

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ROSÂNGELA BASSO TOKARSKI

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA A UTILIZAÇÃO DO REJEITO
PASSIVO DE CARVÃO MINERAL NA CONFECÇÃO DE BLOCOS DE
CONCRETO**

CURITIBA

2022

ROSÂNGELA BASSO TOKARSKI

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA A UTILIZAÇÃO DO REJEITO
PASSIVO DE CARVÃO MINERAL, NA CONFECÇÃO DE BLOCOS DE
CONCRETO**

**Study of the technical feasibility for the use of mineral coal passive
waste in the production of concrete blocks**

Trabalho de Tese apresentado como requisito para
obtenção do título de Doutor em Engenharia civil da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR.
Orientador: Adalberto Matoski.
Coorientador: Wellington Mazer

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ROSANGELA BASSO TOKARSKI

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA A UTILIZAÇÃO DO REJEITO PASSIVO DE CARVÃO
MINERAL NA CONFEÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 25 de Novembro de 2022

Dr. Adalberto Matoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Adauto Jose Miranda De Lima, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Andre Nagalli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Jose Marques Filho, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Rodrigo Cezar Kanning, Doutorado - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (Ifpr)

Dr. Rodrigo Eduardo Catal, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 25/11/2022.

Dedico este trabalho ao meu filho Alexandre e ao meu esposo Ângelo pelo apoio, carinho e pela compreensão nas longas ausências.

AGRADECIMENTOS

A vida é feita de pequenas batalhas. Algumas mais curtas outras mais longas, cada uma com dificuldades e obstáculos a serem superados. Porém nunca realizamos esta jornada sozinhos. Esta é a grande magia da vida, saber ouvir, aceitar e assimilar o conhecimento a experiência e a sabedoria que as pessoas tem para nos transmitir. O caminho para chegar até aqui foi cercado de pessoas que acreditaram no meu potencial, que serão citadas aqui. Aquelas que não estiverem nominadas e participaram desta jornada a minha gratidão imensa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adalberto Matoski, por ter acreditado em mim e possibilitado esta oportunidade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Wellington Mazzer, pelas longas discussões e tempo dedicado aos seus orientandos.

A minha família que sempre me deu apoio com incentivo acreditando que eu poderia alcançar meus objetivos.

Aos amigos Marly e Carlos, pessoas dedicadas e determinadas. Sem a sua ajuda com certeza tudo teria sido mais difícil, vocês foram e serão sempre fonte de inspiração para mim. A Patrícia e a Lenir que embora distantes estão sempre torcendo por mim.

Aos técnicos de laboratório: Felipe sempre disposto ajudar, realizando ensaios ajudando orientando em todas atividades de laboratório, e o Alexandre, por sua disponibilidade, em realizar as análises necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. Meu muito obrigada aos demais servidores da UTFPR.

IFSC-Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia de Santa Catarina, onde sou professora, pelo apoio com afastamento integral durante a realização do doutorado.

UTFPR- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade de desenvolver minha pesquisa.

NPT - Núcleo de Pesquisas Tecnológicas-Laboratórios de Materiais-UTFPR.

ACMCM - no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR.

LAMAQ – Laboratório Multiusuários de Análises Químicas da UTFPR.

SATC -Associação Beneficente Da Indústria Carbonífera De Santa Catarina.

LAEC – Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão, da SATC Criciúma-SC.

Viver é enfrentar desafios. Quem nunca enfrentou desafios, apenas passou pela vida, não viveu.

(AUGUSTO BRANCO)

RESUMO

A preservação do meio ambiente é uma prioridade para que se ofereça uma vida com dignidade para a humanidade e suas gerações futuras. A agressão causada pela retirada de minérios e produtos naturais para serem destinados a diversos fins de consumo é uma realidade. A indústria da construção civil contribui de várias formas com a degradação, e uma delas é a fabricação do cimento. A indústria da mineração de carvão também contribui com os depósitos de rejeitos no entorno das carboníferas. Porém atualmente, 38,5% da energia consumida no mundo vem do carvão mineral, cujas reservas existentes tem capacidade para suprir mais 190 anos no ritmo atual de extração e consumo. No Brasil as reservas de carvão mineral estão localizadas na região Sul. A extração do carvão descarta como rejeito em torno de 60% a 70% do total retirado da mina, 4,7 mil toneladas por ano ficam em forma de rejeitos, gerando assim um enorme passivo ambiental. O objetivo desta pesquisa é estudar a viabilidade técnica de produção de blocos de concreto substituindo parte do cimento pelo rejeito passivo de carvão mineral (RPCM) para ser utilizados na construção civil, diminuindo assim o passivo ambiental causado pelo rejeito e pela fabricação do cimento. A metodologia da pesquisa foi dividida em três fases, a fase 1 utilizou quatro tipos de cimentos: CP IV 32- RS, CP V-ARI, CP II-Z-32, CP II-F-32, testando a compatibilidade dos mesmos com o cimento em porcentagens de 5% e 10% de RPCM substituindo o cimento no traço do concreto, determinando assim o cimento a ser utilizado nas fases 2 e 3 da pesquisa. O cimento CP II-Z-32 foi o que apresentou a melhor compatibilidade com o rejeito. Na fase 2 da pesquisa foram usadas três porcentagens diferentes de RPCM, 10%, 20%, 30% de RPCM substituindo o cimento no traço do concreto, e o traço de referência, submetidos a tempos de cura diferentes, 28, 60, 90 e 365 dias. Após a cura foram submetidos a ensaios físicos, mecânicos, análise química por FRX, análise mineralógica por DRX, análise da microestrutura do concreto pelo MEV, testes de lixiviação e solubilização. Ensaio de durabilidade: análise de envelhecimento acelerado na câmara de climatização, câmara de carbonatação e ataque interno por sulfatos. Os resultados indicaram que substituir 30% do cimento por rejeito passivo de carvão mineral no concreto para moldagem dos blocos atende as especificações da norma. Na fase 3 foram moldados os blocos, cuja caracterização resultou em blocos com 30% de rejeito passivo de carvão mineral com resistência a compressão de 5,61 MPa, permitido para blocos estruturais em edificações de até 5 pavimentos.

Palavras chave: carvão mineral; rejeito; concreto; bloco; durabilidade;

ABSTRACT

The preservation of the environment is a priority in order to offer life with dignity for humanity and its future generations. The aggression caused by the removal of ores and natural products to be destined for various consumption purposes is a reality. The construction industry contributes in several ways to this degradation, and one of them is the manufacture of cement. The coal mining industry also contributes to the environmental damage and one of the ways it happens is the tailings deposits around the coal mines. Nowadays, 38.5% of the energy consumed in the world comes from coal, whose existing reserves have the capacity to supply another 190 years at the current rate of extraction and consumption. In Brazil, mineral coal reserves are located in the South region. The extraction of coal discards around 60% to 70% of the total removed from the mine as tailings. 4,700 tons are discarded in the form of tailings per year, thus generating an enormous environmental liability. The objective of this research is to study the technical feasibility of producing concrete blocks by replacing part of the cement with mineral coal passive waste (MCPW) to be used in civil construction, thus reducing the environmental liability caused by the waste as well as by the manufacturing of cement. The research methodology was divided into three phases, phase 1 used four types of cement: CP IV 32-RS, CP V-ARI, CP II-Z-32, CP II-F-32, testing their compatibility with the cement in percentages of 5% and 10% of MCPW replacing the cement in the concrete mix, thus determining the cement to be used in phases 2 and 3 of the research. The CP II-Z-32 cement showed the best compatibility with the tailings. In phase 2 of the research, three different percentages of MCPW were used, 10%, 20%, 30% of RPCM replacing the cement in the concrete mix, and the reference mix, submitted to different curing times, 28, 60, 90 and 365 days. After curing, they were subjected to physical and mechanical tests, chemical analysis by XRF, mineralogical analysis by XRD, analysis of concrete microstructure by SEM, leaching and solubilization tests. Durability tests: analysis of accelerated aging in the acclimatization chamber, carbonation chamber and internal attack by sulfates. The results indicated that replacing 30% of the cement with passive mineral coal waste in the concrete for molding the blocks meets the specifications of the standard. In phase 3, the blocks were molded, the characterization resulted in blocks with 30% of mineral coal tailings with compressive strength of 5.61 MPa, which is allowed for structural blocks used in buildings of up to 5 floors.

Keywords: mineral coal; tailings; concrete; block; durability;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Acoplamento bibliográfico por países gerados pelo software VOSviewer.....	35
Figura 2 - Interligações de citações entre autores pelo software VOSviewer	36
Figura 3 - Diferentes tipos de carvão extraídos da natureza	38
Figura 4 - Formação estratificada do carvão	38
Figura 5 - Tipos de carvões mineral e seus principais usos	40
Figura 6 - Reservas mundiais de carvão mineral	42
Figura 7 - Cinturão carvoeiro no Brasil	43
Figura 8 - Diagrama de Pourbaix	59
Figura 9 - Gráfico de Canovas.....	60
Figura 10 - Identificação geométrica do bloco	68
Figura 11 - Bloco canaleta	69
Figura 12 - Bloco compensador.....	69
Figura 13 - Fluxograma da pesquisa	72
Figura 14 - Consistômetro de VeBe.....	85
Figura 15 - Fluxograma dos ensaios realizados na fase 2.....	88
Figura 16 - Fluxograma para obtenção do extrato lixiviado	98
Figura 17 - Difratoograma de Raios-X do RPCM.....	109
Figura 18 - Difratoograma de Raios-X do traço TR aos 28 dias de cura.....	172
Figura 19 - Difratoograma de Raios-X do traço T10 aos 28 dias de cura	173
Figura 20 - Difratoograma de Raios-X do traço T20 aos 28 dias de cura	174
Figura 21 - Difratoograma de Raios-X do traço T30 aos 28 dias de cura	175
Figura 22 - Difratoograma de Raios-X do traço TR após o tratamento de carbonatação	176
Figura 23 - Difratoograma de Raios-X do traço T10 após o tratamento de carbonatação	177
Figura 24 - Difratoograma de Raios-X do traço T20 após o tratamento de carbonatação	178
Figura 25 - Difratoograma de Raios-X do traço T30 após o tratamento de carbonatação	179
Figura 26 - Difratoograma de Raios-X do traço TR após o tratamento de EA....	180
Figura 27 - Difratoograma de Raios-X do traço T10 após o tratamento de EA ..	181
Figura 28 - Difratoograma de Raios-X do traço T20 após o tratamento de EA ..	182
Figura 29 - Difratoograma de Raios-X do traço T30 após o tratamento de EA ..	183
Figura 30 - Difratoograma de Raios-X do traço TR após o ensaio de AIS.....	184
Figura 31 - Difratoograma de Raios-X do traço T10 após o ensaio de AIS	185
Figura 32 - Difratoograma de Raios-X do traço T20 após o ensaio de AIS	186
Figura 33 - Difratoograma de Raios-X do traço T30 após o ensaio de AIS	187
Figura 34 - Difratoograma de Raios-X dos blocos BR e B30	225

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Extração e processamento de carvão mineral em atividade	28
Fotografia 2 - Início da DAM em um depósito de rejeito de carvão mineral	31
Fotografia 3 - Comunidade formada sobre o depósito de rejeitos	32
Fotografia 4 - Projeto de recuperação de área verde	32
Fotografia 5 - Contaminação pela DAM na rede hídrica da região estudada	46
Fotografia 6 - Pirita encapsulada no carvão mineral.....	49
Fotografia 7 - Local e forma de coleta do material	74
Fotografia 8 - Moinhos utilizados na preparação do material	75
Fotografia 9 - Material no processo de preparação para uso.....	75
Fotografia 10 - Câmara de carbonatação	91
Fotografia 11 - Marcação dos corpos de prova para a medição	94
Fotografia 12 - Corpos de prova embalados.....	94
Fotografia 13 - Aparelho usado para lixiviação de monolitos	96
Fotografia 14 - Corpos de prova sendo ensaiados	97
Fotografia 15 - Agitador para obtenção do extrato lixiviado	97
Fotografia 16 - Extrato lixiviado	99
Fotografia 17 - Material em repouso para a obtenção do extrato solubilizado	100
Fotografia 18 - Extrato solubilizado.....	101
Fotografia 19 - Moldagem dos blocos de concreto	105
Fotografia 20 - Imagens de MEV e EDS do RPCM	112
Fotografia 21 - Ensaio VeBe, tronco cone moldado e adensado	130
Fotografia 22 - Teste com fenolftaleína para a leitura da profundidade de carbonatação	142
Fotografia 23 - Corpos de prova após o envelhecimento acelerado na câmara de climatização.....	144
Fotografia 24 - Corpos de prova antes do ataque interno por sulfatos.....	163
Fotografia 25 - Corpos de prova do traço TR após o ataque interno por sulfatos	164
Fotografia 26 - Corpos de prova do traço T10 após o ataque interno por sulfatos.....	165
Fotografia 27 - Corpos de prova do traço T20 após o ataque interno por sulfatos.....	165
Fotografia 28 - Corpos de prova do traço T30 após o ataque interno por sulfatos.....	166
Fotografia 29 - Material sólido do lixiviado dos monolitos.....	167
Fotografia 30 - Corpos de prova após a lixiviação de monolitos.....	168
Fotografia 31 - Imagens dos traços TR, T10, T20 e T30 realizadas pelo MEV para 28 dias de cura	188
Fotografia 32 - Imagens dos traços TR, T10, T20 e T30, cura de vinte e oito dias	189
Fotografia 33 - Pontos da análise química por EDS do traço TR com 28 dias de cura.....	190
Fotografia 34 - Pontos da análise química por EDS do traço T10 com 28 dias de cura.....	191
Fotografia 35 - Pontos da análise química por EDS do traço T20 com 28 dias de cura.....	192

Fotografia 36 - Pontos da análise química por EDS do traço T30 com 28 dias de cura.....	193
Fotografia 37 - Imagens dos traços TR, T10, T20 e T30 realizadas pelo MEV para o tratamento da câmara de carbonatação	194
Fotografia 38 - Fotografias com ampliação dos traços TR, T10, T20 e T30, submetidas a câmara de carbonatação.....	195
Fotografia 39 - Pontos da análise química por EDS do traço TR, submetido a câmara de carbonatação	196
Fotografia 40 - Pontos da análise química por EDS do traço T10, submetidos a câmara de carbonatação	197
Fotografia 41 - Pontos da análise química por EDS do traço T20, submetido a câmara de carbonatação	198
Fotografia 42 - Pontos da análise química por EDS do traço T30, submetidos a câmara de carbonatação	199
Fotografia 43 - Imagens dos traços TR, T10, T20 e T30 realizadas pelo MEV para o tratamento de EA	200
Fotografia 44 - Fotografias com ampliação dos traços TR, T10, T20 e T30, submetidas a tratamento de EA.....	201
Fotografia 45 - Pontos da análise química por EDS do traço TR submetido ao tratamento de EA.....	202
Fotografia 46 - Pontos da análise química por EDS do traço T10 submetido ao tratamento de EA.....	203
Fotografia 47 - Pontos da análise química por EDS do traço T20 submetido ao tratamento de EA.....	204
Fotografia 48 - Pontos da análise química por EDS do traço T30, submetido ao tratamento de EA.....	205
Fotografia 49 - Imagens dos traços TR, T10, T20, T30 realizadas pelo MEV para o ensaio de AIS.....	206
Fotografia 50 - Fotografias com ampliação dos traços TR, T10, T20 e T30, submetidas ao ensaio de AIS.....	207
Fotografia 51 - Pontos da análise química por EDS do traço TR, submetidos ao ensaio de AIS.....	208
Fotografia 52 - Pontos da análise química por EDS do traço T10, submetido ao ensaio de AIS.....	209
Fotografia 53 - - Pontos da análise química por EDS do traço T20, submetidos ao ensaio de AIS.....	210
Fotografia 54 - Pontos da análise química por EDS do traço T30, submetido ao ensaio de AIS.....	211
Fotografia 55 - imagens do MEV para os blocos BR e B30	226
Fotografia 56 - Pontos analisados pelo EDS para o bloco BR	227
Fotografia 57 - Pontos analisados pelo EDS para o bloco B30.....	228

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição química do carvão mineral	39
Gráfico 2 - Índices do interior da câmara de carbonatação.....	91
Gráfico 3 - Temperatura mínima, média e máxima mensal (2011-2021)	92
Gráfico 4 - Médias de temperatura mínima, média e máxima anuais (2011-2021)	92
Gráfico 5 - Curva granulométrica do RPCM.....	108
Gráfico 6 - Curva granulométrica da areia	114
Gráfico 7 - Curva granulométrica da brita.....	114
Gráfico 8 - Teores de SiO ₂ para o RPCM, cimentos e composições.....	117
Gráfico 9 - Teores de SO ₃ para o RPCM, cimentos e composições	118
Gráfico 10 - Teores de Fe ₂ O ₃ para o RPCM, cimentos e composições.....	119
Gráfico 11 - Teores de Al ₂ O ₃ para RPCM, cimentos e composições	120
Gráfico 12 - Teores de CaO para RPCM, cimentos e composições.....	121
Gráfico 13 - Absorção de água.....	123
Gráfico 14 - Resistência a compressão.....	124
Gráfico 15- Massa específica X Teor de Ar do concreto fresco	128
Gráfico 16 - Massas específicas do concreto endurecido.....	131
Gráfico 17 - Densidade de massa X Índice de vazios do concreto endurecido	132
Gráfico 18 - Absorção por imersão.....	133
Gráfico 19 - Resistência a compressão.....	135
Gráfico 20 - Comparação da resistência a compressão com e sem aplicação de secagem prévia a 100°C.....	136
Gráfico 21 - Porosidade antes e após o tratamento na câmara de carbonatação	138
Gráfico 22 - Linha de tendência da perda de peso em função do aumento de RPCM.....	139
Gráfico 23 - Resistência à tração pela compressão X Perda de peso	140
Gráfico 24 - Profundidade de carbonatação em função da quantidade de RPCM	143
Gráfico 25 - Volume X peso dos corpos de prova antes e depois do envelhecimento acelerado.....	145
Gráfico 26 - Linha de tendência do volume antes e após o envelhecimento acelerado.....	147
Gráfico 27 - Linha de tendência do peso antes e após o envelhecimento acelerado.....	148
Gráfico 28 - Porosidade antes e após o envelhecimento acelerado.....	149
Gráfico 29 - Absorção antes e após o envelhecimento acelerado.....	150
Gráfico 30 - Resistência a compressão antes e após o envelhecimento acelerado.....	151
Gráfico 31 - Variação semanal de volume dos corpos de prova do traço TR..	153
Gráfico 32 - Variação semanal de volume dos corpos de prova do traço T10	154
Gráfico 33 - Variação semanal de volume dos corpos de prova do traço T20	155
Gráfico 34 - Variação semanal de volume dos corpos de prova do traço T30	155
Gráfico 35 - Variação nas médias dos volumes dos corpos de prova	156
Gráfico 36 - Variação semanal de peso dos corpos de prova do traço TR.....	157
Gráfico 37 - Variação semanal de peso dos corpos de prova do traço T10.....	158

Gráfico 38 - Variação semanal de peso dos corpos de prova do traço T20.....	159
Gráfico 39 - Variação semanal de peso dos corpos de prova do traço T30.....	159
Gráfico 40 - Variação nas médias dos pesos dos corpos de prova.....	160
Gráfico 41 - Resistência a compressão antes e após o AIS	161
Gráfico 42 - Porosidade para o concreto antes e após o AIS.....	163
Gráfico 43 - Teores de SiO ₂ dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX	213
Gráfico 44 - Teores de CaO dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX	214
Gráfico 45 - Teores de Al ₂ O ₃ dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX	215
Gráfico 46 - Teores de SO ₃ dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX	216
Gráfico 47 - Teores de Fe ₂ O ₃ dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX	217
Gráfico 48 - Teores de K ₂ O dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX	218
Gráfico 49 - Teores de TiO ₂ dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX	219
Gráfico 50 - Massa específica X Teor de ar incorporado	221
Gráfico 51 - FRX para os blocos BR e B30, rejeito e cimento	229
Gráfico 52 - Gráfico de peso x volume antes e após o EA do traço TR.....	264
Gráfico 53 - Gráfico de peso x volume antes e após o EA do traço T10	264
Gráfico 54 - Gráfico de peso x volume antes e após o EA do traço T20	265
Gráfico 55 - Gráfico de peso x volume antes e após o EA do traço T30	265

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pesquisas relacionadas a ação prejudicial da DAM.....	47
Quadro 2 - Análises imediatas do RPCM	77
Quadro 3 - Ensaio de caracterização dos agregados	79
Quadro 4 - Quantidade de corpos de prova destinados aos ensaios nas datas de cura.....	87
Quadro 5 - Métodos para a análise do extrato lixiviado.....	99
Quadro 6 - Método para análise do extrato solubilizado	101
Quadro 7 - Siglas para gráficos	212

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do carvão mineral	37
Tabela 2 - Total de carvão mineral extraído no Brasil em 2020.....	43
Tabela 3 - Consumo de carvão mineral no Brasil em 2020 em (t).....	44
Tabela 4 - Famílias de blocos.....	70
Tabela 5 - Composição dos corpos de prova da fase 1	82
Tabela 6 - Classificação do Grau VeBe segundo a EN 12350-3	85
Tabela 7 - Consistência do concreto segundo a ACI 211-3R-02	86
Tabela 8 - Médias das temperaturas e umidades relativas das estações do ano (2011-2021).....	93
Tabela 9 - Sugestões para relação agregado/cimento em concreto seco.....	103
Tabela 10 - Análises imediatas do rejeito passivo de carvão mineral-RPCM ..	106
Tabela 11 - Composição granulométrica do RPCM.....	107
Tabela 12 - Análise de FRX do RPCM.....	110
Tabela 13 - Composição química da fotografia 20d e 20e do RPCM pelo método EDS (%)	113
Tabela 14 - Índices físicos para os agregados	115
Tabela 15 - Limites do módulo de finura da areia NBR 7211 (2019).....	115
Tabela 16 - Análise química dos materiais e composições.....	116
Tabela 17 - Absorção para artefatos de cimento.....	124
Tabela 18 - Índices físicos do concreto fresco	127
Tabela 19 - Resumo da classificação da consistência dos concretos frescos	128
Tabela 20 - Resultados do teste VeBe para o concreto fresco	129
Tabela 21 - índice de trabalhabilidade dos concretos.....	129
Tabela 22 - Massa específica conforme a NBR 8953 (2015)	131
Tabela 23 - Metais pesados detectados no extrato lixiviado da lixiviação dos monolitos	166
Tabela 24 - Perda de massa dos corpos de prova durante o processo de lixiviação de monolitos.....	168
Tabela 25 - Resultados da lixiviação conforme a NBR 10005 (2004)	169
Tabela 26 - Comparação dos resultados: lixiviação de monolitos e lixiviação NBR 10005 (2004)	170
Tabela 27 - Resultados da análise do extrato solubilizado	171
Tabela 28 - Composição química para o traço TR aos 28 dias de cura, realizada por EDS.....	190
Tabela 29 - Composição química para o traço T10 aos 28 dias de cura, realizada por EDS.....	191
Tabela 30 - Composição química para o traço T20 aos 28 dias de cura, realizada por EDS.....	192
Tabela 31 - Composição química para o traço T30 aos 28 dias de cura, realizada por EDS.....	193
Tabela 32 - Composição química para o traço TR submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS.....	196
Tabela 33 - Composição química para o traço T10, submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS.....	197
Tabela 34 - Composição química para o traço T20, submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS.....	198

Tabela 35 - Composição química para o traço T30 submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS.....	199
Tabela 36 - Composição química do TR submetido ao tratamento de EA realizada por EDS.....	202
Tabela 37 - Composição química para o T10 submetido ao tratamento de EA, realizada por EDS.....	203
Tabela 38 - Composição química para o T20 submetido ao tratamento de EA, realizada por EDS.....	204
Tabela 39 - Composição química para o T30 submetido ao tratamento de EA, realizada por EDS.....	205
Tabela 40 - Composição química para o traço TR submetido ao ensaio de AIS, realizada por EDS.....	208
Tabela 41 - Composição química para o traço T10 submetido ao ensaio de AISS, realizada por EDS.....	209
Tabela 42 - Composição química para o traço T20 submetido ao ensaio de AIS, realizada por EDS.....	210
Tabela 43 - Pontos da análise química por EDS do traço T30, submetido ao ensaio de AIS.....	211
Tabela 44 - Índices físicos do concreto fresco com os traços dos blocos.....	220
Tabela 45 - Índice de consistência e índice de trabalhabilidade do concreto fresco.....	222
Tabela 46 - Áreas dos blocos.....	222
Tabela 47 - Absorção dos blocos.....	223
Tabela 48 - Resistência a compressão dos blocos.....	224
Tabela 49 - Índice de porosidade dos blocos.....	224
Tabela 50 - Análise do EDS para o bloco BR.....	227
Tabela 51 - Análise do EDS para o bloco B30.....	228
Tabela 52 - Granulometria, percentagens retidas acumuladas da areia lavada ..	247
Tabela 53 - Granulometria e porcentagens retidas acumuladas da brita.....	247
Tabela 54 - Dados da absorção dos corpos de prova de referência da fase 1	248
Tabela 55 - Dados da absorção dos corpos de prova do traço T5 da fase 1 ...	248
Tabela 56 - Dados da absorção dos corpos de prova do traço T10 da fase 1 .	249
Tabela 57 - Resistência a compressão do traço de referência (TR)	249
Tabela 58 - Resistência a compressão do traço T5.....	249
Tabela 59 - Resistência a compressão do traço T10.....	250
Tabela 60 - Volume dos corpos de prova com cura de 28 dias.....	252
Tabela 61 - Absorção dos corpos de prova com cura de 28 dias	253
Tabela 62 - Índice de vazios dos corpos de prova com cura de 28 dias	254
Tabela 63 - Massa específica seca dos corpos de prova com cura de 28 dias	255
Tabela 64 - Massa específica saturada dos corpos de prova com cura de 28 dias	256
Tabela 65 - Massa específica real dos corpos de prova com cura de 28 dias .	257
Tabela 66 - Esforços de resistência a compressão com e sem ensaio de absorção	258
Tabela 67 - Absorção dos corpos de prova com cura de 60 dias	258
Tabela 68 - Resistência a compressão dos corpos de prova com cura de 60 dias	259
Tabela 69 - Absorção dos corpos de prova com cura de 90 dias	259
Tabela 70 - Resistência a compressão dos corpos de prova com cura de 90 dias	260

Tabela 71 - Absorção dos corpos de prova com cura de 365 dias	260
Tabela 72 - Resistência a compressão dos corpos de prova com cura de 365 dias	261
Tabela 73 - Perda de peso e umidade dos corpos de prova carbonatados	261
Tabela 74 - Profundidade carbonatação do traço TR.....	262
Tabela 75 - Profundidade carbonatação do traço T10	262
Tabela 76 - Esforços de rompimento (MPa)	263
Tabela 77 - Volume dos corpos de prova antes e após EA	263
Tabela 78 - Peso dos corpos de prova antes e após envelhecimento acelerado	264
Tabela 79 - Absorção dos corpos de prova após tratamento de EA	265
Tabela 80 - Resistência a compressão dos corpos de prova em (MPa), após o tratamento EA.....	266
Tabela 81 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 1 e 2).....	266
Tabela 82 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 3 e 4).....	267
Tabela 83 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 5 e 6).....	267
Tabela 84 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 7 e 8).....	268
Tabela 85 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 9 e 10).....	268
Tabela 86 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 11 e 12).....	269
Tabela 87 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 13 e 14).....	269
Tabela 88 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 15 e 16).....	270
Tabela 89 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 17 e 18).....	270
Tabela 90 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 19 e 20).....	271
Tabela 91 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 21 e 22).....	271
Tabela 92 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 23 e 24).....	272
Tabela 93 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semana 25).....	272
Tabela 94 - Perdas e ganhos de volume máximo e mínimo durante o processo de AIS	273
Tabela 95 - Perdas e ganhos de peso máximo e mínimo durante o processo de AIS	274
Tabela 96 - Resistência a compressão após o tratamento de AIS	274
Tabela 97- Análise da Anova para absorção.....	276
Tabela 98 - Teste de Tukey para a absorção.....	276
Tabela 99 - Análise Anova para resistência a compressão	276
Tabela 100 - Teste de Tukey para resistência a compressão.....	276
Tabela 101- Análise ANOVA para massas específicas do concreto endurecido	278

Tabela 102 - Análise da ANOVA para as densidades do concreto endurecido	278
Tabela 103 - Teste de Tukey para as densidades do concreto endurecido	278
Tabela 104 - Análise da ANOVA para absorção por imersão dos traços TR, T10, T20 e T30. Nas datas de cura de 28, 60, 90 e 365 dias	278
Tabela 105 - Análise da ANOVA para resistência a compressão dos traços TR, T10, T20 e T30. Nas datas de cura de 28, 60, 90 e 365 dias	278
Tabela 106 - Teste de Tukey para o concreto endurecido com cura de 28 dias	278
Tabela 107 - Teste de Tukey para o concreto endurecido com cura de 60 dias	279
Tabela 108 - - Teste de Tukey para o concreto endurecido com cura de 90 dias	279
Tabela 109 - Teste de Tukey para o concreto endurecido com cura de 365 dias	279
Tabela 110 - Análise ANOVA para comparação de resistência a compressão de amostra com cura de 28 dias submetidas e não submetidas a secagem por temperatura de 100°C	279
Tabela 111 - Análise ANOVA para comparação de resistência a compressão de amostra com cura de 365 dias submetidas e não submetidas a secagem por temperatura de 100°C	279
Tabela 112 - Teste de Tukey para resistência a compressão aos 365 dias de cura com e sem secagem a 100°C	279
Tabela 113 - Análise da ANOVA para o índice de porosidade na carbonatação	280
Tabela 114 - Análise da ANOVA para as médias da perda de peso na carbonatação	280
Tabela 115 - Teste de Tukey para as amostras perda de peso da carbonatação	280
Tabela 116 - Análise da ANOVA para os esforços de resistência à tração por compressão	280
Tabela 117 - Teste de Tukey para a resistência a tração por compressão na carbonatação	280
Tabela 118 - Análise ANOVA das médias dos volumes dos corpos de prova após o EA	280
Tabela 119 - Teste de Tukey para o volume dos corpos de prova após o EA	281
Tabela 120 - Teste Tukey para o volume dos corpos de prova antes e após o EA	281
Tabela 121 - Análise ANOVA para as médias dos pesos dos corpos de prova após o EA	281
Tabela 122 - Teste Tukey para o peso dos corpos de prova após O EA	281
Tabela 123 - Teste Tukey para o peso dos corpos de prova antes e após O EA	282
Tabela 124 - Análise ANOVA fator duplo sem repetição para porosidade no EA	282
Tabela 125 - Análise ANOVA para a absorção antes e após o EA	282
Tabela 126 - Teste de Tukey para a absorção antes e após o EA	282
Tabela 127 - Análise da ANOVA para resistência a compressão antes e após o EA	283
Tabela 128 - Teste de Tukey para a resistência a compressão antes e após o EA	283

Tabela 129 - Análise das variações volumétricas entre semanas para o traço TR	283
Tabela 130 - Análise das variações volumétricas entre semanas para o traço T10	283
Tabela 131 - Análise das variações volumétricas entre semanas para o traço T20	284
Tabela 132 - Análise das variações volumétricas entre semanas para o traço T30	284
Tabela 133 - Análise ANOVA para as médias das variações volumétricas dos corpos de prova no ensaio de ataque interno por sulfatos.....	284
Tabela 134 - Análise da ANOVA para as variações de peso do traço TR.....	284
Tabela 135 - Análise da ANOVA para as variações de peso do traço T10	284
Tabela 136 - Análise da ANOVA para as variações de peso do traço T20	284
Tabela 137 - Análise da ANOVA para as variações de peso do traço T30	285
Tabela 138 - Análise ANOVA para as médias de redução e aumento dos pesos dos corpos de prova no ensaio de ataque interno por sulfatos	285
Tabela 139 - Análise da ANOVA para resistência a compressão antes e após o tratamento de ataque interno por sulfatos.....	285
Tabela 140 - Teste de Tukey para os esforços de resistência a compressão dos corpos de prova antes e após o tratamento de ataque interno por sulfatos ...	285
Tabela 141 - Análise da ANOVA para absorção dos blocos	287
Tabela 142 - Teste de Tukey para absorção dos blocos.....	287
Tabela 143 - Análise da ANOVA para resistência a compressão dos blocos ..	287
Tabela 144 - Teste de Tukey para os esforços de resistência a compressão dos blocos.....	287

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANFOR	Association Française de Normalisation
ABN	Agência Nacional de Mineração
ASTM	American Society for Testing and Materials
CC	Concreto Convencional
CM	Carvão Mineral
CMCM	Centro Multiusuários de Caracterização de Materiais
CWR	Rejeitos de Lavagem de Carvão Mineral
CT	Centro Tecnológico da UTFPR
DACOC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
DAM	Drenagem Acida de Mina
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DIDEM	Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral
DRX	Difratômetro de Raio-X
EN	European Standards
EUA	Estados Unidos da América
EU	União Europeia
FCWR	Concreto com Cinzas Volantes de Carvão Mineral
FRX	Fluorescência de Raio-X
IEA	Internacional Energy Agency
LAMAQ	Laboratório Multiusuários de Análises Químicas da UTFPR.
LAEC	Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão
NPT	Núcleo de Pesquisas Tecnológicas dos Laboratórios de Materiais
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PR	Paraná
RS	Rio Grande do Sul
ROM	Run of Mine
RPCM	Rejeito Passivo de Carvão Mineral
SATC	Associação Beneficente Da Indústria Carbonífera De Santa Catarina
SC	Santa Catarina
SIECE	Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina
UNI	Ente Italiano di Normazione
UR	Umidade Relativa
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

(t)	Tonelada
%	Porcentagem
R\$	Reais
kcal/kg	Quilocalorias por quilos
kg	Quilogramas
m ³	Metros cúbicos
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
h	Horas
µm	Micrometro de milímetros
ρ _a	Massa específica da água
ρ _{ap}	Massa unitária para o agregado seco
d ₁	Massa específica aparente do agregado seco
d ₂	Massa específica do agregado saturado superfície seca
d ₃	Massa específica
v	Volume
a/c	Relação água /cimento
CP's	Corpos de prova
ha	hectares
kg/m ³	Quilogramas por metro cúbico
g/cm ³	Gramas por centímetros cúbicos
mg/l	Miligramas por litro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Objetivos	30
1.1.1	Objetivo geral	30
1.1.2	Objetivos específicos	30
1.2	Justificativa	30
1.3	Estrutura da tese	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	Carvão mineral	36
2.1.1	Carvão mineral no mundo	41
2.1.2	Carvão mineral no Brasil	42
2.2	Rejeito de carvão mineral	45
2.2.1	Rejeito de carvão mineral e sua utilização na construção civil	50
2.3	Durabilidade do concreto	56
2.3.1	Carbonatação	58
2.3.2	Ataque por sulfatos	61
2.3.3	Envelhecimento acelerado – Câmara de climatização	66
2.4	Blocos de concreto	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS	71
3.1	Metodologia da fase 1	73
3.1.1	Rejeito passivo de carvão mineral	73
3.1.2	Cimento	76
3.1.3	Agregados	76
3.1.4	Água	76
3.1.5	Caracterização do rejeito passivo de carvão mineral	76
<u>3.1.5.1</u>	<u>Análises imediatas</u>	<u>76</u>
<u>3.1.5.2</u>	<u>Análise granulométrica</u>	<u>77</u>
<u>3.1.5.3</u>	<u>Atividade pozolânica</u>	<u>77</u>
<u>3.1.5.4</u>	<u>Densidade</u>	<u>77</u>
<u>3.1.5.5</u>	<u>Difração de Raios-X (DRX)</u>	<u>78</u>
<u>3.1.5.6</u>	<u>Fluorescência de Raios-X (FRX)</u>	<u>78</u>
<u>3.1.5.7</u>	<u>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</u>	<u>78</u>
3.1.6	Caracterização do cimento	78
3.1.7	Caracterização dos agregados	79

<u>3.1.7.1</u>	<u>Composição granulométrica.....</u>	<u>79</u>
<u>3.1.7.2</u>	<u>Massa unitária e volume de vazios.....</u>	<u>80</u>
<u>3.1.7.3</u>	<u>Massa específica.....</u>	<u>80</u>
<u>3.1.7.4</u>	<u>Teor de material pulverulento.....</u>	<u>80</u>
3.1.8	Moldagem e caracterização dos corpos de prova	80
<u>3.1.8.1</u>	<u>Caracterização dos corpos de prova.....</u>	<u>82</u>
3.2	Metodologia da fase 2.....	83
3.2.1	Definição do traço.....	84
3.2.2	Caracterização do concreto fresco	84
<u>3.2.2.1</u>	<u>Massa específica do concreto fresco.....</u>	<u>84</u>
<u>3.2.2.2</u>	<u>Consistência do concreto fresco.....</u>	<u>84</u>
3.2.3	Moldagem dos corpos de prova	86
3.2.4	Caracterização do concreto endurecido	89
<u>3.2.4.1</u>	<u>Determinação da absorção por imersão, índice de vazios e massa específica 89</u>	
<u>3.2.4.2</u>	<u>Resistência a compressão simples.....</u>	<u>89</u>
<u>3.2.4.3</u>	<u>Resistência a compressão para os corpos de prova com cura de 28 dias e 365 dias sem serem submetidos ao ensaio de absorção por imersão.....</u>	<u>89</u>
3.2.5	Porosimetria	90
3.2.6	Ensaio de durabilidade do concreto.....	90
<u>3.2.6.1</u>	<u>Câmara de carbonatação.....</u>	<u>90</u>
<u>3.2.6.2</u>	<u>Envelhecimento acelerado – Câmara de climatização.....</u>	<u>91</u>
<u>3.2.6.3</u>	<u>Ataque interno por sulfatos.....</u>	<u>93</u>
3.2.7	Lixiviação.....	95
<u>3.2.7.1</u>	<u>Lixiviação de monolitos.....</u>	<u>95</u>
<u>3.2.7.2</u>	<u>Lixiviação do rejeito passivo de carvão mineral e dos traços de concreto conforme a NBR 10005 (2004).....</u>	<u>97</u>
3.2.8	Solubilização do rejeito passivo de carvão mineral e dos traços de concreto conforme a NBR 10006 (2004).....	100
3.2.9	Análise mineralógica (DRX) e microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	101
3.2.10	Análises químicas (FRX).....	101
3.3	Metodologia da fase 3.....	102
3.3.1	Definição do traço dos blocos.....	102
3.3.2	Caracterização do concreto fresco dos blocos	104
<u>3.3.2.1</u>	<u>Massa específica do concreto fresco dos blocos.....</u>	<u>104</u>
<u>3.3.2.2</u>	<u>consistência do concreto fresco dos blocos.....</u>	<u>104</u>

3.3.3	Moldagem dos blocos de concreto	104
3.3.4	Caracterização dos blocos de concreto.....	105
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	106
4.1	Resultados e discussões da fase 1 da pesquisa.....	106
4.1.1	Resultados das análises do rejeito passivo do carvão mineral.....	106
<u>4.1.1.1</u>	<u>Análises imediatas.....</u>	<u>106</u>
<u>4.1.1.2</u>	<u>Análise granulométrica</u>	<u>107</u>
<u>4.1.1.3</u>	<u>Atividade pozolânica.....</u>	<u>108</u>
<u>4.1.1.4</u>	<u>Densidade</u>	<u>109</u>
<u>4.1.1.5</u>	<u>Difração de Raios-X (DRX).....</u>	<u>109</u>
<u>4.1.1.6</u>	<u>Fluorescência de Raios-X (FRX).....</u>	<u>110</u>
<u>4.1.1.7</u>	<u>Microscopia Eletrônica de Varredura MEV</u>	<u>111</u>
4.1.2	Caracterização dos agregados.....	113
<u>4.1.2.1</u>	<u>Granulometria dos agregados</u>	<u>113</u>
<u>4.1.2.2</u>	<u>Índices físicos dos agregados</u>	<u>115</u>
4.1.3	Caracterização dos corpos de prova	116
<u>4.1.3.1</u>	<u>Análise de FRX.....</u>	<u>116</u>
<u>4.1.3.2</u>	<u>Absorção por imersão</u>	<u>122</u>
<u>4.1.3.3</u>	<u>Resistência a compressão.....</u>	<u>124</u>
4.1.4	Definição do cimento	125
4.2	Resultados e discussões da fase 2 da pesquisa.....	126
4.2.1	Caracterização do concreto fresco	127
<u>4.2.1.1</u>	<u>Massa específica do concreto fresco.</u>	<u>127</u>
<u>4.2.1.2</u>	<u>Consistência do concreto fresco.....</u>	<u>128</u>
4.2.2	Caracterização do concreto endurecido	131
<u>4.2.2.1</u>	<u>Massa específica.....</u>	<u>131</u>
<u>4.2.2.2</u>	<u>Densidade de massa e índice de vazios</u>	<u>132</u>
<u>4.2.2.3</u>	<u>Absorção por imersão</u>	<u>133</u>
<u>4.2.2.4</u>	<u>Resistência a compressão.....</u>	<u>134</u>
<u>4.2.2.5</u>	<u>Resistência a compressão simples para os corpos de prova com cura de 28 e 365 dias, com e sem o tratamento de absorção por imersão.....</u>	<u>136</u>
4.2.3	Durabilidade do concreto endurecido	137
<u>4.2.3.1</u>	<u>Carbonatação.....</u>	<u>137</u>
<u>4.2.3.2</u>	<u>Envelhecimento acelerado – Câmara de climatização</u>	<u>144</u>
<u>4.2.3.3</u>	<u>Ataque interno por sulfatos.....</u>	<u>152</u>

4.2.4	Lixiviação.....	166
4.2.4.1	<u>Lixiviação de monólitos</u>	<u>166</u>
4.2.4.2	<u>Lixiviação do rejeito passivo de carvão mineral e dos traços do concreto segundo a NBR 10005 (2004).....</u>	<u>169</u>
4.2.5	Solubilização do rejeito passivo de carvão mineral e dos traços do concreto segundo a NBR 10006 (2004).....	171
4.2.6	Análise mineralógica – Difractometria de Raios-X (DRX)	171
4.2.6.1	<u>Composição mineralógica dos concretos aos 28 dias de cura.....</u>	<u>172</u>
4.2.6.2	<u>Composição mineralógica dos concretos após o tratamento na câmara de carbonatação.....</u>	<u>175</u>
4.2.6.3	<u>Composição mineralógica dos concretos após o tratamento de envelhecimento acelerado - EA.....</u>	<u>179</u>
4.2.6.4	<u>Composição mineralógica dos concretos após o tratamento de ataque interno por sulfatos - AIS</u>	<u>184</u>
4.2.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Espectroscopia por dispersão de elétrons (EDS).....	187
4.2.7.1	<u>Análise de MEV e EDS para os traços submetidos a cura por vinte e oito dias</u>	<u>188</u>
4.2.7.2	<u>Análise de MEV e EDS para os traços submetidos ao tratamento na câmara de carbonatação.....</u>	<u>194</u>
4.2.7.3	<u>Análise de MEV e EDS para os traços submetidos ao envelhecimento acelerado-EA na câmara de climatização</u>	<u>200</u>
4.2.7.4	<u>Análise de MEV e EDS para os traços submetidos ao ensaio de ataque interno por sulfatos - AIS</u>	<u>206</u>
4.2.8	Fluorescência de Raios-X (FRX).....	212
4.2.9	Definição da porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral para os blocos	219
4.3	Resultados da fase 3 - Blocos de concreto.....	219
4.3.1	Caracterização do concreto fresco executado no traço dos blocos.....	220
4.3.1.1	<u>Massa específica do concreto fresco</u>	<u>220</u>
4.3.1.2	<u>Consistência do concreto fresco.....</u>	<u>221</u>
4.3.2	Caracterização física e mecânica dos blocos de concreto	222
4.3.2.1	<u>Absorção e área líquida.....</u>	<u>222</u>
4.3.2.2	<u>Resistência a compressão dos blocos</u>	<u>223</u>
4.3.3	Índice de porosidade	224
4.3.4	Difractometria de Raios-X (DRX)	225
4.3.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Espectroscopia por dispersão de elétrons (EDS).....	226
4.3.6	Fluorescência de Raios-X (FRX).....	229

5	CONCLUSÕES	231
	RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	234
	REFERÊNCIAS	235
	APÊNDICE A - DADOS DA FASE 1 DA PESQUISA	246
	APÊNDICE B - DADOS DA FASE 2 DA PESQUISA	251
	APÊNDICE C - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DA FASE 1 DA PESQUISA	275
	APÊNDICE D TRATAMENTO ESTATÍSTICO DA FASE 2 DA PESQUISA	277
	APÊNDICE E – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DA FASE 3 DA PESQUISA.....	286
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DOS CIMENTOS FORNECIDA PELO FABRICANTE	288

1 INTRODUÇÃO

O meio ambiente e sua preservação é uma preocupação que envolve a população mundial, fazendo com que todos se voltem a necessidade de conservação do planeta, e da tomada de medidas que façam com que a realidade da poluição e da degradação ocorridas sejam contidas, e medidas sejam adotadas no sentido da retomada de atitudes que solucionem os prejuízos causados até o momento.

Dos fatores causadores desta poluição os resíduos e rejeitos são o motivo de grande impacto ambiental, com poluição das redes hídricas e produção de gases tóxicos, aumentando assim o efeito estufa.

É importante separar rejeitos de resíduos, pois cada um terá que ser tratado de forma específica. Segundo a Lei 12.305/2010, resíduo sólido: “é todo aquele material, substância, objeto ou bem descartado, resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos, ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível”.

A mesma lei define rejeitos como: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”. Ainda segundo (CHAVES, 2013) a definição de rejeito na mineralogia é: “rochas ou minerais inaproveitáveis presentes no minério e que são separados deste, total ou parcialmente, durante o beneficiamento”. Em sua grande maioria os rejeitos são separados por não possuir o padrão exigido para a comercialização.

Entre estes rejeitos estão os rejeitos de carvão mineral. O carvão mineral é o combustível fóssil que possui a maior reserva mundial, estimada em cerca de um trilhão de toneladas, que suprem 190 anos a demanda atual de consumo desse minério. As reservas são encontradas em todos os continentes e em mais de 50 países, sendo que as maiores quantidades se encontram nos EUA, China, Rússia e Índia, é o combustível fóssil mais utilizado, pois possui facilidades de extração e poucos entraves geopolíticos para comercialização (IEA, 2016).

A atividade da mina de carvão é criticada por seu impacto ambiental prejudicial e especialmente pela grande quantidade de rejeitos produzidos durante a mineração e processamento do carvão. No entanto o carvão é uma das fontes de energia fóssil que vem sendo utilizada por séculos, desde a ‘Revolução Industrial”, para impulsionar a economia de vários países. Desde então, os governos perceberam que o uso de carvão foi a chave para a industrialização e, conseqüentemente, as minas foram muito desenvolvidas (TAHA *et al*, 2017).

A produção atual de rejeitos sólidos de carvão, que resulta do descarte durante a produção do carvão chega a centenas ou milhões de toneladas. Uma grande quantidade deste rejeito é armazenada ao longo no entorno das minas ou das regiões onde está acontecendo a mineração, acumulando um passivo ambiental que pode destruir o equilíbrio ecológico da região.

O maior consumidor de carvão do mundo atualmente, a China, estuda projetos de revitalização de áreas de depósitos de rejeitos de carvão com parques verdes de vegetação rasteira, bem como processos limpos de extração de carvão com tecnologias avançadas de lavagem e separação do carvão vendável dos rejeitos.

Conforme (FAN; ZHANG; WANG; 2014), 4,5 bilhões de toneladas de rejeito são armazenados em centenas de lixões. Isso atinge 2100 “condados” que pode chegar, em 1600 pilhas ocupando mais de 15.000 ha de terra, e este acúmulo continua aumentando em torno de 1,5 a 2,0 milhões de toneladas por ano na China (ZHOU *et al.*, 2019). Estes empilhamentos de rejeitos podem trazer várias conseqüências como: combustão espontânea, desmoronamento por erosão, a DAM-Drenagem Ácida de Minas, a chuva ácida na região do depósito, etc.

No Brasil a mineração do carvão ocorre desde 1790, foi ela que impulsionou a economia sul catarinense e ainda hoje é considerado um setor de peso na economia da região. Existem municípios que empregam em torno de 25% da sua mão de obra na indústria carvoeira. Segundo a ABCM-Associação Brasileira de Carvão Mineral, o setor do carvão mineral representa 1,5% da matriz energética do país, com perspectivas de crescimento em função das termoeletricas (ZANCAN, 2019). O governo brasileiro incentiva a mineração de carvão, pois segundo o Ministério de Minas e Energia as termoeletricas serão fundamentais na produção de energia no Brasil no mínimo por 20 anos.

Conforme Amaral Filho *et al.* (2013), até a década de 2010 existia no Brasil 300 milhões de toneladas de rejeito acumulada em pilhas de depósitos. Isto

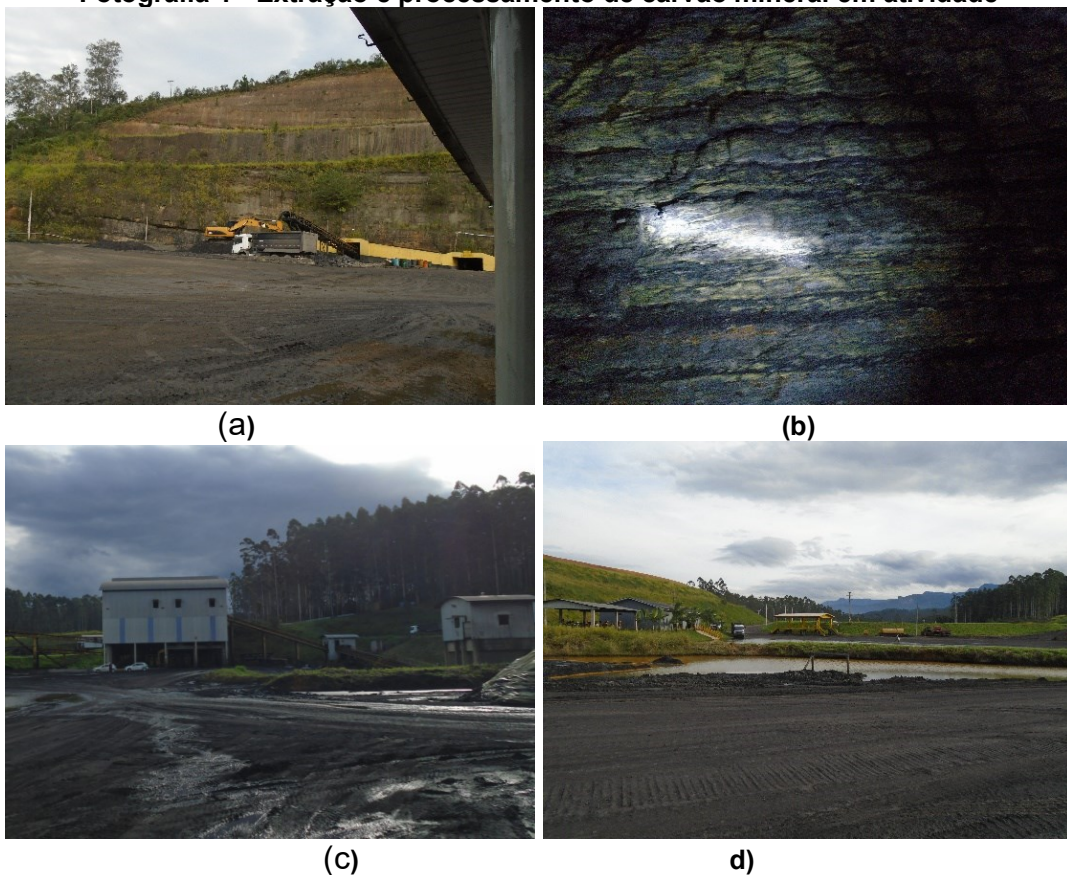
demonstra que historicamente a mineração do carvão tem causado danos ao meio ambiente. Em 1970 com as leis ambientais em vigor esperava-se uma redução do passivo ambiental causado pela mineração do carvão, porém isto não ocorreu.

Em 1993 o Ministério Público Federal propõe Ação Civil Pública com o objetivo de obrigar as mineradoras a recuperar suas áreas de depósito de passivos, ou seja, rejeitos abandonados a anos na região (BRASIL, 2008).

Em 2005 o Ministério Público propõe Termo de Ajuste de Conduta para as mineradoras, dando um prazo de 5 anos, até 2010 para que as mineradoras se adequassem as normas ambientais vigentes. Três empresas foram fechadas por não conseguir se enquadrar as exigências da lei (BRASIL, 2010).

Nas fotografias 1a, 1b, 1c, 1d, pode-se observar uma mina de extração de carvão em atividade, as paredes internas com as camadas de pirita, a planta de classificação e lavagem, e as lagoas de deposição de finos após a lavagem do carvão.

Fotografia 1 - Extração e processamento de carvão mineral em atividade



Fonte: Aatoria própria (2019)

Para Ravazzoli (2013), a questão do uso do carvão no Brasil e no mundo é um tema atual, e sem perspectivas de diminuição de sua importância num futuro

próximo. Apesar de ser um combustível poluente, o carvão deverá continuar desempenhando um importante papel como fonte de energia no cenário mundial.

As tecnologias que permitem a redução gradativa do uso do carvão como gerador de energia, não dispensa o uso do mesmo na indústria siderúrgica, mesmo considerando que no Brasil as reservas de carvão siderúrgico já estão reduzidas. O potencial deste combustível para termoeletricas e outras utilizações é alto, e deve-se considerar que a estrutura da indústria carvoeira não vai ser desativada sem esgotar as possibilidades de extração.

O passivo ambiental provocado pela indústria do carvão já existe tendo ela atividades ou não. Esta é a realidade atual do entorno da região carvoeira. Os resíduos sólidos estão depositados a décadas causando a DAM- Drenagem Ácida de Minas. Isso requer uma atenção especial, com determinação e visão para tomada de soluções que resolvam ou contribuam para reduzir este ataque a natureza.

Existem duas situações a serem discutidas: a do “Rejeito Passivo de Carvão Mineral-RPCM”, que é o rejeito depositado a décadas podendo estar há mais de 50 anos depositado a céu aberto na região. E o “R1 e R2” que são os rejeitos que estão saindo da classificação do carvão extraído atualmente, eles apresentam algumas características químicas diferenciadas, pelo fato do “passivo” estar exposto a mais tempo.

Neste contexto “proteção ao meio ambiente” não se permite ignorar a poluição causada pela construção civil, embora o déficit habitacional seja relevante e não possa ser esquecido. O impacto ambiental causado pela retirada de agregados, bem como pelo processo de fabricação do cimento desde a retirada da rocha até seu uso nas obras.

Motivados pelo cenário mundial ao longo dos tempos, pesquisadores vêm desenvolvendo vários estudos com o objetivo de melhorar o desempenho do cimento nos concretos. Alguns estudos estão sendo desenvolvidos com a finalidade de encontrar alternativas mais sustentáveis, com o intuito de diminuir o consumo de matéria prima natural na confecção de concretos, tornando assim a indústria da construção civil mais limpa e sustentável.

O uso de fontes alternativas em vez de cimento e agregados é uma necessidade desafiadora. Desta forma, materiais reciclados e resíduos podem ser usados como fontes alternativas no concreto, que auxiliam na redução de

desperdícios e uso de energia e recursos naturais como mineração de agregados (KHATAEI e NASROLLAHI, 2020).

Com base no exposto acima, esta pesquisa tem como objetivo reduzir o impacto ambiental causado pelos rejeitos de carvão mineral depositados no em torno das mineradoras, bem como diminuir a quantidade de produção de cimento, substituindo parte do mesmo por rejeito passivo de carvão mineral no concreto

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é estudar a viabilidade técnica para a utilização do rejeito passivo de carvão mineral (RPCM), na confecção de blocos estruturais de concreto, utilizados pela construção civil, reduzindo o impacto ambiental causado pelo rejeito passivo de carvão mineral no meio ambiente.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar as características físicas e químicas do rejeito passivo de carvão mineral.
- Estudar a compatibilidade química dos cimentos CP-IV-32RS, CP-V-ARI, CP II-Z-32 e CP II-F-32, e definir qual dos cimentos apresenta melhor desempenho em conjunto com o rejeito passivo de carvão mineral.
- Estudar qual a porcentagem de cimento a ser substituída por rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto.
- Estudar a durabilidade do concreto com rejeito passivo de carvão mineral.
- Moldar blocos de concreto com rejeito passivo de carvão mineral substituindo parte do cimento.

1.2 Justificativa

A reserva brasileira de carvão mineral é de 32 bilhões de toneladas (ABCM, 2021). Durante o processo de extração de carvão ROM (*Rum of mine*), são gerados 60% de rejeitos sólidos e 1,5 m³ de efluentes ácidos. Os efluentes ácidos atualmente por exigências de leis ambientais são conduzidos para lagoas de decantação onde serão submetidos a tratamento, os rejeitos sólidos serão encaminhados para aterros programados, que podem gerar a DAM, ou também com o tempo acabam se tornando

grandes depósitos de rejeito passivo que também irão gerar a DAM. Todo este processo gera grandes passivos ambientais. A atividade de mineração de carvão está atuante, pois segundo a (ABCM), 2021) em 2020 o Brasil produziu 9,2 milhões de toneladas de carvão mineral, sendo vendável 4,7 milhões de toneladas, ficando como rejeito nos depósitos 4,5 milhões de toneladas, estes rejeitos de depósito a céu aberto não incluem os finos da lavagem do carvão vendável, que é direcionado para as lagoas de decantação no entorno das plantas de classificação do carvão.

A DAM é o mais sério problema causado pelos depósitos de rejeitos passivos nas regiões de mineração no Sul do Brasil, ela é o resultado da oxidação natural dos minerais sulfetados combinados com a água e o oxigênio. A DAM inicia quando minerais sulfatados são extraídos do interior da terra e entram em contato com o ar e a água da atmosfera e formam os óxidos, que serão lixiviados pelas águas das chuvas sendo conduzidos para a rede hídrica da região.

Nas fotografias 2a e 2b está apresentado o início da DAM se formando em depósito de rejeito passivo de carvão mineral, e a erosão formada ao longo do tempo pelas chuvas, provocando a DAM-Drenagem Ácida de Minas.

Fotografia 2 - Início da DAM em um depósito de rejeito de carvão mineral



(a) (b)

Fonte: A autoria própria (2019)

As camadas de rejeitos nos depósitos podem ter em torno de 3,00m de altura. Com o passar dos anos a chuva vai provocando erosão e formando lagoas na área do depósito, (fotografia 2a). Essas lagoas irão percolar até o subsolo para a rede hídrica, ou também se formam veios que se transformam em pequenos córregos na área do depósito (fotografia 2b), tendo como destino final a rede hídrica da região.

Na fotografia 3 estão apresentadas comunidades formadas nos depósitos de rejeito.

Fotografia 3 - Comunidade formada sobre o depósito de rejeitos

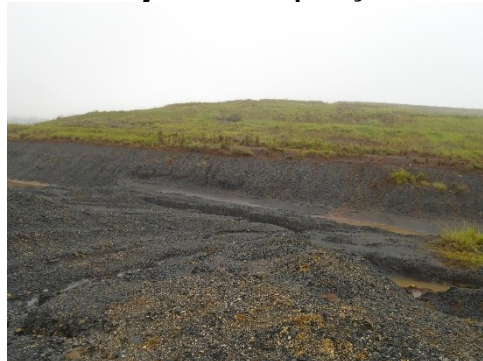


Fonte: Autoria própria (2019)

Pode-se observar na fotografia 3a e 3b, a formação de comunidades sobre os depósitos de rejeito de carvão, esses aglomerados de edificações começam nos limites do depósito e vão tomando corpo para dentro da área, sobre os rejeitos de carvão. Essas comunidades estão expostas a inúmeros riscos de contaminação, pois estão em contato direto com os rejeitos de carvão mineral.

Na fotografia 4 está apresentada uma área de um depósito de rejeito, onde foi executado um projeto de recuperação de área verde.

Fotografia 4 - Projeto de recuperação de área verde



Fonte: Autoria própria (2019)

Inúmeras tentativas para conter a contaminação pela DAM já foram executadas com projetos desenvolvidos com objetivo de contenção da mesma em depósitos de rejeitos passivos de carvão mineral, alguns obtiveram sucesso outros não,

Os depósitos de rejeitos passivos ocupam hoje uma área de 3.050ha expostos na Bacia Carbonífera de Santa Catarina. Somando-se a estas áreas de passivos, os depósitos de rejeitos também estão presentes nos pátios operacionais das minas em atividade na região carbonífera, cuja superfície alcança um total de 957ha. Estes depósitos geram uma DAM que causa a contaminação dos recursos hídricos em cerca

de 786 km de rios atingidos por DAM, nas bacias hidrográficas dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga (BRASIL, 2008).

A mineração de carvão na região Sul do Brasil é uma atividade econômica de relevância para as microrregiões onde ela ocorre. O potencial econômico desta atividade contribui para a formação do PIB-Produto Interno Bruto de cada região, em contra partida o fator energético também é beneficiado por esta atividade, as termoelétricas são atualmente consideradas uma opção para reforçar o setor energético do país.

A construção civil é um setor em expansão no Brasil, a indústria do cimento por sua vez, também é uma geradora de poluição com agressão ao meio ambiente, principalmente na extração da rocha calcária, matéria prima indispensável na produção do cimento.

A produção atual de cimento é de 4,5 bilhões de toneladas, o que gera 1,5 bilhões de toneladas de CO₂, que corresponde a 8% das emissões de dióxido de carbono. Atualmente o maior emissor de dióxido de carbono é a china, seguida pela Índia, EU-União Europeia e EUA-Estados Unidos da América. Observa-se que a China atualmente é o país que provoca a maior emissão de dióxido de carbono pela fabricação do cimento, também é o país que tem a maior extração de carvão e gera os maiores depósitos de rejeito de carvão mineral.

O Brasil fechou o ano de 2020 com uma produção de 60,8 milhões de toneladas de cimento, que contribuem com 2,6% de emissão de CO₂ do país, segundo o Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa, isso corresponde à metade da emissão de CO₂ da Indústria da construção civil no Brasil. Além da emissão de gás carbônico no meio ambiente, pode-se também listar outros impactos ambientais tão nocivos quanto o CO₂ que a indústria do cimento pode causar ao meio ambiente como: extração de matéria prima da natureza, consumo de energia para todo o processo de fabricação, consumo de outros combustíveis naturais, poluição do ar pela moagem primária e peneiramento do calcário, etc. (DA SILVA, 2022).

Reduzir o consumo do cimento contribuirá com a redução da emissão de gases de efeito estufa e e também outros agentes poluidores causados pela indústria do cimento. Substituindo este cimento no concreto por rejeito de carvão mineral efetua-se a retirada de um agente agressivo da natureza, que causa um enorme passivo ambiental, este é o objetivo desta pesquisa.

1.3 Estrutura da tese

Esta tese está dividida em cinco capítulos, o primeiro capítulo é o que inclui a introdução onde são abordados aspectos importantes sobre o tema, os objetivos e a justificativa da escolha do tema da pesquisa.

O segundo capítulo é composto de ampla revisão bibliográfica, onde são abordadas as questões técnicas que envolvem o carvão mineral, o seu uso na construção civil, também relata aspectos da durabilidade do concreto.

O terceiro capítulo descreve a metodologia com a qual foi desenvolvida a pesquisa. É subdividido em três fases:

Fase 1 – Descreve a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, bem como desenvolve as metodologias dos ensaios e análises realizados para a escolha do cimento a ser utilizado na fase 2 e fase 3 da pesquisa:

Fase 2 - Nesta fase são desenvolvidas as metodologias dos ensaios e análises, testando porcentagens diferentes do rejeito passivo de carvão mineral no concreto para a confecção dos blocos.

Fase 3 - Nesta fase foi realizada a moldagem e caracterização física, mecânica, química e mineralógica dos blocos.

No quarto capítulo os resultados obtidos no desenvolvimento das três fases da pesquisa são apresentados e discutidos, mostrando as possibilidades de uso do rejeito passivo de carvão mineral.

No quinto capítulo São apresentadas as conclusões da pesquisa

As referências bibliográficas utilizadas na pesquisa são apresentadas ao final do texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

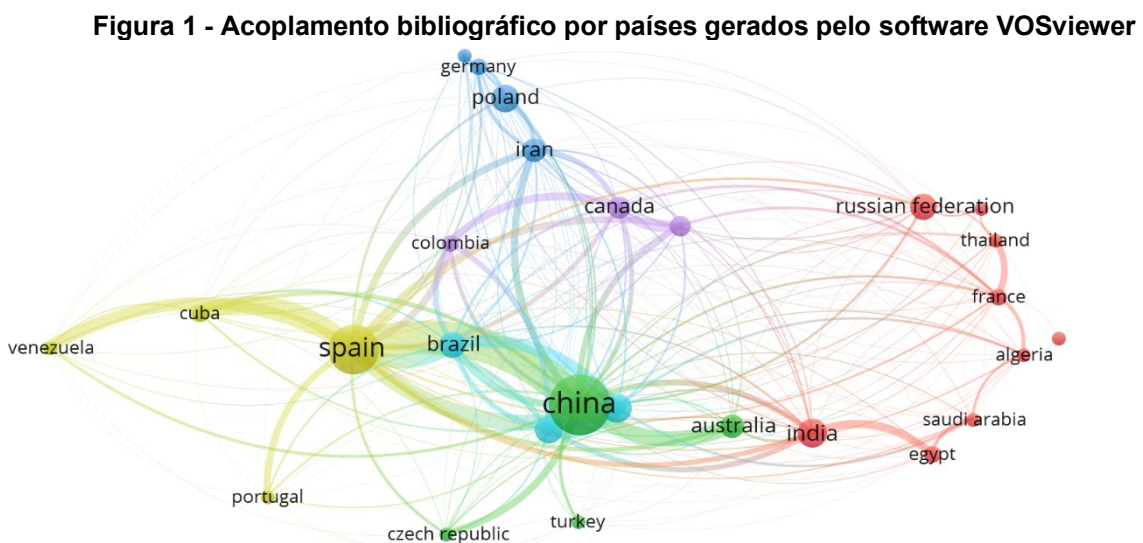
Esse capítulo tem como objetivo abordar o assunto a ser discutido nesta tese, buscando embasamento teórico em autores e textos que apresentam resultados. Com base nos trabalhos pesquisados foi feito um relato de pontos considerados de relevância para o estudo.

Para alcançar este objetivo realizou-se uma pesquisa bibliométrica como embasamento teórico, com a finalidade de adquirir conteúdo para fundamentar e discutir sobre os problemas e locais onde atualmente são feitas pesquisas referentes ao material a ser utilizado no desenvolvimento desta tese.

A pesquisa bibliométrica é um meio de identificar padrões na literatura demonstrando os principais periódicos e as áreas mais relacionadas à temática da pesquisa. Por meio desta é possível mensurar a contribuição do conhecimento científico inseridos nas publicações vinculadas a sua área de interesse, (PRASAD-TATA, 2005).

A *string* de busca utilizada foi: ((*Mineral coal*) AND (*Reject* OR “*Coal washery rejects*” OR *concrete* OR *Cement*) AND (“*Coal-mining waste*”) AND (*Construction* OR “*Building materials*”)), restringindo o filtro a três áreas de conhecimento, *Materials Science*, *Environmental Science* e *Engineering*.

Na figura 1 estão apresentados os países onde se encontra a distribuição da produção literária atual sobre carvão mineral.

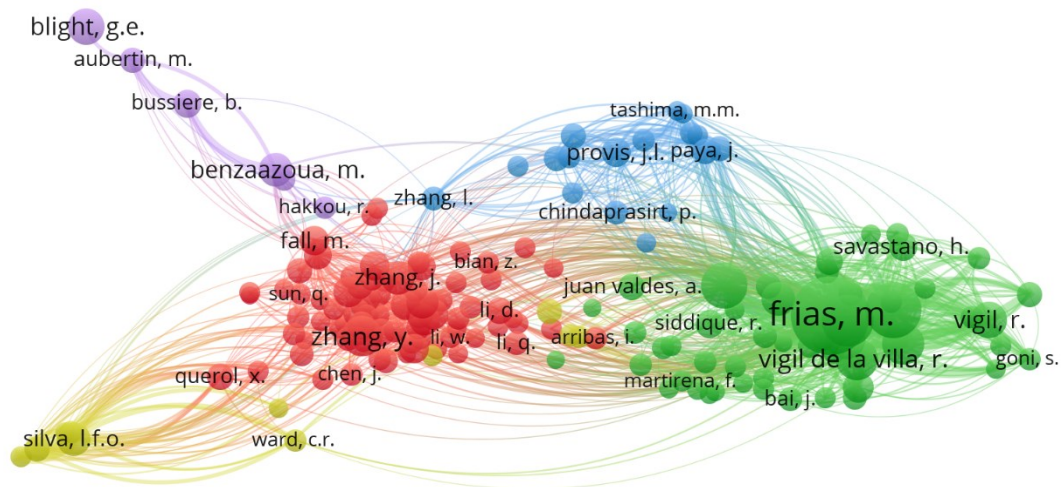


Fonte: Autoria própria (2019)

Na figura 1 observa-se que atualmente a China detém o maior número de produções literárias sobre o assunto, seguida pela Espanha. Os demais países mantêm um equilíbrio de estudos publicados.

Na figura 2 está apresentada a troca de informações de citações e cocitações entre autores que escrevem sobre o tema.

Figura 2 - Interligações de cocitações entre autores pelo software VOSviewer



Fonte: Autoria própria (2019)

Analisando a figura 2 observa-se que a troca mais intensa de informações acontece entre os autores espanhóis e chineses. Isto possibilita a identificação dos autores de maior relevância atualmente na área da pesquisa que está sendo desenvolvida, criando subsídios para o desdobramento dos estudos e parâmetros de referência para a investigação.

2.1 Carvão mineral

O carvão mineral utilizado em siderúrgicas e termoelétricas é uma rocha sedimentar combustível, o mesmo está disposto em forma de camadas sendo o resultado de várias espécies vegetais (plantas tropicais e subtropicais) em ambientes aquáticos durante a era Paleozoica nos períodos Carbonífero e Permiano. O aumento da pressão e temperatura aliados a ação de micro-organismos anaeróbicos sobre a matéria orgânica concentrou carbono expulsando hidrogênio e oxigênio. A matéria prima pode também ter sido estocada em bacias pouco profundas, sob influência de pressão temperatura e tempo. O carvão possui teores de carbono, hidrogênio e

oxigênio de acordo com os diversos estágios de transformação da planta em carvão, (PITT e MILLWARD, 1979; SANTANA, 2002; JOSÉ, 2019).

O processo de formação de carvão se deve ao fato de vegetais, resíduos de vegetais, folhas, galhos e a celulose serem compactados e sofrerem diagênese ao longo do tempo geológico na bacia sedimentar, e transformações devidas as pressões e a temperaturas concentrando carbono e hidrogênio nas rochas estratificadas. Na carbonificação há um aumento de teor de carbono e diminuição dos teores de oxigênio e hidrogênio nas sucessivas etapas do processo, ou seja, vegetal (celulose), turfa, linhito, hulha, antracito e grafite (JOSÉ, 2019; GOMES, 2002).

O carvão é composto basicamente por carbono e quantidades variáveis de oxigênio, hidrogênio, enxofre e nitrogênio, podendo conter outros elementos dependendo da composição mineralógica. Os diferentes graus de carbonificação do carvão crescem na seguinte ordem: vegetação, turfa, linhito, carvão e antracito, sendo este com o maior grau de carbonificação ou *ranking*. (STACH, 1975; OSÓRIO *et al.*, 2008).

O carvão mineral é considerado um bem mineral e segundo Schumann, (1985), os bens minerais são de origem orgânica e, portanto, segundo definição geológica, não são rochas autênticas. Entretanto, como são componentes sólidos da crosta terrestre e estão tão alterados que não é possível reconhecer sua origem orgânica, são incluídos em rochas sedimentares. O autor descreve as propriedades do carvão mineral conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do carvão mineral

Mineral	Cor	Brilho	Valor calorífico	% de carbono
Turfa	Parda	Não tem	1.500 – 2.000	50 -78
linhito	Negro-parda	Mate	2.000 – 7.000	55 - 75
Hulha	Negra	Céreo	7.000 – 8.500	74 - 90
Antracito	Negra	intenso	8.500 – 9.000	90 - 96

Fonte: Rochas e Minerais, Walter Schumann (1985)

Na figura 3 estão representadas as características visuais dos diferentes tipos de carvão mineral.

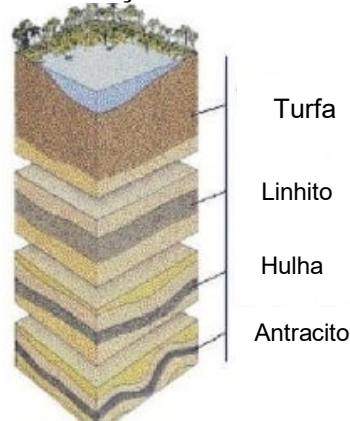
Figura 3 - Diferentes tipos de carvão extraídos da natureza



Fonte: ABCM (2021).

A principal composição química do carvão mineral é o carbono, o teor de carbono do carvão mineral ajuda a identificar a idade do carvão, como também a profundidade onde o mesmo pode ser encontrado para a extração. Quanto maior o teor de carbono, maior a idade de formação do mineral e conseqüentemente maior sua profundidade, como pode-se observar na figura 4.

Figura 4 - Formação estratificada do carvão

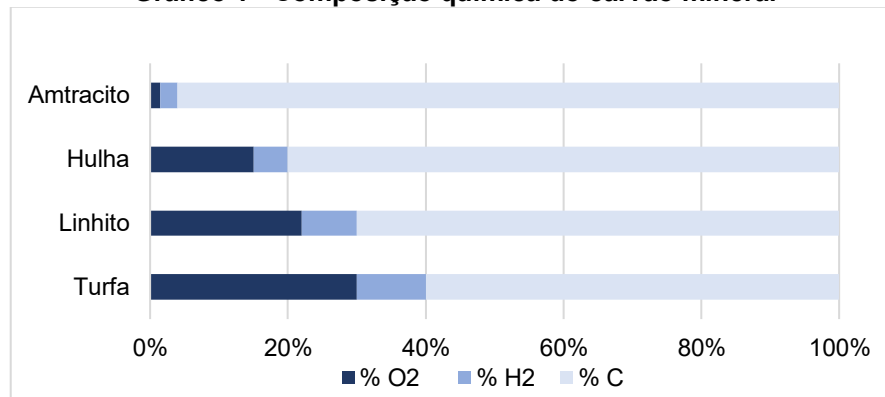


Fonte: Malaquias (2022).

A umidade, o poder calorífico, os teores de carbono e hidrogênio ou a fluorescência, são propriedades que permitem estimar o *ranking*, uma vez que a elevação da carbonificação aumenta o poder refletor e reduz o hidrogênio e as matérias voláteis (CANO, 2017).

Segundo Da Silva (1987) este *ranking* também pode se referir ao grau de calorificação suportado pela matéria orgânica, sendo calculado pelo conteúdo da mistura, da energia específica, da refletância da vitrinita ou da matéria volátil.

Esta composição será de fundamental relevância na classificação do carvão no momento da extração da mina e está descrita no gráfico 1.

Gráfico 1 - Composição química do carvão mineral

Fonte: DNPM-DIDEM (2017)

Devido ao fato de o carvão mineral não apresentar uma composição uniforme ele também não apresenta uma fórmula química definida, tornando assim importante realizar as análises químicas do mineral. As análises imediata e elementar são o primeiro passo para a caracterização do carvão, elas determinam as porcentagens de carbono, nitrogênio, hidrogênio, oxigênio, teor de cinzas, umidade entre outros.

Peuker e Fagundes (2006) afirmam que a análise imediata envolve a determinação dos principais componentes de carvão mineral para a sua aplicação como combustível na indústria. A análise elementar determina os elementos individuais de um carvão mineral tais como: carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio. As propriedades plásticas do carvão são influenciadas diretamente pelo oxigênio e o hidrogênio.

O enxofre e suas formas determinam por si só a importância de serem analisados, pois praticamente todo enxofre encontrado no aço e no ferro-gusa são provenientes do carvão. Este enxofre pode ser encontrado sob a forma de enxofre total, e pode ser dividido em enxofre pirítico, enxofre sulfúrico e enxofre orgânico, a soma dos três determina a quantidade de enxofre total do carvão.

O carvão mineral pode ser encontrado na natureza em camadas horizontais, tanto nas camadas superficiais ou a centenas de metros abaixo da superfície. Desta forma existem duas maneiras principais de extrair o carvão: mineração subterrânea e mineração de superfície (SIECESC, 2016).

A mineração subterrânea implica em abertura de poços, planos e inclinados, ou galerias de encosta para extração do minério, transporte de materiais e de pessoas. O método de câmaras e pilares consiste na abertura de um eixo principal de

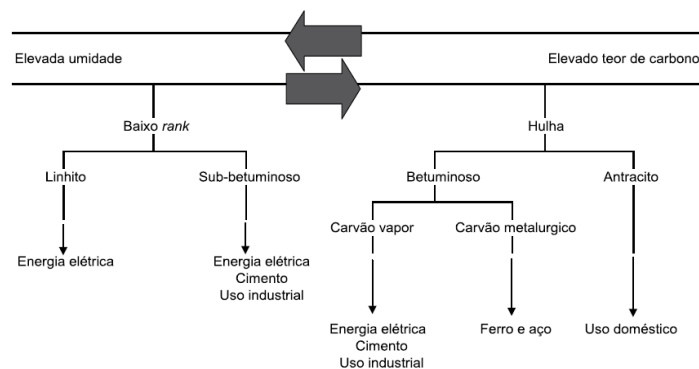
transporte, que pode ser constituído de duas ou mais galerias paralelas e perpendiculares ao eixo principal, a partir daí são traçados os painéis de produção, onde são abertas galerias de extração (CAMPOS *et al.* 2010).

A lavra a céu aberto consiste nas operações de remoção da cobertura de material estéril e a extração da camada de carvão descoberta (CAMPOS, *et al.* 2010).

O beneficiamento do carvão são processos que visam à redução da matéria inorgânica existente no mineral, melhorando desta forma a qualidade do mesmo. O Carvão ROM, é o minério bruto, obtido diretamente da mina, sem sofrer nenhum tipo de beneficiamento e é retirado através de correia transportadora ou vagonetes.

Devido à complexidade e diversidade da composição do carvão mineral, ele tem uma ampla utilização, na figura 5 estão demonstradas as utilizações do carvão mineral.

Figura 5 - Tipos de carvões mineral e seus principais usos



Fonte: DNPM-DIDEM (2017)

O linhito, como os demais carvões de baixo *ranking* podem sofrer combustão espontânea, desgastam rapidamente e tem baixo poder calorífico, são usados na geração de eletricidade. A hulha sub-betuminosa é utilizada na produção de cimento e na geração de calor em vários tipos de indústrias. A hulha betuminosa é o principal combustível usado em alto forno onde é fundido o minério de ferro para a produção de aço e ferro gusa. Em função de sua alta combustão o antracito normalmente tem uso doméstico (DNPM, 2017).

2.1.1 Carvão mineral no mundo

Segundo o IEA (2021) o carvão mineral é o combustível fóssil que possui as maiores reservas no mundo, estas reservas estão estimadas em cerca de um trilhão de toneladas, com capacidade de suprir as necessidades de consumo se mantidas no ritmo atual por 190 anos. Em 2018 em torno de 38,5% da energia consumida no mundo foi fornecida pelo carvão mineral.

As adversidades como, oscilação econômica e temperatura variável não influenciaram de forma significativa o consumo do carvão mineral, este continuou responsável por 36% da energia global em 2020, sendo responsável pela geração de 40% da energia elétrica global. O maior consumidor mundial é a China, este consumo vem crescendo ano a ano desde 2011, atingindo 56% do consumo global em 2020, seguidos da OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, Índia, Estados Unidos, Rússia, Japão, África do Sul, Indonésia e União Europeia.

A queda do consumo nos EUA – Estados Unidos da América e na EU – União Europeia, não foi significativa o suficiente para perderem sua posição no *ranking* de terceiro e quartos maiores consumidores deste minério no planeta. Em seguida vem Índia e demais países consumidores espalhados por vários continentes. O consumo global não sofreu queda sensível, face ao aumento de consumo na China e demais países do Continente Asiático (IEA, 2021).

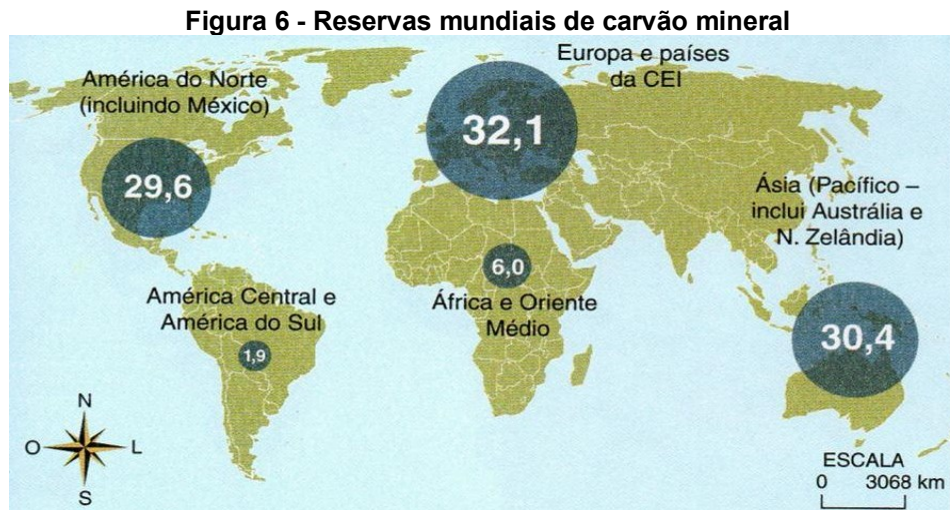
Em relação aos EUA, a previsão é que o consumo retorne gradativamente aos níveis anteriores, conforme sobe o preço do gás natural naquele país, pois um dos principais fatores que impulsionou a queda de consumo do carvão nos EUA foi a baixa do preço do gás natural (IEA, 2021).

No que diz respeito a produção, a China lidera o *ranking mundial*. A China e a Índia são classificadas como as maiores importadoras de carvão mineral atualmente no planeta. A Indonésia, Austrália e Rússia continuam sendo os principais fornecedores de carvão em todo o mundo. O Sudoeste Asiático ainda depende do carvão para a geração de energia elétrica, como forma de movimentar seu parque industrial.

A indústria do aço é a segunda maior consumidora de carvão no planeta, superada apenas pelo consumo na geração de energia elétrica, 15% da produção global do minério é consumido na indústria siderúrgica, esta indústria também é um

fator importante no crescimento dos países asiáticos, o que ajuda a aumentar o consumo global de carvão.

Na figura 6 está demonstrado a distribuição das maiores reservas de carvão mineral espalhadas pelo planeta.



As reservas mundiais aparecem em todos os continentes, distribuídas de forma não uniforme, sendo que a América Central e do Sul são as que tem as menores reservas.

2.1.2 Carvão mineral no Brasil

Os estados da região sul: Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul são os que detêm a maior incidência de carvão mineral no Brasil, com uma reserva estimada em 31,404 bilhões de toneladas (ZANCAN, 2021).

Segundo a ABCM (2021) atualmente cerca de 85% do consumo de carvão é destinada para o abastecimento de usinas termelétricas, 6% é aplicado na indústria de cimento, 4% na indústria de papel celulose e 5% nas indústrias de cerâmica, alimentos e secagem de grãos.

Em termos de emissões de gases de efeito estufa pela energia, o Brasil é responsável por cerca de 1,4% das emissões globais, não sendo o carvão termelétrico o problema brasileiro, já que ele gera 3,7% das emissões de gases da energia e 0,7% das emissões totais. Do total de energia elétrica consumida hoje no Brasil 5,3% tem como fonte geradora o carvão mineral (ZANCAN, 2021).

Na figura 7 pode-se observar o cinturão carvoeiro do Brasil.



Fonte: ABCM (2021).

O cinturão carvoeiro no Brasil está concentrado na região Sul do país, com uma pequena reserva no estado de São Paulo. Na tabela 2 está descrita a produção em toneladas de carvão mineral ROM extraído no Brasil, sua parte vendável e o montante em valores movimentados em 2020 por este minério.

Tabela 2 - Total de carvão mineral extraído no Brasil em 2020

Estado	ROM (t)	Vendável(t)	Faturamento (R\$)	Faturamento ((%)
PR	152.547	97.298	35.671.190,25	3
RS	3.391.575	2.539.637	356.274.977,26	33
SC	5.614.266	2.085.089	699.046.243,31	64
Total	9.158.388	4.722.024	1.090.992.410,82	100

Fonte: ABCM (2021)

A indústria carvoeira no Brasil gera 3.020 empregos diretos, sendo 2.508 em SC, 297 no RS e 215 no PR, gerando um total de R\$ 19.747.804,08 de Imposto sobre Circulação de mercadorias-ICMS, sendo que, no estado de Santa Catarina a indústria carvoeira é isenta de ICMS por incentivos governamentais (ABCM, 2021).

O carvão mineral Brasileiro é consumido por vários setores da indústria como está demonstrado na tabela 3.

Tabela 3 - Consumo de carvão mineral no Brasil em 2020 em (t)

Setor	RS	PR	SC	Total (t)
Alimentos	52.288	-	-	52.288
Cerâmica	93.527	-	7.843	101.370
Cimento	4.492	-	6.857	11.349
Coque	-	-	3.646	3.646
Elétrico	1.433.353	45.500	2.541.316	4.020.169
Mineração	316.856	-	46.306	361.662
Papel e celulose	209.578	-	-	209.578
Petroquímico	344.507	-	-	344.507
Outros	27.485	51.798	15	5.207.300
Total	2.482.086	97.298	2.605.983	4.722.024

Fonte: ABCM (2021)

Na tabela 3 observa-se que o carvão brasileiro extraído atualmente tem baixo consumo nas siderúrgicas em função das suas características químicas.

Segundo a ANM (2019) no segundo semestre de 2018 o Brasil importou o montante de US\$ 1.254.722.791,00 de carvão mineral para suprir necessidades internas. Importados principalmente pelas indústrias siderúrgicas, totalizando mais de 14 milhões de toneladas anuais de carvão metalúrgico, provenientes de países como EUA, China, Austrália e Polônia.

O carvão siderúrgico ou coque é usado como elemento redutor, em altos fornos, é preciso extrair o Fe do minério Fe_2O_3 , separação esta que ocorre por meio da redução química fundindo junto ao Fe uma substância com maior capacidade de captação de oxigênio, no caso o coque, que na presença de calcário resulta em dióxido de carbono, ferro e escória. A indústria siderúrgica depende em larga escala do carvão mineral para a produção do aço. Apenas 15% das reservas de carvão no mundo tem propriedades coqueificantes (HERNÁNDEZ, 2018).

A análise química do carvão não dá indicação definitiva das suas potencialidades para ser utilizado como coque, porém recomenda-se que tenha um teor de cinzas inferior a 8%, quantidade de enxofre menor que 1,5%. Quando utilizado o carvão a quente o enxofre pode causar problemas de fragilidade no material. O fósforo deve ser menor que 0,02%, pois poderá causar problemas de fragilidade a frio.

No Brasil como pode-se observar na tabela 3 a produção de coque é muito pequena e está concentrada em SC, levando a indústria siderúrgica importar esta matéria prima para suprir suas necessidades na produção do aço.

Após a extração o carvão é conduzido para o beneficiamento, que consiste basicamente em um conjunto de operações visando adequar o produto de forma a torná-lo comercializável. Depois de realizado o beneficiamento é que o carvão vai

agregar valor comercial. Os produtos gerados do beneficiamento que agregam valor comercial são: carvão energético fino, carvão energético granulado, carvão metalúrgico e produtos especiais (carbotrat). Mas ao mesmo tempo o beneficiamento gera uma parte material sem valor comercial que é o estéril granulado (R1, R2, R3) e o estéril granulado fino.

O estéril granulado (R1, R2, R3) é encaminhado para depósitos de rejeito, onde ao longo do tempo formam o rejeito passivo de carvão mineral, provocando a DAM, que também pode ser causada pela lavagem do carvão durante seu beneficiamento. Os estéreis finos são encaminhados para as bacias de decantação.

Segundo Peterson (2008), o carvão catarinense é de qualidade relativamente baixa, com um poder calorífico (3700 e 4500) kcal, tendo também um teor alto de cinza e enxofre. Por fim, a taxa de recuperação é extremamente baixa, menos de 35%. Isso significa que a quantidade máxima recuperada de carvão em cada tonelada métrica extraída é de apenas 350 kg de carvão comercializável. Os restantes 650 kg terminam como rejeitos, (grossos e finos) e aproximadamente 1,5 m³ de efluentes ácidos também são gerados na lavagem de 1 tonelada de carvão ROM.

2.2 Rejeito de carvão mineral

O rejeito do carvão mineral gerado pelo seu beneficiamento é um subproduto da mineração sem interesse comercial, sendo assim depositado em áreas próximas às mineradoras, evitando assim, o custo do transporte, criando grandes passivos ambientais no entorno do cinturão de mineração.

A drenagem ácida de minas (DAM), ocorre depois que a mineração expõe os sulfetos de metal, a condições oxidantes.

A DAM é um efluente de elevada acidez, formado pela oxidação da pirita (FeS₂) na presença de água (H₂O) e oxigênio (O₂). O processo de geração da DAM é acelerado na presença de bactérias *acidofílicas*, como as bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, sendo o efluente de difícil controle. Normalmente a DAM apresenta um baixo pH (entre 2,0 e 3,0), altas concentrações de sulfato, ferro (na forma de Fe²⁺ e/ou Fe³⁺, dependendo das condições oxidantes ou redutoras do meio) e outros metais (Al, Mn e Zn) solubilizados a partir de minerais presentes no ambiente (KONTOPOULOS, 1998).

Quando os sulfetos são expostos à atmosfera ou águas subterrâneas oxigenadas, se oxidam para produzir uma água ácida carregada de sulfatos, metais

pesados e metaloides. O mineral pirita (FeS_2) tende a ser o mineral de sulfeto mais comum presente. O desgaste desse mineral em locais de mina causa o maior e mais difícil problema ambiental que a indústria da mineração enfrenta hoje, a drenagem ácida de mina (LOTTERMOSER, 2010).

Conforme Weiler *et al.* (2016) devido às suas características, a DAM é a principal responsável pela contaminação da água e do solo nas regiões carboníferas, e deve ser tratada previamente à sua emissão em corpos hídricos receptores.

Muitos métodos de tratamento da DAM estão disponíveis e os custos de implantação dos sistemas de tratamento geralmente são altos, além disso muitos fatores determinam o método de tratamento mais eficiente: qualidade e quantidade de DAM, formação e sedimentação de hidróxidos de metal, recursos disponíveis (SKOUSEN; ZIEMKIEWI; MCDONALD; 2019).

Na fotografia 5a e 5b pode-se observar o resultado da DAM em um córrego, e numa lagoa da região carbonífera de Criciúma-SC, local da coleta de rejeito para este estudo.

Fotografia 5 - Contaminação pela DAM na rede hídrica da região estudada



(a)

(b)

Fonte: A autoria própria (2019)

Ao entrar em contato com corpos d'água superficiais, os efeitos da DAM incluem impactos bióticos em organismos de riachos e lagos por meio de toxicidade direta, alteração do habitat por precipitados de metal, mudanças visuais de coloração laranja ou amarela dos fluxos dos rios, e a água muitas vezes se torna inadequada para uso doméstico, agrícola ou mesmo para a indústria, (SKOUSEN; ZIEMKIEWI; MCDONALD; 2019).

A maior contribuição da DAM em riachos e lagos vem de numerosas terras minadas e abandonadas que foram mineradas e deixadas sem recuperação. Os

materiais contendo sulfeto eram deixados expostos na superfície e sem recuperação, eles continuam a gerar DAM, liberando assim os íons metálicos e ácido sulfúrico no ambiente, (SKOUSEN *et al.*, 2019).

Segundo Haibin e Zhenling (2010) na China são gerados 4,00m³ de DAM, por tonelada de carvão produzida, descartadas em estações de tratamento, tendo como destino final o uso em indústrias ou rede hídrica da região da mina onde são geradas. Em função disso e de outros prejuízos para o meio ambiente, nos últimos anos, a economia da reciclagem se tornou o foco do estudo acadêmico, e com técnicas mais sofisticadas de controle de rejeitos da mineração do carvão.

Buscando a literatura foi constatado que ao longo dos anos vários pesquisadores estudaram sobre os efeitos prejudiciais da DAM no solo e nas redes hídricas. No quadro 1 pode-se observar uma lista destes pesquisadores e os locais onde pesquisaram.

Quadro 1 - Pesquisas relacionadas a ação prejudicial da DAM

Autores	Títulos	Região
Carlos Primo C. David	<i>Establishing the impact of acid mine drainage through metal bioaccumulation and taxa richness of benthic insects in a tropical Asian stream. Environ. Toxicol. Chem. 22, 2952–2959.</i>	Asia/2009
Ting Ting Wei, Yang Yu, Zhen Qi Hu, Yuan Bo Cao, Yang Gao, Yao Qi Yang, Xin Jing Wang, Pei Jun Wang	<i>Research Progress of Acid Mine Drainage Treatment Technology in China</i>	Asia/2013
Jae E. Yang, Hee Joung Kim, Yong-Sik Ok, Jai-Young Lee & Joonhong Park	<i>Treatment of abandoned coal mine discharged waters using lime wastes</i>	Asia/2007
D Trumm, J Ball	<i>Use of sulfate-reducing mussel shell reactors in New Zealand for treatment of acid mine drainage</i>	Nova Zelândia/2014
IM. J. Winterbourn, W.F. Mc Diffett, S.J. E. ppley.	<i>Aluminium and iron burdens of aquatic biota in New Zealand streams contaminated by acid my drainage: effects of trophic level</i>	Nova Zelândia/2000
Danae N. Antivachis, Elias Chatzitheodoridis, Nikolaos Skarpelis & Konstantinos Komnitsas	<i>Secondary Sulphate Minerals in a Cyprus-Type Ore Deposit, Apliki, Cyprus: Mineralogy and Its Implications Regarding the Chemistry of Pit Lake Waters Mine Water and the Environment volume 36, pages226–238 (201</i>	Europa/2016

Nurgul Balci & Cansu Demirel	<i>Prediction of Acid Mine Drainage (AMD) and Metal Release Sources at the Küre Copper Mine Site, Kastamonu, NW Turkey</i> <i>Mine Water and the Environment</i> volume 37, pages56–74 (2018)	Europa/2018
Corinne Casiot, Marion Egal, Françoise Elbaz, Poulichet, Odile Bruneel Chrystelle Bancon-Montigny, Marie- Ange Cordier, Elena Gomez. Catherine Aliaume.	<i>Hydrological and geochemical control of metals and arsenic in a Mediterranean river contaminated by acid mine drainage (the Amous River, France); preliminary assessment of impacts on fish (Leuciscus cephalus)</i>	Europa/2009
NF Gray, E Delaney	<i>Comparison of benthic macroinvertebrate indices for the assessment of the impact of acid mine drainage on an Irish river below an abandoned Cu–S mine</i>	Europa/2008
W. H. J. Strosnider, F. S. L. López, R. W. Nairn -	<i>Acid mine drainage at Cerro Rico de Potosí I: unabated high-strength discharges reflect a five-century legacy of mining</i>	América do Sul/2011
G.J. Zagury and C. Neculita, B. Bussière	<i>Passive treatment of acid mine drainage in bioreactors: short review, applications, and research needs</i>	Canada/2007
O Sracek, M Choquette, P Gélinas, R Lefebvre	<i>Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Québec, canada</i>	Canada/2004
D. S. Cherry, R. J. Currie, D. J. Soucek, H.A. Latimer.	<i>An integrative assessment of a watershed impacted by abandoned mined land discharges</i>	EUA/2001
R. Kleinmann	<i>Acid mine drainage Eng. Min. J., 190 (1989) 161-16N</i>	EUA/1989
Soucek, D. J.; Cherry D.S.; Currie, R.J.; Latimer, H. Á.; Trent G. C.	<i>Laboratory to field validation in an integrative assessment of an acid mine drainage-impacted watershed</i>	EUA/2000

Fonte: Dados baseados em Skousen, et al. (2018).

Rejeitos de mineração contêm minerais sulfetados que propiciam a formação de drenagens ácidas, disponibilizando metais bioacumulativos, tornando as águas inadequadas para uso doméstico e agropecuário (PETERSON, 2008).

Estéreis e rejeitos são ricos em sulfetos de ferro (FeS_2), que indica a presença da pirita, um mineral sulfetado muito comum nos carvões brasileiros. Estes oxidam-se em presença do ar e da água, desencadeando o processo de acidificação de drenagens que pode ocorrer em minas abandonadas ou em operação. A poluição hídrica, observada nas áreas de mineração, é decorrente da geração destes efluentes ácidos, provenientes das minas e dos rejeitos de carvão (LAUS et al., 2006; EVANGELOU, 2018).

Para Ma e Lin (2013) o estudo do processo de oxidação tem sido desenvolvido nas últimas décadas com foco em mineralogia e em casos de degradação ambiental, como a drenagem ácida em minas de carvão e outros minerais e em solos sulfatados ácidos. Alguns autores fazem a analogia da oxidação da pirita com as reações envolvidas durante o processo de corrosão do ferro e a precipitação de seus compostos. Sendo assim, pode-se supor que durante a oxidação da pirita tem-se uma corrosão generalizada sobre a superfície do mineral. Um sistema complexo de sulfetos em contato com um meio aquoso será composto de inúmeras células eletroquímicas atuando simultaneamente (PEREIRA *et al.* 2014; *apud* ALMEIDA, 1999).

Na fotografia 6 observa-se a pirita encapsulada entre as camadas do carvão. Material coletado do depósito de rejeitos no entorno da cidade de Criciúma-SC, região onde foi feita a coleta para desenvolver esta pesquisa.

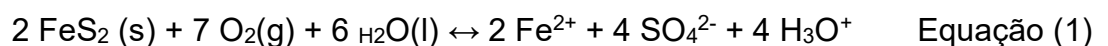
Fotografia 6 - Pirita encapsulada no carvão mineral



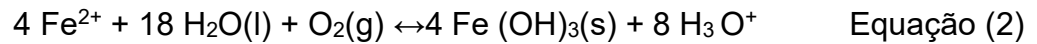
Fonte: Autoria própria (2019)

A oxidação da pirita ou pirrotita é o processo biogeoquímico mais relevante em depósitos de rejeitos de minas sulfídicas. Diferentes técnicas têm sido aplicadas para medir as taxas de reação: Fe acidofílico (II) - e microrganismos oxidantes de enxofre, que são os mais relevantes para a oxidação de sulfeto de metal. Os processos biogeoquímicos anaeróbicos em pilhas de minas sulfídicas são Fe (III) - e redução de sulfato, mas pouco se sabe sobre as taxas de reação, (SCHIPPERS *et al.*, 2010).

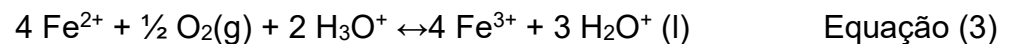
Em contato com o ar e a água, a pirita é rapidamente oxidada e dissociada, liberando Fe^{2+} em solução (Equação 1).



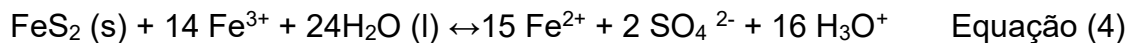
Que pode ser rapidamente oxidada a Fe^{3+} e precipitada na forma de hidróxidos, (Equação 2).



Depois de iniciada a reação 1, é desencadeado um ciclo onde o Fe^{2+} é oxidado a Fe^{3+} , (Equação 3).



Subsequentemente reduzido pela pirita (Equação 4), liberando Fe^{2+} e acidez adicional.



Segundo Attia (1993) é muito difícil dissociar a pirita do carvão mineral. As razões para as dificuldades de separação da pirita do carvão são muito complexas. A eficiência da rejeição da pirita pode ser baixa e variar a cada camada de carvão, dificultando assim, o aproveitamento eficaz do carvão e, gerando um percentual considerável de rejeitos, que por sua vez podem agregar carvão mineral ainda com potencial de uso.

2.2.1 Rejeito de carvão mineral e sua utilização na construção civil

Os estudos, objetivando o aproveitamento do uso do rejeito do carvão mineral como um componente dos materiais na construção civil já estão sendo realizados a algum tempo. Xiaoyan e Changsheng (2007) concluíram que por diferentes métodos de processamento, tais como: calcinação para ser usado como adição ao cimento; moagem e peneiramento onde os finos podem ser utilizados como adição no concreto; sendo os diâmetros maiores classificados para substituir parte dos agregados do concreto e tijolo oco sem carga e oco que suporta carga, agregado leve que substitui a argila para produtos cerâmicos.

Haibin e Zhenling (2010) comprovaram a possibilidade da confecção de compostos cerâmicos de rejeito de carvão mineral. Com alguns tratamentos prévios

ao qual submeteram os rejeitos, para que os mesmos não emitissem gases tóxicos durante a queima que é a etapa final da fabricação dos produtos cerâmicos. O processo consiste em um sistema avançado de queima do rejeito com o lodo proveniente da lavagem do carvão, para geração de energia. As cinzas volantes resultantes deste processo são umedecidas sendo transformadas em uma pasta que em conjunto com materiais apropriados são transformados em tijolos coloridos. O projeto produz 500.000 tijolos por ano, gerando 20 empregos com uma receita anual de 227.000,00 USD e um lucro anual de 45.390,00 USD. Cada tijolo economiza 1,5kg de argila.

Heidari; Sarrafi; Kakueinejad (2010), investigaram soluções possíveis para os rejeitos sólidos da lavagem de carvão mineral com o objetivo de utilizar estes rejeitos em uma indústria de cimento. Eles afirmam que o uso deste rejeito leva a economia de energia e de matérias primas do cimento. Os resultados da pesquisa levaram a uma resistência a compressão do cimento CP-II com rejeito, maior que a da referência, cerca de 4% aos 3 dias de cura, e 3,2% aos 28 dias de cura.

Frías, *et al.* (2012) comprovaram a atividade pozolânica do rejeito de carvão ativando o mesmo até 650°C e adicionando a pasta do cimento teores de 10% e 20%, atingindo valores de SO_3 3,0% e 3,3% respectivamente para 10% e 20% de rejeito e Fe_2O_3 de 3,0% e 3,7% para pasta com 10% e 20% de rejeito, valores estes admitidos pela norma Europeia. A resistência a compressão de todas as amostras ficou acima de 52,5MPa, que é o exigido pela norma Europeia para cimentos da classe 52,5 MPa, utilizado na pesquisa.

Wang (2014) estudou o efeito da granulometria do rejeito de carvão como agregado grosso no concreto fazendo uma relação entre agregados de 5-10mm com agregados de 10-20mm de diâmetro em 5 relações fracionárias diferentes (30/70, 38/62, 46/54, 54/46 e 68/38), denominando-as respectivamente de A1, A2, A3, A4, A5. O autor concluiu que usando o agregado grosso com 17% de rejeitos mais finos no diâmetro de 5-10mm, ou seja a fração de A4=54/46 os resultados de esforços a compressão, tração e flexão do concreto são maiores que as outras frações. A maior resistência à compressão de 28 dias, resistência à tração e resistência à flexão de aproximadamente 33,68 MPa, 3,14 MPa e 3,25 MPa, respectivamente, podem ser obtidas, com relação A/B= 54/46.

Belkheiri *et al.* (2015) comprovaram que o rejeito de carvão no Marrocos possui características (é formado essencialmente por sílica e argila) que se realizada uma

otimização da composição da mistura com calcário pode ser transformado em clínquer, contendo essencialmente as principais fases mineralógicas do mesmo, possibilitando assim a criação de pastas cimentícias. A percentagem de rejeito considerada ideal pela pesquisa em relação ao calcário foi de 18,5%, a calcinação foi realizada a temperatura de 1450°C, por um tempo de 40 min. Os principais óxidos resultantes da mistura $\text{CaO}=63,2$; $\text{SiO}_2=21,0$; $\text{Al}_2\text{O}_3=7,97$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=2,06$, semelhantes ao clínquer do cimento Portland.

Santos *et al.* (2015) concluíram que o uso de rejeitos de carvão mineral, como agregado miúdo substituindo a areia, em *pavers* para pavimentação, pode chegar até 50% do agregado miúdo a ser substituído por rejeitos de carvão mineral. A resistência a compressão dos *pavers* aos 90 dias foi de 27,2MPa, e a absorção de água aos 28 dias 1,44%.

Nos estudos de Rajesh *et al.* (2016) foi utilizado o rejeito do carvão mineral (CWR) como agregado graúdo na fabricação do concreto testando substituições de (0 a 50%), nas resistências a compressão, tração e flexão. O autor concluiu que a melhor porção a ser substituída é de 30% do agregado por rejeito, acima disto o concreto começa a apresentar uma queda de desempenho nas propriedades mecânicas. Segundo o autor o menor valor de esmagamento e resistência ao impacto do CWR é atribuído principalmente a diminuição nas propriedades de resistência à compressão, tração e flexão das misturas de concreto à base de CWR. Foi constatado ainda que a resistência à compressão de 28 dias do concreto com mistura 20% de CWR e 30% de CWR são comparáveis as resistências do concreto convencional CCC.

Devido à sua composição, rejeitos de mineração de carvão podem ser utilizados eficientemente como matéria-prima para tijolos queimados ecologicamente corretos, como materiais de construção. O processo consiste em submeter o rejeito a flotação de espumas realizada em temperatura ambiente, em uma célula de flotação descontinuada. Após a moldagem e queima dos tijolos concluiu-se que do ponto de vista ambiental, a recuperação de carvão por flotação de espuma resultou em uma redução significativa das emissões de CO_2 e SO_2 em 79,76% e 67,92%, respectivamente. A resistência a flexão aumentou de 9MPa para 11MPa em tijolos contendo 60% de rejeito em relação a referência, enquanto em tijolos confeccionados com 100% de rejeitos a resistência a flexão foi 83% maior que a referência (TAHA *et al.*, 2017).

Naghypour; Tazikeh; Hoseinian (2017) utilizaram os rejeitos de carvão como grãos finos em concretos com resistência a compressão de 20MPa e 31MPa. Em seguida estudaram várias porcentagens de substituição para o cimento e a areia na fabricação do concreto. Obtiveram os melhores resultados de resistência a compressão substituindo 10% de areia pelo rejeito e 5% de cimento pelo rejeito, com rompimento dos corpos de prova aos 28 dias de cura.

Zhou *et al.*, (2019) comprovaram através de análises científicas as propriedades básicas do rejeito de carvão como absorção de água e resistência ao esmagamento. Estes estudos resultaram em valores que comprovam a eficiência do rejeito de carvão como agregado substituindo o agregado natural no concreto. Os autores salientam a importância da análise química, para entender qual a temperatura máxima a ser submetido o rejeito, para que obtenha uma maior atividade pozolânica com menor custo de energia e chegaram à temperatura de 600°C, porém esta temperatura depende das propriedades de cada rejeito a ser utilizado. A temperatura de 600°C os minerais argilosos do rejeito foram convertidos em fases amorfas.

Wang; Qiu; Zeng (2020) afirmam que o rejeito usado para a fabricação de concretos leves pode causar fissuras durante o período das primeiras doze horas de cura, em função da retratibilidade do concreto por perda de água neste período. Segundo os autores pode ser corrigida com técnicas de melhoramento com aditivos redutores de água, ou também com um tratamento prévio de umedecimento do rejeito. Os autores usaram um método de pré umedecimento do rejeito usado como agregado fino na composição do concreto, com tempos pré-estabelecidos de 0h, 1h, 6h, 12h e 24h, chegando à conclusão que após doze horas de imersão o rejeito já havia chegado à saturação. Após 28 dias de cura submersa, as medidas de retração nos corpos de prova foram feitas em 1d, 3d, 7d, 14d, 28d e 56d. A conclusão é que quanto maior o tempo de pré umedecimento do rejeito, menor é a retração sofrida pelas amostras estudadas. Esta retração diminui também ao longo do tempo, aos 56d a retração lida foi menor que aos 7 dias. A resistência a compressão aumenta nos corpos de prova moldados com rejeito pré umedecidos até 12h, com os rejeitos pré umedecidos por 24h a resistência a compressão diminui.

Khataei e Nasrollahi (2020) estudaram a resistência a tração do concreto em comparação com o custo deste concreto, usando o método estatístico de superfície de resposta em 30 possíveis composições. Os autores chegaram à conclusão que substituindo 7,5% de cimento por rejeito de carvão no concreto, o resultado da

resistência a tração alcançado é igual à do concreto sem substituição de cimento por rejeito, com um custo de 5% mais barato na confecção do material.

Segundo Xiao; Ju; He (2020) o rejeito de carvão mineral sem fazer a ativação pozolânica, quando usado como agregado graúdo em concreto projetado, conforme se aumenta a granulometria do agregado do carvão, aumenta a resistência a compressão do concreto, porém, diminui a sua trabalhabilidade. A densidade do concreto cresce, aumentando a quantidade de agregados de rejeito de carvão mineral, o que se deve ao fato do rejeito ter uma densidade maior que a da areia de rio. Os autores afirmam a viabilidade do uso deste rejeito de carvão mineral como agregado graúdo no concreto projetado.

Malágon *et. al.* (2020), testaram o rejeito de carvão mineral de vários depósitos de rejeitos da Espanha para produção de *clínker*. A pesquisa foi desenvolvida dosando os materiais para a farinha do *clínker* com software para evitar erros de dosagem. Todos os *clínkers* foram testados de acordo com a norma europeia, considerando suas características físicas e químicas, propriedades e desempenho mecânico. Estes materiais cumprem os requisitos para um cimento CEM Tipo I (padrão europeu), com resistência a compressão de 42,5 MPa. A conclusão é que o uso de uma porcentagem controlada de rejeito de carvão mineral na produção de clínquer para o cimento *Portland* é tecnicamente viável.

Zhang e Ling (2020) pesquisaram a ativação pozolânica no rejeito de 4 formas diferentes: Ativação térmica, ativação mecânica, ativação de micro-ondas, ativação composta. A ativação composta feita por dois ou mais métodos de ativação é mais eficiente para o rejeito do carvão, pois o mesmo tem uma estrutura química estável (cristalina) resultando em uma baixa reatividade pozolânica. Portanto, para o componente caulinita de rejeito de carvão, métodos adequados de ativação são importantes para quebrar para baixo a estrutura da rede cristalina, e aumentar o amorfo, provocando assim uma melhora na reatividade pozolânica do rejeito. A conclusão dos autores é que os dois métodos mais eficientes para melhorar a reatividade pozolânica do rejeito do carvão são: O tratamento térmico (600-700 °C) e moagem física (finura de 300–400 m²/kg) são recomendados para ativar efetivamente a reatividade do rejeito de carvão, com uma proporção ideal de 10 a 20% em peso, do rejeito de carvão, em relação ao peso do cimento para melhorar as propriedades mecânicas do concreto. Segundo os autores ainda existem estudos e informações

muito limitadas sobre a durabilidade do concreto produzido com rejeito de carvão mineral.

A calcinação dos rejeitos com o objetivo específico de usá-los como cinzas volantes, gera um custo extra na utilização deste material, o qual seria eliminado com o estudo realizado por Zhang; Chen; Gao (2021), que propõe o uso do rejeito de auto ignição, ou seja, aquele material que já sofreu uma combustão espontânea interna na pilha do depósito de rejeito. Este material foi usado como adição mineral em estruturas pré-moldadas de concreto e submetidas a cura a vapor. Esta cura acelerou a atividade pozolânica do material. Foram testadas várias quantidades do material e a conclusão é que o rejeito de auto ignição usado como adição mineral (no teor de 30%-fração ideal a ser usada), no concreto submetido a cura a vapor, provoca uma queda de resistência inicial no concreto, se comparado com o concreto convencional. Esta resistência aumenta consideravelmente em idades mais avançadas como por exemplo 28 dias de cura, isto acontece com uma temperatura limite de até 80°C. Os testes mostraram também concretos com uma estrutura de poros mais refinados, favorecendo a durabilidade dos mesmos.

Zhao; Ren; Remennikov (2021) usaram rejeitos substituindo agregados no concreto, um novo conceito híbrido: pilares incorporando polímero reforçado com fibra, denominados pilares de CRC (concreto de rejeito de carvão) confinadas a FRP (Reforço de fibra de polímero), o que resultou em um crescimento da resistência a compressão significativamente melhorada dos pilares. Segundo os autores ainda não existe um banco de dados técnicos científicos que permita a comparação dos resultados descritos em seu artigo.

O uso de rejeito de carvão como materiais cimentícios complementares é considerado uma das estratégias eficazes para o descarte destes rejeitos. Zhao *et al.* (2021) testaram a moagem do rejeito úmido com o objetivo de aumentar sua atividade pozolânica. Concluíram que a moagem do rejeito úmido aumentou sua superfície específica, e diminuiu o tamanho da partícula com uma distribuição mais homogênea, aumentando assim ainda mais a fase amorfa, com o aumento da sua atividade pozolânica e não modificou sua composição nas fases mineralógicas. Compósitos com rejeito de carvão mineral moído úmido apresentam maior resistência a compressão e menor porosidade. Os autores recomendam estudos mais aprofundados em relação a durabilidade de concretos fabricados com rejeitos de carvão mineral.

2.3 Durabilidade do concreto

Durabilidade do concreto de cimento Portland é a capacidade do concreto em resistir à ação de intempéries, reações químicas com agentes agressivos, abrasão ou qualquer outro tipo de deterioração, sem perder sua funcionalidade e formato originais. Desta forma, considera-se o fim do tempo de vida útil de um determinado material quando sua utilização passa a ser insegura e antieconômica (ACI 201, 2008).

A NBR 15575-1- Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais (ABNT, 2013), define durabilidade como: capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções ao longo do tempo, e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção.

A classificação das causas de deterioração do concreto pode ser agrupada em três categorias: física, química e mecânica, das quais os principais problemas de durabilidade, como a corrosão do aço, são iniciados e desenvolvidos em uma estrutura de concreto (LI, 2011).

Vários estudos foram desenvolvidos em torno da deterioração do concreto, foram estudados tópicos como carbonatação, reação álcalis-agregados, corrosão de barras de reforço, ataque de sulfato, lixiviação e congelamento-descongelamento. Observando a degradação de uma estrutura de concreto, na maioria dos casos concluiu-se que esta degradação é o resultado de um efeito combinado de vários fatores ambientais e de carregamento. Isto fez com que pesquisadores passassem da análise de um único fator, para múltiplos fatores causadores da deterioração em uma única estrutura (DESMETTRE e CHARRON, 2013; KHELIDJ e CHOINSKA, 2012; DESMETTRE e CHARRON, 2012).

Para Olivier e Torrenti (2008) a durabilidade dos concretos está diretamente associada a capacidade dos mesmos de resistir a penetração de agentes agressivos, presentes no meio externo à sua rede de poros. Para que os concretos possam resistir a penetração de agentes agressivos, obter uma alta compacidade será sempre uma condição necessária para se evitar uma deterioração dos concretos. Embora esta seja uma afirmação verdadeira a presença de uma estrutura porosa é algo intrínseco nos concretos. A porosidade no concreto é concernente à dimensão dos poros presentes, neste sentido a durabilidade é diretamente influenciada pelos poros capilares (mesoporos e macroporos) e pela conectividade entre eles, a dimensão dos poros capilares faz com que estes governem os mecanismos de transporte das substâncias

nocivas do meio ambiente para dentro da estrutura do concreto, afetando assim a durabilidade do mesmo.

Processos mecânicos de deterioração podem causar perda de material de superfície do concreto ou rachaduras. É comum acontecer a combinação de ambos em estruturas de concreto. A perda de material pode ser problemática por dois motivos. Primeiro, uma perda de área da seção transversal comprometerá a capacidade de carga de um elemento estrutural. Também reduzirá a profundidade da cobertura do aço, expondo o mesmo a agentes externos suscetíveis de acelerar a corrosão. A fissuração também pode comprometer o desempenho estrutural. No entanto, a formação de rachaduras fornecerá rotas para espécies químicas nocivas ao concreto e em direção a armadura. Esta deterioração pode acontecer de forma química por ataque de sulfatos, reação álcalis agregados e ataques ácidos. É importante considerar ainda a possibilidade de que alguns constituintes podem apresentar ameaças químicas de dentro do próprio concreto (DYER, 2014).

Sumalatha; Sree; Kumar, (2016) estudaram as propriedades de durabilidade do concreto composto com rejeito lavado de carvão mineral com proporções de 0% a 50% e vários teores de rejeito de carvão mineral. Foram estudadas propriedades como: absorção, resistência a compressão e retração por secagem. As composições com 30% de rejeito substituindo o agregado graúdo podem ser consideradas como nível ótimo para a indústria da construção civil. As misturas com a cinzas volantes provenientes da calcinação do rejeito de carvão mineral, substituindo o agregado fino, bem como cimento foram usadas nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Observou-se um aumento significativo na durabilidade do concreto com rejeito de carvão mineral, em relação ao concreto convencional. Este aumento foi atribuído a atividade pozolânica do rejeito, e também aos finos do rejeito que contribuíram no preenchimento dos vazios do concreto.

Caneda-Martínez *et. al.* (2019) pesquisaram a corrosão por cloretos em armaduras de corpos de prova de argamassas, preparados com rejeitos de mineração de carvão ativado termicamente. Os corpos de prova foram preparados para provocar dois efeitos opostos: um atraso na penetração do íon cloreto e uma redução no conteúdo crítico de cloreto necessário para iniciar a corrosão. Concluíram que a inclusão do rejeito induz um aumento geral no tempo de início da corrosão, que foi mais visível em taxas de substituição mais altas. A taxa de propagação da corrosão

também diminuiu com o aumento das quantidades de rejeito, com 13% a 21% menos perda de seção de reforço nas argamassas com as maiores taxas de substituição.

A presença de materiais deletérios pode prejudicar a durabilidade do concreto pois estes podem reagir com substâncias presentes no concreto, que podem provocar expansões e tensões internas na pasta do cimento endurecida. Deve-se evitar também o estado de alteração dos minerais, como calcinação e carbonatação, pois podem influenciar na durabilidade do concreto (DNPM, 2015).

2.3.1 Carbonatação

A carbonatação do concreto é uma das principais razões para a deterioração de estruturas de concreto sob condições atmosféricas. Dióxidos de carbono (CO_2) no ar ambiente se difunde no concreto e reagem com os hidratos, levando à queda do pH na solução dos poros da cobertura de concreto (Li *et. al.* (2020).

A carbonatação do concreto está relacionada a múltiplos problemas relativos a processos físicos e químicos complexos. O mecanismo de ação da carbonatação tem início na difusão do CO_2 em poros do material cimentício, encontrando a água intersticial oriunda da umidade relativa do ar ou de infiltração de água de chuvas ou subterrâneas. A água promove a solvatação do CO_2 que libera o ácido carbônico e espécies iônicas. Conseqüentemente, o pH da solução porosa torna-se ácido causando desequilíbrio iônico que tende a ser normalizado com a liberação do Ca^{+2} dos componentes hidratados do cimento Portland. A carbonatação torna-se efetiva quando o ácido carbônico reage com componentes predominantes na pasta cimentícia: o hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o trissulfoaluminato de cálcio hidratado [$\text{Af}(\text{t})- 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$] e o monossulfoaluminato de cálcio hidratado ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). A taxa de carbonatação é a mais alta em uma condição de umidade relativa média (PAPADAKIS *et.al.*, 1991; MACHADO *et. al.*, 2020).

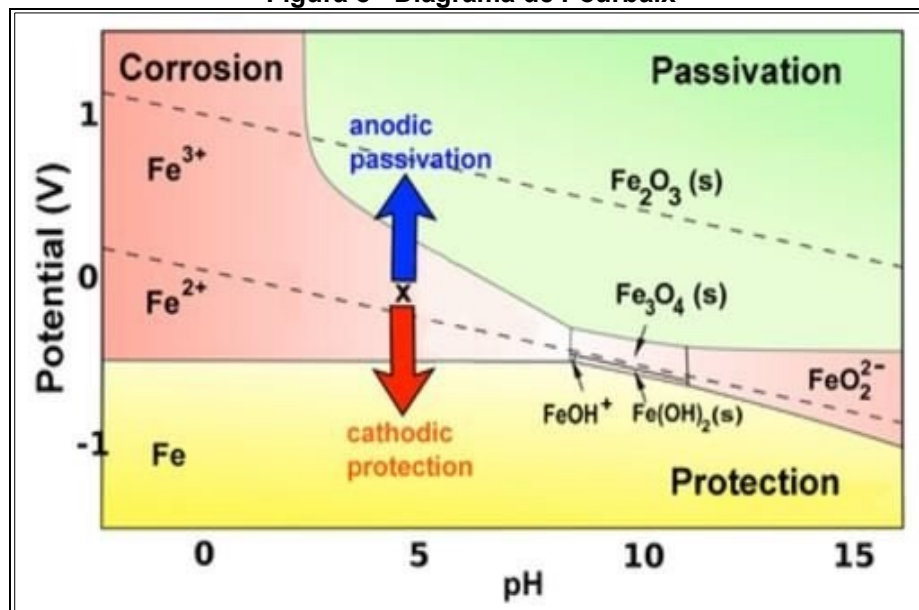
O impacto da alcalinidade na carbonatação pode ser modificado substituindo cimentos comuns por cimentos com diferentes teores de cinzas volantes, provocando assim mudanças na microestrutura e na migração de seus constituintes. Concluiu-se que a taxa e capacidade de reação de carbonatação foi inversamente proporcional para a alcalinidade do sistema. A taxa de carbonatação é geralmente mais lenta em cimentos de alto teor alcalino. Para cimentos com taxa de alcalinidade mais baixa em função da mistura de cinzas volantes, pode ser compensada pela menor

permeabilidade de suas pastas de cimento obtidas por cura adequada (URBONAS; LENO; HEINZ, 2016; BRANCH *et al.*, 2016; BERTOLINI *et al.*, 2013).

Já para Medeiros; Raisdorfer; Hoppe; (2017), a carbonatação não está exclusivamente relacionada com a alcalinidade do concreto, pois segundo eles a redução do teor de portlandita no compósito de cimento Portland pode facilitar o processo de carbonatação. Contudo o refinamento dos poros devido a atividade pozolânica e o aumento no empacotamento de partículas tende a criar uma barreira física ao ingresso de CO_2 , o que reduz o efeito da carbonatação.

O consumo de hidróxido de cálcio e redução da concentração de hidroxilas, fazendo com que o pH da solução intersticial do concreto reduza de valores acima de 12,5 para valores inferiores a 9, favorecendo a despassivação do aço de reforço e uma posterior corrosão generalizada do mesmo, de acordo com o diagrama de Pourbaix mostrado na figura 8.

Figura 8 - Diagrama de Pourbaix



Fonte: Mazer, (2021)

A relação água/aglomerante do concreto é um dos principais fatores que impactam direto no processo da carbonatação. Concretos com relações água/aglomerante menores do que 0,45 podem ser considerados com velocidade de carbonatação praticamente desprezível, mas acima desse limite o aumento na relação água/aglomerante e o aumento no teor de pozolana, bem como a rede capilar do concreto, podem acelerar o processo de carbonatação. Como o fenômeno de

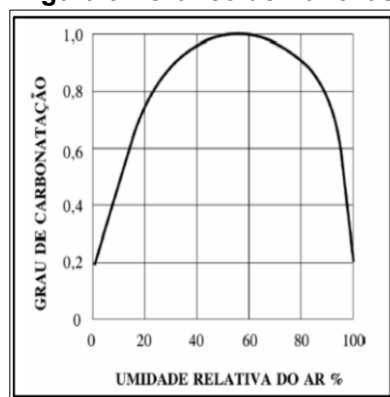
carbonatação não é perceptível a olho nu, e em algumas vezes ele não reduz a resistência do concreto, em alguns casos até aumenta a sua dureza superficial, a identificação da frente ou profundidade de carbonatação requer ensaios específicos (POSSAN, 2010; PAPADAKIS, 2000, *apud* MEDEIROS; RAISDORFER e HOPPE, 2017; MARUYA *et. al.*, 2003; ANDRADE, 2005).

A umidade relativa (UR) e a concentração de CO₂ na atmosfera, são os dois principais influenciadores da carbonatação no meio ambiente. Em geral, aceita-se que em concentrações abaixo de 3-4% de CO₂, o processo não altera a composição dos produtos formados durante a carbonatação no ar ou em ambientes naturais (GALAN; ANDRADE; CASTELLOTE, 2013).

Atualmente não existe um consenso entre pesquisadores sobre qual a concentração ideal de umidade relativa a ser usada em ensaios acelerados de carbonatação, ficando a aplicação desta concentração em função dos objetivos dos ensaios.

Quando a umidade relativa é muito baixa decresce o nível da carbonatação e conforme cresce a umidade relativa aumenta a carbonatação, sendo o seu nível máximo com a umidade relativa em torno de 60% e o nível de carbonatação diminui novamente perto da saturação de água nos poros capilares do concreto, pois neste ponto os poros do concreto estão fechados, conforme demonstrado pelo gráfico de Canovas (1988) na figura 9.

Figura 9 - Gráfico de Canovas



Fonte: Canovas, (1988).

Morandea; Thierry; Dangla; (2014), ressaltam que a carbonatação produz mudanças importantes nas matrizes cimentícias como redução da porosidade e da permeabilidade, menor conectividade entre os poros, maior superfície específica,

entre outras propriedades, mas o efeito desse impacto na microestrutura ainda é objeto de investigação, e muitas vezes, de divergência de opiniões entre os pesquisadores.

2.3.2 Ataque por sulfatos

O ataque de sulfato é um dos principais fatores que causam a deterioração da estrutura de concreto, quando provocada pela expansão. Essa expansão é atribuída a reações de íon sulfato com alguns produtos de hidratação na estrutura do concreto. Os testes de resistência ao sulfato são geralmente conduzidos através do armazenamento de amostras em uma solução de sulfato de sódio ou magnésio, ou uma mistura dos dois. O efeito do ataque de sulfato geralmente é avaliado através de vários indicadores: variações de comprimento, perda ou aumento de massa, diferença de dureza superficial, diminuição da resistência e do módulo de elasticidade. No entanto, esses indicadores não fornecem informações suficientes, para avaliar as reações químicas e entender os mecanismos de danos, como também não podem ser relacionados ao desempenho da estrutura em condições reais. Métodos de testes inovadores são imperativos para estudar a degradação da estrutura de concreto causada pelo processo de ataque de sulfato (LI, 2011; OUYANG, 2014; SIRISAWAT, 2014; HOPPE FILHO *et al.*, 2015; JIANG e NIU, 2016).

Praticamente todas as teorias que buscam descrever o ataque por sulfatos baseiam-se na difusão, e na penetração dos sulfatos para dentro da matriz cimentícia. No caso do agregado contaminado ou de outra contaminação que já esteja presente na massa de concreto, as hipóteses apresentam limitações e o período de indução tende a ser reduzido, uma vez que a barreira protetora proporcionada pela porosidade do concreto não parece ter influência significativa sobre o ataque (PEREIRA, 2015).

Brunetaud; Dlvét; Damidot (2008) atribuíram a ocorrência do ataque de sulfatos devido a uma combinação de dois fatores: A precipitação de produtos secundários de sulfato, potencialmente expansivos, e uma deterioração químico-mecânica dos concretos.

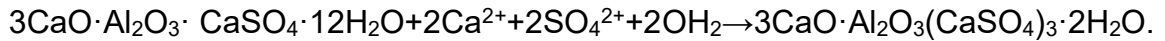
No entanto segundo Brunetaud; Khelifa-Al; Mukhtar (2012) dentro do âmbito do ataque por sulfatos, deve-se destacar que é mais comum que haja ataque de sulfato externo, em que existe um ambiente externo rico em sulfato. O ataque externo de sulfato no concreto é uma doença relacionada à formação expansiva de hidrato de sulfato em uma matriz cimentícia endurecida.

Os íons sulfatos estão presentes no solo, água, água do mar e águas residuais. Esta reação dos íons sulfatos com a água pode levar à formação de gesso, etringita e/ou taumasita e pode causar rachaduras, fragmentação, amolecimento, expansão, perda de resistência, e outras formas de danos. Fatores físicos e químicos, como o pH da solução e sua concentração, o cátion associado, o tipo de aglutinante, a relação água cimento do concreto e as condições de cura, podem influenciar o ataque externo de sulfatos. O efeito deste ataque pode ser investigado, com testes que correlacionem o risco de expansão, tempo de início da expansão e a expansão em um determinado momento. A composição do cimento também é um fator relevante para a ocorrência do ataque externo de sulfato (EL-HACHEM *et. al.*, 2012; DIER, 2014).

O ataque de sulfato também pode ocorrer quando o concreto entra em contato com ácido (H_2SO_4). A exposição à esta fonte, produz o ataque de sulfato como também a corrosão do concreto. O ácido sulfúrico pode surgir de várias fontes, como o dióxido de enxofre derivados da queima de combustíveis fósseis que oxidarão na atmosfera e produzirão H_2SO_4 . As bactérias redutoras de sulfato e oxidantes agem juntas para converter compostos de enxofre em gás H_2S , que será convertido em enxofre que reage com o oxigênio atmosférico. Este enxofre pode então ser digerido por bactérias oxidantes, produzindo H_2SO_4 . Vários processos industriais também utilizam o H_2SO_4 , ou o produzem como subproduto. Estruturas de concreto nas usinas onde tais atividades são realizadas podem entrar em contato com esta substância (DYER, 2014).

Os íons sulfatos reagindo com produtos hidratados do cimento como o hidróxido de cálcio e aluminatos formam a etringita ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (CaSO_4)_3 \cdot 32H_2O$). Este tipo de ataque ocorre quando os cátions associados com os íons sulfato são sódio, potássio ou cálcio, que são extremamente expansivos. A etringita é um produto da reação de hidratação do cimento Portland e desempenha um papel importante durante o início da pega e endurecimento do concreto. Porém, quando formada no interior do concreto após o final da pega e endurecimento do mesmo, em grandes quantidades, o efeito pode ser problemático. Sabe-se que o concreto não tem boa capacidade de deformação e nesta fase, conseqüentemente, a expansão causada pela formação da etringita pode causar rachaduras e degradação do concreto endurecido. Na fase endurecida do concreto, quando o mesmo já passou pelo processo inicial de cura, o alumínio está presente como etringita, normalmente esta fase será monossulfato ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$). Embora misturar os

constituintes e as condições ambientais podem produzir fases incluindo sal de Friedel ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$), moncarbonato ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$) e hemicarbonato ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 1/2\text{CaCO}_3\cdot 1/2\text{CaO}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$). A reação com o monossulfato é a seguinte:



O cálcio adicional necessário para esta reação é obtido de diferentes fontes, dependendo do cátion associado ao sulfato. Se o sulfato estiver presente como CaSO_4 , o íon associado fornece todo o cálcio necessário para a reação. No entanto, quando o sulfato de sódio ou de potássio está envolvido, o cálcio vem dos produtos de hidratação da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou do gel de C-S-H. Caso o cálcio seja obtido a partir do gel C-S-H, Ca/Si a proporção do gel diminui, e pode se dizer que o gel ficou descalcificado. Quando não restam mais fases de monossulfatos, os íons sulfatos se combinam com íons de cálcio para formar gesso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), (MARCELINO *et al.*, 2016; DYER, 2014; PEREIRA *et al.*, 2014).

Ouyang; Chen; Jiang; (2014) concluíram que existe um mecanismo de competição de efeito de aprimoramento e efeito de enfraquecimento, porque a dureza da superfície do concreto estável aumenta no início do endurecimento. Testes de DRX indicaram que o efeito de aprimoramento e enfraquecimento são todos causados por etringita tardia e gesso. O mecanismo de trincas e deformações é produzido pelo efeito de preenchimento de etringita tardia e gesso, e o mecanismo de enfraquecimento é induzido pela evolução do dano devido sua força de expansão.

Oliveira; Cavalaro; Aguado; (2013) concluíram que a produção de apenas 1mol de etringita pelo mesmo mecanismo é responsável por um aumento volumétrico de $3,94\cdot 10^{-4}\text{ m}^3$, enquanto à recristalização a partir do monossulfato pode contribuir com uma expansão de $2,48\cdot 10^{-4}\text{ m}^3\cdot \text{mol}^{-1}$.

O ataque interno de sulfato é aquele em que o agente agressivo está presente na massa de concreto de forma distribuída, tendo origem nos materiais empregados na dosagem do concreto (CAPRARO *et al.*, 2017).

Segundo Pereira *et al.* (2014) o ataque por sulfatos de origem interna é uma manifestação patológica bastante agressiva, uma vez que o contaminante já se encontra presente no interior do concreto. Dos minerais sulfetados existentes, a pirita é o mais comum, sua oxidação produz íons sulfatos e íons ferrosos, que são

responsáveis pelas expansões iniciais do concreto, por sua vez as reações dos sulfatos com o cimento são as responsáveis pelas expansões mais significativas.

Kihara e Centurione (2005) afirmam que a mais simples formulação do cimento Portland resulta da moagem do clínquer previamente obtido com uma ou mais formas de sulfato de cálcio em pequenas proporções (3 a 5% do volume) com o objetivo de regular o tempo de pega ou endurecimento inicial.

O resultado da resistência final do concreto está diretamente ligado ao tipo de cimento utilizado para sua confecção, bem como o tempo de cura do concreto, o agregado e óxidos que compõem o cimento são relevantes para atingir a resistência prevista para o uso do concreto. Os principais parâmetros de desenvolvimento da resistência do cimento são: A finura, as fases químicas do cimento, tempo e temperatura de hidratação, porosidade total e estrutura dos poros, sendo assim o grau de hidratação afeta diretamente a porosidade e resistência do cimento e sua pasta no concreto (NOSRATI *et al.*, 2018).

O uso de adições minerais na composição do material ligante para substituir parcialmente o cimento provoca alterações microestruturais, que interferem na porosidade da matriz hidratada e principalmente na distribuição granulométrica, tamanho e interconectividade dos poros. Isso influencia positiva ou negativamente o influxo de água contendo íons sulfato na estrutura (HOPPE FILHO *et al.*, 2015).

A maioria dos estudos desenvolvidos nos últimos 50 anos sobre o ataque interno de sulfatos concentram-se nos agregados sulfatados na natureza. Existem normas que estabelecem os limites máximos de contaminação por SO_3 a serem utilizados em estruturas de concreto. As normas mais difundidas internacionalmente e uma norma brasileira, que são:

- American Concrete Institute – ACI 201 (2002) – estabelece um limite de 0,5% de SO_3 em relação ao peso total do agregado;
- Norma francesa AFNOR (Association Française de Normalisation) NF P 18-541 (1997) – estabelece, para o concreto hidráulico, a quantidade máxima de enxofre (S) expresso em SO_3 de 1% ou 0,75% de pirita (FeS_2) em relação à massa do agregado.
- Norma Americana ASTM American Society for Testing and Materials) C294-05 - Esta norma americana não diferencia entre os sulfetos, pirita ou pirrotita em suas especificações.
- A Norma Italiana UNI (Ente Italiano di Normazione) 8520-2 (2016), estabelece um limite máximo de (S) expresso em SO_3 de 0,20% do peso total de agregados.

- A norma brasileira NBR 7211- Agregados para concreto – Especificação, (ABNT, 2019), estabelece um limite de SO_4^{2-} , de todos os constituintes do concreto (água, agregados, cimentos, adições e aditivos químicos), em relação à massa total da mistura, igual a 0,2%.

Porém, estas normas tratam este valor limite para o enxofre total nos agregados não diferenciando o tipo de sulfato se pirita ou pirrotita. Uma exceção é:

- A norma Europeia EN 12620:2008, que recomenda caso seja detectado na composição do agregado pirrotita, uma forma instável de sulfeto de ferro FeS , o valor máximo do enxofre total não deve exceder 0,1%. Este valor é 10 vezes menor do que o usualmente aceito para agregados contendo sulfetos de ferro.

Para Chinchón-Payá; Aguado; Chinchón (2012), este fator recomendado pela Norma Europeia 12620:2008, é exagerado do ponto de vista de muitos engenheiros, e pode resultar na prática, em perdas de agregados adequados que foram rejeitados desnecessariamente em alguns locais em função do teor de sulfato.

A concentração de oxigênio, presença de umidade, superfície específica do sulfeto mineral, teor de ferro contido no sulfeto, presença de bactérias, temperatura ambiente, morfologia do sulfeto e pH do sistema, são os principais fatores que contribuem para a oxidação (GOMIDES, 2009).

Segundo Marcelino *et al.* (2016) a taxa de oxidação de sulfeto do agregado depende da difusão de oxigênio através da camada de óxido (hidróxido) formada ao redor dos grãos de sulfeto e a subsequente mudança de sua área de superfície. Concluíram também que o teor de enxofre limite contido nos componentes do concreto a serem usados na sua composição deve ser prescrito de acordo com o tipo de sulfeto de ferro, apresentado na composição destes componentes e não apenas pela quantidade total de enxofre.

Segundo Ribeiro *et al.* (2014) todo o processo de ataque de sulfatos ao concreto pode contribuir também com a corrosão das armaduras, pois a exposição das mesmas a meios agressivos onde contenha íons sulfatos devido a formação da etringita, gipsita e monossulfato, tende a diminuir o pH da solução dos poros do material chegando próximo a neutralidade ($\text{pH}=7$). Criando assim condições para que aconteça a passivação da armadura pois os óxidos formados durante o processo são dissolvidos, deixando o concreto armado mais susceptível a corrosão, além disso, o mecanismo de deterioração do concreto por reação com íons sulfato leva ao

surgimento de fissuras no material, as quais possibilitam maior interação da armadura de aço com os agentes agressivos, promovendo a aceleração do processo corrosivo.

Sudharshan e Kumar (2017) submeteram três traços de concreto, (concreto convencional, concreto com 30% de rejeito de carvão mineral como substituição ao agregado graúdo, e concreto com 30% de cinzas volantes oriundas da queima do rejeito do carvão mineral substituindo o cimento). Os corpos de prova eram cubos de concreto e foram submetidos a 28 dias de cura submersa, eles foram analisados após 30, 60 e 90 dias de imersão em substâncias ácidas em temperatura ambiente. As amostras foram submetidas a três ataques ácidos, isto é, 5% de ácido clorídrico (HCl), 5% de sulfato de magnésio ($MgSO_4$) e 5% de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Foram investigados resistência a compressão, peso e pulso ultrassônico antes e após o ataque ácido. A conclusão é que o concreto convencional tem um comportamento semelhante ao concreto com 30% de rejeito de carvão mineral, substituindo o cimento, sendo mais eficiente que o concreto com 30% de cinzas volantes provenientes da queima do rejeito do carvão mineral em ambientes ácidos.

2.3.3 Envelhecimento acelerado – Câmara de climatização

Segundo a NBR 15575-1 - Edificações gerais habitacionais — Desempenho Parte um, (ABNT, 2021) manifestações patológicas são: “irregularidade que se manifesta no produto em função de falhas no projeto, na fabricação, na instalação, na execução, na montagem, no uso ou na manutenção, bem como problemas que não decorram do envelhecimento natural”.

O ensaio de envelhecimento acelerado pode ser aplicado em corpos de prova de argamassa ou de concreto, bem como em placas cimentícias, para projetar a durabilidade de um material exposto ao tempo, permitindo assim um levantamento das manifestações patológicas que podem ocorrer nos materiais ou nas estruturas, em um espaço de tempo determinado.

A partir de 2014, com a entrada em vigor da Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) o Brasil começou a contar com um método de envelhecimento acelerado por ciclagem térmica normalizado, descrito na seção quatro da referida norma. Essa norma é aplicada a sistemas de vedação verticais, sendo que, a mesma norma cria requisitos de funcionalidade, segurança estrutural, estanqueidade, desempenho térmico, desempenho acústico, durabilidade e manutenibilidade. Apesar disso os parâmetros de execução e análise dos resultados dos ensaios de

envelhecimento acelerado adotados pela NBR 15575-4 (2013), embora sejam bastante abrangentes não contemplam a microestrutura da argamassa ou do concreto, não fornecendo informações do que efetivamente está acontecendo ao longo do tempo, na estrutura durante o processo de envelhecimento (SENTENA; KAZMIERCZAK; KREIN, 2018).

A literatura sugere algumas formas mais utilizadas para realizar ensaios de envelhecimento acelerado, que são:

- Envelhecimento natural – Consiste na exposição de corpos de prova ao ambiente com ou sem o contato com as intempéries. Não existe uma normatização para este ensaio.
- Envelhecimento por imersão – Ensaio regulamentado pela ASTM 4792 (2019).
- Envelhecimento cíclico – Consiste em ciclos de imersão e secagem dos corpos de prova.
- Câmara de climatização- Ambiente controlado automaticamente onde são colocados os corpos de prova que receberão umidade e calor conforme programação da câmara, simulando temperaturas e umidades reais de uma determinada região.
- A NBR 15575-4 - Desempenho Parte quatro: Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE (ABNT, 2013), propõe um ensaio de ciclos térmicos em painéis para testar o desgaste, degradação e envelhecimento dos painéis verticais das edificações.

Lima et al. (2019) comprovaram a importância do ensaio de envelhecimento acelerado, com os resultados diferenciados para corpos de prova submetidos ao envelhecimento e os não submetidos. Com estes resultados foi possível simular uma melhoria na mistura das argamassas para aumentar a resistência mecânica e diminuir a fissuração do material.

Segundo De Freitas *et. al.* (2008) a variação de temperatura, a variação da umidade relativa, a incidência de radiação solar e as precipitações, são os agentes de degradação de maior importância, sendo fundamentais em ensaios acelerados de envelhecimento. Os principais requisitos a serem avaliados, em diferentes momentos durante o ensaio de envelhecimento acelerado do revestimento são: o coeficiente de absorção de água por capilaridade, a permeabilidade à água, a adesão ao substrato e características da superfície do revestimento, como o nível de fissuração e as diferenças de coloração.

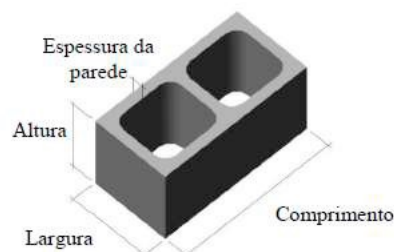
2.4 Blocos de concreto

Os blocos de concreto são elementos antigos na construção civil, que surgiram logo após o descobrimento do cimento Portland. De forma maciça e com alto consumo de material, foram ao longo do tempo sendo adequados para formas mais leves e com um menor consumo de material, hoje representam papel importante na construção civil fabricados com formatos vazados.

A alvenaria estrutural com blocos de concreto é um sistema construtivo que vem ganhando espaço na indústria da construção civil brasileira, justamente por permitir uma redução no prazo de conclusão das construções e uma economia no custo final dos empreendimentos. Em 2013 o parque industrial brasileiro contava com capacidade instalada mensal de 100 milhões de blocos estruturais de concreto (SANTIAGO e BECK, 2018).

A norma NBR 6136 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos (ABNT, 2016) define blocos de concreto como sendo: “componente para execução de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75 % da área bruta”. Na figura 10 está representado como a norma determina a leitura das medidas para identificar os blocos por família.

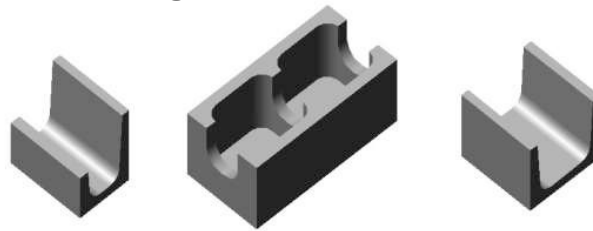
Figura 10 - Identificação geométrica do bloco



Fonte: ABNT (2016)

A NBR 6136 (2016) ainda especifica tipos de blocos que são fabricados com o objetivo de facilitar a montagem da estrutura em obra. Nas figuras 11 e 12 estão demonstrados estes blocos, denominados de bloco canaleta e bloco compensador.

Figura 11 - Bloco canaleta



Fonte: ABNT (2016)

Figura 12 - Bloco compensador



Fonte: ABNT (2016)

A norma brasileira NBR 6136 (2016) divide os blocos de concreto em famílias conforme as suas dimensões nominais. Essa normativa foi criada para auxiliar a execução da edificação com o bloco de concreto, pois sua dureza dificulta o corte do mesmo na obra. As mesmas famílias podem ser produzidas para alvenaria estrutural ou de simples fechamento.

O bloco normatizado é produzido nas categorias estrutural e de vedação, de acordo com a aplicação, para fins estruturais ou apenas de fechamento. É interessante destacar que os blocos de concreto devem estar em conformidade com as especificações das normas técnicas brasileiras, para que possam desempenhar com segurança sua função dentro da construção, em alvenaria estrutural ou de vedação. Possuem formatos e dimensões padronizadas que, quando aplicados dentro da boa técnica, proporcionam um sistema construtivo limpo, prático, rápido, econômico e eficiente. De acordo com a NBR 6136 (2016) as seguintes características devem ser observadas: absorção de água por imersão, resistência característica a compressão (MPa), avaliação dimensional das peças e verificação das dimensões dos blocos conforme os limites de tolerância prescritos em norma (DE OLIVEIRA ROCHA, 2017; FERNANDES, 2013).

Na tabela 4 estão distribuídas as famílias de blocos e suas dimensões nominais.

Tabela 4 - Famílias de blocos

Famílias de blocos – Medidas nominais em mm									
Família	20x40	15x40	15x30	12,5x40	12,5x25	12,5x37,5	10x40	10x30	7,5x40
Largura	190	140	140	115	115	115	90		65
Altura	190	190	190	190	190	190	190	190	190
					Comprimentos				
Inteiro	390	390	290	390	240	395	140	190	190
Meio	190	190	140	190	115	-	190	190	140
2/3	-	-	-	-	-	240	-	190	-
1/3	-	-	-	-	-	115	-	90	-
Amarração "L"	-	340	-	-	-	-	-	-	-
Amarração "T"	-	540	440	-	365	-	-	290	-
Compensador A	90	90	-	90	-	-	90	-	90
Compensador B	40	40	-	40	-	-	40	-	40
Canaleta inteira	390	390	290	390	290	365	3690	290	-
Meia canaleta	190	190	140	190	115	-	190	140	-

Fonte: Adaptada da NBR 6136 (2016).

Os principais insumos dos blocos de concreto são materiais como cimento, agregados (areia natural ou industrial, pedrisco, pó de pedra) e água, sendo que o pedrisco é o agregado responsável pelo acabamento das peças. Se for necessário a fabricação um bloco aparente o pedrisco deverá ter em sua composição granulométrica valores máximos característicos de aproximadamente 6,3mm de diâmetro, e para blocos que farão a composição de uma alvenaria rebocada pode ser utilizado um pedrisco de diâmetro máximo de 9,5 mm. Devido aos padrões de tamanho sugeridos pela NBR 6136 (2016), que os blocos devem seguir (espessura mínima de parede tanto para o estrutural, como para o de vedação) estas especificações limitam a granulometria máxima do agregado à zona de graduação zero para uso de agregado na produção de blocos, já que ele geralmente “não pode possuir grãos com diâmetro superior a metade da espessura da menor parede do bloco, e também define que os blocos devem atender as dimensões padronizadas permitindo-se tolerância de ± 2 mm para a largura e ± 3 mm para altura e comprimento” NBR 6136 (2016).

De acordo com Raphael Baldusco (2019) pesquisador do Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), para fabricar blocos de concreto com qualidade, deve-se tomar alguns cuidados como a caracterização adequada dos agregados a serem utilizados, uso de equipamentos em bom estado para produzir misturas e blocos homogêneos, cura em ambiente com temperatura controlada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão descritos os materiais utilizados, e a metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa.

Para um melhor entendimento do processo aplicado e acompanhar seu desenvolvimento, este capítulo foi dividido em três partes.

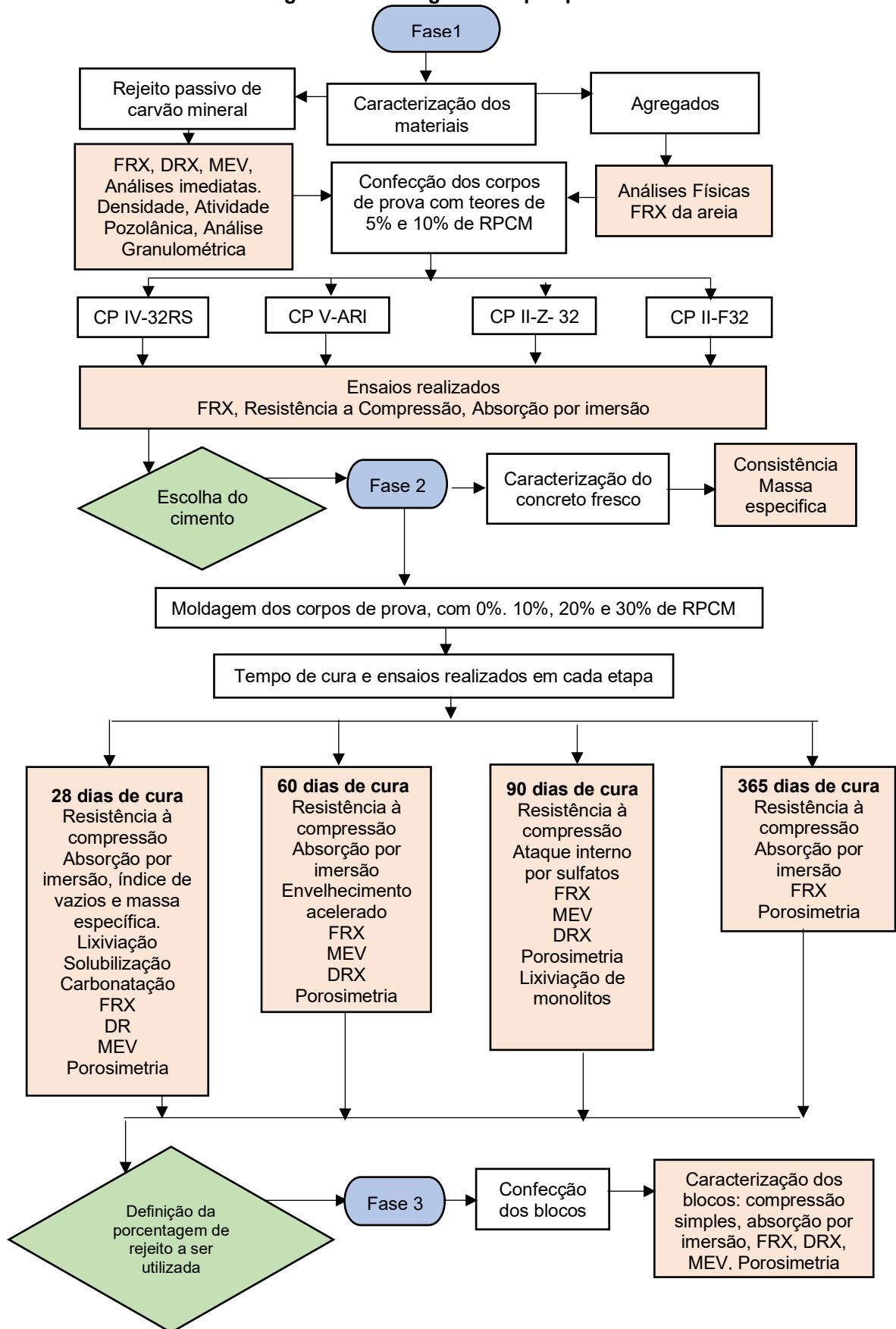
3.1 Fase 1 - Caracterização dos materiais e definição do tipo de cimento mais apropriado para a pesquisa. A compatibilidade química do cimento com o rejeito passivo do carvão mineral foi estudada nesta fase, sendo levado em consideração a importância desta compatibilidade para o desempenho químico do concreto no decorrer da pesquisa. Foram testados três traços de concreto, um com 0% de rejeito passivo de carvão mineral, traço de referência, e nos outros dois foram usadas duas porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento (5% e 10%), e foram analisados o desempenho químico, físico e mecânico das composições.

3.2 Fase 2 – Com o cimento a ser usado, definido na fase 1 da pesquisa, foram moldados os corpos de prova com as diferentes porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento, 0% (traço de referência), 10%, 20% e 30%, porcentagens definidas para esta etapa da pesquisa. Foram realizados ensaios físicos e mecânicos, análises químicas e mineralógicas para medir o desempenho de cada traço. Testes de durabilidade das amostras de concreto, produzidas com as diferentes porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral, sugeridas no decorrer da pesquisa, substituindo parte do cimento. Definição da porcentagem ideal de rejeito passivo de carvão mineral a ser utilizado na substituição do cimento, para a moldagem dos blocos.

3.3 Fase 3 - Moldagem dos blocos de concreto, com a porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral definida na fase 2. Caracterização física e de esforços mecânicos, caracterização química e mineralógica, análise da microestrutura do concreto dos blocos referência e com rejeito passivo de carvão mineral.

No fluxograma da figura 13 está descrito como foi desenvolvida a pesquisa, nas três fases, e também estão apresentados os ensaios executados em cada uma das fases da pesquisa.

Figura 13 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2020)

3.1 Metodologia da fase 1

O rejeito passivo de carvão mineral em sua composição apresenta elementos químicos como, (SiO_2 , SO_3 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , K_2O , TiO_2 , MnO). Esses elementos também compõem os cimentos, sendo assim para um melhor entendimento da forma como esses dois materiais, cimento e rejeito passivo de carvão mineral, irão se comportar juntos, foi necessário a definição do cimento a ser utilizado, que apresente um melhor desempenho e compatibilidade com o rejeito passivo de carvão mineral. Proporcionando assim uma maior estabilidade química ao conjunto de rejeito, cimento, agregado e água. Para isso foi decidido testar alguns cimentos mais comuns na indústria de pré-moldados.

Foram utilizadas quatro classes diferentes de cimento Portland, o CP IV–32-RS, CP V-ARI, CP II-Z-32, CP II-F-32, areia natural da região de Curitiba-PR, brita zero, água e rejeito passivo de carvão mineral.

As variáveis independentes da primeira fase da pesquisa são;

- Os cimentos CP IV–32- RS, CP V-ARI, CP II-Z-32, CP II-F-32.
- Quantidade de rejeito a ser usada, 5% e 10% do peso do cimento substituído por rejeito passivo de carvão mineral.

As condições fixas da primeira fase da pesquisa são:

- A quantidade de agregados em massa.
- A relação água/aglomerante de 0,5.
- O traço do concreto utilizado 1:2:3 (cimento, areia e brita).
- Tempo de cura das amostras de 28 dias.

Os materiais utilizados na pesquisa serão descritos a seguir.

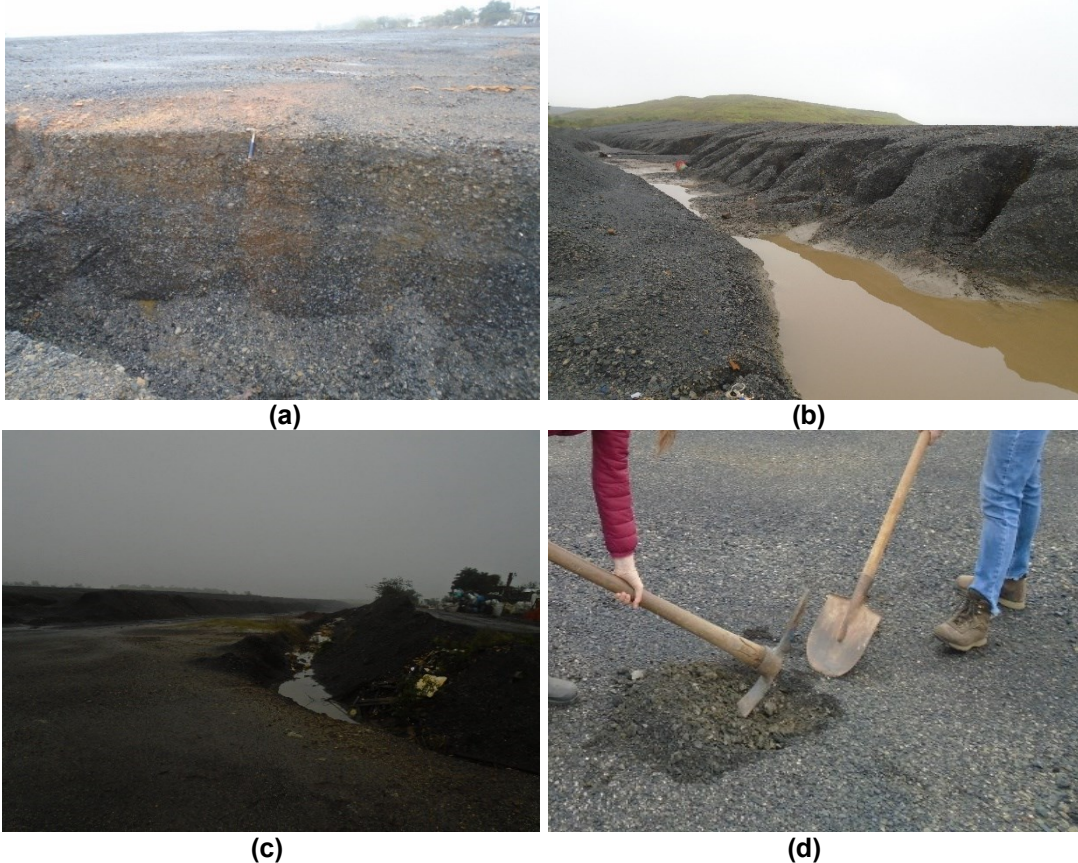
3.1.1 Rejeito passivo de carvão mineral

O rejeito passivo de carvão mineral foi coletado na região carbonífera do entorno de Criciúma-SC, onde acontece o acúmulo de grandes áreas deste rejeito. O tempo de deposição do rejeito passivo de carvão mineral nestas áreas é bastante variável, e oscila em função da extração pelas mineradoras. O local no qual foi coletado o material desse estudo especificamente, está depositado por mais ou menos 50 anos e existe uma compactação natural do material dificultando a sua coleta. A coleta do material foi realizada em outubro de 2019, sendo coletados 400 kg de rejeito em seu estado natural, para serem processados e preparados para a pesquisa. Essa coleta

foi acompanhada por uma geóloga dos laboratórios da SATC - Associação Beneficente Da Indústria Carbonífera De Santa Catarina, Criciúma-SC., e por um engenheiro ambiental da empresa responsável pela área onde ocorreu a coleta.

Nas fotografias 7a,7b, 7c e 7d, está representado o local e forma de coleta do material.

Fotografia 7 - Local e forma de coleta do material



Fonte: Autoria própria (2019)

Após a coleta o material foi levado ao Laboratório de Tratamento de Minérios da Faculdade da SATC em Criciúma SC, onde foi desenvolvida a etapa seguinte de preparação do material para seu uso na pesquisa.

No laboratório o material foi quarteado e em seguida foi seco em estufa. A secagem foi controlada a 60°C e monitorada constantemente em função do risco de combustão do material no interior da estufa. O tempo de secagem é muito variável pois depende da altura da camada de onde foi coletado o rejeito, bem como das intempéries do período de coleta, pois o material está depositado a céu aberto. O tempo médio de secagem foi de 8h, o resfriamento do material foi feito de forma natural.

A etapa seguinte consistiu na moagem do material, sendo realizada em dois moinhos, primeiro o moinho de mandíbulas no qual o material foi passado duas vezes, com o objetivo de conseguir uma granulometria adequada para ser processado no moinho de disco orbital.

Nas fotografias 8a e 8b, estão os moinhos utilizados na moagem do material da pesquisa.

Fotografia 8 - Moinhos utilizados na preparação do material



(a) Moinho de mandíbula

(b) Moinho de disco orbital

Fonte: Autoria própria (2019)

A escolha dos moinhos foi feita em função da dureza do material e também pensando em manter sua estrutura, ou seja, o material não podia ser moído por esmagamento. Após a moagem o rejeito passivo de carvão mineral foi acondicionado em bombonas plásticas bem fechadas, evitando assim o umedecimento do mesmo, para não oxidar e alterar as propriedades químicas do produto.

Na fotografia 9a observa-se o material após a secagem em estufa e moído no moinho de mandíbulas. Na fotografia 9b, o material já processado no moinho de discos orbital pronto para ser utilizado.

Fotografia 9 - Material no processo de preparação para uso



(a) RPCM seco, para moagem

(b) RPCM pronto para uso

Fonte: Autoria própria (2019)

3.1.2 Cimento

Os cimentos utilizados nesta fase da pesquisa foram: o cimento Portland Pozolânico CP IV-32 RS; o cimento Portland CP V-ARI; o cimento Portland CP II-Z-32; o cimento Portland Composto CP II-F-32.

3.1.3 Agregados

Os agregados utilizados na pesquisa, areia e brita zero ou pedrisco, foram adquiridos em lojas de construção civil de Curitiba. Esses materiais foram adquiridos em quantidade suficiente para a moldagem de todos os corpos de prova necessários para a primeira e segunda fase da pesquisa e também para os blocos. Evitando assim mudanças nas características físicas e químicas dos materiais que possam causar qualquer alteração nos resultados da pesquisa, provenientes de variações químicas dos materiais.

A areia é proveniente de dragas e foi adquirida em loja de materiais de construção civil de Curitiba-PR. O pedrisco é proveniente de pedreiras basálticas e foi adquirido no comércio da região metropolitana de Curitiba-PR.

3.1.4 Água

A água de amassamento utilizada para produção dos corpos de prova desta etapa do projeto foi água de uso dos laboratórios da UTFPR-CT – Campus Ecoville.

3.1.5 Caracterização do rejeito passivo de carvão mineral

O rejeito passivo de carvão mineral utilizado na pesquisa foi caracterizado quanto as suas propriedades químicas, físicas e mineralógicas. e os parâmetros de caracterização e ensaios realizados serão descritos na sequência.

3.1.5.1 Análises imediatas

Determinam algumas substâncias específicas necessárias para o melhor entendimento do rejeito, foram realizadas no LAEC-Laboratório de Análises e Ensaio de Carvão da SATC, especializado em análise de carvão mineral. Estas análises estão nominadas no quadro 2.

Quadro 2 - Análises imediatas do RPCM

Análises/Ensaio	Métodos de análise
Determinação da umidade de higroscopia	PO - 158 Rev: 5 / ASTM D 7582-15
Determinação do teor de cinzas	PO - 158 Rev: 5 / ASTM D 7582-15
Determinação do teor de matérias voláteis	PO - 158 Rev: 5 / ASTM D 7582-15
Determinação do teor de enxofre total	PO-064Rev:13/ ASTM D 4239/18 E ¹ Método A
Determinação do teor de carbono fixo	PO - 068 Rev: 5 / ASTM D 3172
Determinação do teor de carbono	PO - 197 Rev: 2
Determinação do teor de hidrogênio	PO - 197 Rev: 2
Determinação do teor de nitrogênio	PO - 197 Rev: 2
Determinação do teor de oxigênio	PO - 347 Rev: 0

Fonte: Adaptado do relatório do LAEC-SATC (2019)

3.1.5.2 Análise granulométrica

Determina a distribuição granulométrica dos materiais. A análise foi realizada com granulometria a *Laser & Image* em um aparelho *Bettersizer S3 Plus* a análise foi realizada da seguinte forma: Nenhum dispersante; Óptica Mie; Partícula RI 1.8-0.55; Ultrassom 2 minutos; Modo de Análise 8.0 – *Multipeak*; RI Médio 1,333; Agitação 1600 rpm; Distribuição Volumétrica. Essa análise foi realizada no NPT - Núcleo de Pesquisas Tecnológicas dos Laboratórios de Materiais do DACOC – Departamento de construção Civil na UTFPR-CT – Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Centro Tecnológico.

3.1.5.3 Atividade pozolânica

Determina o grau de atividade pozolânica do material, foi realizado conforme estabelece a NBR – 15895 - Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chappelle modificado (ABNT 2010), o aparelho utilizado foi um banho maria com agitação do tipo “*Dubnoff*”, ensaio realizado na NPT-UTFPR-CT.

3.1.5.4 Densidade

Para determinar a massa específica do rejeito passivo de carvão mineral, foi utilizado o Picnômetro de Hélio: Multipicnômetro de Hélio Quantachrome, Modelo MVP-D160-E/Gás: Hélio analítico a 20psi/Temperatura ambiente de 22°C/ Leitura

máxima de pressão pelo equipamento: 20 psi/Diâmetro máximo da célula: 50 mm, ensaio realizado na NPT-UTFPR-CT.

3.1.5.5 Difração de Raios-X (DRX)

Determina a caracterização mineralógica dos materiais, ou seja, quais minerais fazem parte da composição do material em estudo, permitindo uma análise quanto a cristalinidade do material, se o mesmo é amorfo ou cristalino. Para realização desta análise foi utilizado um Difratorômetro de Raios-X (*Shimadzu*, modelo XRD-7000), esse procedimento foi realizado no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR-Curitiba-PR, sede Centro.

3.1.5.6 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Essa análise determina a composição química do material e foi realizada em um aparelho do tipo: Espectrofotômetro de fluorescência de Raios X, Marca SHIMADZU - Modelo: EDX 720/800HS Colimador: 10mm Atmosfera: vácuo (exceto líquidos)/Faixa de medição: ^{11}Na a ^{92}U /Tubo de Ródio: 50kV e 100 μA /Detector Si (Li)/Amostra de até 300mm de diâmetro e 150mm de altura em pastilha ou pó. Esta análise foi realizada na NPT-UTFPR-CT.

3.1.5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de microscopia eletrônica de varredura, viabiliza a visualização da microestrutura do concreto e dos cristais formados ao longo da cura do concreto. Essa análise foi realizada no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR-Curitiba-PR, sede Centro. As amostras foram secas em estufa, e preparadas no CMCM, após este processo foram submetidas a análise no MEV.

3.1.6 Caracterização do cimento

As especificações físicas e químicas dos cimentos estão descritas no Anexo A e foram fornecidas pelo fabricante do cimento. No Anexo A também são encontrados em forma de resumo os parâmetros exigidos pela NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos (ABNT, 2018).

3.1.7 Caracterização dos agregados

Os agregados foram caracterizados conforme exigências da ABNT, cada ensaio foi realizado com duas repetições, segundo especificações das normas, sendo usado a média dos dois resultados. As propriedades físicas dos agregados determinadas nos ensaios foram as de relevância para os resultados da pesquisa.

Esses ensaios tem como objetivo contribuir com a utilização dos agregados no concreto, visando a otimização de seu potencial de desempenho para os resultados da pesquisa. Os resultados dos ensaios estão descritos no capítulo quatro desta tese.

As propriedades químicas da areia foram determinadas pelo FRX. Essa análise foi realizada no mesmo local e equipamento onde foi realizada análise do rejeito passivo de carvão mineral, conforme descrito no item 3.1.5.6 desta pesquisa.

As propriedades físicas foram determinadas pelos respectivos ensaios conforme descritos no quadro 3.

Quadro 3 - Ensaio de caracterização dos agregados

Ensaio	Normas utilizadas
Composição granulométrica da areia e da brita	NBR NM 248 (ABNT, 2003); NBR 7211 (ABNT, 2019); NM ISO 3310-1 (ISO, 2016); NBR NM 16915 (ABNT, 2021)
Massa unitária e volume de vazios, da areia e da brita	NBR NM 16972 (ABNT, 2021); NM ISO 3310 -1 (ISO 2016); NBR NM 16915 (ABNT, 2021)
Massa específica da areia	NBR NM 52 (ABNT, 2009); NBR NM 16915 (ABNT, 2021)
Massa específica da brita	NBR NM 16917 (ABNT, 2021); NBR NM 16915 (ABNT, 2021)
Teor de material pulverulento da areia e da brita.	NBR NM 16973 (ABNT, 2021); NM ISO 3310-1 (ISO. 2016); NBR NM 16915 (ABNT, 2021)

Fonte: Autoria própria (2022)

3.1.7.1 Composição granulométrica

Esse ensaio tem como objetivo determinar os tamanhos dos grãos que compõe o agregado e foi realizado conforme a NBR NM – ISO 3310-1 - Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificações (ABNT, 2016) e também segundo as determinações da NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003).

Os resultados obtidos no ensaio de composição granulométrica também permitem determinar o módulo de finura da areia e o diâmetro máximo característico.

3.1.7.2 Massa unitária e volume de vazios

Esse ensaio determina a massa das partículas da areia que ocupam um determinado volume, e o índice de vazios entre os grãos, foi realizado tendo como parâmetro as instruções da NBR NM 16972 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios (ABNT, 2021).

3.1.7.3 Massa específica

O objetivo desse ensaio é estabelecer a relação da massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis. Ele também permite obter o valor da massa específica aparente do agregado que é a relação entre a massa seca do agregado e seu volume excluindo os poros. O ensaio permite também obter o valor da massa específica relativa, que é a relação entre a massa da unidade de volume de um material, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis, a uma temperatura determinada e a massa de um volume igual de água destilada, livre de ar, a uma temperatura estabelecida.

Os ensaios para as massas específicas (areia e brita) foram realizados segundo os parâmetros estabelecidos pela norma. Para a areia foi utilizada a NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2003) e para a brita a NBR NM 16917: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2021).

3.1.7.4 Teor de material pulverulento

Ensaio realizado conforme estabelece a NBR NM 16973 - Agregado - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem. (ABNT, 2021). A finalidade do ensaio é determinar a quantidade de material fino que passa pela abertura da malha da peneira de 75 µm da série normal especificada pela NM ISO 3310-1 (2016).

3.1.8 Moldagem e caracterização dos corpos de prova

A fase 1 dessa pesquisa foi uma fase experimental voltada a escolha do cimento mais adequado para ser utilizado com o rejeito passivo do carvão mineral no concreto, com o objetivo final da produção de blocos vazados de concreto.

O foco principal desta fase da pesquisa foi o estudo da compatibilidade química dos cimentos com o rejeito passivo de carvão mineral. Para isso foi determinado um traço que atendesse exigências de uso diário em obras de pequeno porte, com uma relação água/cimento que obedecesse às recomendações estabelecidas por norma sem prejudicar a plasticidade do concreto.

O traço de 1:2:3 (um de cimento, dois de areia e três de brita zero), foi escolhido devido ao uso em obras convencionais, para o concreto é um traço que atinge em média 25 MPa, com um consumo de 369,23kg de cimento por m³ de concreto. Atendendo assim as necessidades iniciais da pesquisa.

A relação água/aglomerante, foi determinada em 0,5, pois segundo a NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2014), os concretos convencionais devem obedecer a uma relação a/c entre 0,45 e 0,65, em função da classe de agressividade a qual o concreto vai ser submetido. A indústria de pré-moldados precisa de uma consistência que permita a retirada dos blocos de concreto rapidamente da fôrma do equipamento de moldagem por exigências técnicas da linha de montagem. Por isso nem sempre obedecem a relação a/c mínima exigida por norma.

Para esta etapa da pesquisa se faz necessário que o concreto apresente uma plasticidade que permita a moldagem e adensamento dos corpos de prova sem mesa vibratória. Sendo assim optou-se por uma relação água/materiais secos que resulte em uma trabalhabilidade possível para a moldagem das amostras. Foi vetado o uso de aditivo plastificante, pois seria mais uma variante a ser analisada nos compostos o que aumentaria consideravelmente o número de corpos de prova.

A escolha de corpos de prova de 5X10cm é justificada, pois a quantidade de corpos de prova a serem moldados em toda pesquisa (fase 1 e 2), foi de 288. O manuseio de corpos de prova deste tamanho fica facilitado, como também um menor consumo de material, e o objetivo desta fase é apenas a comparação de resultados, e a dimensão máxima característica do agregado é adequada para a moldagem de corpos de prova no tamanho de 5X10cm.

Para esta fase da pesquisa foram moldados um total de 72 corpos de prova no tamanho de 5X10cm, como está apresentado na tabela 5, distribuídos da seguinte forma: para cada um dos cimentos testados, CP IV-32-RS, CP V-ARI, CP II-Z-32, CPII-F-32. Foram moldados 18 corpos de prova para cada tipo de cimento, sendo 6 corpos de prova de referência ou com 0% de rejeito passivo de carvão mineral, 6 corpos de

prova com 5% de rejeito passivo de carvão mineral e 6 corpos de prova com 10% de rejeito passivo de carvão mineral. O rejeito passivo de carvão mineral em todas as situações substituiu parte do cimento, sendo mantido o aglomerante em peso em todas as amostras.

Na tabela 5 estão descritos os traços usados na primeira fase da pesquisa.

Tabela 5 - Composição dos corpos de prova da fase 1

Cimento	CP IV-32-RS			CP V-ARI			CP II-Z-32			CP II-F-32		
RPCM %	0	5	10	0	5	10	0	5	10	0	5	10
CP's	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Traço							1:2:3					
a/a							0,5					
a/ms							0,083					

Onde: RPCM Rejeito passivo de carvão mineral em porcentagem do cimento em peso
 CP's Corpos de prova
 Traço (um cimento, dois areia, três brita)
 a/a Relação água / aglomerante
 a/ms Relação água/ material seco

Fonte: Autoria própria (2020)

As porcentagens de 5% e 10% nesta fase da pesquisa, foram determinadas com base na análise química do rejeito, ficando em aberto a possibilidade de aumentar estas porcentagens na fase 2, em função do comportamento químico do rejeito nas análises dessas porcentagens.

Os corpos de prova foram moldados segundo os parâmetros da NBR 5738 - Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2016). Após 24 h os corpos de prova foram desmoldados e submetidos a cura submersa por 28 dias conforme determina a NBR 5738 (2016). Ao término do tempo de cura estabelecido de 28 dias os corpos de prova foram submetidos a caracterização física, química e mecânica.

3.1.8.1 Caracterização dos corpos de prova

Tendo completado os 28 dias de cura os corpos de prova foram retirados da água e submetidos ao ensaio de absorção por imersão, seguindo os parâmetros da NBR 9778 – Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção por imersão – Índice de vazios e massa específica (ABNT, 2009).

Tendo concluído o ensaio de absorção os corpos de prova foram rompidos por compressão simples segundo a NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018). Conforme recomenda a norma o

rompimento foi realizado com os corpos de prova saturados, que representa a pior situação ao qual o concreto pode ser submetido. A prensa usada foi a de marca EMIC, modelo DL-30.000, que atende as especificações da norma (NBR 5739, 2018).

As análises químicas foram realizadas para os quatro cimentos nos três traços propostos para cada cimento. O material foi seco em estufa por 48h a uma temperatura de 50°C. Retirada da estufa colocada para esfriar em um dessecador por 24h para ser preparada para a análise de FRX. As amostras foram submetidas a moagem em moinho de panela marca AMEF LTDA, modelo AMP1-M, capacidade da panela 50 a 125ml, painel elétrico Controlador Lógico Programável (CLP) 24V, motor elétrico 1,5 CV 220/380/440V 60Hz TFVE RPM 1120, granulometria média de entrada < 5mm, granulometria máxima final 400 *mesch*. Após a moagem as amostras foram encaminhadas para as análises de FRX, e foram analisadas conforme descrito no item 3.1.5.6.

3.2 Metodologia da fase 2

Nas análises realizadas na fase 1 da pesquisa ficou determinado que o cimento com o melhor desempenho em conjunto com o o rejeito passivo de carvão mineral é o CP II-Z-32, sendo assim ele foi usado para dar prosseguimento a pesquisa. Nessa fase da pesquisa foram testadas novas porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral na substituição de parte do cimento. Foram realizados ensaios químicos, mineralógicos, físicos, mecânicos e de durabilidade, com o objetivo de definir qual o traço ideal para ser usado na confecção dos blocos vazados de concreto que será discutido na fase 3 da pesquisa.

As variáveis independentes desta fase da pesquisa são:

- O rejeito passivo de carvão mineral que substituiu o cimento em porcentagens de 0%, 10%, 20% e 30%. A porcentagem de 10% foi repetida nesta fase da pesquisa pois foram feitos vários testes que não foram executados na fase 1, e até concluir a fase 2, o teor máximo de rejeito passivo de carvão mineral não era conhecido, podendo o mesmo ser 10%, justificando assim testar novamente este teor.

- O tempo de cura dos corpos de prova de 28 dias, 60 dias, 90 dias e 365 dias;
- A quantidade de cimento CP II-Z-32.

As condições fixas da segunda fase da pesquisa são:

- A quantidade de agregados em massa;
- A relação água/aglomerante de 0,5;

- O traço do concreto utilizado 1:2:3 (cimento, areia e brita).

3.2.1 Definição do traço

Nessa etapa da pesquisa foi estudado o desempenho de quatro traços diferentes com o cimento CP II-Z-32 e o rejeito passivo de carvão mineral. Com 0% de rejeito passivo de carvão mineral (referência TR), 10% de rejeito passivo de carvão mineral substituindo parte do cimento (T10), 20% de rejeito passivo de carvão mineral substituindo parte do cimento (T20), e 30% de rejeito passivo de carvão mineral substituindo parte do cimento (T30). O traço principal foi mantido o mesmo da fase 1 da pesquisa, ou seja, 1:2:3 (um cimento, dois areia e três pedrisco), a relação água/aglomerante igual a 0,5 conforme determinado para a fase 1 da pesquisa.

A caracterização dos materiais utilizados nessa fase da pesquisa (cimento, areia, brita zero ou pedrisco, rejeito passivo de carvão mineral), foi realizada na fase 1 da pesquisa.

3.2.2 Caracterização do concreto fresco

A caracterização do concreto fresco foi realizada pela verificação da massa específica e da consistência do concreto no seu estado fresco.

3.2.2.1 Massa específica do concreto fresco

O ensaio de massa específica do concreto fresco foi realizado segundo a norma NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. (ABNT, 2009). Esse ensaio permite calcular a massa específica do concreto, como também fornece dados para o cálculo da massa específica aparente, do rendimento do concreto, do consumo de cimento, do volume total dos componentes na betoneira, do índice de ar e do teor de ar do concreto estudado. Esses indicadores da qualidade do concreto foram ensaiados duas vezes para cada traço (TR, T10, T20 e T30).

3.2.2.2 Consistência do concreto fresco

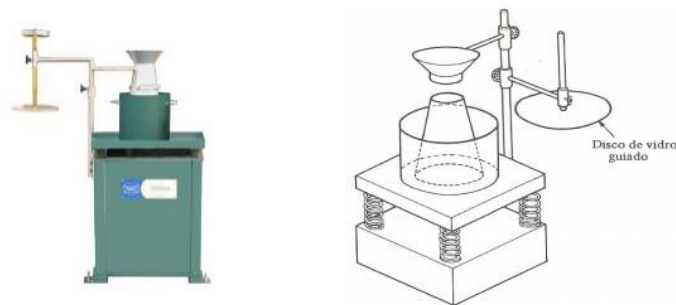
A consistência do concreto foi determinada com o consistômetro VeBe. O ensaio foi realizado conforme determina a norma ACI 211.3R-02: *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*. (ACI- 211, 2009). O consistômetro é indicado para

concretos com características mais secas, pois para esses concretos o “*Slump Test*” ou teste de abatimento pelo cone não apresenta resultados satisfatórios.

O consistômetro VeBe é composto de uma mesa vibratória, onde é fixado o cilindro dentro do qual será moldado o concreto no cone e posteriormente compactado por vibração. Em funcionamento, a mesa deverá produzir frequência de 3.000 hertz com amplitude entre 0,4mm e 0,5mm. O aparelho ainda é provido de uma haste de sustentação com disco transparente de vidro ou plástico, com 23cm de diâmetro. A massa do conjunto compreendido pela haste e disco deve ser de 2,75kg. A haste deve ser graduada para a leitura do abatimento do tronco de cone moldado para o teste de VeBe.

Na figura14 está apresentado um esquema do consistômetro de VeBe.

Figura 14 - Consistômetro de VeBe



Fonte: Magalhães, (2009)

O ensaio permite a leitura do “Grau VeBe”, que é o tempo de vibração em segundos, decorrido até que se consiga remodelar o concreto no consistômetro “VeBe”, passando o mesmo da forma troncocônica para a forma cilíndrica.

Na tabela 6 está descrita a forma como é classificado o grau VeBe segundo a norma Europeia EN 12350-3, (2019).

Tabela 6 - Classificação do Grau VeBe segundo a EN 12350-3

Grau VeBe					
Classe VeBe	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
Tempo VeBe (s)	>30	30 a 21	20 a 11	10 a 5	<4

Fonte: EM 12350-3, (2019)

A consistência do concreto seco analisada pelo teste VeBe também pode ser apresentada conforme determina a ACI 211.3R-02 (2009).

Na tabela 7 estão descritos os índices de consistência determinados pelo consistômetro VeBe conforme determina a (ACI 211.3R-02, 2009).

Tabela 7 - Consistência do concreto segundo a ACI 211-3R-02

Descrição da consistência	Slump test (mm)	Tempo VeBe (s)
Extremamente seco	----	18 a 32
Muito seco	-----	10 a 18
Seco	0 a 1	5 a 10
Seco para plástico	1 a 3	3 a 5
Plástico	3 a 5	0 a 3
Fluído	5 a 7	----

Fonte: EM 12350-3, (2019)

Antes do adensamento com a mesa vibratória, é necessário realizar a medida do abatimento do tronco cone moldado para realização do ensaio, determinando assim a consistência inicial do concreto. Conforme a norma determina, se o abatimento do tronco cone for maior que 3mm e o tempo VeBe menor que 3 segundos o concreto é considerado plástico, e sua consistência deverá ser analisada por outros métodos que não o teste de tempo VeBe. Essa relação está apresentada na tabela 7.

Com os resultados obtidos no ensaio, tempo de adensamento, volume inicial do tronco de cone e volume final do cilindro, pode-se calcular o índice de trabalhabilidade do concreto com a equação 1.

$$IT = t \cdot (V_2 \div V_1) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

IT é o índice de trabalhabilidade do concreto;

V_1 é o volume inicial do concreto (do tronco de cone);

V_2 é o volume final do concreto (do cilindro);

t é o tempo necessário para a moldagem, em segundos.

3.2.3 Moldagem dos corpos de prova

Para essa etapa foram moldados duzentos e dezesseis corpos de prova de 5x10cm, para serem submetidos a quatro tempos diferentes de cura, 28 dias de cura, 60 dias de cura, 90 dias de cura e 365 dias de cura. Para cada data de cura foram separados duas séries de 24 corpos de prova, sendo 6 corpos de prova de cada traço.

Os traços utilizados foram: TR (traço de referência sem adição do rejeito passivo de carvão mineral), T10 (traço com 10% de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento), T20 (traço com 20% de rejeito passivo de carvão mineral

substituindo o cimento), T30 (traço com 30% de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento). Para a idade de cura de 28 dias foram destinadas três séries de 24 corpos de prova, pois foi feito o ensaio de resistência a compressão sem submeter os corpos de prova previamente ao ensaio de absorção.

Os corpos de prova foram submetidos a uma cura sem nenhum produto adicional na água, que pudesse vir a interferir nas reações químicas do rejeito no concreto. Essa medida foi tomada para preservar as possíveis reações que aconteceriam entre o cimento e o rejeito passivo de carvão mineral.

No quadro 4 estão descritas as datas de cura e ensaios realizados, e quantidade de corpos de prova utilizados nos respectivos ensaios.

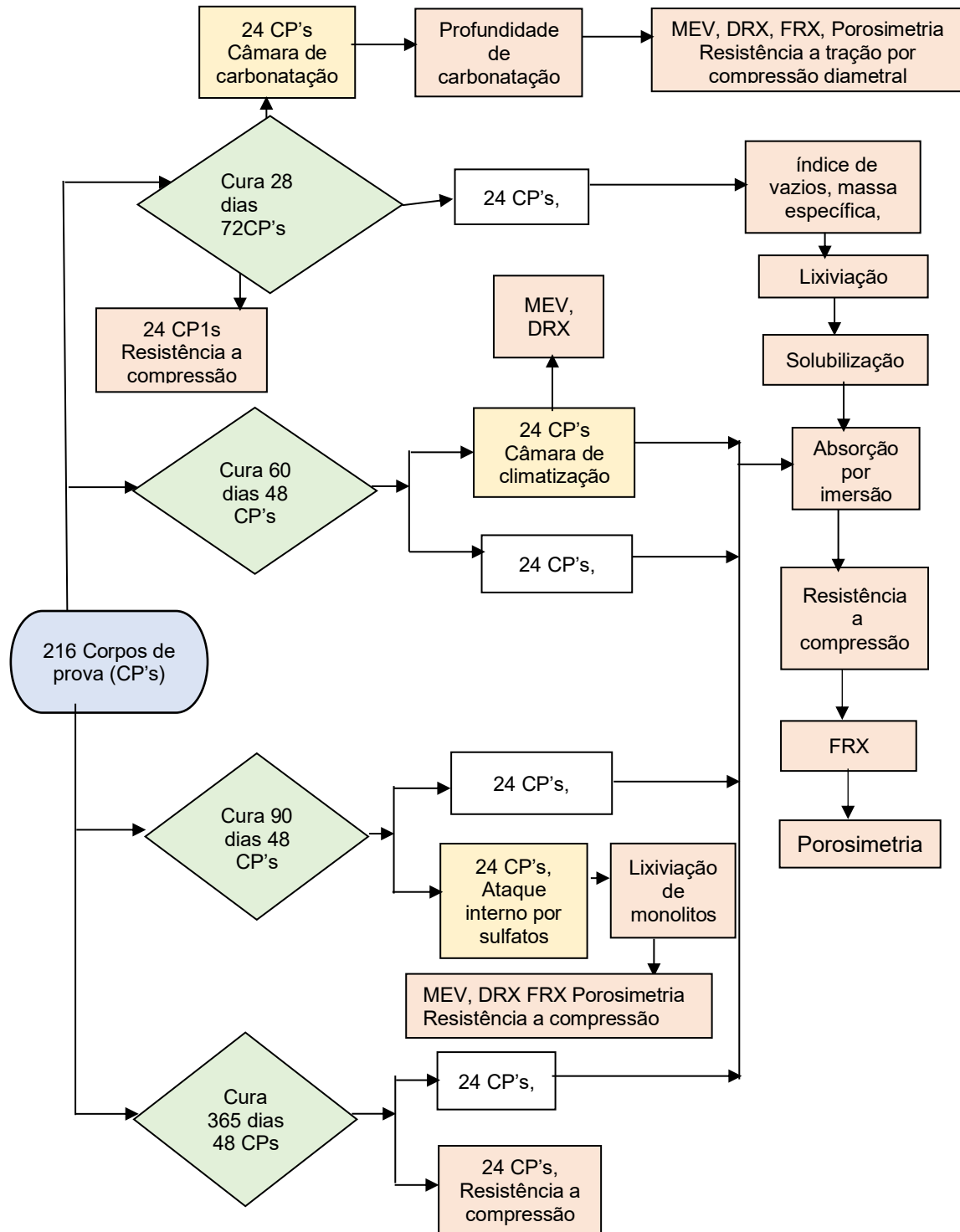
Quadro 4 - Quantidade de corpos de prova destinados aos ensaios nas datas de cura.

Tempo de cura	Ensaio realizado	Corpos de prova (unidades)	Corpos de prova para cada traço
28 dias 72 corpos de prova	Resistência a compressão	24	6TR, 6T10, 6T20, 6T30
	Massa específica, absorção por imersão, índice de vazios, resistência a compressão, análises físicas químicas e mineralógicas	24	6TR, 6T10, 6T20, 6T30
	20 Câmara de carbonatação, resistência a tração por flexão, análises físicas químicas e mineralógicas.	20	5TR, 5T10, 5T20, 5T30
	Lixiviação e solubilização.	4	1TR, 1T10, 1T20, 1T30
60 dias 48 corpos de prova	Absorção por imersão, resistência a compressão análises físicas químicas e mineralógicas.	24	6TR, 6T10, 6T20, 6T30
	Câmara de climatização, Análises físicas químicas e mineralógicas.	24	6TR, 6T10, 6T20, 6T30
90 dias 48 corpos de prova	Absorção por imersão, resistência a compressão, análises físicas químicas e mineralógicas.	24	6TR, 6T10, 6T20, 6T30
	Ataque interno por sulfatos. Lixiviação de monolitos, resistência a compressão, análises físicas químicas e mineralógica.	24	6TR, 6T10, 6T20, 6T30
365 dias 48 corpos de prova	Absorção por imersão, resistência a compressão, análises físicas químicas e mineralógicas.	24	6TR, 6T10, 6T20, 6T30
	Resistência a compressão	24	6TR, 6T10, 6T20, 6T30

Fonte: Autoria própria (2022)

A divisão desses corpos de prova e ensaios realizados para cada idade de cura estão demonstrados no fluxograma da figura 15. Nesse fluxograma cada conjunto de vinte e quatro corpos de prova está composto por seis corpos de prova TR, seis corpos de prova T10, seis corpos de prova T20 e seis corpos de prova T30.

Figura 15 - Fluxograma dos ensaios realizados na fase 2



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.4 Caracterização do concreto endurecido

3.2.4.1 Determinação da absorção por imersão, índice de vazios e massa específica

Esse ensaio foi realizado segundo as orientações da NBR 9778 (2009). Após a cura de 28 dias os vinte e quatro corpos de prova foram pesados, secos em estufa por 72h, a 100°C e pesados novamente, preparados e colocados em imersão, sendo pesados a cada 24h até chegar à constância de peso, conforme determina a norma. Tendo completado esta etapa o índice de absorção por imersão estava concluído. Na sequência os corpos de prova foram colocados para a fervura durante 5h, em seguida deixados para esfriar por 14h, pesados na balança hidrostática e na balança comum, tendo assim concluído o ensaio conforme determina a norma.

Ainda saturados os corpos de prova foram levados para a prensa e em seguida rompidos a compressão simples. O ensaio de massa específica e índice de vazios foi realizado somente para as amostras com 28 dias de cura, a determinação da absorção por imersão foi feito para todas as idades de cura.

3.2.4.2 Resistência a compressão simples

Esse ensaio foi realizado conforme os parâmetros da NBR 5739 (2018), e está descrito na fase 1 dessa pesquisa. Os corpos de prova da cura com idade de 60, 90 e 365 dias, e também os que passaram pela câmara de climatização e ataque interno por sulfatos, foram submetidos ao rompimento por compressão simples. Os corpos de prova submetidos ao tratamento de carbonatação, foram rompidos por resistência atração pela compressão diametral, possibilitando assim a aplicação da fenolftaleína e posterior leitura da carbonatação.

3.2.4.3 Resistência a compressão para os corpos de prova com cura de 28 dias e 365 dias sem serem submetidos ao ensaio de absorção por imersão

Seis corpos de prova de cada traço submetidos a cura de 28 dias e também a cura de 365 dias, foram rompidos a compressão simples para um estudo comparativo de resistências. O objetivo é apurar se a passagem dos corpos de prova pela estufa a 100°C para o ensaio de absorção por imersão, e a fervura dos mesmos para o ensaio de massa específica alteram significativamente a resistência dos mesmos.

3.2.5 Porosimetria

A Porosimetria foi feita com o aparelho Porosímetro de marca Quantachrome. Modelo: PoreMaster 33, Faixa de pressão: De 0,2 a 33.000 psi/Faixa de tamanho dos poros (ângulo de contato de 150°): de 1100 μm a 0,0064 μm /Estação de baixa pressão: 2 (de 0,2 a 50 psia)/Estações de alta pressão: 1 (de 20 a 33.000 psia)/Resolução de volume: $\pm 0,0001$ cc. Todas as idades de cura foram analisadas com diferentes porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral (TR, T10, T20 e T30), também foram analisadas para o índice de Porosimetria os corpos de prova submetidos aos ensaios de durabilidade (câmara de carbonatação, a câmara de climatização, ataque interno por sulfatos).

3.2.6 Ensaios de durabilidade do concreto

3.2.6.1 Câmara de carbonatação

Dos setenta e dois corpos de prova que ficaram na cura por vinte e oito dias, vinte deles, sendo (5TR, 5T10, 5T20 e 5T30) foram destinados para o ensaio de carbonatação. Após retirados da cura, foram deixados em laboratório a uma temperatura de 23°C por sete dias para que perdessem o excesso de umidade naturalmente. Em seguida foram colocados na câmara de carbonatação onde permaneceram por 180 dias, com uma ingestão média de 0,1% de CO₂ e umidade acima de 90%.

Ao serem retirados da câmara de carbonatação, os corpos de prova foram rompidos a compressão axial, possibilitando assim a aplicação da fenolftaleína, em concentração de 1% de álcool etílico. As leituras da profundidade de carbonatação foram feitas com dez medidas em cada corpo de prova, para assim determinar a média aritmética das medidas podendo desta forma determinar a profundidade de carbonatação individual das amostras, em seguida foi determinada a profundidade de carbonatação para cada traço.

Na fotografia 10 está apresentada a câmara de carbonatação usada na pesquisa.

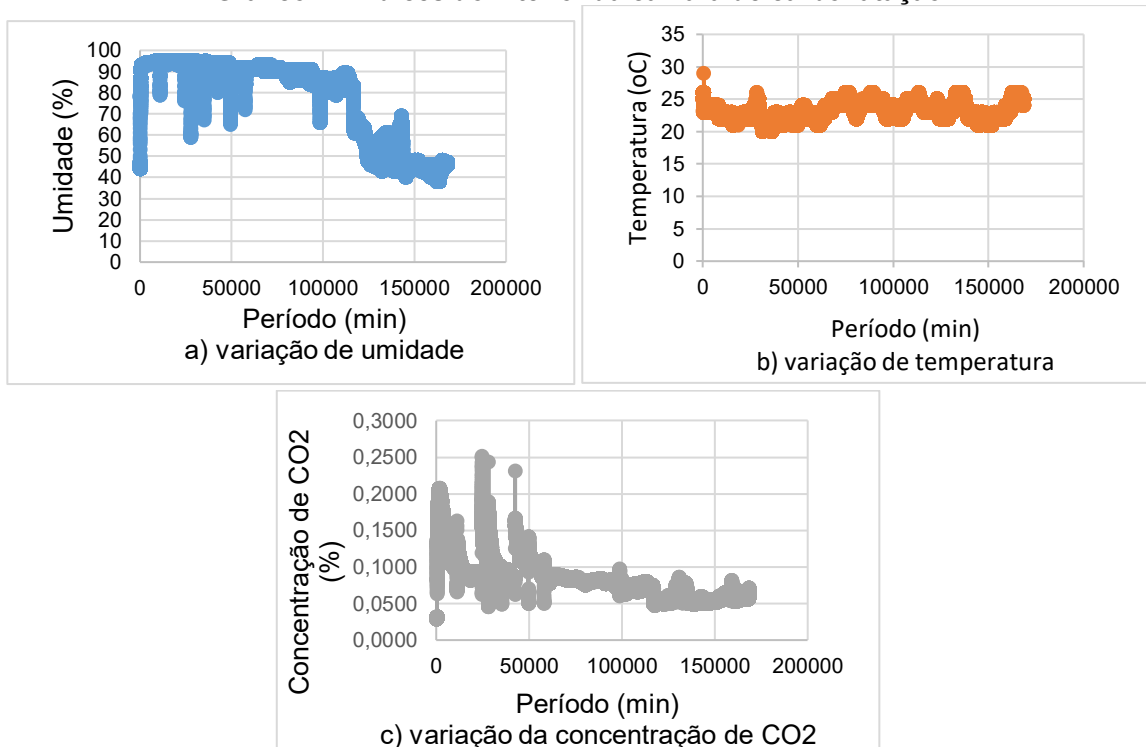
Fotografia 10 - Câmara de carbonatação



Fonte: Autoria própria (2022)

Nos gráficos 2a, 2b, 2c, estão representadas as condições de umidade, temperatura e variação de CO₂ no interior da câmara, durante um determinado período em que as amostras ficaram carbonatando.

Gráfico 2 - Índices do interior da câmara de carbonatação



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.6.2 Envelhecimento acelerado – Câmara de climatização

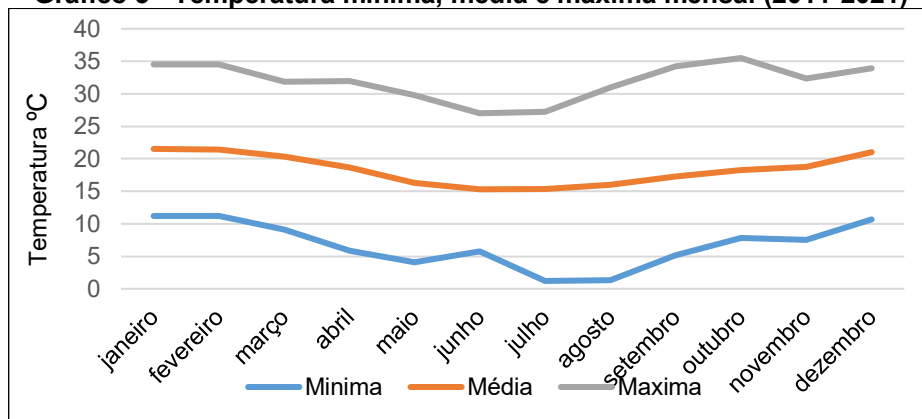
O ensaio de envelhecimento acelerado foi realizado no NPT-UTFPR-CT, em uma câmara climática simulando o envelhecimento natural. Os corpos de prova utilizados neste ensaio ficaram em cura submersa por 60 dias, foram utilizados 24

corpos de prova (6TR, 6T10, 6T20 e 6T30). Após retirados da cura foram deixados no laboratório a uma temperatura de 23°C por 28 dias, para que perdessem o excesso de água naturalmente. Em seguida foram medidos, três leituras de diâmetro e três leituras de altura para cada amostra, e com a média das três foi feito o cálculo do volume dos corpos de prova. Esse procedimento foi executado antes e após a permanência dos corpos de prova na câmara de climatização. Todos os corpos de prova foram pesados antes e após o período do envelhecimento acelerado.

A câmara foi programada para 28 dias de ensaio simulando um ano de exposição dos corpos de prova ao intemperismo. Os dados climáticos foram coletados no site do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia para a região de Curitiba-PR.

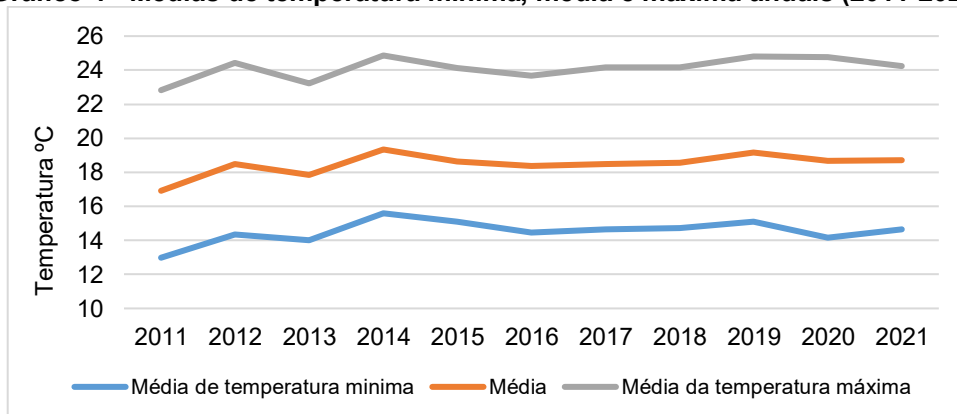
Nos gráficos 3 e 4 estão representados os dados do levantamento realizado no site do IMET para a programação da câmara de climatização.

Gráfico 3 - Temperatura mínima, média e máxima mensal (2011-2021)



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 4 - Médias de temperatura mínima, média e máxima anuais (2011-2021)



Fonte: Autoria própria (2021)

Durante o tempo de ensaio os corpos de prova ficaram expostos na câmara submetidos a simulação de temperatura e umidade natural, sendo uma semana para cada estação do ano, iniciando pelo inverno. No decorrer desse período a temperatura iniciou com a mínima da estação, subiu até a máxima e retornou para a mínima do período, com um intervalo de 6h para atingir a mínima da próxima estação do ano, a primavera. Repetindo o processo até chegar ao ciclo verão, em seguida, após 6h de ajuste da temperatura começar o ciclo do outono. Para as quatro estações do ano a umidade relativa também foi programada mudando conforme os dados coletados no site do IMET.

O resumo das médias das temperaturas e da umidade utilizadas na programação da câmara de climatização estão descritas na tabela 8.

Tabela 8 - Médias das temperaturas e umidades relativas das estações do ano (2011-2021)

Estação	Mínima (°C)	Média (°C)	Máxima (°C)	Umidade relativa (%)
Inverno	1,2	16	33,5	68,2
Primavera	5,5	19	35,5	71,5
Verão	1,2	21	34,5	71,9
Outono	4,1	17	32	72,0
Total Geral	1,2	19	35,5	70,9

Fonte: Adaptada dos dados do IMET (2021)

Tendo completado os quatro ciclos correspondentes a 672h de ensaio os corpos de prova foram retirados da câmara. Foi executado o procedimento de pesagem e medidas como feito antes de passarem pelo processo de envelhecimento acelerado. Em seguida os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de absorção por imersão de acordo com a NBR 9778 (2009) e compressão simples de acordo com a NBR 5739 (2018). Na sequência foram preparadas amostras e encaminhadas para a análise de DRX, MEV, FRX e teste de Porosimetria. Essas análises foram realizadas conforme descritas na fase 1 e fase 2 desta pesquisa.

3.2.6.3 Ataque interno por sulfatos

Esse ensaio foi realizado com os corpos de prova submetidos a cura submersa por noventa dias, foram utilizados vinte e quatro corpos de prova (6TR, 6T10, 6T20 e 6T30). Após retirados da cura foram colocados no laboratório a uma temperatura de 23°C onde ficaram por trinta dias perdendo o excesso de água naturalmente, para que

os corpos de prova ficassem com uma superfície seca. Tendo sido realizado este procedimento foi dado início ao ensaio.

O procedimento para esse ensaio consiste em fazer três medidas de diâmetro e três de altura em cada corpo de prova. Para ter um controle mais real destas medidas e para que elas possam ser repetidas sempre no mesmo lugar, os corpos de prova foram marcados como está apresentado na fotografia 11.

Fotografia 11 - Marcação dos corpos de prova para a medição



Fonte: Autoria própria (2021)

Tendo concluído as medidas, os corpos de prova foram pesados, fotografados para comparações futuras das deformações, borrifados com água destilada e embalados em papel filme para que não perdessem a umidade, e também não entrassem em contato com o ar externo. Com isso somente reações internas de sulfatos agiram no interior do corpo de prova, e as deformações lidas foram efetivamente do ataque interno por sulfatos. O peso e as medidas das amostras foram repetidos todas as semanas durante vinte e cinco semanas.

Na fotografia 12 estão expostos os corpos de prova embalados para serem devidamente armazenados até a semana seguinte.

Fotografia 12 - Corpos de prova embalados



Fonte: Autoria própria (2021)

Tendo concluído as vinte e cinco semanas programadas para o ensaio, os corpos de prova foram tirados da embalagem e deixados no laboratório a uma

temperatura de 23°C e umidade de 60% por sete dias, em seguida foram pesados novamente e colocados para saturar em água destilada, como preparação ao próximo ensaio ao qual seriam submetidos, o ensaio de lixiviação de monolitos.

3.2.7 Lixiviação

Foram feitos dois tipos de ensaio de lixiviação, a lixiviação de monolitos para conhecer como o rejeito passivo de carvão mineral se comporta na liberação de metais pesados quando concretado em peças de artefatos de concreto. E a lixiviação conforme determina a NBR 10005 (2004) que é feita com o concreto triturado e por agitação, o que dificulta análise de monolitos com esse método.

3.2.7.1 Lixiviação de monolitos

Esse ensaio tem como objetivo verificar a presença de metais pesados na água após os corpos de prova serem submetidos a um período de lixiviação. Para a realização desse ensaio foi montado um recipiente com capacidade para 25l de água.

Foi acoplada à caixa uma bomba de 12 V, 5 amperes e 130Psi de pressão nominal. A entrada e saída da caixa foram acoplados canos de ½ polegada. A entrada da bomba foi equipada com mangueira de pressão de 5/8 de polegadas e a saída também com 5/8' e adaptador que serve para uma mangueira de borracha de ½ polegada. A bomba tem capacidade de fluxo de 5 l/min, pressão máxima 9 MPa, potência máxima de 80W. Na saída da água foi colocado uma peneira de 0,075mm com o objetivo de impedir que resíduos do material lixiviado sejam impulsionados pelo fluxo de água para fora do recipiente.

O aparelho foi criado por um grupo de mestrandos e doutorandos do PPGEC, da área de materiais de construção civil, para suprir a necessidade de executar o ensaio de lixiviação de monolitos.

O aparelho foi desenvolvido com base no modelo de extrator para lixiviação de monolitos indicado pela SW, EPA. 846 Method 1310B: "Extraction Procedure (EP) Toxicity Test Method and Structural Integrity Test". 2004. Entre todos os métodos de testes de lixiviação estudados, este é o que mais se aproxima dos objetivos e necessidades apresentadas nesta pesquisa para a lixiviação de monolitos, (lixiviar pela agitação da água, e usar somente água destilada).

Na fotografia 13 está apresentado o conjunto (caixa-bomba) desenvolvido para ser utilizado no teste de lixiviação de monolitos.

Fotografia 13 - Aparelho usado para lixiviação de monolitos



Fonte: Autoria própria (2022)

O ensaio foi realizado após os corpos de prova saturarem por 72h em água destilada, sendo feita a pesagem a cada 24h para confirmara a constância de peso. Ao final das 72h de saturação, foi iniciado o ensaio.

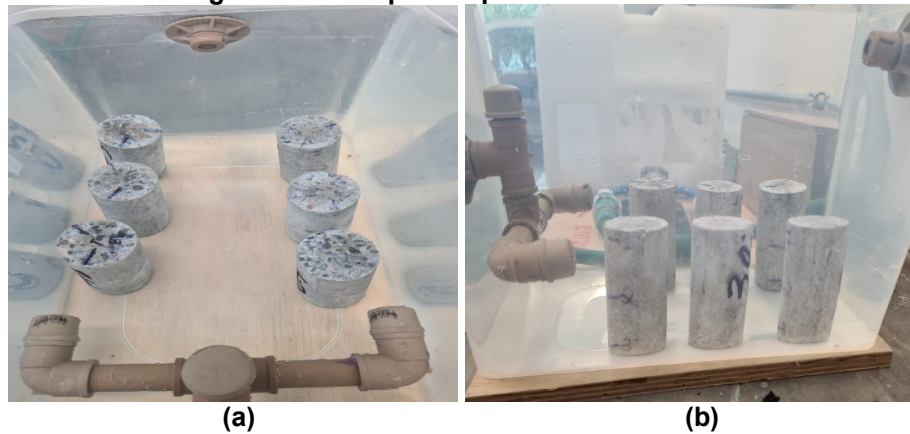
Sequência do ensaio:

- Os corpos de prova foram pesados novamente para fazer a comparação dos desgastes no final do processo;
- Em seguida foram colocados no recipiente plástico com 25l de água destilada;
- A bomba foi ligada e permaneceu por 24h trabalhando, sem que fosse alterado sua velocidade de fluxo;
- Ao final das 24h a bomba foi desligada, os corpos de prova foram pesados e rompidos a compressão simples;
- O extrato lixiviado do recipiente foi filtrado com bomba a vácuo e com filtro de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de 0,6 μ m.

Parte do lixiviado filtrado foi separado e enviado para a análise de metais pesados no LAMAQ – Laboratório Multiusuários de Análises Químicas da UTFPR. A análise foi realizada no Espectrofotômetro de Absorção Atômica de Chama (FAAS).

O material retido no filtro foi incinerado na mufla a 800°C, para que o filtro fosse consumido e restasse apenas o material desgastado dos corpos de prova.

Nas fotografias 14a e 14b pode-se observar o ensaio em andamento.

Fotografia 14 - Corpos de prova sendo ensaiados

(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2022)

O procedimento descrito foi repetido quatro vezes, uma para cada traço proposto na pesquisa, ou seja, TR, T10, T20 e T30, sendo ensaiado seis corpos de prova por vez.

3.2.7.2 Lixiviação do rejeito passivo de carvão mineral e dos traços de concreto conforme a NBR 10005 (2004)

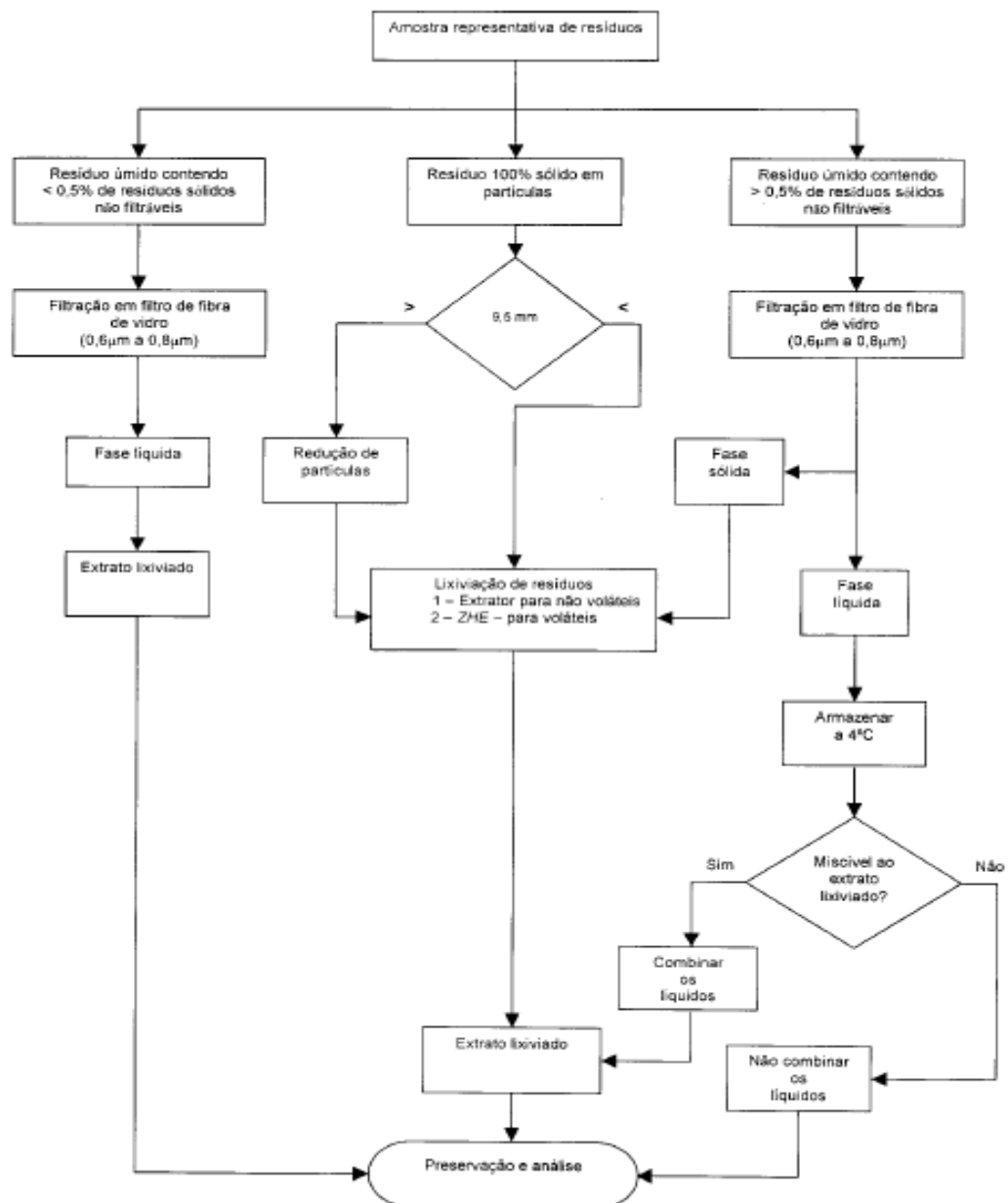
O ensaio para obtenção do extrato lixiviado foi executado conforme parâmetros da NBR 10005 -Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido- (ABNT, 2004). O Equipamento utilizado foi um Agitador Rotativo para Frascos modelo SL 96/5, mostrado na fotografia 15, com os frascos carregados para o ensaio, que foi realizado na NPT-UTFPR-CT.

Esse ensaio foi realizado em 5 amostras, TR, T10, T20, T30 e no rejeito passivo de carvão mineral natural. Os objetivos são: após analisar o extrato lixiviado saber se acontece uma redução dos metais pesados do rejeito puro para os concretos, bem como se estes índices de lixiviado obedecem às instruções normativas vigentes.

Fotografia 15 - Agitador para obtenção do extrato lixiviado**Fonte: Autoria própria (2021)**

Para preparar o material segundo a NBR 10005 (2004), os corpos de prova foram secos em estufa a 100 °C e retirados após 24h e deixados em dessecador para esfriar. O corpo de prova foi triturado e moído manualmente e peneirado em uma peneira de Ø 9,5mm. Desse material foi separado 100g que foi processado conforme o fluxograma da figura 16.

Figura 16 - Fluxograma para obtenção do extrato lixiviado



Fonte: NBR 10005 (2004)

Após o teste do pH para definição dos reagentes a serem utilizados o material foi colocado nos frascos como pode-se observar na fotografia 15. O agitador foi ligado em uma rotação constante por 18h.

Após esse tempo o agitador foi desligado e o extrato lixiviado foi filtrado com bomba a vácuo em um filtro de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de 0,6 μ m. Os extratos filtrados foram colocados em frascos preparados com reagente conforme apresentado na fotografia 16, e encaminhados para a realização da análise de metais pesados.

Essas análises foram realizadas nos laboratorios LAEC – Laboratório de Análises e Ensaios de Carvão, da SATC Criciúma-SC.

O ensaio de lixiviação foi executado somente nos corpos de prova submetidos a cura de 28 dias.

Fotografia 16 - Extrato lixiviado



Fonte: Autoria própria (2021)

O material foi enviado ao laboratório, e foi analisado para os seguintes metais pesados: chumbo total, cobre total, cromo total, níquel total e zinco total. Os procedimentos utilizados para essa análise estão descritos no quadro 5.

Quadro 5 - Métodos para a análise do extrato lixiviado

Elemento (mg/L)	Metodologia da análise
Chumbo Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248
Cobre Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248
Cromo Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248
Níquel Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248
Zinco Total	SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B / PO-248

Fonte: Adaptado das análises realizadas pelo LAEC (2021)

3.2.8 Solubilização do rejeito passivo de carvão mineral e dos traços de concreto conforme a NBR 10006 (2004)

O ensaio de solubilização foi realizado conforme parâmetros da NBR 10006- Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT, 2004). O material foi preparado conforme determina a norma, após a cura os corpos de prova foram colocados em uma estufa por um período de 48h, a uma temperatura de a 42°C (a norma recomenda esta temperatura para que não ocorra a perda de materiais voláteis). Tendo completado o período de secagem os mesmos foram retirados para serem moídos e peneirados. A peneira recomendada pela norma é de Ø 9,5mm. As leituras do teor de umidade das amostras foram realizadas e em seguida foi colocado 250g das mesmas em frascos com 1.000ml de água destilada. O próximo passo é a agitação que pode ser manual ou mecânica e deve ser de forma leve, ou em agitador automático com agitação controlada.

Na fotografia 17 estão as amostras prontas para solubilização.

Fotografia 17 - Material em repouso para a obtenção do extrato solubilizado



Fonte: Autoria própria (2021)

Os frascos foram fechados com papel filme como orienta a norma e deixados sem serem movimentados, em repouso absoluto durante sete dias. Passado este período o líquido foi filtrado em bomba a vácuo com filtro de fibra de vidro isento de resinas e com porosidade de 0,6µm e colocado em frascos previamente preparados com reagentes.

Esse ensaio foi executado somente para os corpos de prova com cura de 28 dias, e todos os traços foram ensaiados, TR, T10, T20, T30 e também o rejeito passivo de carvão mineral.

Na fotografia 18 estão apresentados os frascos prontos para a análise.

Fotografia 18 - Extrato solubilizado

Fonte: Autoria própria (2021)

Após filtradas as amostras foram encaminhadas para o LAEC, laboratório da SATC em Criciúma-SC, onde foram analisadas. Essas análises foram realizadas conforme determina a norma e está apresentada no quadro 6.

Quadro 6 - Método para análise do extrato solubilizado

Elemento (mg/L)	Metodologia de análise
SO ₄	SMWW, 23ª Edição, Método 4500-SO4 2- E / PO-100

Fonte: Adaptado das análises realizadas pelo LAEC (2021)

3.2.9 Análise mineralógica (DRX) e microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foram submetidas às análises de DRX e MEV as amostras do traço de referência (TR) e com diferentes teores de rejeito passivo de carvão mineral (T10, T20 e T30). As amostras analisadas foram: vinte e oito dias de cura; amostras submetidas a câmara de carbonatação; a câmara de climatização; e ao ataque interno por sulfatos.

As análises de DRX e MEV, foram realizadas nos mesmos locais e da mesma forma conforme descritas na fase 1 da pesquisa.

3.2.10 Análises químicas (FRX)

As análises químicas de FRX foram realizadas em amostras com diferentes teores de rejeito passivo de carvão mineral (T10, T20, T30) bem como no traço de referência TR. Amostras de todas as idades de cura foram submetidas a análise de FRX. Também foram analisadas amostras retiradas de corpos de prova submetidos a câmara de carbonatação, a câmara de climatização e ao ataque interno por sulfatos.

A forma de realização dessas análises, local e equipamento onde foram realizadas já foram devidamente descritos na fase 1 dessa pesquisa.

3.3 Metodologia da fase 3

Nessa fase foram moldados e caracterizados os blocos de concreto, quanto ao seu desempenho físico, mecânico, químico e mineralógico.

Tendo analisado os resultados da fase dois da pesquisa conforme descrito no capítulo 4, concluiu-se que a porcentagem de cimento a ser substituída pelo rejeito passivo de carvão mineral nos blocos de concreto foi de 30%.

As variáveis independentes desta fase da pesquisa são:

- O rejeito passivo de carvão mineral que substituiu o cimento em porcentagens de 0% e 30%;

- A quantidade de cimento em massa CP II-Z-32.

As condições fixas da terceira fase da pesquisa são:

- A quantidade de agregados em massa;
- A relação água/aglomerante de 0,5;
- O traço do concreto utilizado 1:3:3 (cimento, areia e brita);
- O tempo de cura dos blocos de concreto de vinte e oito dias.

3.3.1 Definição do traço dos blocos

O traço para os blocos foi definido pelo método do IPT/EPUSP (Instituto de Pesquisa Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). Este método foi adaptado para concretos secos, com a finalidade de moldar blocos de concreto.

O método IPT/EPUSP adaptado por Tango (1994), e consiste nas seguintes etapas:

- Definição da dimensão máxima do agregado, condição essa obedecida nos concretos para blocos, visto que, o agregado graúdo a ser usado é o pedrisco com máximo de 6,8mm de diâmetro.

- Resistência característica de dosagem dada pela expressão:

$$f_{bd,j} = f_{bk,j} + k_{mt} \times sd \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$f_{bd,j}$ = resistência requerida de cálculo para dosagem dos blocos à idade de j dias;

$f_{bk,j}$ = resistência característica requerida dos blocos à idade de j dias;

k_{mt} = coeficiente definido por tabela;

sd = desvio padrão estimado por meio de trabalhos anteriores, com foco na resistência média dos blocos, materiais e processos semelhantes ao empregado no momento.

Estimativas dos teores de agregados/cimento (m) a ser utilizado. Para estas estimativas o autor sugere que sejam utilizados três graus de agregados/cimento, ou seja, um rico, um médio e um pobre, na etapa de testes, com o objetivo de chegar a relação ideal agregados/cimento, que resulte na resistência programada para a data a serem testados os blocos. Na tabela 9; estão descritas as proporções sugeridas pelo autor.

Tabela 9 - Sugestões para relação agregado/cimento em concreto seco

F_{28} (MPa)	M_{b18} (kg/kg)	M_{rico} (kg/kg)	$M_{médio}$ (kg/kg)	M_{pobre} (kg/kg)	$A_{líquida}/A_{bruta}$ Mínima
5	12,6	6,6	8,6	10,6	0,5
7	13,4	5,6	7,6	9,6	0,5
9	14	4,5	6,6	8,6	0,5
11	14,5	4,1	6,1	8,1	0,5
13	15,1	3,5	5,5	7,5	0,5
15	15,6	3,0	5,0	7,	0,5
17,0*	16,2*	3,0*	5,0*	7,0*	0,56
19,0*	16,8*	3,0*	5,0*	7,0*	0,63
21,0*	17,4*	3,0*	5,0*	7,0*	0,7

Onde: F_{28} = resistência de dosagem (ou resistência média visada aos 28 dias de idade);

M_{b15} =; massa média esperada para cada bloco M15;

M = teor de agregado/cimento;

$A_{líquida}$ = área líquida da seção de trabalho do bloco (desconsiderados os vazios);

A_{bruta} = área bruta da seção de trabalho do bloco (incluindo vazios);

* Nestas proporções poderá existir uma necessidade provável do aumento na relação $A_{líquida}/A_{bruta}$ (aumentando a espessura das paredes do bloco para diminuir a área vazada), ou usando um equipamento com maior capacidade de compactação do bloco.

Fonte: Adaptado de Tango (1994)

Umidade ótima é a determinação da relação ideal de água/materiais secos. Esse teor será aquele que permite a moldagem dos blocos sem que os mesmos percam a coesão e desmontem na hora da moldagem quando retirados da máquina. E também apresentem bom aspecto superficial, massa unitária mais alta e trabalhabilidade do concreto.

Considerando o objetivo da pesquisa, ou seja, a confecção de blocos estruturais classe B, cuja a resistência exigida por norma é até 8MPa. Foram testadas as sugestões da tabela 9 para blocos de 5MPa e 7MPa, com proporções para traços

ricos e médios. Chegou-se à conclusão que um traço com relação agregado/cimento igual a seis seria adequado à pesquisa.

A relação água/aglomerante foi mantida 0,5, pois como foi visto no teste de VeBe para os concretos da fase 2, esta relação resulta em um concreto seco necessário para a moldagem dos blocos. O traço final determinado para os blocos foi 1:3:3, (um de cimento, três de areia e três de pedrisco), com relação água/aglomerante 0,5. A relação água/materiais secos ficou igual a 0,075, e o consumo de cimento foi calculado e está apresentado no capítulo 4 dos resultados da pesquisa.

3.3.2 Caracterização do concreto fresco dos blocos

O concreto fresco dos blocos foi caracterizado para massa específica e para consistência.

3.3.2.1 Massa específica do concreto fresco dos blocos

O ensaio de massa específica do concreto fresco foi realizado segundo a norma NBR 9833 (2009). Foram ensaiados os traços dos blocos BR e B30.

3.3.2.2 consistência do concreto fresco dos blocos

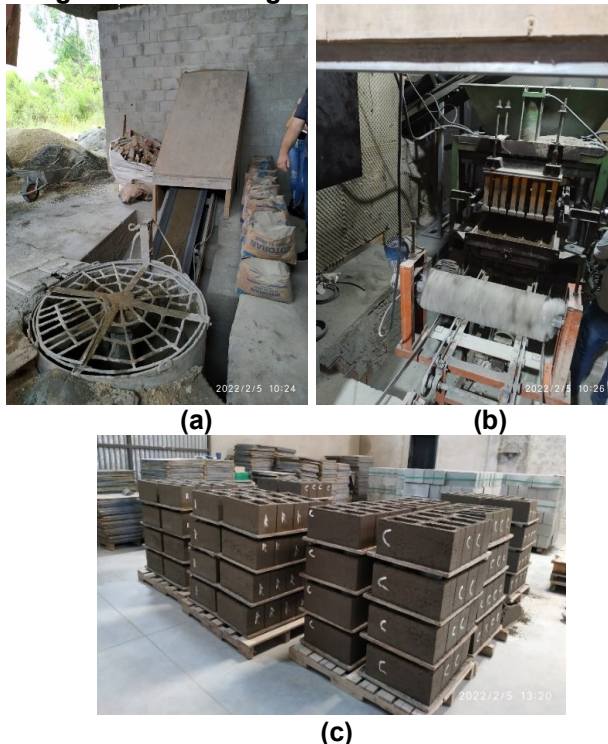
A consistência do concreto foi determinada com o consistômetro VeBe. O ensaio foi realizado conforme determina a norma ACI 211.3R-02: *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*. (ACI- 211, 2009). O ensaio foi realizado conforme descrito no item 3.2.2.2 da fase 2 da pesquisa, e para os blocos foi realizado para o BR e o B30.

3.3.3 Moldagem dos blocos de concreto

O material usado para a moldagem dos blocos já foi devidamente caracterizado na fase 1 dessa pesquisa.

Os blocos foram moldados em uma indústria especializada em blocos de concreto, na cidade de Campo Magro, região metropolitana de Curitiba. Foram moldados duzentos blocos, cem blocos com traço de referência, e cem blocos substituindo 30% do cimento por rejeito passivo de carvão mineral.

Nas fotografias 19a, 19b, e 19c estão apresentados a linha de moldagem e os blocos de concreto no dia da moldagem.

Fotografia 19 - Moldagem dos blocos de concreto

(a) (b)
(c)
Fonte: Autoria própria (2022)

Na fotografia 19a está apresentado o misturador e a esteira de transporte do concreto até o reservatório da máquina. Na fotografia 19b está apresentada a máquina onde foram moldados os blocos de concreto, e na fotografia 19c os blocos no dia da moldagem.

3.3.4 Caracterização dos blocos de concreto

Os blocos foram caracterizados de acordo com a NBR 12118 - Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Método de ensaio (ABNT, 2014). Esta norma estabelece os parâmetros de todos os ensaios necessários para a caracterização física e mecânica de blocos de concreto. Foram realizados os ensaios de absorção de água e área líquida, e resistência a compressão.

Os blocos também foram caracterizados quanto a sua composição mineralógica pela análise de DRX, composição química por análise de FRX e análise de microscopia do concreto realizada com o MEV.

Todos esses métodos de análise (FRX, DRX, MEV), já foram devidamente descritos nas fases 1 e 2 dessa pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo estão apresentados os resultados e discussões referentes a pesquisa desenvolvida.

4.1 Resultados e discussões da fase 1 da pesquisa

Nesse item serão apresentados e discutidos os resultados da fase 1 da pesquisa, essa fase tem como objetivo a escolha do cimento que apresentar melhor desempenho em conjunto com o rejeito passivo de carvão mineral.

4.1.1 Resultados das análises do rejeito passivo do carvão mineral

O rejeito passivo de carvão mineral utilizado na pesquisa foi analisado quanto as suas características físicas, químicas e mineralógicas. Essas análises são apresentadas nesse item.

4.1.1.1 Análises imediatas

Os resultados das análises imediatas do rejeito passivo de carvão mineral estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Análises imediatas do rejeito passivo de carvão mineral-RPCM

Análises/Ensaio	Resultado (%)
Determinação da umidade de higroscopia	1,57
Determinação do teor de cinzas	81,48
Determinação do teor de matérias voláteis	13,62
Determinação do teor de enxofre total	1,00
Determinação do teor de carbono fixo	4,90
Determinação do teor de carbono	10,46
Determinação do teor de hidrogênio	1,62
Determinação do teor de nitrogênio	0,23
Determinação do teor de oxigênio	5,21

Fonte: Adaptado do relatório do LAEC-SATC (2019)

As análises imediatas caracterizam o carvão quanto ao seu potencial de uso comercial principalmente em função do teor de cinzas, enxofre total e carbono que o mesmo apresenta.

O rejeito analisado possui um baixo teor de enxofre total (S=1%), e um alto teor de cinzas (81,48%). As termoelétricas brasileiras somente aceitam para a produção de energia elétrica carvões com até 2,3% de enxofre e 42% de cinzas. Algumas termoelétricas permitem um teor de cinzas no carvão mineral de 67%, e até 3,2% de

enxofre. Este parâmetro é um dos motivos do acúmulo de rejeitos da mineração de carvão. Com relação ao seu teor de enxofre o rejeito passivo de carvão mineral analisado teria aceitação em termoelétricas, porém seu teor de cinzas ultrapassa muito o máximo permitido, tornando o produto impróprio para o consumo nesse ramo de produção de energia.

Teores acima disto até 75,6% pode ser absorvido pela indústria de ácidos e pigmentos (ácido sulfúrico, sulfato férrico, sulfato ferroso). Acima destes valores o rejeito pode ser absorvido pela indústria da construção civil, que é a faixa de teor de cinzas onde se encaixa o rejeito passivo de carvão mineral estudado, 84,48% de teor de cinzas.

Os teores de oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, dependem do teor de carbono. Em um carvão com alto teor de carbono (acima de 50%) os teores destes elementos (hidrogênio, oxigênio e nitrogênio) serão em torno de 3%.

Observa-se ainda um considerável teor de carbono, embora este não o classifique como um carvão, pois o teor mínimo de carbono da turfa é de 50% (tipo de carvão com menor teor de carbono). O valor determinado de teor de carbono no rejeito passivo de carvão mineral estudado, apresenta potencial para construção civil podendo contribuir para o aumento de resistência do concreto.

4.1.1.2 Análise granulométrica

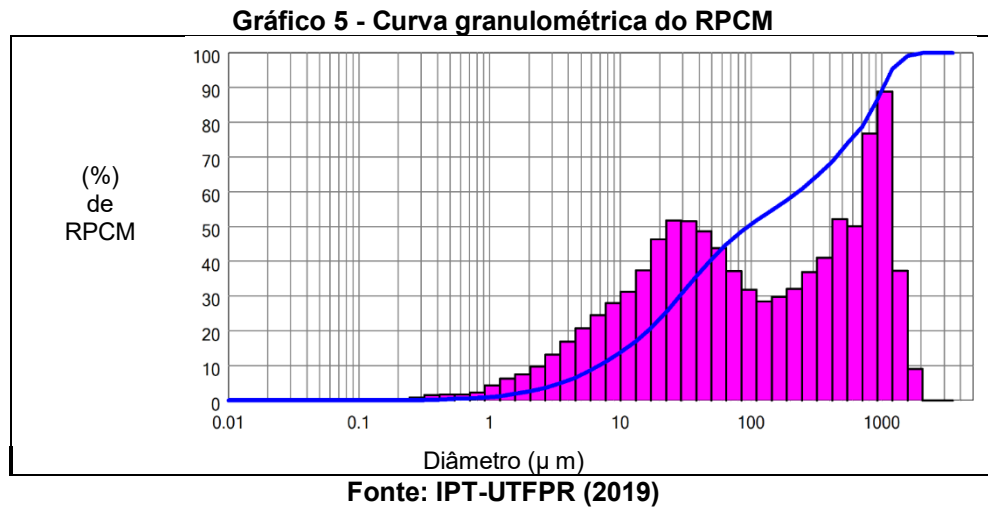
A análise granulométrica do rejeito passivo de carvão mineral foi realizada a *laser*, e os resultados estão demonstrados na tabela 11.

Tabela 11 - Composição granulométrica do RPCM

Diâmetro (μm)	Retida (%)
300.0	63,56
400.0	67,9
500.0	72,07
600.0	65,72
700.0	78,55
800.0	811,58
900.0	85,49
1000	89,33
1500	98,52
2000	100,
	0

Fonte: NPT (2019)

Com os resultados obtidos da tabela 11, foi construída a curva granulométrica do rejeito passivo de carvão mineral apresentada no gráfico 5.



Na tabela 11 e gráfico 5 está apresentada a distribuição da granulometria do rejeito passivo de carvão mineral. Pode-se observar que após ser submetido ao processo de moagem o diâmetro dos grãos do rejeito, foi reduzido a um tamanho de grãos que permite ser usado como substituto de parte do cimento no concreto, sem passar por peneiramento prévio de seleção de tamanho de grãos.

No gráfico 5 pode-se observar pela curva granulométrica, que em torno de 60% a 70% dos grãos estão no intervalo que representa a categoria de grãos com dimensão que passa na peneira de malha menor que 200.

4.1.1.3 Atividade pozolânica

O ensaio de Chapelle modificado do rejeito indicou uma atividade pozolânica com um consumo de 572,22 mg de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ de rejeito. Este resultado vem de encontro a classificação de Raverdy *et al.* (1980), que classificam como tendo atividade pozolânica materiais que apresentassem um consumo de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ =436mg. Conclui-se assim que o rejeito analisado pode ser considerado um material Pozolânico, possibilitando assim o uso do rejeito passivo de carvão mineral como aglomerante, substituindo parte do cimento no concreto.

Quando materiais pozolânicos são adicionados ao clínquer durante a fase de produção de cimento eles fixam a cal livre liberado por silicatos de clínquer durante a hidratação. Nesta situação a cal livre se torna insolúvel em água, tornando o cimento altamente resistente a agressões do meio ambiente. Substituindo uma parte do

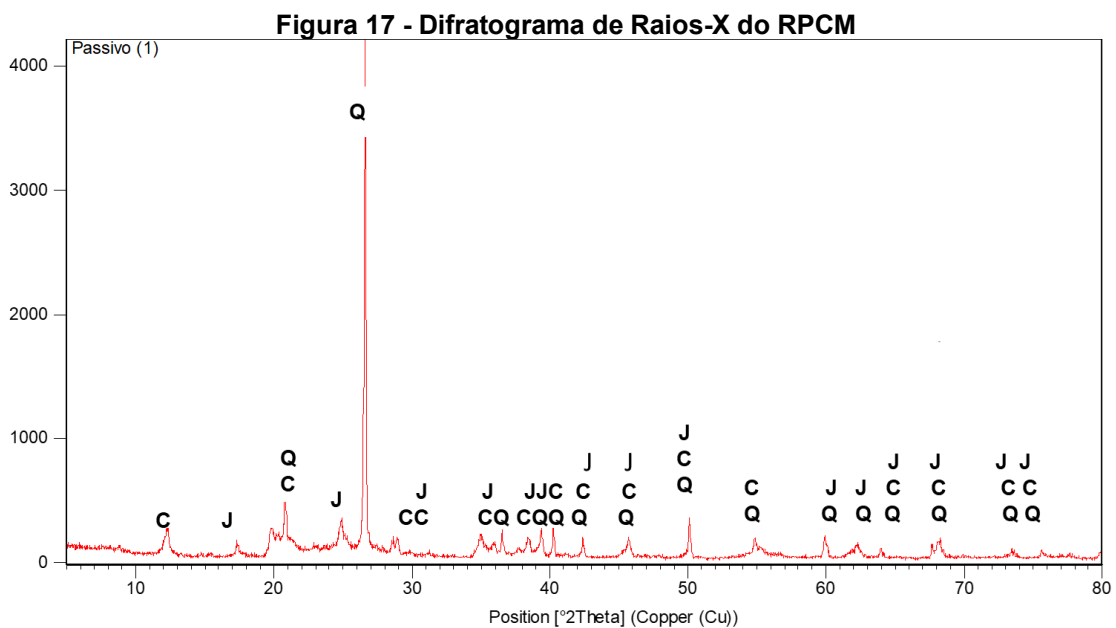
cimento por material Pozolânico o mesmo vai aumentar a plasticidade do concreto e o calor de hidratação diminui (BIRICIK *et al.*, 1999),

4.1.1.4 Densidade

O ensaio de densidade do rejeito passivo de carvão mineral realizado pelo método de análises multipictômetro resultou em $2,36 \text{ g/cm}^3$, este resultado vem de encontro aos resultados de Amaral Filho *et al.* (2013), que discutem a classificação e aproveitamento de rejeitos de carvão mineral. Os mesmos recomendam para utilização na construção civil rejeitos com densidade $2,2\text{g/cm}^3$ a $2,8\text{g/cm}^3$.

4.1.1.5 Difração de Raios-X (DRX)

Na figura 17 está representado o difratograma de Raios-X do rejeito passivo de carvão mineral. Na fase mineralógica do rejeito estão presentes o quartzo, a caulinita e jarosita.



Onde: Q – Quartzo (SiO_2)
 C – Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)
 J – Jarosita $\text{K}_2\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_4$,

Fonte: Autoria própria (2019)

Pode-se observar que o quartzo (SiO_2) lidera a fase cristalina pois apresenta o maior pico e a maior quantidade de picos, a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) também está presente na fase cristalina mineralógica do rejeito passivo do carvão mineral. Se

comparados esses resultados com a tabela 12 onde está apresentado o FRX do mineral, pode-se observar a presença de sílica e de aluminato na análise química do rejeito.

Cutruneo *et al.* (2014), em suas análises de DRX também relatam que o quartzo e a caulinita são os elementos predominantes na fase mineralógica dos rejeitos de minas de Santa Catarina.

O quartzo é um elemento de presença constante nos minerais terrestres, pois é considerado o mineral mais abundante existente na terra, sendo comum que seja detectado por análise de DRX em minerais, e sendo frequente sua presença no rejeito passivo de carvão mineral. A caulinita é um mineral formado principalmente por intemperismo químico, sendo o rejeito passivo de carvão mineral proveniente de um mineral extraído na formação de rochas sedimentares, tendo frequentemente a presença de um argilo-mineral. A jarosita é um sulfato hidratado formado pela oxidação de sulfetos de ferro, Compõe-se de 31,9% de SO₃ (sulfato), 43,0% de FeO (óxido de ferro (II)), 9,4% de K₂O (óxido de potássio) e 10,8% de H₂O (água) é encontrado como crosta de minérios ferruginosos na zona de oxidação da pirita. Em função da idade do rejeito estudado a jarosita pode estar presente como resultado da oxidação da pirita existente no carvão mineral.

4.1.1.6 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A análise de FRX do rejeito passivo de carvão mineral, possibilita o conhecimento de sua estrutura química. alguns elementos desta análise que provocam a DAM (drenagem acida de mina), também podem prejudicar o concreto através da oxidação. Na tabela 12 estão descritos os resultados obtidos na análise de FRX do rejeito.

Tabela 12 - Análise de FRX do RPCM

Componentes químicos do RPCM								
Composto	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MnO
(%) no RPCM	47,854	16,383	12,943	9,456	6,875	4,652	1,489	0,393

Fonte: NPT - UTFPR (2019)

O elemento predominante na tabela 12 é SiO₂, ou dióxido de silício que em presença do oxigênio vai formar silicatos entre eles o quartzo, elemento predominante na fase mineralógica do rejeito, como pode-se observar no difratograma de Raios -X do rejeito na figura 17.

O SO_3 tri óxido de enxofre ou óxido sulfúrico ou anidrido sulfúrico, é um dos principais focos da pesquisa, pois é um dos compostos do rejeito passivo de carvão mineral que causa sérios prejuízos a natureza quando em contato com o oxigênio e com a água. Em quantidades muito altas também pode causar danos ao concreto, pois o calor de hidratação do tri óxido de enxofre é alto e o mesmo é extremamente higroscópico.

O Fe_2O_3 conhecido como hematita, ou óxido férrico, ou óxido de ferro III. A sua principal reação é o que popularmente conhecemos como ferrugem, é o causador da DAM na rede hídrica da região carbonífera, e pode causar danos as ferragens do concreto armado, caso não seja neutralizado.

O óxido de alumínio ou alumina Al_2O_3 é um componente da bauxita, a alumina quando adicionada em pequenas quantidades no concreto pode contribuir para o aumento da resistência a compressão do mesmo.

O óxido de cálcio CaO é obtido industrialmente pela calcinação do calcário, sua presença no concreto é importante pois junto com o alumínio vai formar a etringita, que vai contribuir para a resistência do concreto.

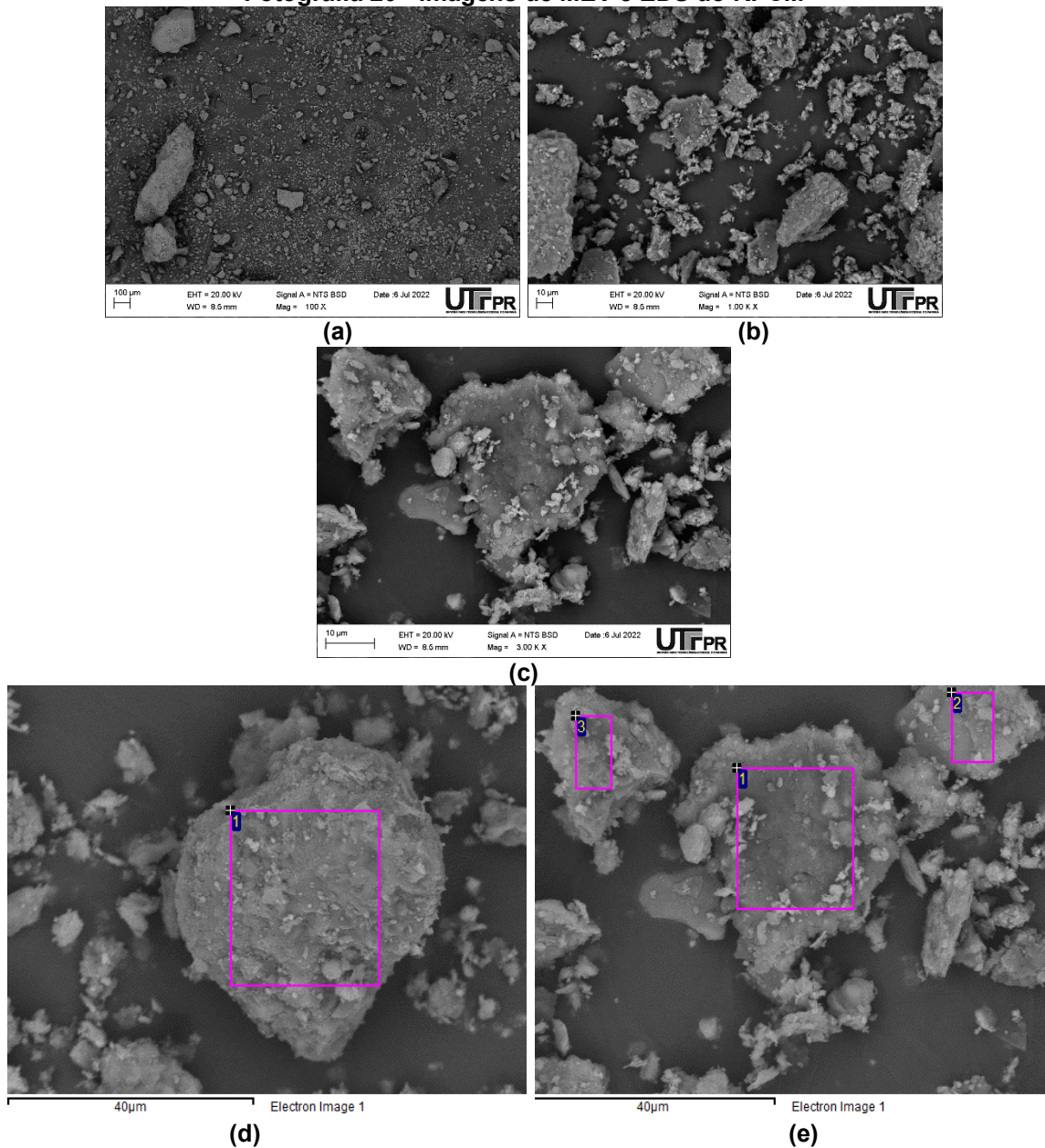
O K_2O (óxido de potássio), da análise química do mineral, contribui para a formação da jaarosita que está presente na fase mineralógica do rejeito, como descrito no difratograma de Raios-X do rejeito figura 17. O TiO_2 (dióxido de titânio), MnO (óxido de manganês), estão presentes em menor quantidade no rejeito passivo de carvão mineral.

Os resultados obtidos na análise química do rejeito (tabela 12), vem de encontro aos valores relatados por Cutruneo *et al.* (2014), que descrevem seus resultados com valores semelhantes aos deste trabalho. Os mesmos afirmam que os altos valores de Fe_2O_3 e SO_3 encontrados nos carvões brasileiros deve-se ao fato que, ao processar o carvão ROM a maior parte da pirita é eliminada do mesmo, para a produção de um carvão mais limpo. Os rejeitos brasileiros apresentam uma quantidade três vezes maior de oligoelementos do que os rejeitos dos demais países produtores de carvão mineral no mundo.

4.1.1.7 Microscopia Eletrônica de Varredura MEV

Na fotografia 20 estão representadas as imagens realizadas pelo MEV, do rejeito passivo de carvão mineral, bem como os pontos específicos analisados pelo EDS para o rejeito.

Fotografia 20 - Imagens de MEV e EDS do RPCM



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2019)

Nas fotografias 20a, 20b e 20c pode-se observar as superfícies irregulares, o tamanho não uniforme dos grãos, mesmo estando a maior percentagem em uma granulometria no intervalo que representa a categoria de grãos com dimensão passante na peneira de malha menor que 200, como já foi apresentado no gráfico 5. Observa-se também a fração fina dos rejeitos aderida os grãos maiores, esta fração que no gráfico 5 representa em torno de 20% do material é o que contribui para a baixa absorção do rejeito, pode-se observar também uma porosidade existente no rejeito passivo de carvão mineral.

Na tabela 13 estão apresentados os resultados do EDS dos pontos marcados nas fotografias 20d e 20e.

Tabela 13 - Composição química da fotografia 20d e 20e do RPCM pelo método EDS (%)

Pontos	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ti	Fe	Total
1d	62,22	-	-	3,51	32,05	-	0,47	-	1,75	100,00
1e	53,67		0,26	14,24	22,58	2,79	2,05	0,72	3,69	100,00
2e	64,55	0,59	0,21	13,69	16,41		3,13	0,19	1,23	100,00
3e	55,75			14,03	22,54	1,54	1,97	0,64	3,53	100,00
Máximo	64,53	0,59	0,26	14,24	32,05	2,79	3,13	0,72	3,69	100,00
Mínimo	22,22	0,59	0,21	3,51	16,41	1,54	0,47	0,19	1,23	100,00

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2019)

Os elementos como sódio (Na), magnésio (Mg), enxofre (S), titânio (Ti), que não são detectados em todos os pontos analisados, aparecem em pequenas quantidades. Elementos como o potássio (K) e o ferro (Fe), apresentam uma certa uniformidade entre os pontos analisados e valores relativamente baixos. Já o alumínio (Al), apresenta um valor atípico para o ponto 1e, enquanto para os pontos 1d, 1e, 1d, e 3d existe uma uniformidade de valores não variando muito a quantidade do elemento nos pontos analisados. O silício (Si) também tem uma variação considerável do ponto 1d para o ponto 2e, que apresenta o dobro da quantidade do primeiro.

O oxigênio (O) pode ter formado óxidos com todos os elementos apresentados na análise de FRX, isto explica os altos valores de oxigênio encontrados na análise de EDS. Fazendo um comparativo da análise química do rejeito passivo do carvão mineral por FRX (tabela 12) pode-se observar que os elementos predominantes aparecem nas duas análises (com exceção do Ca). No FRX estes elementos já aparecem em forma de óxidos, enquanto o EDS analisa o Oxigênio separadamente.

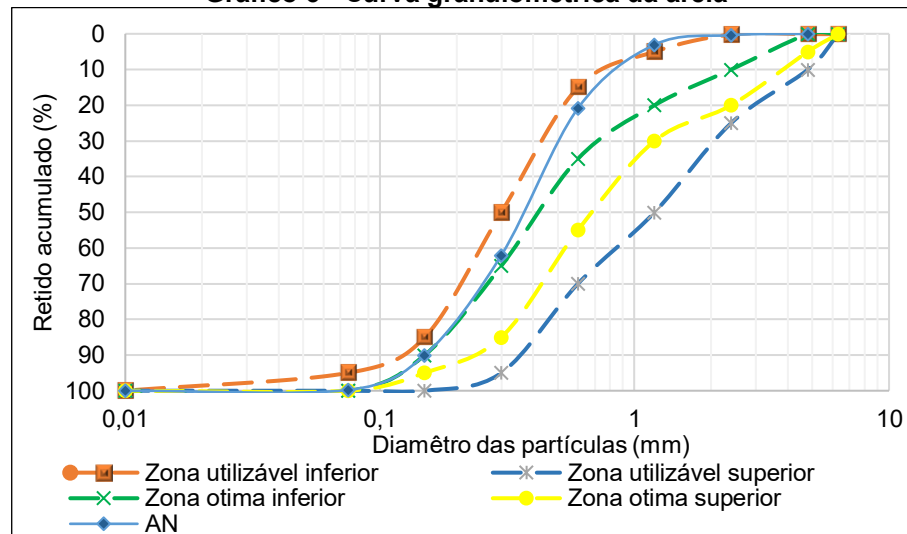
4.1.2 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados (areia e brita zero) foram caracterizados em função de suas propriedades físicas e os resultados estão descritos nesse item.

4.1.2.1 Granulometria dos agregados

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria para areia e para a brita estão apresentados nos gráficos 6 e 7.

Gráfico 6 - Curva granulométrica da areia

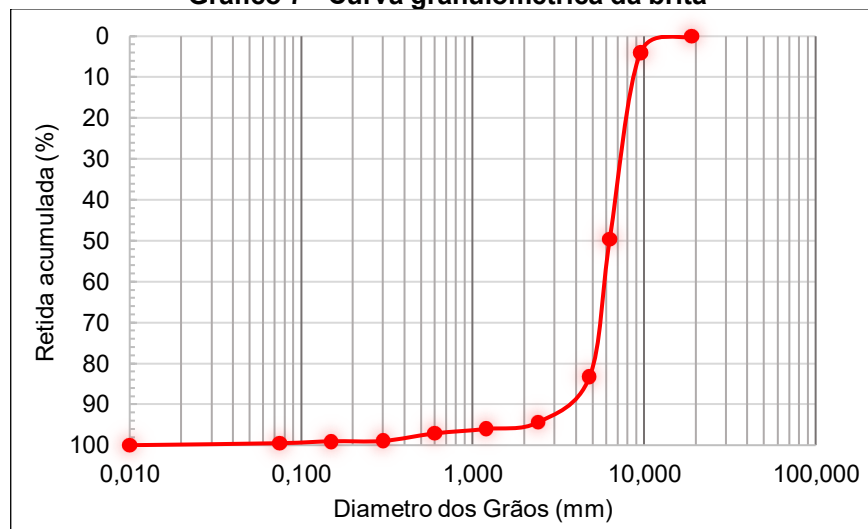


Fonte: Autoria própria (2019)

A NBR 7211 (2019), define para agregados miúdos que a sua granulometria seja uniforme, para isso determina faixas utilizáveis e ótimas de aceitação dos agregados miúdos, estas faixas estão representadas no gráfico 6, pelas suas respectivas curvas granulométricas. A areia analisada (AN=Areia Natural)), está contida no intervalo entre a zona utilizável e a zona ótima inferior.

Para o agregado graúdo a NBR 7211 (2019), não determina faixas de utilização. O resultado obtido no ensaio está apresentado no gráfico 7.

Gráfico 7 - Curva granulométrica da brita



Fonte: Autoria própria (2019)

Para agregados graúdos é analisada a porcentagem retida acumulada nas peneiras como parâmetro de classificação dos agregados. No caso da brita zero

utilizada nesta pesquisa é de 95% a 100% nos diâmetros de 2,4mm a 9,5mm. O ensaio de granulometria ainda nos permite analisar o módulo de finura (MF) do material, percentagem de material pulverulento (MP) e diâmetro máximo característico (DMC). Estes resultados estão descritos na tabela 14.

4.1.2.2 Índices físicos dos agregados

Na tabela 14 estão descritos os resultados da caracterização dos agregados quanto a seus índices físicos. Essa caracterização foi realizada segundo as normas da ABNT descritas no quadro 3.

Dos índices descritos na tabela 14 somente o material pulverulento tem parâmetro máximo permitido por norma. Para o agregado graúdo no concreto, a NBR 7211 (2019), determina que o material pulverulento seja, $MP \leq 1\%$ do total da massa de agregados utilizados, e para a areia de MP de 3% a 5%.

Tabela 14 - Índices físicos para os agregados

Índices físicos.	Areia	Brita	Unidade
Absorção de água (A)	0,75	2,53	%
Massa específica aparente do agregado seco (d_1)	2,25	2,61	g/cm ³
Massa específica do agregado saturado superfície seca (d_2)	2,25	2,68	g/cm ³
Massa específica aparente (d_3)	2,26	2,26	g/cm ³
Massa unitária do agregado seco (ρ_a)	1,61	1,49	Kg/dm ³
Massa unitária do agregado saturado superfície seca (ρ_a)	1,62	1,47	Kg/dm ³
Índice de volume de vazios (I)	28,43	1,12	%
Material pulverulento (MP)	4,78	0,49	%
Diâmetro máximo característico (DMC)	1,2	9,50	mm
Módulo de finura (MF)	2,72	7,22	

Fonte: Autoria própria (2019)

Conforme pode-se observar a brita usada apresenta material pulverulento (MP=0,49%), a norma específica $MP \leq 1\%$ para agregados graúdos. E a areia usada apresenta MP=4,78%) a norma específica de 3% a 5%. Portanto o teor de material pulverulento dos agregados está dentro dos parâmetros exigidos por norma.

O módulo de finura para o agregado miúdo tem limites definidos pela NBR 7211 (2019), estes limites estão descritos na tabela 15.

Tabela 15 - Limites do módulo de finura da areia NBR 7211 (2019)

Zona de utilização	Módulo de finura
Utilizável inferior	1,55 a 2,20
Ótima	2,20 a 2,90
Utilizável superior	2,90 a 3,50

Fonte: Autoria própria (2019)

O módulo de finura da areia estudada está dentro da zona ótima de utilização. É importante que o módulo de finura e o índice de material pulverulento do agregado se mantenham dentro dos limites indicados pela norma, pois os mesmos influenciam no consumo do cimento e da água na pasta da argamassa do concreto.

4.1.3 Caracterização dos corpos de prova

Nesse item estão descritos e analisados os resultados obtidos na caracterização química, física e mecânica dos corpos de prova que serviram como base para a fundamentação da escolha do cimento usado para dar prosseguimento da pesquisa.

4.1.3.1 Análise de FRX

Na análise de FRX dos corpos de prova alguns elementos químicos que compõe o rejeito passivo de carvão mineral e o cimento, se destacaram em valores e foram analisados separadamente, devido a importância de suas reações no concreto. Estes elementos são: SiO_2 , SO_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO .

Na tabela 16 estão relacionados os valores encontrados para estes elementos,

Tabela 16 - Análise química dos materiais e composições

Componentes químicos do RPCM, areia, cimento e composições		SiO_2	SO_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO
RPCM		47,85	16,38	12,94	9,47	6,88
Areia		98,28	0,00	0,4	0,4	0,1
Cimentos	CP IV - 32 RS	30,32	2,1	4,24	9,55	45,17
	CP V-ARI	20,07	2,78	2,99	4,57	62,04
	CP II-Z-32	21,03	2,56	3,21	8,45	53,84
	CP II-F-32	18,75	2,52	2,95	4,31	61,44
TR	CP IV - 32 RS	40,16	2,11	6,03	6,29	45,04
	CP V-ARI	25,07	2,13	6,52	7,02	59,04
	CP II-Z-32	40,98	1,89	6,03	7,95	42,87
	CP II-F-32	38,57	1,39	5,14	7,00	47,81
T5	CP IV- 32 RS	53,43	5,07	0,53	9,27	29,29
	CP V-ARI	52,96	5,4	0,6	8	32,14
	CP II-Z-32	52,77	4,92	0,36	7,86	32,81
	CP II-F-32	52,36	4,79	0,59	10,1	29,72
T10	CP IV - 32 RS	51,46	5,31	0,48	11,71	29,4
	CP V-ARI	49,4	5,71	0,08	9,68	33,44
	CP II-Z-32	52,11	3,38	0,64	12,20	29,56
	CP II-F-32	48	5,13	0,61	8,09	36,49

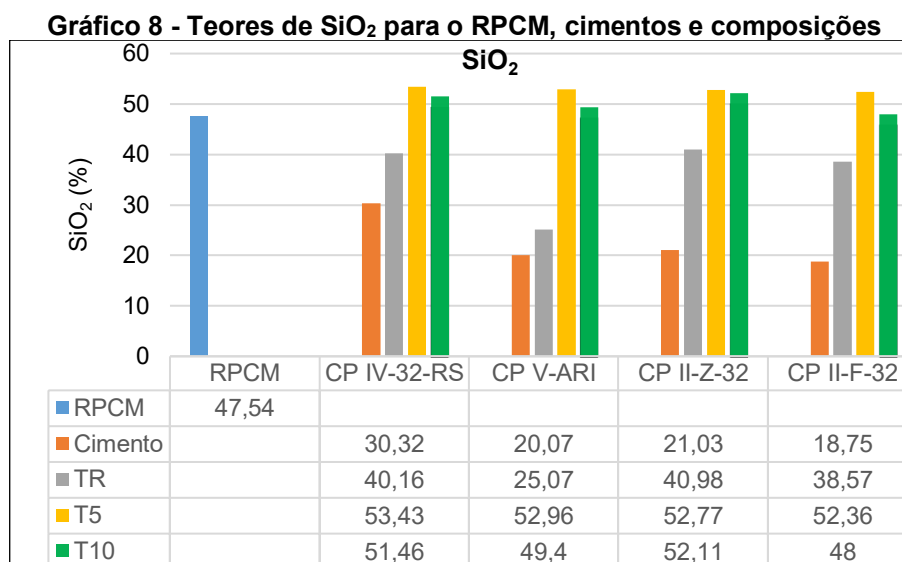
Onde: RPCM – Rejeito passivo de carvão mineral
 TR=Traço de referência com 0% de RPCM substituindo o cimento
 T5= Traço com 5% de RPCM substituindo o cimento
 T 10=Traço com 10% de RPCM substituindo o cimento

Fonte: Autoria própria (2020)

Estão descritos na tabela 16 os teores de SiO_2 , SO_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO para o rejeito passivo de carvão mineral, nos cimentos, na areia e nos corpos de prova, de referência sem rejeito passivo de carvão mineral (TR), com 5% de rejeito passivo de carvão mineral (T5) e 10% de rejeito passivo de carvão mineral (t10), substituindo o cimento.

Observa-se na tabela 16 as variações de cada componente químico que faz parte da constituição do rejeito passivo de carvão mineral, da areia do cimento e dos corpos de prova moldados, baseados nestes valores foi possível estruturar os gráficos de número 8 a número 12.

No gráfico 8 está apresentado o comportamento do elemento químico SiO_2 no rejeito e nos corpos de prova nos traços propostos, TR, T5 e T10.



Fonte: Autoria própria (2020)

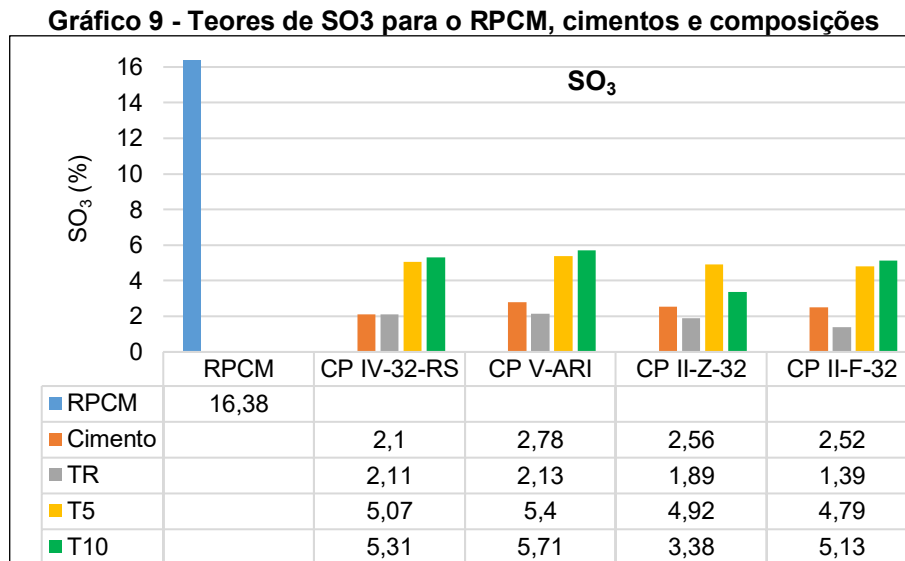
Observa-se no gráfico 8 a estabilidade dos níveis de teor de óxido de sílica em todas as composições, para o mesmo cimento nos traços de T5 e T10, como também nos diferentes cimentos, em média com 52% de SiO_2 nos cimentos CP IV-32-RS, CP V-ARI, CP II-Z-32. A maior diferença foi detectada entre os compostos do CP II-F-32 onde o teor de sílica no traço T5 está 8,82% maior que no traço T10.

Pode-se observar também que em todas as situações o teor de SiO_2 é maior nas composições que o teor de sílica do rejeito bruto em média 5% a 10%. Em relação aos cimentos os teores das composições também estão 160% maiores nos cimentos CP V-ARI, CP II-Z-32 e CP II-F-32, para o cimento CP IV 32 RS o teor de SiO_2 está 78% maior.

Com relação aos traços de referência observa-se que todas elas aumentam o teor de sílica no concreto em relação ao mesmo cimento com o qual foram moldados, porém ficam menores do que nas amostras que tiveram a substituição de parte do cimento pelo rejeito passivo de carvão mineral. Esta diferença é mais acentuada para o CP V-ARI que aumenta em torno de 100% o teor de sílica nas amostras, já para os demais cimentos o aumento ficou em média 25%.

É importante que se mantenha o teor de sílica alto nos concretos pois ele, em composição com o hidróxido de cálcio, é um dos responsáveis pela resistência final dos concretos. Os finos da sílica também contribuirão para o aumento da resistência e durabilidade do concreto, pois exercem um importante papel no fechamento dos poros contribuindo para maior impermeabilidade do concreto, impedindo a penetração de agentes agressivos.

No gráfico 9 estão apresentados os teores do trióxido de enxofre do cimento do rejeito passivo de carvão mineral, do traço TR, do traço T5 e do traço T10.

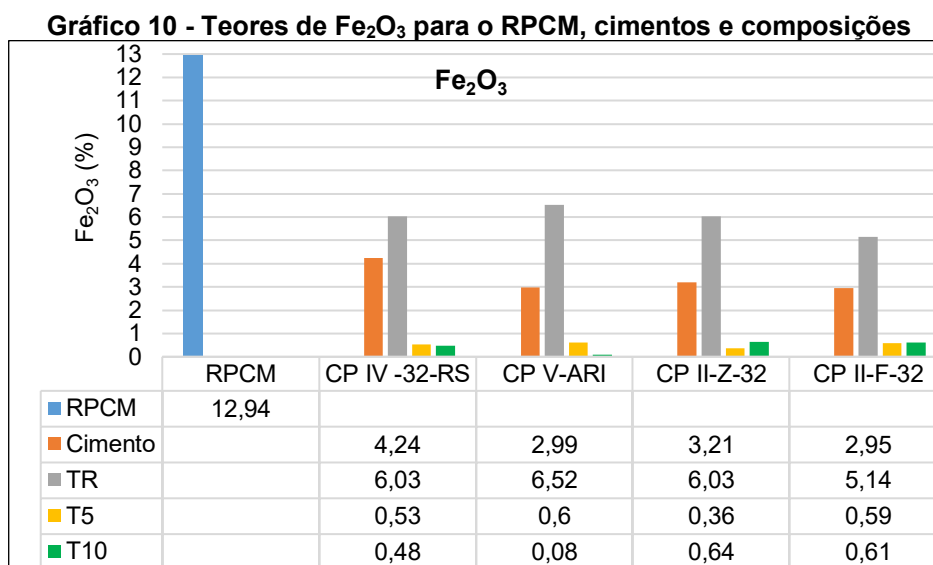


Fonte: Autoria própria (2020)

Observa-se no gráfico 9 que entre o cimento e as amostras referência dos quatro cimentos não acontece muita alteração no teor deste componente. Todas as composições apresentadas no gráfico 9 baixaram o teor de SO₃ em relação ao rejeito natural puro, que possui um teor de trióxido de enxofre de 16,38%. O cimento CP II-Z-32 com 10% de RPCM foi o que teve a maior redução de 16,38% para 3,38%, o que representa uma redução de 79% no teor de SO₃. As demais composições tiveram um comportamento semelhante apresentando uma redução de 16,38% para em média

de 5%, ou seja, uma redução de 69%. Dos quatro cimentos ensaiados o que apresentou um melhor desempenho em relação a redução do SO_3 foi o CP II-Z-32.

No gráfico 10 estão apresentados os teores de óxido férrico encontrados pela análise de FRX para as amostras estudadas.



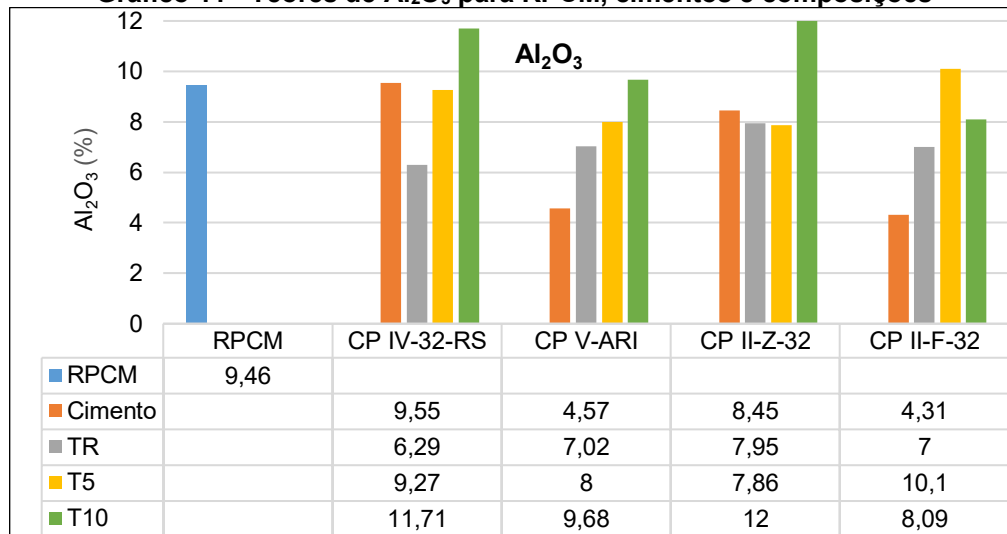
Fonte: Autoria própria (2020)

Considerando o teor de enxofre do rejeito passivo de carvão mineral estudado (16,38%), seria admissível que o teor de óxido férrico das composições apresentadas na tabela 16, tivessem valores aproximados aos valores do rejeito passivo de carvão mineral natural puro, porém não é o que se observa na análise dos resultados do FRX deste óxido férrico.

Pode-se observar no gráfico 10 que o teor de óxido férrico apresenta uma redução quase total do rejeito passivo de carvão mineral natural para as composições estudadas, ficando em média com 0,6%, sendo que o rejeito passivo de carvão mineral apresenta um teor de 12,94%, reduzindo um total de 95,20% o teor de óxido férrico nas composições.

Nas amostras de referência onde não foi substituído cimento por rejeito passivo de carvão mineral, o Fe_2O_3 variou entre 6% e 7%. entre os diferentes cimentos estes valores são mais altos que os do cimento puro, mas mais baixos do que o do rejeito passivo de carvão mineral, significando que as amostras de referência ficam em uma média entre o cimento e o rejeito natural.

No gráfico 11 estão apresentadas as mudanças ocorridas com o teor de Al_2O_3 nas amostras estudadas.

Gráfico 11 - Teores de Al_2O_3 para RPCM, cimentos e composições

Fonte: Autoria própria (2020)

No gráfico 11 está evidenciado um aumento do teor do Al_2O_3 sendo que, para o CP IV-32 RS os teores de Al_2O_3 ficam maiores do que no rejeito passivo de carvão mineral apenas para o traço T10, subindo de 9,46% do rejeito para 11,73% no traço T10, o que representa um aumento de 20,58%. Mantendo uma média de 9,3% entre o rejeito natural e o cimento e T5. O traço TR diminuiu tanto em relação ao rejeito passivo de carvão mineral como em relação ao cimento em torno de 48,68%.

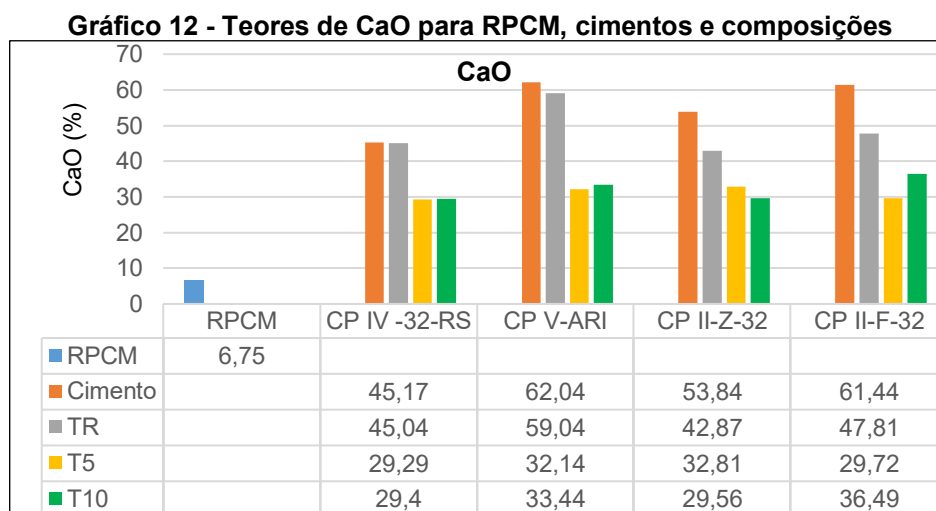
O cimento CP V-ARI possui 4,57% de Al_2O_3 em sua composição, isto significa 43% do existente no rejeito passivo de carvão mineral que é 9,46%. Os traços T5 e T10 resultaram respectivamente com teores de Al_2O_3 igual a 8,57% para T5 ficando 13% maior que o do cimento e 15,43% menor que o rejeito natural. O traço T10 finalizou com o mesmo teor igual ao do rejeito passivo de carvão mineral, e 108% maior que o teor do cimento. O traço TR resultou com 7,02% de Al_2O_3 , apenas 14% menor que o T5.

A análise do cimento CP II-Z-32 que possui 8,45% de Al_2O_3 , mostra que no traço T5, diminuiu de 9,46% que é o teor de Al_2O_3 no rejeito passivo de carvão mineral, para 7,86% de Al_2O_3 , o que representa uma queda de 16,91%. O traço TR se manteve praticamente igual ao teor do cimento que é estatisticamente igual ao traço T5. O teor de Al_2O_3 no traço T10 aumentou em relação ao rejeito natural em 27%, e em relação ao cimento o aumento do teor de Al_2O_3 para o traço T10 foi de 42%. O traço TR ficou no mesmo patamar do traço T5 ou seja 7,95% de Al_2O_3 , o que significa que para o aluminato substituir 5% de cimento por rejeito passivo de carvão mineral não vai influenciar as reações químicas da composição.

O cimento CP II-F-32 com teor de $\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,31\%$ é o cimento que apresenta o menor teor de aluminato, foi onde ocorreram as maiores altas de óxido de alumínio nas composições. No traço T5 o crescimento foi de 135% em relação ao cimento, de 4,36% para 10,1%, já em relação ao rejeito passivo de carvão mineral, o teor de óxido de alumínio manteve-se praticamente constante, ou seja, 9,46%, que é o teor de Al_2O_3 existente no rejeito natural, subiu para 10,1% no traço T5. O traço T10 também teve um aumento considerável de 4,31% (teor do Al_2O_3 no cimento), para 12% significando um aumento de 178% e 26,84% de aumento do teor de óxido de alumínio em relação ao rejeito passivo de carvão mineral. No traço TR também cresceu o teor de aluminato de 4,31% no cimento, para 7% no traço TR, deixando visível a formação da etringita na amostra.

Os cimentos CP-V-ARI e o CP II-Z-32 no traço T5, são os dois que apresentaram o menor teor de Al_2O_3 . O óxido de alumínio junto com o tri óxido de enxofre podem dar origem a formação da etringita. O processo de formação da etringita secundária pode se iniciar em poucos dias em pastas estocadas em água. Inicialmente, são formados pequenos cristais dispersos no gel C-S-H, e mais tarde, a etringita se recristaliza em alguma pequena cavidade existente. A formação da etringita secundária se caracteriza como um fenômeno relativo à matriz cimentícia, em decorrência disto, o efeito da composição química do cimento sobre a expansão é o aspecto mais relevante entre os parâmetros relativos aos materiais constituintes do concreto (MELO *et. al.*, 2010).

No gráfico 12 pode-se observar os teores de óxido de cálcio do cimento, do rejeito passivo de carvão mineral, e os teores resultantes nos traços TR, T5 e T10.



Fonte: Autoria própria (2020)

Observando o gráfico 12 conclui-se que o teor de CaO do rejeito passivo de carvão mineral está bem abaixo dos valores desse elemento nos cimentos. Os teores de CaO para os cimentos são 45,17% no CP IV-32-RS e de 62,04% no CP V-ARI, e de apenas 6,75% no rejeito natural. Esta diferença fica na ordem de 569,18% para o CP IV-32-RS, a 819,11% para o CP V-ARI.

Os cimentos em geral possuem uma alta porcentagem de CaO devido a sua origem, ao contrário do rejeito passivo de carvão mineral cuja origem não favorece a formação do CaO como já foi visto no DRX e EDS. O CaO e em conjunto com SiO₂ vão fazer com que o concreto ganhe resistência, portanto é benéfico para o concreto que o cimento possua um determinado teor de CaO.

Os teores de óxido de cálcio nas composições mantêm-se num mesmo patamar com uma média de 31,56%, sendo o maior teor do CP II-F-32 no traço T10 com 36,49%, e o menor do CP IV-32-RS do traço T5 com um teor de CaO de 29,29%, tendo uma variação de aproximadamente 20%.

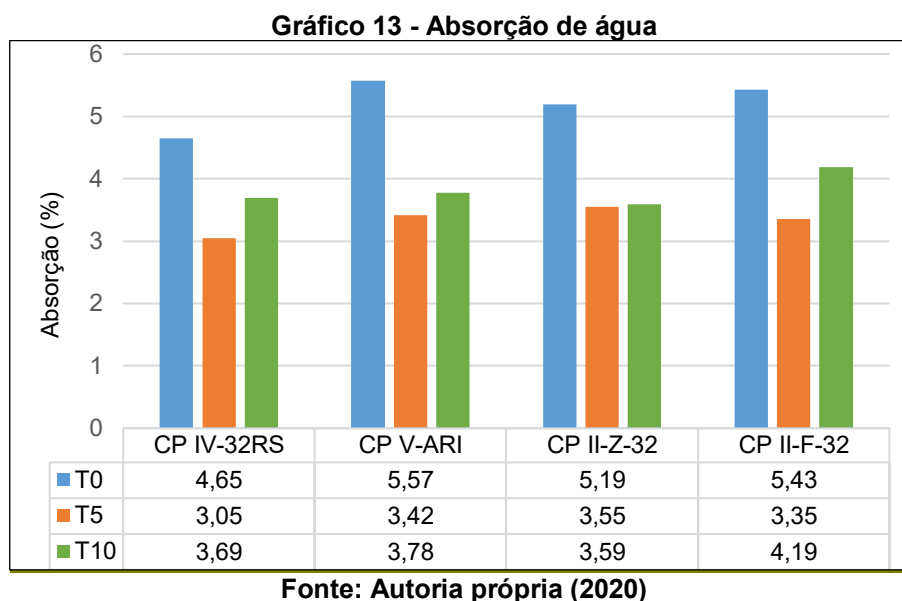
Para o CP IV-32-RS e o CP V-ARI, os traços TR mantiveram o teor de óxido de cálcio igual ao teor dos respectivos cimentos com o qual foram moldados. No TR do cimento CP II-Z-32 houve uma queda de 26% no teor de óxido de cálcio, e de 29% para o traço TR do cimento CP II-F-32.

Em todas as composições os teores de óxido de cálcio ficaram abaixo do cimento, sendo as composições do CP V-ARI e do CP II-F-32 as que tiveram a maior queda em relação ao respectivo cimento, o primeiro em torno de 50% e o segundo em torno de 40%. Esta redução do CaO se deve provavelmente a interações do mesmo com o SO₃ e com Fe₂O₃ que tiveram seus teores reduzidos ou neutralizados pelo óxido de cálcio.

4.1.3.2 Absorção por imersão

No gráfico 13 estão apresentados os resultados do ensaio de absorção por imersão dos traços TR, T5 e T10 que estão sendo analisados na fase 1 da pesquisa.

Pode-se observar que a absorção diminuiu nos traços com a substituição de parte do cimento por rejeito passivo de carvão mineral. Para o cimento CP V-ARI e o CP II-Z-32 a absorção do traço TR foi 100% maior do que os traços T5 e T10. O traço T5 e o traço T10 apresentaram a mesma absorção.



A análise estatística da ANOVA, resultou em um $F_{\text{crítico}}=3,49 < F_{\text{calculado}}=13,33$, e um $P_{\text{valor}}=0,0004 < 0,05$ mostrando que as médias são significativas, ou seja, substituir o cimento pelo rejeito passivo de carvão mineral altera significativamente a absorção do concreto. O teste de Tukey para verificar a igualdade entre as amostras resultou em um $P_{\text{valor}}=1,84E^{-24} < 0,05$, confirmando as diferenças de absorção existentes entre as amostras analisadas. No teste de Tukey, foi constatado uma diferença de absorção do traço TR para os traços T5 e T10. Para os quatro cimentos o traço TR apresenta o mesmo comportamento na absorção e diferente dos demais, isso ocorre com os quatro cimentos analisados. No mesmo teste o traço T5 para o cimento CP IV-32-RS apresenta uma absorção estatisticamente igual ao traço T5 dos cimentos CP V-ARI, CP II-Z-32 e CP ii-F-32, e T10 do cimento CP IV-32-RS. Estes por sua vez (T5 dos cimentos CP V-ARI, CP II-Z-32 e CP II-F-32 e T10 do cimento CP IV-32-RS), apresentam igualdade estatística para com o traço T10 dos cimentos CP V-ARI, CP II-Z-32 e CP II-F-32.

Os traços analisados do CP II-F-32 não apresentaram a mesma absorção para os dois teores de substituição do cimento pelo rejeito passivo de carvão mineral, ou seja, 5% e 10% de substituição), mas ficaram bem próximas, 2,44% para 5% (traço T5), e 3,1% para 10% (traço T10), isso significa que a referência com 0% de substituição (traço TR), teve uma absorção maior: 122% em relação a composição a T5 e 75% maior com relação a T10.

Para as composições executadas com o cimento CP V-ARI a absorção nos corpos de prova de TR foi maior em 163,84% que no traço T5, e 110% maior que no

traço T10. Conforme apresentado na tabela 17 os índices de absorção encontrados estão dentro do permitido pelas normas para artefatos de cimento, os quais são o foco desta pesquisa.

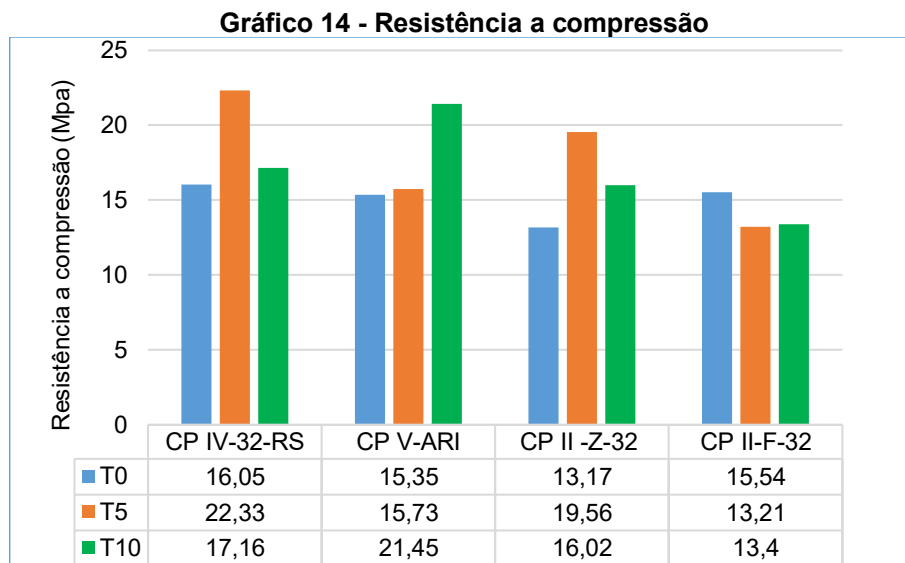
Tabela 17 - Absorção para artefatos de cimento

Componente de concreto	Norma	Absorção permitida (%)
Blocos vazados	NBR 6136-2014	Média-13 Individual-16
Telhas	NBR 13858-2-2009	10
Peças para pavimentação	NBR 9791-2013	Média≤6 Individual<7

Fonte: Autoria própria (2020)

4.1.3.3 Resistência a compressão

No gráfico 14 estão apresentados os resultados dos esforços de resistência a compressão dos traços TR, T5 e t10 que foram analisados na fase 1 da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2020)

No gráfico 14 pode-se observar que o melhor desempenho em relação a resistência a compressão ocorreu no traço T5 do cimento CP IV 32-RS e no traço T10 do cimento CP V-ARI, foram as composições que atingiram as maiores resistências a compressão, estes dois traços são também as que apresentaram a menor absorção de água. A absorção de água está relacionada aos índices de vazios e poros do concreto, ou seja, menos vazios menos absorção de água e conseqüentemente maior

resistência a compressão, que também está relacionada com quantidade de vazios e índice de porosidade do concreto.

Para os cimentos CP IV-32-RS, CP V-ARI e CP II-Z-32 os traços T5 e T10 apresentaram um melhor desempenho na resistência a compressão do que o traço TR. O melhor desempenho foi nas composições do cimento CP II-Z-32 com uma melhora da resistência em 49% para o T5 em relação ao TR, e de 23% para a T10 em relação ao TR.

O teste estatístico da ANOVA resultou em um $F_{\text{crítico}}=3,49 < F_{\text{calculado}}=26,37$, e um $P_{\text{valor}} = 1,44E^{-05} < 0,05$, mostrando que para a resistência a compressão a substituição do cimento pelo rejeito passivo de carvão mineral vai alterar significativamente o resultado, o que aponta para a desigualdade das médias. Portanto pode-se afirmar que existe diferença entre as resistências a compressão dos traços estudados. Tendo realizado o teste de Tukey, constatou-se que as amostras apresentam diferenças estatísticas.

Para o traço TR o cimento CP II-Z-32 é que se destaca dos demais apresentando o pior desempenho. Os traços T5 do cimento CP IV-32-RS, o traço T5 do cimento CP II-Z-32 e o traço T10 do cimento CP V-ARI são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey, e apresentaram o melhor desempenho no rompimento de resistência a compressão.

Não foi constatado uma queda sistemática de resistência no concreto com o aumento da porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento no traço. Esses resultados contradizem as afirmações de Rajseh; J abades; Mohan (2016), que afirmam haver uma diminuição sistemática na resistência a compressão do concreto conforme acontece o aumento de rejeito no traço.

4.1.4 Definição do cimento

Os itens abordados até o presente momento neste trabalho têm como objetivo definir qual o melhor cimento a ser utilizado para a confecção dos blocos de concreto. Esta definição envolve as características químicas, físicas e o desempenho mecânico dos concretos na composição cimento/ rejeito passivo de carvão mineral.

O estudo da fase química do rejeito passivo de carvão mineral e das composições do mesmo com o cimento, feito com o auxílio do FRX, detectou teores de $SO_3=16,33\%$ e de $Fe_2O_3=12,93\%$ no rejeito passivo de carvão mineral. Esses dois elementos são os mais prejudiciais ao meio ambiente, causando a poluição do ar e a

drenagem acida de minas-DAM, tão prejudicial à rede hídrica no entorno das minas. Sendo assim, passa a ser determinante para a escolha do cimento a forma como o mesmo se comporta quando processado junto ao rejeito passivo de carvão mineral.

Todos os cimentos propostos obtiveram um excelente desempenho com relação ao Fe_2O_3 como pode se observar no gráfico 10, reduzindo o mesmo a níveis inferiores a 1%. Porém em relação ao SO_3 as composições que obtiveram o melhor desempenho foram as do cimento CP II-Z-32, como pode se observar no gráfico 9, na composição do cimento CP II-Z-32 com 10% de RPCM, o tri óxido de enxofre foi reduzido de 16,33% a 3%.

Com relação ao óxido de sílica ao aluminato e o óxido de cálcio todos os cimentos tiveram um comportamento semelhante, não demonstrando características que impeçam o seu uso com o rejeito passivo de carvão mineral.

Os ensaios físicos e mecânicos de absorção e resistência a compressão, também tiveram resultados positivos, sendo que no ensaio de absorção constatou-se que o concreto com a substituição de parte do cimento por rejeito passivo de carvão mineral, em todas as situações tem uma diminuição significativa da absorção. A resistência a compressão, com exceção do concreto com o cimento CP II-F-32, todos os demais cimentos tiveram um desempenho positivo com aumento considerável da resistência a compressão.

Sendo assim o fator mais relevante para a definição do cimento foi a redução do SO_3 quando composto com o cimento CP II-Z-32, o que contribuiu para a escolha deste cimento para dar continuidade a pesquisa.

4.2 Resultados e discussões da fase 2 da pesquisa

Neste item estão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da etapa 3.2 da pesquisa referente ao estudo das análises químicas, físicas e de durabilidade do concreto referência e do concreto composto com o rejeito passivo de carvão mineral substituindo parte do cimento. Com os resultados destas análises foi definido o a porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral, usado no traço do concreto para a moldagem dos blocos, que serão estudados na fase 3 desta pesquisa.

4.2.1 Caracterização do concreto fresco

Este item trata da apresentação e discussão dos resultados dos ensaios realizados no concreto fresco.

4.2.1.1 Massa específica do concreto fresco.

Na tabela 18 estão apresentados os resultados dos índices físicos do concreto fresco. Esses índices foram calculados tendo como referência os resultados obtidos no ensaio de massa específica do concreto fresco.

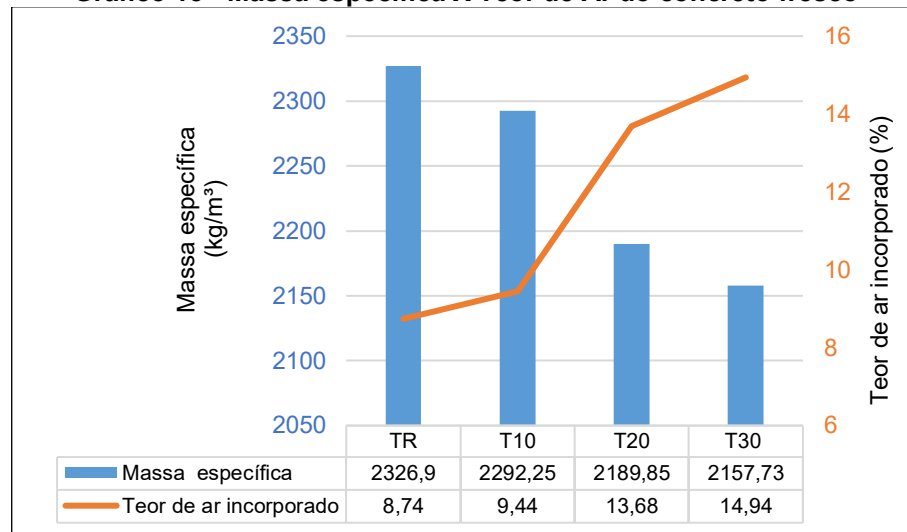
Tabela 18 - Índices físicos do concreto fresco

Índices	Traços				Unidade
	TR	T10	T20	T30	
Massa (m)	17,25	16,99	16,24	15,99	(kg)
Massa específica aparente (ρ_{ap})	2326,9	2295,25	2189,85	2157,73	(kg/m ³)
Rendimento (R)	0,006425	0,006522	0,006829	0,006929	(m ³)
Consumo de cimento (C)	368,59	316,39	269,53	232,37	(kg/m ³)
Consumo de RPCM (C _r)	0	35,266	67,38	99,59	(kg/m ³)
Consumo de aglomerante (C _a)	358,69	352,65	336,91	331,96	(kg/m ³)
Volume de concreto V _c)	0,005854	0,005873	0,005893	0,005913	m ³
Índice de ar (I _a)	1,0957	1,1104	1,15843	1,1757	
Teor de ar (A)	8,7377	9,9449	13,6765	15,9439	(%)

Fonte: Autoria própria (2021)

Pode-se observar na tabela 18 que com o aumento da percentagem do rejeito passivo de carvão mineral no concreto a massa específica diminui, pois, a massa específica do cimento usado é 2960 kg/m³, e a do rejeito é 2360 kg/m³. O rejeito passivo de carvão mineral tem uma massa específica menor que a do cimento, sendo assim quanto maior a porcentagem de cimento substituída por rejeito no concreto, menor será sua massa específica. Do traço TR para o traço T30 houve uma diminuição de 159,17 kg/m³, de 2326,9 kg/m³ para 2157,3 kg/m³, isso significa que a massa específica do T30 ficou 6,5% menor que do TR, influenciando assim em todos os índices físicos dos traços analisados, que estão apresentados na tabela 18.

No gráfico 15 está demonstrada a relação massa específica e o teor de ar incorporado no concreto fresco. Pode-se observar que conforme diminui a massa específica do concreto, aumenta o teor de ar incorporado. Para o traço TR o teor de ar incorporado foi de 8,73%, e para o traço T30 foi de 14,94%, um aumento de 6,21%, significando que o T30 subiu 71,13% o teor de ar incorporado em relação ao TR. Este aumento pode refletir em uma maior porosidade do concreto endurecido, maior absorção de água por imersão, menor resistência a compressão.

Gráfico 15 - Massa específica X Teor de Ar do concreto fresco

Fonte: Autoria própria (2021)

O aumento do teor de ar incorporado verificado do traço TR para o traço T30, pode contribuir para uma maior plasticidade do concreto, no momento da moldagem. Esta plasticidade maior possibilita a moldagem de maneira a conseguir um melhor resultado nas formas para as quais foram programados os concretos,

4.2.1.2 Consistência do concreto fresco

Na tabela 19 está apresentado um resumo da classificação dos concretos frescos conforme a sua consistência em função das determinações da norma americana ACI 211-3R-02 (2009) e da norma europeia EN 12350-3 (2019).

Tabela 19 - Resumo da classificação da consistência dos concretos frescos

Consistência	ACI 211-3R-02		EN 12350-3	
	Slump test (mm)	Tempo VeBe (s)	Grau VeBe	Tempo VeBe (s)
Extremamente seco	----	18 a 32	V ₀	>30
Muito seco	-----	10 a 18	V ₁	21 a 30
Seco	0 a 1	5 a 10	V ₂	11 a 20
Seco para plástico	1 a 3	3 a 5	V ₃	5 a 10
Plástico	3 a 5	0 a 3	-----	-----
Fluído	5 a 7	----	V ₄	<4
			-----	-----

Fonte: Autoria própria (2021)

A norma europeia EN 12350-3 (2009) classifica a consistência do concreto em graus VeBe, este grau depende do tempo necessário para que o concreto seja adensado da forma tronco cônica para a forma cilíndrica na mesa vibratória. O grau

V_0 é o que leva o maior tempo para ser adensado, sendo considerado um concreto extremamente seco por esta norma. A norma americana ACI 211-3R-02 (2009) utiliza o tempo de adensamento do concreto e o abatimento apresentado pelo *slump test*.

Analisando a tabela 19 pode-se observar que a norma ACI 211-3R-02 (2009) apresenta um intervalo a mais de tempo VeBe, onde classifica o material de seco para plástico, diferenciando assim da classificação da norma europeia EN 12350-3 (2019), que passa a classificação de seco para plástico direto.

Na tabela 20 estão apresentados os resultados obtidos no teste VeBe para os concretos analisados.

Tabela 20 - Resultados do teste VeBe para o concreto fresco

	TR	T10	T20	T30
<i>Slump Test</i> (mm)	0	0	0	0
Tempo VeBe (s)	59,14	52,41	38,63	26,66
ACI 211-3R-02	Extremamente seco	Extremamente seco	Extremamente seco	Extremamente seco
EN 12350-3	V_0	V_0	V_0	V_1

Fonte: A autoria própria (2021)

Na tabela 20 pode-se observar que: à medida que aumenta a porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento no traço do concreto, diminui o tempo necessário para o adensamento no cilindro da mesa vibratória. Para o traço TR o tempo de adensamento é de 59,14s e cai pra o traço T30 com 26,66s, isso significa uma diminuição de 123,83% de tempo para o T30 adensar no cilindro, indicando uma menor consistência e maior plasticidade do traço T30 em relação ao traço TR. Conclui-se que quanto maior a quantidade de rejeito no concreto maior plasticidade ele vai ter.

Com o resultado do teste de consistência VeBe, ou seja: com o volume do tronco de cone, tempo necessário para o seu adensamento no cilindro e o volume final do cilindro, pode-se calcular o índice de trabalhabilidade (IT) do concreto fresco seco que está apresentado na tabela 21.

Tabela 21 - índice de trabalhabilidade dos concretos

Traços	TR	T10	T20	T30
IT(s)	38,93	36,66	34,97	32,91

Fonte: A autoria própria (2021)

A trabalhabilidade do concreto é a sua capacidade de ser moldado com maior ou menor facilidade em função da sua consistência. O índice de trabalhabilidade do concreto fresco, indica o tempo necessário em segundos para que o concreto tome a forma desejada, isso significa que “quanto maior o índice de trabalhabilidade menor a plasticidade do concreto e mais difícil a moldagem da estrutura na qual o mesmo vai ser utilizado”.

Nas fotografias 21a e 21b, está apresentado o teste VeBe realizado em um dos traços do concreto ensaiado.

Fotografia 21 - Ensaio VeBe, tronco cone moldado e adensado



(a) Teste de abatimento

(b) Cone adensado

Fonte: Autoria própria (2021)

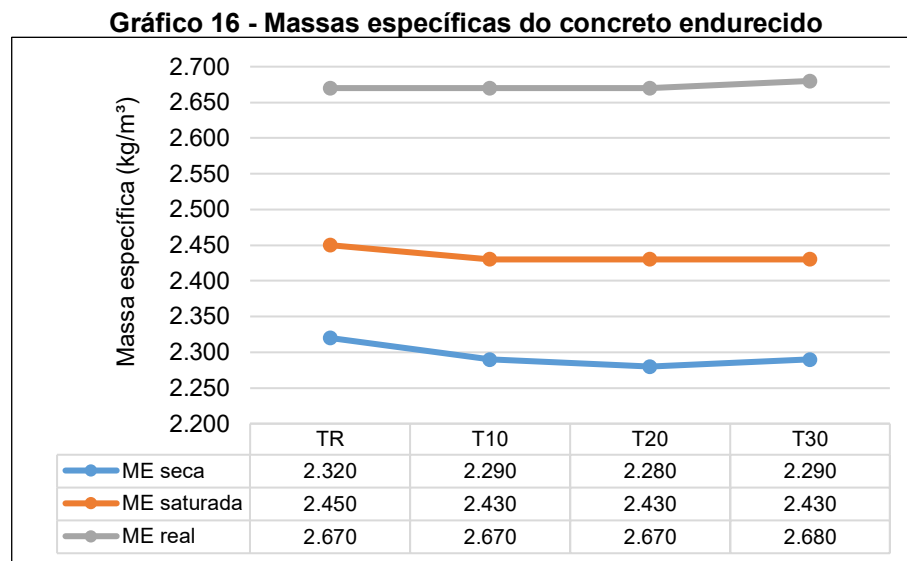
Os traços de concreto apresentaram um maior índice de trabalhabilidade para o TR, sem adição do rejeito passivo de carvão mineral. O tempo diminui gradativamente com o aumento da percentagem de rejeito substituindo o cimento no traço, indicando que quanto maior a quantidade de rejeito no concreto maior será a plasticidade e mais rápido este se moldará a forma desejada, sem aumentar a relação a/c do concreto. Pois sendo o rejeito um mineral argiloso ele tem como característica uma baixa absorção de água, que permanecerá nos poros do concreto na fase inicial de moldagem antes do endurecimento, propiciando uma maior coesão entre as partículas. Esse índice de trabalhabilidade apresentado pelo traço TR é 18,28% maior que o apresentado pelo traço T30, conclui-se, portanto, que a substituição de parte do cimento por rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto, favorece a moldagem dos blocos, pois como se trata de um concreto seco o aumento de plasticidade sem aumentar a relação a/c, não prejudica a resistência do concreto e favorece a moldagem.

4.2.2 Caracterização do concreto endurecido

Nesta etapa da pesquisa estão apresentados e discutidos os resultados da caracterização do concreto endurecido, esforços mecânicos e características físicas.

4.2.2.1 Massa específica

No gráfico 16 estão apresentadas as massas específicas do concreto endurecido, que foram analisadas apenas para as amostras com 28 dias de cura.



Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se no gráfico 16 que as massas específicas seca, saturada e real apresentam valores entre 2.280 kg/m³ e 2.680 kg/m³. Estes valores se aproximam dos valores das massas específicas do cimento utilizado na pesquisa, CP II-Z-32, fornecido pelo fabricante, de 2.960 kg/m³, e do rejeito passivo de carvão mineral que é de 2.360 kg/m³. A NBR 8953 - Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, (ABNT, 2015), estabelece as massas específicas, para os diferentes concretos conforme a tabela 22.

Tabela 22 - Massa específica conforme a NBR 8953 (2015)

Tipo de concreto	Massa específica seca
Concreto normal	2 000 kg/m ³ a 2 800 kg/m ³ .
Concreto leve (CL)	inferior a 2 000 kg/m ³ .
Concreto pesado ou denso (CD)	superior a 2 800 kg/m ³ .

Fonte: Adaptado da NBR 8915 (2015)

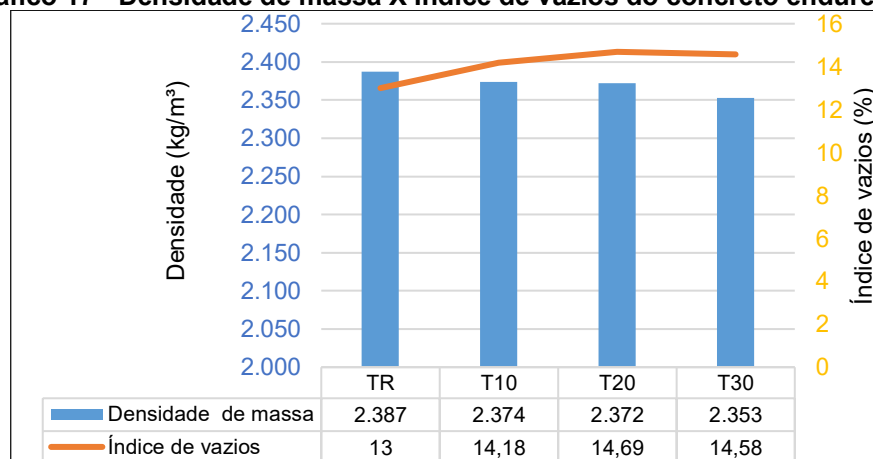
Os valores apresentados no gráfico 16 estão de acordo com os valores exigidos por norma para o concreto normal, conforme apresentado na tabela 22. O concreto normal (ou concreto convencional) é o objetivo desta pesquisa. A análise estatística da ANOVA para as massas específicas apresentadas, resultou em um $F_{crítico}=4,76 > F_{calculado}=2,32$, e $P_{valor}=0,17 > 0,05$, mostrando que a adição de rejeito passivo de carvão mineral não influencia com significância nas massas específicas do concreto endurecido. No entanto a análise mostrou que as massas específicas seca, saturada e real, são estatisticamente diferentes pois resultou em um $F_{crítico}=5,14 < F_{calculado}=21498,37$, e $P_{valor}=7,98E^{-09} < 0,05$. Porém mesmo sendo estatisticamente diferentes, todas estão dentro da faixa exigida pela norma para concreto normal de 2.000 kg/m^3 a 2.800 kg/m^3 .

4.2.2.2 Densidade de massa e índice de vazios

A densidade de massa e o índice de vazios do concreto endurecido foram calculados com os resultados obtidos do ensaio de absorção e da massa específica do concreto. O índice de vazios é importante pois pode influenciar na absorção e na resistência a compressão do concreto.

No gráfico 17 estão apresentados os resultados obtidos para a densidade e o índice de vazios dos traços estudados.

Gráfico 17 - Densidade de massa X Índice de vazios do concreto endurecido



Fonte: Autoria própria (2021)

Pode-se observar no gráfico 17 que a densidade diminui conforme aumenta o índice de vazios. A maior densidade ocorre no traço TR e diminui gradativamente com o aumento do rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto. Sendo assim no

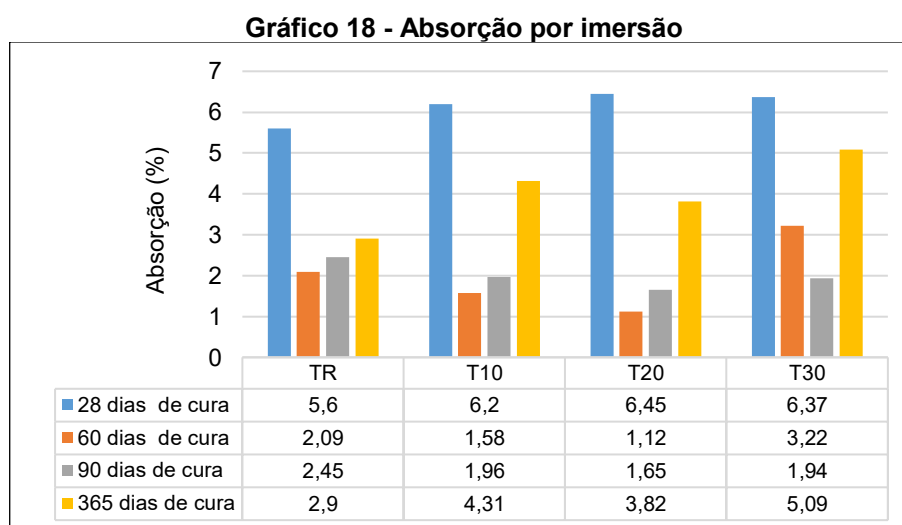
traço TR ocorre o menor índice de vazios, que aumenta com o aumento do rejeito passivo de carvão mineral no traço. Isso pode ser atribuído ao fato que o cimento absorve mais a água de amassamento do concreto, ocorrendo uma melhor hidratação com o fechamento dos vazios mais rápido que nos traços onde o rejeito passivo do carvão mineral substitui gradativamente o cimento.

A diferença entre as densidades é de 1,44% de redução do TR para o T30, e o índice de vazios aumenta 12,15% do traço TR para o Traço T30. No entanto a análise estatística da ANOVA mostra que as médias das densidades entre os traços são significativamente diferentes com um $F_{\text{crítico}}=5,99 < F_{\text{calculado}}=113376,99$ e $P_{\text{valor}}=4,63 E^{-14} < 0,05$. O teste de Tukey indicou que o traço TR é diferente do T30, mas apresenta semelhanças com o T10 e o T20, que apresentam igualdade estatística no teste de Tukey e também são semelhantes ao T30.

O índice de vazios apresentou diferenças estatísticas na análise da ANOVA com um $F_{\text{crítico}}=5,99 < F_{\text{calculado}}=238,71$ e $P_{\text{valor}}=4,63 E^{-06} < 0,05$, indicando que existe diferença no índice de vazios entre os traços para o concreto endurecido em função da substituição do cimento por rejeito passivo de carvão mineral. Pelo teste de Tukey o traço que apresenta esta diferença é o traço T30, o traço TR, T10 e T20 são iguais estatisticamente em relação ao índice de vazios.

4.2.2.3 Absorção por imersão

No gráfico 18 estão apresentados os resultados das absorções por imersão realizadas nas amostras submetidas as idades de cura de 28, 60, 90 e 365 dias



Fonte: Autoria própria (2022)

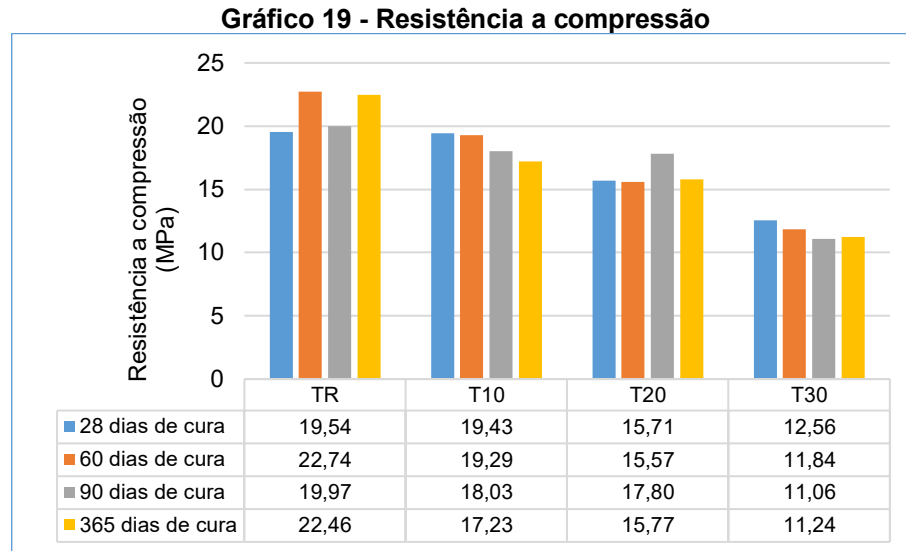
Observa-se no gráfico 18, que os maiores índices de absorção ocorreram nos corpos de prova com cura de 28 dias, pois o concreto apresentava uma maior permeabilidade nesta idade de cura, em função da hidratação do cimento, aos 60 dias ocorreu o menor índice de absorção para o TR, o T 10 e o T20. A maior redução aos 60 dias de cura ocorreu no T20 com 290,09% em relação aos 28 dias. O TR, T10 e T20 tiveram um comportamento uniforme com a maior absorção aos 28 dias a menor aos 60 dias, subindo gradativamente dos 60 dias para os 90 dias e dos 90 dias para os 365 dias. Este aumento dos 60 dias aos 365 dias atribui-se ao fato da água de amassamento ter sido totalmente absorvida pelos componentes do concreto ao longo do tempo, contribuindo assim com a formação da rede capilar cuja tendencia é ser preenchida novamente com a absorção de água. O traço T30 apresentou um comportamento diferente dos demais, onde a menor absorção ocorreu aos 90 dias de cura. O maior índice de absorção ocorreu no traço T20 com cura de 28 dias, 6,45%, a NBR 6136 (2014) permite para blocos vazados que é o objetivo desta pesquisa um índice de absorção de 16% para o bloco individual, e 13% para a média de um conjunto de blocos, portanto as absorções registradas em todas as idades de cura estão dentro dos parâmetros permitidos por norma.

A análise estatística da ANOVA para as absorções indicou que a adição de rejeito passivo de carvão mineral nos traços do concreto não é significativa para a absorção no concreto endurecido, pois $F_{\text{crítico}}=3,86 > F_{\text{calculado}}=1,78$, e $P_{\text{valor}}=0,22 > 0,05$. No entanto a mesma análise determina que existe diferença estatística na absorção ocorrida nas diferentes datas de cura dos corpos de prova, com um $F_{\text{crítico}}=3,86 < F_{\text{calculado}}=39,36$, e $P_{\text{valor}}=4,68E^{-05} < 0,05$.

4.2.2.4 Resistência a compressão

No gráfico 19 estão apresentadas as resistências a compressão para os traços nas diferentes idades de cura de 28, 60, 90 e 365 dias. Esta análise de resistência a compressão foi realizada com os corpos de prova que foram submetidos a absorção por imersão, sendo que os de 28 dias de cura também foram submetidos ao ensaio de massa específica do concreto endurecido.

Observa-se no gráfico 19 que os esforços de resistência a compressão reduzem do traço TR para o traço T30, indicando que a substituição de cimento por rejeito passivo do carvão mineral no traço do concreto, pode estar contribuindo para esta redução.



Fonte: Autoria própria (2022)

Nas diferentes datas de cura ocorrem algumas alterações de resistência dentro do mesmo traço, no entanto não pode se observar uma correlação entre a absorção e a resistência a compressão, ou seja, nesta análise as menores resistências não ocorreram onde ocorrem as maiores absorções. A resistência a compressão reduz nos traços onde a densidade é menor e o índice de vazios é maior, podendo -se atribuir a menor resistência ao maior índice de vazios do concreto, bem como a menor densidade do concreto resultante da menor massa específica do rejeito passivo de carvão mineral.

A análise estatística da ANOVA resultou em um $F_{\text{crítico}}=3,86 < F_{\text{calculado}}=38,67$, e $P_{\text{valor}}=1,81E^{-05} < 0,05$, conclui-se assim que existem diferenças estatísticas nas resistências a compressão entre os traços com diferentes porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral. Porém a análise entre as idades de cura das amostras indica que os esforços são estatisticamente iguais para as diferentes idades para os referidos traços, com um $F_{\text{crítico}}=3,86 > F_{\text{calculado}}=0,24$, e $P_{\text{valor}}=0,87 > 0,05$.

O teste de Tukey realizado para cada idade de cura revelou que para a idade de 28 dias de cura o $P_{\text{valor}}=0,0003 < 0,05$, os traços TR e T10 são iguais estatisticamente, e diferentes do traço T30, e todos os três traços são semelhantes ao traço T20. Para os 60 dias de cura os resultados do teste de Tukey indicaram quatro traços estatisticamente diferentes, com um $P_{\text{valor}}=2,10E^{-06} < 0,05$, o traço T20 apresentando semelhança com o TR e o T10. Aos 90 dias de cura o $P_{\text{valor}}=1,2 < 0,05$, o traço TR é estatisticamente diferente do traço T30, e os dois são semelhantes ao T10 e o T20. Para os 365 dias de cura o $P_{\text{valor}}=1,13E^{-05} < 0,05$, os traços T10 e T20

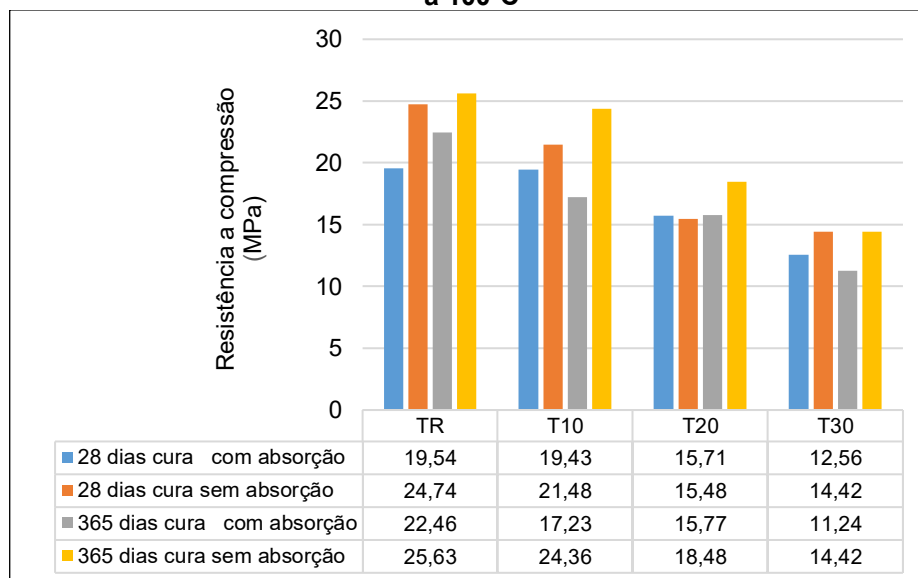
são estatisticamente iguais, e diferentes do traço TR e do T30 que também diferem entre si em relação a análise estatística.

4.2.2.5 Resistência a compressão simples para os corpos de prova com cura de 28 e 365 dias, com e sem o tratamento de absorção por imersão

No gráfico 20 estão apresentados os esforços de resistência a compressão dos traços com 28 e 365 dias de cura, submetidos e não submetidos ao ensaio de absorção por imersão.

O objetivo da análise em separado destas amostras é a comparação da resistência a compressão, pois no ensaio de absorção as amostras são submetidas a secagem em estufa a 100°C. Esta temperatura pode de alguma forma comprometer a microestrutura do concreto, alterando compostos como os silicatos hidratados de cálcio (C-S-H), provocando assim uma queda na resistência mecânica. Esta temperatura pode alterar também compostos como o hidróxido de cálcio (CH), ou os menores que contém aluminatos ou sulfatos. A perda de umidade pode fazer com que todos eles sofram alterações em sua estrutura.

Gráfico 20 - Comparação da resistência a compressão com e sem aplicação de secagem prévia a 100°C



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 20, que tanto para as amostras analisadas com cura de 28 dias, como as com cura de 365 dias, todas sofreram alterações nominais nas resistências a compressão.

A análise da ANOVA para as amostras da cura de 28 dias revelou que não existe diferença estatística para a resistência a compressão entre as amostras que foram submetidas a temperatura de 100°C e as que não foram submetidas, pois o $F_{\text{crítico}}=10,13 > F_{\text{calculado}}=3,93$ e $P_{\text{valor}}=0,14 > 0,05$. No entanto para as amostras com cura de 365 dias a análise da ANOVA indicou um $F_{\text{crítico}}=10,13 < F_{\text{calculado}}=15,33$, e $P_{\text{valor}}=0,03 < 0,05$, mostrando diferenças estatísticas na resistência a compressão, entre as amostras submetidas a temperaturas de secagem de 100°C e as não submetidas a mesma temperatura.

Portanto conclui-se que a temperatura não se configura no principal agente causador da redução das resistências mecânicas do concreto, pois as águas, livre e capilar, só começam a evaporar quando a temperatura de aquecimento da pasta do cimento ultrapassar os 100°C, esta evaporação é total entre 200°C e 300°C. O gel de C-S-H inicia seu processo de desidratação aos 100°C. A quantidade de portlandita decresce até a temperatura do concreto atingir 100°C, devido a desidratação da pasta cimentícia. Porém nestes níveis estas alterações na estrutura do cimento não são significativas para causar alterações na estrutura do concreto.

Nas amostras com cura de 365 dias ocorreu uma hidratação com maior aumento de volume dos materiais, o que proporcionou uma maior retenção de água nos poros capilares, que evaporou com a secagem a 100°C, formando uma quantidade maior de poros, reduzindo assim a resistência a compressão do concreto.

4.2.3 Durabilidade do concreto endurecido

Neste item estão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios e análises de durabilidade do concreto endurecido.

4.2.3.1 Carbonatação

Os corpos de prova submetidos ao tratamento de carbonatação, foram mantidos por seis meses na câmara de carbonatação, sendo cinco amostras de cada traço, TR, T10, T20 e T30. Os resultados estão descritos a seguir.

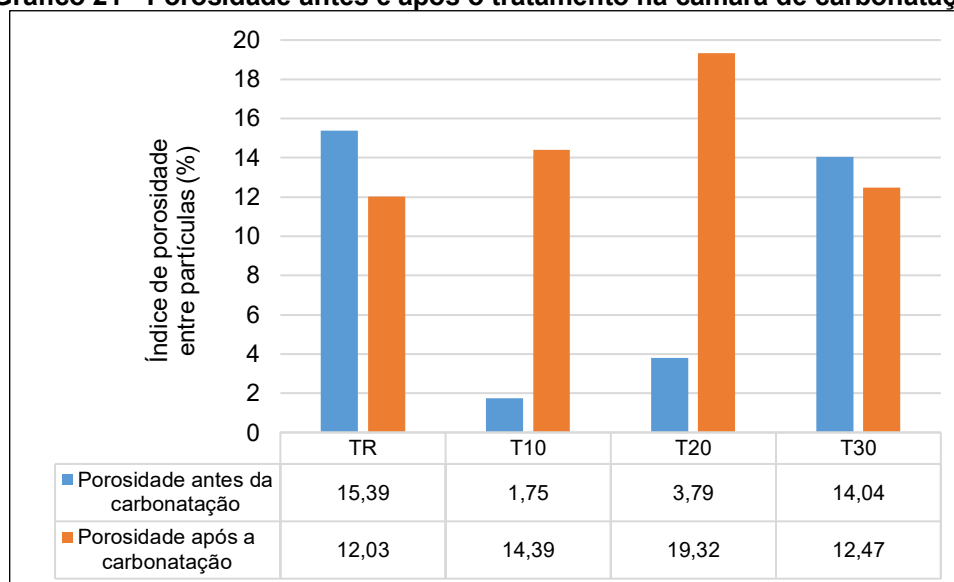
No gráfico 21 está representado o índice de porosidade entre partículas das amostras medidas antes e após o tratamento na câmara de carbonatação.

A porosidade antes da carbonatação pode ser um indicativo de como as amostras se comportariam na câmara de carbonatação, pois uma rede capilar de

poros mais extensa, permite uma maior circulação de gases e líquidos nas interfaces do material constituinte do concreto. No caso específico da carbonatação o CO_2 encontraria mais facilidade de penetração e com isso provocaria uma maior carbonatação, com conseqüente fechamento dos poros.

No gráfico 21 pode-se observar que não houve uma uniformidade na formação e fechamento da rede capilar pois, a porosidade aumenta após o tempo de exposição na câmara de carbonatação para os traços T10 e T20, enquanto para os traços TR e T30 esse índice de porosidade diminui em relação as amostras não carbonatadas.

Gráfico 21 - Porosidade antes e após o tratamento na câmara de carbonatação



Fonte: Autoria própria (2022)

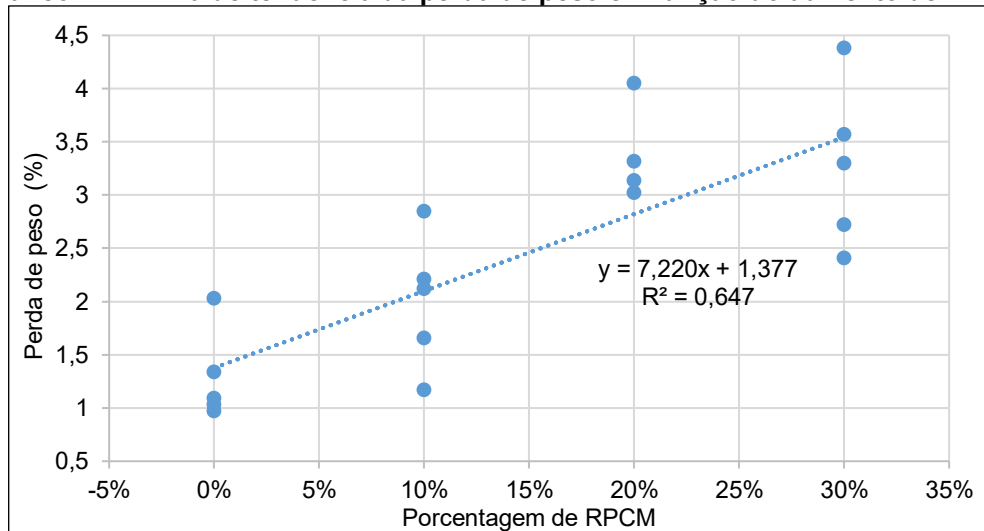
Para as amostras que não foram submetidas a câmara de carbonatação, o traço TR sem rejeito passivo de carvão mineral, apresentou a maior porosidade de todos, já o T10 apresentou a menor porosidade seguido do T20 e do T30, subindo gradativamente com o aumento do teor de rejeito passivo de carvão mineral na amostra. Isso pode ser atribuído a água de amassamento não absorvida pelo rejeito e evaporada posteriormente, ocasionando uma maior porosidade nos traços com o maior teor de rejeito. Após a carbonatação o índice de porosidade diminui para o TR, e o T30, e aumenta para o T10 e o T20 em relação a amostra não carbonatada.

Os traços TR e o T30 tiveram uma redução no índice de porosidade na ordem de 27,79% para o TR e 12,49% para o T30, após o tratamento de carbonatação. Para os traços T10 e T20 o aumento do índice de porosidade foi de 729,29% para o T10, e

de 409,06% para o T20. Pode-se observar ainda que antes do tratamento de carbonatação, o índice de porosidade era maior para o traço TR em relação ao traço T10 na ordem de 779,43%, que é o traço que apresenta a menor porosidade do conjunto. Após a carbonatação o índice de porosidade aumenta do traço TR até o traço T20 e reduz no traço T30.

Os índices de porosidade contribuíram para a perda de peso durante a carbonatação. Esta perda de peso está representada em percentuais no gráfico 22, com a respectiva linha de tendência do comportamento do concreto na câmara de carbonatação, em função das diminuições de peso, com o aumento de rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto.

Gráfico 22 - Linha de tendência da perda de peso em função do aumento de RPCM



Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar no gráfico 22 que a menor redução ocorreu no traço TR, sem rejeito passivo de carvão mineral, e a maior no traço T30, com 30% de rejeito passivo de carvão mineral. A redução de peso é atribuída a perda de umidade, pois as amostras após a cura submersa, ficaram por 15 dias em laboratório e em seguida foram colocadas na câmara de carbonatação, sem passarem por uma secagem na estufa. Esta diminuição natural de umidade durante os seis meses em que as amostras ficaram carbonatando, teve como consequência o aumento da quantidade de poros no concreto, o que favoreceu a penetração do CO₂ causando a carbonatação.

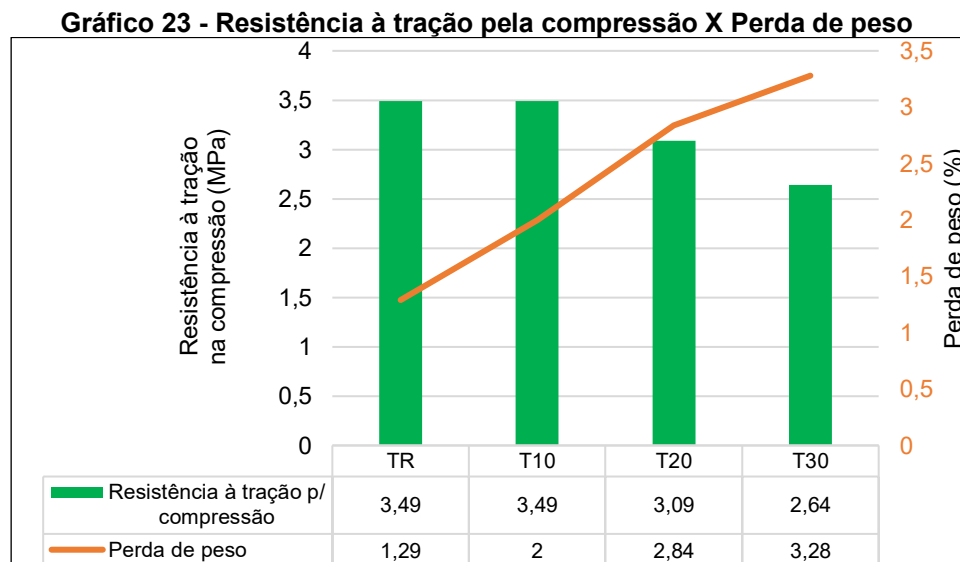
No gráfico 22 pode-se observar um R²=0,647 indicando que o modelo utilizado para análise tem 64,70% de confiabilidade, e que outros fatores, como a massa

específica do rejeito menor que a do cimento, além das diferentes quantidades de rejeito passivo de carvão mineral nas amostras, podem estar influenciando na perda de peso dos corpos de prova.

A análise da ANOVA para as médias das perdas de peso de cada traço, apresentou um $F_{\text{crítico}}=5,99 > F_{\text{calculado}}=0,04$, e $P_{\text{valor}}=0,89 > 0,05$, como o $F_{\text{crítico}} > F_{\text{calculado}}$ as médias não são significativas, e a perda de peso não pode ser atribuída as diferentes porcentagens de carvão mineral substituindo o cimento no concreto. No entanto essas perdas de peso podem ser atribuídas a perda natural de umidade devido ao tempo de exposição dos corpos de prova na câmara de carbonatação.

Embora substituir cimento por rejeito não interfira na perda de peso, o teste de Tukry mostrou que esta perda é diferente entre os diferentes traços, ou seja: o traço TR difere do traço T20 e do traço T30, mas apresenta semelhança como traço T10. Os traços T20 e T30 são iguais para a perda de peso e semelhantes ao traço T10.

No gráfico 23 está apresentada a perda de peso em relação a resistência à tração pela compressão, pois a perda de peso pode ser influenciada pela porosidade, que tem uma relação direta com a perda de resistência dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria (2022)

A perda natural de umidade com consequente perda de peso, favoreceu a formação de poros no concreto. A maior quantidade de poros nas amostras, contribuiu para a queda da resistência nos esforços de rompimento da tração por compressão dos corpos de prova, como está demonstrado no gráfico 23. O rompimento foi

realizado por compressão diametral cilíndrica, possibilitando assim a aplicação da fenolftaleína para a leitura da profundidade de carbonatação.

Pode-se observar no gráfico 23 a relação: quanto maior a perda de peso menor a resistência à tração por compressão, o que pode ser atribuída ao aumento de poros no interior do concreto. Os traços TR e o T10 tiveram o mesmo desempenho no esforço de resistência à tração por compressão, já os traços T20 e o T30 sofreram uma queda nesta resistência. Os resultados encontrados neste trabalho de resistência à tração por compressão, que variam de TR=3,49 MPa a T30= 2,64 MPa, (queda de 19,98% no esforço de resistência à tração por compressão para os corpos de prova carbonatados), vem de encontro aos resultados obtidos por Wang (2014), de 3,14 MPa para corpos de prova com rejeito de carvão mineral substituindo a porção mais fina da areia. O autor confirmou que quanto mais fino a granulometria do rejeito a ser utilizado, menor será a absorção de água pelo rejeito, e maior será a resistência do concreto.

A análise estatística realizada das médias dos esforços dos diferentes traços submetidos a resistência à tração por compressão, mostrou que as diferentes porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento no traço do concreto, não interferem significativamente nas médias dos esforços de resistência dos corpos de prova, pois para análise da ANOVA $F_{\text{crítico}}=5,99 > F_{\text{calculado}}=0,095$, e $P_{\text{valor}}= 0,37 > 0,05$, mostrando uma igualdade entre as médias.

O teste de Tukey para as amostras que foram analisadas ao esforço de resistência à tração por compressão, mostrou que os corpos de prova dos traços TR e T10 apresentaram uma igualdade de desempenho, e apresentam semelhança com o T20, e são diferentes do T30. Já os traços T20 e o T30 apresentaram desempenho semelhante.

O carvão mineral absorve uma quantidade menor de água de amassamento, sendo um material menos expansivo, deixando mais vazios na microestrutura do concreto. Esta água fica aprisionada nos interstícios do concreto e contribuirá para a carbonatação quando o material for submetido a presença do CO₂.

As fotografias 22a, 22b, 22c, 22d, 22e, 22f, 22g e 22h, apresentam a profundidade de carbonatação nos corpos de prova após seis meses de tratamento na câmara de carbonatação. Analisando a profundidade alcançada pela fenolftaleína, pode-se observar o aumento das áreas carbonatadas nos corpos de prova conforme aumenta a quantidade de rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto.

Fotografia 22 - Teste com fenolftaleína para a leitura da profundidade de carbonatação



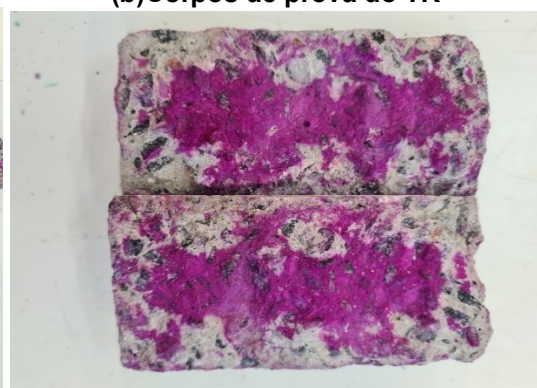
(a) Corpos de prova do TR



(b) Corpos de prova do TR



(c) Corpos de prova do T10



(d) Corpos de prova do T10



(e) Corpos de prova do T20



(f) Corpos de prova do T20



(g) Corpos de prova do T30



(h) Corpos de prova do T30

Fonte: Autoria própria (2022)

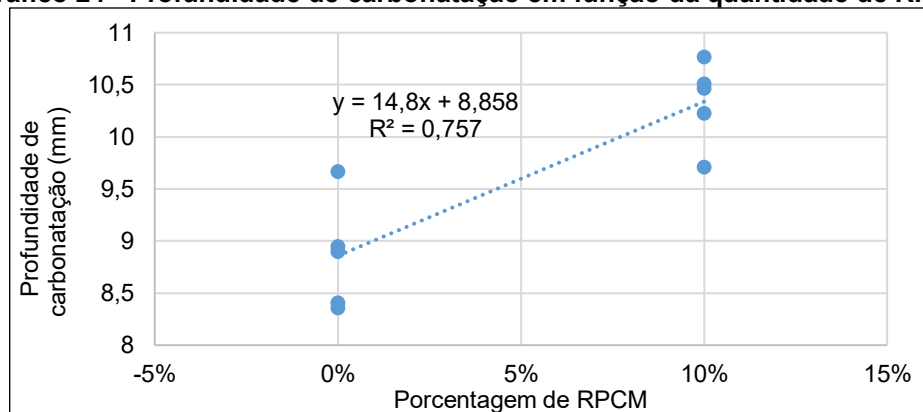
Nas fotografias 22a a 22h pode-se observar o aumento das áreas carbonatadas nos corpos de prova, conforme aumenta a quantidade de rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto. O rejeito tem como característica fixar uma quantidade menor de água que o cimento. Com o tempo o concreto perde esta umidade, com conseqüente perda de peso e formação de poros propiciando assim a entrada de gases como o CO₂, favorecendo a carbonatação. Os corpos de prova foram colocados na câmara sem uma secagem prévia na estufa, fator que favorece a carbonatação, pois a umidade em torno de 70% é considerada uma umidade ótima para desencadear o processo.

Observa-se ainda nas fotografias 22a a 22h um aumento gradativo da carbonatação conforme aumenta a porcentagem de rejeito passivo nas amostras. Para os traços TR e T10 observa-se que a carbonatação foi mais uniforme, possibilitando uma análise da profundidade atingida pela mesma. Nos traços T20 e T30 ocorreu uma carbonatação irregular, impedindo uma análise da profundidade de carbonatação por medidas como pode-se observar nas fotografias 22e a 22h.

Esta forma de carbonatação é atribuída a quantidade de poros formados no concreto pela perda de água durante o processo na câmara de carbonatação. Esta perda de umidade forma uma rede capilar não uniforme, possibilitando o acesso do CO₂, que sendo um gás, abre caminho pelos interstícios favorecendo assim uma carbonatação irregular e quase total como pode-se observar nas fotografias 22e a 22h.

A forma como ocorreu a carbonatação não permitiu a realização do levantamento da profundidade de carbonatação dos traços T20 e T30. No gráfico 24 está representada a linha de tendencia da carbonatação para os traços TR e T10.

Gráfico 24 - Profundidade de carbonatação em função da quantidade de RPCM



Fonte: Autoria própria (2022)

Esta linha foi traçada com base nos resultados obtidos para os traços TR e T10. No gráfico 24 pode-se observar que a profundidade de carbonatação aumenta com o aumento do rejeito passivo de carvão mineral no traço. O $R^2=0,757$ indica que o modelo usado para esta análise tem 75,7% de confiabilidade. Pode-se concluir que o rejeito influencia na profundidade de carbonatação do concreto, e que com o aumento da porcentagem deste rejeito substituindo o cimento, ocorrerá o aumento gradativo da carbonatação no concreto.

4.2.3.2 Envelhecimento acelerado – Câmara de climatização

Os corpos de prova ficaram na câmara de climatização por 28 dias para o envelhecimento acelerado, e os resultados estão descritos a seguir.

Nas fotografias 23a, 23b, 23c e 23d. estão apresentados os corpos de prova após o envelhecimento acelerado na câmara de climatização, e pode-se observar que não houve deterioração perceptível visualmente.

Fotografia 23 - Corpos de prova após o envelhecimento acelerado na câmara de climatização



(a) Traço TR

(b) Traço T10

(c) Traço T20

(d) Traço T30

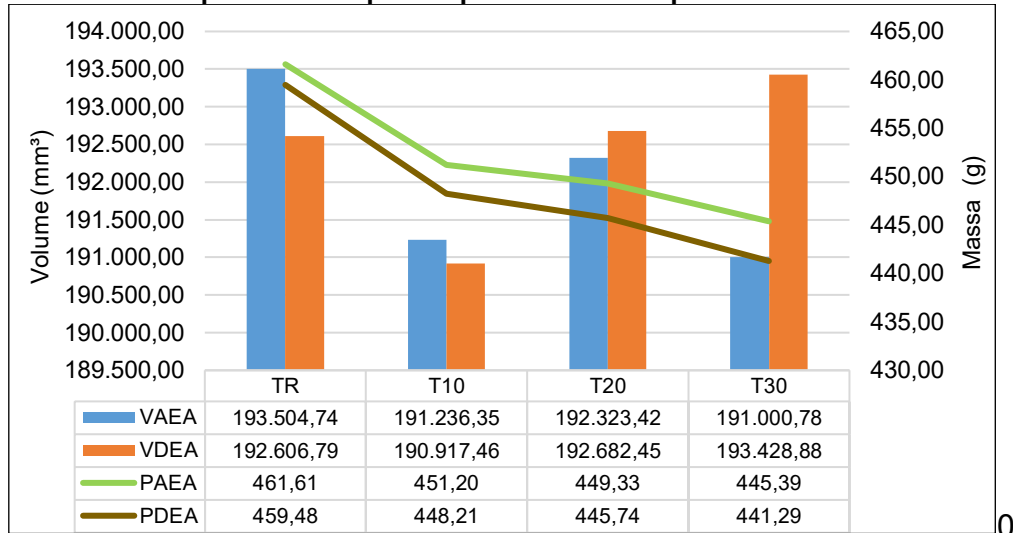
Fonte: Autoria própria (2021)

Analisando as fotografias 23a, 23b, 23c e 23d, não se pode afirmar que as diferentes porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral influenciaram de alguma maneira o resultado final do envelhecimento acelerado, pois a análise visual não apresenta diferenças sensíveis entre os diferentes traços.

Os corpos de prova foram medidos e pesados antes de serem colocados, e após serem retirados da câmara de climatização, pois a alteração de volume e peso é um indicativo de alterações na micro estrutura do concreto durante a fase de envelhecimento acelerado. Porém as alterações de peso e volume que ocorrem nos corpos de prova não são os únicos indicativos de deterioração e redução de desempenho do concreto durante o envelhecimento acelerado. A resistência a compressão e as alterações mineralógicas sofridas pelas amostras também são indicativos da durabilidade do concreto e serão apresentadas no decorrer das discussões.

No gráfico 25 estão apresentadas as médias de volume correlacionadas com o peso dos traços TR, T10, T20 e T30.

Gráfico 25 - Volume X peso dos corpos de prova antes e depois do envelhecimento acelerado



Onde: VAEA=Volume antes do envelhecimento acelerado (mm³)
 VDEA=Volume depois do envelhecimento acelerado (mm³)
 PAEA=Peso antes do envelhecimento acelerado (g)
 PDEA=Peso depois do envelhecimento acelerado (g)

Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se no gráfico 25 que em relação ao volume os traços TR e o T10 têm seus volumes menores após a câmara de climatização, enquanto os traços T20 e T30 sofreram um aumento de volume. Não foi possível observar uma uniformidade de aumento ou perda de volume. Isso pode ser atribuído as diferentes reações ocorridas entre os componentes do concreto em função dos diferentes traços que compunham os corpos de prova, como por exemplo: perda de água, aumento da quantidade de poros e formação de cristais pelas reações químicas ocorridas.

O traço que apresentou a maior variação de volume foi o T30, aumentou de 191.000,78 mm³ para 193.428,68 mm³, o que representa um aumento de 1,8%. O traço T30 foi também o que apresentou a maior redução de volume de 445,39 g para 441,29 g o que representa 0,93% de redução de peso. Os demais traços (TR, T10 e T20) tiveram alterações de peso e volume em porcentagens menores que o T30.

Com relação ao peso médio das amostras pode-se observar que a uma constância na diminuição dos mesmos durante o tempo que foram submetidos ao envelhecimento acelerado. Todos os traços sofreram uma diminuição de peso, que pode ser atribuída a perda de umidade e formação de poros na microestrutura do

concreto. Com os resultados obtidos não foi identificado uma uniformidade entre volume e peso antes e depois do processo de envelhecimento acelerado.

A análise da ANOVA realizada para a média dos volumes após o envelhecimento acelerado, resultou em um $F_{\text{crítico}}=5,99 < F_{\text{calculado}}=131482$ e $P_{\text{valor}}=2,97E^{-14} < 0,05$, indicando que as diferentes porcentagens de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento, causam um efeito significativo para o volume final dos corpos de prova.

As mesmas amostras foram submetidas ao teste de Tukey e resultaram em um $P_{\text{valor}}=0,067 > 0,05$, mostrando que a diferença de volume das amostras entre os diferentes traços não é significativa. Em valores nominais o volume aumenta do T10= $0,190\text{cm}^3$, para o maior volume que é o T30= $0,193\text{cm}^3$. O mesmo teste realizado para comparação dos volumes antes e depois do tratamento resultou em um $P_{\text{valor}}=0,05$, indicando que não existe diferença estatística nos volumes das amostras antes e depois do processo de envelhecimento acelerado.

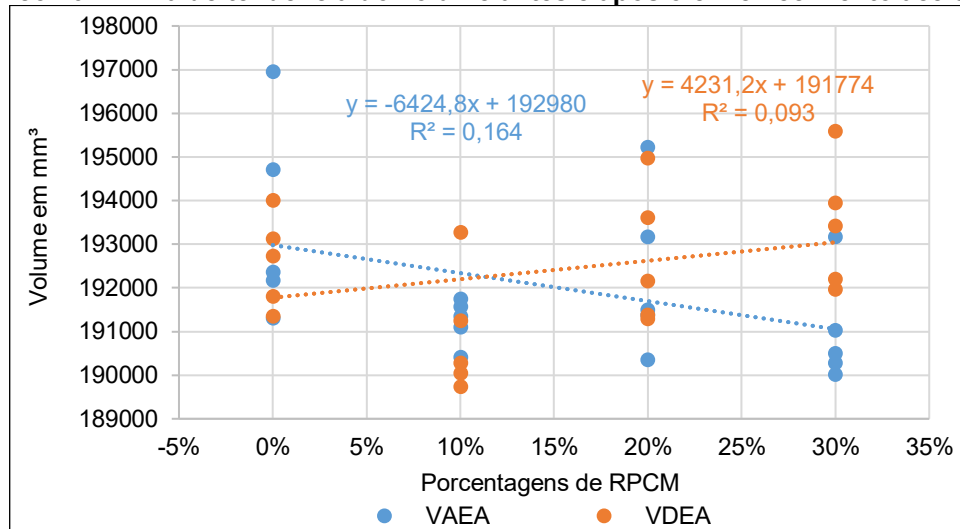
O peso dos corpos de prova diminui durante o processo de envelhecimento acelerado, na análise da ANOVA as médias obtidas de cada traço em relação ao peso o $F_{\text{crítico}}=5,99 < F_{\text{calculado}}=12905,47$ e $P_{\text{valor}}=3,14E^{-11} < 0,05$, indicando que a substituição do cimento pelo rejeito passivo do carvão mineral, é significativa para a mudança de peso entre as médias dos diferentes traços após o tratamento de envelhecimento acelerado.

Realizando o teste de Tukey somente para as amostras após o envelhecimento acelerado, este apresentou um $P_{\text{valor}}=1,88E^{-5} < 0,05$, e a análise dos resultados mostra que o TR é o traço que apresenta diferença relevante de peso em relação ao T10, T20 e T30, que são iguais estatisticamente, porém são diferentes do TR.

O teste de Tukey realizado para as amostras com relação a perda de peso, antes e após o tratamento na câmara de climatização resultou em um $P_{\text{valor}}=1,26E^{-8} < 0,05$, indicando a diferença estatística dos pesos das amostras com o tratamento de envelhecimento acelerado. Os resultados mostram que o traço TR não apresenta diferenças estatísticas de peso após o tratamento, mas o mesmo se apresenta diferente de todos os demais. Os traços T10, T20 e T30 diferem o peso pela análise estatística do Tukey antes e depois do tratamento de envelhecimento acelerado. Conclui-se que o rejeito passivo de carvão mineral influencia no peso final do concreto após a simulação de um ano de envelhecimento acelerado.

No gráfico 26 estão apresentadas as linhas de tendência dos volumes dos corpos de prova antes e após serem submetidos ao tratamento de envelhecimento acelerado, na câmara de climatização.

Gráfico 26 - Linha de tendência do volume antes e após o envelhecimento acelerado



Onde: VAEA=Volume antes do envelhecimento acelerado
 VDEA=Volume depois do envelhecimento acelerado
 RPCM=Rejeito passivo de carvão mineral

Fonte: Autoria própria (2021)

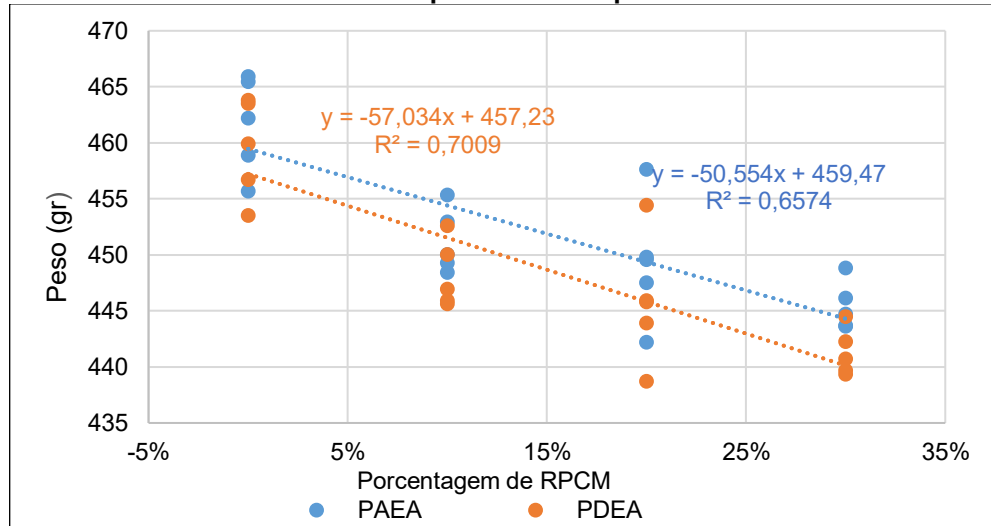
Pode-se observar no gráfico 26, que existe uma tendência para a redução do volume dos corpos de prova com o aumento da porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento, antes dos mesmos serem submetidos ao envelhecimento acelerado. Esta diminuição de volume pode ser atribuída a perda de umidade com consequente retração do concreto. O $R^2 = 0,16,35$ indica que 16,35% de erro pode ser eliminada do modelo usado para esta análise, e também que o aumento do rejeito passivo de carvão mineral não é o único fator a influenciar a diminuição de volume das amostras.

Após o tratamento de envelhecimento acelerado as amostras tendem a aumentar de volume gradativamente com o aumento de rejeito passivo de carvão mineral em sua composição. No modelo apresentado pela linha de tendência o $R^2 = 0,0928$, indica que é possível eliminar 9,28% de probabilidade de erro no modelo, e que o aumento do rejeito na composição das amostras é significativo para o aumento de volume das mesmas no processo de envelhecimento acelerado. Este aumento de volume pode ser atribuído ao aumento de poros como está apresentado no gráfico 28,

onde estão demonstrados os índices de porosidade das amostras antes e após a câmara de envelhecimento.

No gráfico 27 estão apresentadas as linhas de tendência dos pesos dos corpos de prova antes e após serem submetidos ao tratamento de envelhecimento acelerado, na câmara de climatização.

Gráfico 27 - Linha de tendência do peso antes e após o envelhecimento acelerado

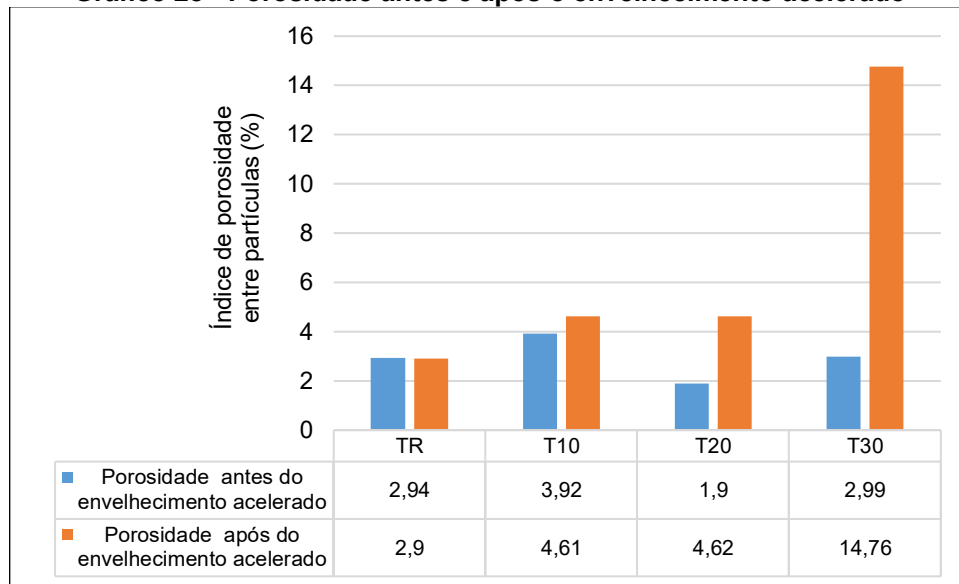


Onde: PAEA=Peso antes do envelhecimento acelerado
PDEA=Peso depois do envelhecimento acelerado
RPCM=Rejeito passivo de carvão mineral

Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se no gráfico 27 as linhas de tendência indicando uma diminuição do peso das amostras com o aumento de rejeito passivo de carvão mineral nas composições, tanto anterior como posterior ao envelhecimento acelerado. O $R^2=0,6574$ do modelo anterior ao tratamento indica que a confiabilidade estatística do modelo é de 65,74%, adotando isso como certeza de que o aumento gradativo do rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto, provoca uma gradativa perda de peso no mesmo. Essa confiabilidade aumenta para o modelo após o tratamento de envelhecimento acelerado, com um $R^2=0,701$, ou seja 70,10% de eliminação de erros do modelo, confirmando a influência do rejeito na perda de peso das amostras.

Uma das causas dessa perda de peso pode ser atribuída a formação de poros na microestrutura do concreto, como pode ser observado no gráfico 28, onde está apresentado o índice de porosidade entre partículas das amostras, antes de serem submetidas a câmara de climatização para o envelhecimento acelerado e após o processo de envelhecimento acelerado.

Gráfico 28 - Porosidade antes e após o envelhecimento acelerado

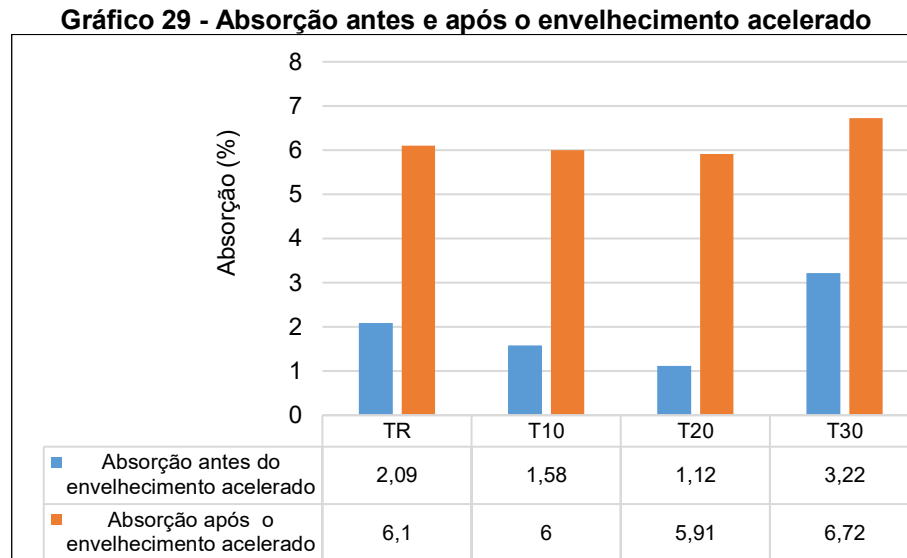
Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se no gráfico 28 que a porosidade das amostras antes de serem submetidas a ao envelhecimento acelerado era igual para os traços TR e T30. O traço T10 apresenta um índice de porosidade 33,33% maior que o TR e o T30, e o traço T20 apresenta um índice de porosidade 54% menor que TR e T30. Após o tratamento de envelhecimento acelerado o traço TR manteve o mesmo índice de porosidade, o traço T10 apresentou um índice de porosidade 17,6% maior do que antes da câmara de climatização, o traço T20 aumentou 143,7% o índice de porosidade. O traço T30 é o que teve o maior aumento do índice de porosidade de 393,64%.

Os traços com a substituição de cimento por rejeito passivo de carvão mineral aumentam o índice de porosidade, nas não apresentam um padrão definido para este aumento. Isto pode ser atribuído ao fato d'água de amassamento utilizada em quantidade superior a necessária para hidratação do rejeito, ficar retida nos interstícios do concreto, e ao longo do tempo na câmara de climatização evaporar, formando poros na microestrutura do concreto, aumentando assim a sua porosidade.

O traço T30 que contém a maior quantidade de rejeito passivo de carvão mineral em sua composição, é o traço que consome a menor quantidade de água de amassamento. Com a evaporação desta água conseqüentemente no traço T30 é onde ocorrerá a maior rede capilar com o maior número de poros.

No gráfico 29 estão apresentados os índices médios de absorção por imersão dos corpos de prova com tempo de cura de 60 dias, antes e após o tratamento de envelhecimento acelerado na câmara de climatização.



Fonte: Autoria própria (2021)

Pode-se observar no gráfico 29 que antes do tratamento de envelhecimento acelerado a absorção diminui do traço TR para o T10 32% e do T10 para o T20 40%, com um aumento relevante de 187% do traço T20 para o T30. Para os corpos de prova após o envelhecimento acelerado segue o mesmo padrão diminuindo a absorção do TR ao T20 e aumentando para o T30, porém o aumento do T20 para o T30 foi de apenas 14%, menor que nos corpos de prova sem o tratamento de envelhecimento acelerado. O comportamento não uniforme do traço T30 pode ser atribuído a rede capilar formada durante a cura e o envelhecimento acelerado.

Como pode se observar comparando o gráfico 28 com o gráfico 29 a absorção não se comporta de acordo com a porosidade, esta apresenta um aumento no índice de porosidade após o envelhecimento acelerado, conforme aumenta o teor de rejeito na amostra. Portanto conclui-se que a permeabilidade formada pela porosidade, nas amostras não é uniforme, a falta de uniformidade da rede capilar desfavorece a penetração de água pelos poros, diminuindo assim a absorção do TR para o T20.

Realizando a análise da ANOVA conclui-se que a quantidade de rejeito passivo de carvão mineral que substitui o cimento no traço do concreto não exerce influência na absorção final do concreto, pois o $F_{\text{crítico}}=9,28 > F_{\text{calculado}}=5,19$ e $P_{\text{valor}}=0,11 > 0,05$. Porém o tratamento de envelhecimento acelerado influencia na absorção pois

encontrou-se um $F_{\text{crítico}}=10,13 < F_{\text{calculado}}=27,65$ e $P_{\text{valor}}=0,00063 < 0,05$, indicando diferenças no nível de absorção antes e após o envelhecimento acelerado.

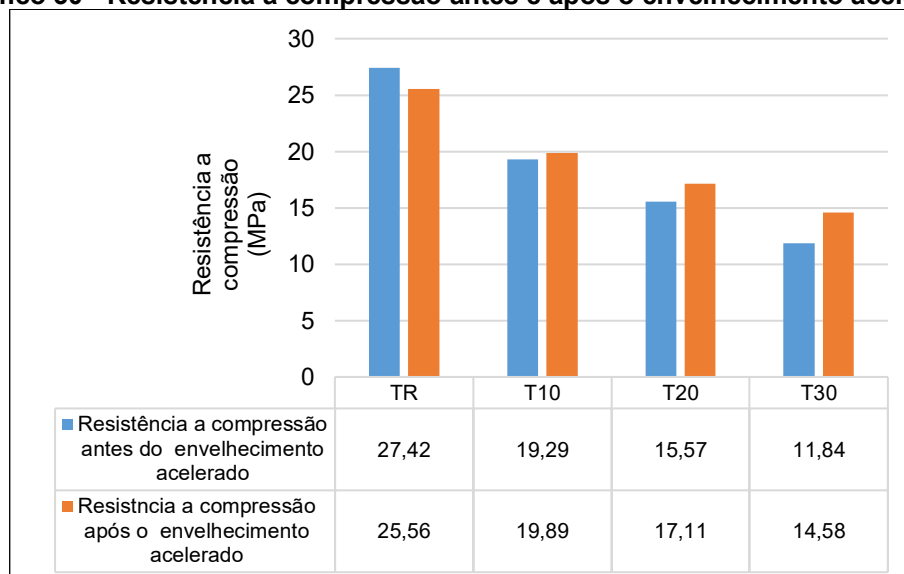
O teste de Tukey mostra que após o tratamento, os corpos de prova que foram submetidos ao envelhecimento acelerado são estatisticamente iguais, porém são diferentes daqueles que não foram submetidos ao envelhecimento acelerado. Estes por sua vez apresentam diferenças estatísticas entre si, sendo que o T30 apresenta um comportamento diferente do T10 e do T20, mas é semelhante ao TR, que por sua vez é semelhante ao T10 e ao T20.

No gráfico 30 estão apresentados os esforços de resistência à compressão, antes e após o tratamento de envelhecimento acelerado.

Observa-se no gráfico 30 que existe um padrão de redução na resistência a compressão. Com o aumento do rejeito passivo de carvão mineral substituindo parte do cimento no traço do concreto, acontece uma redução na resistência a compressão do concreto nas duas situações, antes e após o tratamento de envelhecimento acelerado. Comparando o gráfico 28 com o gráfico 30, pode-se observar que com o aumento da porosidade no concreto a resistência a compressão diminui, esta perda de resistência pode ser atribuída a formação de poros.

Analisando o gráfico 29 onde estão apresentados os índices de absorção e comparando o mesmo com o gráfico 30, conclui-se que não existe uma relação entre absorção e resistência a compressão, ou seja, não se pode afirmar que quanto maior a absorção menor a resistência a compressão.

Gráfico 30 - Resistência a compressão antes e após o envelhecimento acelerado



Fonte: Autoria própria (2021)

Pode-se observar no gráfico 30 que após o tratamento de envelhecimento acelerado ocorre um aumento na resistência a compressão nos traços T10, T20, T30, em relação aos corpos de prova não envelhecidos, que pode ser atribuído a formação de etringita nos poros do concreto. Pois como já foi visto nestes traços ocorre um maior índice de porosidade, possibilitando uma formação maior de etringita nos micróporos do concreto, contribuindo para o aumento da resistência a compressão dos mesmos. No traço TR ocorre uma redução da resistência a compressão após o envelhecimento acelerado.

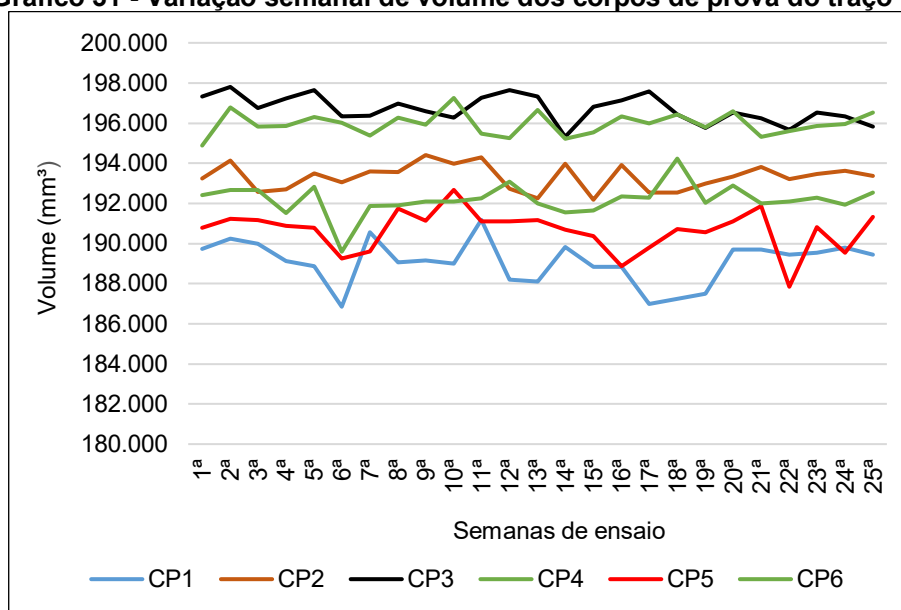
Para as duas situações, antes e após o tratamento de envelhecimento acelerado a resistência a compressão reduz do traço TR ao traço T30. O aumento no teor de rejeito pode ser um fator que contribui para a redução da resistência a compressão do concreto. Pois como o rejeito possui uma menor densidade que o cimento, conseqüentemente terá menor resistência aos esforços.

A análise da ANOVA para a resistência a compressão indica que os diferentes teores de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento, alteram os resultados dos esforços de resistência a compressão nas médias dos traços, pois o $F_{\text{crítico}}=9,28 < F_{\text{calculado}}=33,98$ e $P_{\text{valor}}=0,0081 < 0,05$, indicando a significância do rejeito na composição. A mesma análise indicou que o tratamento de envelhecimento acelerado não altera a resistência a compressão dos corpos de prova, tendo como resultado um $F_{\text{crítico}}=10,13 > F_{\text{calculado}}=0,60$ e $P_{\text{valor}}=0,50 > 0,05$, indicando que os valores nominais da resistência a compressão após o tratamento de envelhecimento acelerado, mesmo sendo maiores, estatisticamente não representam diferenças para a resistência a compressão dos corpos de prova.

4.2.3.3 Ataque interno por sulfatos

O ensaio de ataque interno por sulfatos foi realizado durante seis meses ou vinte e cinco semanas. Foram ensaiados seis corpos de prova de cada traço, TR, T10, T20 e T30. Os resultados estão descritos a seguir.

Nos gráficos 31 a 34 estão apresentadas as variações volumétricas pelas quais passaram os corpos de prova submetidos ao tratamento de ataque interno por sulfatos. Pode-se observar que estas variações não ocorreram de forma uniforme para os corpos de prova dentro de um mesmo traço.

Gráfico 31 - Variação semanal de volume dos corpos de prova do traço TR

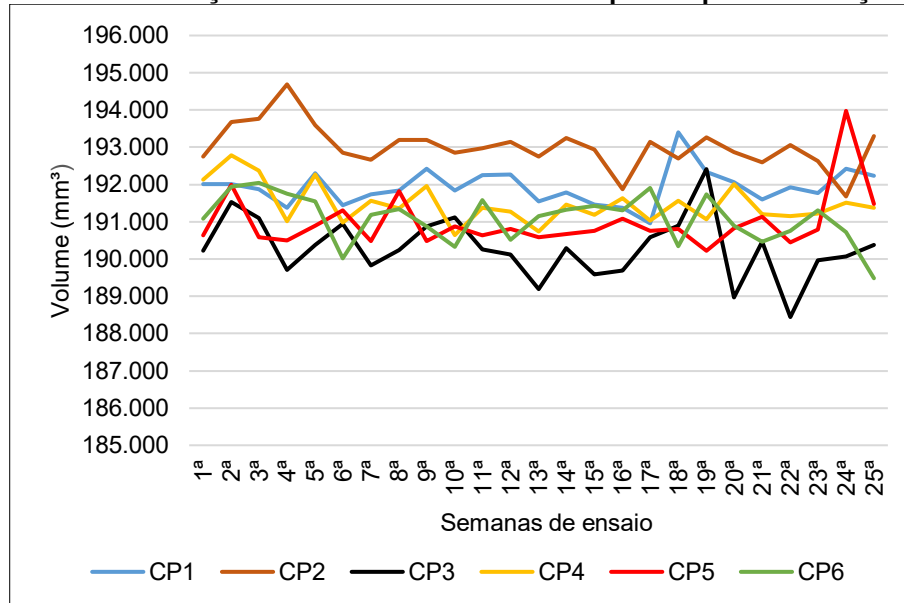
Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico 31 estão apresentadas as variações de volume para os corpos de prova do traço TR, traço de referência sem rejeito passivo de carvão mineral. Observa-se que esta variação não acontece de forma constante, o volume reduz e aumenta de forma aleatória durante o processo. A análise nominal desta variação feita para os seis corpos de prova do traço TR, apresentou uma redução máxima em relação ao volume inicial para o CP5 de 2.940 mm³, o que significa 1,48% de redução do volume, e o aumento máximo do traço TR em relação ao volume nominal inicial, foi do CP4 com 2.373 mm³, significando 1,22% de aumento.

Esta variação volumétrica pode ser atribuída a vários fatores como: a perda ou ganho de umidade durante o processo, em função da porosidade não uniforme de cada amostra, as reações químicas do cimento com o rejeito formando diferentes componentes que foram se modificando durante o processo, formando diferentes tipos de cristais com maior ou menor poder de expansão, resultando na instabilidade de volume da amostra. O CP6 foi o que se manteve em um nível mais estável de mudança de volume. A análise da ANOVA teve como resultado um $P_{valor}=0,81 > 0,05$, indicando que não existe diferença estatística ao longo das 25 semanas para a variação volumétrica dos corpos de prova do traço TR.

No gráfico 32 estão apresentadas as variações de volume dos corpos de prova do T10, traço com 10% de rejeito passivo de carvão mineral.

Gráfico 32 - Variação semanal de volume dos corpos de prova do traço T10



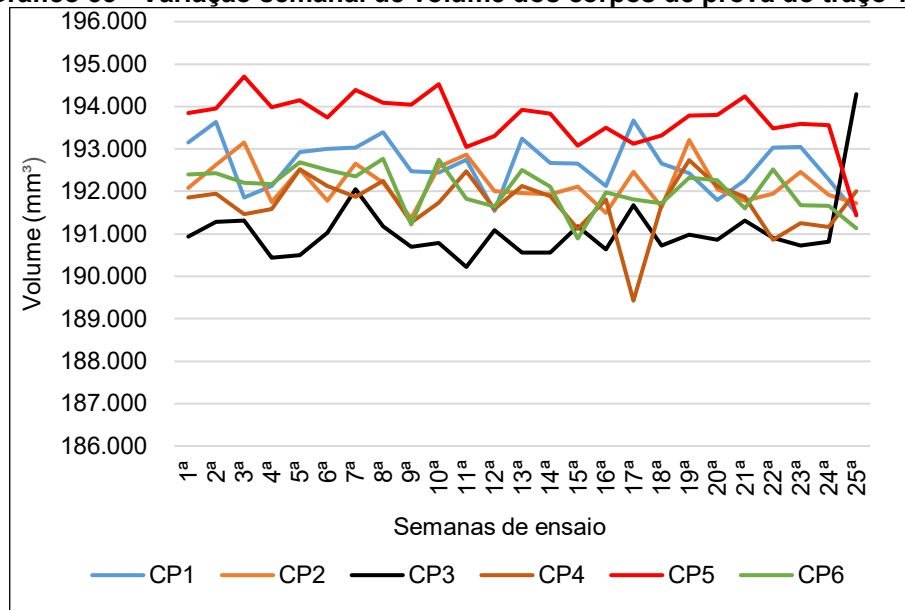
Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico 32 observa-se que as variações de volume são mais acentuadas para os corpos de prova do T10, concluindo-se que nenhum dos seis corpos de prova teve uma movimentação uniforme do volume. Em relação ao volume inicial de cada amostra a que apresentou maior redução foi a CP3, com uma redução nominal de 1.785 mm³, ou seja 0,95% de redução. A amostra CP5 foi a que apresentou o maior aumento, 3.338 mm³ ou 1,75% de aumento em relação ao seu volume inicial.

A análise da ANOVA para as variações volumétricas do traço T10 resultou em um $P_{valor}=0,80>0,05$, indicando que não existe diferença estatística entre os corpos de prova ao longo das 25 semanas para o traço T10.

No gráfico 33 estão apresentadas as variações de volume do traço T20, e pode-se observar que as mudanças de volume ocorridas nos corpos de prova do traço T20, com 20% de rejeito passivo de carvão mineral, também ocorreram sem um padrão definido de redução ou aumento de volume. Entre os seis corpos de prova analisados a redução máxima ocorreu no CP4 com 2.429 mm³, ou 1,28% de redução do volume inicial ao final do processo. O maior aumento ocorreu no CP3 com 3.3359 mm³ ou 1,76% de aumento.

Gráfico 33 - Variação semanal de volume dos corpos de prova do traço T20



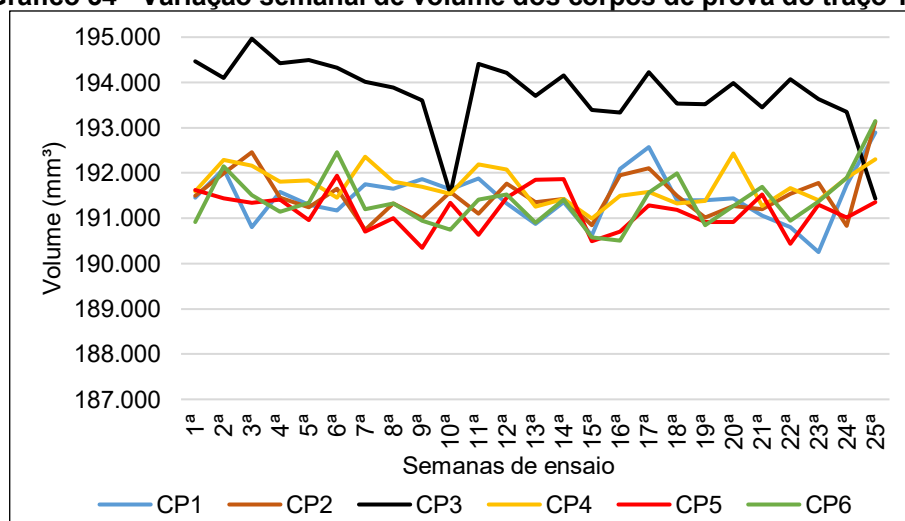
Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar também que para o T20 as variações não obedecem a um padrão específico para cada amostra, como também não existe um padrão de variação entre as amostras.

Assim como ocorre no TR e no T10, O traço T20 estatisticamente não apresenta variações volumétricas no decorrer das 25 semanas de tratamento, pois a análise da ANOVA resultou em um $P_{valor}=0,68 > 0,05$,

No gráfico 34 estão apresentadas as variações volumétricas para os corpos de prova do traço T30, com 30% de rejeito passivo de carvão mineral.

Gráfico 34 - Variação semanal de volume dos corpos de prova do traço T30



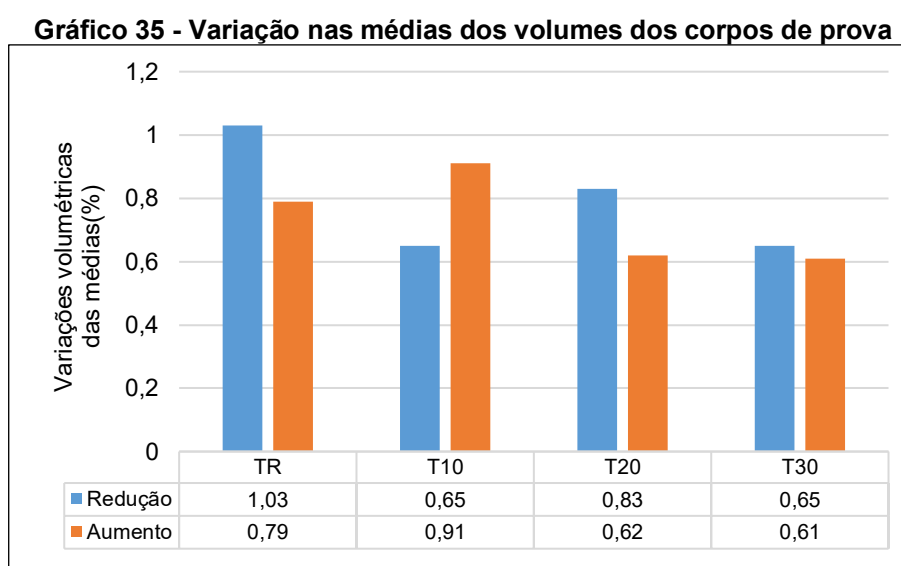
Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 34 as variações volumétricas que ocorrem em todos os corpos de prova, bem como a falta de um padrão de redução ou aumento desses volumes. A maior redução em relação ao volume inicial ocorreu no CP3, com 3.030 mm³ ou 1,59% de redução e o maior aumento ocorreu no CP6, com 2.227 mm³ ou 1,67% de aumento em relação ao volume inicial. Para o T30 assim como para T10 e T20 observou-se a falta de um padrão definido para cada amostra, bem como este padrão também não foi encontrado na comparação das amostras, concluindo-se assim que a movimentação do volume das amostras é apresentada apenas como um fator indicativo para o ataque interno de sulfatos.

A análise da ANOVA para as variações volumétricas do T30 resultaram em um $P_{\text{valor}}=0,23 >0,05$, indicando que não existe diferença estatística para as variações volumétricas ao longo das 25 semanas de análise.

No gráfico 35 estão apresentadas as médias das variações de volume para os traços TR, T10, T20 e T30. Estas médias representam as maiores variações de redução ou aumento de volume, ocorridas durante o período para cada corpo de prova analisado.

A variação volumétrica das amostras foi calculada em relação ao volume inicial das mesmas para cada traço, fazendo uma média das porcentagens destes aumentos ou reduções.



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 35 que os traços TR e o T20 apresentam uma redução maior que o aumento de volume, enquanto o traço T10 apresentou um aumento maior

que a redução. Para o traço T30 as duas variações, redução e aumento foram praticamente iguais com uma diferença de 0,04%.

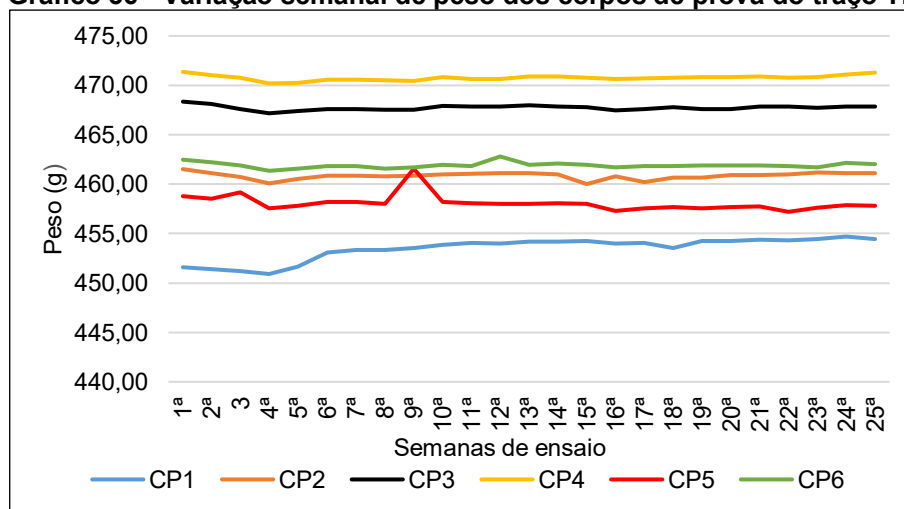
Durante o tratamento de ataque interno por sulfatos a variação volumétrica não seguiu um padrão uniforme de redução ou aumento dos corpos de prova. Essas variações ocorreram aleatórias, sem um critério de vínculo com a condição de mais ou menos rejeito passivo de carvão mineral no traço, o que resultou em uma redução ou aumento de volume não uniforme entre eles.

A análise estatística da ANOVA para as médias indicou, que não existe diferença estatística entre os traços em função da substituição do cimento por rejeito passivo de carvão mineral, pois o $F_{\text{crítico}}=9,28 > F_{\text{calculado}}=1,04$, e $P_{\text{valor}}=0,49 > 0,05$, indica que estatisticamente as amostras são iguais. Com esta análise também se conclui que não existe diferença estatística entre a redução e o aumento de volume dos corpos de prova pois $F_{\text{crítico}}=10,13 > F_{\text{calculado}}=0,25$, e $P_{\text{valor}}=0,65 > 0,05$. Conclui-se, portanto, que não existe diferenças estatísticas entre os diferentes traços para a variação volumétrica.

Nos gráficos 36 a 39 estão apresentadas as variações de peso pelas quais passaram os corpos de prova submetidos ao tratamento de ataque interno por sulfatos. Pode-se observar que estas variações não ocorreram de forma uniforme para os corpos de prova dentro de um mesmo traço.

No gráfico 36 estão representadas as variações de peso das amostras do TR.

Gráfico 36 - Variação semanal de peso dos corpos de prova do traço TR

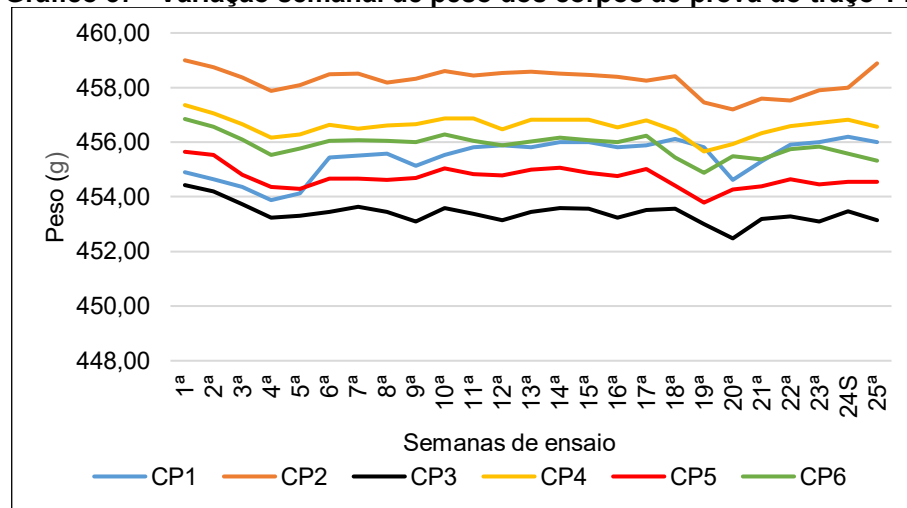


Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 36 que no corpo de prova CP1 ocorreram variações de peso mais evidentes que nos demais corpos de prova. Isso não significa que esta será a amostra com maiores variações de redução e aumento em relação ao peso inicial. No traço TR a maior redução ocorreu no CP5, com 1,59 g o que equivale a uma redução de 0,25% do peso inicial. E o maior aumento ocorreu no CP1 com 9,91 g o que corresponde a 2,19% do peso inicial. Observa-se ainda que para o traço TR, três corpos de prova o CP2, CP3 e CP4 não aumentaram o peso em relação ao peso inicial durante todo o processo. A análise da ANOVA mostra que ao longo das vinte e cinco semanas de ensaio não ocorreram diferenças estatísticas entre os pesos pois $F_{\text{crítico}}=1,61 > F_{\text{calculado}}=1,42$, e $P_{\text{valor}}=0,11 > 0,05$.

No gráfico 37 estão representadas as variações de peso para o traço T10.

Gráfico 37 - Variação semanal de peso dos corpos de prova do traço T10

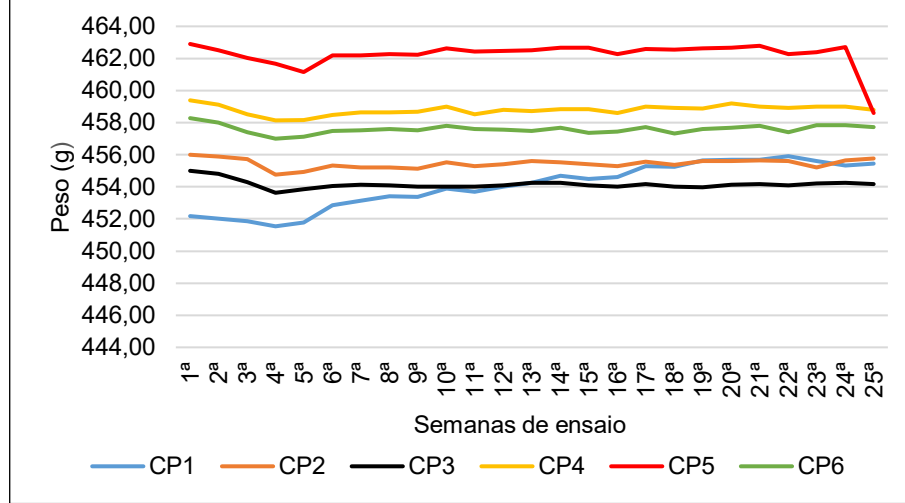


Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar no gráfico 37 que as variações de peso estão bem evidenciadas, porém sem um padrão de redução ou aumento das mesmas. Concluiu-se nesta análise que a maior redução ocorreu no CP6 com 1,97 g, que representa 0,43% do peso inicial da amostra. Para o traço T10 somente um CP apresentou aumento de peso, foi o CP1 com um aumento de 1,3 g, que significa um aumento de 0,29% do seu peso inicial. Os demais corpos de prova, CP2, CP3, CP4, CP5 e CP6, no final do processo apresentaram peso menor ou igual ao peso do início do processo. Realizando a análise da ANOVA concluiu-se que existe diferença estatística de peso ao longo das 25 semanas de ensaio para o traço T10, pois $F_{\text{crítico}}=1,61 < F_{\text{calculado}}=5,05$, e $P_{\text{valor}}=1,04E^{-09} < 0,05$.

No gráfico 38 estão demonstradas as variações de peso do traço T20.

Gráfico 38 - Variação semanal de peso dos corpos de prova do traço T20

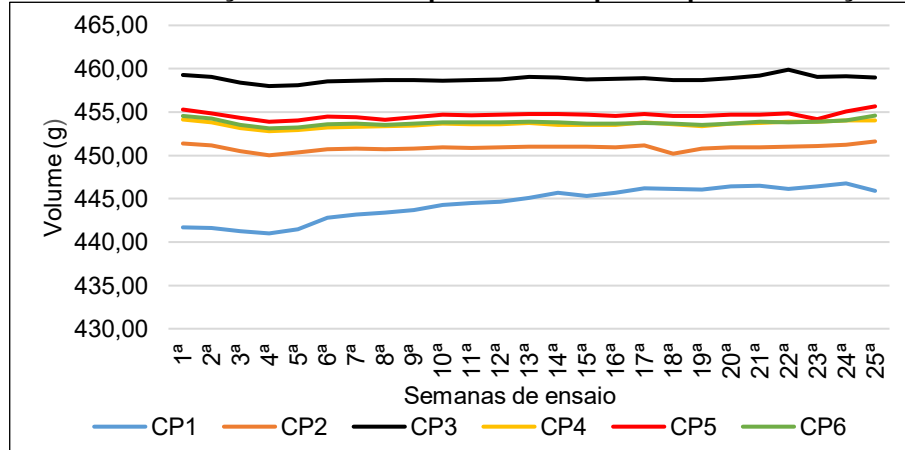


Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar no gráfico 38 que as variações de peso estão bem evidenciadas, somente no CP1, que foi o CP que apresentou o maior aumento de peso durante o processo, de 3,75 g, o que significa um aumento de 0,83% do seu peso inicial. Os demais corpos de prova, CP2, CP3, CP4, CP5 e CP6, ao final do processo apresentaram um peso menor ou igual ao do início do processo. Concluiu-se nesta análise que a maior redução ocorreu no CP5 com 4,3 g, que representa 0,94% do peso inicial da amostra. A análise estatística indicou que existe diferença estatística ao longo das vinte e cinco semanas de ensaio para o traço T20, pois $F_{\text{crítico}}=1,61 < F_{\text{calculado}}=1,89$, e $P_{\text{valor}}=0,013 < 0,05$.

No gráfico 39 estão demonstradas as variações de peso do traço T30.

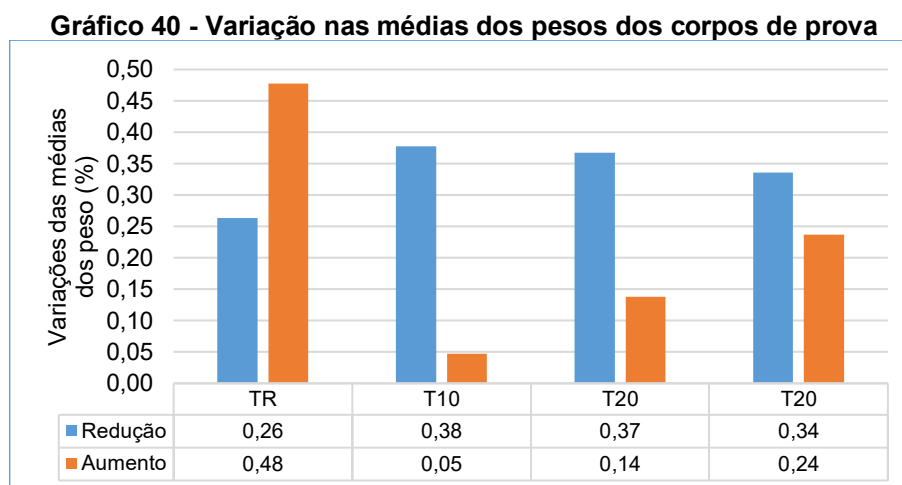
Gráfico 39 - Variação semanal de peso dos corpos de prova do traço T30



Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar no gráfico 39 a semelhança de ocorrências com o gráfico 38. Variações mais evidentes de peso em apenas um dos corpos de prova o CP1, enquanto os demais apresentam variações menos evidentes. No traço T30 os corpos de prova CP5 e CP6 foram os que sofreram a maior redução de peso 1,4 g, que significa 0,31% de seu peso inicial. O CP1 sofreu o maior aumento com 5,05 g, ou 1,14% de seu peso inicial. O CP4 ao final do processo estava com o peso igual ao do início do processo. Ao longo das vinte e cinco semanas de ensaio ocorreram diferenças estatísticas entre as amostras, pois a análise da ANOVA resultou em um $F_{\text{crítico}}=1,61 < F_{\text{calculado}}=2,76$, e $P_{\text{valor}}=0,00015 < 0,05$.

No gráfico 40 estão demonstradas as médias das variações de peso ocorridas durante o processo de ataque interno por sulfatos.

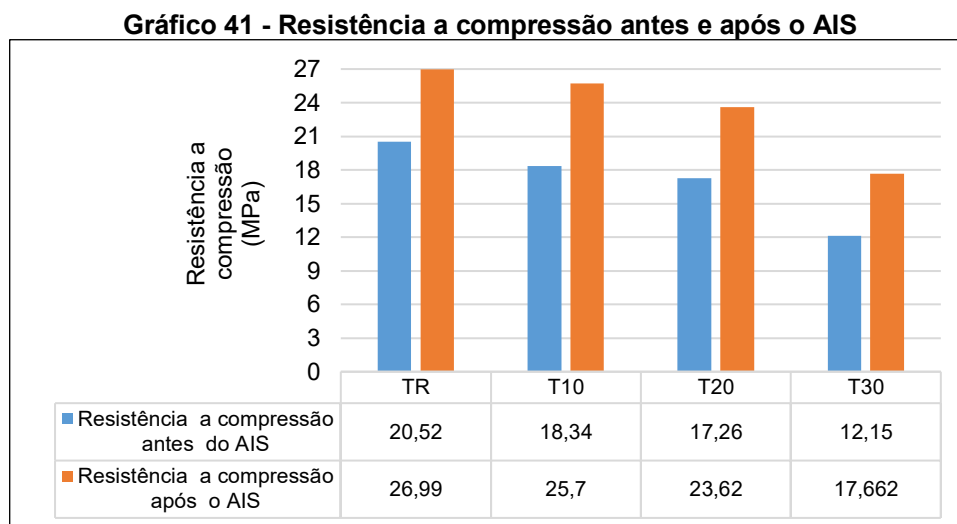


Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar no gráfico 40 que o TR foi o traço que teve a menor redução e o maior aumento de peso durante o processo. Analisando as médias das variações de peso observa-se que os traços T10, T20 e T30 desenvolveram um padrão para as variações, sendo que as reduções de peso diminuem do T10 ao T30, e as médias de aumento de peso aumentam do T10 para o T30. Conclui-se que os traços com substituição de parte do cimento por rejeito passivo de carvão mineral obedecem a um padrão de variação de peso. O TR sem rejeito passivo de carvão mineral apresenta um comportamento oposto aos demais. A maior variação do aumento de peso foi de 0,43% do traço T10 para o TR, e a maior redução foi de 0,26% também ocorreu do TR para o T10.

Realizando a análise estatística com a ANOVA conclui-se que não existe diferença estatística entre os traços para a variação de peso, pois $F_{\text{crítico}}=9,28 > F_{\text{calculado}}=0,81$, e $P_{\text{valor}}=0,81 > 0,05$. A análise estatística também indicou que não existe diferenças estatísticas entre a redução e o aumento das médias dos pesos durante as 25 semanas de ensaio de ataque interno por sulfatos, pois o $F_{\text{crítico}}=10,13 > F_{\text{calculado}}=0,88$, e $P_{\text{valor}}=0,842 > 0,05$.

No gráfico 41 estão apresentados os esforços de resistência a compressão para os corpos de prova com cura de 90 dias antes e após o ensaio de ataque interno por sulfatos.



Onde: AIS-Ais-Ataque interno por sulfatos

Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 41 que os esforços de resistência a compressão dos corpos de prova que foram submetidos a 90 dias de cura, nas duas situações, antes e após o ensaio de ataque interno por sulfatos, diminuem a resistência a compressão conforme aumenta a quantidade de rejeito passivo de carvão mineral, substituindo o cimento no traço do concreto. Na primeira fase da pesquisa ficou comprovado que para a cura de 28 dias até 10% de rejeito passivo de carvão mineral, como substituição do concreto, pode ocorrer um aumento de resistência a compressão do concreto.

No entanto na segunda fase da pesquisa com 10%, 20% e 30%, de rejeito substituindo o cimento, houve uma queda sistemática da resistência a compressão. Os resultados encontrados para esta fase da pesquisa vêm de encontro as afirmações de Rajseh; Jabades; Mohan (2016), que afirmam haver uma diminuição sistemática na resistência a compressão do concreto conforme acontece o aumento de rejeito no

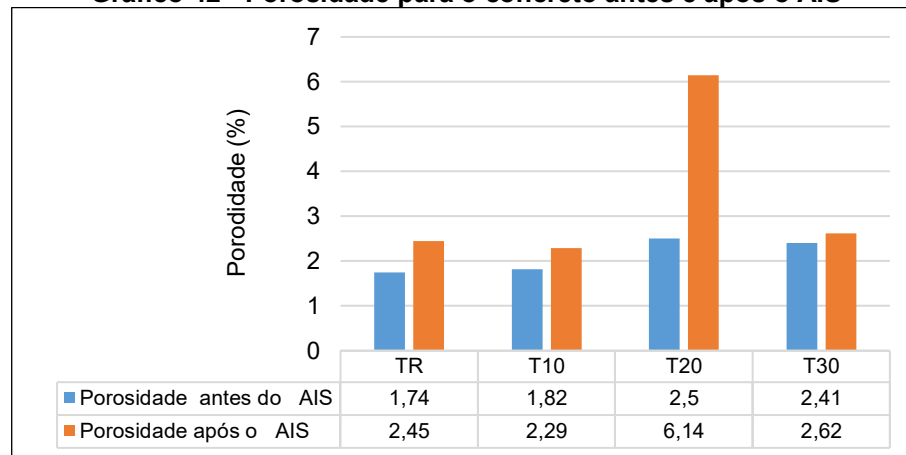
traço. Esta redução de resistência com o aumento de rejeito do carvão e a cura mais prolongada vem de encontro aos resultados de Wang; Qiu; Zeng (2020), que afirmam que um pré umedecimento muito prolongado do rejeito desencadeia a queda de resistência do mesmo no traço do concreto. É possível fazer uma analogia do pré umedecimento prolongado com a cura estendida a 90 dias a qual os corpos de prova foram submetidos.

Esse mesmo padrão de redução de resistência a compressão com o aumento do rejeito, e aumento das resistências após o tratamento de durabilidade, também pode ser observado no gráfico 26, onde estão apresentadas as resistências a compressão para 60 dias de cura e após o envelhecimento acelerado. O aumento das resistências após o ataque interno de sulfatos pode ser atribuído a formação de cristais como a etringita, que proporcionam uma maior resistência a compressão ao concreto.

A análise da ANOVA para a resistência a compressão indicou a influência significativa da substituição do cimento pelo rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto, com um $F_{\text{crítico}}=9,28 < F_{\text{calculado}}=102,70$ e $P_{\text{valor}}=0,016 < 0,05$. Observou-se também na análise estatística que o ensaio realizado durante as 25 semanas para o ataque interno por sulfatos altera significativamente a resistência a compressão do concreto, pois $F_{\text{crítico}}=10,13 < F_{\text{calculado}}=289,05$ e $P_{\text{valor}}=0,00044 < 0,05$.

O teste de Tukey mostrou que o traço T30 antes do ataque interno por sulfatos é diferente estatisticamente de todos os outros traços, mas é semelhante aos traços T10 e T20 antes do ataque interno por sulfatos, e ao T30 após o ataque interno por sulfatos. O TR antes do ataque interno por sulfatos é semelhante a todos os traços, o TR e o T10 após o ataque interno por sulfatos são iguais estatisticamente e semelhantes ao TR antes do ataque interno por sulfatos, e ao T20 após o ataque interno por sulfatos.

No gráfico 42 estão apresentadas as porosidades do concreto com 90 dias de cura antes de serem submetidas ao ataque interno por sulfatos e após este tratamento. Observa-se no gráfico 42 que as porosidades são semelhantes com exceção do traço T20 após o ensaio de ataque interno por sulfatos. Para todos os traços a porosidade aumenta após o ensaio, sendo que para o TR, T10 e o T30 este aumento é menor que para o T20, com 8,71% no T30, e no TR ocorreu um aumento de 40,50%. No T10 aumentou 25%, no T20 o maior aumento de todos, foi de 145,60%.

Gráfico 42 - Porosidade para o concreto antes e após o AIS

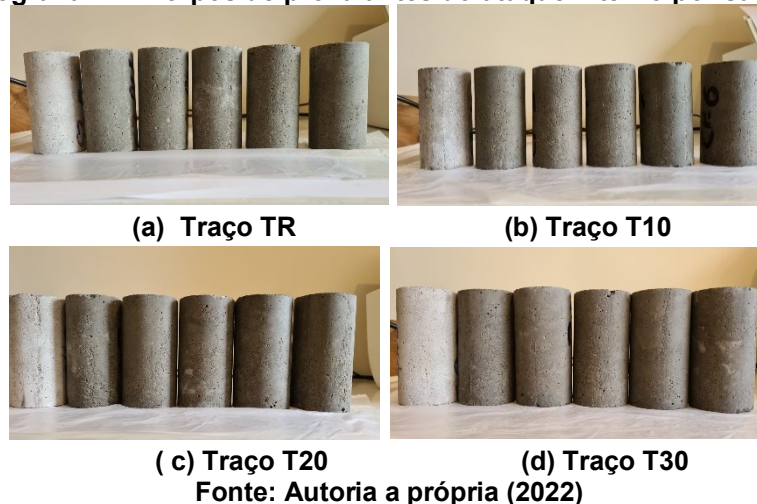
Onde: AIS-Ataque interno por sulfatos

Fonte: Autoria própria (2022)

No entanto, a análise estatística para a comparação dos índices de porosidade para os diferentes traços resultou em um $F_{\text{crítico}}=9,28 > F_{\text{calculado}}=1,78$ e $P_{\text{valor}}=0,32 > 0,05$, sendo assim conclui-se que não existe diferença estatística entre as diferentes porosidades encontradas para os diferentes traços. Na comparação estatística para as porosidades antes e após o ataque interno de sulfatos, resultou em um $F_{\text{crítico}}=10,13 > F_{\text{calculado}}=2,47$ e $P_{\text{valor}}=0,21 > 0,05$, conclui-se que estatisticamente o ataque interno por sulfatos não alterou significativamente a porosidade do concreto.

Durante as vinte e cinco semanas de ensaio foi feito o acompanhamento visual dos corpos de prova, que está apresentado a seguir.

Nas fotografias 24a, 24b, 24c, e 24d, estão apresentados os corpos de prova dos traços TR, T10, T20 e t30, antes de serem submetidos ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Fotografia 24 - Corpos de prova antes do ataque interno por sulfatos

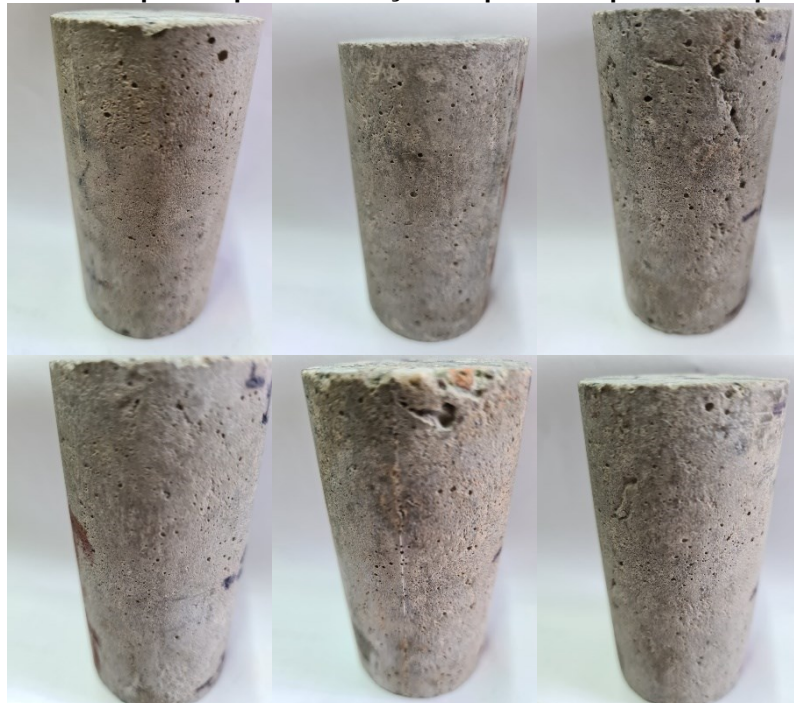
Fonte: Autoria a própria (2022)

Os corpos de prova submetidos ao ataque interno por sulfatos ficaram por noventa dias em cura submersa. Na fotografia 24 os mesmos estão apresentados antes de serem submetidos ao ensaio de ataque interno de sulfatos, pode se observar que não existem deteriorações visíveis, apenas uma leve alteração na coloração dos mesmos em função do rejeito passivo de carvão mineral.

Nas fotografias 25, 26, 27 e 28, estão apresentados os corpos de prova após o ataque interno por sulfatos. O objetivo do acompanhamento fotográfico foi registrar quaisquer alterações que pudessem sinalizar deteriorações provenientes de sulfatos. Estas alterações poderiam se apresentar em forma de pequenas fissuras, manchas ou pequenas erosões na superfície do corpo de prova, que ocorreriam como consequência das reações que estivessem acontecendo internamente.

Observou-se, porém, que ocorreram algumas alterações visuais nos corpos de prova após vinte e cinco semanas de ensaio, contudo não foram detectadas deteriorações como rachaduras ou fissuras causadas por aumento excessivo de volume, ou retrações possíveis de serem detectadas visualmente.

Fotografia 25 - Corpos de prova do traço TR após o ataque interno por sulfatos



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 26 - Corpos de prova do traço T10 após o ataque interno por sulfatos



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 27 - Corpos de prova do traço T20 após o ataque interno por sulfatos



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 28 - Corpos de prova do traço T30 após o ataque interno por sulfatos

Fonte: A autoria própria (2022)

4.2.4 Lixiviação

4.2.4.1 Lixiviação de monolitos

O material filtrado resultante da lixiviação foi analisado no Espectrofotômetro de Absorção Atômica de Chama (FAAS). O resultado está apresentado na tabela 23.

Tabela 23 - Metais pesados detectados no extrato lixiviado da lixiviação dos monolitos

Elementos (mg/l)	Traços				Limites máximos (mg/l)		
	TR	T10	T20	T30	Elinder; Frberg (1986) Apud Alves; Rosa (2003)	NBR 10004 (ABNT (2004)	Portaria GM/MSNº888
Chumbo	ND	ND	ND	ND	-	1,0	0,01
Cobalto	0,037	0,012	0,0596	0,016	0,1-5	-	-
Cromo	ND	ND	ND	ND	-	5,00	0,05
Níquel	0,003	0,009	0,033	0,054	-	-	0,07
Zinco	0,021	0,011	0,021	0,022	-	-	5,00

Onde: ND = Nada detectado

Fonte: Adaptado do LAMAQ-UTFPR (2022)

Para a execução do ensaio de lixiviação de monolitos, foram utilizados os corpos de prova sulfatados no ensaio de ataque interno por sulfatos. Observa-se na tabela 23 os limites máximos permitidos em mg/l dos metais detectados pela análise química, esses limites são os permitidos para a água potável. No concreto com rejeito passivo de carvão mineral não foi detectado no extrato lixiviado dos monolitos os

elementos chumbo e cromo. Os elementos zinco e níquel não tem parâmetros definidos pela NBR 100004 (2004), o limite máximo permitido para esses elementos só é definido pela portaria GM/MS N°888 (2021), e os dois estão dentro do limite máximo definido por esta portaria para o consumo de água potável. O cobalto detectado no extrato lixiviado não tem parâmetros definidos pela NBR 10004 (2004), e a portaria GM/MS N°888 (2021) também não apresenta parâmetros para o limite máximo deste elemento na água potável. Elinder e Frberg (1986), Apud Alves; e Rosa (2003), apresentam um limite de cobalto na água potável que pode variar de 0,1 mg/l a 5,0 mg/l. Conclui-se, portanto, que os metais pesados contidos no extrato lixiviado dos monólitos para os quatro traços analisados, não representam risco de contaminação.

Após a filtração os resíduos sólidos restantes no filtro foram incinerados a 800°C em mufla, para que restassem apenas os resíduos sólidos do desgaste dos corpos de prova lixiviados. O material restante está apresentado na fotografia 29.

Fotografia 29 - Material sólido do lixiviado dos monólitos



Fonte: Autoria própria (2022)

O material da foto é referente a um traço de corpos de prova lixiviados. Na tabela 24 estão descritos os valores restantes de resíduos sólidos da filtração para cada traço de monólitos lixiviados.

Na tabela 24 estão descritos os pesos dos corpos de prova de cada traço lixiviado (seis corpos de prova para cada traço), e o total de material coletado e incinerado após cada lixiviação. O resultado da perda de massa de cada traço está representado em porcentagem das massas lixiviadas.

Tabela 24 - Perda de massa dos corpos de prova durante o processo de lixiviação de monolitos

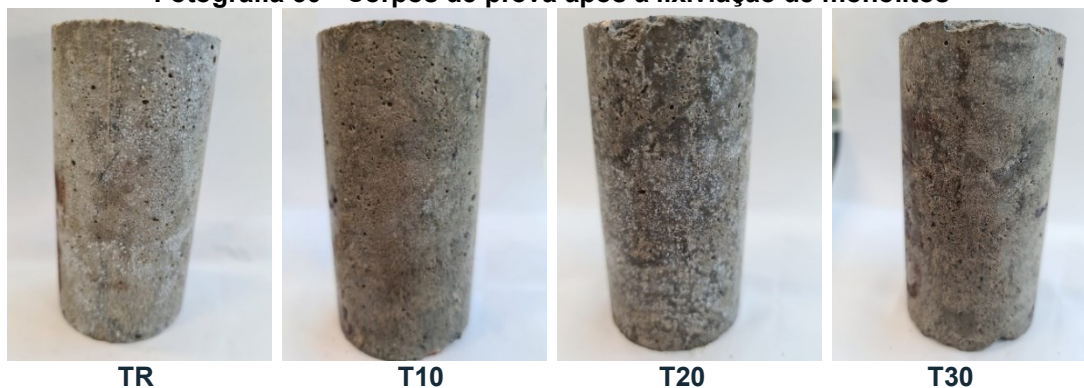
Traço	Peso total lixiviado (g)	Peso total de filtrados sólidos(g)	%
TR	2.766,12	1,03	0,037
T10	2.727,76	1,04	0,038
T20	2.733,72	1,37	0,050
T30	2.703,67	1,33	0,049

Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se na tabela 24 que o filtrado sólido referente a cada traço não ultrapassou 0,05% do peso total dos corpos de prova lixiviados, esta perda de massa não apresenta relevância em relação ao peso inicial dos corpos de prova. No entanto uma análise estatística da ANOVA mostrou que entre os traços a perda tem relevância estatística, ou seja o T30 estatisticamente teve uma redução maior de massa que o TR durante o processo de lixiviação, com um $F_{\text{crítico}}=5,99 < F_{\text{calculado}}=14,48$ e $P_{\text{valor}}=0,009 > 0,05$. Conclui-se que durante a lixiviação de monolitos ocorreu o desgaste dos corpos de prova, porém não houve contaminação do extrato lixiviado.

Na fotografia 30 estão apresentados os corpos de prova dos quatro traços após terem sido submetidos a lixiviação de monolitos.

Fotografia 30 - Corpos de prova após a lixiviação de monolitos



Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar na fotografia 30 que não ocorreram deteriorações, como fissuras ou manchas, visualmente perceptíveis nos corpos de prova durante o processo de lixiviação. O desgaste ocorrido não pode ser detectado visualmente, os corpos de prova apresentavam uma coloração homogênea entre os traços após a lixiviação. A análise dos resultados foi feita baseada somente nos dados numéricos coletados do ensaio.

4.2.4.2 Lixiviação do rejeito passivo de carvão mineral e dos traços do concreto segundo a NBR 10005 (2004)

Esse ensaio foi realizado segundo os parâmetros da NBR 10005 (2004), que deve ser realizado com o material moído passante na peneira de 9,5mm. Foram submetidos a este ensaio, o rejeito passivo de carvão mineral, e todos os traços propostos na pesquisa, TR, T10, T20, T30. O resultado das análises do extrato lixiviado estão apresentadas na tabela 25.

Tabela 25 - Resultados da lixiviação conforme a NBR 10005 (2004)

Elementos (mg/l)	Traços				RPCM	Limites máximos (mg/l)	
	TR	T10	T20	T30		NBR 10005 (2004)	Portaria GM/MSNº 888
Chumbo Total	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,057	1,0	0,01
Cobre Total	0,029	0,012	0,016	0,037	2,845		2,0
Cromo Total	0,067	0,052	<0,05	0,057	0,0555	5,0	0,05
Níquel Total	0,020	<0,02	<0,02	<0,02	0,215		0,07
Zinco Total	0,168	0,107	<0,1	0,185	4,314		5,00

Fonte: Adaptado do relatório do LAEC-SATC (2021)

Os limites máximos de metais pesados são regulamentados por lei federal pela portaria GM/GS N°888 de 04 de maio de 2021, que alterou o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. A NBR 10004 (2004) regulamenta os limites máximos apenas de alguns metais pesados como está apresentado na tabela 25.

Analisando os valores apresentados na tabela 25 pode-se observar que os valores encontrados para todos os traços, para os cinco metais estudados ficam abaixo dos limites máximos exigidos por lei. Para o rejeito passivo de carvão mineral puro, somente o zinco total apresentou um valor abaixo do limite máximo exigido por lei.

Esses valores podem sofrer algumas alterações em função da profundidade da coleta, como está descrito nos resultados de Alamino *et al.* (2017), que analisou estéreis de rejeito de carvão mineral e encontrou os seguintes valores para os metais, Zn=0,185 mg/l; C=0,0005mg/l; Pb=0,005mg/l; Ni=0,088mg/l; Cr=0,0005mg/l. Como o estéril é uma camada mais superficial pode ocorrer alterações nas quantidades de metais pesados em função de uma lixiviação da DAM.

A forma como o material é exposto para o processo de lixiviação pode alterar alguns índices dos resultados finais da análise do lixiviado.

Na tabela 26 está demonstrada uma comparação de resultados entre o extrato lixiviado dos monolitos e o extrato lixiviado segundo a NBR 10005 (2004).

Tabela 26 - Comparação dos resultados: lixiviação de monolitos e lixiviação NBR 10005 (2004)

Traços	Tipo de lixiviação	Cr (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mh/l)	Ni (mg/l)	Zn (mg/l)	Co (mg/l)
TR	De monolitos	-	-	-	0,003	0,021	0,037
	NBR 10005 (2004)	0,057	0,029	<0,01	0,020	0,016	-
T10	De monolitos	-	-	-	0,009	0,011	0,012
	NBR 10005 (2004)	0,056	0,012	<0,01	0,03	0,107	-
T20	De monolitos	-	-	-	0,033	0,021	0,056
	NBR 10005 (2004)	<0,05	0,016	<0,01	<0,02	<0,1	-
T30	De monolitos	-	-	-	0,054	0,022	0,046
	NBR 10005 (2004)	0,057	0,037	<0,01	<0,02	0,186	-

Fonte: Adaptado do LAMAQ-UTFPR e LATEC-SATC (2022)

Observa-se na tabela 26 que os metais cromo (Cr), cobre (Cu) e chumbo (Pb), não foram detectados no extrato lixiviado dos monolitos. O níquel (Ni) apresenta uma variação com um índice menor nos monolitos para o TR e o T10, e maior nos monolitos do que no concreto triturado para o traço T20 e o T30. O zinco (Zn) só é maior nos monolitos para o traço TR, nos traços T10, T20 e T30 o índice de zinco é menor nos monolitos do que no concreto triturado. O cobalto (Co) foi detectado apenas na lixiviação de monolitos.

Vários parâmetros como: tempo de lixiviação, pH do extrato lixiviante, modo de agitação do material a ser lixiviado, granulometria do material, temperatura, influenciam o resultado final do procedimento. Com exceção do níquel nos traços T20 e T30, do zinco no traço TR, e do cobalto em todos os traços, os monolitos demonstraram uma maior resistência a lixiviação. Nos dois ensaios de lixiviação todos os traços resultaram em valores de metais pesados menores que os permitidos em norma. Sendo assim, conclui-se que o rejeito adicionado no concreto nos termos propostos na pesquisa está dentro dos parâmetros exigidos por norma, possibilitando a utilização do rejeito em artefatos de cimento, sem riscos de contaminação.

Observa-se ainda na tabela 26 que para o rejeito passivo de carvão mineral, o zinco é o único metal com índice inferior ao permitido pela Portaria GM/MS Nº888 (2021).

4.2.5 Solubilização do rejeito passivo de carvão mineral e dos traços do concreto segundo a NBR 10006 (2004)

O extrato solubilizado dos traços TR, T10, T20, T30 e do rejeito passivo de carvão mineral, foram analisados para concentração de sulfatos e os resultados estão apresentados na tabela 27.

Tabela 27 - Resultados da análise do extrato solubilizado

Traços	Sulfatos expressos em SO ₄ (mg/l)	Máximo permitido pela NBR 1004(2004) (mg/l)
TR	31,78	250,0
T10	34,72	250,0
T20	35,55	250,0
T30	38,72	250,0
RPCM	690,82	250,0

Fonte: Adaptado LAEC-SATC (2021)

Pode-se observar na tabela 27 que os resultados de sulfatos liberados na análise do extrato solubilizado para TR está 87,28%, abaixo do permitido por norma. A mostra de concreto que liberou a maior quantidade de sulfatos foi o traço T30, com 84,51% abaixo do permitido pela NBR 10004 (2004).

O rejeito passivo de carvão mineral liberou uma quantidade de sulfato 176,20% maior do que o limite permitido pela NBR 10004 (2004). Utilizando o rejeito para compor o traço do concreto substituindo parte do cimento pode-se observar que a liberação dos sulfatos aumenta na solubilização, conforme aumenta a porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral na amostra.

A quantidade de sulfatos encontrada nos traços de concreto compostos com rejeito passivo de carvão mineral está dentro do limite máximo permitido por norma, possibilitando o seu uso em artefatos de cimento sem riscos de contaminação a população.

4.2.6 Análise mineralógica – Difractometria de Raios-X (DRX)

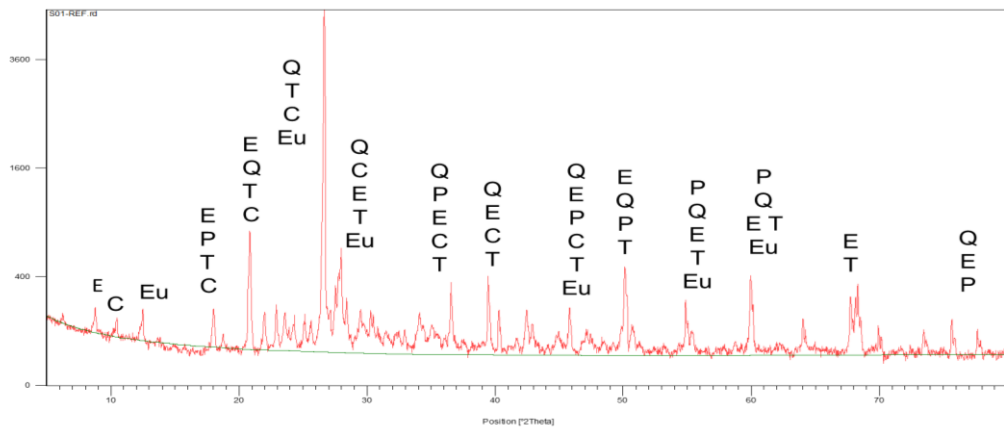
Na fase 2 da pesquisa as análises mineralógicas por DRX, foram realizadas nos traços TR, T10, T20 e T30, para a idade de cura de vinte e oito dias, bem como para as amostras submetidas a câmara de carbonatação, as amostras submetidas ao envelhecimento acelerado na câmara de climatização, e as amostras submetidas ao ataque interno por sulfatos. Os difratogramas foram obtidos pelo programa *High Score*, com o banco de dados PDF2.

4.2.6.1 Composição mineralógica dos concretos aos 28 dias de cura

As figuras 18 a 21 apresentam os difratogramas dos traços do concreto submetidos a cura de vinte e oito dias.

Na figura 18 está representado o difratograma do traço TR (traço de referência), no qual não foi adicionado o rejeito passivo de carvão mineral.

Figura 18 - Difratograma de Raios-X do traço TR aos 28 dias de cura



Onde:	E	Etringita	$\text{Ca}_6 \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 (\text{OH})^{12} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	Q	Quartzo	SiO_2
	P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
	T	Tounkite	$(\text{Na Ca K})^8 (\text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{24}) (\text{SO}_4)^2 \text{Cl} \cdot \text{H}_2\text{O}$
	C	Cordierita	$\text{Mg}_2 \text{Al}_4 \text{Si}_5 \text{O}_{18}$
	Eu	Euclase	$\text{Be Al Si O}_4 (\text{O H})$

Fonte: Autoria própria (2022)

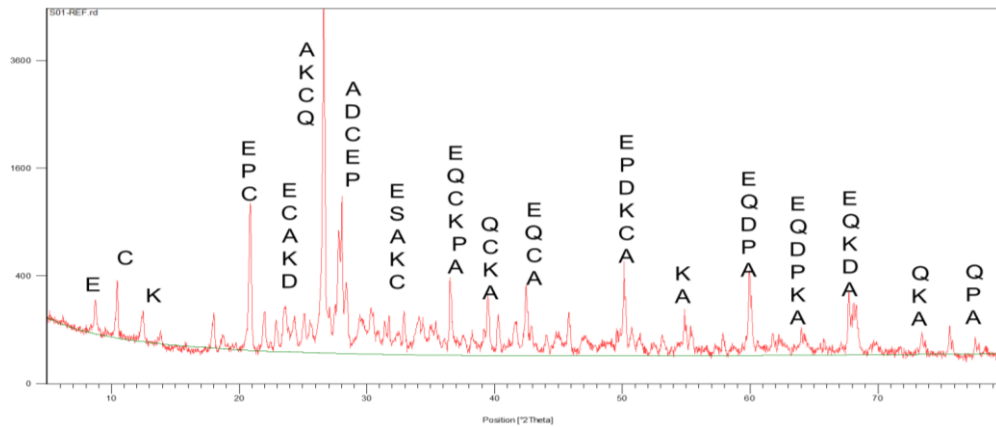
Observa-se no difratograma do traço TR que o pico mais relevante é o que contém quartzo, elemento abundante na natureza e presente na maioria dos minerais, O quartzo também está presente nos picos mais altos, a presença marcante do quartzo indica a cristalinidade do material. A presença da portlandita indica que a hidratação do cimento, não está totalmente concluída.

Nesta fase de cura está ocorrendo a formação da etringita, esta é detectada na maioria dos picos formados pelo difratograma. Foram detectados ainda o tounkite que é um silicato e o enucleasse também é um silicato natural hidratado de alumínio e berílio, é um mineral frágil e de alta cristalinidade.

A cordierita tem como origem as rochas metamórficas, é um mineral muito comum em metamorfismo de contato, é usada como indicador para detectar a origem anatômica da rocha, ou da contaminação de rochas encaixantes ricas em alumínio (Al), é um ciclosilicato, a altas temperaturas tem reações amorfas.

Na figura 19 está apresentado o difratograma do traço T10, traço com 10% de rejeito passivo de carvão mineral, substituindo o cimento.

Figura 19 - Difratograma de Raios-X do traço T10 aos 28 dias de cura



Onde*	E	Etringita	$\text{Ca}_6 \text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 (\text{OH})^{12} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
*	Q	Quartzo	SiO_2
*	P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})^2$
*	C	Cordierita	$\text{Mg}_2 \text{Al}_4 \text{Si}_5 \text{O}_{18}$
*	D	Dolomita ferroana	$\text{Ca}(\text{Mg Fe}) (\text{CO}_3)^2$
*	K	Caulinita	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})^4$
*	A	Albita, calciano	$(\text{Na, Ca Al}(\text{Si, Al})^3 \text{O}^8$

Fonte: Autoria própria (2022)

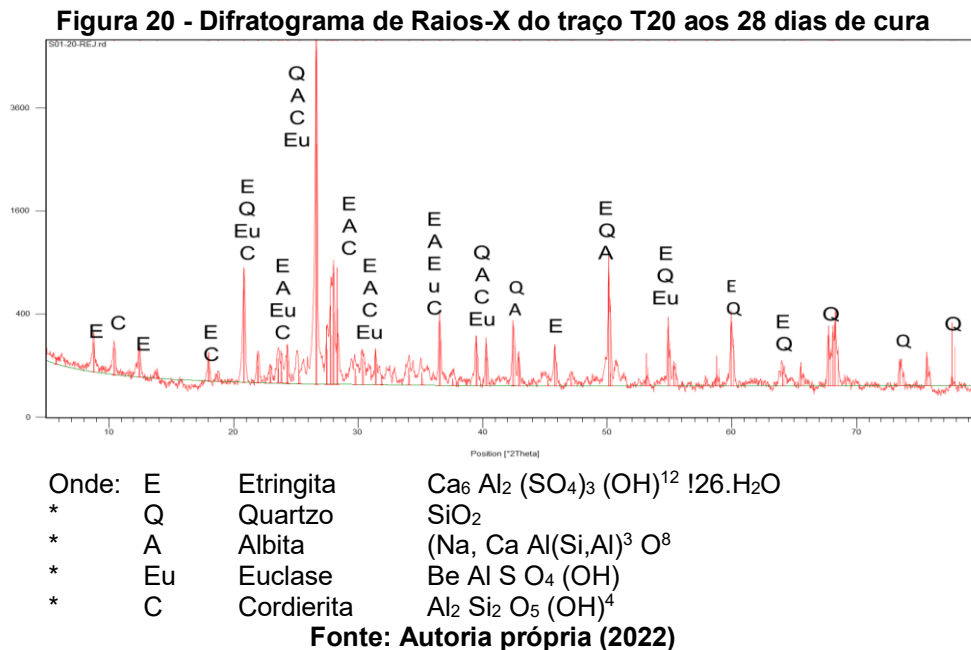
Dos minerais encontrados no difratograma do traço TR, somente o euclase não foi detectado no traço T10. O pico de maior relevância continua sendo formado pelo quartzo, porém para o T10 neste pico também foram detectados a caulinita, a albita e a cordierita. A albita tem origem de feldspatos, é a formação de novas fases cristalinas para a formação de géis álcalis-sílicas, quando aquecida a altas temperaturas são instáveis para a formação de produtos reativos como gel amorfo. A albita também é característica da fase do agregado graúdo no DRX, e está presente em 65% dos picos mais relevantes do difratograma, contribuindo com a cristalinidade do material.

A caulinita é um silicato de alumínio, mineral argiloso, e foi detectada de uma forma bem recorrente neste traço, pode-se atribuir a sua ocorrência ao fato de o rejeito passivo de carvão mineral ser um argilo-mineral e na sua composição mineralógica, como foi visto no DRX do rejeito na fase um da pesquisa, ocorrem picos de Caulinita, que se repetem aqui no traço T10, mineral também detectado por Zago (2019)

A dolomita é um mineral sedimentar que ocorre em estratos e podem estar mineralizados por sulfetos, isso torna comum a sua ocorrência em rejeitos minerais

como o caso do rejeito passivo de carvão mineral, explicando assim a sua presença neste difratograma.

Na figura 20 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço T20, traço com 20% de rejeito passivo de carvão mineral, substituindo o cimento no concreto.

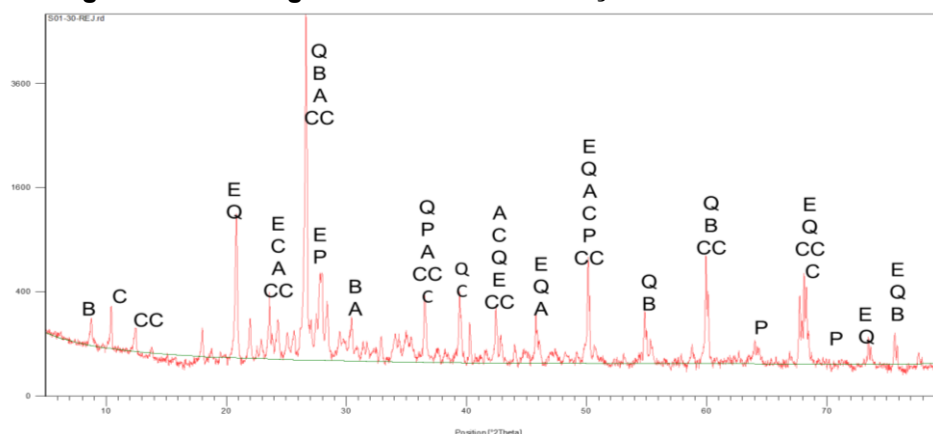


Para a análise de DRX do T20, no pico mais significativo foi novamente detectado o quartzo, e com ele a albita a cordielita e o euclase. O euclase ocorre no TR, mas não aparece no T10 e volta a ocorrer no T20.

A etringita continua presente sendo que, os picos onde a mesma ocorre cresceram em relação aos picos dos traços TR e T10, bem como surgiram novos picos de etringita no difratograma. Não foram detectados picos de dolomita, portlandita e caulinita. A cordoelita ocorre em alguns picos em conjunto com a etringita. A albita e a cordoelita podem estar contribuindo no crescimento da formação da etringita, pois possuem alumínio (Al) em sua composição.

Na figura 21 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço T30, traço com 30% de rejeito passivo de carvão mineral, substituindo o cimento no concreto.

Observa-se na figura 21 que os minerais quartzo, etringita albita e cordierita ocorrem novamente no difratograma do traço T30. O quartzo continua compondo o pico mais significativo, acompanhado da albita da biotita e do clinocloro.

Figura 21 - Difratoograma de Raios-X do traço T30 aos 28 dias de cura

Onde:	E	Ettringita	$\text{Ca}_6 \text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 (\text{OH})^{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
	Q	Quartzo	SiO_2
	P	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
	B	Biotita-1\ITM\RG	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2})^3 (\text{Al}, \text{Fe}^{+3}) \text{Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH}, \text{F})^2$
	A	Albita, calcian	$(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al}(\text{Si}, \text{Al})^3 \text{O}^8$
	CC	Clinocloro	$(\text{Mg}, \text{Fe})^6 (\text{Si}, \text{Al})^4 \text{O}_{10} (\text{OH})^8$
	C	Cordierita	$\text{Fe}_2 \text{Al}_4 \text{Si}_5 \text{O}_{18}$

Fonte: Autoria própria (2022)

A biotita e o clinocloro surgiram apenas para o traço T30, sendo que a Biotita apresenta as mesmas características mineralógicas que a albita ou seja: albita tem origem de feldspatos, é a formação de novas fases cristalinas para a formação de géis álcalis-silicas, quando aquecida a altas temperaturas, são instáveis para a formação de produtos reativos como gel amorfo. O clinocloro, que é um silicato de magnésio e alumínio no qual é comum conter ferro, portanto o surgimento deste mineral no difratograma do traço T30, pode estar vinculado ao aumento do rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento no traço do concreto.

Observa-se na figura 21 que alguns picos de etringita detectados no difratograma do T20, não foram mais detectados no traço T30. E a portlandita foi detectada novamente, indicando o aumento de hidróxido de cálcio no traço do concreto.

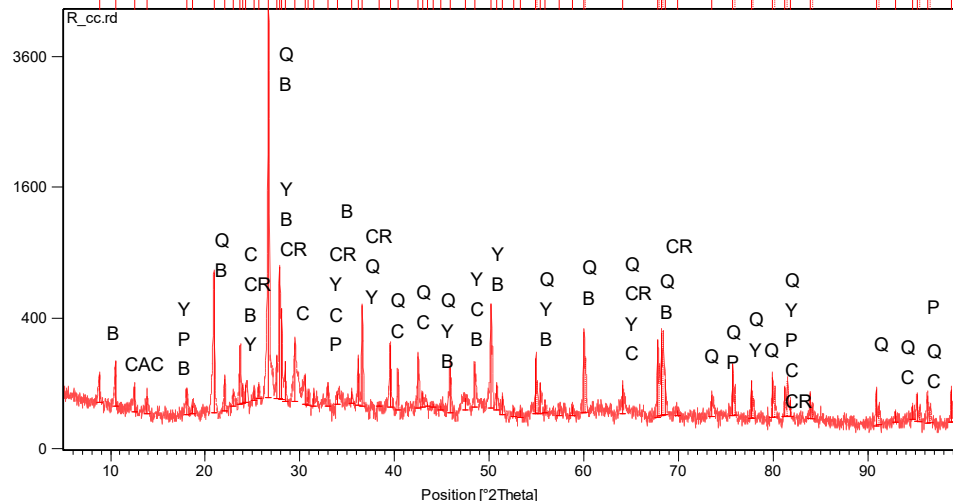
4.2.6.2 Composição mineralógica dos concretos após o tratamento na câmara de carbonatação

Nas figuras 22 a 25 estão apresentados os difratogramas de Raios-X para os traços TR, T10, T20 e T30, analisados após o tratamento de carbonatação. Esses corpos de prova foram colocados na câmara de carbonatação após 28 dias de cura. As características mineralógicas que os mesmos apresentavam antes do tratamento de carbonatação eram iguais aos dos corpos de prova analisados por DRX aos 28

dias de cura. As reações e transformações ocorridas na sua estrutura mineralógica estão apresentadas a seguir, na análise de DRX dos corpos de prova após a carbonatação.

Na figura 22 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço TR, (traço de referência), onde não foi adicionado o rejeito passivo de carvão mineral.

Figura 22 - Difratograma de Raios-X do traço TR após o tratamento de carbonatação



Onde	Q	Quartzo	SiO_2
	CR	Cristobalita	SiO_2
	Y	Yeelimite	$\text{Ca}_4 \text{Al}_6 \text{O}_{12} \text{SO}_4$
	C	Calcita	CaCO_3
	CAC	Óxido de cromo, cálcio e alumínio hidratado	$\text{Ca}_4 \text{Al}_2 \text{O}_6 (\text{CrO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
	P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
	B	Boggsite	$\text{Na}_3.7\text{Ca}_7.4\text{Al}_{18.5}\text{Si}_{77.5}\text{O}_{192} \cdot 174\text{H}_2\text{O}$

Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se na figura 22 que o quartzo é o elemento predominante no DRX do traço de referência após a carbonatação. A cristobalita que também é uma sílica, ocorre de uma forma significativa acompanhando o quartzo em alguns picos bem distintos, reforçando assim a cristalinidade do material. O yeelimite é um sulfoaluminato de cálcio, é um mineral que pode ser natural ou sintético, e contribui para a estabilização da etringita na fase em que a mesma está se formando no concreto.

O cimento tem como origem uma rocha calcária, seu teor de CaO é maior que o teor de sílica, atribui-se a isso a ocorrência de calcita em vários picos com presença constante em todo o difratograma. A portlandita ocorreu em alguns picos, ela é um hidróxido de cálcio que está presente no concreto até a hidratação completa do cimento, e seu consumo total só ocorrerá, se houver sílica ou adições minerais que

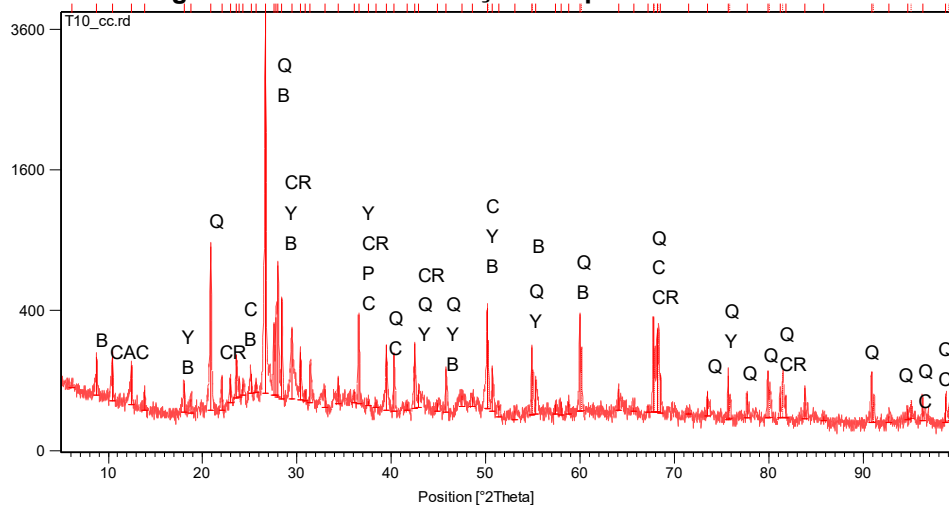
façam com que isso aconteça. Como pode-se observar na análise dos DRX antes da carbonatação, a portlandita se manteve no TR após a carbonatação.

A boggsita é uma zeólita encontrada em cavidades basálticas, mas sua estrutura não é constante, pois a determinação da estrutura de que os cátions não são coordenados com os oxigênios da estrutura, e carecem de qualquer ocupação consistente torna ela instável (GALLI *et al.* 1995). A boggsite e muitas outras zeólitas ocorrem através da reação das águas subterrâneas quentes com a rocha basáltica. Atribui-se a presença da boggsita a origem do basalto, e as reações devido a umidade e temperatura no processo de carbonatação.

O óxido de cromo cálcio e alumínio hidratado é uma reação dos componentes do cimento na hidratação e endurecimento do concreto.

Na figura 23 está apresentado o difratograma de Raios-X do T10, traço com 10% de rejeito passivo de carvão mineral, após o tratamento de carbonatação

Figura 23 - Difratograma de Raios-X do traço T10 após o tratamento de carbonatação



Onde	Q	Quartzo	SiO_2
	CR	Cristobalita	SiO_2
	Y	Yeelimite	$\text{Ca}_4 \text{Al}_6 \text{O}_{12} \text{SO}_4$
	C	Calcita	CaCO_3
	CAC	Óxido de cromo, cálcio e alumínio hidratado	$\text{Ca}_4 \text{Al}_2 \text{O}_6 (\text{CrO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
	B	Boggsite	$\text{Na}_3.7\text{Ca}_7.4\text{Al}_{18.5}\text{Si}_{77.5}\text{O}_{192} \cdot 174\text{H}_2\text{O}$

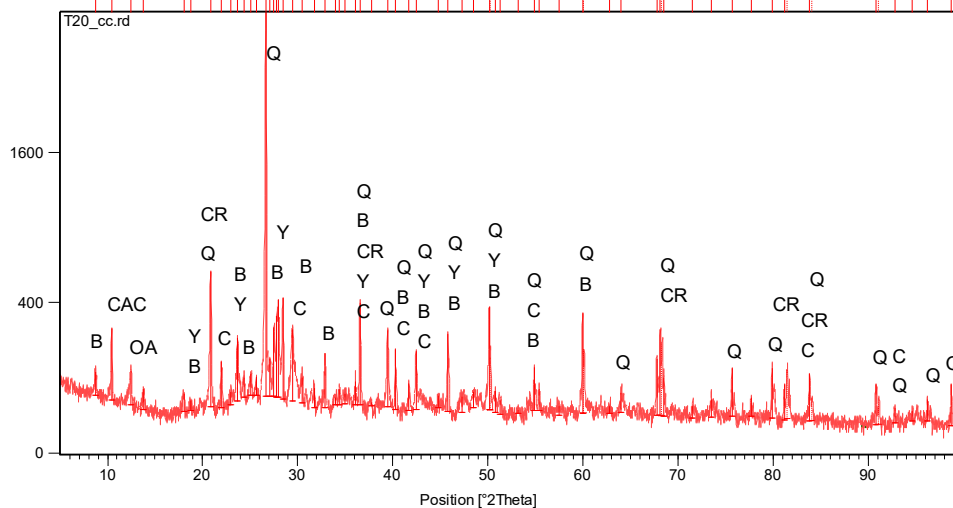
Fonte: Aatoria própria (2022)

O difratograma de Raios-X do traço T10 apresentado na figura 23, ocorreu a mesma composição mineralógica que o traço TR, significando que a substituição de 10% de cimento por rejeito passivo de carvão mineral alterou somente a intensidade dos picos, diminuindo a ocorrência de alguns minerais. O pico principal continua

composto por quartzo e boggsita, porém a quantidade de quartzo no entorno do pico principal diminui, pois a cristobalita não ocorre nestes picos como ocorre no traço TR. Observa-se a redução da calcita reagindo com os sulfatos do rejeito.

Na figura 24 está apresentado o difratograma de Raios-X do T20, traço com 20% de rejeito passivo de carvão mineral, após o tratamento de carbonatação.

Figura 24 - Difratograma de Raios-X do traço T20 após o tratamento de carbonatação



Onde	Q	Quartzo	SiO_2
	CR	Cristobalita	SiO_2
	Y	Yeelimite	$\text{Ca}_4 \text{Al}_6 \text{O}_{12} \text{SO}_4$
	C	Calcita	CaCO_3
	CAC	Óxido de cromo e alumínio hidratado	$\text{Ca}_4 \text{Al}_2 \text{O}_6 (\text{CrO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
	OA	Óxido de Alumínio	Al_2O_3
	B	Boggsite	$\text{Na}_3.7\text{Ca}_7.4\text{Al}_{18.5}\text{Si}_{77.5}\text{O}_{192} \cdot 174\text{H}_2\text{O}$

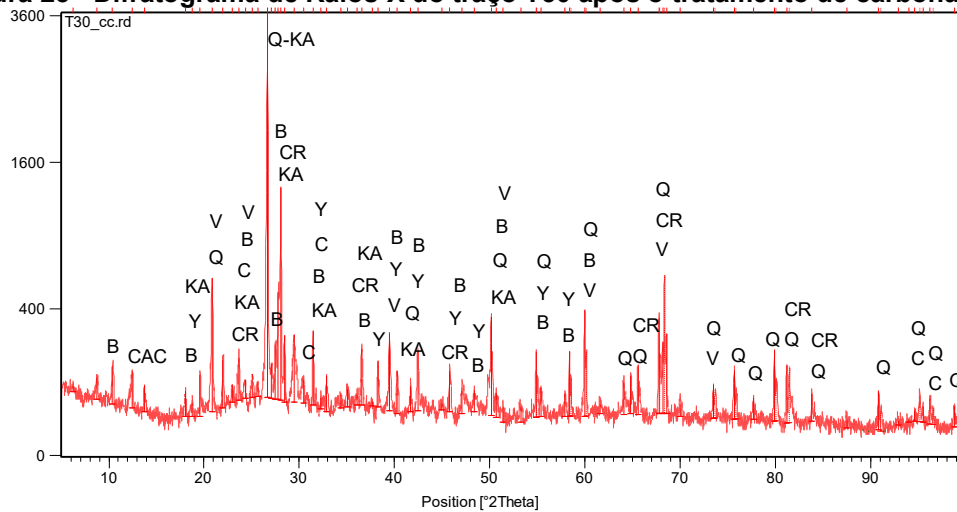
Fonte: Autoria própria (2022)

Na figura 24 observa-se que os picos continuam a diminuir sua intensidade em relação ao TR e ao T10. No pico principal ocorre apenas o quartzo que continua presente em toda a extensão do gráfico. O óxido de alumínio surge com um pico ao lado do pico de óxido de cromo e alumínio hidratado, o aumento da quantidade de rejeito, e o teor do alumínio no rejeito podem ter provocado a formação do óxido de alumínio. Porém dos quatro traços submetidos a carbonatação somente no T20 ocorreu o óxido de alumínio.

Na figura 25 está apresentado o difratograma de Raios-X do T30, traço com 30% de rejeito passivo de carvão mineral, após o tratamento de carbonatação.

Observa-se na figura 25 a ocorrência de dois minerais que não ocorrem nos traços TR, T10 e T20, submetidos ao tratamento de carbonatação, que são a caulinita e a vareterita.

Figura 25 - Difratoograma de Raios-X do traço T30 após o tratamento de carbonatação



Onde	Q	Quartzo	SiO_2
	CR	Cristobalita	SiO_2
	Y	Yeelimite	$\text{Ca}_4 \text{Al}_6 \text{O}_{12} \text{SO}_4$
	C	Calcita	CaCO_3
	CAC	Óxido de cromo e alumínio hidratado	$\text{Ca}_4 \text{Al}_2 \text{O}_6 (\text{CrO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
	V	Vaterita	CaCO_3
	KA	Caulinita	$\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
	B	Boggsite	$\text{Na}_3.7\text{Ca}_7.4\text{Al}_{18.5}\text{Si}_{77.5}\text{O}_{192} \cdot 174\text{H}_2\text{O}$

Fonte: Autoria própria (2022)

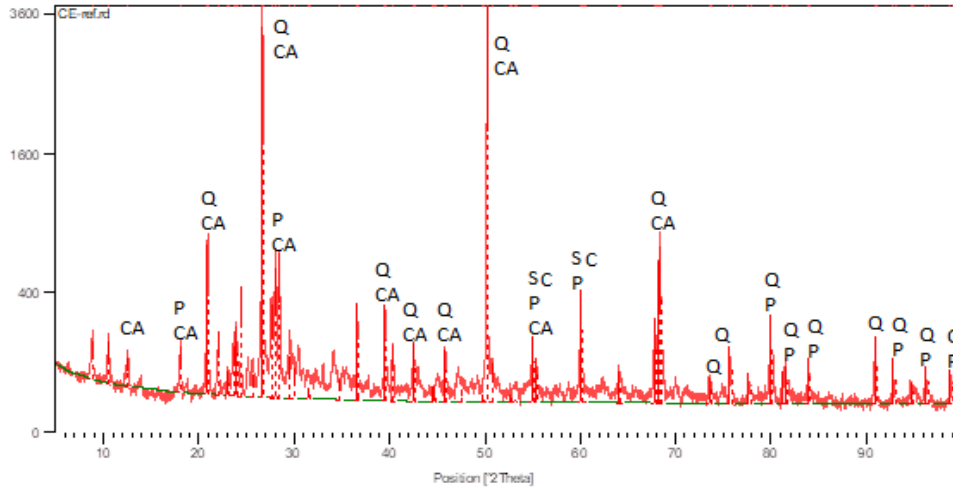
Conforme já exposto no DRX do traço T10 da cura de 28 dias a caulinita é um silicato de alumínio, mineral argiloso e pode-se atribuir a sua ocorrência ao fato de o rejeito passivo de carvão mineral ser um argilo-mineral, e na sua composição mineralógica, como foi visto no DRX do rejeito na fase um da pesquisa, ocorrem picos de caulinita, e aqui ela compõe o pico principal em conjunto com o quartzo. A vaterita é um polimorfo de cálcio metaestável, altamente solúvel que pode se transformar em carbonato de cálcio dependendo da temperatura da água que a dissolve, considerado um mineral raro de difícil obtenção devido a sua instabilidade química, (DE FATIMA, *et. al.*, 2020). A ocorrência da vaterita nesta análise pode ser atribuída a alterações sofridas pelo rejeito, provocadas pela temperatura, umidade e ingestão do CO_2 na câmara de carbonatação.

4.2.6.3 Composição mineralógica dos concretos após o tratamento de envelhecimento acelerado - EA

Nas figuras 26 a 29 estão apresentados os difratogramas de Raios-X para os traços TR, T10, T20 e T30, analisados após o tratamento de envelhecimento acelerado dos concretos, na câmara de climatização.

Na figura 26 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço TR, (traço de referência), onde não foi adicionado o rejeito passivo de carvão mineral, após o tratamento de envelhecimento acelerado dos concretos, na câmara de climatização.

Figura 26 - Difratograma de Raios-X do traço TR após o tratamento de EA



Onde	Q	Quartzo	SiO ₂
	P	Portlandita	Ca(OH) ₂
	SC	Silicato de Cálcio	Ca ₂ SiO ₄
	CA	Óxido Hidratado de Cálcio e Alumínio	(C ₃ A) (CaAl ₂ O ₄ .n10.H ₂ O)

Fonte: Autoria própria (2022)

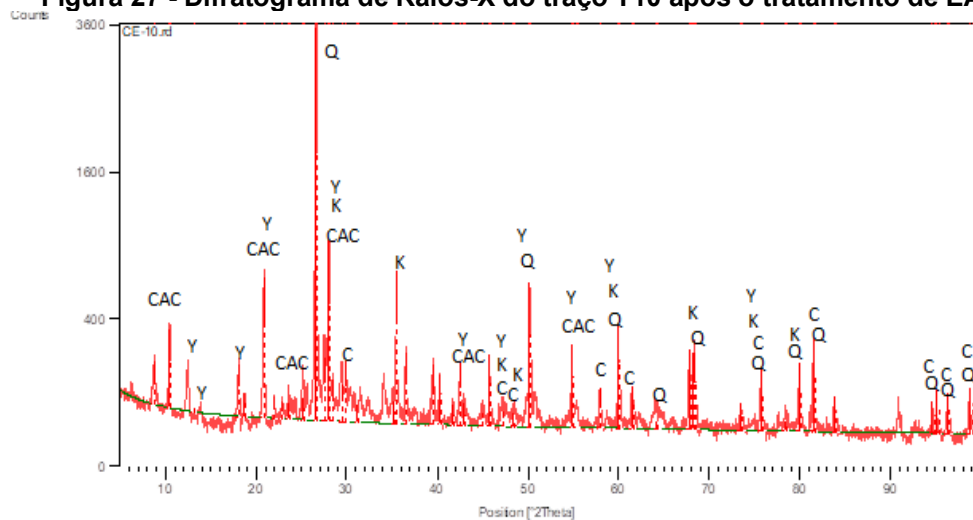
Observa-se na figura 26, que após 28 dias de envelhecimento acelerado com simulação de um ano de temperaturas e umidade, ocorreram alterações na microestrutura do concreto, o quartzo teve um aumento de números de picos, bem como os picos ficaram mais significativos.

Nesses picos mais significativos foi detectada a presença de óxido Hidratado de Cálcio e Alumínio, resultado da hidratação do cimento o que ocorreu com a simulação de um ano de envelhecimento. Essa hidratação não havia ocorrido até os vinte e oito dias de cura como pode-se observar no gráfico da figura 18.

A Portlandita ainda ocorre com picos mais discretos, indicando que durante o processo não ocorreu o consumo total do hidróxido de cálcio nas reações de hidratação do cimento. Foi detectada uma discreta formação de sulfato de cálcio, que ocorrem em conjunto com picos de quartzo e óxido hidratado de cálcio e alumínio.

Na figura 27 está apresentado o difratograma de Raios-X do T10, traço com 10% de rejeito passivo de carvão mineral, após o tratamento de envelhecimento acelerado dos concretos, na câmara de climatização.

Figura 27 - Difratograma de Raios-X do traço T10 após o tratamento de EA



Onde:	CAC	Óxidos Hidratados de Cálcio Alumínio e Cromo	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CrO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Q	Quartzo	SiO_2
	K	Sulfato de potássio	K_2SO_4
	C	Calcita	(CaCO_3)
	Y	Yeelimite	$\text{Ca}_4\text{Al}_6(\text{SO}_4)\text{O}_{12}$

Fonte: Autoria própria (2022)

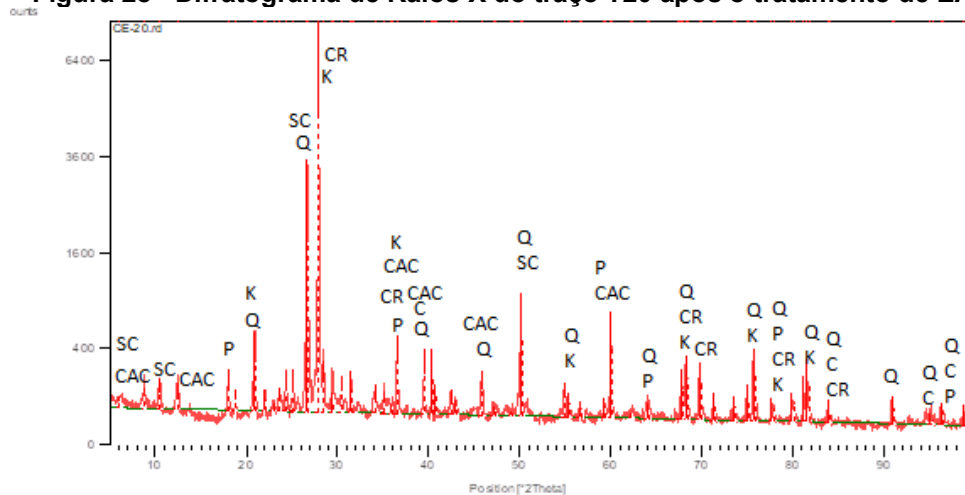
Observa-se no difratograma da figura 27 que o quartzo novamente é o mineral que compõem o pico mais significativo do gráfico, porém surgem novos elementos. Os óxidos hidratados de cálcio e alumínio e cromo, detectando a presença do rejeito passivo de carvão mineral. O cromo foi relatado pela análise da lixiviação e detectado no rejeito em teores permitidos por norma e só foi detectado no DRX após o envelhecimento acelerado.

O FRX do rejeito passivo de carvão mineral, apresentado nos resultados da fase 1 da pesquisa, mostra que o mesmo contém potássio e enxofre, o que justifica o surgimento deste elemento ao longo do tempo no concreto, como acontece com o óxido de cromo.

A calcita surge em função de sua origem ser uma rocha calcária, que dão origem aos cimentos. A yeelimite é um sulfoaluminato de cálcio, é um mineral que pode ser natural ou sintético, e contribui para a estabilização da etringita na fase em que a mesma está se formando no concreto.

Na figura 28 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço T20, com 20% de rejeito passivo de carvão mineral, após o tratamento de envelhecimento acelerado na câmara de climatização.

Figura 28 - Difratoograma de Raios-X do traço T20 após o tratamento de EA



Onde:	CAC	Óxidos hidratados de cálcio alumínio cromo	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CrO}_4)\cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Q	Quartzo	SiO_2
	K	Sulfato de Potássio	K_2SO_4
	C	Calcita	CaCO_3
	CR	Cristobalita	SiO_2
	SC	Sulfato de Cálcio	Ca_2SiO_4
	P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$

Fonte: Autoria própria (2022)

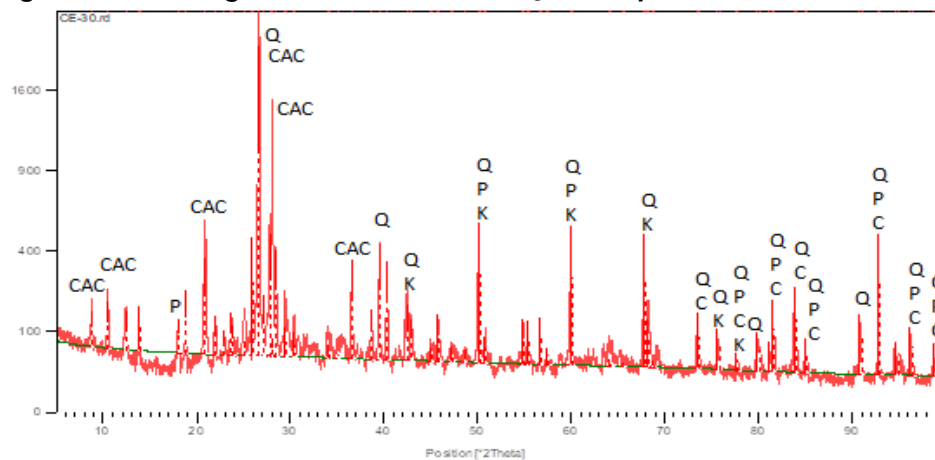
Pode-se observar na figura 28 que o quartzo não compõe o pico mais significativo deste difratograma, embora ainda esteja presente em todo o gráfico. Os elementos que aparecem no maior pico do difratograma são: o sulfato de potássio e a cristobalita. O sulfato de potássio é recorrente no traço T20 pois já foi detectado no traço T10, e se justifica pela presença do potássio e do enxofre serem maiores no rejeito passivo de carvão mineral do que no cimento.

A cristobalita é um polimorfismo do quartzo, e de origem de rochas vulcânicas. A cristobalita também é um indicador de como os cristais podem sofrer modificações em ambientes diferentes. A presença dela explica a redução de quartzo ocorrida nesse período de envelhecimento acelerado.

Com o envelhecimento acelerado simulando um ano para os concretos, observa-se que começam a ocorrer a formação de sulfatos nas amostras, fato este comprovado pela presença do sulfato de cálcio que ocorre junto com o quartzo no segundo pico mais significativo do difratograma, ocorrendo novamente no terceiro maior pico do difratograma. A portlandita ocorre de forma bem discreta para este traço.

Na figura 29 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço T30, com 30% de rejeito passivo de carvão mineral, após o tratamento de envelhecimento acelerado na câmara de climatização.

Figura 29 - Difratoograma de Raios-X do traço T30 após o tratamento de EA



Onde:	CAC	Óxidos Hidratados de Cálcio Alumínio e Cromo	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CrO}_4) \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Q	Quartzo	SiO_2
	K	Sulfato de Potássio	K_2SO_4
	C	Calcita	(CaCO_3)
	P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$

Fonte: Autoria própria (2022)

No difratograma da figura 29 pode-se observar que o quartzo voltou a apresentar ocorrências bastante significativas em todo o gráfico. Também está bastante evidenciado o crescimento da portlandita e do sulfato de cálcio, o que pode ter contribuído para a redução da resistência a compressão do traço T30 em relação aos demais traços.

A calcita que é um mineral com baixa dureza ocorre com bastante frequência, o que seria mais um fator para a redução da resistência. Os óxidos hidratados de cálcio, alumínio e cromo surgem novamente, como ocorre no T10 e no T20.

A análise comparativa conclui que o rejeito passivo de carvão mineral altera a composição mineralógica do concreto, pois surgem óxidos e sulfatos nos traços compostos pelo mesmo.

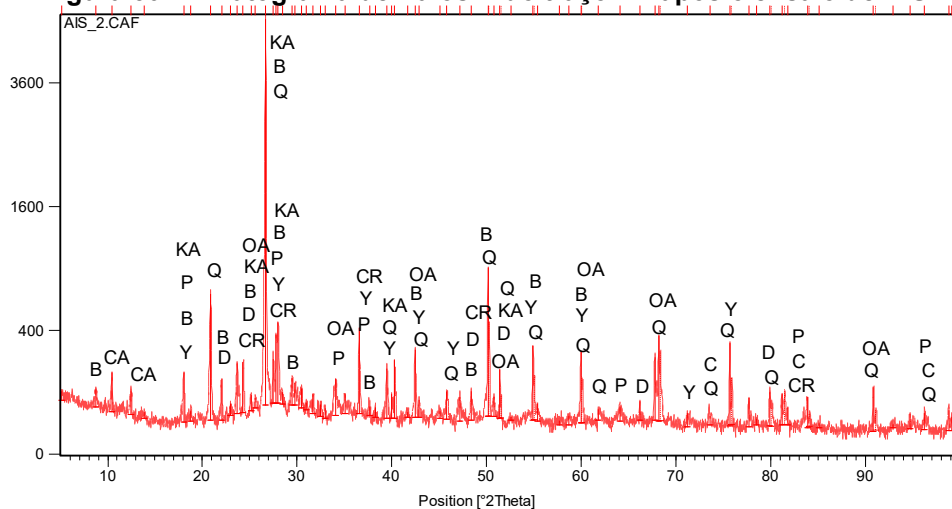
Pode-se observar também comparando os difratogramas de Raios-X das figuras 18 a 21, que diz respeito aos traços com cura de vinte e oito dias sem nenhum tratamento de durabilidade, com os difratogramas das figuras 26 a 29, que o tratamento de envelhecimento acelerado provocou alterações ao longo do tempo na mineralogia dos concretos.

4.2.6.4 Composição mineralógica dos concretos após o tratamento de ataque interno por sulfatos - AIS

Nas figuras 30 a 33 estão apresentados os difratogramas de Raios-X para os traços TR, T10, T20 e T30, analisados após o ensaio de ataque interno por sulfatos.

Na figura 30 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço TR, (traço de referência), onde não foi adicionado o rejeito passivo de carvão mineral, após o ensaio de ataque interno por sulfatos.

Figura 30 - Difratograma de Raios-X do traço TR após o ensaio de AIS



*Onde	Q	Quartzo	SiO_2
*	CR	Cristobalita	SiO_2
*	Y	Yeelimite	$\text{Ca}_4 \text{Al}_6 \text{O}_{12} \text{SO}_4$
*	C	Calcita	CaCO_3
*	CA	Óxido de cálcio e alumínio hidratado	$\text{Ca Al}_2 \text{O}_4 \cdot 110 \text{H}_2\text{O}$
	D	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	OA	Óxido de Alumínio	Al_2O_3
	P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
	KA	Caulinita	$\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 111\text{H}_2\text{O}$
*	B	Boggsite	$\text{Na}_{3.7}\text{Ca}_{7.4}\text{Al}_{18.5}\text{Si}_{77.5}\text{O}_{192} \cdot 174\text{H}_2\text{O}$
	AIS	Ataque interno por sulfatos	

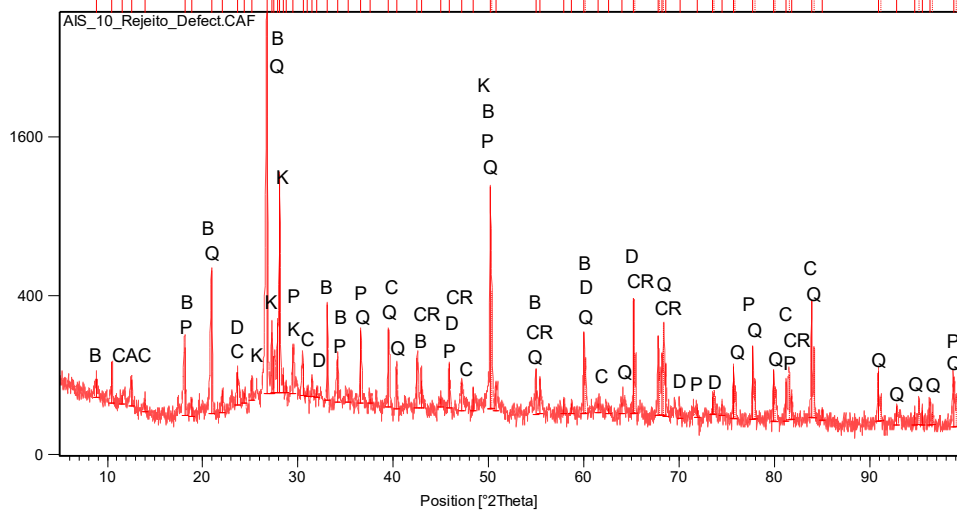
Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar na figura 30 a ocorrência de 11 minerais no DRX do traço TR, todos estes minerais já foram descritos quando de sua ocorrência nos tratamentos de cura de 28 dias e da câmara de carbonatação e envelhecimento acelerado. No DRX da figura 30 observa-se que o pico de maior relevância é composto por quartzo, caulinita e boggsite, pode-se observar também que o quartzo compõe junto com outros minerais os maiores picos do difratograma, indicando a cristalinidade do material. O óxido de alumínio e o óxido de cálcio e alumínio estão presentes em vários

picos do gráfico. Conclui-se que embora os minerais que tem ocorrência neste difratograma já ocorreram em tratamentos analisados anteriormente, no tratamento de ataque interno por sulfatos, já no traço TR ocorrem algumas alterações na mineralogia do concreto provocada pelo ataque de sulfatos.

Na figura 31 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço T10, traço com 10% de rejeito passivo de carvão mineral, após o ensaio de ataque interno por sulfatos.

Figura 31 - Difratograma de Raios-X do traço T10 após o ensaio de AIS



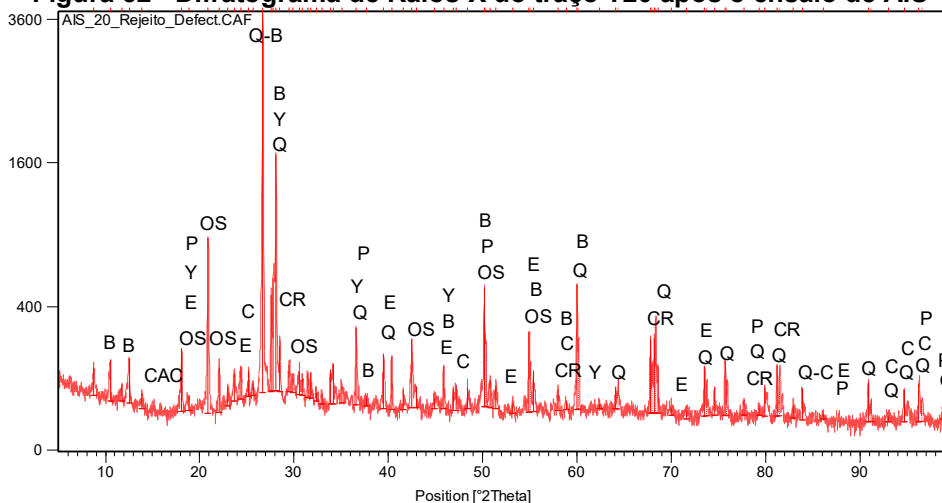
Onde	Q	Quartzo	SiO ₂
	CR	Cristobalita	SiO ₂
*	C	Calcita	CaCO ₃
	CAC	Óxido de cálcio e alumínio cromo hidratado	Ca ₄ Al ₂ O ₆ (CrO ₄) · 9H ₂ O
	D	Dolomita	Ca Mg(CO ₃) ₂
	K	Sulfato de Potássio	K ₂ SO ₄
	P	Portlandita	Ca(OH) ₂
	B	Boggsite	Na _{3.7} Ca _{7.4} Al _{18.5} Si _{77.5} O ₁₉₂ · 74H ₂ O
	AIS	Ataque interno por sulfatos	

Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se na figura 31 que alguns minerais que ocorreram no DRX do TR, não ocorrem no DRX do T10, que são a portlandita, o Yeelimite e o óxido de alumínio, no entanto o sulfato de potássio surge em vários picos de relevância. O maior pico é composto por quartzo e boggsite e acontece um aumento da altura dos picos para o T10 em relação ao TR.

Na figura 32 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço T20, com 20% de rejeito passivo de carvão mineral.

Figura 32 - Difratograma de Raios-X do traço T20 após o ensaio de AIS



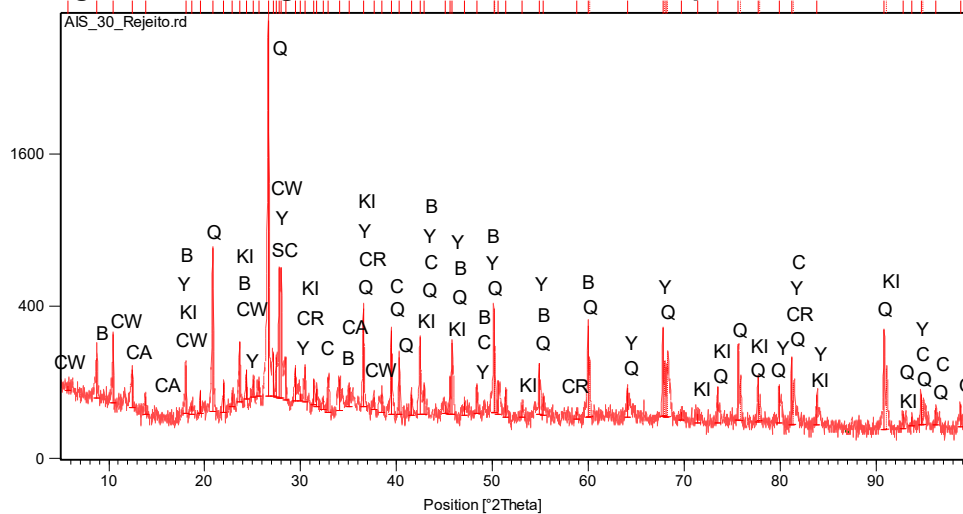
Onde	Q	Quartzo	SiO_2
	CR	Cristobalita	SiO_2
	Y	Yeelimite	$Ca_4 Al_6 O_{12} SO_4$
	C	Calcita	$CaCO_3$
	CAC	Óxido de cálcio e alumínio cromo hidratado	$Ca_4 Al_2 O_6 (CrO_4) \cdot 19H_2 O$
	P	Portlandita	$Ca(OH)_2$
	K	Sulfato de Potássio	K_2SO_4
	OS	Óxido de Sílica	SiO_2
	E	Etringita	$Ca_6 Al_2 (SO_4)_3 (OH)^{12} \cdot 26 H_2 O$
	P	Portlandita	$Ca(OH)_2$
	B	Boggsite	$Na_3 \cdot 7Ca_7 \cdot 4Al_{18} \cdot 5Si_{77} \cdot 5O_{192} \cdot 174H_2 O$
	AIS	Ataque interno por sulfatos	

Fonte: Autoria própria (2022)

Na figura 32 observa-se uma redução na altura dos picos do difratograma, ocorrendo novamente a incidência do mineral yeelimite, o óxido de sílica e também a ocorrência da etringita, que só havia ocorrido nas amostras submetidas aos 28 dias de cura. A presença da etringita pode justificar o aumento de resistência a compressão dos traços após o tratamento de ataque interno por sulfatos, apesar de que a etringita só tenha sido detectada no traço T20. A redução na intensidade dos picos indica que o material reduziu sua cristalinidade, embora o principal pico ainda seja composto pelo quartzo. A presença do rejeito está alterando mesmo que de forma discreta, a estrutura mineralógica do material. O óxido de sílica contribui para o aumento dos silicatos em forma de quartzo, mas neste traço não contribuiu para a cristalinidade do material.

Na figura 33 está apresentado o difratograma de Raios-X do traço T30, com 30% de rejeito passivo de carvão mineral, após o ensaio de ataque interno por sulfatos.

Figura 33 - Difratoograma de Raios-X do traço T30 após o ensaio de AIS



Onde	Q	Quartzo	SiO_2
	CR	Cristobalita	SiO_2
	Y	Yeelimite	$\text{Ca}_4 \text{Al}_6 \text{O}_{12} \text{SO}_4$
	C	Calcita	CaCO_3
	CAC	Óxido de cálcio e alumínio hidratado	$\text{Ca}_4 \text{Al}_2 \text{O}_4 \cdot 110\text{H}_2\text{O}$
	SC	Sulfato de Cálcio	Ca_2SiO_4
	KI	Killalaite	$\text{Ca}_3 \cdot 2(\text{H}_0.6\text{Si}_2 \text{O}_7) (\text{OH})$
	CW	Cowlesite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$
	B	Boggsite	$\text{Na}_3 \cdot 7\text{Ca}_7 \cdot 4\text{Al}_{18} \cdot 5\text{Si}_{77} \cdot 5\text{O}_{192} \cdot 174\text{H}_2\text{O}$
	AIS	Ataque interno por sulfatos	

Fonte: Autoria própria (2022)

No difratograma da figura 33 pode-se observar a ocorrência de dois novos minerais nas análises mineralógicas da pesquisa, o killalaite e o cowlesite. O killalaite ocorre em um calcário termicamente metamorfoseado, é um mineral secundário, ocorre em cavidades e veios com calcita. Cowlisite é uma zeólita rica em cálcio com estrutura desconhecida, isso significa que são dois elementos ligados ao calcário, que é a rocha de origem do cimento, portanto sua presença está ligada ao cimento.

A formação diferenciada dos difratogramas para cada tratamento, indica que os mesmos provocaram processos de alterações diferenciadas nas estruturas mineralógicas dos concretos.

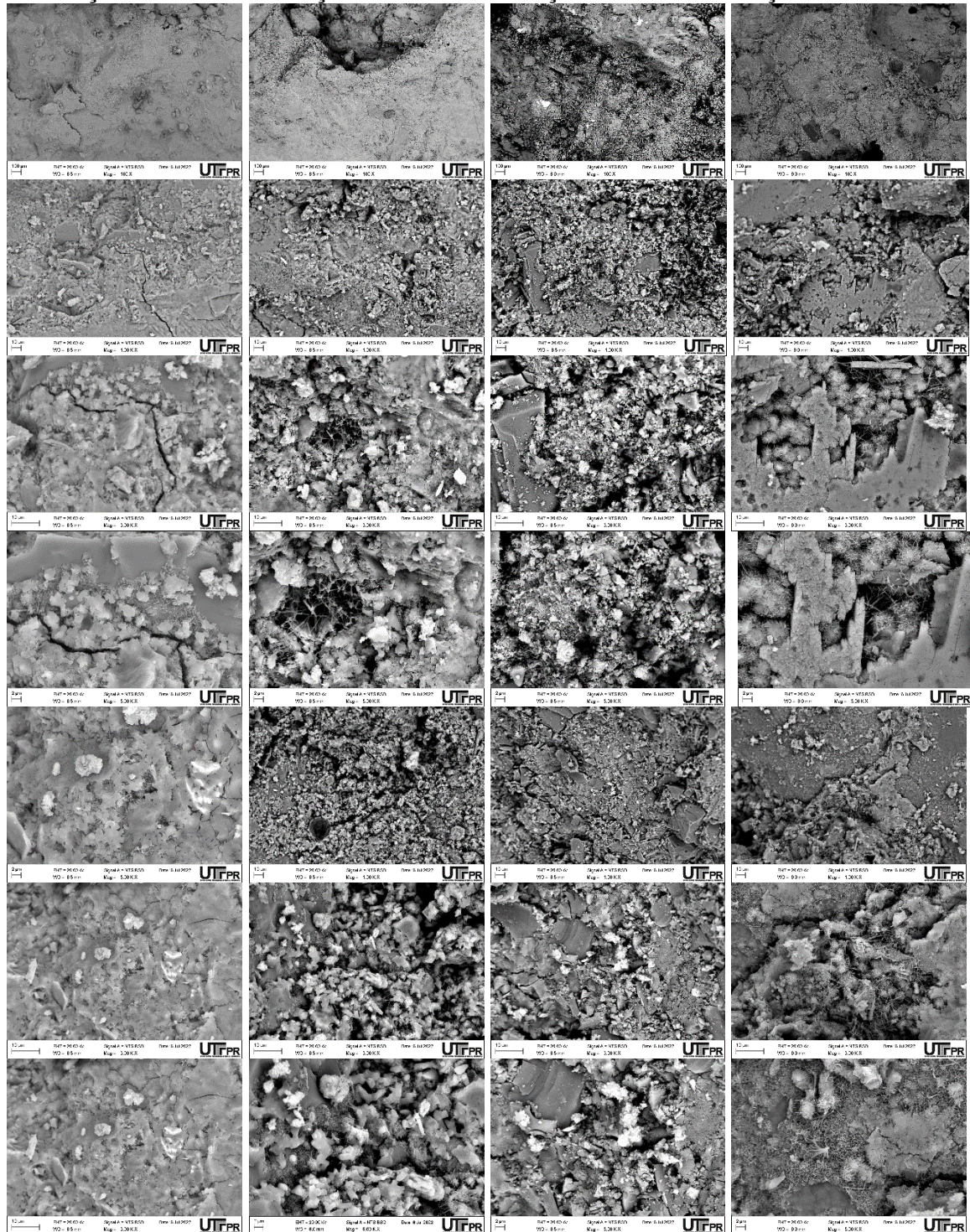
4.2.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Espectroscopia por dispersão de elétrons (EDS)

A análise de microscopia eletrônica de varredura MEV e análise de EDS, foram realizadas para os corpos de prova com cura de vinte e oito dias, como também os submetidos a câmara de carbonatação, ao envelhecimento acelerado na câmara de climatização e aos submetidos ao ataque interno por sulfatos.

4.2.7.1 Análise de MEV e EDS para os traços submetidos a cura por vinte e oito dias

Na fotografia 31 está demonstrada a análise realizada pelo MEV para vinte e oito dias de cura, com a sequência de ampliações.

Fotografia 31 - Imagens dos traços TR, T10, T20 e T30 realizadas pelo MEV para 28 dias de cura

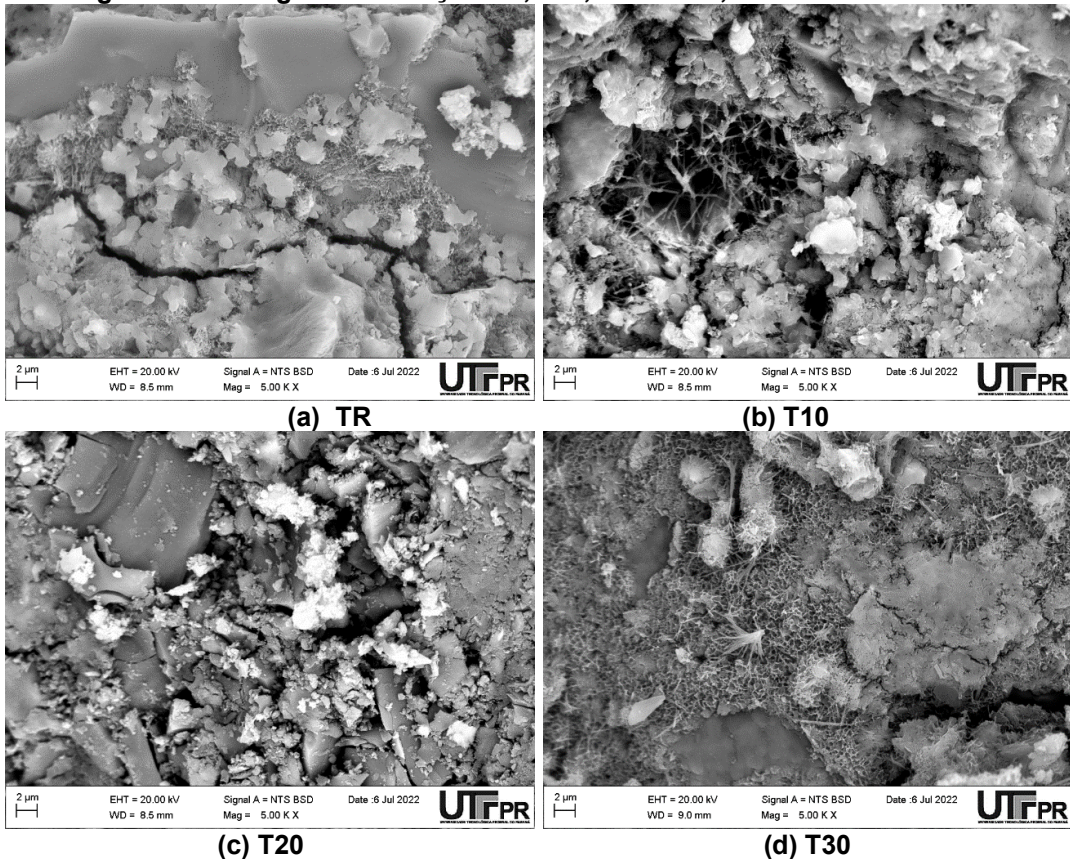


Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Pode-se observar no conjunto de imagens da fotografia 32, a mudança gradativa de coloração conforme aumenta a quantidade de rejeito passivo de carvão mineral, e a formação de poros e vazios entre as partículas.

As fotografias 32a, 32b, 32c e 32d do material analisado, estão apresentadas com a mesma ampliação (Mag = 5.00 K X).

Fotografia 32 - Imagens dos traços TR, T10, T20 e T30, cura de vinte e oito dias

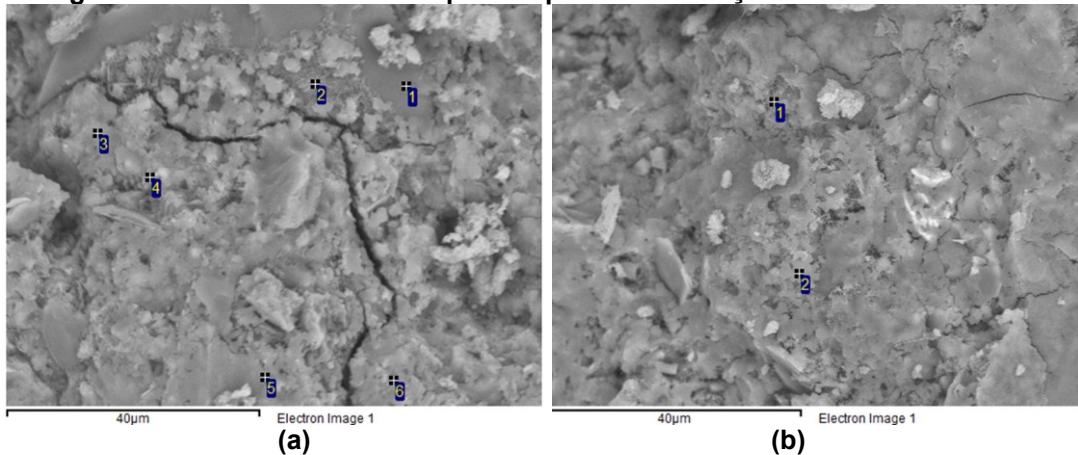


Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na fotografia 32a referente ao traço TR, observa-se a formação do gel C-S-H, cristais de hidróxido de cálcio e gipsita. Nessa análise observa-se fissuras no material as quais pode-se atribuir o fato deste traço não ter apresentado uma resistência superior à do T10, visto que sua absorção foi inferior. A fotografia 32b do traço T10, apresenta poros mais perceptíveis, e pode-se observar que no interior dos poros acontece a formação de agulhas de etringita, e um aumento da porosidade do material. O traço T20 representado pela fotografia 32c, apresenta cristais de hidróxido de cálcio, gipsita e poros. Na fotografia 32d referente ao traço T30, observa-se a formação do gel C-S-H, alguns pontos de etringita, e fissuras nas partículas componentes do concreto.

Nas fotografias 33a e 33b estão apresentados os pontos da análise química do traço TR com vinte e oito dias de cura, realizada por EDS.

Fotografia 33 - Pontos da análise química por EDS do traço TR com 28 dias de cura



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 28 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço TR, com vinte e oito dias de cura.

Tabela 28 - Composição química para o traço TR aos 28 dias de cura, realizada por EDS

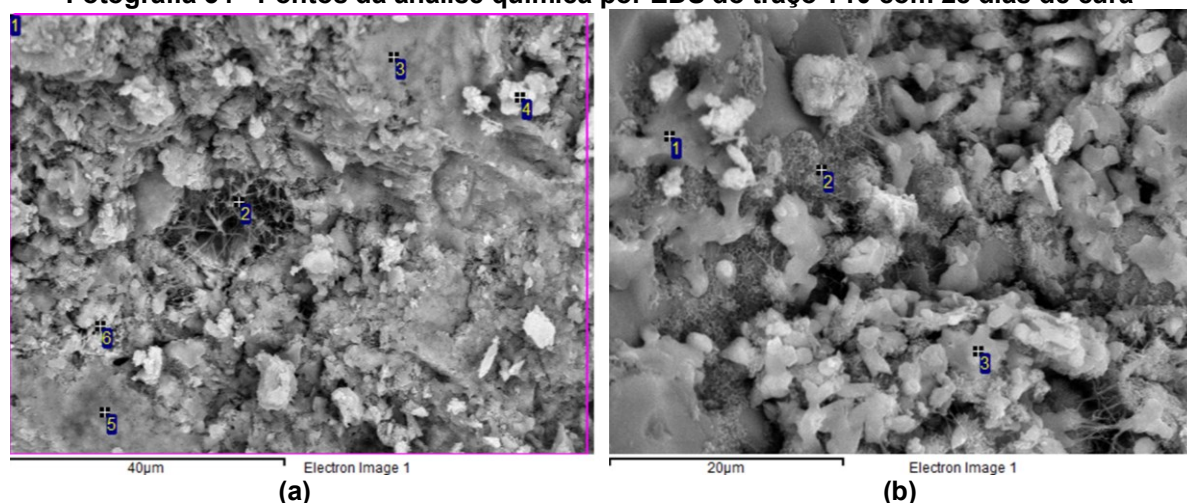
Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
1a	9,85	57,14	-	-	29,48	-	-	3,53	-
2a	-	58,12	-	0,26	34,82	-	0,42	6,38	-
3a	-	54,71	0,56	1,00	13,15	-	1,06	29,20	0,33
4a	-	64,31	2,81	1,35	7,69	1,20	0,87	20,99	0,79
5a	-	48,89	0,70	2,28	7,50	1,12	1,54	37,19	0,78
6a	-	44,59	1,17	2,23	8,35	-	0,57	37,51	5,57
1b	-	55,50	0,45	3,38	7,56	-	1,46	22,88	0,51
2b	-	42,14	0,46	1,39	15,58	-	0,86	25,05	3,65
Máxima.	9,85	64,31	2,81	3,38	34,82	1,20	1,54	37,51	5,57
Mínima	9,85	42,14	0,45	0,26	7,50	1,12	0,42	3,53	0,33

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Pode-se observar nas fotografias 33a e 33b que o carbono tem incidência somente no ponto 1a, com 9,85%. Esta porcentagem de carbono embora incida em um único ponto é maior que a incidência do manganês, alumínio, enxofre, potássio e ferro, em todos os demais pontos analisados para este traço. A sílica tem sua maior incidência no ponto 2a com 34,82%, valor superior ao encontrado pelo FRX para o traço TR que é de 29,50%. O cálcio é o elemento que apresenta maior concentração para este traço, de 37,51% no ponto 6a.

Nas fotografias 34a e 34b estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T10 com vinte e oito dias de cura.

Fotografia 34 - Pontos da análise química por EDS do traço T10 com 28 dias de cura



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 29 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T10, com vinte e oito dias de cura.

Tabela 29 - Composição química para o traço T10 aos 28 dias de cura, realizada por EDS

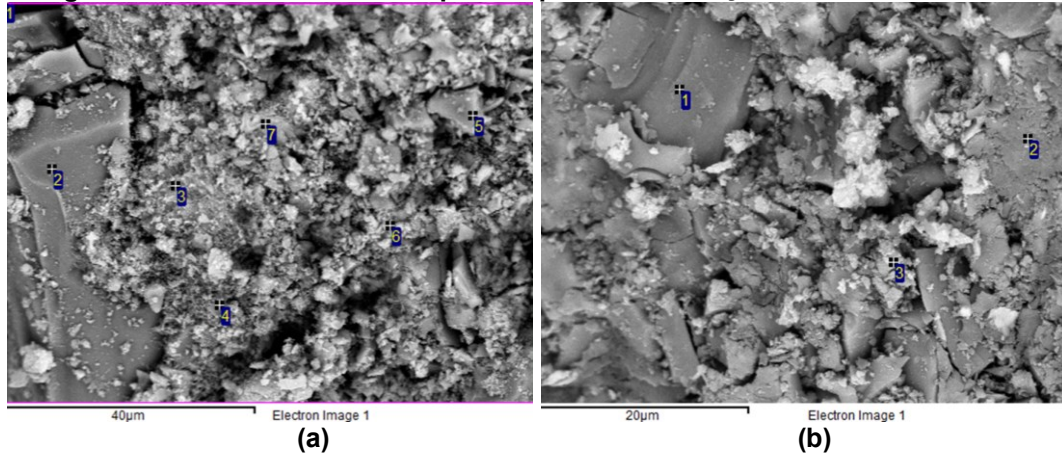
Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1a	-	60,64	1,52	2,39	8,42	1,24	0,59	23,82	-	1,39
2a	4,97	54,31	1,68	2,60	4,88	2,34	0,30	26,45	0,39	2,08
3a	-	42,12	0,34	1,66	5,12	1,60	0,34	47,87	-	0,95
4a	9,89	62,25	0,39	1,32	5,30	-	0,40	19,74	-	0,71
5a	-	55,94	0,50	2,35	10,63	1,52	0,77	27,48	-	0,83
6a	-	52,22	0,25	1,04	11,28	-	0,13	33,58	0,25	1,25
1b	-	55,39	-	0,69	17,99	-	0,63	24,78	-	0,52
2b	--	34,78	-	0,81	51,30	-	0,79	12,32	-	-
3b	-	63,26	-	2,31	4,27	-	0,45	29,42	-	0,28
Máxima	9,89	63,26	1,68	2,60	51,80	2,34	0,79	47,87	0,39	2,08
Mínima	4,97	34,78	0,25	0,69	4,27	1,24	0,13	12,32	0,25	0,28

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 29 observa-se novamente a incidência do carbono, nos pontos 2a e 4a com 4,97% e 9,87% respectivamente, se sobrepondo ao magnésio, o alumínio, o enxofre, o potássio e o titânio que surge neste traço com uma pequena porcentagem de 0,64%, em dois pontos 2a e o 6a. O ferro não foi detectado neste traço. A maior porcentagem de sílica encontrada foi de 51,80% no ponto 2b, o que superou a sílica encontrada no FRX para o traço T10 nos vinte e oito dias de cura, que é de 48,57%. O ponto com maior concentração de cálcio foi o 3a, com 47,87%, na análise de FRX o cálcio encontrado para este traço foi de 35,91%.

Nas fotografias 35a e 35b estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T20 com vinte e oito dias de cura.

Fotografia 35 - Pontos da análise química por EDS do traço T20 com 28 dias de cura



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 30 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T20, com vinte e oito dias de cura.

Tabela 30 - Composição química para o traço T20 aos 28 dias de cura, realizada por EDS

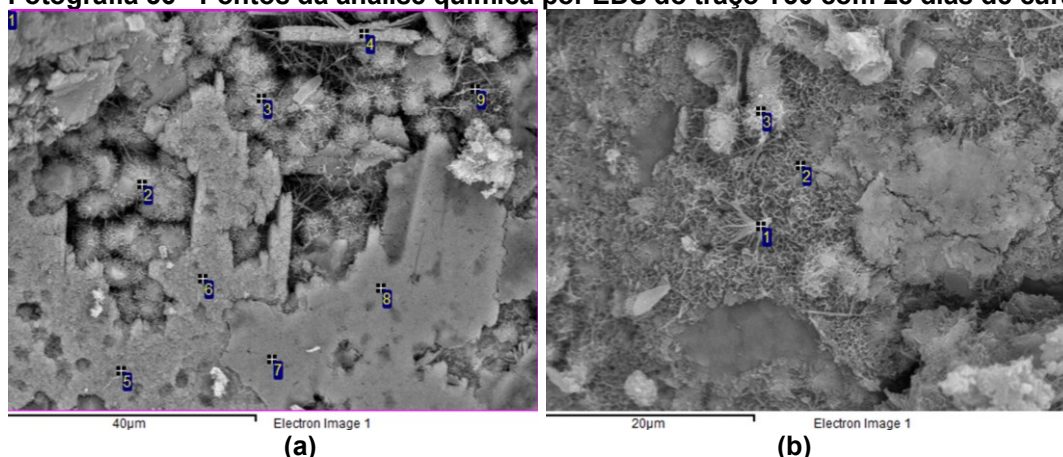
Pontos	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
1 ^a	-	62,34	1,28	0,92	2,60	23,95	-	0,34	7,53	1,04
2 ^a	10,69	57,90	-	-	-	31,41	-	-	-	--
3 ^a	7,81	60,37	0,35	3,38	2,46	7,87	0,69	0,41	14,86	1,81
4 ^a	-	57,44	7,62	-	8,88	24,67	-	0,26	1,14	-
5 ^a	5,35	55,22	-	-	-	37,08	-	-	1,98	0,37
6 ^a	-	59,49	-	0,67	1,94	18,46	-	0,25	18,02	1,15
7 ^a	-	42,11	1,21	6,18	9,16	16,10	-	-	2,68	22,54
1b	9,45	57,84	-	-	-	32,47	-	-	0,24	-
2b	-	60,09	1,09	0,46	5,36	20,93	-	1,54	9,70	0,84-
3b	-	62,18	0,47	1,99	2,03	19,66	0,81	0,18	11,48	1,20
Máxima	10,69	62,34	7,62	6,18	5,39	37,08	0,81	1,54	18,02	22,54
Mínima	5,35	42,11	0,35	0,45	1,94	7,87	0,69	0,18	0,24	0,37

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Pode-se observar na tabela 30 que a concentração de carbono para o traço T20 aumentou em relação aos traços TR e T10 com 10,65% no ponto 2a, 7,81% no ponto 3a, 5,35% no ponto 5a, e 9,45% no ponto 1b. Neste traço foi detectado também uma concentração de sódio nos pontos 1a, 3a, 4a, 6a, 2a, e 3b, sendo a maior concentração no ponto 4a, com 7,62%. O magnésio também apresenta uma maior concentração do que nos demais traços da cura com vinte e oito dias no ponto 7a com 6,18%.

Nas fotografias 36a e 36b estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T30 com vinte e oito dias de cura.

Fotografia 36 - Pontos da análise química por EDS do traço T30 com 28 dias de cura



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 31 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T30, com vinte e oito dias de cura.

Tabela 31 - Composição química para o traço T30 aos 28 dias de cura, realizada por EDS

Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Cu
1a	6,55	52,49	1,11	1,57	5,02	-	-	32,43	-	0,83	-
2a	-	53,42	0,77	2,56	12,95	-	0,26	28,72	-	1,32	-
3a	--	48,90	0,27	1,69	12,23	1,28	-	35,09	-	0,54	-
4a	8,92	56,94	-	6,70	3,38	1,55	-	21,83	-	0,27	0,41
5a	4,85	44,69	-	-	0,56	-	-	49,90	-	-	-
6a	4,67	46,47	-	0,21	0,48	-	-	48,17	-	-	-
7a	3,81	47,12	-	0,25	2,01	-	-	46,80	-	-	-
8a	4,29	47,44	-	0,31	1,21	-	-	46,75	-	-	-
9a	-	54,56	1,85	4,32	7,62	2,48	-	26,43	0,27	2,47	-
1b	14,14	59,66	-	1,18	16,57	1,52	-	6,70	-	-	0,23
2b	14,20	52,39	-	0,34	28,19	-	-	4,88	-	-	-
3b	-	60,63	0,24	2,15	19,30	1,26	0,24	15,69	-	-	0,49
Máxima	14,14	56,94	1,85	6,70	28,19	2,48	0,26	49,90	0,27	2,47	0,49
Mínima	3,81	44,69	0,24	0,21	0,48	1,28	0,24	21,83	0,27	0,27	0,23

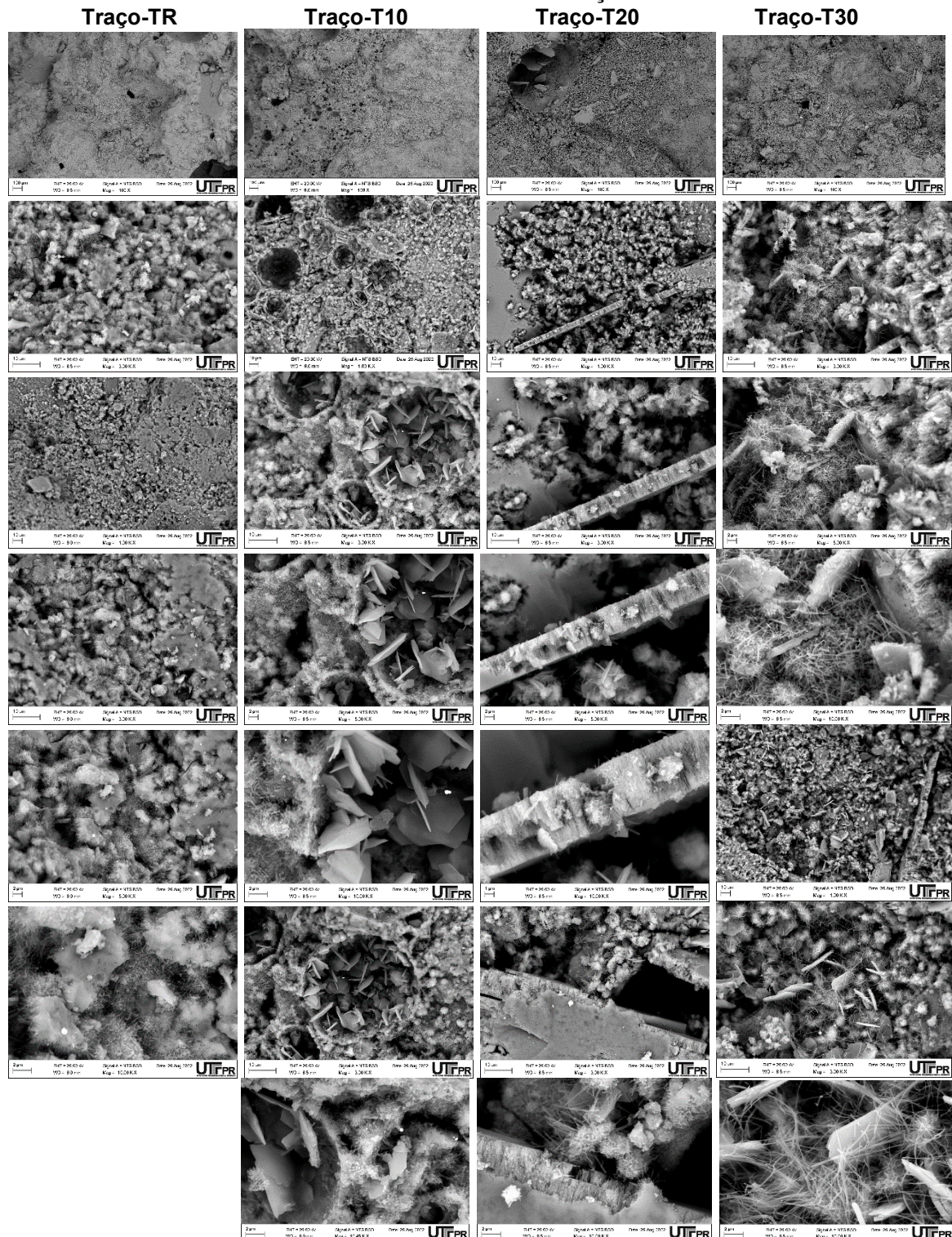
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Neste traço o ponto 1b se destaca pela sua alta concentração de carbono, 14,14%, e pela redução de cálcio com 6,70%. Neste traço não existe homogeneidade entre os pontos. Dos 12 analisados a sílica varia de 0,48% no ponto 6a a 28,19% no ponto 2b, um valor bem inferior ao encontrado para o mesmo traço na análise de FRX, que foi de 50,37%. O cobre surge pela primeira vez nos pontos 4a, 1b e 3b, com concentrações menos expressivas, sendo a maior de 0,49% e a menor de 0,29%. As altas concentrações de carbono neste traço deveriam ter contribuído para uma resistência a compressão mais significativa, porém os poros bastante incipientes que se pode observar nas fotografias 31a e 31b, contribuíram para uma redução da resistência a compressão e uma absorção mais elevada.

4.2.7.2 Análise de MEV e EDS para os traços submetidos ao tratamento na câmara de carbonatação

Na fotografia 37 estão demonstradas as análises realizadas pelo MEV para o tratamento da câmara de carbonatação, com a sequência de ampliações.

Fotografia 37 - Imagens dos traços TR, T10, T20 e T30 realizadas pelo MEV para o tratamento da câmara de carbonatação

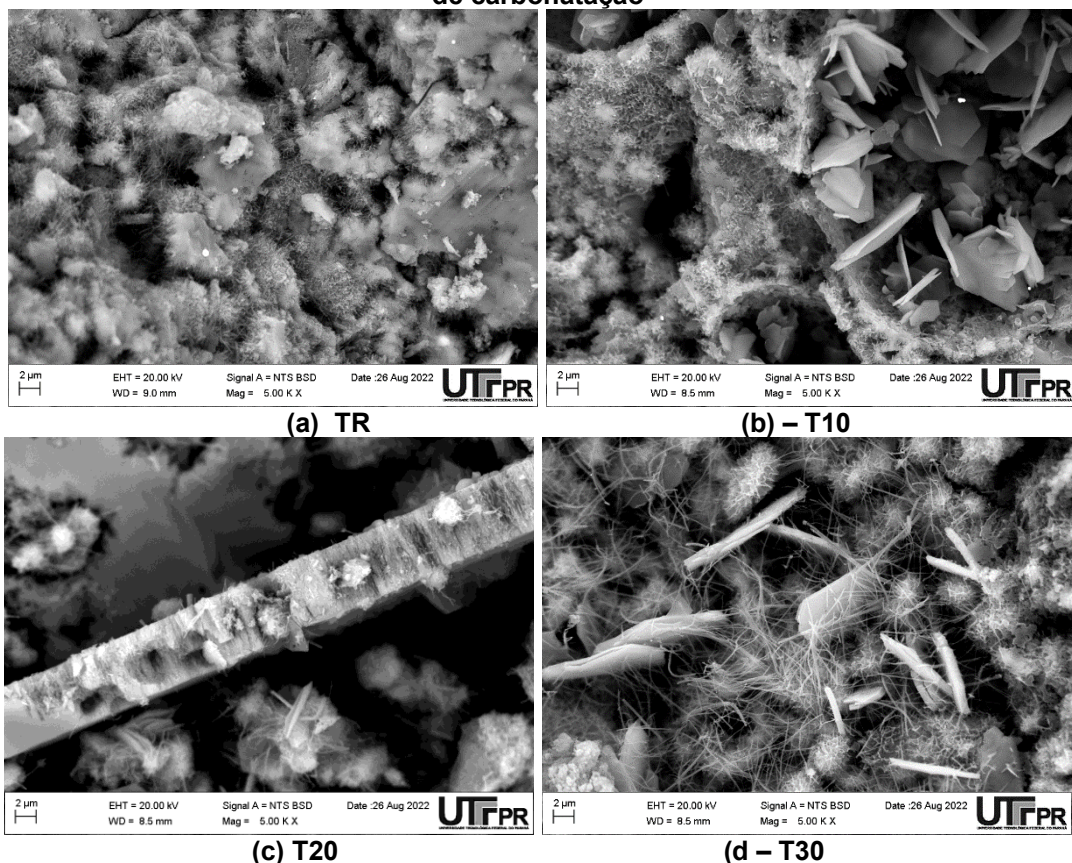


Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

No conjunto de imagens da fotografia 37 pode-se observar a formação de poros, alguns com preenchimento de placas de hidróxido de cálcio em seu interior. Observa-se que estes vazios aumentam com a substituição de cimento por rejeito passivo de carvão mineral. Estes poros podem ter contribuído para o alto índice de carbonatação encontrado para estes traços após o tratamento na câmara de carbonatação, bem como os resultados obtidos no ensaio de Porosimetria: TR=13,03%, T10=14,86%, T20=19,32% e T30=12,47% de índice de porosidade após o tratamento de carbonatação.

As fotografias 38a, 38b, 38c, 38d do material analisado, estão apresentadas com a mesma ampliação (Mag = 5.00 K X).

Fotografia 38 - Fotografias com ampliação dos traços TR, T10, T20 e T30, submetidas a câmara de carbonatação



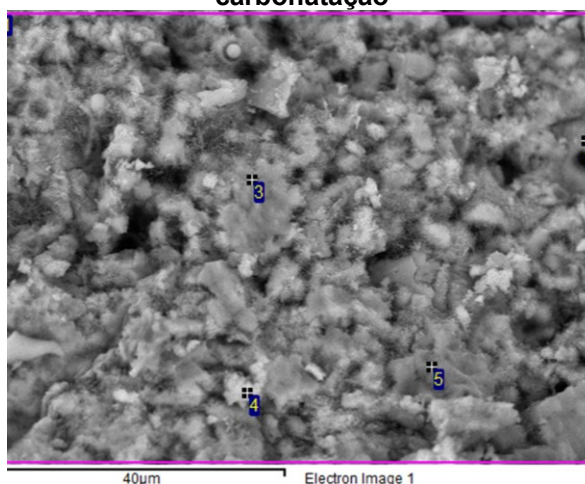
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na fotografia 38a referente ao traço TR observa-se uma discreta formação de placas de hidróxido de cálcio, a ocorrência de gel de C-S-H, a gipsita ocorre em alguns pontos. Na fotografia 38b que representa o traço T10, as placas de hidróxido de cálcio preenchendo poros são bem relevantes, o gel de sílica aparece envolvendo cristais

de calcita. Na fotografia 38c está demonstrada uma barra identificada pelo EDS como carbono, e algumas agulhas de etringita. A fotografia 38d que diz respeito ao traço T30 pode-se observar uma formação mais abrangente de etringita, com algumas agulhas de calcita.

Na fotografia 39 estão apresentados os pontos da análise química, do traço TR, submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS.

Fotografia 39 - Pontos da análise química por EDS do traço TR, submetido a câmara de carbonatação



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 32 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço TR, submetido a câmara de carbonatação.

Tabela 32 - Composição química para o traço TR submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS

Pontos	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1	-	61,23		1,29	1,58	7,15	1,09	0,23	26,52		0,91
2	-	56,14	0,47	0,95	11,70	24,54	-	3,17	1,92	0,32	0,78
3	8,78	38,51	-	1,10	1,64	8,16	-	-	38,24		3,58
4	-	66,93	-	2,29	5,85	11,02	-	2,00	10,63	0,14	1,15
5	-	63,10	-	1,47	0,98	4,75	1,05	-	28,25	-	0,40
Máximo	8,78	66,93	0,47	2,29	11,70	24,54	1,09	3,17	38,24	0,32	3,58
Mínimo	8,78	38,51	0,47	0,95	0,98	4,75	1,05	0,23	1,92	0,14	0,40

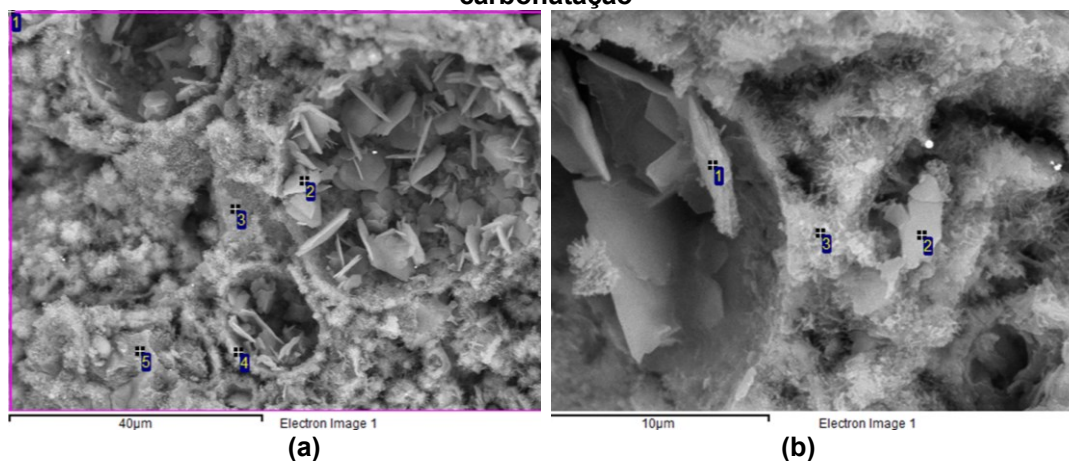
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 32, o ponto 2 e o ponto 3 se destacam, o primeiro por ser o único com concentração de sódio (Na=0,47%), e o segundo é o único com concentração de carbono (C=8,78%). O magnésio é o único elemento que apresenta homogeneidade entre os pontos. O cálcio se destaca no ponto 2 com uma concentração de apenas 1,92%, enquanto o alumínio neste mesmo ponto apresenta uma concentração de

11,70%. O titânio tem ocorrência neste traço com pequenas concentrações nos pontos 2 e 4.

Nas fotografias 40a e 40b estão apresentados os pontos da análise química, do traço T10, submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS.

Fotografia 40 - Pontos da análise química por EDS do traço T10, submetidos a câmara de carbonatação



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 33 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T10, submetidos a câmara de carbonatação.

Tabela 33 - Composição química para o traço T10, submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS

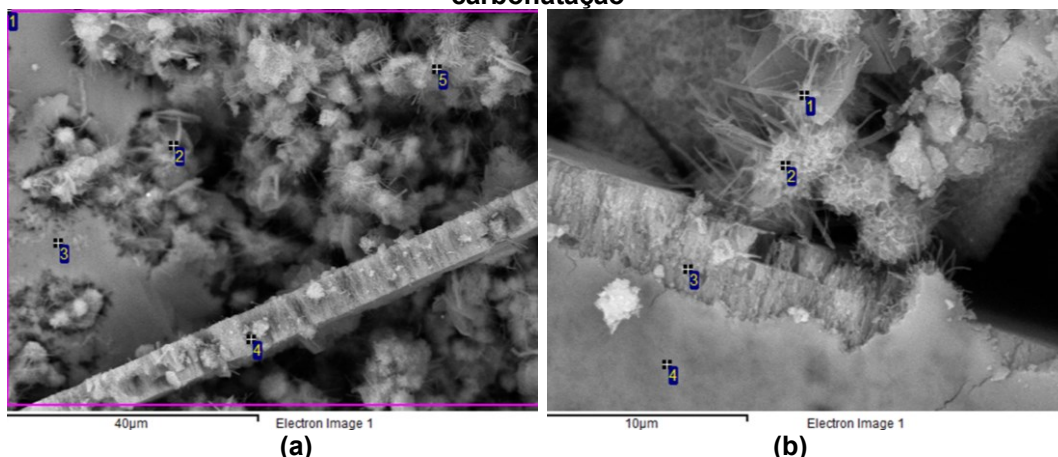
Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
-1 ^a	-	64,03	2,00	2,70	6,95	0,88	0,49	21,28	0,18	1,49
2 ^a	-	72,56	0,34	6,09	2,85	0,83	0,00	16,66	-	0,68
3 ^a	13,90	52,63	0,71	0,15	0,79	-	-	31,59	-	0,25
4 ^a	-	64,65	1,79	2,75	6,29	1,03	0,31	22,17	-	1,01
5a	-	61,34	3,24	1,91	7,64	-	0,27	22,12	0,29	3,19
1b	-	73,68	0,61	4,64	3,82	0,79	0,12	15,57	-	0,77
2b	-	56,93	0,97	2,88	8,34	-	0,42	28,89	-	1,58
3a	-	69,43	1,86	2,11	7,28	-	0,32	17,40	-	1,60
Máximo	13,90	73,68	4,61	6,54	8,34	1,03	0,49	31,59	0,29	3,19
Mínimo	13,90	52,63	0,34	0,15	0,79	0,79	0,00	15,67	0,18	0,25

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 33 pode-se destacar as baixas concentrações de sílica, que não acompanha os resultados da análise de FRX para este tratamento neste traço, como também o fato dela não estar homogênea em todos os pontos analisados. O carbono tem uma concentração de 13,9% no ponto 3a, onde pode-se observar uma mancha preta proveniente desta concentração.

Nas fotografias 41a e 41b estão apresentados os pontos da análise química, do traço T20, submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS.

Fotografia 41 - Pontos da análise química por EDS do traço T20, submetido a câmara de carbonatação



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 34 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T20, submetidos a câmara de carbonatação.

Tabela 34 - Composição química para o traço T20, submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS

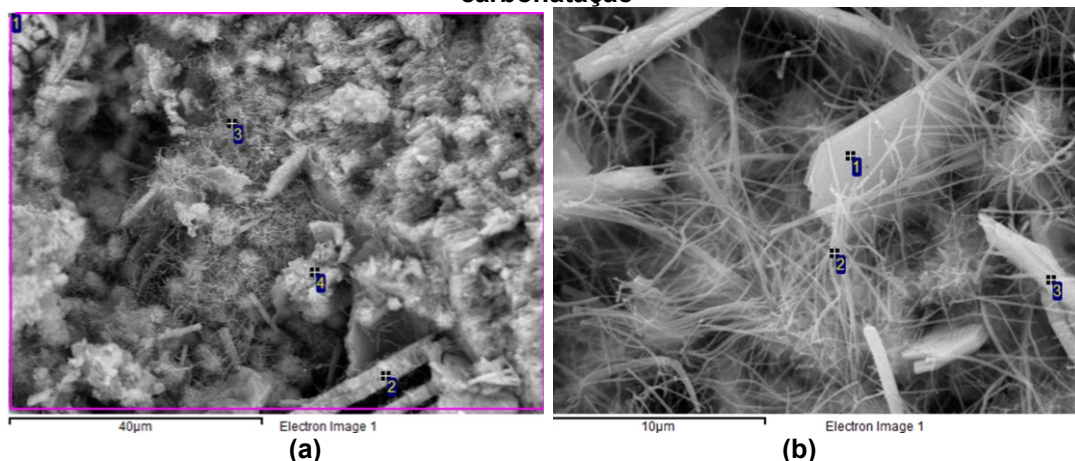
Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
1 ^a	-	61,03	1,26	1,84	4,90	0,62	0,45	28,78	1,12
2a	-	64,57	1,69	3,52	10,05	-	1,04	17,09	2,05
3a	4,42	40,87	-	-	0,42	-	-	54,29	-
4a	6,17	37,61	0,70	0,31	1,15	0,97	-	53,09	-
5a	-	58,46	1,68	2,42	6,88	0,62	0,68	28,17	1,10
1b	-	72,41	2,26	2,33	5,54	0,68	0,25	15,78	0,74
2b	-	65,99	1,70	1,80	5,84	0,76	0,30	20,40	3,22
3b	9,44	49,66	0,20	0,22	0,84	2,27	-	37,37	-
4b	6,28	54,18	-	-	1,05	3,67	-	34,82	-
Máximo	9,41	72,12	2,26	3,52	10,05	3,67	1,04	54,29	3,22
Mínimo	4,42	19,16	0,20	0,22	0,42	0,62	0,25	15,7	0,74

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 34 pode-se observar uma alta concentração de carbono no traço, pela análise dos pontos 3a, 4a, (3b e 4b com respectivamente 4,20%, 6,17%, 9,44% e 6,28%, este apresenta-se em forma de barras. Observa-se também na tabela 34 a baixa concentração de sílica no traço T20, porém o cálcio apresenta índices de concentração semelhantes ao do FRX. O alumínio assim como o enxofre se mantém estável em todos os pontos analisados.

Nas fotografias 42a e 42b estão apresentados os pontos da análise química do traço T30, submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS.

Fotografia 42 - Pontos da análise química por EDS do traço T30, submetidos a câmara de carbonatação



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 35 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T30, submetidos a câmara de carbonatação.

Tabela 35 - Composição química para o traço T30 submetido a câmara de carbonatação, realizada por EDS

Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1a	10,89	58,84	0,94	1,42	5,67	0,73	0,14	20,78	-	0,58
2a	13,36	56,07	0,39	0,52	0,64	1,03	-	27,82	-	0,19
3a	19,19	51,14	0,62	0,55	14,14	0,43	-	13,65	-	0,27
4a	-	65,00	1,92	2,69	5,36	1,23	0,23	21,53	1,12	0,93
1b	-	67,48	4,31	6,76	6,86	2,12	0,25	10,48	-	1,74
2b	-	67,80	2,66	3,16	7,07	0,83	0,29	16,56	-	1,63
3b	-	71,34	5,69	8,78	4,73	2,14	0,22	5,97	-	1,13
Máximo	19,19	71,83	5,8	8,78	7,07	2,18	0,23	27,82	1,12	1,78
Mínimo	10,89	51,14	0,39	0,52	0,64	0,83	0,14	5,97	1,12	0,19

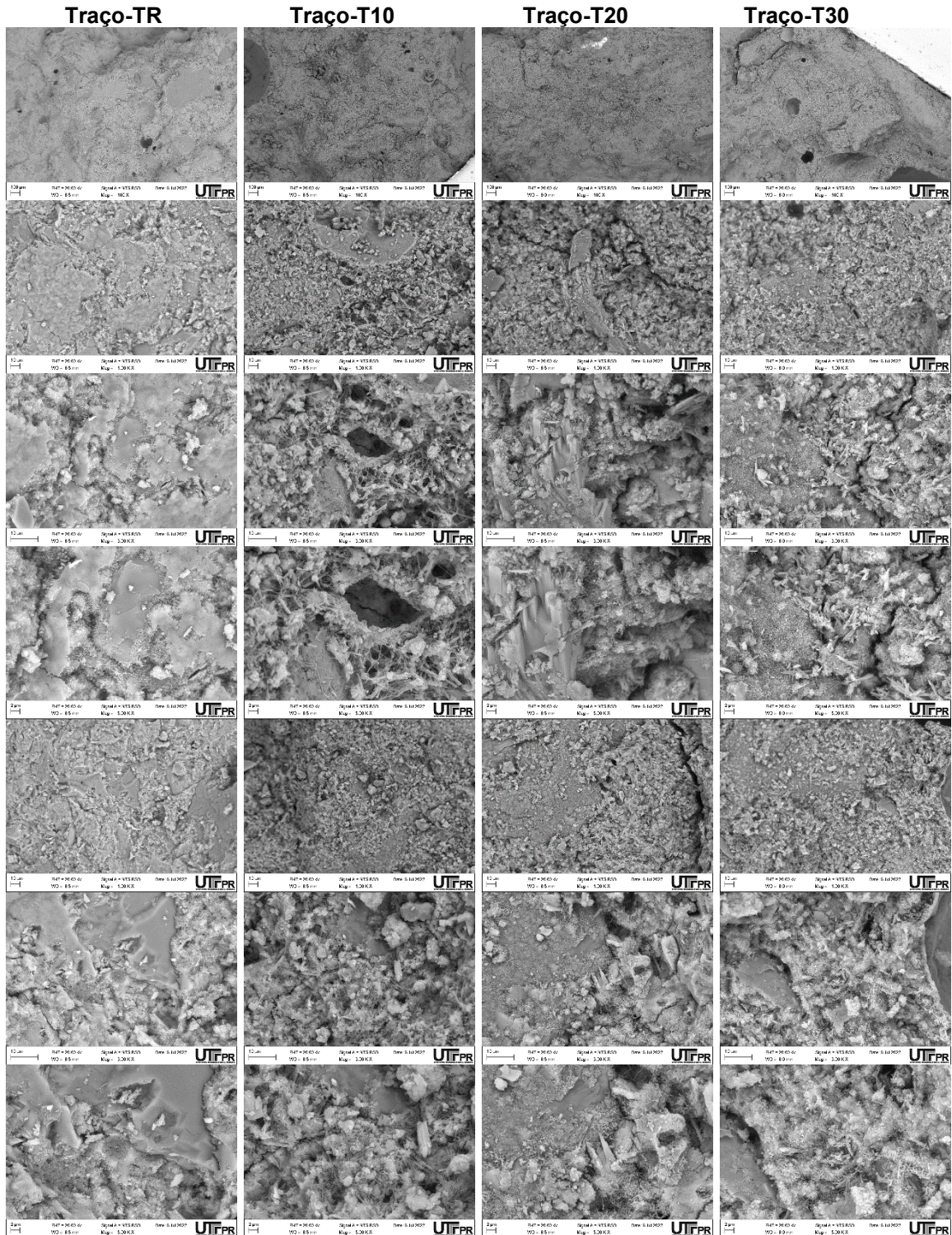
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 35 o carbono se concentra nos pontos 1a, 2a, e 3a, e como pode-se observar no ponto 2a ele se apresenta novamente em forma de barras, mas também composto com sílica e cálcio como é o caso do ponto 3a. O titânio surge no ponto 4a com uma concentração de 1,12%, um pouco maior que as apresentadas nos demais traços submetidos a carbonatação. No T30 a sílica continua com uma baixa concentração, o máximo atingido foi de 7,07 no ponto 2b. O diferencial deste tratamento, para a cura de vinte e oito dias foram as baixas concentrações de sílica encontradas na análise do EDS.

4.2.7.3 Análise de MEV e EDS para os traços submetidos ao envelhecimento acelerado-EA na câmara de climatização

Na fotografia 43 está demonstrada a análise realizada pelo MEV para o tratamento da câmara de climatização, com a sequência de ampliações.

Fotografia 43 - Imagens dos traços TR, T10, T20 e T30 realizadas pelo MEV para o tratamento de EA

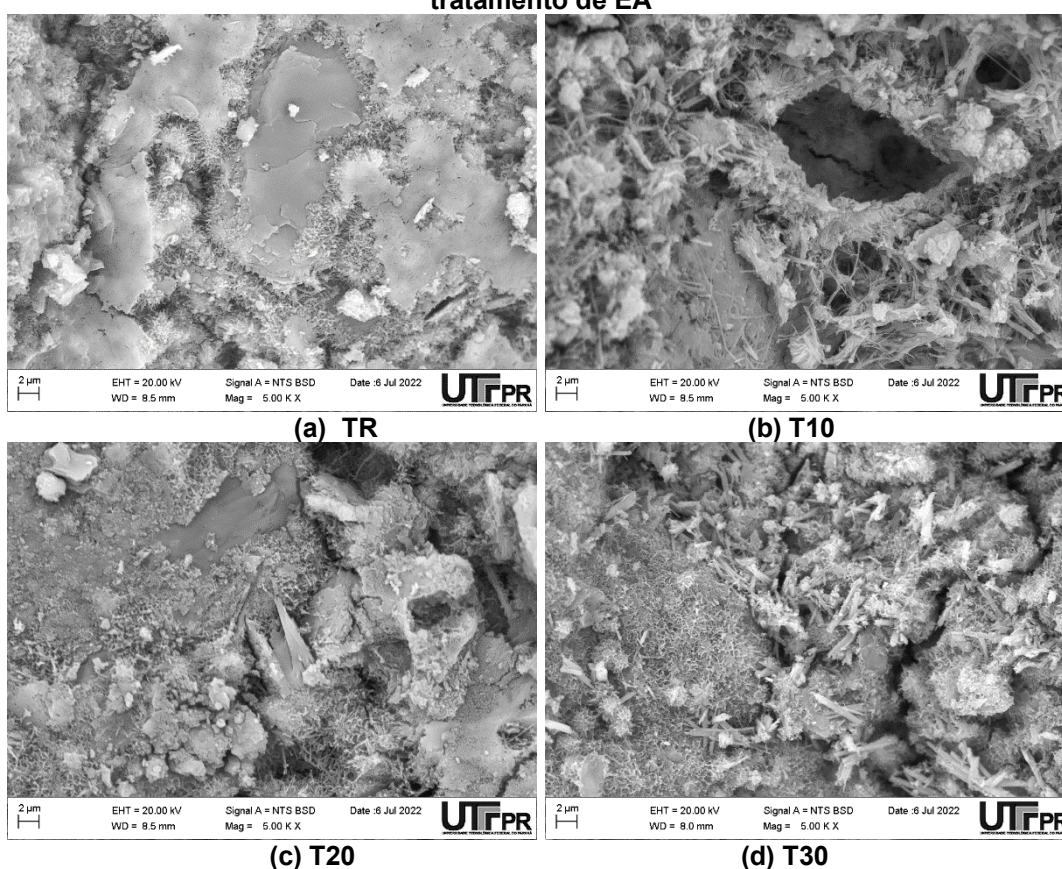


Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Nas imagens da fotografia 43 pode-se observar a mudança de textura do concreto com a substituição do cimento pelo rejeito passivo de carvão mineral. Foi registrado nas imagens o surgimento de fissuras na microestrutura do concreto com o tratamento de envelhecimento acelerado, a que se pode atribuir a queda de resistência a compressão registrada do traço TR ao T30 para este tratamento.

As fotografias 44a, 44b, 44c e 44d do material analisado, estão apresentadas com a mesma ampliação (Mag = 5.00 K X).

Fotografia 44 - Fotografias com ampliação dos traços TR, T10, T20 e T30, submetidas a tratamento de EA

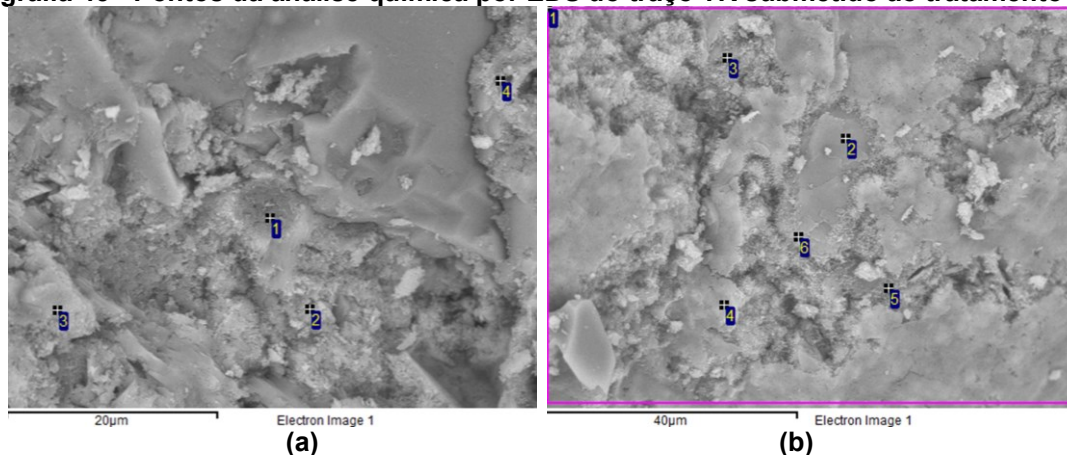


Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

A fotografia 44a representa a microestrutura do concreto do traço TR, pode-se observar placas de hidróxido de cálcio, gel de C-S-H envolvendo as mesmas e fechando uma fissura presente na imagem. Na fotografia 44b do traço T10, observa-se uma concentração de carbono e agulhas de etringita fechando alguns poros da microestrutura. No traço T20 representado pela fotografia 44c pode-se observar fissuras na estrutura do concreto, ocorrem também placas de hidróxido de cálcio, gel de C-S-H e poros. na fotografia 44d as fissuras estão bem definidas, com gel de C-S-H envolvendo as placas de hidróxido de cálcio.

Nas fotografias 45a e 45b estão apresentados os pontos da análise química por EDS do traço TR, submetido ao tratamento de envelhecimento acelerado.

Fotografia 45 - Pontos da análise química por EDS do traço TR submetido ao tratamento de EA



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 36 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço TR, submetidos ao tratamento de envelhecimento acelerado.

Tabela 36 - Composição química do TR submetido ao tratamento de EA realizada por EDS

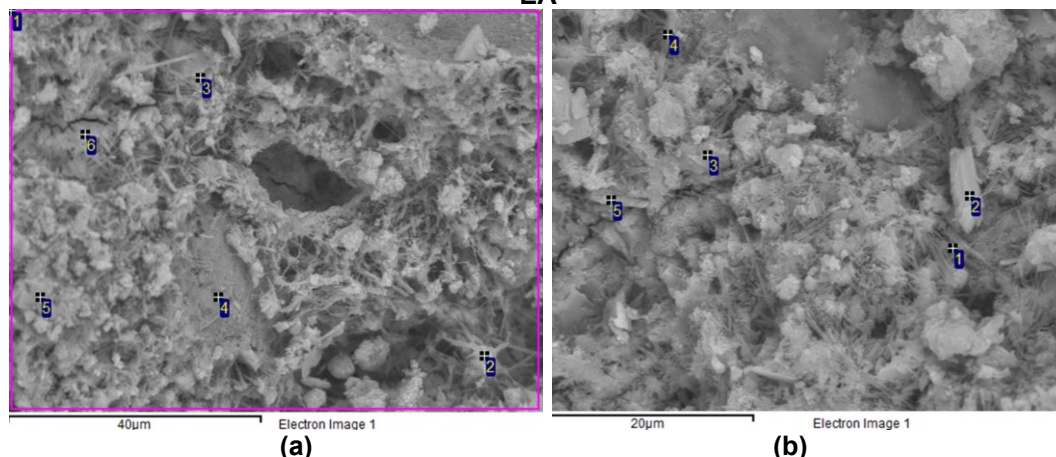
Pontos	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
1 ^a	-	45,02	0,31	2,71	9,39	-	41,52	-	1,05
2 ^a	-	61,71	0,55	1,40	8,27	0,00	27,42	--	0,65
3 ^a	7,10	45,28	4,32	4,78	4,65	-	25,64	0,52	7,70
4 ^a	-	54,71	1,12	1,56	14,49	-	27,48	-	0,64
1 ^b	-	51,75	0,84	2,51	11,08	0,54	32,16	-	1,10
2 ^b	-	39,46	1,82	11,83	24,09	7,49	11,69	-	3,61
3 ^b	7,83	45,22	0,57	1,20	9,79	-	34,20	-	1,18
4 ^b	-	46,51	0,28	1,18	11,00	--	39,80	-	1,22
5 ^b	-	34,81	0,95	4,00	13,51	0,85	42,63	-	1,75
6 ^b	-	56,33	0,93	6,58	17,01	2,93	15,21	-	1,00
Máximo	7,83	61,71	4,32	11,83	24,09	7,49	42,53	0,52	7,70
Mínimo	7,10	34,81	0,31	1,18	4,65	0,00	11,69	0,52	0,64

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 36 o ponto 2b apresenta a mais alta concentração de potássio da amostra de 7,49%, embora o mesmo não seja estável na amostra. O pico de concentração do ferro está no ponto 3a, com 7,70%. O carbono surge em dois pontos, 3a e 3b com concentrações semelhantes de 7,1% e 7,83%. O titânio tem uma presença bastante discreta com uma concentração de 0,52% no ponto 3a. O alumínio apresenta uma alta concentração no ponto 2b. O cálcio e a sílica variam suas concentrações em toda a mostra. Visualmente observa-se uma amostra coesa com um baixo índice de poros.

Nas fotografias 46a e 46b estão apresentados os pontos da análise química por EDS, do traço T10, submetido ao tratamento de envelhecimento acelerado.

Fotografia 46 - Pontos da análise química por EDS do traço T10 submetido ao tratamento de EA



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 37 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T10, submetido ao tratamento de envelhecimento acelerado.

Tabela 37 - Composição química para o T10 submetido ao tratamento de EA, realizada por EDS

Pontos	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
1a	-	58,80	-	0,66	1,81	4,89	1,31	-	0,45	31,19	0,89
2a	-	72,19	-	0,42	2,02	1,54	1,17	-	0,17	22,26	0,24
3a	-	38,49	-	-	7,13	26,01	-	-	14,93	13,44	-
4a	-	48,03	-	0,41	0,90	3,13	-	-	-	46,40	1,13
5a	-	62,29	1,37	0,77	2,30	6,26	1,89	0,20	0,85	23,38	0,68
6a	-	54,41	-	1,19	1,32	11,15	-	-	0,48	30,72	0,72
1b	-	38,54	-	0,41	0,91	20,24	1,20	-	0,51	36,99	-
2b	18,38	57,04	-	0,28	0,45	3,60	-	-	-	20,25	1,20
3b	-	61,96	-	0,51	5,31	6,30	0,97	-	0,23	22,93	-
4b	-	59,60	-	0,62	1,49	19,20	-	-	0,31	18,39	1,51
5b	10,57	63,20	-	0,88	2,58	5,28	-	-	0,37	16,64	0,38
Máximo	18,38	18,38	1,37	1,19	7,13	26,01	1,89	0,20	14,93	46,40	1,51
Mínimo	10,57	-	1,37	0,28	0,45	1,54	0,7	0,20	0,17	13,44	0,24

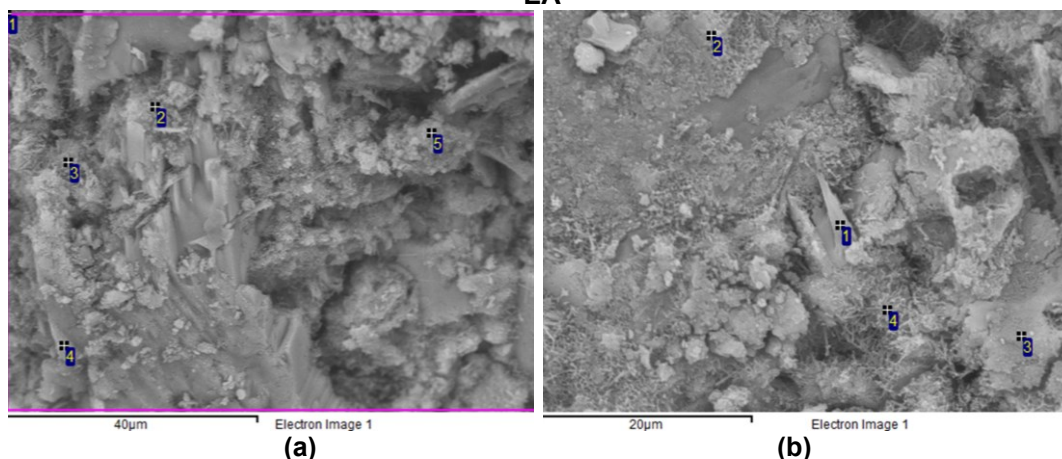
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 37 observa-se uma pequena concentração de cloro, 0,20% no ponto 5a. Nas análises de DRX foi detectado clinocloro em uma amostra com cura de 28 dias, o que confirma a presença desse elemento no material. Neste mesmo ponto o 5a o sódio ocorre com uma concentração de 1,37%, sendo esse o único ponto em que existe a ocorrência do cloro nessa amostra. Nesse traço pode-se destacar as altas concentrações de carbono nos pontos 2b e 5b com respectivamente 18,38% e

10,37%. O cálcio e a sílica embora não apresentem estabilidade nas concentrações são constantes em todos os pontos analisados.

Nas fotografias 47a e 47b estão apresentados os pontos da análise química por EDS do traço T20, submetido ao tratamento de envelhecimento acelerado.

Fotografia 47 - Pontos da análise química por EDS do traço T20 submetido ao tratamento de EA



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 38 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T20, submetido ao tratamento de envelhecimento acelerado.

Tabela 38 - Composição química para o T20 submetido ao tratamento de EA, realizada por EDS

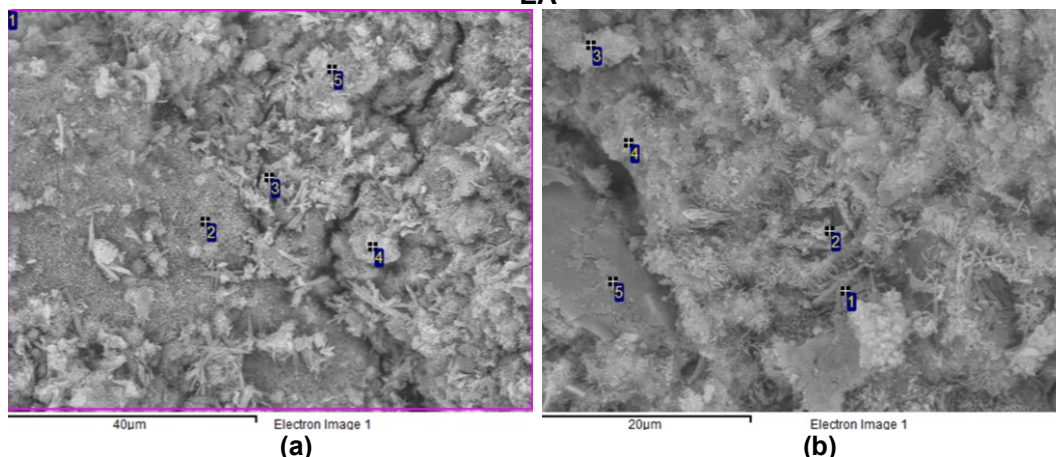
Pontos	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Cu
1a	-	61,91	-	1,04	2,48	6,92	0,89	0,16	25,24	-	1,37	-
2a	7,54	55,69	-	3,62	2,13	3,28	-	-	26,28	-	1,46	-
3a	-	56,26	-	0,52	3,55	13,62	-	0,46	24,11	-	1,48	-
4a	11,54	63,78	-	0,38	0,95	3,34	-	-	19,63	-	0,38	-
5a	-	63,07	0,63	1,02	7,15	15,33	-	0,96	10,50	0,24	0,81	0,29
1b	8,56	52,90	-	-	6,30	2,84	4,81	-	23,73	-	0,85	-
2b	18,29	50,29	-	0,21	0,69	20,58	-	-	9,59	-	0,35	-
3b	9,93	55,73	-	1,94	3,42	5,39	1,19	-	17,37	0,31	4,72	-
4b	12,93	54,56	-	3,33	1,64	9,43	0,89	-	16,51	-	0,71	-
Máximo	18,93	63,78	0,63	3,62	7,15	20,58	4,81	0,96	26,28	0,31	1,48	0,29
Mínimo	7,54	50,29	0,63	0,38	0,95	2,84	0,89	0,16	9,53	0,24	0,38	0,29

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 38 observa-se que o carbono está presente em seis dos nove traços analisados para esta amostra, com concentrações que vão de 7,54% a 18,94%. O sódio surge com uma concentração discreta no ponto 5a, onde também se registra uma concentração de titânio de 0,24%, o titânio está presente também no ponto 3b com 0,31% de concentração. Pode-se observar fissuras no material analisado.

Nas fotografias 48a e 48b estão apresentados os pontos da análise química por EDS do traço T30, submetido ao tratamento de envelhecimento acelerado.

Fotografia 48 - Pontos da análise química por EDS do traço T30, submetido ao tratamento de EA



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 39 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T30, submetido ao tratamento de envelhecimento acelerado.

Tabela 39 - Composição química para o T30 submetido ao tratamento de EA, realizada por EDS

Pontos	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
1a	14,68	50,23	-	0,56	1,89	15,31	1,21	-	-	15,17	0,95
2a	10,43	42,80	-	-	-	43,99	-	-	-	2,78	-
a	-	36,13	-	1,03	3,44	10,22	2,39	--	-	41,61	5,16
4a	-	66,34	-	1,95	3,18	10,22	-	-	0,21	16,77	1,33
5a	9,74	53,59	-	2,38	2,52	7,62	-	-	-	23,04	1,11
1b	-	59,23	-	0,46	2,91	7,74	3,21	-	-	25,46	0,98
2b	-	61,65	-	2,07	3,10	7,58	1,89	-	-	22,13	1,42
3b	-	65,49	-	1,61	2,36	8,74	1,30	-	0,24	19,22	1,04
4b	-	63,35	0,53	2,59	3,23	11,99	-	-	0,44	12,05	5,67
5b	6,30	43,40	-	0,63	5,05	12,11	-	0,16	2,34	25,45	4,28
Máximo	14,68	66,34	0,53	2,38	5,05	43,99	3,21	-	2,36	41,61	5,67
Mínimo	6,30	43,00	0,53	0,56	2,36	7,62	1,03	0,16	0,21	2,78	0,68

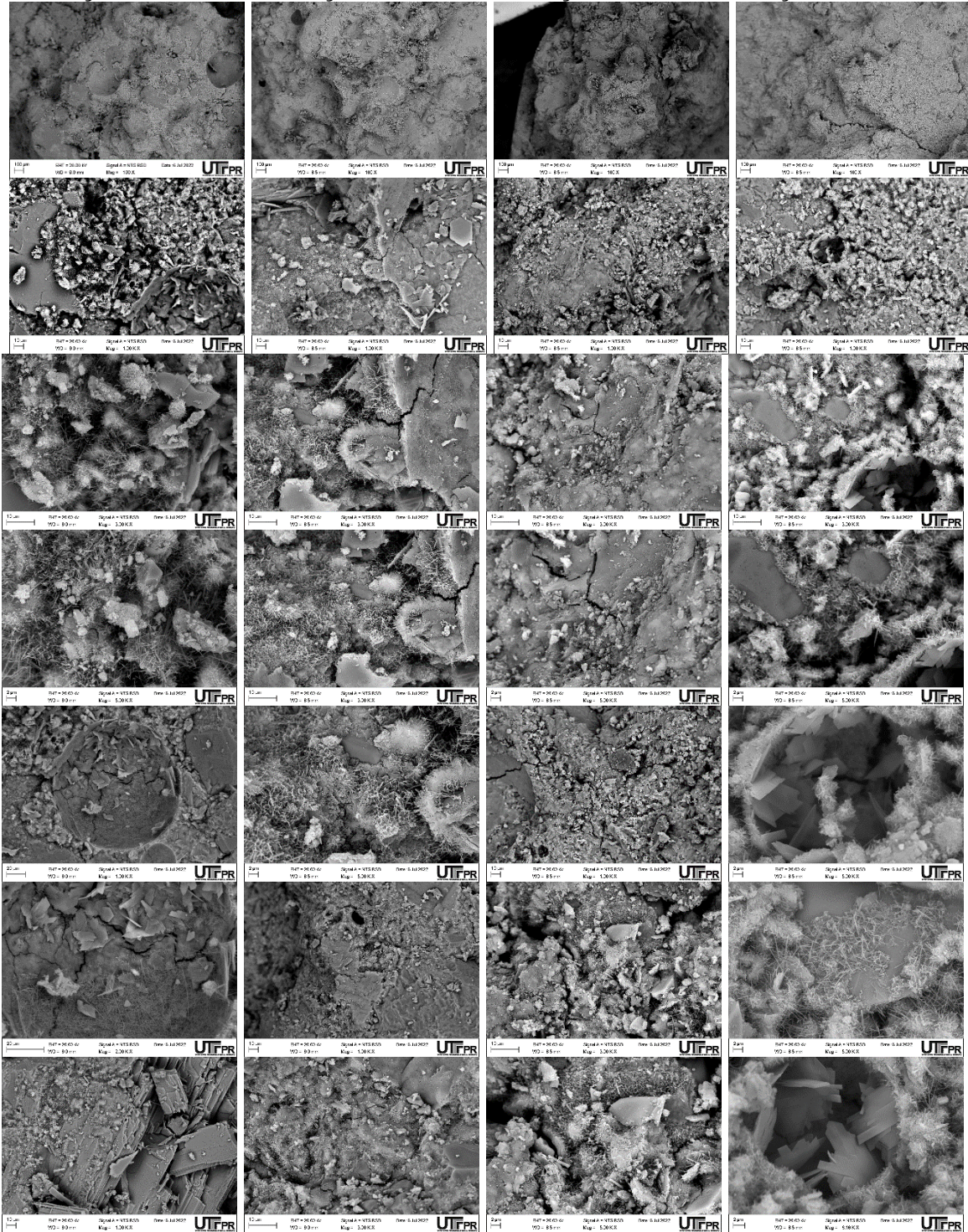
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 39 pode-se observar novamente a concentração de carbono com 14,68% no ponto 1a, 10,43% no ponto 2a, 9,74% e 6,30% nos pontos 5a e 5b, onde registra-se a ocorrência do cloro novamente. O alumínio, a sílica, o magnésio e o cálcio estão presentes em todos os pontos analisados. A característica do tratamento de envelhecimento acelerado foi onde aconteceu a ocorrência do carbono em maiores concentrações.

4.2.7.4 Análise de MEV e EDS para os traços submetidos ao ensaio de ataque interno por sulfatos - AIS

Na fotografia 49 está demonstrada a análise realizada pelo MEV para os traços submetidos ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Fotografia 49 - Imagens dos traços TR, T10, T20, T30 realizadas pelo MEV para o ensaio de AIS

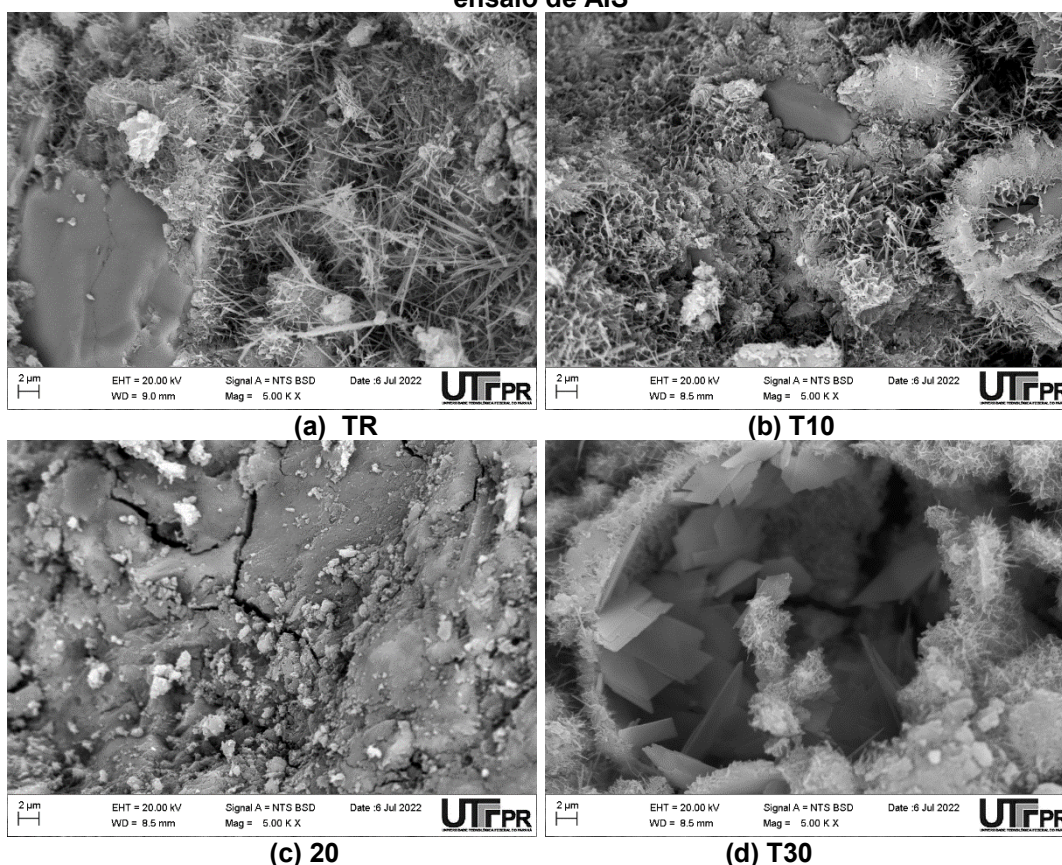


Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na fotografia 49 estão apresentadas as imagens do MEV para os quatro traços submetidos ao ensaio de ataque interno por sulfatos, em sequência de ampliação. Pode-se observar fissuras na microestrutura do concreto dos quatro traços, essas microfissuras podem ser atribuídas a expansão do material, embora na análise de volume e massa concluiu-se que estatisticamente não houve alteração de volume e massa das amostras, as imagens do MEV registram a possível ocorrência do ataque de sulfatos internamente nas amostras.

As fotografias 50a, 50b, 50c e 50d do material analisado, estão apresentadas com a mesma ampliação (Mag = 5.00 K X).

Fotografia 50 - Fotografias com ampliação dos traços TR, T10, T20 e T30, submetidas ao ensaio de AIS



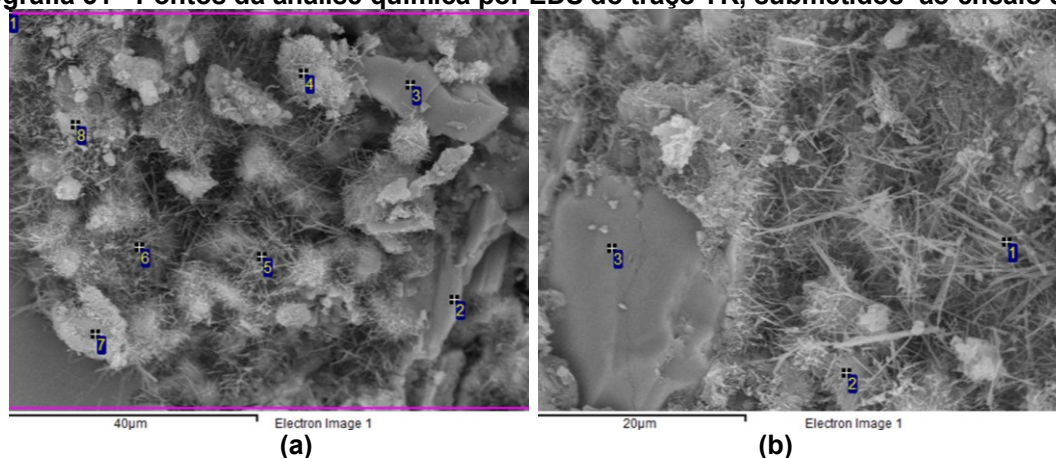
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Observa-se na fotografia 50a que no traço TR submetido ao ataque interno por sulfatos, ocorre a formação de etringita, gel de C-S-H e hidróxido de cálcio. O gel de C-S-H envolve alguns cristais componentes do concreto e a etringita tende a fechar os poros formados na estrutura. Na fotografia 50b a rede de gel de C-S-H se intensifica, porém alguns poros ficam mais visíveis. O traço T20 representado pela fotografia 50c pode-se observar as microfissuras que ocorrem no interior da amostra

de forma não linear, contornando alguns cristais e rompendo outros. Na fotografia 50d, referente ao traço T30, está representado um poro da microestrutura do concreto, envolto pelo gel de C-S-H e sendo preenchido por placas de hidróxido de cálcio. Pode-se atribuir a formação de etringitas a resistência a compressão ser maior após o ataque interno de sulfatos.

Nas fotografias 51a e 51b estão apresentados os pontos da análise química por EDS, do traço TR, submetido ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Fotografia 51 - Pontos da análise química por EDS do traço TR, submetidos ao ensaio de AIS



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 40 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para traço TR, submetido ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Tabela 40 - Composição química para o traço TR submetido ao ensaio de AIS, realizada por EDS

Pontos	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
1a	9,20	54,14	-	1,48	1,84	6,90	1,61	-	--	24,05	-	-	0,77
2a	5,70	56,38	-	0,24	0,58	2,63	-	-	-	34,15	-	-	0,31
3a	11,32	48,61	-	-	0,23	36,73	-	-	-	3,12	-	-	-
4a	11,26	57,71	-	1,83	1,45	7,17	1,09	-	-	19,05	-	-	0,43
5a	9,51	54,29	-	0,36	1,95	6,62	2,00	-	-	24,70	-	-	0,56
6a	-	47,03	-	0,53	2,75	5,91	3,86	-	-	39,22	-	-	0,71
7a	-	61,40	-	0,50	1,68	12,48	-	-	0,00	23,27	-	-	0,67
8a	12,88	57,93	-	1,32	2,21	7,68	1,78	-	-	15,74	-	-	0,47
1b	-	60,93	-	0,73	2,16	11,74	1,19	-	0,16	16,89	4,43	-	1,78
2b	-	59,12	-	0,58	3,22	11,53	1,41	-	-	22,10	0,30	-	1,75
3b	-	54,48	1,00	5,14	4,85	17,13	-	0,25	0,79	5,67	0,40	0,27	10,01
Máximo	12,88	61,40	1,00	5,14	4,85	36,73	3,86	0,25	0,79	39,22	4,43	0,27	10,01
Mínimo	5,70	47,03	1,00	0,24	0,23	2,63	1,09	0,25	0,00	3,12	0,30	0,27	0,31

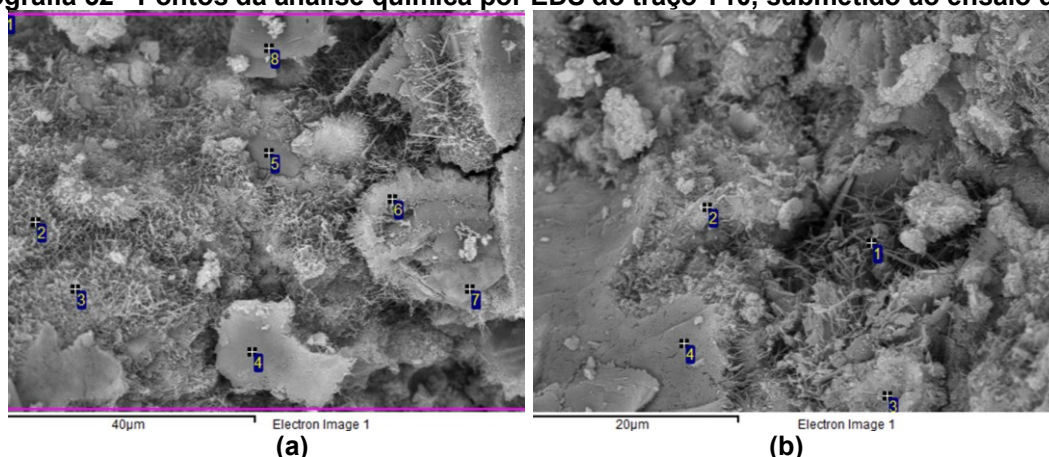
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Observa-se na tabela 40 que o magnésio, a sílica, o alumínio, o cálcio e o ferro são frequentes neste traço. A sílica e o cálcio não mantêm concentrações estáveis, as concentrações não vêm de encontro as registradas pela análise de FRX. O ferro

no ponto 3b apresentou a maior concentração de todas as registradas para esse elemento nas análises de EDS, de 10,01%. O sódio e o cloro aparecem no ponto 3b com respectivamente 1% e 0,25% de concentração. O titânio está presente no ponto 1b com sua maior concentração 4,43%.

Nas fotografias 52a e 52b estão apresentados os pontos da análise química por EDS, do traço T10, submetido ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Fotografia 52 - Pontos da análise química por EDS do traço T10, submetido ao ensaio de AIS



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 41 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T10, submetido ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Tabela 41 - Composição química para o traço T10 submetido ao ensaio de AISS, realizada por EDS

Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
1a		52,78	1,71	2,38	17,81			24,20		1,11
2a	11,40	22,16		0,84	48,59			16,38		0,63
3a	10,72	42,12		1,08	21,22			23,89		0,97
4a		28,33		15,95	29,00		6,30	19,47		0,95
5a	11,95	48,90			37,59			1,55		
6a	11,14	51,06	1,44	2,15	11,05			22,41		0,74
7a	10,06	46,66	1,52	2,32	7,30			22,21	0,36	9,57
8a	10,85	61,60		0,21	25,75			1,60		
1b	6,71	47,21	2,35	4,62	3,20	2,37		31,42		2,11
2b	10,57	53,12	0,34	4,99	6,29			23,90		0,80
3b	10,54	53,02	2,91	4,23	5,19			20,02	0,26	3,82
4b	11,04	55,88	0,40	1,04	7,53			23,70		0,41
Máximo	11,95	61,60	2,9	15,95	48,59	2,37	6,30	31,42	0,36	9,57
Mínimo	6,7	22,16	1,44	0,21	7,30	2,37	6,30	1,55	0,28	0,41

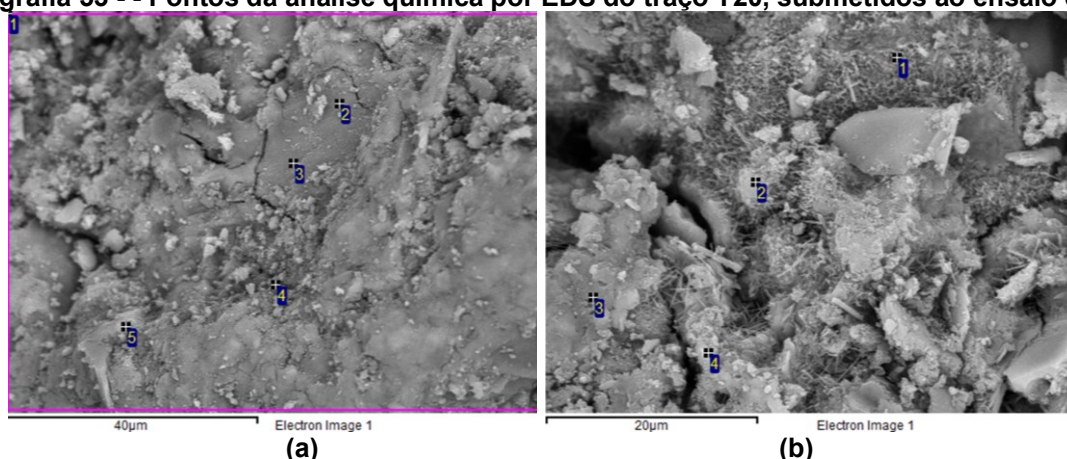
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 41 pode-se observar que o carbono está presente de forma constante em toda amostra analisada com concentrações que variam de 6,7% a 11,9%. O

alumínio e o cálcio também estão presentes em todos os pontos, ao que se pode atribuir a formação da etringita. O potássio apresenta no ponto 4a a sua maior incidência registrada pelo EDS com uma concentração de 6,30%. O ferro tem também no ponto 7a uma alta concentração de 9,57%.

Nas fotografias 53a e 53b estão apresentados os pontos da análise química por EDS do traço T20, submetido ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Fotografia 53 - - Pontos da análise química por EDS do traço T20, submetidos ao ensaio de AIS



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 42 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T20, submetido ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Tabela 42 - Composição química para o traço T20 submetido ao ensaio de AIS, realizada por EDS

Pontos	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
1a	-	62,27	2,96	2,81	9,16	0,30	20,86	-	1,64
2a	-	58,81	1,82	1,60	12,79	0,19	22,46	0,23	2,09
3a	10,12	56,77	1,39	0,88	10,92	-	18,73	-	1,20
4a	8,48	55,68	2,21	2,87	9,53	0,14	20,37	-	0,71
5a	-	56,44	0,46	2,72	12,47	0,30	23,96	-	3,65
1b	16,57	44,03	-	0,34	35,07	-	3,99	-	-
2b	-	64,37	0,61	8,68	15,99	0,78	9,05	-	0,52
3b	-	57,44	0,88	1,41	7,60	0,38	31,64	-	0,66
4b	-	60,05	-	2,02	6,24	0,17	20,16	-	11,3
Máximo	16,75	64,37	2,96	8,68	35,07	0,78	31,64	0,23	3,65
Mínimo	8,48	44,03	0,46	0,34	6,24	0,17	3,99	0,23	0,71

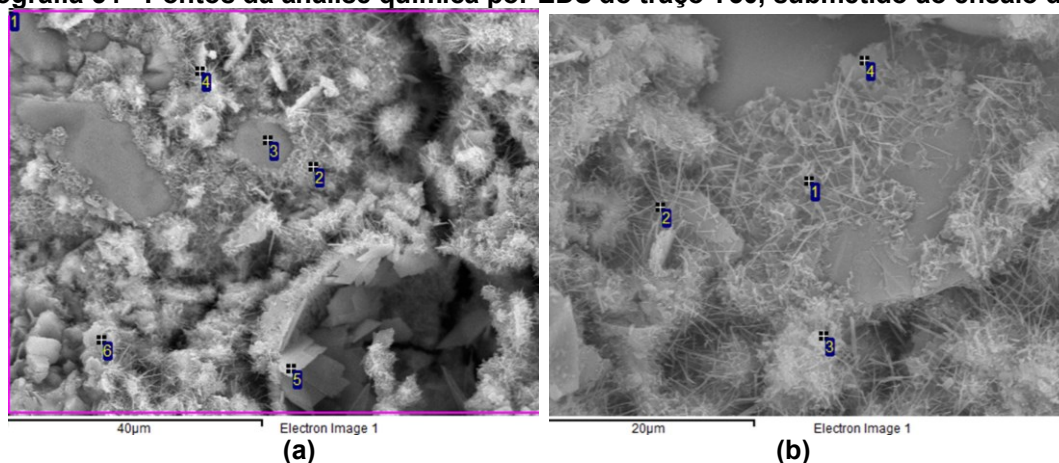
Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 42, em alguns pontos o cálcio apresenta concentrações diferentes as registradas pela análise de FRX para esse elemento. Para a sílica todos os pontos estão inferiores aos registrados pelo FRX. O alumínio tem uma alta concentração no ponto 2b, com 8,83%. O carbono surge em 3 pontos sendo o mais relevante o ponto 1b

com 16,57%. Pode-se observar algumas fissuras na microestrutura do concreto e a ocorrência de alguns poros.

Nas fotografias 54a e 54b estão apresentados os pontos da análise química por EDS do traço T30, submetido ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Fotografia 54 - Pontos da análise química por EDS do traço T30, submetido ao ensaio de AIS



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 43 estão apresentados os resultados obtidos da análise de EDS para o traço T30, submetido ao ensaio de ataque interno por sulfatos.

Tabela 43 - Pontos da análise química por EDS do traço T30, submetido ao ensaio de AIS

Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Cu
1a	8,73	54,79	0,36	2,22	17,55	0,93	0,31	13,89	-	1,23	-
2a	12,27	41,00	-	1,33	30,32	-	0,27	13,52	-	1,29	-
3a	8,77	52,16	-	-	38,61	-	-	0,46	-	-	-
4a	-	70,67	-	3,45	10,46	-	0,12	13,68	-	1,62	-
5a	-	59,69	-	6,33	4,80	-	-	27,52	-	1,66	0,01
6a	-	61,28	0,29	7,58	17,50	-	0,41	11,81	-	0,69	0,43
1b	-	58,55	0,72	9,33	16,23	-	4,32	8,08	0,53	2,24	-
2b	-	60,30	-	5,81	7,19	1,59	0,83	22,80	-	1,49	-
3b	10,81	55,81	0,99	2,67	15,06	-	0,64	12,80	-	0,89	0,32
4b	-	61,04	0,77	9,52	13,49	0,71	3,82	8,13	0,35	2,16	-
Máximo	12,27	70,67	0,99	9,33	38,61	1,59	4,32	27,52	0,53	2,24	0,43
Mínimo	8,73	41,00	0,29	1,33	4,80	0,71	0,64	0,46	0,35	0,69	0,01

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 43 observa-se uma concentração de 9,38% de alumínio no ponto 1b, observando este ponto na fotografia 52b, visualiza-se nitidamente uma rede de etringita formada na microestrutura do concreto, o mesmo acontece nos pontos 4b e 2b. O carbono está presente em concentrações significativas nos pontos 1a, 2a, 3a e 3b, variando de 8,73 %a 12,27%. O ferro apresenta uma concentração constante, porém

não muito significativa. O cobre aparece discretamente com uma concentração de 0,43% no ponto 6a.

Dos três estudos de durabilidade do concreto com o rejeito passivo de carvão mineral, conclui-se que: a câmara de climatização, usada para o envelhecimento acelerado foi o tratamento que apresentou os menores danos e deteriorações ao concreto.

4.2.8 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados referentes as análises de FRX dos traços com cura de 28 dias, 60 dias, 90 dias, 365 dias, traços submetidos a câmara de carbonatação, traços submetidos ao tratamento de envelhecimento acelerado na câmara de climatização e traços submetidos ao ataque interno por sulfatos.

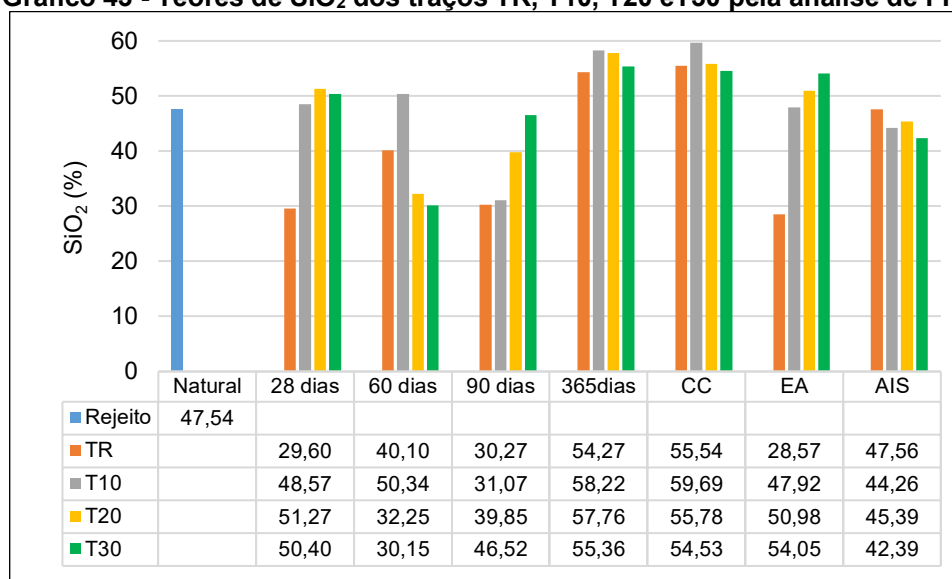
No quadro 7 estão apresentadas as siglas usadas para descrever os tipos de tratamentos aos quais foram submetidos os corpos de prova no decorrer da pesquisa, e orienta para um melhor entendimento dos gráficos de número 43 a 49, que apresentam os teores dos elementos químicos resultantes da análise de FRX dos traços estudados.

Quadro 7 - Siglas para gráficos

Sigla	Tratamento
Natural	Análise do rejeito como coletado
28 dias	Corpos de prova com 28 dias de cura submersa
60 dias	Corpos de prova com 60 dias de cura submersa
90 dias	Corpos de prova com 90 dias de cura submersa
365 dias	Corpos de prova com 365 dias de cura submersa
CC	Câmara de carbonatação
EA	Envelhecimento acelerado-Câmara de climatização
AIS	Ataque interno por sulfatos

Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico 43 estão apresentadas as variações do óxido de silício ou sílica (SiO_2), da análise por FRX, para os traços TR, T10, T20 e T30, submetidos as diferentes curas e diferentes tratamentos.

Gráfico 43 - Teores de SiO₂ dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX

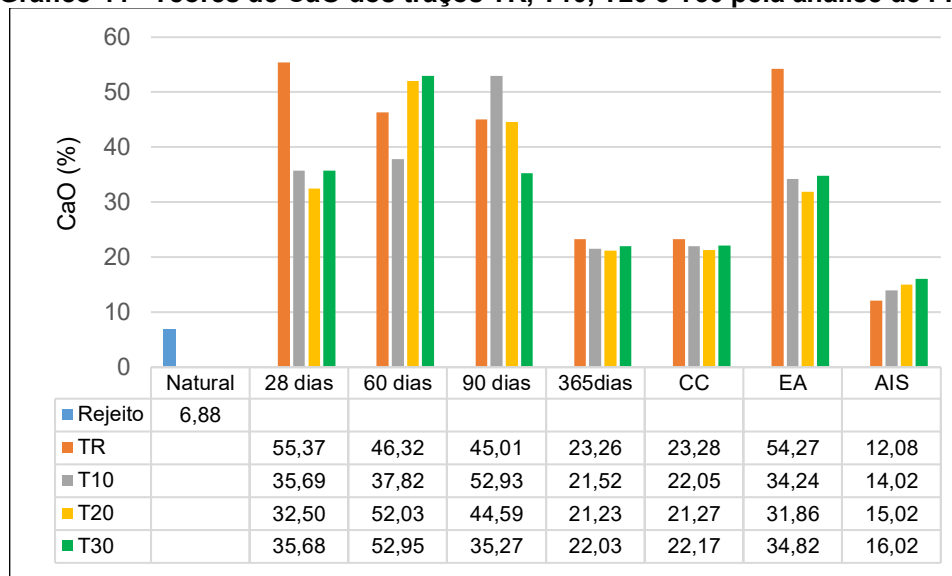
Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 43 que os teores de sílica nos concretos variam entre os diferentes tempos de cura ou tratamento aos quais foram submetidos. Os maiores valores de 58,22% e 59,89% estão no traço T10 com cura de 365 dias, e no traço T10 com tratamento na câmara de carbonatação. O traço com cura de 90 dias e o traço submetido ao envelhecimento acelerado apresentaram uma sequência de crescimento no teor de sílica, o traço com cura de 90 dias aumenta 53,78% do TR para o T30. No envelhecimento acelerado acontece um aumento de 89,18% do TR para o T30. O crescimento do teor de sílica para o envelhecimento acelerado foi maior 65,82% do que a cura de 90 dias. Porém observa-se que os níveis do teor de sílica das amostras com cura de 365 dias e do tratamento da câmara de carbonatação ficaram semelhantes aos do traço T30 com o tratamento de envelhecimento acelerado. Conclui-se que com um envelhecimento natural sem agentes agressivos, os teores de sílica do concreto com 30% de rejeito passivo de carvão mineral podem atingir os mesmos níveis do concreto convencional com tratamentos específicos, ou maiores que o concreto convencional sem tratamento. No entanto se os agentes agressivos forem favorecidos, o teor de sílica pode sofrer uma redução como pode-se observar nos resultados obtidos com o ensaio de ataque interno por sulfatos, onde constata-se uma redução de 12,19% do traço TR para o traço T30. Portanto como já foi relatado na fase 1 da pesquisa a importância de manter altos teores de sílica no concreto, pois em conjunto com o hidróxido de cálcio ela é responsável por parte da

resistência do concreto, sendo assim é importante evitar que inicie o ataque interno de sulfatos.

No gráfico 44 estão apresentadas as variações do óxido de cálcio (CaO), da análise por FRX, para os traços TR, T10, T20 e T30, submetidos as diferentes curas e diferentes tratamentos.

Gráfico 44 - Teores de CaO dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX



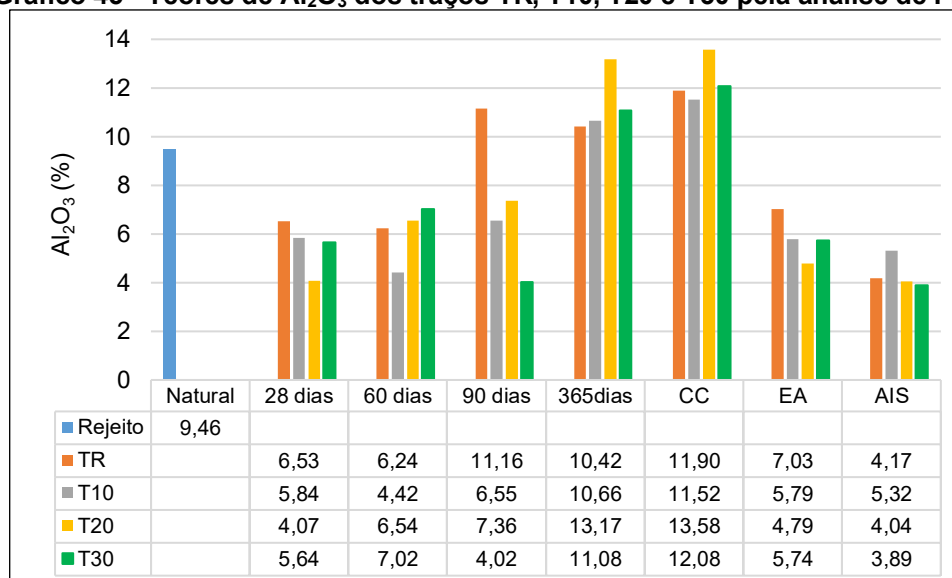
Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 44, que para o maior tempo de cura das amostras 365 dias, ocorreu a maior redução de óxido de cálcio, isso se repetiu para as amostras no tratamento na câmara de carbonatação, e no ensaio de ataque interno por sulfatos. O consumo do óxido de cálcio com o passar do tempo nas reações internas do concreto ocorre pelo óxido férrico e pelo trióxido de enxofre, que como pode-se observar nos gráficos 46 e 47, com exceção das amostras do ensaio de ataque interno por sulfatos, ocorre no óxido de cálcio uma grande redução do seu teor no rejeito passivo de carvão mineral, em relação ao teor resultante nos traços do concreto. Observa-se ainda que os níveis de óxido de cálcio são iguais para os quatro traços independente da porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral. Para a cura de 365 dias e para a câmara de carbonatação a diferença de 2% do maior para o menor teor encontrado entre os traços. Para o ataque interno por sulfatos o teor de óxido de cálcio aumenta 3,94% do traço TR para o traço T30, mostrando que nesse tratamento acontece um menor consumo de óxido de cálcio com o aumento do rejeito, favorecendo assim a resistência do concreto. No envelhecimento acelerado que simula um envelhecimento

natural, os níveis de óxido de cálcio se mantêm os mesmos que os níveis de cura de 365 dias, câmara de carbonatação e ataque interno por sulfatos, com o traço TR aumentando ao mesmo patamar que o traço TR aos 28 dias de cura, e o traço T30 acompanha os níveis do T30 aos 60 dias e 28 dias de cura. Conclui-se que o envelhecimento natural do concreto, com rejeito passivo de carvão mineral, sem ataque de agentes agressivos, pode atingir resistências a compressão maiores devido ao maior teor de óxido de cálcio.

No gráfico 45 estão apresentadas as variações do óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3), da análise por FRX, para os traços TR, T10, T20 e T30, submetidos as diferentes curas e diferentes tratamentos.

Gráfico 45 - Teores de Al_2O_3 dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX



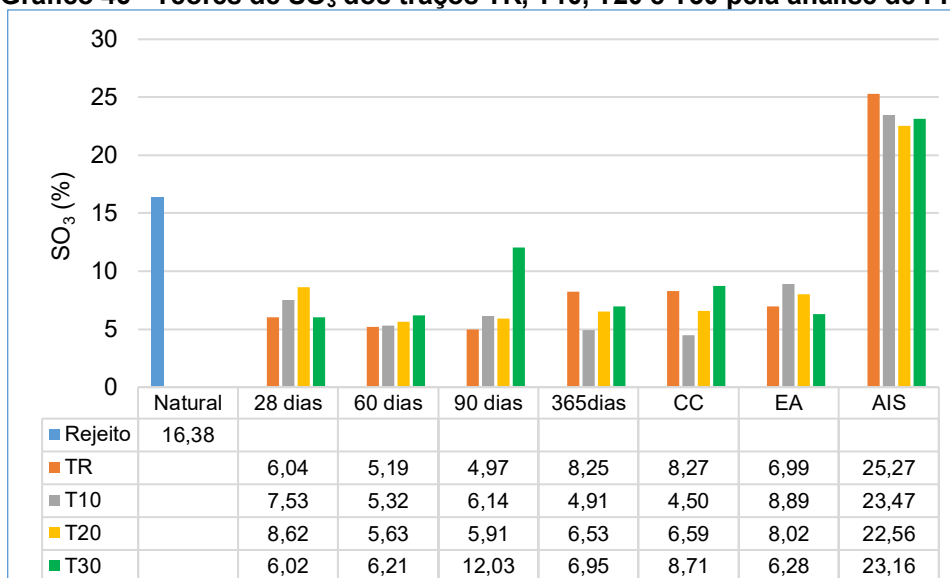
Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 45 que os teores de óxido de alumínio são maiores para as amostras com cura de 365 dias e as da câmara de carbonatação, superando o teor do rejeito natural em todos os traços desses dois tratamentos. O traço com 365 dias foi submetido a cura submersa, o que vem de encontro a afirmação de Melo *et al.* (2010), o processo de formação da etringita secundária pode se iniciar em poucos dias em pastas estocadas em água. Inicialmente, são formados pequenos cristais dispersos no gel C-S-H e mais tarde, a etringita se recristaliza em alguma pequena cavidade existente. As amostras submetidas a câmara de carbonatação ficaram por 180 dias em umidade relativa de 90%. Na análise do MEV pode-se observar a etringita formada nas amostras carbonatadas. O tratamento de ataque interno de sulfatos

resultou no menor teor de óxido de alumínio, isso é atribuído aos altos níveis de óxido de enxofre resultantes nas amostras em função do tempo em que foram acondicionadas para provocar este ataque. Os traços com cura de 28 e 60 dias e envelhecimento acelerado tiveram seus teores de óxido de alumínio reduzidos em relação ao rejeito de 9,48% para em média 5,5%. Em nenhum dos tratamentos aconteceu um aumento ou redução uniforme para os traços em função do acréscimo do rejeito passivo do carvão mineral.

No gráfico 46 estão apresentadas as variações do óxido de enxofre (SO_3), da análise por FRX, para os traços TR, T10, T20 e T30, submetidos as diferentes curas e diferentes tratamentos.

Gráfico 46 - Teores de SO_3 dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX



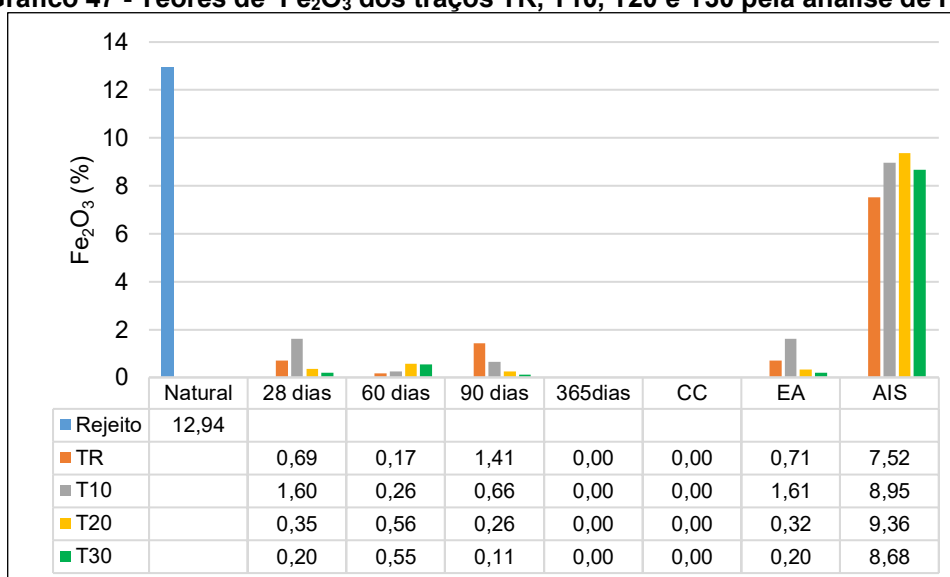
Fonte: Autoria própria (2022)

Nos resultados apresentados no gráfico 46 observa-se que a redução do óxido de enxofre, só não ocorreu para as amostras submetidas ao ensaio de ataque interno por sulfatos. A redução não foi uniforme, mais a menor redução ocorreu no traço T30, com 90 dias de cura com uma redução de 16,42%, e a maior redução ocorreu no traço T10 submetido ao tratamento na câmara de carbonatação, com uma redução de 73,20%. Os teores para os quais foram reduzidos os índices de enxofre resultou no ensaio de solubilização com níveis permitidos por norma para água potável. Os resultados apresentados no gráfico 46 para o ensaio de ataque interno por sulfatos, mostra teores de óxido de enxofre maiores que os encontrados no rejeito passivo de carvão mineral. O traço que apresentou o maior aumento foi o TR que não tem rejeito,

este ficou 54,27% maior que o teor de óxido de enxofre encontrado no rejeito. O traço T20 foi o que apresentou o menor aumento com 37,73% de aumento. Conclui-se que os corpos de prova submetidos ao ensaio de ataque interno por sulfatos sofreram este ataque, e que o rejeito passivo de carvão mineral não provoca um aumento de sulfatos no concreto composto com rejeito, maior que no concreto convencional quando atacado por sulfatos.

No gráfico 47 estão apresentadas as variações do óxido de ferro III (Fe_2O_3), da análise por FRX, para os traços TR, T10, T20 e T30, submetidos as diferentes curas e diferentes tratamentos.

Gráfico 47 - Teores de Fe_2O_3 dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX



Fonte: Autoria própria (2022)

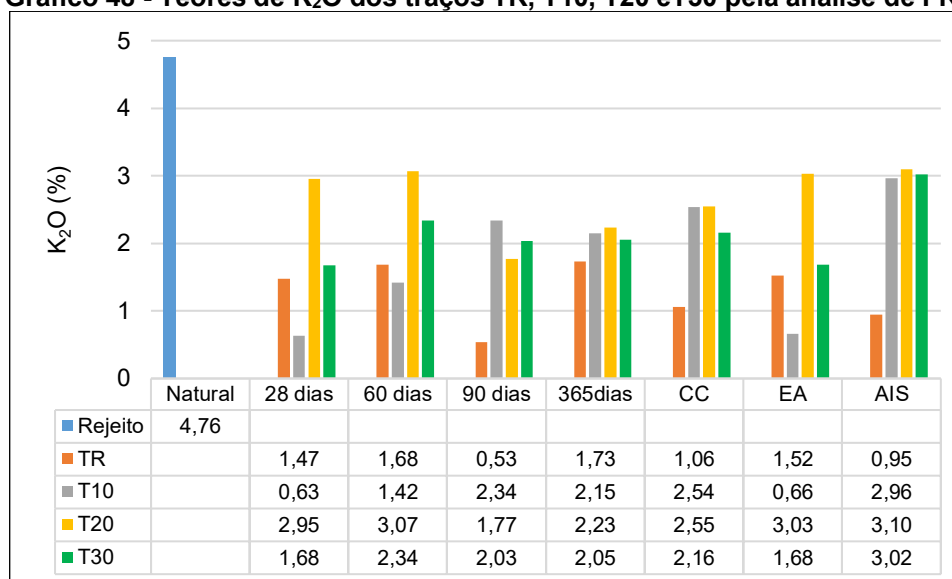
Os teores de óxido férrico após as curas submersas e os tratamentos propostos foram reduzidos a índices menores que 2%, com exceção das amostras submetidas ao ensaio de ataque interno por sulfatos. Nas amostras que passaram pela cura de 365 dias, e as submetidas a câmara de carbonatação, a análise de FRX não detectou nenhum indício de óxido férrico nas amostras. O teor de ferro, apesar de identificado como Fe_2O_3 , está também intimamente ligado ao conteúdo pirético do material. Sendo a pirita uma substância formada também por ferro, espera-se maiores teores do metal em um rejeito que apresente elevado teor de enxofre, como observado, ROCONI *et al.* (2017).

Considerando o teor de enxofre do rejeito passivo de carvão mineral estudado (16,38%), seria admissível que o teor de óxido férrico das amostras apresentadas

tivesse valores aproximados aos valores do rejeito. Isso se verifica nos traços submetidos ao ataque interno por sulfatos. O traço que apresenta o maior teor de óxido férrico é o traço T20 com 71,65% do teor do rejeito natural. O traço que apresenta o menor teor é o traço TR com 61% do teor do rejeito natural.

No gráfico 48 estão apresentadas as variações do óxido de potássio (K_2O), da análise por FRX, para os traços TR, T10, T20 e T30, submetidos as diferentes curas e diferentes tratamentos.

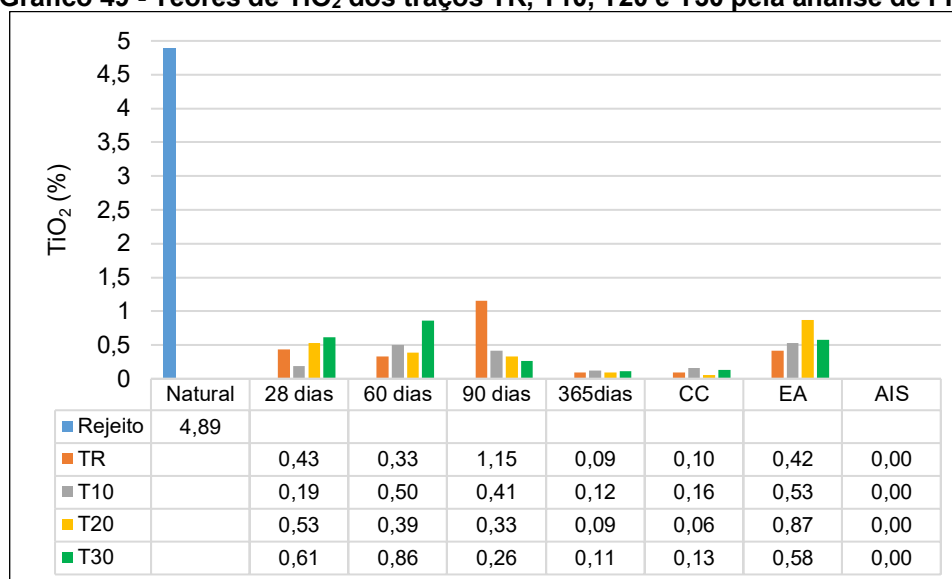
Gráfico 48 - Teores de K_2O dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 48 que o teor do óxido de potássio é reduzido para todas as curas, como também para os tratamentos propostos. Considerando a alta alcalinidade do óxido de potássio, e seu alto poder corrosivo quando em contato com a água, pois forma o hidróxido de potássio, a sua redução é benéfica para o concreto. A menor redução ocorreu no traço T20 das amostras submetidas ao ataque interno por sulfatos, com uma redução de 34,9%. E a maior redução ocorreu no traço T10 da cura de 28 dias com uma redução de 86,5%. Os traços T20 das curas de 28 e 60 dias e da câmara de carbonatação, mantiveram o mesmo teor de óxido de potássio que os traços T10, T20 e T30 submetidos ao ataque interno por sulfatos.

No gráfico 49 estão apresentadas as variações do óxido de titânio (TiO_2), da análise por FRX, para os traços TR, T10, T20 e T30, submetidos as diferentes curas e diferentes tratamentos.

Gráfico 49 - Teores de TiO₂ dos traços TR, T10, T20 e T30 pela análise de FRX

Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 49 que os teores de dióxido de titânio foram reduzidos para todas as curas e tratamentos propostos na pesquisa, em relação ao teor encontrado no rejeito passivo de carvão mineral. Nas amostras submetidas ao ataque interno por sulfatos a análise de DRX não detectou teores de dióxido de titânio. Esse composto é conhecido como autolimpante e vem sendo usado na construção civil com este objetivo sem prejuízo a microestrutura do concreto.

4.2.9 Definição da porcentagem de rejeito passivo de carvão mineral para os blocos

Após análise criteriosa dos resultados obtidos na segunda fase da pesquisa, considerando resistência, absorção, testes de durabilidade, critérios das normas brasileiras exigidos para a confecção de blocos de concreto. Análise química de FRX, em relação ao comportamento do rejeito passivo de carvão mineral em cada traço proposto, e aos tratamentos realizados, concluiu-se que o teor de substituição de cimento por rejeito passivo de carvão mineral no traço dos blocos pode ser de 30%.

Os resultados da fase 3 da pesquisa que diz respeito a confecção e testes dos blocos foi embasada em dois traços o TR (traço de referência) e o T30 (traço com 30% de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento no concreto).

4.3 Resultados da fase 3 - Blocos de concreto

Neste item serão descritos e discutidos os resultados obtidos na análise dos blocos de concreto. Para o estudo dos blocos foi utilizado um traço de referência e um

traço com 30% de rejeito passivo de carvão mineral substituindo parte do cimento no traço do concreto. Conforme definido na metodologia o traço utilizado na confecção dos blocos foi de 1:3:3 (cimento; areia; pedrisco) e uma relação água/aglomerante de 0,5.

Todos os materiais utilizados nesta fase da pesquisa já foram devidamente caracterizados e seus resultados estão descritos no item de resultados da fase 1 da pesquisa.

4.3.1 Caracterização do concreto fresco executado no traço dos blocos

4.3.1.1 Massa específica do concreto fresco

Na tabela 44 estão descritos os resultados dos índices físicos do concreto fresco com o traço específico para os blocos. Esses índices foram calculados tendo como referência os resultados obtidos no ensaio de massa específica do concreto fresco.

Tabela 44 - Índices físicos do concreto fresco com os traços dos blocos

Índices	Traços		Unidade
	TR	T30	
Massa (m)	1967,00	1965,60	(kg)
Massa específica aparente (ρ_{ap})	2652,63	2610,38	(kg/m ³)
Rendimento (R)	0,0065	0,006	(m ³)
Consumo de cimento (C)	247,58	348,05	(kg/m ³)
Consumo de RPCM (C _r)	106,11	-	(kg/m ³)
Consumo de aglomerante (C _a)	353,69	348,05	(kg/m ³)
Volume de concreto V _c)	0,006776	0,00674	m ³
Índice de ar (I _a)	0,96	0,98	
Teor de ar (A)	4,21	2,08	(%)

Onde: RPCM=Rejeito passivo de carvão mineral

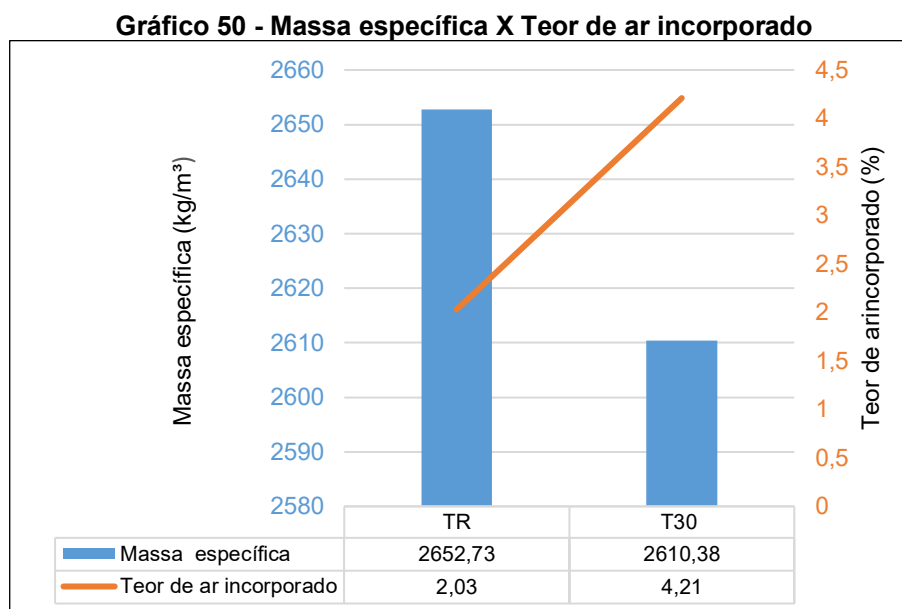
Fonte: Autoria própria (2022)

Na tabela 44 pode-se observar que a massa específica do traço de referência TR é maior que a do traço T30 com rejeito passivo de carvão mineral. Como já foi discutido na fase 2 da pesquisa, a massa específica do traço com carvão mineral é menor, pois a massa específica do carvão é menor que a do cimento, retirando parte de cimento e substituindo por carvão, reduz a massa específica do concreto.

A massa específica dos traços do concreto aumenta em relação aos traços estudados na fase 2 cuja variação era de 2326,9 kg/m³ para o TR, e 2157,3 kg/m³ para o T30. Para os traços dos blocos a massa específica variou de 2652,63 kg/m³ para o traço TR a 2610,338kg/m³ para o traço T30.

O aumento da massa específica dos traços dos blocos em relação a massa específica da fase 2 atribui-se ao aumento do agregado graúdo no traço do concreto.

No gráfico 50 está apresentado a massa específica em relação ao teor de ar incorporado do concreto fresco executado com o traço dos blocos.



Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se no gráfico 50 que conforme a massa específica diminui o teor de ar incorporado aumenta. Esse aumento no teor de ar incorporado do traço T30 vai proporcionar ao mesmo uma maior plasticidade e trabalhabilidade. O aumento da massa específica do TR em relação ao T30 é de 1,62%. E a redução do teor de ar incorporado é de 51,71%.

4.3.1.2 Consistência do concreto fresco

Conforme já discutido na fase 2 da pesquisa, a consistência do concreto fresco foi determinada pelo método de VeBe. O resultado está apresentado na tabela 45, com um resumo da classificação dos concretos frescos conforme a sua consistência segundo a determinação das normas: americana ACI 211-3R-02 (2009) e da europeia EN 12350-3 (2019). Na tabela 45 também está apresentado o índice de trabalhabilidade IT), dos traços TR e T30, definidos para os blocos.

Tabela 45 - Índice de consistência e índice de trabalhabilidade do concreto fresco

Traços	Slamp Test (mm)	Tempo VeBe (s)	ACI 211-3R-02	EN 12350-3	IT (s)
TR	0	56,66	Extremamente seco	V ₀	46,62
T30	0	43,84	Extremamente seco	V ₀	25,25

Fonte: Aatoria própria (2022)

Na tabela 45 pode-se observar que o índice de consistência do concreto se enquadra na classificação extremamente seco segundo a ACI 211-3R-02, o que atende as exigências para a moldagem de blocos, que não permanecem em fôrmas e são desmoldados imediatamente após o término do processo de moldagem, exigindo para isso um concreto seco.

O traço TR sem rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento apresenta maior tempo VeBe. Isso significa uma consistência menor, menos plasticidade, o que é corroborado pelo índice de trabalhabilidade maior que o T30, indicando um tempo maior para que o concreto chegue à forma desejada. Portanto o traço T30 com um menor índice de trabalhabilidade, apresenta uma plasticidade maior, com mais facilidade de moldagem.

4.3.2 Caracterização física e mecânica dos blocos de concreto

Os blocos foram caracterizados conforme orienta a norma NBR 12118 (2014). Foram realizados os ensaios de absorção e área líquida, resistência a compressão, que serão apresentados e discutidos a seguir.

4.3.2.1 Absorção e área líquida

Na tabela 46 estão descritos os resultados das áreas líquidas dos blocos com os limites permitidos por norma.

Tabela 46 - Áreas dos blocos

Blocos	ÁB (mm ²)	NBR 6136 (2016) ÁAL ≤ 75% AB	ÁL (mm ²)	Parâmetro normativo
BR-1	56.353,62	42.265,21	31.066,30	Atende
BR-2	56.396,32	42.297,24	29.476,22	Atende
BR-3	56.363,20	42.272,24	30.132,30	Atende
B30-1	56.382,50	42.286,88	29.218,69	Atende
B30-2	55.747,47	41.810,60	28.411,75	Atende
B30-3	56.377,56	42.283,17	28.787,30	Atende

Onde AB Área bruta
 AL Área líquida
 BR Bloco de referência
 B30 Bloco com 30% de rejeito passivo de carvão mineral

Fonte: Aatoria própria (2022)

Para a realização dos ensaios de absorção e área líquida a norma determina que independentemente do tamanho do lote sejam ensaiados três blocos por lote. Na tabela 46 estão descritas as áreas líquidas e brutas dos blocos ensaiados. A NBR 6136 (2016) determina que a área líquida de cada bloco não ultrapasse 75% da área bruta do bloco, e como pode-se observar na tabela 46, todos os blocos atendem a essa condição.

Na tabela 47 estão descritos as absorções determinadas segundo a NBR 12118 (2014) e os limites permitidos segundo a NBR 6136 (2016).

Tabela 47 - Absorção dos blocos

Blocos	Absorção (%)		Limites	Função
	Individual	Média		
BR-1	7,14			
BR-2	7,17	6,99		
BR-3	6,65			
B30-1	7,64			
B30-2	7,66	7,90		
B30-3	8,29			
Classe A	≤ 9	≤ 8		Estrutural
Classe B	≤ 10	≤ 9	NBR 6136 (2016)	Estrutural
Classe C	≤ 11	≤ 10		Com ou sem função estrutural

Fonte: Autoria própria (2022)

Na tabela 47 pode-se observar que todos os limites máximos de absorção de água exigidos por norma foram obedecidos, tanto para os BR (blocos de referência, como para os B30 (blocos com 30% de rejeito passivo de carvão mineral). Observa-se ainda que os blocos B30 tiveram uma absorção em média 13,10% maior que os blocos BR. Segundo os requisitos da NBR 6136 (2016) os dois traços podem ser classificados como blocos para “Função Estrutural Classe A”.

Na análise estatística das absorções com o teste de Tukey ficou determinado um $P_{\text{valor}}=0,02 < 0,05$, indicando a diferença entre as amostras e que a substituição de parte do cimento por rejeito passivo de carvão mineral influencia na absorção dos blocos.

4.3.2.2 Resistência a compressão dos blocos

O ensaio de resistência a compressão foi realizado seguindo os parâmetros da NBR 12118 (2014), essa norma orienta que sejam ensaiados sete ou nove blocos para um lote de até cinco mil blocos. No caso específico desta pesquisa, foram moldados cem blocos de cada traço, portanto foram ensaiados a resistência a

compressão nove blocos de cada traço, para a prova e nove para a contra prova como orienta a norma.

Na tabela 48 está descrito os resultados obtidos dos blocos e os limites exigidos por norma para os blocos de concreto.

Tabela 48 - Resistência a compressão dos blocos

Blocos	Resistência a compressão (MPa)	Função
	Média	
BR	5,77	Estrutural-classe B
B30	5,61	Estrutural-classe B
Limites permitido por norma NBR 6136 (2016)		
Classe A	$f_{bk} \geq 8,0$	Estrutural
Classe B	$4,0 \leq f_{bk} < 8,0$	Estrutural
Classe C	$f_{bk} \geq 3,0$	Com ou sem função estrutural

Fonte: Autoria própria (2022)

Observa-se na tabela 48 que a resistência a compressão dos Blocos BR e B30 estão na faixa determinada pela norma NBR 6236 (2016), para blocos com o objetivo “Estrutural Classe B”. Como as determinações da norma para a absorção também permite classificar os blocos com “Estruturais Classe B”, pode-se concluir que os blocos com 30% de rejeito passivo de carvão mineral podem ser usados como blocos estruturais. A norma ainda determina que blocos estruturais classe B podem ser usados em edificações até cinco pavimentos.

A análise estatística do Tukey resultou em um $P_{valor}=0,19 > 0,05$, indicando que a adição do rejeito passivo de carvão mineral nos blocos, não altera significativamente a resistência a compressão dos mesmos.

4.3.3 Índice de porosidade

O índice de porosidade dos blocos está descrito na tabela 49.

Tabela 49 - Índice de porosidade dos blocos

Blocos	Índice de porosidade (%)
BR	4,47
B30	14,03

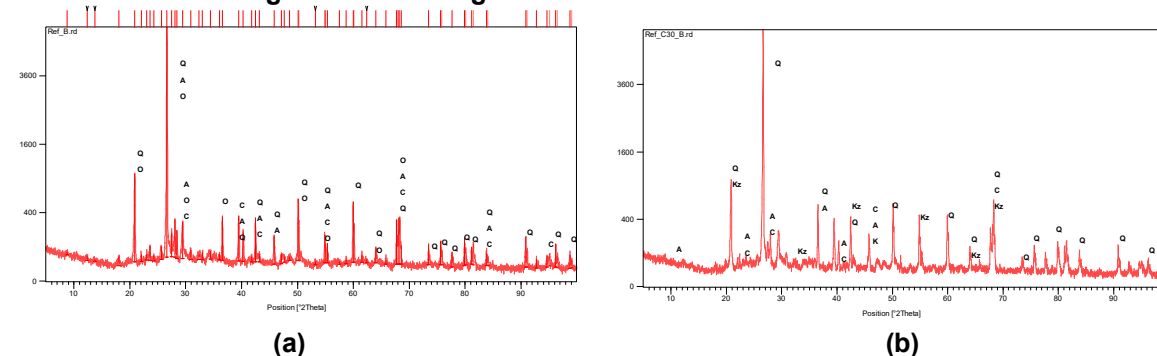
Fonte: Autoria própria (2022)

Na tabela 49 estão descritos os índices de porosidade dos blocos. Observa-se que o bloco B30 tem um índice de porosidade de 213,00% maior que do bloco BR, ao que se pode atribuir a absorção do bloco T30 ser maior que a do bloco TR.

4.3.4 Difractometria de Raios-X (DRX)

Na figura 34 estão apresentados os resultados do DRX dos blocos.

Figura 34 - Difractograma de Raios-X dos blocos BR e B30



Onde:

Q	Quartzo	SiO_2
A	Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
C	Calcita	CaCO_3
O	Ortoclásio	KAlSi_3O_8
Kz	Kuzminite	$\text{Hg}^{2+1}(\text{Br}, \text{Cl})^2$

Fonte: Autoria própria, gráficos gerados com dados dos relatórios CMCM-UTFPR (2022)

Na figura 34 estão representados os difratogramas de raios-X para os dois blocos BR e B30. Na figura 34a onde está representado o DRX do bloco BR observa-se que o quartzo é o mineral com maior incidência em todo o difratograma. Isso acontece também na figura 34b onde está representado o difratograma do bloco B30, que apresenta o maior pico somente de quartzo. Já o DRX do bloco TR tem o principal pico composto pelos minerais quartzo, albita e ortoclásio.

A albita é um mineral da família dos feldspatos e pode estar vinculada ao tipo de agregado utilizado na confecção do concreto. O ortoclásio também é um feldspato, do grupo dos tectossilicatos, ao que se pode atribuir sua presença junto com o quartzo no principal pico do gráfico. A calcita também está presente no DRX do bloco BR, mineral comum nos concretos devido a origem dos cimentos.

Dos elementos presentes no DRX do bloco BR somente o ortoclásio não está presente no DRX do B30, neste está presente o mineral Kuzminite, mineral composto de mercúrio, bromo e cloro, o mesmo aparece em alguns picos, esses minerais podem ter como origem o rejeito utilizado no concreto.

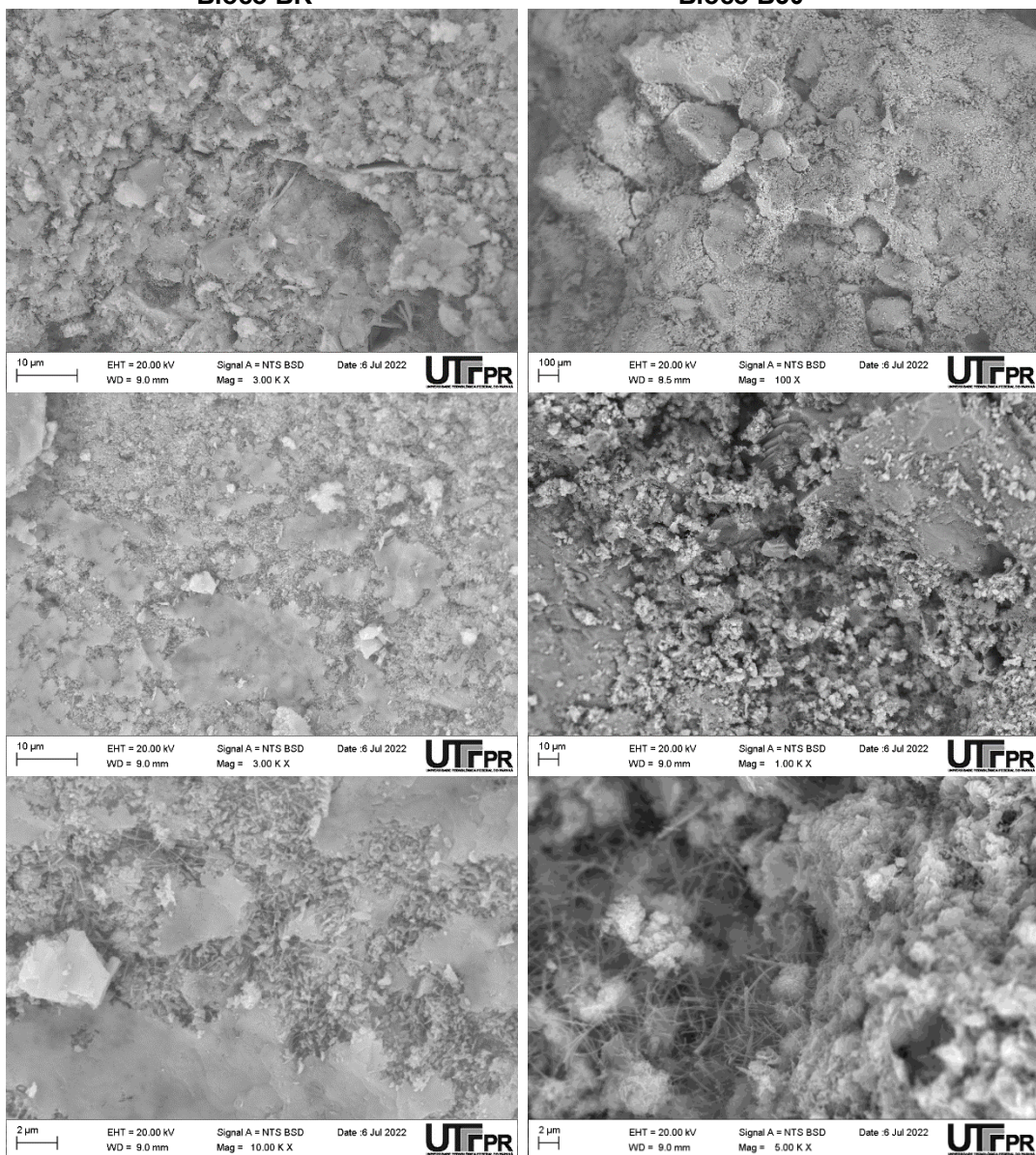
Na análise comparativa dos dois difratogramas observa-se que o quartzo é o mineral predominante nos dois casos. As fases mineralógicas dos dois materiais são semelhantes, porém ocorre uma mudança mineralógica do bloco BR cujo traço não contém rejeito passivo de carvão mineral, para o bloco B30 que o traço contém 30%

de rejeito passivo de carvão mineral substituindo o cimento. Não se observa diferenças marcantes nas alturas e posições dos picos na comparação dos dois DRX.

4.3.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Espectroscopia por dispersão de elétrons (EDS)

As análises de MEV e EDS para os blocos BR e B30 serão apresentadas a seguir.

Fotografia 55 - imagens do MEV para os blocos BR e B30



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

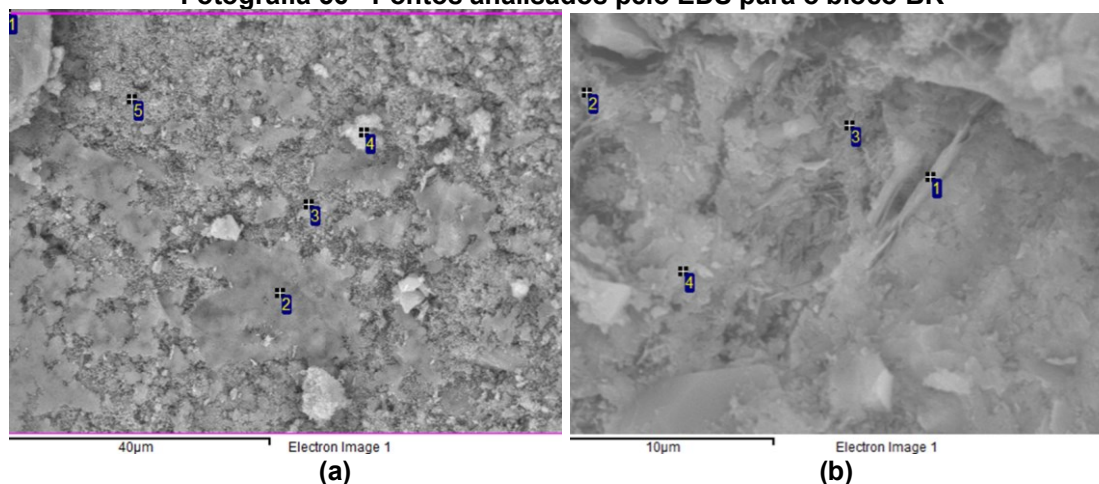
Na fotografia 55, estão apresentadas as imagens em sequência de ampliação, realizadas pelo MEV dos blocos BR (grupo a) e B30(grupo b). Nas imagens do grupo

a referente ao bloco BR pode-se observar a formação de hidróxido de cálcio, com uma rede de gel de C-S-H, observa-se também algumas fissuras no material.

No grupo b referente ao bloco B30 pode-se observar as fissuras, os poros das imagens do bloco B30 estão bem definidos, e a formação da etringita. Pode-se observar a coloração mais escura do concreto em função do rejeito, dando destaque a pequenos cristais brancos, que na análise do EDS foram identificados com um teor de 31,84% de cálcio, porém a forma como estão identificados na imagem não sugere placas e hidróxido de cálcio.

Nas fotografias 556a e 56b estão apresentados os pontos analisados por EDS para o bloco BR.

Fotografia 56 - Pontos analisados pelo EDS para o bloco BR



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 50 estão descritos os elementos químicos analisados pelo EDS do bloco BR para os pontos marcados nas fotografias 56a e 56b.

Tabela 50 - Análise do EDS para o bloco BR

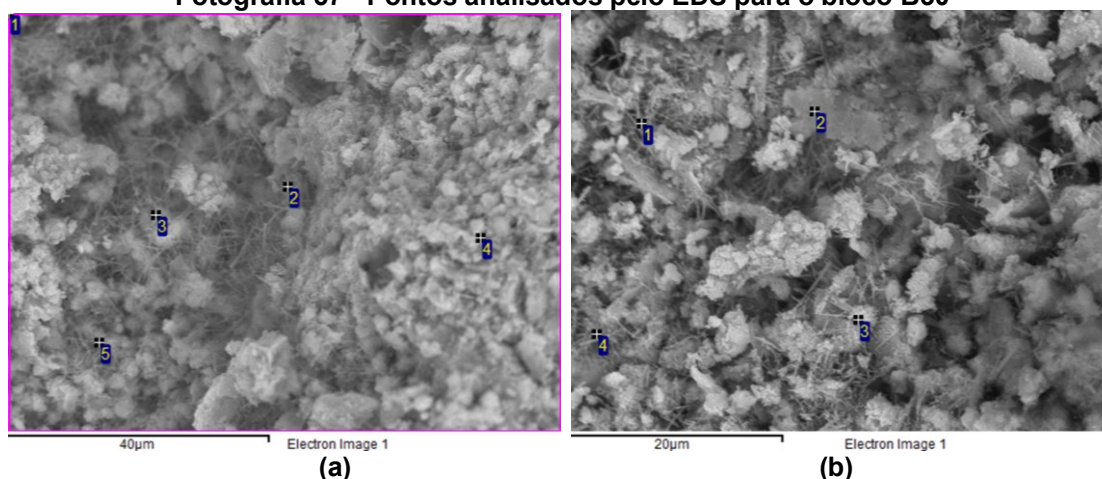
Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Cu
1a		62,73	0,87	2,54	7,92	1,14		0,27	23,35		1,20	
2a	9,66	51,04	0,45	4,50	9,77	0,82	0,18	0,21	22,46		0,92	
3a		62,86	3,04	2,46	6,82			0,20	23,53		0,68	0,41
4a		61,05	1,13	2,56	7,47	1,27		0,56	21,46	0,38	3,66	0,46
5a	17,04	56,71	1,45	0,90	2,27				20,80		0,41	0,42
1b		61,57	1,20	7,46	11,83			0,65	15,81		1,49	
2b		58,16	5,40	1,65	4,19	1,16		0,82	27,50		1,13	
3b	6,61	51,52	1,17	2,67	7,87	1,33		0,50	26,19		1,30	
4b		64,37	1,28	1,62	4,76			0,00	27,26		0,72	
Máximo	17,04	64,37	5,40	7,46	11,83	1,27	0,18	0,56	27,50	0,38	3,66	0,46
Mínimo	9,66	51,04	0,45	0,90	2,27	0,82	0,18	0,20	20,80	0,38	0,41	0,41

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Observa-se na tabela 50, que os elementos magnésio, alumínio, sílica, potássio, cálcio e ferro estão presentes em todos os pontos analisados. O ponto 4b apresenta um teor de cálcio de 21,46%, e o maior teor de ferro 3,63% com a presença de cristais de calcita. O cobre também está presente em três dos pontos analisados. O magnésio apresenta o teor mais elevado no ponto 2b, com um teor de 5,40%, neste ponto ocorre também um teor de enxofre de 1,16% sugerindo a presença de cristais de gipsita.

Nas fotografias 57a e 57b estão apresentados os pontos analisados do EDS para o bloco B30.

Fotografia 57 - Pontos analisados pelo EDS para o bloco B30



Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 51 estão descritos os elementos químicos analisados pelo EDS do bloco BR para os pontos marcados nas fotografias 57a e 57b.

Tabela 51 - Análise do EDS para o bloco B30

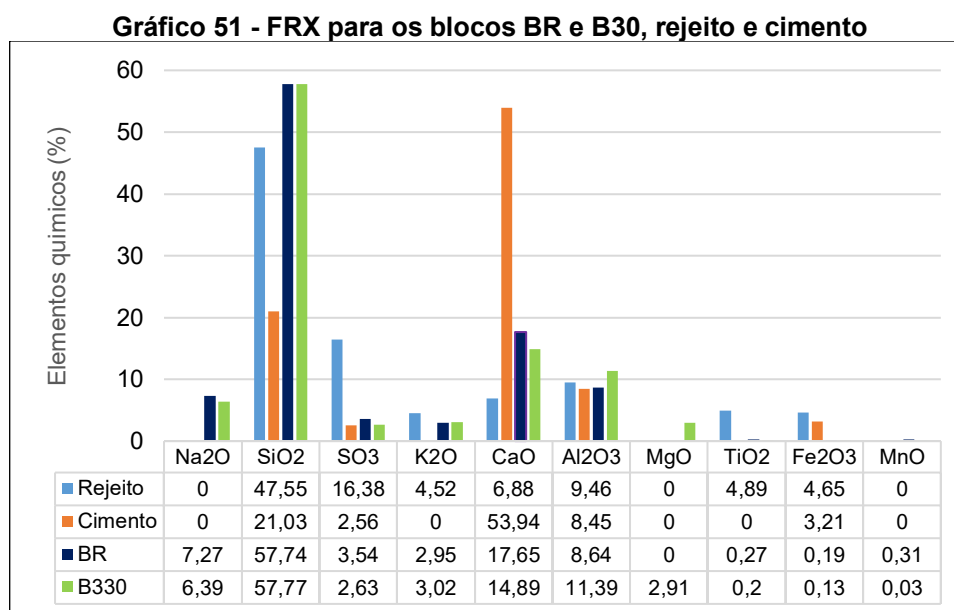
Pontos	C	O	Mg	Al	Si	S	P	K	Ca	Fe
1a		62,62	1,49	2,83	8,08			0,46	22,72	1,80
2a		65,73	1,69	5,22	10,27			0,58	15,50	1,00
3a		55,66	1,02	2,60	6,23			0,51	32,62	1,35
4a		51,24	0,58	2,88	24,01			0,52	19,84	0,93
5a	5,22	47,64	0,93	1,66	4,98		3,78	0,34	34,38	1,06
1b		52,51	2,72	4,21	11,14	1,72		0,44	25,28	1,99
2b		58,93	1,94	1,36	11,83	1,40		0,31	23,24	0,99
3b		61,40	0,72	1,54	3,62			0,24	31,78	0,70
4b		60,57	1,13	4,52	9,48			0,57	21,76	1,98
Máximo	5,22	65,73	2,72	5,22	24,01	1,72	3,78	0,58	34,38	1,99
Mínimo	5,22	47,64	0,58	1,66	4,98	1,40	3,78	0,24	15,50	0,70

Fonte: Adaptado do relatório do MEV realizado no CMCM-UTFPR (2022)

Na tabela 51 está apresentada a análise química de EDS para o bloco B30, cujo traço contém 30% de rejeito passivo de carvão mineral. As diferenças entre o EDS do BR e o EDS do B30 a serem ressaltadas são: o teor de cálcio aumenta para o B30, enquanto reduz a incidência dos teores de enxofre. O cobre o titânio e o cloro não ocorrem no B30. No ponto 3b ocorre uma alta concentração de cálcio o que sugere que os pontos mais brancos da imagem sejam cristais de calcita. No ponto 2a ocorre a mais alta concentração de alumínio, e pode-se observar a formação de etringita, o que pode ser observado também nos pontos 1b e 4b. A essas ocorrências de etringita atribui-se o fato de mesmo com a absorção e porosidade maiores que as do bloco BR o bloco B30 manteve a resistência a compressão igual à do bloco BR.

4.3.6 Fluorescência de Raios-X (FRX)

No gráfico 51 estão apresentados os resultados do FRX para os blocos BR e B30.



Fonte: Autoria própria (2022)

No gráfico 51 estão apresentados os teores dos elementos químicos resultantes da análise de FRX para os blocos BR e B30, comparados aos teores do cimento e do rejeito natural. Pode-se observar que o óxido de sílica aumenta em relação ao do cimento 174,56%, e em relação ao rejeito 21,27%, sendo que o BR e o B30 alcançam o mesmo valor de 83,74%, este aumento favorece os resultados finais de resistência a compressão dos blocos, pois o óxido de sílica é um dos contribuintes da resistência a compressão do concreto.

O trióxido de enxofre que em conjunto com o óxido férrico são o foco principal da pesquisa, pois em contato com o ar e a água formam a DAM-Drenagem Acida de Minas, tem seus teores reduzidos, no caso do óxido férrico, estes teores foram reduzidos a 0,19% para o BR e 0,30% para o B30. Para o trióxido de enxofre em relação ao cimento o BR sobe 3,83%, e o B30 fica igual aos teores do cimento. Em relação ao rejeito natural ocorre uma redução de 78,88%, e para o B30 uma redução de 83,88%, fazendo com que o risco da lixiviação de sulfatos e metais contaminantes da rede hídrica seja reduzida a níveis permitidos por lei.

O óxido de cálcio em relação ao cimento reduz para o BR 67,27% e para o B30 72,24%, pois esse óxido de cálcio foi consumido para a redução do óxido férrico e do trióxido de enxofre, porém ele se manteve em níveis suficientes para junto do óxido de sílica resultar na resistência necessária para blocos de concreto da classe B.

O óxido de alumínio reduz 9,49% do rejeito para o BR, e aumenta 20,41% do rejeito para o B30, ao que se atribui o B30 manter uma resistência estatisticamente igual a do BR pois o óxido de alumínio é um dos responsáveis pela resistência do concreto, contribuindo na formação da etringita, que em quantidades adequadas contribui para esta resistência sem prejudicar o concreto.

5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos na pesquisa conclui-se que:

Dos quatro cimentos testados na primeira fase da pesquisa o que apresentou o melhor desempenho em conjunto com o rejeito passivo de carvão mineral (RPCM), foi o CP II -Z- 32. Na primeira fase da pesquisa obteve-se uma redução de 16,38% para 3,38% no teor de SO_3 , no traço com 10% de rejeito, o que significa uma redução de 84%. E uma redução de 12,94% para 0,36% no teor de Fe_2O_3 , ou seja, 97% de redução no traço com 5% de rejeito. Portanto o CP II – Z – 32 foi o que apresentou o melhor desempenho químico quando manipulado com o rejeito passivo de carvão mineral.

A plasticidade do concreto fresco aumenta com o aumento do rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto. Pois como o rejeito absorve menos água que o cimento parte da água de amassamento fica retida nos poros do concreto, fazendo com que melhore sua plasticidade sem aumentar sua relação a/c.

A substituição de parte do cimento por rejeito passivo de carvão mineral no traço do concreto, resulta em uma queda gradativa da resistência a compressão dos corpos de prova. Esta redução é de em média 35,4% do traço TR para o traço T30 nos corpos de prova com cura de 28 dias, e 50% do traço TR para o traço T30 nos corpos de prova com cura de 365 dias, sendo esta a maior redução, que pode ser atribuída a baixa da densidade do concreto, a porosidade do concreto que aumenta com a substituição do cimento pelo rejeito. A redução de resistência na cura de 365 dias comprova que o rejeito saturado contribui para a queda da resistência a compressão do concreto.

A resistência a compressão do concreto é estatisticamente igual para corpos de prova submetidos e não submetidos ao ensaio de absorção que eleva a temperatura dos mesmos a 100°C na estufa.

O tempo de cura altera o comportamento da absorção, sendo a maior de 6,45% para o traço T20 aos 28 dias de cura, e a menor 1,12%, também para o T20 com 60 dias de cura. Mesmo aumentando a absorção se mantém em uma média de 2,00% aos 90 dias, 4% aos 365 dias. A alta porcentagem de absorção aos 28 dias deve-se ao fato do cimento e do rejeito ainda não estarem completamente hidratados ao retirar os corpos de prova da cura.

A durabilidade do concreto é afetada de forma diferente em função do tipo de tratamento ao qual o mesmo é submetido.

O rejeito passivo de carvão mineral influenciou o processo de carbonatação, os traços com 20% e 30% de rejeito passivo de carvão mineral, foram os mais atingidos pela carbonatação. Devido a configuração da rede capilar desenvolvida nos corpos de prova do traço T20 e T30, não foi possível fazer um levantamento numérico para comparação quantitativa da carbonatação em relação ao traço TR. A conclusão foi feita pela análise visual com a fenolftaleína.

Os corpos de prova da câmara de climatização que foram submetidos ao um envelhecimento acelerado, simulando um envelhecimento natural, foram os que apresentaram menos alterações em suas estruturas após as análises.

O tratamento de envelhecimento acelerado foi o que apresentou as menores alterações no concreto, porém realizando a análise comparativa conclui-se que o rejeito passivo de carvão mineral altera a composição mineralógica do concreto, pois surgem óxidos e sulfatos nos traços compostos pelo mesmo. Pode-se observar também comparando os difratogramas de Raios-X das figuras 18 a 21, que diz respeito aos traços com cura de vinte e oito dias sem nenhum tratamento de durabilidade, com os difratogramas das figuras 26 a 29, que o tratamento de envelhecimento acelerado provocou alterações ao longo do tempo na mineralogia dos concretos.

O ataque interno por sulfatos é comprovado pelos resultados obtidos na análise de FRX, DRX (gráfico 46), e MEV dos corpos de prova submetidos a este ensaio. Porém não foram detectados sinais de deterioração nos corpos de prova tipo, fissuras rachaduras ou manchas que alterassem visualmente as amostras. Neste ensaio a resistência a compressão dos corpos de prova aumenta 31% para o TR, 40% para o T10, 68% para o T20 e 45% para o T30 após o ensaio, em relação aos corpos de prova com o mesmo tempo de cura que não foram submetidos ao ataque interno por sulfatos. Atribui-se esse aumento a formação de etringita, como pode se observar nas análises da micro estrutura do concreto apresentadas nos resultados do MEV e do DRX.

Os índices de metais pesados e sulfatos detectados pelos ensaios de lixiviação e solubilização ficaram dentro dos exigidos por norma e por lei.

Ao término da segunda fase da pesquisa, concluiu-se que é possível utilizar 30% de rejeito passivo de carvão mineral em artefatos de concreto sem risco de contaminação.

Dos estudos realizados com os blocos com 30% de rejeito passivo de carvão mineral, conclui-se que os mesmos estão dentro dos padrões exigidos por norma no que diz respeito a absorção de água (7,90%), e a resistência a compressão (5,51MPa), podendo ser utilizados em alvenaria estrutural de até cinco pavimentos.

Ao término da pesquisa concluiu-se que é possível utilizar o rejeito passivo de carvão mineral (RPCM) substituindo 30% de cimento no traço do concreto sem prejuízo ao meio ambiente, e mantendo a qualidade do produto a ser utilizado nas edificações.

Recomendações de trabalhos futuros

Estudar a viabilidade econômica da retirada e moagem do rejeito para a produção dos blocos de concreto.

Estudar a viabilidade técnica e econômica da montagem de uma linha de produção de blocos de concreto ao lado do depósito de rejeito.

Testar outras porcentagens de rejeito substituindo o cimento no concreto, em blocos para a alvenaria.

Testar outros tipos de peças pré-moldadas como: meio fio, lajota sextavada e *paver*.

Aprofundar os estudos de durabilidade do concreto com o rejeito passivo de carvão mineral

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações gerais habitacionais — Desempenho Parte um.: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4** - Desempenho Parte quatro: Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 16915**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 16973**: Agregado – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 16917**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13858-2**: Telhas de concreto - Parte 2: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006**- Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9791**: Peças para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953** Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953** Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 2015

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201** Guide to Durable Concrete. ACI Committee 211. Detroit – USA, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 211.3R-02**: Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. ACI Committee 211. Detroit, USA, 2009.

ABCM (Associação Brasileira de Carvão Mineral) **Disponível em:** <https://www.carvaomineral.com.br>. Acessado em 17/09/2021.

ALAMINO, RENATA C. J. et al., metodologia integrada para estimar a bioconcentração de metais em oligoquetas na disposição terrestre de rejeitos de carvão. **V CBCM – Congresso Brasileiro do Carvão Mineral**. Criciúma, 2017

ALVES, Atecla Nunciata Lopes; DELLA ROSA, Henrique Vicente. Exposição ocupacional ao cobalto: aspectos toxicológicos. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 39, p. 129-139, 2003.

AMARAL FILHO, Juarez R. do et al. Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 3, p. 347-353, 2013.

AFNOR NF P 541 (**Association Française de Normalisation**) Granulats – Granulats Pour Beton Hydrauliques Specifications 2Eme Tirage. França, 1994.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira et al. Vida útil das estruturas de concreto. **Concreto: Ensino. Pesquisas e Realizações**. Geraldo Isaia (Ed.). **Ibracon, São Paulo**, p. 923-951, 2005.

ASTM C294-05. (American Society for Testing and Materials) for **Constituents of Concrete Aggregates**. 2005.

ASTM C40/C40M. (American Society for Testing and Materials) **Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete**, 2016.

ASTM D4792 (American Society for Testing and Materials) **Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions**. 2019

ATTIA, Yosry A. Processing and Utilization of High-Sulfur Coals V edited by BK Parekh and JG Groppo 467 1993 Elsevier Science Publishers BV. In: **Processing and Utilization of High-Sulfur Coals V: Proceedings of the Fifth International Conference on Processing and Utilization of High-Sulfur Coals, October 25-28, 1993, Lexington, Kentucky, USA**. Elsevier, 2013. p. 467.

BALDUSCO, Rafael; em <https://www.mapadaobra.com.br/negocios/conheca-os-tipos-de-blocos-de> . 2019. Acessado em fevereiro 2022

BELKHEIRIA, D. et al. Recycling of Moroccan coal gangue in the elaboration of a Portland clinker. **Mater. Environ. Sci**, v. 6, n. 6, p. 1570-1577, 2015.

BERTOLINI, Luca et al. **Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair**. John Wiley & Sons, 2013.

BRANCH, J. L. et al. The impact of carbonation on the microstructure and solubility of major constituents in microconcrete materials with varying alkalinities due to fly ash replacement of ordinary Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 297-309, 2016.

BRASIL. 2008. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Processo nº 2000.72.04.002543-9. Autor: Ministério Público Federal. Réu: Nova Próspera Mineração S.A. e outros. Recuperação dos passivos ambientais decorrentes da mineração de carvão no sul do Estado de Santa Catarina. Segundo relatório de monitoramento dos indicadores ambientais. Criciúma, julho: 192 p.

BRASIL, 2021. Diário Oficial da União. **Portaria GM/MSNº 888 de 04 de maio de 2021** que altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Publicado em: 07/05/2021; Edição: 85; Seção: Página: 127. Brasília, DF. <https://brasilsus.com.br/index.php/pdf/portaria-gm-> Acessado em julho de 2021.

BRASIL, 2010. Diário Oficial da União **LEI Nº 12.305, DE 2 DE Agosto de 2010** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BIRICIK, Hasan et al. Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. **Cement and concrete research**, v. 29, n. 5, p. 637-643, 1999.

BRUNETAUD, Xavier; DIVET, Loic; DAMIDOT, Damien. Impact of unrestrained Delayed Ettringite Formation-induced expansion on concrete mechanical properties. **Cement and concrete research**, v. 38, n. 11, p. 1343-1348, 2008.

BRUNETAUD, Xavier; KHELIFA, Mohammed-Rissel; AL-MUKHTAR, Muzahim. Size effect of concrete samples on the kinetics of external sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 370-376, 2012.

CHAVES, Neto J, Meio Ambiente e Mineração. Apostila de Meio Ambiente – Curso Técnico em mineração, **Governo do Estado do Ceará**, 2013 Disponível: http://educacaoprofissional.seduc.ce.gov.br/images/material_didatico/mineracao/mineracao_meio_ambiente_e_mineracao.pdf. Acessado em março de 2023.

CAMPOS, Mari Lucia, et al. Impactos no solo provocados pela mineração e depósito de rejeitos de carvão mineral. **Revista de Ciências Agro veterinárias**, 2010, 9.2: 198-205.

CANEDA-MARTÍNEZ, Laura et al. Reuse of coal mining waste to lengthen the service life of cementitious matrices. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 72-79, 2019.

CANO, TELMA MONREAL. **DNPM**. Disponível em: telma.cano@dnpm.gov.br –. Acessado em 28/05/2021.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado**. Pini, 1988.

CAPRARO, Ana Paula et al. Velocidade de Propagação de Ondas de Ultrassom e Resistividade Elétrica para a Detecção do Ataque por Sulfatos de Origem Interna. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 3, 2017.

CHINCHÓN-PAYÁ, S.; AGUADO, A.; CHINCHÓN, S. A comparative investigation of the degradation of pyrite and pyrrhotite under simulated laboratory conditions. **Engineering Geology**, v. 127, p. 75-80, 2012.

CUTRUNEO, César MNL et al. A mineralogical and geochemical study of three Brazilian coal cleaning rejects: demonstration of electron beam applications. **International Journal of Coal Geology**, v. 130, p. 33-52, 2014.

DA SILVA, ZC Corrêa. Jazidas de Carvão do Rio Grande do Sul. Brasil. **Simpósio Sul brasileiro de geologia**. Curitiba-PR. Brasil, V2, p. 677-687.

DA SILVA, Leandro Souza. INDÚSTRIA BRASILEIRA DO CIMENTO: CONSUMO E IMPACTOS AMBIENTAIS. **CONSTRUINDO**, v. 14, n. 1, 2022.

DE FÁTIMA SOUZA, Eliane et al. OBTENÇÃO DE VATERITA ESTABILIZADA PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DE FÁRMACOS. **Revista Tecnologia e Tendências**, v. 11, n. 1, p. 138-148, 2020.

DE FREITAS, Vasco Peixoto et al. Discussing the durability assessment of cement mortars-A contribution for a prediction model. In: **11th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 11DBMC**. 2008.

DESMETTRE, C.; CHARRON, J.-P. Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 7, p. 945-952, 2012.

DESMETTRE, Clélia; CHARRON, Jean-Philippe. Water Permeability of Reinforced Concrete Subjected to Cyclic Tensile Loading. **ACI Materials Journal**, v. 110, n. 1, 2013.

DYER, Thomas. **Concrete durability**. Crc Press, 2014.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumario Mineral, 2015**, v. 35. Brasília, 2015. Disponível em: www.dnpm.gov.br/dnpm/sumario/sumario-mineral-2015. Acessado em dezembro 2021.

EL-HACHEM, R. et al. New procedure to investigate external sulphate attack on cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 357-364, 2012.

European Standards. **EN 12620**: Aggregates for concrete, 2008

European Standards. EN 12350-3: [Testing fresh concrete Vebe test](#), 2019

EVANGELOU, VP Bill. Pyrite oxidation and its control: solution chemistry, surface chemistry, acid mine drainage (AMD), molecular oxidation mechanisms, microbial role, kinetics, control, ameliorates and limitations, microencapsulation. **CRC press**, 2018.

FAN, Gangwei; ZHANG, Dongsheng; WANG, Xufeng. Reduction and utilization of coal mine waste rock in China: a case study in Tiefu coalfield. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 24-33, 2014.

FERNANDES, Idário. Blocos e Pavos: produção e controle de qualidade. **Ribeirão Preto, SP: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda**, 2008.

FRÍAS, Moisés et al. Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 5, p. 678-683, 2012.

DE OLIVEIRA ROCHA, Cyntia et al. Caracterização de blocos em concreto para alvenaria estrutural do município de muriaé-MG. **Revista Interdisciplinar Pensamento Científico**, v. 3, n. 2, 2017.

GALAN, Isabel; ANDRADE, Carmen; CASTELLOTE, Marta. Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities. **Cement and Concrete Research**, v. 49, p. 21-28, 2013.

GALLI, Ermanno et al. Boggsite and tschernichite-type zeolites from Mt. Adamson, Northern Victoria land (Antarctica). **European Journal of Mineralogy**, p. 1029-1032, 1995.

GOMES, Aramis José Pereira. Carvão do Brasil, turfa agrícola: geologia, meio ambiente e participação estratégica na produção de eletricidade no sul do Brasil. **EST Edições**, 2002.

GOMIDES, Maria de Jesus. Investigação de agregados contendo sulfetos e seus efeitos sobre a durabilidade do concreto. 2009.

HAIBIN, Liu; ZHENLING, Liu. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1331-1340, 2010.

HEIDARI, Gm; SARRAFI A; KAKUEINEJAD, A. Feasibility study of consuming the Zarand coal mine waste in the process of cement production as alternative fuel and raw materials. In: **National Conference on Energy and Environment of Kerman, Shahid Bahonar university of Kerman**, 2010.

HERNÁNDEZ BUITRAGO, Leidy Julieth. **Avaliação microestrutural, cinética e mecânica do comportamento de pelotas auto-redutoras a base de resíduos de aciaria elétrica contendo zinco do processo Waelz**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HOPPE FILHO, J. et al. Concrete attack by sodium sulfate: mineral additions as a mitigation tool. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 168-177, 2015.

HOPPE, Juarez et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017.

IEA – Internacional Energy Agency. **Key Coal Trends**. 2016

IEA – Internacional Energy Agency, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/coal>. Acessado em 12/09/2021

JIANG, Lei; NIU, Ditao. Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 88-98, 2016.

JOSÉ, DAVID SELEMANE. Caracterização tecnológica de carvão ROM da Mina de Moatize-Moçambique para o destoning, visando seu beneficiamento. 2019. Tese (doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**.

KHATAEI, Behnoosh; NASROLLAHI, Meisam. Optimizing the tensile strength of concrete containing coal waste considering the cost. **Sn Applied Sciences**, v. 2, n. 1, p. 1-13, 2020.

- KHELIDJ, A; CHOINSKA, M. Coupling between mechanical damage, temperature, and permeability of concrete: experimental and some numerical studies Proceeding of the 1st International Conference on Performance-Based and **Life-Cycle Structural Engineering, Hong Kong, China** December, 5–7 2012, pp. 906–917.
- KIHARA, Yushiro; CENTURIONE, Sérgio Luiz. O Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: **Editora Ibracon**, 2005. V1. Cap. 10, p. 295-321.
- KONTOPOULOS, A. **Acid mine drainage control**. 1998.
- LAUS, Rogério et al. Microesferas de quitosana reticuladas com tripolifosfato utilizadas para remoção da acidez, ferro (III) e manganês (II) de águas contaminadas pela mineração de carvão. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 34-39, 2006.
- LI, Bei et al. Carbonation process simulation for cement-based materials based on microstructure by a cement hydration model. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 120429, 2020.
- LI, Zongjin. **Advanced concrete technology**. John Wiley & Sons, 2011.
- LIMA, Paulo Roberto Lopes et al. Efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades de microconcreto reforçado com fibras longas de sisal. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 7-20, 2019.
- LOTTERMOSER, Bernd G. Sulfidic mine wastes. In: **Mine wastes**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 43-117.
- MA, Yingqun; LIN, Chuxia. Microbial oxidation of Fe²⁺ and pyrite exposed to flux of micromolar H₂O₂ in acidic media. **Scientific Reports**, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2013.
- MACHADO, Cleice Lins et al. Efeito do dióxido de carbono supercrítico em pastas de cimento contendo catalisador residual de FCC. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.
- MAGALHÃES, F. Concreto e cimento Portland: especificações e ensaios. **Curso Superior de Tecnologia em Construção de Edifícios. Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Sul–IFRS-Campus Rio Grande**, 2009.
- MALAGÓN, Beatriz et al. Feasibility study on the utilization of coal mining waste for Portland clinker production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 21-32, 2020.
- MALAQUIAS, Bruno Santos. **Efeito da adição de coque verde de petróleo na microestrutura e características metalúrgicas do coque**. Editora Dialética, 2022.
- MARCELINO, Ana Paula et al. Evaluation of pyrite and pyrrhotite in concretes. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 9, p. 484-493, 2016.
- MARUYA, Tsuyoshi et al. Numerical modeling of steel corrosion in concrete structures due to chloride ion, oxygen and water movement. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 2, p. 147-160, 2003.

- MAZER, W. *et al.* Rehabilitation Technologies. In: **Durability of Concrete Structures**. Springer, Cham, 2021. p. 63-83.
- MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; RAISDORFER, Janderson William; HOPPE, Juarez. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 125-139, 2017.
- MELO, Sandra Kurotusch de et al. Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento. 2010.
- MORANDEAU, Antoine; THIERY, Mickaël; DANGLA, Patrick. Investigation of the carbonation mechanism of CH and CSH in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 153-170, 2014.
- NAGHIPOUR, M.; TAZIKEH, M.; HOSEINIAN, B. The use of coal waste in concrete construction & survey of compressive strength. **Concrete Research**, v. 9, n. 2, p. 43-53, 2017.
- NOSRATI, A. et al. Portland cement structure and its major oxides and fineness. **Smart structures and systems**, v. 22, n. 4, p. 425-432, 2018.
- OLIVEIRA, Izelman; CAVALARO, Sergio HP; AGUADO, Antonio. New kinetic model to quantify the internal sulfate attack in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 43, p. 95-104, 2013.
- OLLIVIER, Jean-Pierre; TORRENTI, Jean-Michel. La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert. **La durabilité des bétons**, v. 1, 2008.
- OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F.; SAMPAIO, C. H. **Carvão Mineral e Coque Viabilização. Carvão Brasileiro. Nota Técnica. Estudo Perspectivo do Setor Siderúrgico Brasileiro Contrato CGEE/187/2008**: p 1-40, 2008
- OUYANG, Wei-yi; CHEN, Jian-kang; JIANG, Min-qiang. Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 419-424, 2014.
- PAPADAKIS, Vagelis G.; VAYENAS, Costas G.; FARDIS, Michael N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **Materials Journal**, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.
- PEREIRA, E. et al. Ataque interno por sulfatos em estruturas de concreto contaminadas por pirita: Uma revisão da literatura. In: **1º Congresso Brasileiro de Patologias das Construções. Foz do Iguaçu, Paraná**. 2014.
- PEREIRA, Eduardo. Investigação e monitoramento do ataque por sulfatos de origem interna em concretos nas primeiras idades. 2015.
- PETERSON, Michael et al. Produção de sulfato ferroso a partir da pirita: **desenvolvimento sustentável**. 2008
- PEUKER, K., FAGUNDES, L. **Primeiro relatório brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**. Sindicato Nacional da Indústria de Extração de Carvão Mineral-SNIEC, 2006. Disponível em <http://> 138

homologia.ambiente.sp.gov.br/proclima/publicações/relatórios_referencias/setor_energético/4. Pdf> acessado em 30/08/2021.

PITT, G. J.; MILLWARD, George Robert. Coal and modern coal processing: **an introduction**. 1979.

RAJESH, KUMAR R.; JAGADEESH, P.; MOHAN, RAO P. Propriedades de resistência de concreto contendo rejeitos de lavagem de carvão como agregado graúdo. 2016.

RAVAZZOLI, Cláudia. A problemática ambiental do carvão em santa catarina: sua evolução até os termos de ajustamento de conduta vigente entre os anos de 2005 E 2010. **Geografia em Questão**, v. 6, n. 1, 2013.

RAVERDY, M. et al. Appréciation de l'activité pouzzolanique de constituents secondaires. In: **Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement**. Paris, France: Editions Septima, 1980. p. 36-41.

RIBEIRO, D. V. et al. Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise. Campus. 2014.

SANTANA, E. R. R. Caracterização e reconstrução mineralógica de carvão, caulim, calcários e de cinzas sulfatadas geradas à temperatura de um leito fluidizado, visando a sua aplicação na indústria sementeira. Tese de Doutorado-**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Programa de Pós- graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materias. Porto Alegre. Brasil, 2002.

SANTIAGO, Wagner Carvalho; BECK, André Teófilo. Estudo da conformidade de blocos estruturais vazados de concreto simples fabricados no Brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, p. 652-672, 2018.

SANTOS, Cassiano Rossi dos; TUBINO, Rejane Maria Candiota; SCHNEIDER, Ivo André Homrich. Mineral processing and characterization of coal waste to be used as fine aggregates for concrete paving blocks. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, p. 14-24, 2015.

SCHIPPERS, Axel et al. The biogeochemistry and microbiology of sulfidic mine waste and bioleaching dumps and heaps, and novel Fe (II)-oxidizing bacteria. **Hydrometallurgy**, v. 104, n. 3-4, p. 342-350, 2010.

SCOPUS. Elsevier. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/online-tools/scopus>.> Acesso em: julho 2021.

SCHUMANN, Walter. Rochas e Minerais. Tradução: Rui Franco Ribeiro e Mario Del Rey. **Editora: Ao Livro Técnico S/A**, Rio de Janeiro/RJ, 1985.

SENTENA, Jeferson Alcântara Alves; KAZMIERCZAK, Claudio de Souza; KREIN, Laércio Antônio. Degradação de revestimentos de argamassa com finos de resíduos de concreto por ciclos térmicos. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 211-224, 2018.

SIECESC – **Sindicato da Industria de Extração de Carvão** n. 1, p. 241 **do Estado de Santa Catarina**. Disponível em: <http://www.carvaomineral.com.br> Acessado em 30/08/2021.

SIRISAWAT, Ittiporn et al. Durability and testing of mortar with interground fly ash and limestone cements in sulfate solutions. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 39-46, 2014.

SKOUSEN, Jeffrey G.; ZIEMKIEWICZ, Paul F.; MCDONALD, Louis M. Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. **The Extractive Industries and Society**, v. 6, -249, 2019.

SUMALATHA A, SREE HS, KUMAR RR. Durability properties of fly ash blended concrete made with coal washery rejects as coarse aggregate. **Int J Sci Res Dev (IJSRD)** 4(10):383–386, 2016.

STACH, E. *et. al.* Stach's Textbook of Coal Petrology, **Berlim: Grebrübr Borntraeger** 429p., 1975.

STUTZER, O. e NOÉ, A. Geology of coal. **University of Chicago. Press Chicago, Illinois**, 1940, p. 461.

SUDHARSHAN J, KUMAR RR. Performance of coal washeryzreject and fly ash blended concrete in acidic environment. **Int JzSci Res Dev (IJSRD)** 5(2):394–397, 2017,

SW, EPA. 846 **Method 1310B**: "Extraction Procedure (EP) Toxicity Test Method and Structural Integrity Test". 2004.

TAHA, Yassine et al. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. **Minerals Engineering**, v. 107, p. 123-138, 2017.

TANGO, Carlos E. de S. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. In: **International Seminar On Structural Masonry For Developing Countries**. 1994. p. 21-30.

UNI (Ente Italiano di Normazione). **UNI 8520-2** Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti, 2016.

URBONAS, L.; LENO, V.; HEINZ, D. Effect of carbonation in supercritical CO₂ on the properties of hardened cement paste of different alkalinity. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 704-711, 2016.

WANG, Zhenshuang. Effect of content and particle size distribution of coal gangue coarse aggregate on concrete performance. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, n. 5, p. 9377-9388, 2014.

WANG, Zhenshuang. Effect of content and particle size distribution of coal gangue coarse aggregate on concrete performance. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, n. 5, p. 9377-9388, 2014.

WANG, Yunsen; QIU, Jingping; ZENG, Chao. Shrinkage and Strength Properties of Coal Gangue Ceramsite Lightweight Aggregate Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, 2020.

WEILER, Jéssica; AMARAL, Juarez Ramos do; SCHNEIDER, Ivo André Homrich. Processamento de rejeito de carvão visando a redução de custos no tratamento da

drenagem ácida de minas-estudo de caso na Região Carbonífera de Santa Catarina. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, p. 337-345, 2016.

WEILER, Jéssica; AMARAL FILHO, Juarez Ramos do; SCHEINER, Ivo André Homrich. Processamento de rejeitos de carvão e redução do impacto ambiental. **AUGMDOMUS**, v. 6, 2014.

VOSVIEVER. Disponível em: <http://www.vosviewer.com/>. Acesso em: julho 2021.

XIAO, Meng; JU, Feng; HE, Ze-quan. Research on shotcrete in mine using non-activated waste coal gangue aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120810, 2020.

XIAOYAN, Y; CHANGSHENG, J. Comprehensive utilization of the coal gangue. **Coal Technology**, (2007; 26(10): 108–10).

ZAGO, Sara de Carvalho. **Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregados de escória de aciaria LD**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Lorena, 2019

ZANCAN, LUIS FERNANDO. **Associação Brasileira de Carvão Mineral**. Acessado em <https://slideplayer.com.br/slide/12174026/> (2021).

ZHANG, Junyi; CHEN, Tiefeng; GAO, Xiaojian. Incorporation of self-ignited coal gangue in steam cured precast concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 126004, 2021.

ZHANG, Yuanlan; LING, Tung-Chai. Reactivity activation of waste coal gangue and its impact on the properties of cement-based materials—a review. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117424, 2020.

ZHAO, Yingliang et al. Eco-friendly treatment of coal gangue for its utilization as supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 124834, 2021.

ZHAO, Hongchao; REN, Ting; REMENNIKOV, Alex. Behaviour of FRP-confined coal reject concrete columns under axial compression. **Composite Structures**, v. 262, p. 113621, 2021.

ZHOU, Shuangxi et al. Effect of Activated Coal Gangue in North China on the Compressive Strength and Hydration Process of Cement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 4, p. 04019022, 2019.

APÊNDICE A - Dados da fase 1 da pesquisa

Granulometria dos agregados

Tabela 52 - Granulometria, percentagens retidas acumuladas da areia lavada

Peneiras Ø (mm)	Amostra 1 R-(g)	Amostra 2 R- (g)	Amostra 3 R (g)	Media R- (g)	RA- (g)	RA- (%)
4,8	0	0	0	0	0	0
2,4	1,88	2,17	1,29	1,78	1,78	0,37
1,2	11,92	13,77	12,76	12,82	14,6	3,04
0,6	82,46	89,79	84,04	85,43	1200,03	20,85
0,3	198,47	198,02	196,32	197,60	297,63	62,04
0,15	134,42	130,48	137,78	134,23	431,86	90,01
0,075	49,44	43,49	47,84	46,92	478,78	99,79
Fundo	1,31	1,20	10,46	0,99	479,77	100,00
Total lavada	479,90	478,92	480,49	479,77		
Total sem lavar	500	500	500	500		

Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 53 - Granulometria e percentagens retidas acumuladas da brita

Peneira (mm)	Amostra 1 Retida (g)	Amostra 2 Retida (g)	Média Retida (g)	Média retida acumulada (%)	Retido acumulado (%)
9,5	199,00	100,80	149,9	4,99%	4,99%
6,3	1470,60	1185,80	828,2	44,24%	49,24%
4,8	899,20	1010,90	955,05	31,81%	81,05%
2,4	422,70	532,10	477,4	15,90%	96,96%
1,2	1,30	51,50	26,2	0,88%	97,84%
0,6	0,30	33,10	16,7	0,55%	98,39%
0,3	0,30	70,80	35,55	1,18%	99,58%
0,15	0,00	1,00	0,5	0,01%	99,59%
0,075	2,30	1,20	1,75	0,05%	99,65%
Fundo	6,50	14,10	10,3	0,34%	100,00%
Total	3002,20	3001,30		100,00%	673,09%

Fonte: Autoria própria (2019)

Absorção dos corpos de prova da fase 1

Tabela 54 - Dados da absorção dos corpos de prova de referência da fase 1

Cimento	CP's	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)	Média (%)
CP II – Z - 32	CP1	440,50	466,13	5,82	5,19
	CP2	436,58	456,92	4,66	
	CP3	440,15	463,19	5,23	
	CP4	435,71	457,95	5,10	
	CP5	442,99	466,13	5,22	
	CP6	441,99	464,58	5,11	
CP II – F - 32	CP1	440,78	468,98	6,40	5,63
	CP2	456,77	480,22	5,13	
	CP3	452,70	476,69	5,30	
	CP4	444,71	467,77	5,19	
	CP5	453,04	476,34	5,14	
CP IV – 32 RS	CP1	444,67	466,58	4,93	4,65
	CP2	444,75	465,36	4,63	
	CP3	452,34	468,17	3,50	
	CP4	453,14	474,38	4,69	
	CP5	441,61	465,85	5,49	
CP V - ARI	CP1	437,68	462,88	5,76	5,57
	CP2	445,40	470,42	5,62	
	CP3	442,32	467,72	5,74	
	CP4	456,74	480,94	5,30	
	CP5	451,22	475,42	5,36	
	CP6	446,69	471,82	5,63	

Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 55 - Dados da absorção dos corpos de prova do traço T5 da fase 1

Cimento	CP's	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)	Média (%)
CP II – Z - 32	CP1	478,75	495,71	3,54	3,75
	CP2	469,02	485,40	3,49	
	CP3	472,78	489,12	3,46	
	CP4	467,25	488,99	4,65	
	CP5	472,87	490,27	3,68	
	CP6	482,94	500,66	3,67	
CP II – F - 32	CP1	468,17	484,86	3,56	3,35
	CP2	463,59	479,44	3,42	
	CP3	477,74	492,44	3,08	
	CP4	485,13	499,95	3,05	
	CP5	462,69	479,00	3,53	
	CP6	464,32	480,41	3,47	
CP IV – 32 RS	CP1	470,61	484,95	3,05	3,05
	CP2	455,23	470,90	3,44	
	CP3	474,38	489,31	3,15	
	CP4	478,89	489,35	2,18	
	CP5	470,27	485,41	3,22	
	CP6	472,13	487,58	3,27	
CP V - ARI	CP1	461,64	478,08	3,56	3,42
	CP2	458,56	473,50	3,26	
	CP3	477,90	494,43	3,46	
	CP4	451,59	469,70	4,01	
	CP5	467,90	485,52	3,77	
	CP6	460,39	471,86	2,49	

Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 56 - Dados da absorção dos corpos de prova do traço T10 da fase 1

Cimento	CP's	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (%)	Média (%)
CP II – Z - 32	CP1	469,45	485,91	3,51	3,59
	CP2	470,64	488,33	3,76	
	CP3	465,14	482,72	3,78	
	CP4	482,40	499,54	3,55	
	CP5	470,18	489,10	4,02	
	CP6	466,74	480,45	2,94	
CP II – F - 32	CP1	454,48	472,79	4,03	4,19
	CP2	440,13	460,47	4,62	
	CP3	449,88	468,61	4,16	
	CP4	462,66	480,92	3,95	
	CP5	464,04	482,18	3,91	
	CP6	447,72	467,66	4,45	
CP IV – 32 RS	CP1	450,67	468,49	3,95	3,59
	CP2	475,59	491,23	3,29	
	CP3	454,28	471,18	3,72	
	CP4	466,88	482,78	3,41	
	CP5	474,81	492,88	3,81	
	CP6	459,20	477,40	3,96	
CP V - ARI	CP1	470,64	488,61	3,82	3,78
	CP2	462,83	478,50	3,39	
	CP3	458,91	477,11	3,97	
	CP4	462,92	479,89	3,67	
	CP5	466,65	484,39	3,80	
	CP6	465,34	484,04	4,02	

Fonte: Autoria própria (2019)

Resistência a compressão da fase 1 da pesquisa

Tabela 57 - Resistência a compressão do traço de referência (TR)

	CP IV – 32 RS	CP V - ARI	CP IV – 32 RS	CP II – F - 32
CP1	15,56	18,03	10,49	14,31
CP2	12,3	14,81	14,49	23,22
CP3	18,1	13,91	15,45	13,22
CP4	12,35	14,46	14,16	15,88
CP5	18,42	16,74	17,3	11,07
CP6	15,82	14,14	17,16	
Média	16,06	15,35	13,17	15,54

Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 58 - Resistência a compressão do traço T5

	CP IV – 32 RS	CP V - ARI	CP IV – 32 RS	CP II – F - 32
CP1	17,27	15,61	20,98	19,01
CP2	16,78	13,04	14,62	29,04
CP3	20,36	15,28	12,13	19,7
CP4	20,27	21,06	14,79	20,76
CP5	26,88	22,03	15,73	25,68
CP6	33,41	15,93	16,16	14,52
Média	22,33	15,75	19,56	13,21

Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 59 - Resistência a compressão do traço T10

	CP IV – 32 RS	CP V - ARI	CP IV – 32 RS	CP II – F - 32
CP1	18,3	15,17	10,22	14,24
CP2	23,44	12,66	12,06	11,37
CP3	14,95	16,83	15,13	12,28
CP4	21,7	15,1	10,24	12,29
CP5	28,2	23,68	14,7	15,93
CP6	20,68	12,66	17,52	14,16
Média	17,16	21,45	16,02	13,4

Fonte: Autoria própria (2019)

APÊNDICE B - Dados da fase 2 da pesquisa

DADOS DOS CORPOS DE PROVA COM CURA DE 28 DIAS

Volume

$$V = \pi r^2 \cdot h$$

Onde:

O diâmetro é a média de três medidas por corpo de prova

A altura é a média de três medidas cada corpo de prova

Tabela 60 - Volume dos corpos de prova com cura de 28 dias

Traço		Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm³)
TR	CP-1	5,00	9,97	195,76
	CP-2	5,03	10,05	199,71
	CP-3	5,04	9,97	198,91
	CP-4	5,05	10,05	201,30
	CP-5	5,02	9,95	196,93
	CP-6	5,03	9,97	198,12
T10	CP-1	5,03	10,02	199,11
	CP-2	5,03	9,98	198,32
	CP-3	5,04	9,97	198,91
	CP-4	5,03	9,97	198,12
	CP-5	5,02	9,98	197,53
	CP-6	5,03	9,99	198,51
T20	CP-1	5,04	10,04	200,3017
	CP-2	5,03	10,04	199,5077
	CP-3	5,03	9,99	198,5141
	CP-4	5,04	9,97	198,9052
	CP-5	5,03	10,05	199,7064
	CP-6	5,02	10,05	198,9131
T30	CP-1	5,02	9,99	197,7256
	CP-2	5,03	10,02	199,1102
	CP-3	5,02	10,01	198,1214
	CP-4	5,02	10,06	199,111
	CP-5	5,04	10,01	199,7032
	CP-6	5,06	10,1	203,1011

Fonte: autoria própria (2021)

Absorção - NBR 9778 (2008)

$$A = \left(\frac{msat - ms}{ms} \right) * 100$$

Onde:

msat é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;
ms é a massa da amostra seca em estufa

Tabela 61 - Absorção dos corpos de prova com cura de 28 dias

Traços	M seca (g)	M saturada(g)	Absorção (%)	Média (%)	
TR	CP1	445,32	470,80	5,72	5,61
	CP2	450,15	476,80	5,92	
	CP3	449,55	475,20	5,71	
	CP4	456,15	481,40	5,54	
	CP5	445,12	470,20	5,63	
	CP6	445,15	467,90	5,11	
T10o	CP1	443,62	471,00	6,17	6,20
	CP2	441,99	470,00	6,34	
	CP3	439,78	467,90	6,39	
	CP4	442,27	470,10	6,29	
	CP5	445,55	472,30	6,00	
	CP6	442,11	468,60	5,99	
T20	CP1	446,25	474,90	6,42	6,47
	CP2	439,01	469,10	6,85	
	CP3	440,94	470,00	6,59	
	CP4	442,60	471,50	6,53	
	CP5	449,81	477,50	6,16	
	CP6	444,26	471,50	6,13	
T30	CP1	441,49	469,10	6,25	6,37
	CP2	442,64	471,30	6,47	
	CP3	439,37	468,20	6,56	
	CP4	440,92	469,00	6,37	
	CP5	443,01	471,00	6,32	
	CP6	440,25	467,80	6,26	

Fonte: Autoria própria (2021)

Índice de vazios - NBR 9778 (2008)

$$I_v = \left(\frac{msat - ms}{ms - mi} \right) * 100$$

Onde:

msat é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

ms é a massa da amostra seca em estufa

mi é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura

Tabela 62 - Índice de vazios dos corpos de prova com cura de 28 dias

Traços	M seca (g)	Maturada (g)	Mi (g)	Índice de vazios (%)	Média (%)	
TR	CP1	445,32	470,80	282,80	13,55	13,00
	CP2	450,15	476,80	282,50	13,72	
	CP3	449,55	475,20	282,50	13,31	
	CP4	456,15	481,40	281,40	12,63	
	CP5	445,12	470,20	278,10	13,06	
	CP6	445,15	467,90	274,50	11,76	
T10	CP1	443,62	471,00	279,20	14,28	14,18
	CP2	441,99	470,00	277,40	14,54	
	CP3	439,78	467,90	271,40	14,31	
	CP4	442,27	470,10	276,40	14,37	
	CP5	445,55	472,30	279,60	13,88	
	CP6	442,11	468,60	275,40	13,71	
T20	CP1	446,25	474,90	280,40	14,73	14,69
	CP2	439,01	469,10	275,00	15,50	
	CP3	440,94	470,00	273,40	14,78	
	CP4	442,60	471,50	275,40	14,74	
	CP5	449,81	477,50	282,00	14,16	
	CP6	444,26	471,50	279,70	14,20	
T30	CP1	441,49	469,10	278,70	14,50	14,58
	CP2	442,64	471,30	277,80	14,81	
	CP3	439,37	468,20	275,40	14,95	
	CP4	440,92	469,00	276,50	14,59	
	CP5	443,01	471,00	276,50	14,39	
	CP6	440,25	467,80	273,90	14,21	

Fonte: Autoria própria (2021)

Massa específica seca- NBR 9778 (2008)

$$\rho_s = \frac{ms}{msat - mi}$$

Onde:

msat é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

ms é a massa da amostra seca em estufa

mi é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura

Tabela 63 - Massa específica seca dos corpos de prova com cura de 28 dias

Traço		M seca (g)	M saturada (g)	Mi (g)	Massa específica seca (g/cm ³)	Média (g/cm ³)
TR	CP1	445,32	470,80	282,80	2,37	2,32
	CP2	450,15	476,80	282,50	2,32	
	CP3	449,55	475,20	282,50	2,33	
	CP4	456,15	481,40	281,40	2,28	
	CP5	445,12	470,20	278,10	2,32	
	CP6	445,15	467,90	274,50	2,30	
T10	CP1	443,62	471,00	279,20	2,31	2,29
	CP2	441,99	470,00	277,40	2,29	
	CP3	439,78	467,90	271,40	2,24	
	CP4	442,27	470,10	276,40	2,28	
	CP5	445,55	472,30	279,60	2,31	
	CP6	442,11	468,60	275,40	2,29	
T20	CP1	446,25	474,90	280,40	2,29	2,28
	CP2	439,01	469,10	275,00	2,26	
	CP3	440,94	470,00	273,40	2,24	
	CP4	442,60	471,50	275,40	2,26	
	CP5	449,81	477,50	282,00	2,30	
	CP6	444,26	471,50	279,70	2,32	
T30	CP1	441,49	469,10	278,70	2,32	2,29
	CP2	442,64	471,30	277,80	2,29	
	CP3	439,37	468,20	275,40	2,28	
	CP4	440,92	469,00	276,50	2,29	
	CP5	443,01	471,00	276,50	2,28	
	CP6	440,25	467,80	273,90	2,27	

Fonte: Autoria própria (2021)

Massa específica saturada -NBR 9778 (2008)

$$\rho_{sat} = \frac{msat}{msat - mi}$$

Onde:

$msat$ é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

ms é a massa da amostra seca em estufa

mi é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura

Tabela 64 - Massa específica saturada dos corpos de prova com cura de 28 dias

Traço		M seca (g)	M saturada (g)	Mi (g)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Média (g/cm ³)
TR	CP1	445,32	470,80	282,80	2,50	2,45
	CP2	450,15	476,80	282,50	2,45	
	CP3	449,55	475,20	282,50	2,47	
	CP4	456,15	481,40	281,40	2,41	
	CP5	445,12	470,20	278,10	2,45	
	CP6	445,15	467,90	274,50	2,42	
T10	CP1	443,62	471,00	279,20	2,46	2,43
	CP2	441,99	470,00	277,40	2,44	
	CP3	439,78	467,90	271,40	2,38	
	CP4	442,27	470,10	276,40	2,43	
	CP5	445,55	472,30	279,60	2,45	
	CP6	442,11	468,60	275,40	2,43	
T20	CP1	446,25	474,90	280,40	2,44	2,43
	CP2	439,01	469,10	275,00	2,42	
	CP3	440,94	470,00	273,40	2,39	
	CP4	442,60	471,50	275,40	2,40	
	CP5	449,81	477,50	282,00	2,44	
	CP6	444,26	471,50	279,70	2,46	
T30	CP1	441,49	469,10	278,70	2,46	2,43
	CP2	442,64	471,30	277,80	2,44	
	CP3	439,37	468,20	275,40	2,43	
	CP4	440,92	469,00	276,50	2,44	
	CP5	443,01	471,00	276,50	2,42	
	CP6	440,25	467,80	273,90	2,41	

Fonte: Autoria própria (2021)

Massa específica real -NBR 9778 (2008)

$$\rho_r = \frac{ms}{ms - m_i}$$

Onde:

msat é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

ms é a massa da amostra seca em estufa

mi é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura

Tabela 65 - Massa específica real dos corpos de prova com cura de 28 dias

Traço		M seca (g)	M (g)	Massa específica real (g/cm ³)	Média (g/cm ³)
TR	CP1	445,32	282,80	2,74	2,67
	CP2	450,15	282,50	2,69	
	CP3	449,55	282,50	2,69	
	CP4	456,15	281,40	2,61	
	CP5	445,12	278,10	2,67	
	CP6	445,15	274,50	2,61	
T10	CP1	443,62	279,20	2,70	2,67
	CP2	441,99	277,40	2,69	
	CP3	439,78	271,40	2,61	
	CP4	442,27	276,40	2,67	
	CP5	445,55	279,60	2,68	
	CP6	442,11	275,40	2,65	
T20	CP1	446,25	280,40	2,69	2,37
	CP2	439,01	275,00	2,68	
	CP3	440,94	273,40	2,63	
	CP4	442,60	275,40	2,65	
	CP5	449,81	282,00	2,68	
	CP6	444,26	279,70	2,70	
T30	CP1	441,49	278,70	2,71	2,68
	CP2	442,64	277,80	2,69	
	CP3	439,37	275,40	2,68	
	CP4	440,92	276,50	2,68	
	CP5	443,01	276,50	2,66	
	CP6	440,25	273,90	2,65	

Fonte: Autoria própria (2021)

Esforços de resistência a compressão

Tabela 66 - Esforços de resistência a compressão com e sem ensaio de absorção

	TR	T10	T20	T30
Esforços a compressão dos corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção				
CP1	16.70	14.59	16.59	10.60
CP2	19.37	20.92	18.83	10.46
CP3	14.91	20.79	15.08	12.53
CO4	18.26	20.04	10.39	11.63
CP5	19.53	16.42	11.85	13.94
CP6	23.86	19.00	16.21	14.09
Média	19,54	19,48	15,71	12,55
Esforços dos corpos de prova sem ser submetidos ao ensaio de absorção				
CP1	20,07	17,53	13,64	12,71
CP2	22,79	24,08	13,7	15,86
CP3	22,83	23,58	12,34	12,22
CO4	25,66	24,28	17,29	12,65
CP5	26,42	23,56	20,42	13,05
CP6	30,66	15,87		12,18
Média	24,74	21,485	15,48	14,42

Fonte: Autoria própria (2021)

DADOS DOS CORPOS DE PROVA COM CURA DE 60 DIAS

Absorção

Tabela 67 - Absorção dos corpos de prova com cura de 60 dias

Traços		Mseca (g)	M saturada (g)	Absorção(%)	Média(%)
tr	CP1	449,43	469,86	4,55	2,09
	CP2	445,52	460,25	3,31	
	CP3	454,29	459,20	1,08	
	CP4	458,23	464,89	1,45	
	CP5	444,21	449,61	1,22	
	CP6	447,52	451,75	0,95	
T10	CP1	443,96	448,05	0,92	1,58
	CP2	447,17	456,92	2,18	
	CP3	441,50	448,73	1,64	
	CP4	446,23	452,39	1,38	
	CP5	442,72	451,37	1,95	
	CP6	444,94	451,16	1,40	
T20	CP1	452,49	458,31	1,29	1,12
	CP2	444,17	449,65	1,23	
	CP3	447,08	450,08	0,67	
	CP4	445,17	449,56	0,99	
	CP5	450,17	455,37	1,16	
	CP6	444,94	451,07	1,38	
T30	CP1	446,24	463,40	3,85	3,22
	CP2	446,59	459,48	2,89	
	CP3	445,11	460,01	3,35	
	CP4	440,88	455,89	3,40	
	CP5	446,68	456,80	2,27	
	CP6	439,01	454,78	3,59	

Fonte: Autoria própria (2021)

Resistência a compressão

Tabela 68 - Resistência a compressão dos corpos de prova com cura de 60 dias

	TR	T10	T20	T30
CP1	16.83	20.22	15.26	12.28
CP2	26.23	14.05	13.82	8.12
CP3	22.13	16.94	15.74	12.74
CO4	20.01	19.25	17.80	10.53
CP5	19.67	17.78	9.77	12.63
CP6	25.67	22.25	15.22	11.04
Média	22,74	19,29	15,57	11,84

Fonte: Autoria própria (2021)

DADOS DOS CORPOS DE PROVA COM CURA DE 90 DIAS

Absorção

Tabela 69 - Absorção dos corpos de prova com cura de 90 dias

Traços	Mseca (g)	M saturad (g)a	Absorção (%)	Média (%)	
TR	CP1	454,68	471,11	3,61	2,45
	CP2	463,18	476,39	2,85	
	CP3	463,37	470,55	1,55	
	CP4	468,94	485,09	3,44	
	CP5	454,86	461,32	1,42	
	CP6	459,63	468,13	1,85	
T10	CP1	458,02	466,77	1,91	2,45
	CP2	457,04	466,50	2,07	
	CP3	449,02	457,58	1,91	
	CP4	448,10	456,86	1,95	
	CP5	452,45	461,31	1,96	
	CP6	449,20	457,99	1,96	
T20	CP1	457,10	463,05	1,30	1,65
	CP2	452,80	460,60	1,72	
	CP3	454,97	462,43	1,64	
	CP4	456,22	464,99	1,92	
	CP5	455,07	462,49	1,63	
	CP6	448,92	456,39	1,66	
T30	CP1	454,71	462,12	1,63	1,94
	CP2	454,67	461,91	1,59	
	CP3	447,85	456,41	1,91	
	CP4	449,30	457,83	1,90	
	CP5	447,06	455,58	1,91	
	CP6	440,71	452,62	2,70	

Fonte: Autoria própria (2021)

Resistência a compressão

Tabela 70 - Resistência a compressão dos corpos de prova com cura de 90 dias

	TR	T10	T20	T30
CP1	23.77	16.55	17.45	8.19
CP2	8.25	23.67	18.80	11.69
CP3	14.02	15.33	15.34	5.66
CO4	23.36	16.11	15.16	13.16
CP5	27.04	18.51	18.62	13.84
CP6	11.67	13.45	18.79	10.97
Média	19,97	18,08	17,30	11,06

Fonte: Autoria própria (2021)

DADOS DOS CORPOS DE PROVA COM CURA DE 365 DIAS

Absorção

Tabela 71 - Absorção dos corpos de prova com cura de 365 dias

Traços	Mseca (g)	Msaturada (g)	Absorção (%)	Média (5)	
TR	CP1	453,61	468,18	3,21	2,90
	CP2	453,86	466,61	2,81	
	CP3	454,90	466,06	2,45	
	CP4	464,62	476,61	2,58	
	CP5	448,17	462,63	3,23	
	CP6	455,66	469,79	3,10	
T10	CP1	443,88	461,82	4,04	4,31
	CP2	458,07	480,03	4,79	
	CP3	446,96	466,30	4,33	
	CP4	446,15	466,20	4,49	
	CP5	442,77	462,88	4,54	
	CP6	442,60	458,85	3,67	
T20	CP1	442,93	458,15	3,44	3,82
	CP2	445,44	462,45	3,82	
	CP3	440,27	453,82	3,08	
	CP4	442,58	461,57	4,29	
	CP5	451,92	471,07	4,24	
	CP6	447,29	465,57	4,09	
T30	CP1	439,36	461,33	5,00	5,48
	CP2	440,40	464,18	5,40	
	CP3	440,82	463,65	5,18	
	CP4	444,52	466,39	4,92	
	CP5	440,54	462,29	4,94	
	CP6	436,32	468,79	7,44	

Fonte: Autoria própria (2021)

Resistência a compressão

Tabela 72 - Resistência a compressão dos corpos de prova com cura de 365 dias

	TR	T10	T20	T30
Esforços a compressão dos corpos de prova submetidos ao ensaio de absorção				
CP1	18,22	14,02	16,75	11,22
CP2	18,55	18,15	15,39	11,26
CP3	24,71	18,7	14,71	11,13
CO4	27,38	18,32	17,48	10,95
CP5	23,44	16,98	14,53	11,66
Média	22,46	17,23	15,77	11,24
Esforços dos corpos de prova sem ser submetidos ao ensaio de absorção				
CP1	16,82	25,03	18,05	12,8
CP2	21,21	25,26	16,21	14,79
CP3	26,11	24,37	19,72	13,15
CO4	22,54	20,44	18,63	16,63
CP5	35,38	24,11	17,08	14,72
CP6	31,73	26,92	21,21	
Média	25,65	24,23	18,48	14,42

Fonte: Autoria própria (2021)

CARBONATAÇÃO

Pesos e umidade

Tabela 73 - Perda de peso e umidade dos corpos de prova carbonatados

		Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pi-Pf (g)	Perda de umidade (5)%
TR	CP1	475,85	471	-4,85	1,03
	CP2	475,02	469,9	-5,12	1,09
	CP3	481,91	472,3	-9,61	2,03
	CP4	470,06	463,85	-6,21	1,34
	CP5	469,6	465,11	-4,49	0,97
Média			6,06	1,29	
T10	CP1	470,95	465,49	-5,46	1,17
	CP2	469,43	461,77	-7,66	1,66
	CP3	470,97	460,83	10,14	2,20
	CP4	472,8	459,71	13,09	2,85
	CP5	469,78	460,05	-9,73	2,11
Média			9,22	2,0	
T20	CP1	470,15	466,92	-3,23	0,69
	CP2	470,81	456,48	14,33	3,14
	CP3	471,04	455,89	15,15	3,32
	CP4	477,87	459,27	-18,6	4,05
	CP5	471,57	457,76	13,81	3,02
Média			3,02	2,84	
T30	CP1	470,51	455,47	15,04	3,30
	CP2	468,19	455,8	12,39	2,72
	CP3	468,23	452,07	16,16	3,57
	CP4	472,85	452,98	19,87	4,39
	CP5	468,26	457,23	11,03	2,41
Média			4,09	3,28	

Fonte: Autoria própria (2021)

Medidas de profundidade de carbonatação

Tabela 74 - Profundidade carbonatação do traço TR

	CP0	CP2	CP3	CP4	CP5
Medidas(mm)	CP0	10,2	7,6	10,73	5,1
	3,38	8,4	6,93	9,52	4,68
	6,87	9,07	11,99	10,47	11,46
	9,82	9,87	7,74	9,19	9,36
	7,98	10,07	8,03	12,14	5,21
	8,67	10,04	7,55	10,39	4,73
	11,38	5,2	6,33	8,75	10,62
	6,06	4,14	6,18	7,53	9,08
	9,21	3,68	10,98	6,52	9,8
	9,89	7,09	8,12	3,78	9,53
	13,52	8,32	10,38	10,74	9,83
	7,25	13,02	10,04	8,64	7,96
	8,1	9,16	10,03	8,04	7,86
	12,22	9,74	7,39	7,84	9,57
	10,87	6,79	11,58	12,13	9,31
	9,62	11,38	11,37	11,61	9,13
	9,18	7,54	10,7	9,2	12,08
	10,39	9,09	8,73	13,17	10,51
	11,2	10,18	7,49	11,59	6,27
	10,39	6,7	6,64	7,82	7,21
	9,47	8,26	8,11	11,88	5,65
	8,64	7,57	13,08	11,08	9,07
	7,08	8,02			
Médias	8,91	8,41	8,95	9,67	8,36

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 75 - Profundidade carbonatação do traço T10

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Medidas (mm)	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
	14,94	10,36	5,51	10,19	14,82
	6,68	12,7	14,24	6,59	12,08
	14,76	11,76	2,51	10,01	1,45
	4,96	13,16	13,25	14,35	7,56
	12,41	2,83	13,07	11,57	12,67
	11,01	11,93	14,11	12,38	8,32
	15,22	10,12	14,15	10,85	10,72
	10,88	11,29	4,24	12,27	13,5
	12,49	7,74	10,25	12,46	8,95
	8,69	16,2	12,59	10,3	8,41
	6,24	9,39	8,66	12,06	9,36
	12,24	12,09	9,82	8,6	9,19
	9,41	14,21	4,13	11,01	17,06
	12,42	14,22	13,76	9,28	13,5
	11,51	13,99	10,74	13,46	12,03
	10,34	1,37	10,03	11,02	7,2
	11,38	11,34	4,34	10,1	7,63
	10,74	13,17	9,91	12,14	9,26
	14,05	8,79	11,71	4,22	12,46
	4	8,67	10,14	11,89	9,66
	6,14		7,91	8,3	13,7
	4,54		10,5	8,23	12,06
				9,2	9,24
Médias	10,23	10,76	9,79	10,51	10,47

Fonte: Autoria própria (2021)

Resistência a tração por compressão diametral

Tabela 76 - Esforços de rompimento (MPa)

	TR	T10	T20	T30
CP1	3,37	3,96	3,15	2,41
CP2	4,08	3,28	2,92	2,6
CP3	3,49	3,53	3,09	2,72
CP4	2,48	3,29	2,98	3,03
CP5	3,63	3,38	3,31	2,46
Médias	3,49	3,49	3,09	2,34

Fonte: Autoria própria (2021)

ENVELHECIMENTO ACELERADO (EA)

Volume

Tabela 77 - Volume dos corpos de prova antes e após EA

	VAEA (mm ³)	VDEA (mm ³)
		TR
CP1	194.715,17	193.130,06
CP2	196.956,28	194.010,49
CP3	192.180,19	192.733,02
CP4	191.302,87	191.346,35
CP5	192.369,23	191.814,04
Média	193.504,74	192.606,79
		T10
CP1	191.577,19	193.273,01
CP2	191.346,80	190.280,71
CP3	190.414,81	191.245,20
CP4	191.098,58	190.051,81
CP5	191.744,37	189.736,58
Média	191.236,35	190.917,46
		T20
CP1	193.176,93	193.608,13
CP2	191.495,51	191.378,76
CP3	190.349,80	191.292,09
CP4	191.375,76	192.152,45
CP5	195.219,09	194.980,83
Média	192.323,42	192.682,45
		T30
CP1	190.281,01	193.949,10
CP2	193.173,08	195.595,39
CP3	190.502,56	191.970,91
CP4	191.025,59	193.421,17
CP5	190.021,67	192.207,83
Média	191.000,78	193.428,88

Onde: VAEA-Volume antes do envelhecimento acelerado
VDEA-Volume depois do envelhecimento acelerado

Fonte: Autoria própria (2021)

Peso

Tabela 78 - Peso dos corpos de prova antes e após envelhecimento acelerado

	TR		T10		T20		T30	
	PACE	PDCE	PACE	PDCE	PACE	PDCE	PACE	PDCE
CP1	465,46	463,48	452,96	450,00	449,57	445,77	446,12	442,27
CP2	465,93	463,80	455,36	452,60	449,77	445,90	448,84	444,46
CP3	458,85	456,71	450,02	446,91	442,19	438,73	443,60	439,33
CP4	462,17	459,88	448,40	445,62	447,50	443,90	444,68	440,72
CP5	455,67	453,53	449,27	445,90	457,63	454,41	443,70	439,67
Média	461,61	459,48	451,20	448,21	449,33	445,74	445,39	441,29

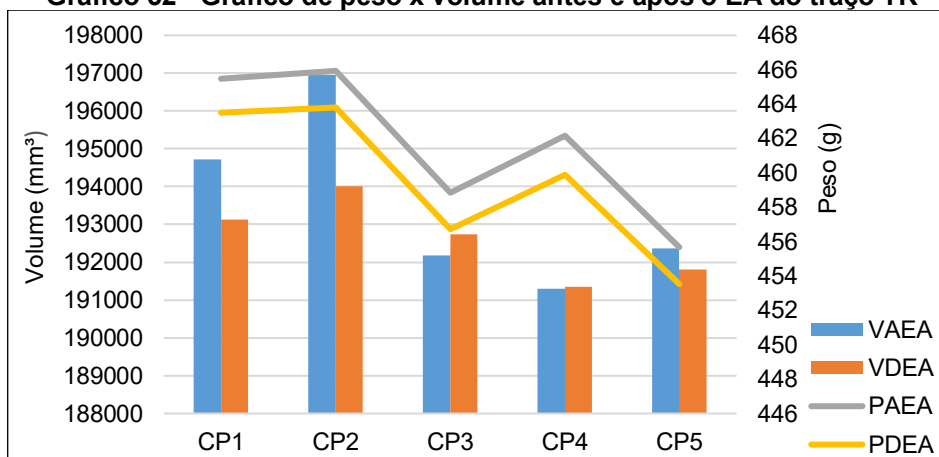
Onde: PAEA-Peso antes do envelhecimento acelerado (g)

PDEA-Peso depois do envelhecimento acelerado (g)

Fonte: Autoria própria (2021)

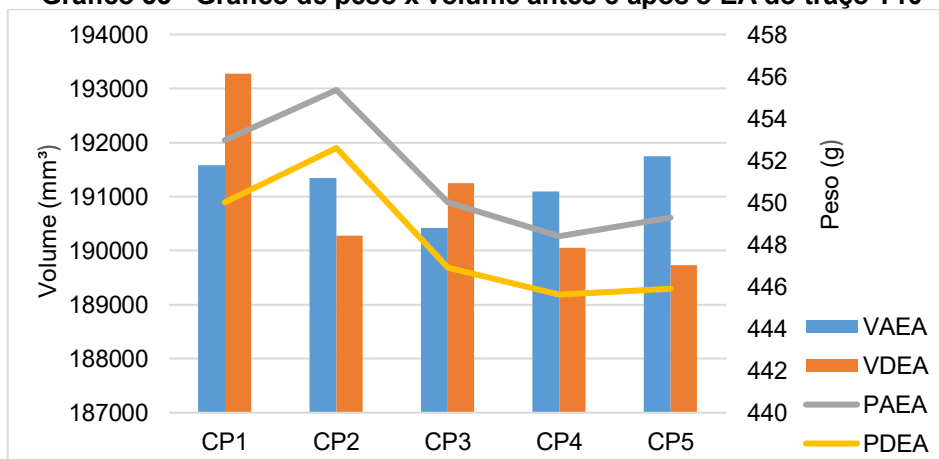
Gráficos de peso X volume

Gráfico 52 - Gráfico de peso x volume antes e após o EA do traço TR

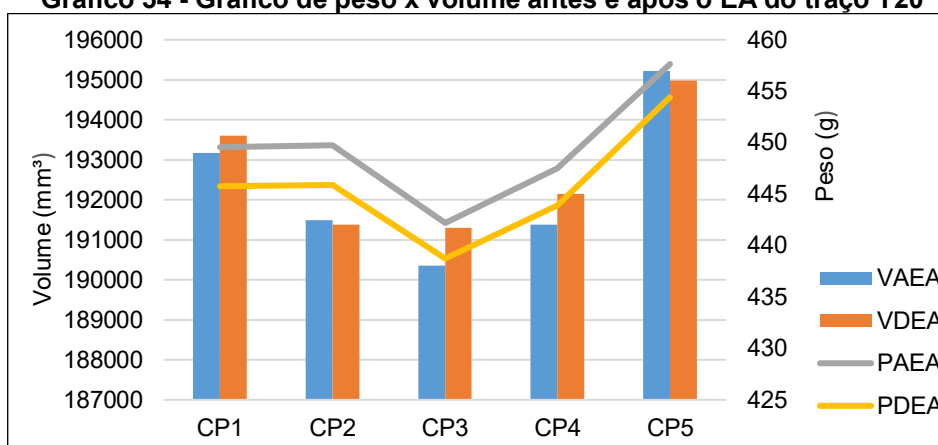


Fonte: Autoria própria (2021)

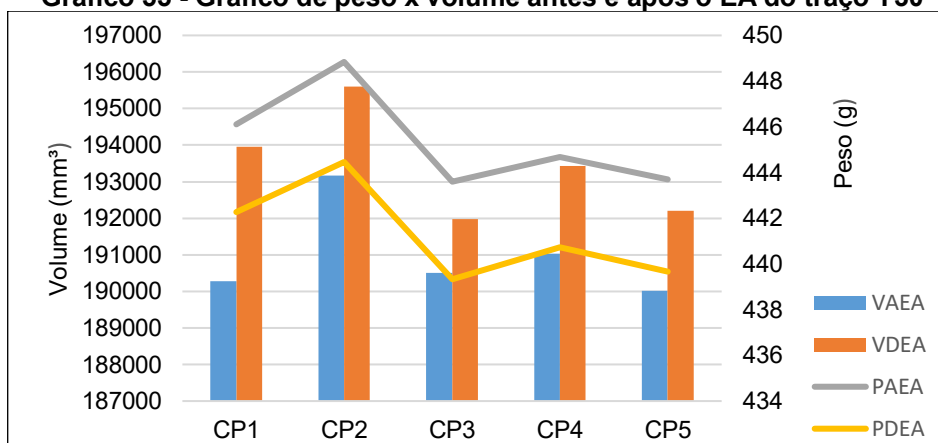
Gráfico 53 - Gráfico de peso x volume antes e após o EA do traço T10



Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 54 - Gráfico de peso x volume antes e após o EA do traço T20

Fonte: Autoria própria (2021)

Gráfico 55 - Gráfico de peso x volume antes e após o EA do traço T30

Fonte: Autoria própria (2021)

Absorção**Tabela 79 - Absorção dos corpos de prova após tratamento de EA**

Traços		M seca (g)	M saturada (g)	Absorção (%)	Média (%)
TR	CP1	444,49	468,87	5,48	6,10
	CP2	443,81	468,88	5,65	
	CP3	436,70	461,36	5,65	
	CP4	439,61	465,03	5,78	
	CP5	433,40	467,84	7,95	
T10	CP1	430,10	455,31	5,86	6,00
	CP2	433,76	457,70	5,52	
	CP3	427,00	454,10	6,35	
	CP4	425,45	451,73	6,18	
	CP5	430,66	456,84	6,08	
T20	CP1	427,92	453,24	5,92	5,91
	CP2	428,47	453,21	5,77	
	CP3	420,62	445,33	5,87	
	CP4	425,49	451,79	6,18	
	CP5	436,06	461,38	5,81	
T30	CP1	424,82	452,71	6,57	6,72
	CP2	426,11	454,53	6,67	
	CP3	421,30	449,92	6,79	
	CP4	422,59	450,89	6,70	
	CP5	421,55	450,47	6,86	

Fonte: Autoria própria (2021)

Resistência a compressão

Tabela 80 - Resistência a compressão dos corpos de prova em (MPa), após o tratamento EA

	TR	T10	T20	T30
CP1	29,32	20,35	18,09	14,97
CP2	21,47	19,43	17,76	13,86
CP3	25,38	21,23	19,36	14,3
CP4	24,92	19,73	16,17	15,18
CP6	25,24	18,69	14,16	
Média	25,56	19,89	17,11	14,58

Fonte: Autoria própria (2021)

ATAQUE INTERNO POR SULFATOS

Volumes e pesos

Tabela 81 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 1 e 2)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
1	TR	CP1	189.735,41	451,61	2	TR	CP1	190.231,47	451,40
1		CP2	193.248,20	461,52	2		CP2	194.135,32	461,10
1		CP3	197.327,75	468,35	2		CP3	197.804,01	468,12
1		CP4	194.881,03	471,36	2		CP4	196.784,13	471,05
1		CP5	190.783,63	458,79	2		CP5	191.241,69	458,50
1		CP6	192.399,46	462,49	2		CP6	192.671,08	462,22
1	T10	CP1	192.003,94	454,90	2	T10	CP1	192.011,43	454,64
1		CP2	192.751,31	459,00	2		CP2	193.680,39	458,75
1		CP3	190.227,63	454,43	2		CP3	191.529,33	454,19
1		CP4	192.138,48	457,36	2		CP4	192.784,78	457,06
1		CP5	190.638,64	455,65	2		CP5	191.994,87	455,54
1		CP6	191.079,30	456,85	2		CP6	191.948,85	456,56
1	T20	CP1	193.154,43	452,16	2	T20	CP1	193.633,44	452,01
1		CP2	192.082,27	456,00	2		CP2	192.624,10	455,89
1		CP3	190.932,24	455,00	2		CP3	191.275,27	454,80
1		CP4	191.852,71	459,39	2		CP4	191.951,29	459,13
1		CP5	193.840,95	462,90	2		CP5	193.948,86	462,51
1		CP6	192.101,28	458,28	2		CP6	192.426,59	458,00
1	T30	CP1	191.458,70	441,72	2	T30	CP1	192.087,54	441,61
1		CP2	191.493,71	451,36	2		CP2	191.987,68	451,13
1		CP3	194.463,19	459,31	2		CP3	194.099,69	459,06
1		CP4	191.593,23	454,14	2		CP4	192.288,23	453,78
1		CP5	191.618,84	455,28	2		CP5	191.434,40	454,81
1		CP6	190.919,38	454,52	2		CP6	192.151,20	454,24

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 82 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 3 e 4)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
3	TR	CP1	189.974,01	451,23	4	TR	CP1	189.110,47	450,91
3		CP2	192.565,83	460,74	4		CP2	192.710,68	460,08
3		CP3	196.743,90	467,61	4		CP3	197.227,60	467,17
3		CP4	195.834,17	470,77	4		CP4	195.841,39	470,19
3		CP5	191.160,21	459,15	4		CP5	190.866,30	457,53
3		CP6	192.649,99	461,90	4		CP6	191.516,52	461,35
3	T10	CP1	191.880,84	454,37	4	T10	CP1	191.379,78	453,88
3		CP2	193.762,08	458,36	4		CP2	194.688,17	457,88
3		CP3	191.108,31	453,73	4		CP3	189.700,24	453,24
3		CP4	192.367,78	456,65	4		CP4	191.015,62	456,16
3		CP5	190.592,52	454,81	4		CP5	190.495,99	454,36
3		CP6	192.043,78	456,10	4		CP6	191.761,20	455,53
3	T20	CP1	191.857,30	451,84	4	T20	CP1	192.130,39	451,54
3		CP2	193.158,37	455,74	4		CP2	191.751,72	454,76
3		CP3	191.313,87	454,30	4		CP3	190.435,01	453,63
3		CP4	191.466,41	458,53	4		CP4	191.583,79	458,14
3		CP5	194.706,18	462,03	4		CP5	193.977,27	461,66
3		CP6	192.194,92	457,41	4		CP6	192.170,72	457,00
3	T30	CP1	190.809,48	441,28	4	T30	CP1	191.584,80	441,00
3		CP2	192.462,44	450,52	4		CP2	191.450,48	450,01
3		CP3	194.966,61	458,41	4		CP3	194.426,85	458,00
3		CP4	192.154,59	453,18	4		CP4	191.804,99	452,79
3		CP5	191.345,06	454,30	4		CP5	191.410,47	453,88
3		CP6	191.511,34	453,54	4		CP6	191.147,66	453,12

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 83 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 5 e 6)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
5	TR	CP1	188.876,38	451,64	6	TR	CP1	186.848,04	453,10
5		CP2	193.483,31	460,53	6		CP2	193.037,23	460,87
5		CP3	197.636,46	467,37	6		CP3	196.328,03	467,60
5		CP4	196.296,71	470,27	6		CP4	196.019,27	470,60
5		CP5	190.792,07	457,81	6		CP5	189.253,80	458,21
5		CP6	192.827,67	461,56	6		CP6	189.588,57	461,85
5	T10	CP1	192.304,20	454,13	6	T10	CP1	191.438,23	455,45
5		CP2	193.598,36	458,08	6		CP2	192.845,33	458,49
5		CP3	190.375,72	453,30	6		CP3	190.942,21	453,46
5		CP4	192.276,52	456,28	6		CP4	190.973,20	456,63
5		CP5	190.887,55	454,30	6		CP5	191.308,19	462,18
5		CP6	191.542,50	455,78	6		CP6	190.025,51	456,04
5	T20	CP1	192.927,91	451,76	6	T20	CP1	193.005,48	452,87
5		CP2	192.511,68	454,92	6		CP2	191.786,01	455,33
5		CP3	190.498,37	453,85	6		CP3	191.027,09	454,07
5		CP4	192.515,45	458,15	6		CP4	192.124,62	458,48
5		CP5	194.147,34	461,17	6		CP5	193.746,30	462,18
5		CP6	192.682,62	457,12	6		CP6	192.507,58	457,48
5	T30	CP1	191.301,60	441,49	6	T30	CP1	191.174,58	442,77
5		CP2	191.248,03	450,36	6		CP2	191.651,15	450,68
5		CP3	194.491,06	458,11	6		CP3	194.326,30	458,55
5		CP4	191.839,11	452,90	6		CP4	191.451,61	453,20
5		CP5	190.966,23	454,00	6		CP5	191.940,13	454,48
5		CP6	191.337,42	453,23	6		CP6	192.463,88	453,60

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 84 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 7 e 8)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
7	TR	CP1	190.566,10	453,34	8	TR	CP1	189.060,53	453,35
7		CP2	193.586,10	460,83	8		CP2	193.572,78	460,76
7		CP3	196.354,99	467,59	8		CP3	196.977,36	467,50
7		CP4	195.387,87	470,56	8		CP4	196.266,32	470,54
7		CP5	189.589,31	458,22	8		CP5	191.751,59	458,00
7		CP6	191.870,11	461,81	8		CP6	191.897,31	461,58
7	T10	CP1	191.733,12	455,51	8	T10	CP1	191.843,48	455,57
7		CP2	192.667,09	458,50	8		CP2	193.188,51	458,19
7		CP3	189.826,05	453,64	8		CP3	190.242,20	453,46
7		CP4	191.572,59	456,50	8		CP4	191.361,92	456,62
7		CP5	190.478,01	454,67	8		CP5	191.823,29	454,63
7		CP6	191.188,80	456,08	8		CP6	191.346,33	456,06
7	T20	CP1	193.030,99	453,12	8	T20	CP1	193.397,29	453,40
7		CP2	192.655,29	455,20	8		CP2	192.206,06	455,19
7		CP3	192.052,99	454,12	8		CP3	191.171,26	454,09
7		CP4	191.867,01	458,65	8		CP4	192.253,19	458,63
7		CP5	194.392,82	462,19	8		CP5	194.088,42	462,28
7		CP6	192.353,52	457,54	8		CP6	192.767,89	457,60
7	T30	CP1	191.758,22	443,16	8	T30	CP1	191.657,77	443,43
7		CP2	190.743,90	450,75	8		CP2	191.324,25	450,71
7		CP3	194.009,92	458,59	8		CP3	193.887,14	458,66
7		CP4	192.355,55	453,29	8		CP4	191.812,98	453,39
7		CP5	190.707,62	454,39	8		CP5	190.996,16	454,14
7		CP6	191.198,94	453,67	8		CP6	191.333,57	453,55

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 85 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 9 e 10)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
9	TR	CP1	189.151,20	453,51	10	TR	CP1	189.001,45	453,89
9		CP2	194.406,94	460,86	10		CP2	193.972,24	461,00
9		CP3	196.582,48	467,54	10		CP3	196.268,22	467,90
9		CP4	195.933,07	470,44	10		CP4	197.253,64	470,83
9		CP5	191.141,29	461,56	10		CP5	192.670,72	458,22
9		CP6	187.805,92	461,72	10		CP6	192.076,37	461,99
9	T10	CP1	192.420,23	455,13	10	T10	CP1	191.843,48	455,53
9		CP2	193.191,94	458,33	10		CP2	192.856,53	458,60
9		CP3	190.875,31	453,10	10		CP3	191.118,82	453,59
9		CP4	191.963,81	456,66	10		CP4	190.642,47	456,86
9		CP5	190.483,73	454,69	10		CP5	190.868,77	455,05
9		CP6	190.885,26	456,00	10		CP6	190.324,07	456,29
9	T20	CP1	192.466,87	453,38	10	T20	CP1	192.436,57	453,91
9		CP2	191.366,22	455,11	10		CP2	192.582,84	455,51
9		CP3	190.692,67	454,03	10		CP3	190.785,11	454,03
9		CP4	191.271,78	458,69	10		CP4	191.731,15	459,00
9		CP5	194.049,45	462,21	10		CP5	194.521,37	462,63
9		CP6	191.225,50	457,52	10		CP6	192.749,19	457,81
9	T30	CP1	191.864,27	443,72	10	T30	CP1	191.639,65	444,31
9		CP2	190.994,90	450,80	10		CP2	191.580,46	450,93
9		CP3	193.598,89	458,72	10		CP3	191.540,01	453,65
9		CP4	191.699,11	453,42	10		CP4	191.540,01	453,65
9		CP5	190.346,45	454,40	10		CP5	191.335,26	454,73
9		CP6	190.943,22	456,65	10		CP6	190.748,54	453,84

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 86 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 11 e 12)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
11	TR	CP1	191.179,19	45,06	12	TR	CP1	188.203,97	454,00
11		CP2	194.280,61	461,03	12		CP2	192.738,02	461,12
11		CP3	197.266,92	467,84	12		CP3	197.645,62	467,84
11		CP4	195.483,83	470,66	12		CP4	195.247,66	470,66
11		CP5	191.104,89	458,04	12		CP5	196.298,08	458,00
11		CP6	192.251,03	461,84	12		CP6	193.065,43	462,80
11	T10	CP1	192.256,93	455,81	12	T10	CP1	192.274,51	455,88
11		CP2	192.979,15	458,43	12		CP2	193.150,91	458,54
11		CP3	190.256,85	453,38	12		CP3	190.117,24	453,15
11		CP4	191.375,86	456,86	12		CP4	191.271,26	456,48
11		CP5	190.634,93	454,82	12		CP5	190.805,46	454,78
11		CP6	191.577,19	456,04	12		CP6	190.521,36	455,88
11	T20	CP1	192.744,95	453,68	12	T20	CP1	191.533,67	454,00
11		CP2	192.866,47	455,30	12		CP2	192.012,53	455,42
11		CP3	190.219,42	454,00	12		CP3	191.087,51	454,09
11		CP4	192.472,38	458,53	12		CP4	191.584,47	458,78
11		CP5	193.044,22	462,43	12		CP5	193.308,02	462,48
11		CP6	191.818,98	457,61	12		CP6	191.636,65	457,58
11	T30	CP1	191.872,61	444,53	12	T30	CP1	191.327,01	444,62
11		CP2	191.105,60	450,84	12		CP2	191.758,57	450,93
11		CP3	194.413,70	458,66	12		CP3	194.214,52	458,75
11		CP4	192.184,27	453,58	12		CP4	192.071,24	453,62
11		CP5	190.634,09	454,59	12		CP5	191.454,68	454,70
11		CP6	191.418,27	453,82	12		CP6	191.527,55	753,79

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 87 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 13 e 14)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
13	TR	CP1	188.100,58	454,16	13	TR	CP1	189.830,11	454,16
13		CP2	192.244,67	461,12	14		CP2	193.972,24	461,00
13		CP3	197.326,37	467,96	14		CP3	195.315,42	467,86
13		CP4	196.644,00	470,92	14		CP4	195.205,43	470,89
13		CP5	191.176,91	458,03	14		CP5	190.693,16	458,08
13		CP6	192.001,62	461,94	14		CP6	191.550,26	462,11
13	T10	CP1	191.541,83	455,82	14	T10	CP1	191.779,36	456,00
13		CP2	192.744,90	458,59	14		CP2	193.248,20	461,52
13		CP3	189.199,18	453,45	14		CP3	190.286,66	458,59
13		CP4	190.739,99	456,82	14		CP4	191.455,69	456,82
13		CP5	190.580,34	455,00	14		CP5	190.663,94	455,07
13		CP6	191.143,65	456,03	14		CP6	191.315,17	456,16
13	T20	CP1	193.236,37	454,24	14	T20	CP1	192.667,37	454,68
13		CP2	191.967,24	455,59	14		CP2	191.927,79	455,51
13		CP3	190.550,03	454,25	14		CP3	190.565,01	454,24
13		CP4	192.128,21	458,70	14		CP4	191.882,64	458,84
13		CP5	193.920,19	462,52	14		CP5	193.838,67	462,67
13		CP6	192.508,52	457,50	14		CP6	192.118,17	457,70
13	T30	CP1	190.878,28	445,08	14	T30	CP1	191.358,04	445,70
13		CP2	191.356,29	451,00	14		CP2	191.430,62	451,00
13		CP3	193.705,01	459,04	14		CP3	194.152,04	459,00
13		CP4	191.250,93	453,71	14		CP4	191.432,09	453,53
13		CP5	191.852,78	454,75	14		CP5	191.859,33	454,76
13		CP6	190.900,54	453,89	14		CP6	191.413,72	453,81

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 88 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 15 e 16)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
15	TR	CP1	188.822,94	454,26	16	TR	CP1	186.118,43	454,00
15		CP2	192.179,51	460,01	16		CP2	193.904,19	460,81
15		CP3	196.819,98	467,80	16		CP3	197.125,82	467,45
15		CP4	195.530,71	470,79	16		CP4	196.343,14	470,66
15		CP5	190.375,88	458,00	16		CP5	188.879,47	457,27
15		CP6	191.658,42	461,97	16		CP6	192.341,70	461,67
15	T10	CP1	191.458,93	456,00	16	T10	CP1	191.380,75	455,82
15		CP2	192.944,30	458,46	16		CP2	191.878,09	458,39
15		CP3	189.582,61	456,57	16		CP3	189.684,00	453,23
15		CP4	191.184,85	456,82	16		CP4	191.627,43	456,55
15		CP5	190.759,93	454,89	16		CP5	191.083,27	454,75
15		CP6	191.425,27	456,07	16		CP6	191.307,90	456,00
15	T20	CP1	192.651,83	454,50	16	T20	CP1	192.130,24	454,62
15		CP2	192.113,73	455,41	16		CP2	191.500,14	455,27
15		CP3	191.174,04	454,11	16		CP3	190.630,59	454,00
15		CP4	191.108,76	458,84	16		CP4	191.812,64	458,60
15		CP5	193.081,32	462,67	16		CP5	193.502,22	462,26
15		CP6	190.890,14	457,37	16		CP6	191.972,24	457,44
15	T30	CP1	190.623,45	445,34	16	T30	CP1	192.085,36	445,69
15		CP2	190.849,20	451,00	16		CP2	191.944,35	450,91
15		CP3	193.389,93	458,78	16		CP3	193.332,61	458,85
15		CP4	190.994,90	453,50	16		CP4	191.501,38	453,54
15		CP5	190.491,79	454,68	16		CP5	190.709,65	454,57
15		CP6	190.583,13	453,68	16		CP6	190.505,39	453,64

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 89 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 17 e 18)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
17	TR	CP1	186.994,85	454,05	18	TR	CP1	187.251,52	453,55
17		CP2	192.545,84	460,23	18		CP2	197.195,53	467,69
17		CP3	197.566,31	467,57	18		CP3	196.430,04	470,77
17		CP4	195.972,11	470,72	18		CP4	196.430,04	470,77
17		CP5	189.795,76	457,58	18		CP5	190.726,65	457,65
17		CP6	192.294,14	461,83	18		CP6	194.230,23	461,81
17	T10	CP1	190.958,26	455,89	18	T10	CP1	193.400,91	456,12
17		CP2	193.140,13	458,25	18		CP2	192.694,70	458,42
17		CP3	190.592,45	453,53	18		CP3	190.899,60	453,56
17		CP4	191.025,91	456,81	18		CP4	191.570,95	456,43
17		CP5	190.754,15	455,01	18		CP5	190.800,24	454,42
17		CP6	191.900,49	456,23	18		CP6	190.349,44	455,43
17	T20	CP1	193.671,91	455,28	18	T20	CP1	192.651,85	455,26
17		CP2	192.455,71	455,55	18		CP2	191.634,94	455,35
17		CP3	191.680,90	454,18	18		CP3	190.724,31	454,00
17		CP4	189.424,02	459,00	18		CP4	191.690,04	458,91
17		CP5	193.123,61	462,60	18		CP5	193.320,42	462,54
17		CP6	191.812,11	457,73	18		CP6	191.716,12	457,32
17	T30	CP1	192.571,26	446,23	18	T30	CP1	191.394,87	446,15
17		CP2	192.111,46	451,17	18		CP2	191.490,96	450,20
17		CP3	194.229,94	458,91	18		CP3	193.538,88	458,66
17		CP4	191.584,80	453,80	18		CP4	191.325,63	453,57
17		CP5	191.281,45	454,78	18		CP5	191.180,65	454,56
17		CP6	191.574,04	453,75	18		CP6	191.992,57	453,68

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 90 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 19 e 20)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
19	TR	CP1	187.493,21	454,23	20	TR	CP1	189.692,84	454,25
19		CP2	192.986,10	460,67	20		CP2	193.333,79	460,89
19		CP3	195.746,21	467,59	20		CP3	196.534,03	467,62
19		CP4	195.780,62	470,84	20		CP4	196.595,17	470,85
19		CP5	190.568,31	457,55	20		CP5	191.096,70	457,71
19		CP6	192.038,04	461,91	20		CP6	192.881,86	461,87
19	T10	CP1	192.340,75	455,81	20	T10	CP1	192.058,46	454,61
19		CP2	193.263,80	457,46	20		CP2	192.864,54	457,20
19		CP3	192.412,60	453,00	20		CP3	188.961,24	452,48
19		CP4	191.058,56	455,66	20		CP4	192.009,12	455,94
19		CP5	190.221,46	453,79	20		CP5	190.818,04	454,26
19		CP6	191.731,77	454,88	20		CP6	190.895,93	455,49
19	T20	CP1	192.426,82	455,63	20	T20	CP1	191.799,88	455,70
19		CP2	193.209,34	455,62	20		CP2	192.056,11	455,60
19		CP3	190.979,86	453,96	20		CP3	190.857,61	454,13
19		CP4	192.736,60	458,88	20		CP4	192.120,47	459,20
19		CP5	193.791,33	462,63	20		CP5	193.808,65	462,66
19		CP6	192.323,77	457,61	20		CP6	192.257,05	457,67
19	T30	CP1	191.395,85	446,06	20	T30	CP1	191.442,84	46,41
19		CP2	191.022,98	450,76	20		CP2	191.269,69	450,92
19		CP3	193.513,84	458,69	20		CP3	193.987,54	458,92
19		CP4	191.386,56	453,34	20		CP4	192.431,49	453,66
19		CP5	190.916,51	454,58	20		CP5	190.921,09	454,73
19		CP6	190.850,98	453,49	20		CP6	191.276,12	453,64

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 91 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 21 e 22)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
21	TR	CP1	192.328,18	454,37	22	TR	CP1	189.455,41	454,32
21		CP2	193.800,64	460,0,93	22		CP2	193.205,01	461,00
21		CP3	196.234,37	467,83	22		CP3	195.675,07	467,85
21		CP4	195.302,44	470,90	22		CP4	195.587,77	470,77
21		CP5	191.883,19	457,73	22		CP5	187.843,74	457,20
21		CP6	191.986,67	461,92	22		CP6	192.081,62	461,82
21	T10	CP1	191.600,26	455,29	22	T10	CP1	191.918,89	455,91
21		CP2	192.587,07	457,59	22		CP2	193.059,37	457,52
21		CP3	190.467,95	453,20	22		CP3	188.442,95	453,28
21		CP4	191.199,98	456,34	22		CP4	191.152,86	456,59
21		CP5	191.132,09	454,38	22		CP5	190.448,85	454,64
21		CP6	190.464,94	455,37	22		CP6	190.764,69	455,75
21	T20	CP1	192.259,86	455,70	22	T20	CP1	193.029,90	455,91
21		CP2	191.779,60	455,65	22		CP2	191.945,91	455,60
21		CP3	191.317,32	454,17	22		CP3	190.897,20	454,09
21		CP4	191.873,87	459,01	22		CP4	190.863,16	458,92
21		CP5	194.232,85	452,77	22		CP5	193.478,21	462,25
21		CP6	191.591,28	457,82	22		CP6	192.512,90	457,40
21	T30	CP1	191.065,44	446,50	22	T30	CP1	190.804,09	446,15
21		CP2	191.200,94	450,93	22		CP2	191.541,83	451,01
21		CP3	193.453,45	459,20	22		CP3	194.064,80	45,89
21		CP4	191.275,27	453,75	22		CP4	191.668,12	453,87
21		CP5	191.524,89	454,70	22		CP5	190.435,01	454,83
21		CP6	191.691,72	453,88	22		CP6	190.951,68	453,78

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 92 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semanas 23 e 24)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)	Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
23	TR	CP1	189.552,29	454,44	24	TR	CP1	189.798,29	454,70
23		CP2	193.468,99	461,20	24		CP2	193.614,34	461,13
23		CP3	196.537,44	467,72	24		CP3	196.350,91	467,87
23		CP4	195.872,23	470,85	24		CP4	195.946,90	471,09
23		CP5	190.815,28	457,64	24		CP5	189.543,81	457,88
23		CP6	192.287,06	461,71	24		CP6	191.933,44	462,13
23	T10	CP1	191.762,22	456,01	24	T10	CP1	192.429,81	456,20
23		CP2	192.624,31	457,90	24		CP2	191.680,54	458,00
23		CP3	189.957,96	453,10	24		CP3	190.072,68	453,48
23		CP4	191.214,12	456,71	24		CP4	191.513,49	456,82
23		CP5	190.797,29	454,46	24		CP5	193.976,74	454,55
23		CP6	191.302,87	455,83	24		CP6	190.718,37	455,57
23	T20	CP1	193.053,34	455,61	24	T20	CP1	192.284,20	455,31
23		CP2	192.453,36	455,20	24		CP2	191.909,64	455,63
23		CP3	190.719,25	454,20	24		CP3	190.807,48	454,26
23		CP4	191.252,99	459,00	24		CP4	191.160,82	458,99
23		CP5	193.585,77	462,38	24		CP5	193.564,11	462,72
23		CP6	191.679,60	457,83	24		CP6	191.654,87	457,84
23	T30	CP1	190.252,76	446,40	24	T30	CP1	191.741,66	446,77
23		CP2	191.784,99	451,10	24		CP2	190.832,30	451,25
23		CP3	193.634,46	459,09	24		CP3	193.353,56	459,12
23		CP4	191.398,74	453,87	24		CP4	191.897,08	454,00
23		CP5	191.303,77	454,15	24		CP5	191.012,86	455,05
23		CP6	191.365,59	453,90	24		CP6	191.897,08	454,00

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 93 - Resumo de volumes e pesos individuais por semana no AIS (semana 25)

Semana	Traço		Volume (mm ³)	Peso (g)
25	TR	CP1	189.432,53	454,44
25		CP2	193.382,98	461,14
25		CP3	195.815,25	467,87
25		CP4	196.531,86	471,27
25		CP5	191.340,06	457,83
25		CP6	192.530,03	462,00
25	T10	CP1	192.235,13	456,00
25		CP2	193.297,58	453,89
25		CP3	190.374,31	456,14
25		CP4	191.374,15	456,57
25		CP5	191.483,62	454,54
25		CP6	189.483,62	455,33
25	T20	CP1	191.482,44	445,00
25		CP2	191.718,04	450,75
25		CP3	194.290,75	459,17
25		CP4	192.006,40	453,78
25		CP5	191.434,40	458,60
25		CP6	191.133,13	453,74
25	T30	CP1	192.894,64	455,91
25		CP2	193.131,06	455,61
25		CP3	191.433,29	454,01
25		CP4	192.304,58	454,00
25		CP5	194.268,24	462,66
25		CP6	193.146,08	457,59

Fonte: Autoria própria (2022)

Perdas e ganhos de volume

Tabela 94 - Perdas e ganhos de volume máximo e mínimo durante o processo de AIS

	Volume inicial	Menor volume	Perda de volume	Perda (%)	Volume i inicial	Maior volume	Ganho de volume	Ganho (%)
	TR				TR			
CP1	189.735,41	186.848,00	2.887,41	1,55	189.735,41	191.179,19	1.443,78	0,76
CP2	193.248,20	192.179,51	1.068,69	0,56	193.248,20	194.406,94	1.158,74	0,60
CP3	197.327,75	195.315,42	2.012,33	1,03	197.327,75	197.804,01	476,26	0,24
CP4	194.881,03	194.881,03	0,00	0,00	194.881,03	197.253,64	2.372,61	1,22
CP5	190.783,63	187.843,74	2.939,89	1,57	190.783,63	192.670,72	1.887,09	0,99
CP6	192.399,46	189.588,57	2.810,89	1,48	192.399,46	194.230,23	1.830,77	0,95
Média			1.953,20	1,03			1.528,21	0,79
	T10				T10			
CP1	192.003,94	190.958,26	1.045,68	0,55	192.003,94	193.400,91	1.396,98	0,73
CP2	192.751,31	191.680,54	1.070,77	0,56	192.751,31	194.688,17	1.936,86	1,00
CP3	190.227,63	188.442,95	1.784,68	0,95	190.227,63	192.412,60	2.184,98	1,15
CP4	192.138,48	190.642,47	1.496,01	0,78	192.138,48	192.784,78	646,31	0,34
CP5	190.638,64	190.221,46	417,18	0,22	190.638,64	193.976,74	3.338,10	1,75
CP6	191.079,30	189.483,62	1.595,68	0,84	191.079,30	192.043,78	964,48	0,50
Média			1.235,00	0,65			1.744,62	0,91
	T20				T20			
CP1	193.154,43	191.482,44	1.671,99	0,87	193.154,43	193.671,91	517,48	0,27
CP2	192.082,27	191.366,22	716,05	0,37	192.082,27	193.209,34	1.127,07	0,59
CP3	190.932,24	190.219,42	712,82	0,37	190.932,24	194.290,75	3.358,51	1,76
CP4	191.852,71	189.424,02	2.428,69	1,28	191.852,71	192.736,60	883,88	0,46
CP5	193.840,95	191.434,40	2.406,55	1,26	193.840,95	194.706,18	865,22	0,45
CP6	192.399,46	190.890,14	1.509,32	0,79	192.399,46	192.767,89	368,43	0,19
Média			1.554,69	0,82			1.186,77	0,62
	T30				T30			
CP1	191.458,70	190.252,76	1.205,94	0,63	191.458,70	192.894,64	1.435,93	0,75
CP2	191.493,71	190.743,90	749,81	0,39	191.493,71	193.131,06	1.637,36	0,86
CP3	194.463,19	191.433,29	3.029,91	1,58	194.463,19	194.966,61	503,41	0,26
CP4	191.593,23	190.994,90	598,32	0,31	191.593,23	192.431,49	838,26	0,44
CP5	191.618,84	190.346,45	1.272,39	0,67	191.618,84	191.940,13	321,29	0,17
CP6	190.919,38	190.505,39	413,99	0,22	190.919,38	193.146,08	2.226,70	1,17
Média			1.211,73	0,63			1.160,49	0,61

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 95 - Perdas e ganhos de peso máximo e mínimo durante o processo de AIS

	Peso inicial	Menor Peso	Redução de peso	Redução (%)	Peso inicial	Maior peso	Aumento de peso	Aumento (%)	
	TR					TR			
CP1	451,61	450,91	0,70	0,16	451,61	461,52	9,91	2,19	
CP2	461,52	460,01	1,51	0,33	461,52	461,52	0,00	0,00	
CP3	468,35	467,17	1,18	0,25	468,35	468,35	0,00	0,00	
CP4	471,36	470,19	1,17	0,25	471,36	471,36	0,00	0,00	
CP5	458,79	457,20	1,59	0,35	458,79	461,56	2,77	0,60	
CP6	462,49	461,35	1,14	0,25	462,49	462,80	0,31	0,07	
Média			1,22	0,26			2,16	0,48	
	T10					T10			
CP1	454,90	453,88	1,02	0,22	454,90	456,20	1,30	0,29	
CP2	459,00	457,20	1,80	0,39	459,00	459,00	0,00	0,00	
CP3	454,43	452,48	1,95	0,43	454,43	454,43	0,00	0,00	
CP4	457,36	455,66	1,70	0,37	457,36	457,36	0,00	0,00	
CP5	455,65	453,79	1,86	0,41	455,65	455,65	0,00	0,00	
CP6	456,85	454,88	1,97	0,43	456,85	456,85	0,00	0,00	
Média			1,72	0,38			0,22	0,05	
	T20					T20			
CP1	452,16	451,54	0,62	0,14	452,16	455,91	3,75	0,83	
CP2	456,00	454,76	1,24	0,27	456,00	456,00	0,00	0,00	
CP3	455,00	453,63	1,37	0,30	455,00	455,00	0,00	0,00	
CP4	459,39	458,14	1,25	0,27	459,39	459,39	0,00	0,00	
CP5	462,90	458,60	4,30	0,94	462,90	462,90	0,00	0,00	
CP6	458,28	457,00	1,28	0,28	458,28	458,28	0,00	0,00	
Média			1,68	0,37			0,63	0,14	
	T30					T30			
CP1	441,72	441,00	0,72	0,16	441,72	446,77	5,05	1,14	
CP2	451,36	450,01	1,35	0,30	451,36	451,61	0,25	0,06	
CP3	459,31	458,00	1,31	0,29	459,31	459,89	0,58	0,13	
CP4	454,14	452,79	1,35	0,30	454,14	454,14	0,00	0,00	
CP5	455,28	453,88	1,40	0,31	455,28	455,66	0,38	0,08	
CP6	454,52	453,12	1,40	0,31	454,52	454,59	0,07	0,02	
Média			1,26	0,28			1,06	0,24	

Fonte: Autoria própria (2022)

Esforços de resistência a compressão

Tabela 96 - Resistência a compressão após o tratamento de AIS

	TR	T10	T20	T30
CP1	31,16	24,49	27,14	17,18
CP2	26,18	21,17	24,17	16,4
CP3	15,09	27,68	23,65	15,94
CP4	29,18	25,04	20,01	21,33
CP5	25,6	25,61	23,01	17,55
CP6	33,93	30,2	23,7	17,32
Média	2326,8585	25,69	23,61	17,62

Fonte: Autoria própria (2022)

APÊNDICE C - Tratamento estatístico da fase 1 da pesquisa

ABSORÇÃO

Tabela 97- Análise da Anova para absorção

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	21,15823	3	7,052742	13,3256	0,000398	3,49029482
Dentro dos grupos	6,35115	12	0,529263			
Total	27,50938	15				

Fonte: Autoria própria (2021\0)

Tabela 98 - Teste de Tukey para a absorção

Composições		Resultado Tukey
Referências	CP IV 32- RS	a
	CP V-ARI	a
	CP II-Z-32	a
	CP II-F-32	a
CP IV 32- RS	5%	c
	10%	bc
CP V-ARI	5%	bc
	10%	bc
CP II-Z-32	5%	bc
	10%	b
CP II-F-32	5%	b
	10%	b

Fonte: Autoria própria (2021)

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Tabela 99 - Análise Anova para resistência a compressão

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	610,2667	3	203,4222	26,37622	1,44E-05	3,490295
Dentro dos grupos	92,54803	12	7,712335			
Total	702,8147	15				

Fonte: Autoria própria (2021)

T

Tabela 100 - Teste de Tukey para resistência a compressão

Composições		Resultado Tukey
Referências	CP IV 32- RS	abc
	CP V-ARI	abc
	CP II-Z-32	bc
	CP II-F-32	abc
CP IV 32- RS	5%	a
	10%	abc
CP V-ARI	5%	abc
	10%	ab
CP II-Z-32	5%	ab
	10%	abc
CP II-F-32	5%	c
	10%	c

Fonte: Autoria própria (2021)

APÊNDICE D Tratamento estatístico da fase 2 da pesquisa

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CONCRETO ENDURECIDO

Tabela 101- Análise ANOVA para massas específicas do concreto endurecido

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	691,6666667	3	230,5555556	2,3714286	0,1694178	4,757062663
Colunas	291350	2	145675	1498,3714	7,978E-09	5,14325285
Erro	583,3333333	6	97,2222222			
Total	292625	11				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 102 - Análise da ANOVA para as densidades do concreto endurecido

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	11224322	1	11224322	113376,9899	4,63093E-14	5,987377607
Dentro dos grupos	594	6	99			
Total	11224916	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 103 - Teste de Tukey para as densidades do concreto endurecido

Traço	Resultado Tukey
TR	a
T10	ab
T20	ab
T30	b

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 104 - Análise da ANOVA para absorção por imersão dos traços TR, T10, T20 e T30. Nas datas de cura de 28, 60, 90 e 365 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	2,142369	3	0,714123	1,78461	0,21997	3,862548
Colunas	47,25457	3	15,75152	39,36343	1,68E-05	3,862548
Erro	3,601406	9	0,400156			
Total	52,99834	15				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 105 - Análise da ANOVA para resistência a compressão dos traços TR, T10, T20 e T30. Nas datas de cura de 28, 60, 90 e 365 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	194,3807608	3	64,79358692	38,67665731	1,80767E-05	3,862548358
Colunas	1,20887475	3	0,40295825	0,24053427	0,865946008	3,862548358
Erro	15,07737025	9	1,675263361			
Total	210,6670058	15				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 106 - Teste de Tukey para o concreto endurecido com cura de 28 dias

Traços	Resultado Tukey
TR	a
T10	a
T20	ab
T30	b

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 107 - Teste de Tukey para o concreto endurecido com cura de 60 dias

<u>Traços</u>	<u>Resultado Tukey</u>
1	a
2	ab
3	b
4	c

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 108 - - Teste de Tukey para o concreto endurecido com cura de 90 dias

<u>Traço</u>	<u>Resultado Tukey</u>
1	a
2	ab
3	ab
4	b

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 109 - Teste de Tukey para o concreto endurecido com cura de 365 dias

<u>Traço</u>	<u>Resultado Tukey</u>
1	a
2	b
3	b
4	c

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 110 - Análise ANOVA para comparação de resistência a compressão de amostra com cura de 28 dias submetidas e não submetidas a secagem por temperatura de 100°C

<u>Fonte da variação</u>	<u>SQ</u>	<u>gl</u>	<u>MQ</u>	<u>F</u>	<u>valor-P</u>	<u>F crítico</u>
Linhas	98,55901	3	32,85300333	13,09655083	0,031384424	9,276628153
Colunas	9,847922	1	9,847922	3,925784492	0,141869842	10,12796449
Erro	7,52557	3	2,508523333			
Total	115,932502	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 111 - Análise ANOVA para comparação de resistência a compressão de amostra com cura de 365 dias submetidas e não submetidas a secagem por temperatura de 100°C

<u>Fonte da variação</u>	<u>SQ</u>	<u>gl</u>	<u>MQ</u>	<u>F</u>	<u>valor-P</u>	<u>F crítico</u>
Linhas	139,754668	3	46,58488933	21,8351043	0,015351645	9,276628153
Colunas	32,72405	1	32,72405	15,33830079	0,02959578	10,12796449
Erro	6,400458	3	2,133486			
Total	178,879176	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 112 - Teste de Tukey para resistência a compressão aos 365 dias de cura com e sem secagem a 100°C

<u>Traços</u>	<u>Resultado Tukey</u>
TR sem absorção	a
T10 sem absorção	ab
TR com absorção	abc
T20 sem absorção	bcd
T10 com absorção	cde
T20 com absorção	de
T30 sem absorção	de
T30 com absorção	e

Fonte: Autoria própria (2022)

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA CARBONATAÇÃO

Tabela 113 - Análise da ANOVA para o índice de porosidade na carbonatação

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	39,29005	3	13,09668	0,280964	0,837579	9,276628
Colunas	67,5122	1	67,5122	1,448342	0,315099	10,12796
Erro	139,8403	3	46,61343			
Total	246,6426	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 114 - Análise da ANOVA para as médias da perda de peso na carbonatação

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,0435125	1	0,0435125	0,035515214	0,856732632	5,987377607
Dentro dos grupos	7,351075	6	1,225179167			
Total	7,3945875	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 115 - Teste de Tukey para as amostras perda de peso da carbonatação

Traços	Resultado Tukey
TR	b
T10	ab
T20	a
T30	a

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 116 - Análise da ANOVA para os esforços de resistência à tração por compressão

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,8646125	1	0,8646125	0,952448053	0,366787285	5,9873776
Dentro dos grupos	5,446675	6	0,907779167			
Total	6,3112875	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 117 - Teste de Tukey para a resistência a tração por compressão na carbonatação

Traço	Resultado Tukey
TR	a
T10	a
T20	ab
T30	b

Fonte: Autoria própria (2022)

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO ENVELHECIMENTO ACELERADO (EA)

Tabela 118 - Análise ANOVA das médias dos volumes dos corpos de prova após o EA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	740404429	1	740404429	131481	2,96929E-14	5,987377607
Dentro dos grupos	3378734,536	6	563122,4227			
Total	74043821709	7				

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 119 - Teste de Tukey para o volume dos corpos de prova após o EA

Traço	Resultados Tukey
T30	a
T20	a
TR	a
T10	a

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 120 - Teste Tukey para o volume dos corpos de prova antes e após o EA

Traço	Resultado Tukey
TRDEA	a
TRAEA	a
T20AEA	a
TRDEA	a
T20DEA	a
T10AEA	a
T30AEA	a
T10DEA	a

Onde:

TRAEA	TR antes do envelhecimento acelerado
TRAEA	TR antes do envelhecimento acelerado
TRDEA	TR depois do envelhecimento acelerado
T10AEA	T10 antes do envelhecimento acelerado
T10DEA	T10 depois do envelhecimento acelerado
T20AEA	T20 antes do envelhecimento acelerado
T20DEA	T20 depois do envelhecimento acelerado
T30AE	T30 antes do envelhecimento acelerado
T30DEA	T30 depois do envelhecimento acelerado

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 121 - Análise ANOVA para as médias dos pesos dos corpos de prova após o EA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	398152,2924	1	398152	12905	0	5,98737761
Dentro dos grupos	185,108619	6	30,8514			
Total	398337,4011	7				

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 122 - Teste Tukey para o peso dos corpos de prova após O EA

Traço	Resultado Tukey
TR	a
T10	b
T20	b
T30	b

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 123 - Teste Tukey para o peso dos corpos de prova antes e após O EA

Traço	Resultado Tukey
TRAEA	a
TRDEA	a
T10AEA	b
T20AEA	bc
T10DEA	bc
T20DEA	bc
T30AEA	bc
T30DEA	c

Onde: TRAEA TR antes do envelhecimento acelerado
 TRAEA TR antes do envelhecimento acelerado
 TRDEA TR depois do envelhecimento acelerado
 T10AEA T10 antes do envelhecimento acelerado
 T10DEA T10 depois do envelhecimento acelerado
 T20AEA T20 antes do envelhecimento acelerado
 T20DEA T20 depois do envelhecimento acelerado
 T30AE T30 antes do envelhecimento acelerado
 T30DEA T30 depois do envelhecimento acelerado

Fonte: Aatoria própria (2021)

Tabela 124 - Análise ANOVA fator duplo sem repetição para porosidade no EA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	45,5885	3	15,19617	1,023264	0,49268	9,276628
Colunas	28,65245	1	28,65245	1,929369	0,258979	10,12796
Erro	44,55205	3	14,85068			
Total	118,793	7				

Fonte: Aatoria própria (2021)

Tabela 125 - Análise ANOVA para a absorção antes e após o EA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	2,39005	3	0,796683333	5,190119435	0,10472322	9,276628153
Colunas	34,9448	1	34,9448	227,6534202	0,000632025	10,12796449
Erro	0,4605	3	0,1535			
Total	37,79535	7				

Fonte: Aatoria própria (2021)

Tabela 126 - Teste de Tukey para a absorção antes e após o EA

Traço	Resultado Tukey
T30DEA	a
TRDEA	a
T10DEA	a
T20DEA	a
T30AEA	b
TRAEA	bc
T10AEA	c
T20AEA	c

Onde: TRAEA TR antes do envelhecimento acelerado
 TRAEA TR antes do envelhecimento acelerado
 TRDEA TR depois do envelhecimento acelerado
 T10AEA T10 antes do envelhecimento acelerado
 T10DEA T10 depois do envelhecimento acelerado
 T20AEA T20 antes do envelhecimento acelerado
 T20DEA T20 depois do envelhecimento acelerado
 T30AE T30 antes do envelhecimento acelerado
 T30DEA T30 depois do envelhecimento acelerado

Fonte: Aatoria própria (2021)

Tabela 127 - Análise da ANOVA para resistência a compressão antes e após o EA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	194,02735	3	64,67578333	33,98414005	0,008133592	9,276628153
Colunas	1,14005	1	1,14005	0,599043674	0,495340684	10,12796449
Erro	5,70935	3	1,903116667			
Total	200,87675	7				

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 128 - Teste de Tukey para a resistência a compressão antes e após o EA

Traço	Resultado Tukey
TRDEA	a
TRAEA	ab
T10DEA	bc
T10AEA	bcd
T20DEA	cde
T20AEA	def
T30DEA	ef
T30AESA	f

Onde:	TRAEA	TR antes do envelhecimento acelerado
	TRAEA	TR antes do envelhecimento acelerado
	TRDEA	TR depois do envelhecimento acelerado
	T10AEA	T10 antes do envelhecimento acelerado
	T10DEA	T10 depois do envelhecimento acelerado
	T20AEA	T20 antes do envelhecimento acelerado
	T20DEA	T20 depois do envelhecimento acelerado
	T30AE	T30 antes do envelhecimento acelerado
	T30DEA	T30 depois do envelhecimento acelerado

Fonte: Autoria própria (2021)

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO ATAQUE INTERNO POR SULFATOS

Tabela 129 Análise das variações volumétricas entre semanas para o traço TR

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P
Linhas	71619220,55	5	14323844,1	26,63655531	0,0013009
Colunas	35996,017	1	35996,017	0,066938029	0,8061615
Erro	2688756,85	5	537751,37		
Total	74343973,41	11			

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 130 - Análise das variações volumétricas entre semanas para o traço T10

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	11707808	5	2341561,552	5,629346754	0,040482274	5,0503291
Colunas	29094,7	1	29094,70075	0,069946553	0,801970284	6,607891
Erro	2079781	5	415956,1764			
Total	13816683	11				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 131 - Análise das variações volumétricas entre semanas para o traço T20

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	1451682,131	5	290336,426	0,139436718	0,9751822	5,0503291
Colunas	402200,5355	1	402200,535	0,193160478	0,6786448	6,607891
Erro	10411046,31	5	2082209,26			
Total	12264928,97	11				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 132 - Análise das variações volumétricas entre semanas para o traço T30

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	30519824	5	6103964,782	2,241992691	0,198145733	5,0503291
Colunas	4669602	1	4669601,729	1,715149631	0,247263203	6,607891
Erro	13612812	5	2722562,303			
Total	48802237	11				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 133 - Análise ANOVA para as médias das variações volumétricas dos corpos de prova no ensaio de ataque interno por sulfatos

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	0,0820375	3	0,0273458	1,04058982	0,48733769	9,276628
Colunas	0,0066125	1	0,0066125	0,25162518	0,65043217	10,12796
Erro	0,0788375	3	0,0262792			
Total	0,1674875	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 134 - Análise da ANOVA para as variações de peso do traço TR

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	4971,369	5	994,27383	2677,7988	2,916E-121	2,289851
Colunas	12,62	24	0,5258333	1,4161852	0,113541808	1,608437
Erro	44,55632	120	0,3713027			
Total	5028,545	149				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 135 - Análise da ANOVA para as variações de peso do traço T10

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	341,207961	5	68,24159	553,1519	4,62E-81	2,289851283
Colunas	14,9455006	24	0,622729	5,047711	1,04E-09	1,608437096
Erro	14,8042364	120	0,123369			
Total	370,957698	149				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 136 - Análise da ANOVA para as variações de peso do traço T20

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	1253,772	5	250,75434	565,04113	1,3624E-81	2,289851
Colunas	20,09814	24	0,8374226	1,8870191	0,013607118	1,608437
Erro	53,25368	120	0,4437807			
Total	1327,124	149				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 137 - Análise da ANOVA para as variações de peso do traço T30

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	2849,4169	5	569,8834	1035,075	7,23E-97	2,289851283
Colunas	36,469024	24	1,519543	2,759935	0,000151	1,608437096
Erro	66,068632	120	0,550572			
Total	2951,95456	149				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 138 - Análise ANOVA para as médias de redução e aumento dos pesos dos corpos de prova no ensaio de ataque interno por sulfatos

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	0,027015	3	0,009005	0,322074	0,811512	9,276628
Colunas	0,024561	1	0,024561	0,878465	0,417765	10,12796
Erro	0,083877	3	0,027959			
Total	0,135453	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 139 - Análise da ANOVA para resistência a compressão antes e após o tratamento de ataque interno por sulfatos

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	88,0174	3	29,33913	102,7015	0,001602916	9,276628153
Colunas	82,5741	1	82,5741	289,0503	0,000443229	10,12796449
Erro	0,857022	3	0,285674			
Total	171,4485	7				

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 140 - Teste de Tukey para os esforços de resistência a compressão dos corpos de prova antes e após o tratamento de ataque interno por sulfatos

Fator	Resultado Tukey
TRDAIS	a
T10DAIS	a
T2DAAIS	ab
TRAAIS	abc
T10AAIS	bc
T30DAIS	bc
T20AAIS	bc
T30AAIS	c

Onde: TRAIAS TR antes do ataque interno por sulfatos
 TRDAIS TR depois do ataque interno por sulfatos
 T10AAIS T10 antes do ataque interno por sulfatos
 T10DAIS T10 depois do ataque interno por sulfatos
 T20AAIS T20 antes do ataque interno por sulfatos
 T20DAIS T20 depois do ataque interno por sulfatos
 T30AAIS T30 antes do ataque interno por sulfatos
 T30DAIS T30 depois do ataque interno por sulfatos

Fonte: Autoria própria (2022)

APÊNDICE E – Tratamento estatístico da fase 3 da pesquisa

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS BLOCOS

Tabela 141 - Análise da ANOVA para absorção dos blocos

	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat F	Pvalor
Fator	1,00	1,24	1,24	12,33	0,02
Resíduos	4,00	0,40	0,10		

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 142 - Teste de Tukey para absorção dos blocos

Blocos	Resultados Tukey
BR	b
B30	a

Fonte: Autoria própria

Tabela 143 - Análise da ANOVA para resistência a compressão dos blocos

	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat F	Pvalor
Fator	1,00	0,12	0,12	1,91	0,19
Resíduos	15,00	0,91	0,06		

Fonte: Autoria própria

Tabela 144 - Teste de Tukey para os esforços de resistência a compressão dos blocos

Blocos	Resultados Tukey
Br	a
B30	a

Fonte: Autoria própria

ANEXOS

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DOS CIMENTOS FORNECIDA PELO FABRICANTE



TIPO / CLASSE : **CP II-F-32**

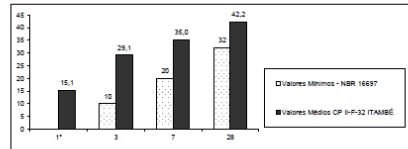
PERÍODO : ago/19
EMISSÃO : 01/10/19

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

Data	Químicos											Físicos									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega Início	Tempo de Pega Fim	Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	min	min	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
02	4,38	18,55	2,95	60,29	3,18	2,68	6,62	1,04	1,52	0,67	1,00	250	300	28,7	3,450	1,20	4,80	14,8	28,2	35,5	43,5
08	4,31	18,37	2,95	60,40	3,07	2,56	6,68	0,79	1,41	0,70	0,00	240	300	26,9	3,480	1,00	6,80	15,5	30,4	36,5	42,7
08	4,37	18,50	3,04	60,31	3,00	1,58	6,68	0,78	1,63	0,66	1,00	240	300	26,8	3,450	1,00	5,00	14,9	30,5	35,8	42,6
12	4,29	18,14	2,95	60,28	2,95	2,50	7,06	0,87	1,78	0,67	0,00	245	300	28,7	3,400	1,00	5,00	14,5	28,2	34,8	42,5
14	4,20	18,19	2,98	61,71	2,30	2,81	6,74	0,53	1,41	0,59	0,00	255	315	26,8	3,430	1,10	6,00	16,2	32,1	36,5	43,7
16	4,28	18,18	2,95	61,62	2,18	2,55	6,81	0,93	1,71	0,67	0,00	230	270	26,8	3,470	1,40	5,10	15,7	30,8	37,0	41,6
20	4,29	18,02	2,88	61,56	2,07	2,56	7,01	0,90	1,80	0,68	0,00	230	270	26,8	3,500	1,50	5,00	15,4	28,4	33,8	41,7
22	4,19	18,27	2,96	61,24	3,07	2,55	6,66	0,70	1,48	0,67	0,00	250	300	28,8	3,340	1,80	5,20	15,5	27,4	35,2	41,9
26	4,24	18,35	2,94	61,28	2,72	2,66	6,76	0,76	1,33	0,70	1,00	240	285	26,7	3,480	1,40	7,10	15,1	29,9	33,9	41,6
28	4,16	18,54	3,00	60,62	2,79	2,52	6,85	0,87	1,33	0,67	0,00	245	300	28,3	3,470	1,20	6,40	14,5	28,9	34,4	41,1
30	4,07	18,15	2,87	60,87	2,67	2,51	7,08	1,15	1,43	0,67	1,00	230	270	28,5	3,410	1,50	6,50	14,1	26,1	32,1	41,4
Média	4,25	18,30	2,96	60,95	2,73	2,57	6,83	0,83	1,56	0,68	0,36	241	292	26,7	3,444	1,37	5,88	15,1	29,1	35,0	42,2
Sd	0,09	0,18	0,05	0,57	0,39	0,06	0,16	0,18	0,21	0,01	0,50	9	16	0,2	46,10	0,21	0,82	0,8	1,7	1,4	0,9
Min	4,07	18,02	2,87	60,26	2,07	2,50	6,62	0,53	1,33	0,67	0,00	230	270	26,3	3,340	1,00	4,80	14,1	26,1	32,1	41,1
Max	4,38	18,55	3,04	61,71	3,18	2,68	7,08	1,15	1,83	0,70	1,00	255	315	26,9	3,500	1,60	7,10	16,2	32,1	37,0	43,7

Obs.: A Norma da ABNT não prevê a determinação da Resistência à Compressão a um dia para o CP II-F-32.
A massa específica média do CP II-F-32 ITAMBÉ é 3,06 g/cm³ (NBR 16605).
As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.

carimbo/assinatura



TIPO / CLASSE : **CP II-Z-32**

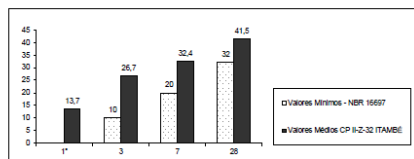
PERÍODO : ago/19
EMISSÃO : 01/10/2019

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

Data	Químicos											Físicos									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega Início	Tempo de Pega Fim	Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	min	min	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
01	7,00	20,45	3,28	55,30	2,78	2,84	6,98	0,79	10,91	0,88	0,00	250	330	27,8	3,660	0,80	6,40	13,4	24,1	33,0	42,1
05	7,02	19,99	3,27	55,59	2,62	2,79	6,80	0,78	9,24	0,92	1,00	255	315	28,0	3,700	1,10	4,80	15,0	28,8	33,7	42,1
07	7,28	20,73	3,30	54,68	2,39	2,54	7,14	0,70	10,89	0,91	0,00	240	300	28,3	3,750	0,90	4,00	14,2	29,2	32,9	42,2
08	7,27	20,71	3,31	54,48	2,38	2,56	6,87	0,67	11,41	0,91	0,00	255	315	28,3	3,750	1,20	5,10	13,9	27,3	32,6	41,0
13	7,23	20,84	3,34	54,99	2,47	2,63	6,62	0,66	11,86	0,89	1,00	260	315	28,1	3,650	1,00	5,00	13,8	26,5	33,3	41,5
15	7,42	20,85	3,28	54,95	2,14	2,57	6,82	0,76	10,94	0,89	0,00	240	300	28,1	3,840	1,20	4,00	13,7	27,2	33,0	41,6
19	7,40	20,18	3,28	55,09	1,99	2,63	7,02	0,93	10,14	0,89	0,00	250	300	28,2	3,740	1,20	6,50	13,6	27,6	33,5	41,6
21	7,28	20,60	3,35	55,03	2,29	2,81	7,11	1,01	10,35	0,93	0,00	245	300	28,2	3,790	1,30	4,80	13,5	25,6	31,8	42,2
23	7,19	19,80	3,39	54,60	2,39	2,82	7,24	0,95	10,94	0,88	0,00	240	300	27,9	3,770	1,30	5,20	13,2	27,1	31,3	40,4
27	7,39	21,11	3,27	54,83	2,21	2,58	6,99	1,12	10,35	0,92	0,00	245	300	28,0	3,630	1,50	6,40	13,5	25,4	30,2	40,1
29	7,27	20,64	3,28	54,94	2,32	2,62	7,34	0,93	11,03	0,88	0,00	230	285	28,3	3,790	1,30	4,50	12,9	24,4	31,2	41,1
Média	7,25	20,54	3,30	54,95	2,36	2,65	6,98	0,83	10,74	0,91	0,18	247	305	28,1	3,718	1,16	5,15	13,7	26,7	32,4	41,5
Sd	0,14	0,40	0,03	0,31	0,22	0,10	0,24	0,17	0,69	0,03	0,40	10	12	0,2	59,30	0,20	0,91	0,5	1,5	1,1	0,7
Min	7,00	19,80	3,27	54,48	1,99	2,54	6,62	0,56	9,24	0,88	0,00	230	285	27,8	3,630	0,80	4,00	12,9	24,1	30,2	40,1
Max	7,42	21,11	3,35	55,59	2,78	2,82	7,34	1,12	11,86	0,98	1,00	260	330	28,3	3,790	1,50	6,50	15,0	29,2	33,7	42,2

Obs.: A Norma da ABNT não prevê a determinação da Resistência à Compressão a um dia para o CP II-Z-32.
A massa específica média do CP II-Z-32 ITAMBÉ é 2,92 g/cm³ (NBR 16605).
As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.

carimbo/assinatura





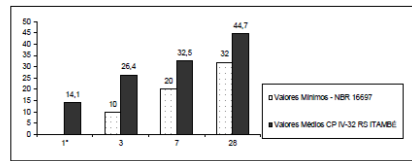
TIPO / CLASSE : **CP IV-32 RS**

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

PERÍODO : ago/19
Emissão: 01/10/2019

Data	Químicos										Físicos										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	Inicio	Fim	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
02	0,58	29,95	4,11	44,70	2,31	2,21	4,77	0,70	25,05	1,23	0,00	275	330	30,4	4.360	0,20	1,10	13,4	25,6	31,2	45,2
08	0,25	29,51	4,16	45,16	1,81	2,20	4,74	0,70	24,95	1,23	0,00	275	330	30,6	4.240	0,30	2,20	14,3	27,4	33,6	45,0
08	0,62	28,42	4,15	45,93	1,91	2,24	4,13	0,63	24,84	1,17	0,50	275	330	30,6	4.200	0,30	1,20	15,0	29,5	35,1	45,2
12	0,48	30,74	4,29	45,05	1,79	2,16	4,65	0,84	25,29	1,19	0,00	285	330	30,4	4.400	0,10	1,00	13,4	25,3	32,0	45,9
14	0,54	30,19	4,29	45,10	1,30	2,19	4,65	0,59	25,47	1,25	0,00	280	330	30,5	4.290	0,20	1,30	14,7	27,7	33,4	45,8
16	0,49	30,04	4,33	45,19	1,22	2,14	4,67	0,87	25,24	1,18	0,00	250	300	30,7	4.340	0,20	1,00	15,3	28,6	34,5	44,5
20	0,42	29,65	4,24	44,99	1,65	2,13	4,67	0,73	25,45	1,19	1,00	270	315	30,4	4.280	0,30	0,80	14,8	25,4	33,7	44,1
22	0,11	29,61	4,32	44,71	1,81	2,19	4,65	0,67	24,90	1,21	0,00	290	345	30,4	4.400	0,20	1,20	13,7	25,2	31,7	44,9
26	0,40	29,90	3,78	45,82	1,74	2,20	4,52	0,70	24,98	1,22	0,50	280	330	30,5	4.210	0,20	1,70	13,4	26,2	31,7	42,8
28	0,09	29,82	4,33	45,16	1,88	2,11	4,70	0,81	24,48	1,15	0,00	275	330	30,4	4.310	0,10	1,00	13,6	24,4	30,0	45,3
30	0,81	30,40	4,17	44,98	1,58	2,21	4,77	0,84	26,28	1,25	0,00	280	330	30,4	4.420	0,20	0,70	13,8	25,0	30,7	44,8
Média	0,44	29,88	4,20	45,14	1,73	2,18	4,63	0,73	25,17	1,21	0,18	274	327	30,5	4.315	0,21	1,20	14,1	26,4	32,5	44,7
Sd	0,22	0,64	0,16	0,36	0,30	0,04	0,18	0,09	0,46	0,03	0,34	10	11	0,1	80,79	0,07	0,42	0,7	1,7	1,7	1,0
Min	0,09	28,42	3,78	44,70	1,22	2,11	4,13	0,59	24,46	1,15	0,00	250	300	30,4	4.200	0,10	0,70	13,4	24,4	30,0	42,8
Max	0,91	30,74	4,33	45,93	2,31	2,24	4,77	0,87	26,26	1,25	1,00	290	345	30,7	4.420	0,30	2,20	15,3	29,5	35,1	45,9

Obs.: A Norma da ABNT não prevê a determinação da Resistência à Compressão a um dia para o CP IV-32 RS.
A massa específica média do CP IV-32 RS ITAMBÉ é 2,83 g/cm³ (NBR 16605).
As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.



carimbo/assinatura



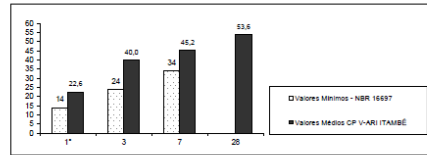
TIPO : **CP V-ARI**

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

PERÍODO : ago/19
Emissão: 01/10/2019

Data	Químicos										Físicos										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	Inicio	Fim	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
01	4,52	19,22	2,93	60,38	3,63	2,98	3,85	1,04	0,93	0,72	0,00	230	270	29,80	4.440	0,10	0,50	21,4	37,8	43,4	53,0
05	4,31	18,86	3,04	61,71	3,17	3,02	3,62	0,73	0,93	0,76	0,00	220	270	29,80	4.470	0,03	0,30	22,7	41,4	45,7	53,9
07	4,38	18,81	3,06	61,42	3,39	2,94	3,48	0,73	0,71	0,89	0,00	225	270	30,10	4.540	0,06	0,20	22,7	40,1	44,2	52,8
09	4,29	18,65	3,01	61,40	3,28	3,02	3,73	0,73	0,94	0,72	0,00	215	270	30,10	4.530	0,04	0,20	23,4	41,7	45,9	53,8
13	4,31	19,06	3,02	61,71	2,75	3,05	3,66	0,86	0,93	0,70	0,00	340	395	29,70	4.390	0,07	0,30	21,5	39,7	45,6	54,3
15	4,36	19,02	3,03	61,64	2,12	2,93	3,77	1,23	0,98	0,71	0,00	220	270	29,60	4.470	0,08	0,20	23,2	40,9	46,7	53,8
19	4,50	19,33	2,99	61,83	2,10	3,08	3,56	0,93	0,84	0,73	0,00	210	255	29,70	4.400	0,10	0,40	23,8	40,0	45,5	54,1
21	4,40	19,25	2,96	61,49	2,98	3,00	3,70	0,73	0,82	0,69	0,00	210	255	29,70	4.510	0,10	0,20	21,9	40,6	44,7	55,2
23	4,48	19,53	3,06	61,02	3,05	2,91	3,47	0,00	1,07	0,74	1,00	220	270	29,30	4.420	0,04	0,30	23,0	38,2	45,0	54,4
27	4,35	19,39	2,93	61,74	2,91	2,92	3,57	1,01	0,69	0,71	0,00	220	270	29,40	4.470	0,06	0,30	22,0	39,4	45,2	53,0
29	4,30	18,59	3,10	61,67	2,40	2,63	3,45	1,12	0,86	0,72	0,00	255	270	29,40	4.410	0,10	0,30	22,7	39,6	45,0	51,8
Média	4,38	19,14	3,01	61,46	2,89	2,97	3,52	0,84	0,86	0,72	0,09	221	269	29,7	4.459	0,07	0,29	22,6	40,0	45,2	53,6
Sd	0,08	0,28	0,05	0,42	0,50	0,07	0,15	0,33	0,13	0,02	0,30	9	8	0,3	52,05	0,03	0,09	0,8	1,2	0,9	0,9
Min	4,29	18,65	2,93	60,38	2,10	2,83	3,46	0,00	0,68	0,69	0,00	210	255	29,3	4.390	0,03	0,20	21,4	37,8	43,4	51,8
Max	4,52	19,53	3,10	61,83	3,63	3,08	3,95	1,23	1,07	0,76	1,00	240	285	30,1	4.540	0,10	0,50	23,8	41,7	46,7	55,2

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 16697, a qual não estabelece valor mínimo.
A massa específica média do CP V-ARI ITAMBÉ é 3,09 g/cm³ (NBR 16605).
As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.



carimbo/assinatura

Parâmetros	CP II-F-32	CP II-Z-32	CP IV-32 RS	CP V-ARI	CP II-F-40
Tempo de início de pega (horas)	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1
MgO (%)	-	-	-	≤ 6,5*	-
Perda ao fogo (%)	≤ 12,5	≤ 8,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 12,5
Resíduo insolúvel (%)	≤ 7,5	≤ 18,5	-	≤ 3,5*	≤ 7,5
SO ₃ (%)	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5	≤ 4,5
Resistência à Compressão (MPa)					
1 dia	-	-	-	≥ 14,0	-
3 dias	≥ 10,0	≥ 10,0	≥ 10,0	≥ 24,0	≥ 15,0
7 dias	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 34,0	≥ 25,0
28 dias	≥ 32,0	≥ 32,0	≥ 32,0	-	≥ 40,0
Adições Permitidas (%)					
Escória	0	0	0	0	0
Filer calcário	11 a 25	0 a 15	0 a 10	0 a 10	11 a 25
Material pozolânico	0	6 a 14	15 a 50	0	0

*No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivados do cimento CP V, não há limitação para Resíduo Insolúvel e MgO.