

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PAULO HENRIQUE BORBA ROLIM

**COMPÓSITOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL COM BASE EM
RESÍDUOS INDUSTRIAIS DOS PROCESSOS DE MINERAÇÃO DE
FERRO, PAPEL E CELULOSE, ENTULHOS E PRODUÇÃO DE CAL**

TESE

CURITIBA

2022

PAULO HENRIQUE BORBA ROLIM

**COMPÓSITOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL COM BASE EM RESÍDUOS
INDUSTRIAIS DOS PROCESSOS DE MINERAÇÃO DE FERRO, PAPEL E
CELULOSE, ENTULHOS E PRODUÇÃO DE CAL**

**Composites for civil construction based on industrial waste from iron ore
processing, pulp and paper mill, construction and demolition debris, and lime
production**

Tese apresentada como requisito para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Vsévolod Mymrine.

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.



PAULO HENRIQUE BORBA ROLIM

COMPÓSITOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL COM BASE EM RESÍDUOS INDUSTRIAIS DOS PROCESSOS DE MINERAÇÃO DE FERRO, APEL E CELULOSE, ENTULHOS E PRODUÇÃO DE CAL

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

Data de aprovação: 17 de março de 2022.

Prof Vsevolod Mymrine, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Andre Nagalli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Haroldo De Araujo Ponte, Doutorado - Universidade Federal do Paraná

Prof.a Karina Querne De Carvalho Passig, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Rodrigo Cezar Kanning, Doutorado – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (Ifpr)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por ter-nos criado com a capacidade de estudar sobre as maravilhas que nos cercam, despertado em nós o desejo pelo conhecimento, pelo qual podemos contribuir para melhoria da condição de vida daqueles que enfrentam maiores dificuldades.

Aos meus pais e minha irmã pela companhia, paciência, amor e carinho na longa jornada da vida, que contribuíram com as condições para que eu tenha alcançado tantas conquistas e respeito pela vida. Meus sobrinhos, meu cunhado, e minha esposa, que são muito importantes dentro desse conjunto.

Agradeço ao meu orientador e a sua esposa, por todos os momentos que passamos e queremos ainda vivenciar juntos, pelo conhecimento de vida como também na área de resíduos industriais, materiais de construção e cristalografia.

Sou grato à toda equipe dos laboratórios da UTFPR, aos professores das disciplinas que cursei, aos técnicos do LAMIR (UFPR) aos meus colegas do IFPR, dentre outras tantas pessoas que fazem parte das conquistas alcançadas. De forma especial aos membros da banca, pelo tempo e colocações sugeridas para melhoria deste trabalho, muito obrigado.

Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia, IFPR, instituição qual atuo como docente, que permitiu minha dedicação integral ao desenvolvimento desta pesquisa.

“A ponte entre o sonho e a realidade é o
planejamento”.
M. Mystic Racing

RESUMO

ROLIM, P.H.B. **Compósitos para a Construção Civil com base em resíduos industriais dos processos de mineração de ferro, papel e celulose, entulhos e produção de cal.** 2022. 145 f. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

A utilização de resíduos industriais na composição de materiais para construção civil é uma excelente alternativa para mitigação dos problemas que surgem com a geração desses resíduos. A intervenção humana na natureza tem causado danos ao ambiente, tais como o aquecimento global, contaminação dos lençóis freáticos, espalhamento de doenças, dentre outros, que são agravados pelo descarte irresponsável de resíduos industriais. As indústrias da construção civil, beneficiamento de minério de ferro, produção de papel e celulose e produção de cal apresentam destaque nesse cenário devido ao elevado volume de produção de resíduos e dos problemas socioambientais que costumam causar, como exemplo os incidentes que ocorreram em barragens de armazenamento de rejeitos da mineração do ferro nas cidades de Mariana e Brumadinho (MG). Grandes volumes de trabalhos têm sido publicados visando a reutilização dos resíduos industriais para reduzir a exploração de recursos naturais. Há estudos de aplicação dos resíduos citados como agregados para concretos, produção de cimentos, tijolos e blocos, misturas asfálticas, geopolímeros, dentre outros, na maior parte dos casos com uso de cimento Portland. Este trabalho aborda a produção de compósitos com diferentes teores entre resíduos das indústrias mencionadas sem adição de cimento Portland. São 35 composições compactadas nas dimensões de 20 mm de diâmetro por 20 mm de altura em um molde cilíndrico metálico, curadas nas condições ambientes para a avaliação das variações dimensionais, absorção de água, resistência à compressão uniaxial, e massa específica unitária. Em quatro composições selecionadas foram investigadas as alterações mineralógicas por DRX, microestruturais por MEV e mapeamento microquímico por EDS. Os resultados apontam para a possibilidade de utilização desses compósitos como materiais para construção civil, com ganho de resistência mecânica variando até 21 MPa, discretas variações dimensionais, teores aceitáveis de absorção de água (entre 18 e 26%), e segurança na contaminação externa por eventuais metais presentes. As melhorias nas propriedades avaliadas são atribuídas às mudanças microestruturais, com dissociação de elementos de silício, cálcio, alumínio, enxofre. Alterações de ordem mineralógica como o consumo de portlandita, periclásio e dolomita, e a formação de brucita, etringita e cristobalita também foram observadas e relacionadas ao desenvolvimento da microestrutura em ambiente alcalino.

Palavras-chave: Materiais sustentáveis. Matrizes de ativação alcalina. Processo sol-gel. Sinérese química. Investigação microestrutural.

ABSTRACT

ROLIM, P.H.B. **Composites for civil construction based on industrial waste from iron ore processing, pulp and paper mill, construction and demolition debris, and lime production.** 2022. 145 p. Thesis. Post-Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2022.

The use of industrial waste in construction materials is an excellent mitigating alternative for the problems that arise with these residues generation. Human intervention in nature has damaged the environment, such as global warming, groundwater contamination, diseases spread, among others, which get worse by the reckless industrial waste disposal. The civil construction, iron ore processing, pulp and paper production and lime production industries stand out in this scenario due to the high volume of waste production and the socio-environmental problems they usually cause, such as the incidents that occurred in storage of iron mining tailings in the cities of Mariana and Brumadinho (MG). There are large volumes of published papers with the intention of reusing industrial waste in order to reduce the exploitation of natural resources, including the application of that mentioned residues as concrete aggregates, cement production, bricks and blocks, asphalt mixtures, geopolymers, among others, in most cases with the use of Portland cement. This work deals with composites production in different contents of mentioned wastes without cement Portland addition. There are 35 proposed compositions compacted in the dimensions of 20 x 20 mm (diameter x height), in a metallic cylindrical mold, cured under ambient conditions for the assessment of dimensional variations, water absorption, uniaxial compressive strength, and specific mass. Four selected compositions were investigated for mineralogical changes by XRD, microstructural changes by SEM, microchemical mapping by EDS. The results point to the possibility of using these composites as materials for civil construction, with mechanical strength gains varying up to 21 MPa, discrete dimensional variations, acceptable levels of water absorption (between 18 and 26%), and safety in external contamination by any metals present. The improvements in the evaluated properties are due the microstructural changes, with the dissociation of elements of silicon, calcium, aluminum and sulfur. Mineralogical alterations such as the consumption of portlandite, periclase and dolomite, and the brucite, ettringite and cristobalita formation were also observed and related to the microstructure development in alkaline environment.

Keywords: Sustainable materials. Alkaline Activation Matrices. Sol-gel process. Chemical syneresis. Microstructural investigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva granulométrica dos rejeitos de minério de ferro.....	25
Figura 2 - Micropartículas observadas no RMF.....	26
Figura 3 - Microscopia e mapeamento de Ferro e Silício em uma amostra de RMF.....	26
Figura 4 - Cristais aciculares do mineral goethita.....	27
Figura 5 - Ciclos da produção de celulose	29
Figura 6 - Percentual de <i>Dregs</i> , <i>Grits</i> e Lama de cal na indústria de celulose	30
Figura 7 - Curvas de decomposição térmica da calcita, <i>dregs</i> e <i>grits</i>	33
Figura 8 - Fluxo para intervenção ou geração de entulhos em obras	36
Figura 9 - Micrografia dos grãos de CaO com baixa reatividade.....	41
Figura 10 - Micrografias dos cristais de calcita (a), aragonita (b) e vaterita (c)	41
Figura 11 - Micrografias dos produtos de hidratação da cal.....	43
Figura 12 - Fluxograma do programa experimental	52
Figura 13 - Amostras utilizadas na pesquisa.....	53
Figura 14 - Molde utilizado na pesquisa.....	56
Figura 15 - Corpos de prova das 35 composições	57
Figura 16 - Difrátogramas das matérias-primas	65
Figura 17 - Micromorfologia (MEV) do RMF.....	66
Figura 18 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos químicos do RMF.....	67
Figura 19 - Micromorfologia (MEV) do <i>dregs</i>	68
Figura 20 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos químicos do <i>dregs</i>	68
Figura 21 - Micromorfologia (MEV) do <i>grits</i>	69
Figura 22 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos químicos do <i>grits</i>	69
Figura 23 - Micromorfologia (MEV) da lama de cal	70
Figura 24 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos da lama de cal	70
Figura 25 - Micromorfologia (MEV) do entulho.....	71
Figura 26 - MEV e distribuição de elementos químicos do entulho.....	71
Figura 27 - Micromorfologia (MEV) do RPC.....	72
Figura 28 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos químicos do RPC.....	73
Figura 29 - Variação da massa durante a cura (cp's 1 a 4)	77
Figura 30 - Variação da massa durante a cura (cp's 5 a 8)	78
Figura 31 - Variação da massa durante a cura (cp's 9 a 20)	79
Figura 32 - Variação da massa durante a cura (cp's 21 a 35)	80
Figura 33 - Difrátogramas da c.2 em função do tempo de cura	86
Figura 34 - Evolução da microestrutura (MEV) da c.2.....	88
Figura 35 - MEV e distribuição química da c.2 na data da moldagem	88
Figura 36 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos da c.2 aos 360 dias..	89
Figura 37 - Difrátogramas da c.6 em função do tempo de cura	91
Figura 38 - Evolução da microestrutura (MEV) da c.6.....	92

Figura 39 - MEV e distribuição química da c.6 na moldagem	93
Figura 40 - MEV, pontos de EDS e distribuição química c.6 aos 360 dias.....	94
Figura 41 - Cristais de thenardita entre as amostras.....	95
Figura 42 - Difratoograma da thenardita	95
Figura 43 - Micrografia e mapeamento por EDS da thenardita	95
Figura 44 - Difratoogramas da c.10 em função do tempo de cura	97
Figura 45 - Evolução da microestrutura (MEV) da c.10.....	98
Figura 46 - MEV e distribuição química da c.10 na moldagem	99
Figura 47 - MEV, pontos de EDS e distribuição química da c.10 aos 180 dias.....	99
Figura 48 - Difratoogramas da c.21 em função do tempo de cura	101
Figura 49 - Evolução da microestrutura (MEV) da c.21.....	102
Figura 50 - MEV e distribuição química da c.21 na moldagem	102
Figura 51 - MEV, pontos de EDS e distribuição química da c.21 aos 180 dias.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição granulométrica das matérias-primas	61
Tabela 2 - Caracterizações físicas das matérias-primas	62
Tabela 3 - Composição química (FRX) das matérias-primas	63
Tabela 4 - Composição microquímica (EDS) dos pontos indicados no RMF	67
Tabela 5 - Composição microquímica (EDS) dos pontos do <i>dregs</i>	68
Tabela 6 - Composição microquímica (EDS) dos pontos do <i>grits</i>	69
Tabela 7 - Composição microquímica (EDS) da lama de cal	70
Tabela 8 - Composição microquímica (EDS) da área de entulho.....	72
Tabela 9 - Composição microquímica (EDS) dos pontos de RPC	73
Tabela 10 - Resistência à compressão dos compósitos 1 a 8.....	74
Tabela 11 - Resistência à compressão dos compósitos 9 a 20.....	75
Tabela 12 - Resistência à compressão dos compósitos 21 a 35.....	76
Tabela 13 - Percentual de variação da altura em relação à data da moldagem	81
Tabela 14 - Variação do diâmetro em relação à data da moldagem	82
Tabela 15 - Variação da densidade em relação à data da moldagem	83
Tabela 16 - Percentual de absorção de água aos 28 dias	84
Tabela 17 - Composição microquímica (EDS) na data da moldagem da c.2	88
Tabela 18 - Composição microquímica (EDS) aos 360 dias de cura da c.2.....	89
Tabela 19 - Composição microquímica (EDS) da c.6 na data da moldagem	93
Tabela 20 - Composição microquímica (EDS) aos 360 dias de cura da c.6.....	94
Tabela 21 - Composição microquímica (EDS) da thenardita.....	96
Tabela 22 - Composição microquímica (EDS) da c.10 na data da moldagem	99
Tabela 23 - Composição microquímica (EDS) aos 180 dias de cura da c.10.....	100
Tabela 24 - Composição microquímica (EDS) na data da moldagem da c.21	103
Tabela 25 - Composição microquímica (EDS) aos 180 dias de cura da c.21.....	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Minerais com potencial econômico para produção de ferro (Fe)	21
Quadro 2 - Composição química e mineralógica em RMF	24
Quadro 3 - Composição química das frações dos Rejeitos de Minério de Ferro.....	25
Quadro 4 - Análise química (FRX) de <i>dregs</i>	31
Quadro 5 - Análise química (FRX) do <i>grits</i>	32
Quadro 6 - Análise química (FRX) da lama de cal	34
Quadro 7 - Classificação dos resíduos segundo as Resoluções do Conama	36
Quadro 8 - Percentual de materiais contidos em entulhos	37
Quadro 9 - Estimativa de geração de entulhos por m ² de construção.....	38
Quadro 10 - Limites da NBR 6453 na classificação da cal virgem de fábrica	42
Quadro 11 - Análise química dos resíduos de produção de cal	44
Quadro 12 - Materiais com base em resíduos industriais	49
Quadro 13 - Caracterização inicial das amostras	54
Quadro 14 - Percentual de matéria-prima nas composições	55
Quadro 15 - Composição mineralógica dos resíduos.....	64

ABREVIATURAS

AAI	Anodização de Alumínio
ADPt	<i>Air Dried Pulp Ton</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
ATG	Análise Termogravimétrica
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>
C-S-H	Silicato Hidratado de Cálcio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes
CMCM	Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais
c.	Composição
cps	<i>Counts per second</i> (intensidade na difratometria de raios X)
CM	Cinza de Madeira
DTG	Termogravimetria Diferencial
DRX	Difratometria de Raios X
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
FRX	Fluorescência de Raios X
HQE	<i>Haute Qualité Environnementale</i>
IA	Inteligência Artificial
IFPR	Instituto Federal do Paraná
LAMIR	Laboratório de Análises de Minerais e Rochas
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LETA	Lodo de Estações de Tratamento de Água
LETE	Lodo de Estações de Tratamento de Esgoto
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MDF	<i>Medium Density Fiber</i>
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PR	Paraná
RC	Resíduo de Concreto
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RDSP	Resíduos da Dragagem de Sedimentos em Portos
RMF	Resíduo de Minério de Ferro
RPC	Resíduo da Produção de Cal
RPCEL	Resíduo de Produção de Celulose
Sd	Desvio Padrão (<i>Standard deviation</i>)
TG	Termogravimetria
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SIMBOLOS

%	Percentual
ρ	Densidade
μ	Massa específica
σ	Resistência à compressão
Θ	Theta (ângulo de leitura no difratômetro)
g	Gramma
μm	Micrômetro
mm	Milímetro
cm^3	Centímetro cúbico
MPa	Mega Pascal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	Estrutura do trabalho	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	Rejeito do beneficiamento do minério de ferro	20
2.2	Resíduos da produção de papel e celulose	27
2.2.1	Dregs	31
2.2.2	Grits	32
2.2.3	Lama de Cal	33
2.3	Entulho: mistura dos resíduos da construção	34
2.4	A cal e seu resíduo de produção	39
2.5	Materiais com base em resíduos industriais	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1	Coleta e caracterização inicial das matérias-primas	52
3.2	Moldagem e caracterização dos compósitos	55
3.2.1	Caracterizações dos Compósitos Moldados	58
3.3	Seleção e caracterização dos compósitos escolhidos	58
3.4	Avaliação ambiental de lixiviados solúveis	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	Caracterização das matérias-primas	60
4.1.1	Caracterização das Propriedades Físicas	60
4.1.2	Composição Química das Matérias-Primas pelo Método de FRX	63
4.1.3	Composição Mineralógica das Matérias-Primas	64
4.1.4	Micromorfologia e Composição Microquímica das Matérias-Primas	66
4.1.4.1	Micromorfologia e composição microquímica do RMF	66
4.1.4.2	Micromorfologia e composição microquímica dos RPCEL	67
4.1.4.3	Micromorfologia e composição microquímica do entulho	71
4.1.4.4	Micromorfologia e composição microquímica do RPC	72
4.2	Caracterização dos materiais desenvolvidos	73
4.2.1	Resistência Mecânica à Compressão Axial	74
4.2.2	Variação de Massa dos Materiais	77
4.2.3	Variações Lineares (altura e diâmetro)	81
4.2.4	Densidade dos Materiais	83
4.2.5	Absorção de água	84
4.3	Processos de formação das estruturas nos materiais	85
4.3.1	Formação de Novas Estruturas na Composição 2 (c.2)	86

4.3.1.1	Alterações mineralógicas (DRX) na c.2.....	86
4.3.1.2	Mudanças na microestrutura (MEV) da c.2	87
4.3.1.3	Composição microquímica das novas formações da c.2.....	88
4.3.2	Formação de Novas Estruturas na Composição 6 (c.6)	90
4.3.2.1	Alterações mineralógicas (DRX) na c.6.....	90
4.3.2.2	Mudanças na microestrutura (MEV) da c.6	91
4.3.2.3	Composição microquímica das novas formações da c.6.....	92
4.3.3	Formação de Novas Estruturas na Composição 10 (c.10)	96
4.3.3.1	Alterações mineralógicas (DRX) na c.10.....	96
4.3.3.2	Mudanças na microestrutura (MEV) da c.10	97
4.3.3.3	Composição microquímica das novas formações da c.10.....	98
4.3.4	Formação de Novas Estruturas na Composição 21 (c.21)	100
4.3.4.1	Alterações mineralógicas (DRX) na c.21	100
4.3.4.2	Mudanças na microestrutura (MEV) da c.21	101
4.3.4.3	Composição microquímica das novas formações da c.21.....	102
4.4	Parâmetros ambientais para os novos materiais	104
5	CONCLUSÕES	105
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	106
	REFERÊNCIAS	107
	APÊNDICE A - Dimensões do molde utilizado na pesquisa	129
	APÊNDICE B - Resultados Obtidos	131
	APÊNDICE C - Picos de DRX das composições 2,6,10 e 21	137
	APÊNDICE D - Resistência à compressão dos compósitos	142

1 INTRODUÇÃO

A transformação da matéria-prima em bens ou produtos é inevitavelmente acompanhada pela geração de resíduos, tanto no processo industrial quanto posterior ao consumo. Pode acontecer de esse resíduo ser reaproveitado, ou rejeitado pela lacuna de aplicações viáveis ao material que, dessa maneira é direcionado para áreas específicas de armazenagem, tais como aterros ou barragens.

O armazenamento irregular de resíduos pode acarretar em problemas de saúde pública, favorecendo a proliferação de animais que podem atuar como vetores de doenças para humanos. Outros danos ambientais também estão relacionados ao acúmulo ou descarte inadequado de qualquer espécie de resíduo; enchentes, poluição das águas e do ar, contaminação do solo, geração de gases do efeito estufa, dentre outros, são alguns dos problemas mais recorrentes.

Os movimentos por maior atenção com às questões ambientais começam a ser tratados com a publicação do livro *Silent Spring*, em 1962 (LYTLE, 2007). A partir daí tem-se continuidade do assunto com a Conferência de Estocolmo (1972) e a Eco-92, na cidade do Rio de Janeiro (1992), onde houve o lançamento da Agenda 21, documento que visa a busca pelo desenvolvimento econômico e social de forma sustentável. A partir do ano de 1995 iniciam-se as Conferências das Partes (COP) promovidas pela Organização das Nações Unidas (ONU), que resultaram no Acordo de Kyoto (1997) instituído na COP-3 e que foi sucedido pelo Acordo de Paris (2015), resultado das discussões na COP-21.

É patente que as ações descontroladas causadas pela intervenção humana na natureza têm gerado consequências catastróficas que clamam por mudanças nos meios de produção enquanto ainda há tempo. Cientistas de todo o mundo estão em consenso de que o “ponto sem volta” está próximo (VAN ZALINGE et al., 2017). Evidências do aquecimento global, contaminação dos lençóis freáticos, limitação do acesso à água potável e doenças se espalhando de forma mais acelerada reforçam os discursos em favor de mudanças nos padrões de consumo e produção de bens materiais.

Além do cuidado com a emissão de gases prejudiciais para a atmosfera, a redução da exploração de recursos não-renováveis, tais como minérios, agregados para construção, carvão e petróleo, é um dos objetivos que devem ser tratados para alcançar desenvolvimento mais sustentável. Esse ponto pode ser atingido com alternativas para implementação desses materiais como matéria-prima base de materiais com grande demanda de aplicação, como exemplo os materiais para a Construção Civil.

A indústria da construção civil é a maior geradora de resíduos sólidos urbanos do mundo (DENG et al., 2008) e, juntamente com a mineração, são os setores que causam o maior impacto no consumo de recursos naturais não-renováveis (FEAM, 2017; USGS, 2020).

Nos anos de 2015 e 2019 a indústria da mineração de ferro foi responsável por dois incidentes relacionados ao rompimento de barragens de armazenamento de rejeitos da mineração no Estado de Minas Gerais. O primeiro, na cidade de Mariana (2015), causou uma série de devastações, mortes, poluição de rios, flora e fauna. O descaso com os resíduos continuou, o que resultou em mais um incidente na cidade de Brumadinho (2019), ceifando mais vidas e causando danos ao ambiente.

De grande destaque na economia mundial, na indústria de papel e celulose também é observado o uso de recursos não-renováveis nas etapas de recuperação química dos reagentes utilizados no processo de preparação da polpa de celulose. Elevada quantidade de água, cal e outros produtos químicos, somados a produção de resíduos de caráter alcalino, que requerem atenção especial para a disposição final, devem ser foco de estudos que promovam produção mais sustentável.

Por outro lado, o esforço de pesquisadores na caracterização desses materiais tem possibilitado descobertas de interações físico-químicas entre esses resíduos, permitindo aplicações mais variadas que podem ser excelentes substitutos para as matérias-primas consolidadas (não-renováveis). Como resultado, há possibilidade de reduzir valores agregados aos materiais de construção, favorecendo a resolução do *déficit* habitacional nos mais diversos países, diminuir a exploração dos recursos não-renováveis a ponto de se criar um ciclo de reaplicação de resíduos ao invés de manter o extrativismo, esgotar a quantidade de aterros destinados a materiais com potencial de reuso e

amenizar os impactos ambientais causados tanto na extração como nos processos industriais de transformação.

A produção de resíduos por processos industriais é insustentável, é necessária a criação de alternativas para a reutilização dos resíduos gerados. A literatura relacionada ao reaproveitamento de resíduos industriais para utilização na construção civil é atrelada ao uso de cimento Portland ou outros reagentes que também dependem de processos industriais. Desta forma buscou-se a formulação de materiais compósitos com utilização de apenas resíduos industriais, com o estudo de suas propriedades através de combinações que favoreçam o desenvolvimento de compósitos utilizáveis pela indústria da construção civil. Com isso é possível reduzir a demanda de recursos não-renováveis destinados a produção de materiais de construção e ainda contribuir para amenizar o *déficit* habitacional (ABRAINCO, 2021) com a colocação de materiais de construção com menor custo.

Com isso foram desenvolvidos materiais puramente com base em resíduos industriais, com testes em 35 diferentes composições em que foram verificados os parâmetros de resistência mecânica à compressão, densidade, absorção de água e variações dimensionais. Em alguns compósitos a resistência mecânica ultrapassa 2 MPa aos 3 dias de cura atingindo valores próximos a 20 MPa depois de 2 anos de cura. Alterações microestruturais foram avaliadas com a utilização de técnicas de DRX, MEV e EDS, comprovando a formação de novas estruturas responsáveis pelo desenvolvimento de elevadas resistências mecânicas, teores de absorção de água entre 18 e 26%, variações dimensionais desprezíveis e densidades na ordem de 1,70 g/cm³.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver novas composições de materiais sustentáveis de concreto sem cimento Portland, usando como matérias-primas rejeitos de beneficiamento de minério de ferro, produção de papel e celulose, entulhos e resíduo da produção de cal.

1.1.2 Objetivos específicos

- Pesquisar as composições química, mineralógica, granulométrica e morfológica dos resíduos industriais utilizados como matéria-prima;
- Avaliar as propriedades mecânicas e físico-químicas das amostras de concreto sem cimento Portland com diferentes composições e percentuais entre as matérias-primas propostas;
- Estudar os processos físico-químicos de formação das amostras durante dois anos de hidratação e cura em ambiente aberto com métodos modernos de microscopia (MEV), difratometria (DRX) e espectroscopia (EDS);
- Escolher as diferentes variantes de aplicação dos materiais desenvolvidos do ponto de vista técnico e ambiental.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho tem continuidade no capítulo 2, com uma revisão da literatura científica relacionada ao tema da pesquisa com abordagem inicial sobre o rejeito do beneficiamento do minério de ferro (RMF), seguida pelos resíduos da produção de papel e celulose (RPEC), os entulhos da indústria da construção civil (RCC ou RCD) e o resíduo da produção de cal (RPC). Buscou-se evidenciar os pontos que tem relevância no comportamento físico, químico e morfológico de cada resíduo.

As peculiaridades relativas ao programa experimental, tais como os procedimentos de caracterizações das matérias-primas, testes químicos, físicos e morfológicos, são tratadas no capítulo 3. Os resultados são expostos no capítulo 4, ali discutidos os dados obtidos em comparação com as informações levantadas na bibliografia consultada. As conclusões do estudo e sugestões para trabalhos que possam ser desenvolvidos neste tema são elencadas no capítulo 5, que precede as referências consultadas durante a pesquisa. Ao final são incluídos Apêndices relacionados aos materiais desenvolvidos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são abordadas as especificidades relacionadas aos resíduos industriais objetos deste estudo. Procurou-se elucidar concisamente os aspectos relacionados aos processos de geração, classificações físicas, químicas, morfológicas, normativas, dentre outros dados que atribuem maior significância ao assunto.

Informações sobre os resíduos sólidos são tratadas genericamente no primeiro momento deste capítulo, que segue a abordagem com os resíduos do beneficiamento de minério de ferro (RMF), resíduos do processo de recuperação química na produção da celulose (RCEL), entulhos (RCD) e os resíduos da produção de cal (RPC).

As aplicações na incorporação em compósitos ou no desenvolvimento de novos materiais, são providas como finalização deste capítulo, compilando as bases necessárias para melhor entendimento e aplicação do programa experimental e, mais adiante, na comparação dos conceitos que fundamentam a discussão dos resultados.

2.1 Rejeito do beneficiamento do minério de ferro

Minérios são a matéria-prima para materiais de interesse econômico, como ferro, alumínio, ouro, platina, dentre outros. São considerados minérios de ferro os minerais que contêm em sua composição química quantidade do elemento ferro (Fe) que possa ser extraída de forma economicamente viável (LUZ; LINS, 2004; CARVALHO et al., 2014). Uma lista desses minerais é apresentada no Quadro 1. O ferro é o quarto elemento químico mais encontrado na crosta terrestre (em torno de 5%), ficando atrás apenas do oxigênio (46,6%), silício (27,72%) e alumínio (8,13%). A maior parte dos minerais que contêm ferro com viabilidade econômica para mineração faz parte do grupo dos óxidos, ocorrendo também na forma de sulfatos e carbonatos (MOURÃO, 2008; CARVALHO et al., 2014).

Quadro 1 - Minerais com potencial econômico para produção de ferro (Fe)

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico de ferro (%)*
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8
Ilmenita	FeTiO_3	36,8
Siderita	FeCO_3	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0

Nota: *Percentual em massa

Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2014)

Dos minerais apresentados no Quadro 1 os mais explorados são a magnetita e a hematita por possuírem maior conteúdo teórico de ferro (CARVALHO et al., 2014).

No Brasil a região do Estado de Minas Gerais já tinha histórico de atividade mineratória desde o século XVII, com exploração de ouro e diamante. O minério de ferro foi descoberto na região de Minas Gerais já no final do século XVI; no entanto, a partir do ano de 1910, foi descoberta a região conhecida atualmente por Quadrilátero Ferrífero, que compreende as cidades de Belo Horizonte, Itabira, Ouro Preto e Congonhas. A exploração dessa região teve início no ano de 1942, com a criação da Companhia Vale do Rio Doce (desde o ano de 2007 denominada apenas 'Vale'), pelo então presidente Getúlio Vargas (VALE, 2012). Outro local de grande interesse econômico para a exploração do minério de ferro é a conhecida Serra de Carajás, no sudeste do Estado do Pará; o minério de ferro encontrado nessa região é conhecido pelo elevado teor de ferro em sua constituição, o maior teor encontrado entre todos os continentes (FONTES, 2013). Mundialmente as maiores reservas desse minério são encontradas no Brasil, China, Austrália, Rússia, Ucrânia, Estados Unidos, Canadá e África do Sul, sendo a China o maior produtor mundial, seguido pelo Brasil que se destaca pela qualidade de seu minério (IBRAM, 2018; USGS, 2020).

O processo de beneficiamento, ou concentração, do minério de ferro, ocorre posterior a extração do material (lavra) dos depósitos geológicos, consistindo no tratamento industrial de preparação granulométrica que, purifica ou enriquece os minérios, por processos físicos e químicos tais como britagem, moagem, gravimetria, separação magnética, flotação, dentre outros. O

procedimento se dá em meio aquoso e divide o mineral bruto em concentrado e rejeito, que por fim é destinado para armazenamento em barragens (ARAÚJO, 2006; LIMA, 2006; MILONAS, 2006; DNPM, 2012; ANDRADE, 2014; FERRANTE, 2014).

Desse processo o material resultante é o minério de ferro concentrado, que é destinado à comercialização e a parte que não tem valor comercial, que podem ser dispostas em pilhas quando secos ou em barragens de rejeitos, que é a principal maneira de serem armazenados (cerca de 85% do total) (FEAM, 2011; ANDRADE, 2014; ELÓI, 2020; CECHIN, 2021). Cerca de 0,5 toneladas de rejeitos são produzidas para cada tonelada de minério de ferro concentrada (BOSCOV, 2008); considerando que a produção mundial média de minério de ferro é da ordem de 2,5 bilhões de toneladas, é possível estimar que anualmente 1,25 bilhões de toneladas de rejeito são geradas. No Brasil, a produção de minério de ferro é da ordem de 480 milhões de toneladas/ano, ou seja, aproximadamente 240 milhões de toneladas/ano de rejeitos são armazenadas nas 211 barragens espalhadas pelo país (ANM, 2020; FEAM, 2018; USGS, 2020; DNPM, 2020). Vale lembrar que cerca de 21% dessas barragens encontram-se desativadas e cerca de 45 tem risco de desmoronamento classificado de médio a alto (FEAM, 2010; ARÊDES, 2016; ANM, 2020).

O armazenamento em barragens de rejeitos, quando o projeto, concepção e operação são inadequados, está relacionado a grandes impactos ambientais e sociais, citando o desmatamento, poluição de águas superficiais e subterrâneas, geração de poeira, impacto visual e o risco de acidentes por desmoronamento, com o potencial de danificar a fauna, flora, bacias hidrográficas e por fim ceifar a vida humana (SILVA, 2007; DUARTE, 2008; CASTRO; NALINI JR; LIMA, 2011; ANDRADE, 2014).

Inúmeras tragédias relacionadas ao rompimento de barragens de rejeitos de minérios ocorreram no mundo, como por exemplo em Barahona, República Dominicana em 1928, com o derramamento de 4 milhões de toneladas de rejeitos e 54 mortes. No ano de 1965 foi a vez da barragem de El Cobre no Chile, com 2 milhões de toneladas que se deslocaram por 12 km, causando mais de 200 mortes (VERDUGO, 2002). Na região de Trento (Itália), duas barragens despejaram 240 mil m³ de rejeitos à cerca de 4 km de distância em 1985; No Canadá, na Mina de Sullivan, em 1991, causando inúmeros estragos (DAVIES;

McROBERTS; MARTIN, 2002); a barragem de Merriespruit na África do Sul em 1994, com o despejamento de 600 mil m³ e 17 mortes (FOURIE; BLIGHT; PAPAGEORGIU., 2001); a mina de Los Frailes na Espanha (1998) com cerca de 4 milhões de m³ de rejeitos (ACHTERBERG et al., 1999); e em 2014 no Canadá com o despejo de 5 milhões de m³ no rio Iskut, causando danos imensuráveis (BAKER; SWEENEY; MCLROY, 2014).

O Brasil apresenta o maior número de casos de ruptura de barragens, com cerca de 350 mil m³ de rejeitos derramados na Mina de Fernandinho, município de Itabirito (MG) em 1986 (PARRA; LASMAR, 1987); e outros acidentes que aconteceram em Rio das Pedras (MG) em 1997, Macacos (MG) em 2001, Mirai (MG) em 2007, Herculano (MG) em 2014. Dois grandes acidentes de grande repercussão no mundo foram o de Mariana (MG) no ano de 2015, cujos rejeitos são objeto de estudo neste trabalho e mais recentemente, no município de Brumadinho (MG) em 2019 (CRUZ, 2014; ROCHE; THYGESEN; BAKER, 2017; ELÓI 2020; PEDROSO, 2020; PEDROSO, 2020; CECHIN, 2021).

No art. 3º da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) é estabelecido que um rejeito deve ter todo o tratamento e recuperação “economicamente viáveis”, antes de sua disposição final adequada no ambiente. Isso indica que os rejeitos dispostos em barragens devem ser assim acomodados por pouco tempo, pois há perigo nesse tipo de armazenamento, apresentando riscos ao ambiente e aos seres humanos (DNPM, 2016). O risco que essas barragens apresentam, tanto pelo que tem mostrado nos números de acidentes quanto àqueles que se tem estudo de instabilidade ou possibilidade de apresentar problemas deve ser levado em conta no estabelecimento de legislações no tocante ao reaproveitamento desse resíduo.

Aliado a isso, inúmeros estudos têm sido conduzidos no tocante a esse reaproveitamento (PRESOTTI, 2002; SANTOS, 2003; PEREIRA, 2005; CHAVEZ, 2009; WOLFF, 2009; CAMPANHA, 2011; BASTOS, 2013; FONTES, 2013; ANDRADE, 2014; FERRANTE, 2014; SILVA, 2014; DANTAS, 2015; ARÊDES, 2016; PRATES, 2018; ELÓI, 2020; PEDROSO, 2020; CECHIN, 2021), tanto para recuperação de parte do minério de ferro contido nessas lamas, devido à escassez que as jazidas tem apresentado em quantidade e qualidade de minério, quanto para produção de materiais de construção que contribuem para diminuição da extração de outras matérias-primas, a exemplo dos

agregados, que são os produtos de maior extração mundial (VALE, 2012; IBRAM, 2019).

Nos estudos referenciados encontram-se caracterizações de ordem física e química dos rejeitos de minério de ferro, armazenados em barragens. No Quadro 2 são exibidas a composição química e mineralógica avaliadas pelos diversos autores em questão, respectivamente.

Quadro 2 - Composição química e mineralógica em RMF

Autores	Fe₂O₃	SiO₂	Al₂O₃	Outros	P.F.*	Minerais principais**
Chaves (2009)	71,30	17,36	9,74	1,60	-	H, Go, C, Mt, Pi
Nocitti (2011)	53,83	41,15	1,76	0,77	2,59	H, Go, Q
Bastos (2013)	45,92	24,19	4,82	-	-	H, C, Q, Gi
Andrade (2014)	44,68	49,67	4,89	0,82	-	H, Go, C, Q
Ferrante (2014)	45,75	24,10	4,80	-	4,06	H, Q
Silva (2014)	42,40	47,90	5,61	1,30	2,77	H, C, Q
Elói (2020)	67,40	21,50	9,10	-	-	H, Go, C, Q
Pedroso (2020)	48,10	41,90	6,30	0,62	3,08	H, Go, C, Q, Mt
Cechin (2021)	35,40	58,60	3,20	0,61	2,19	H, Q, Cb
Média	47,98	37,33	4,91	0,95	2,60	-

Nota: *P.F. (perda ao fogo) corresponde ao percentual de perda em massa pela volatilização de compostos como matéria orgânica e carbonatos presentes nas amostras.

****Legenda: H-Hematita; Go-Goethita; C-Caulinita; Q-Quarzo; Gi-Gibbsita; Mt-Magnetita; Pi-Pirita; Cb-Cristobalita.**

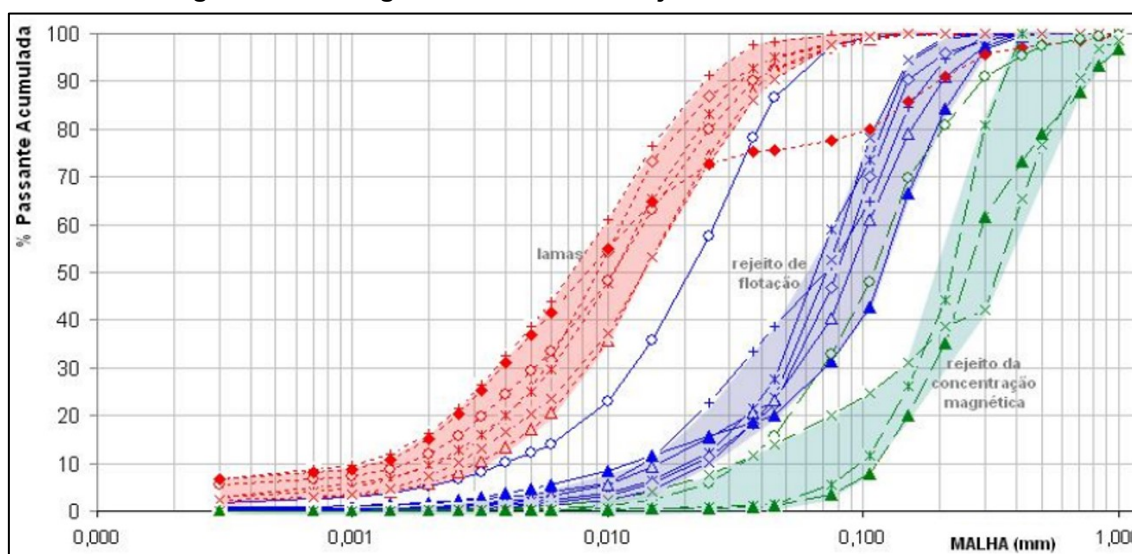
Valores percentuais em relação à massa das amostras.

Fonte: Autoria própria

Observa-se que os rejeitos de minério de ferro são compostos basicamente por Ferro, Silício e Alumínio, que correspondem à composição química dos principais minerais existentes nesse tipo de rejeito. Como representantes dos óxidos de ferro estão a hematita e a goethita e entre os silicatos o quartzo e o argilomineral caulinita. É interessante notar que a hematita pode sofrer hidratação em barragens com drenagem deficiente, se transformando em goethita, conforme observado por Martins (2000), Motta et al. (2002) e Barbosa et al. (2009). Esse comportamento está consoante à presença do mineral em grande parte das amostras estudadas.

A classificação granulométrica dos rejeitos é dependente do processo de enriquecimento aplicado. Na Figura 1, Guimarães (2011) expõe a granulometria observada em rejeitos advindos dos processos de deslamagem (mais finos), flotação (intermediários) e separação magnética (mais grossos).

Figura 1 - Curva granulométrica dos rejeitos de minério de ferro



Fonte: Guimarães (2011)

Silva (2014) inclui uma análise química dessas frações, conforme pode ser observado no Quadro 3, complementada com uma análise mineralógica por DRX.

Quadro 3 - Composição química das frações dos Rejeitos de Minério de Ferro

Rejeitos gerados por processos	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Outros	P.F.*
Flotação	15,02	84,20	0,45	0,24	0,09
Finos de separação magnética e deslamagem	42,40	47,90	5,61	1,32	2,77
Grossos de separação magnética	8,38	90,40	0,43	0,57	0,22

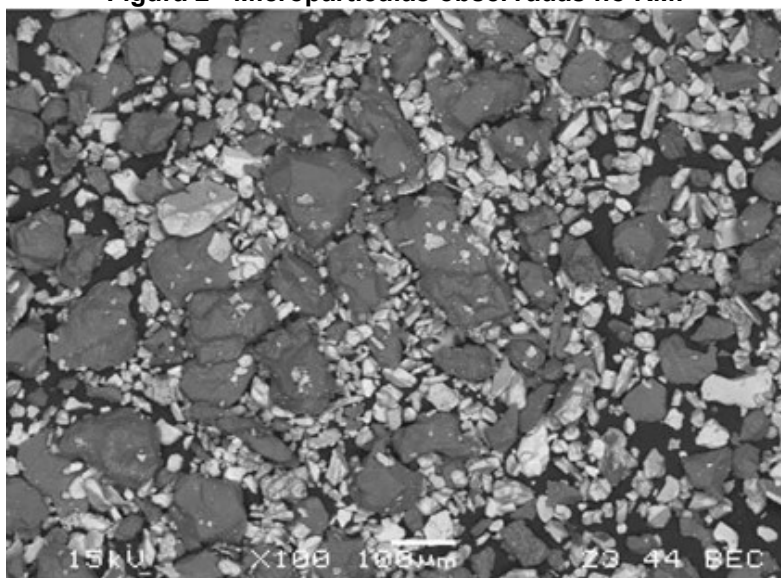
Nota: *P.F. (perda ao fogo) corresponde ao percentual de perda em massa pela volatilização de compostos como matéria orgânica e carbonatos presentes nas amostras. Valores percentuais em relação à massa das amostras.

Fonte: Adaptado de Silva (2014)

A autora destaca que a fração mais grossa apresentou picos de hematita, certa presença de quartzo e caulinita. O argilomineral (caulinita) ainda é presente na fração mais fina, porém não na intermediária (flotação), que evidencia picos mais pronunciados de quartzo e hematita. Comparando a densidade dessas frações, a autora observa que os rejeitos finos (por separação magnética) exibem valores maiores dessa propriedade (3,325 g/cm³), enquanto os intermediários (2,875 g/cm³) e os mais grossos (2,757 g/cm³) corroboram com os valores obtidos pela análise química, relacionando as menores densidades à menor presença de ferro.

A morfologia das partículas dos rejeitos avaliada por Pereira (2005) pode ser observada pela micrografia da Figura 2, com grãos de quartzo correspondendo à fase mais grossa e escura e, hematita à fase mais fina e clara.

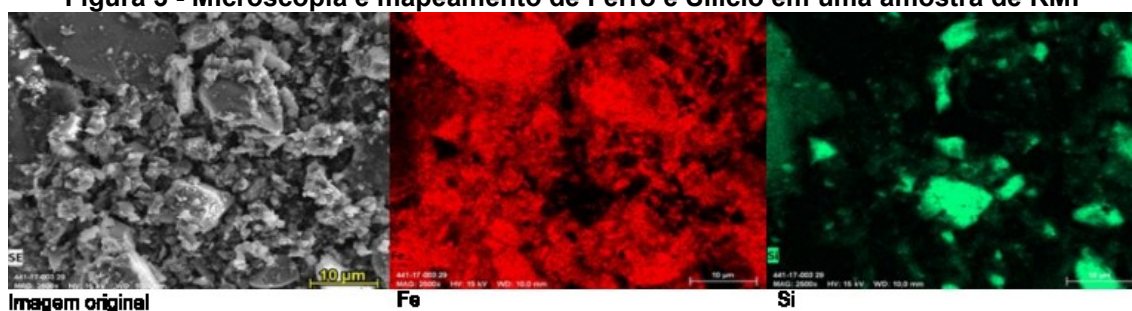
Figura 2 - Micropartículas observadas no RMF



Fonte: Adaptado de Pereira (2005)

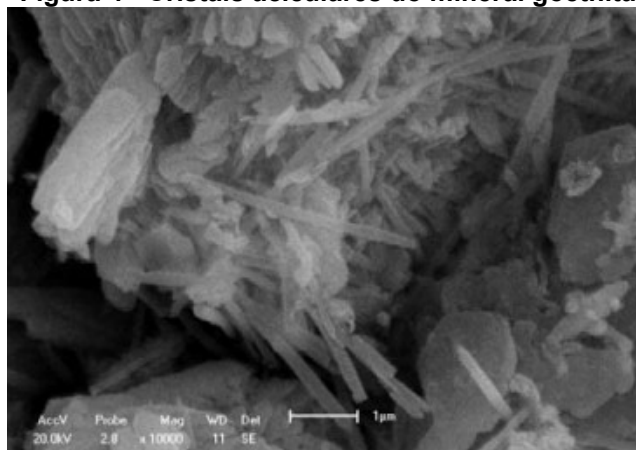
Na Figura 3 pode ser observada a concentração dos principais elementos químicos observados em uma análise de distribuição de elementos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), sendo a forma de distribuição do elemento ferro (Fe) na cor vermelha e a maneira como se distribui o silício (Si) na cor verde. Esses resultados corroboram com aqueles obtidos por outros autores em relação ao silício se apresentar na forma de grãos de quartzo com o ferro mais difundido na matriz nas formas principais de hematita e goethita. Esse último pode ser observado pela micrografia da Figura 4.

Figura 3 - Microscopia e mapeamento de Ferro e Silício em uma amostra de RMF



Fonte: Adaptado de Prates (2018)

Figura 4 - Cristais aciculares do mineral goethita



Fonte: Adaptado de Chaves (2009)

As caracterizações desse material o apresentam de forma similar àqueles utilizados como matéria-prima na indústria da construção civil (ZHANG et al., 2006; COELHO, 2008). Essa peculiaridade indica que os rejeitos da mineração do ferro têm potencial para serem reaproveitados como matéria-prima de fabricação de outros materiais compósitos similares aos que são usualmente empregados na construção.

Há estudos que apontam o reaproveitamento do material como reforço na estrutura de pavimentos (BASTOS, 2013; ARÊDES, 2016), fabricação de cerâmicas (DAS; KUMAR; RAMACHANDRARAO, 2000; NOCITTI, 2011; CECHIN, 2021), utilização como agregados em argamassas e concretos (SILVA, 2014; FONTES et al., 2014), formação de geopolímeros (ELÓI, 2020) e blocos de alvenaria sem adição de cimento (PEDROSO, 2020; PEDROSO, 2020). O reaproveitamento desse material com a finalidade de recuperação de ferro para comercialização também é ponto de interesse entre a comunidade acadêmica, porém dificuldades com as operações relacionadas à grande quantidade de finos que esse material possui são inconvenientes que ainda inviabilizam os processos (PRAKASH et al., 1999; SRIVASTAVA et al., 2001).

2.2 Resíduos da produção de papel e celulose

A invenção chinesa do papel proporcionou grandes avanços para a humanidade, que inicialmente utilizava uma mistura de fibras vegetais como matéria-prima e depois, no século XVIII, a extração dessa fibra, conhecida como celulose da madeira. Os processos de trituração e branqueamento da pasta

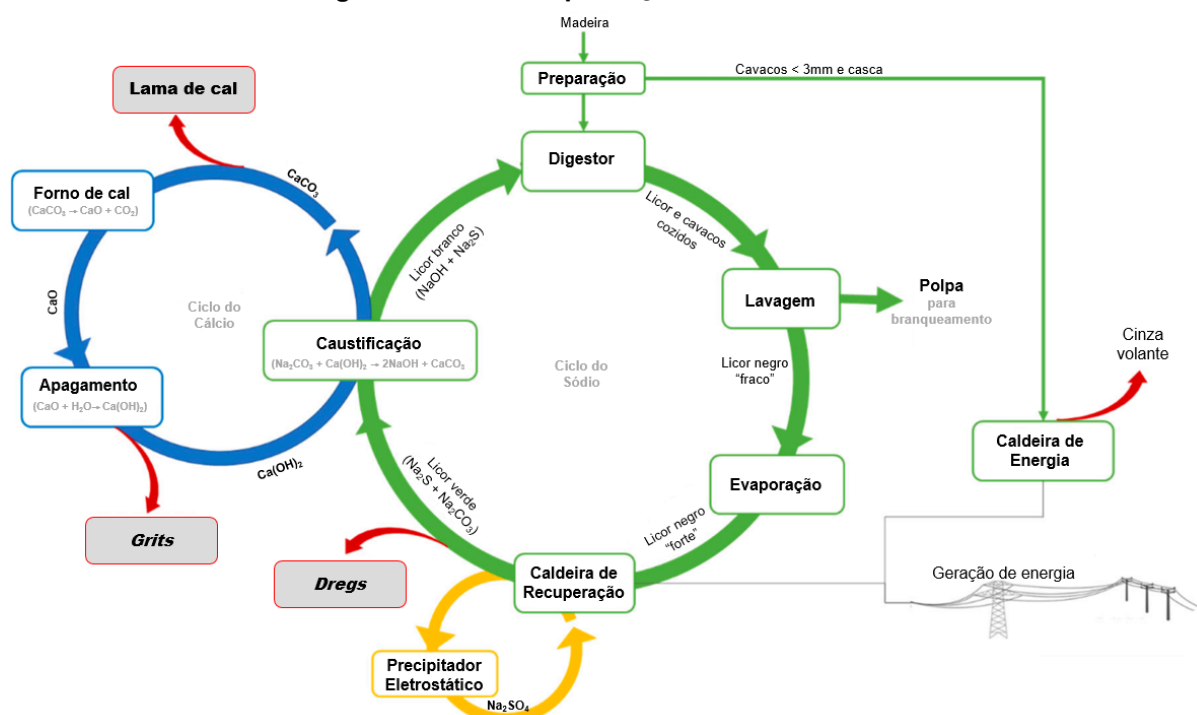
foram evoluindo, passando-se a utilizar a soda cáustica para formação da pasta celulósica.

As primeiras árvores utilizadas foram o pinheiro e o abeto, com posterior utilização do eucalipto, que possibilitou aumento na escala de produção, diminuindo custos e popularizando o material. No Brasil, o grupo Klabin se estabeleceu na cidade de Telêmaco Borba (PR) na década de 1930, e é a maior indústria de papel e celulose do país, contribuindo para colocar o país entre os maiores produtores do mundo nos dias de hoje (HILGEMBERG; BACHA, 2001). A celulose apresenta grande versatilidade para uso, como em embalagens, revestimentos em residências e até mesmo mobiliário para casas.

A produção se inicia pela extração e transporte das toras das árvores, que são descascadas e encaminhadas para picamento, transformadas em pequenos pedaços denominados cavacos com dimensões entre 3 a 8 mm. A casca e os cavacos de tamanho inferior a 3 mm são utilizados como combustível no aquecimento das caldeiras e geração de energia.

A sequência consiste no polpamento, que é a separação da lignina das fibras da celulose. Essa etapa pode acontecer de diversas maneiras: física, mecânica, química e até mesmo por degradação biológica (ainda em estudo). Este processo é empregado em cerca de 80% das indústrias no mundo de ordem química, e é denominado processo *Kraft*, palavra de origem alemã relacionada à resistência e força, característica conferida às fibras da celulose pela adição do reagente seletivo de sulfeto de sódio (Na_2S), que protege a celulose do ataque da soda (NaOH) e permite a recuperação química de até 95% dos reagentes empregados no processo (Figura 5) (MARTINS et al., 2007; KINNARINEN et al., 2016).

Figura 5 - Ciclos da produção de celulose



Fonte: Adaptado de Quina e Pinheiro (2020)

No polpamento, o material é impregnado por pressão (entre 8,0 e 10,0 kgf/cm²) com uma solução alcalina de NaOH e Na₂S, denominada liquor branco, e encaminhado para cozimento nos digestores a temperatura de 170 °C. Nesta etapa ocorre a dissolução da lignina que, ao reagir com o liquor branco se transforma em liquor negro “fraco”, constituído basicamente de matéria orgânica e sais alcalino ferrosos com concentração aproximada de 15% de sólidos. Esse material é concentrado em liquor negro “forte” pelo processo de evaporação, chegando ao teor de 80% em sólidos. A polpa é encaminhada para lavagem, branqueamento, secagem e comercialização, enquanto o liquor negro é incinerado nas caldeiras para formação do *smelt*, devido a seu alto poder calorífico (MARTINS et al., 2007; CASTRO, 2009; QUINA; PINHEIRO, 2020).

O *smelt* (fundido) é encaminhado para clarificação, que consiste em sua solubilização com o liquor branco “fraco”, gerando o liquor verde e impurezas sólidas, que formam o ‘resíduo do liquor verde’ (*green liquor dregs*). Este liquor é posteriormente lavado para maior recuperação de sódio (Na) no sistema.

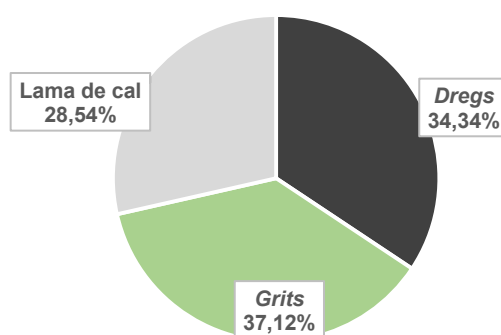
A recuperação química é continuada com o processo de caustificação com adição de cal hidratada ao liquor verde clarificado, recuperando-se assim o liquor branco e uma lama branca que é sedimentada e lavada. A água de lavagem dessa lama é o liquor branco “fraco”, usado anteriormente no processo de

clarificação do *smelt*. A lama branca (lama de cal) proveniente da lavagem, composta essencialmente de calcita (CaCO_3), é encaminhada ao forno para calcinação e recuperação da cal virgem utilizada no processo. Essa lama é descartada como resíduo quando a presença de impurezas inviabiliza o processo de calcinação ou, quando produzida em excesso. A cal virgem recuperada é encaminhada para hidratação (extinção ou apagamento), resultando na cal hidratada (Ca(OH)_2) e um material não reativo insolúvel, retirado do processo na forma de resíduo da hidratação da cal, o *grits*.

Os resíduos citados são objeto de preocupação na indústria de papel e celulose. Com elevado volume de produção são comumente descartados em aterros, utilizados na correção de solos para agricultura ou silvicultura e na pavimentação de estradas de chão (QUINA; PINHEIRO, 2020).

A quantidade desse material pode ser estimada em toneladas de celulose seca ao ar (*Air Dried Pulp ton - ADPt*) (BRACELPA, 2013). Os resíduos gerados correspondem a 14,8 kg/ADPt de *dregs*, 16,0 kg/ADPt de *grits* e 12,3 kg/ADPt de lama de cal. Essa estimativa é baseada em um levantamento na indústria brasileira de papel e celulose, entre os anos de 1970 e 2011, que permite o cálculo percentual de *dregs*, *grits* e lama de cal em relação ao total geral de resíduos produzidos, conforme representado na Figura 6.

Figura 6 - Percentual de *Dregs*, *Grits* e Lama de cal na indústria de celulose



Fonte: Adaptado de BRACELPA (2013)

Características gerais relacionadas a esses resíduos, anotadas com base em dados obtidos em periódicos internacionais, são individualmente expostas nos subitens a seguir, tendo em mente que suas composições variam de acordo com o período de tempo e o processo empregado (KINNARINEN et al., 2016).

2.2.1 Dregs

Os *dregs* são resultantes da sedimentação dos sólidos do processo de clarificação do licor verde, retirados de forma a evitar problemas como a perda de eficiência na caustificação. Sua coloração é escura e granulometria com a parcela de 90% inferior a 1,19 mm (FOELKEL, 2013). No Quadro 4 são indicados os componentes químicos relatados e a mineralogia identificada por difratometria de raios X (DRX).

Quadro 4 - Análise química (FRX) de *dregs*

Óxidos (%) [*]	Martins et al. (2007)	Cabral et al. (2008)	Cusma (2015)	Santos et al. (2019)	Jia et al. (2019)
CaO	32,39	34,9	37,4	33,00	34,30
MgO	1,41	5,94	5,10	4,65	10,90
SiO ₂	0,80	-	2,80	2,35	0,23
Al ₂ O ₃	0,38	0,47	0,50	0,69	1,94
Fe ₂ O ₃	1,01	0,59	0,50	0,65	0,61
Na ₂ O	1,316	9,49	4,50	11,37	2,10
K ₂ O	0,15	0,37	0,30	1,03	< 0,10
P ₂ O ₅	0,14	0,37	0,20	0,33	-
TiO ₂	-	-	-	< 0,1	-
MnO	0,86	0,06	0,30	0,37	4,21
SO ₃	0,98	-	1,60	2,82	3,60
**P.F.	60,56	-	46,00	42,10	-

Nota: *Percentuais de óxidos em relação à massa.

****P.F. (perda ao fogo) corresponde ao percentual de perda em massa pela volatilização de compostos como matéria orgânica e carbonatos presentes nas amostras.**

Fonte: Autoria própria

Os minerais de calcita (MARTINS et al., 2007; CUSMA, 2015; JIA et al., 2019; SANTOS et al., 2019), quartzo (CUSMA, 2015), dolomita (CUSMA, 2015; MARTÍNEZ-LAGE et al., 2016), cesanita (MARTÍNEZ-LAGE et al., 2016), natrita (Na₂CO₃) (CASTRO et al., 2009; SIQUEIRA; HOLANDA, 2013; MARTÍNEZ-LAGE et al., 2016; SANTOS et al., 2019), pirssonita (Na₂Ca(CO₃).2H₂O), manganita (Mn₄O₈H₄) (JIA et al., 2019), sesquicarbonato sódico (Na₃H(CO₃)₂) e brucita (GOMES et al., 2020) são observados na composição mineralógica dos *dregs*.

O pH desse resíduo varia de 12,2 (CABRAL et al., 2008) a 12,93 (JIA et al., 2019) e a densidade varia de 2,40 g/cm³ (CHERIAN; SIDDIQUA, 2019) a 2,83 g/cm³ (MODOLO et al., 2014). A presença de metais pesados, como níquel e zinco foi constatada, porém com baixa mobilidade dos metais (JIA et al., 2019).

2.2.2 Grits

O processo de extinção da cal (*slaking*), ou apagamento como é considerado na indústria da celulose, gera um material não reativo e insolúvel que é retirado na forma de grãos (*grits*), conhecido por *slaking grits* na literatura internacional. A composição química relatada por cinco autores é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5 - Análise química (FRX) do grits

Óxidos (%)*	Martins et al. (2007)	Cusma (2015)	Santos et al. (2019)	Saeli et al. (2019)	Piazza (2020)
CaO	34,62	50,8	55,8	49,45	53,9
MgO	0,92	0,30	0,47	0,45	1,20
SiO ₂	3,84	3,50	1,31	0,47	2,30
Al ₂ O ₃	1,72	0,40	0,42	0,29	0,50
Fe ₂ O ₃	1,03	0,40	< 0,10	0,05	0,30
Na ₂ O	6,44	4,50	0,60	4,52	3,00
K ₂ O	0,43	0,30	< 0,10	0,27	0,40
P ₂ O ₅	0,47	0,50	0,65	0,38	0,10
TiO ₂	0,21	-	< 0,10	-	-
MnO	0,36	-	< 0,10	-	< 0,10
SO ₃	1,62	1,70	0,11	1,86	0,70
**P.F.	13,70	37,08	40,10	41,10	37,34

Nota: *Percentuais de óxidos em relação à massa.

**P.F. (perda ao fogo) corresponde ao percentual de perda em massa pela volatilização de compostos como matéria orgânica e carbonatos presentes nas amostras.

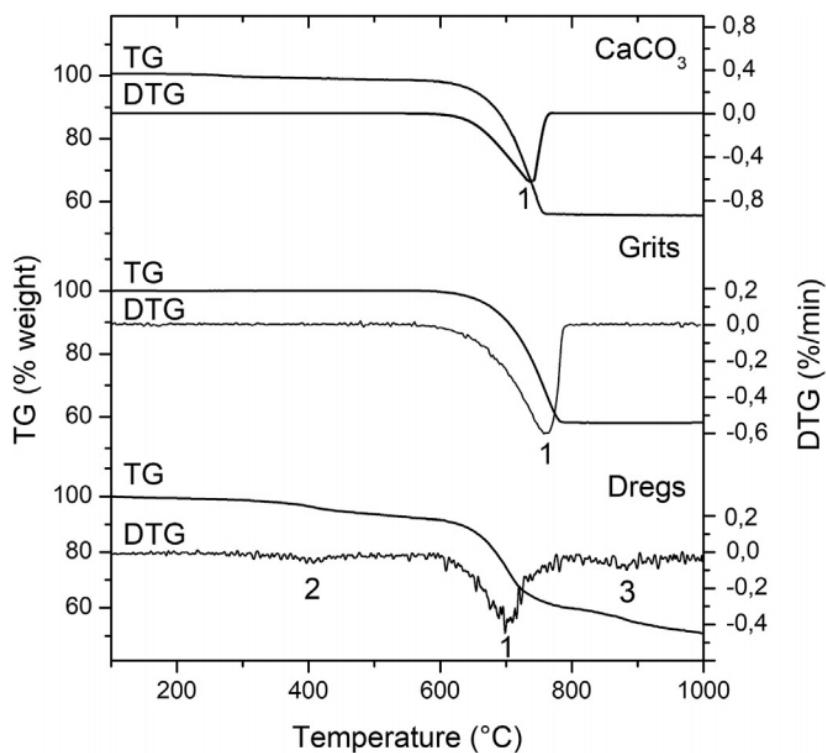
Fonte: Autoria própria

A composição mineralógica, identificada por DRX, é basicamente calcita (MARTINS et al., 2007; SAELI et al., 2019; SANTOS et al., 2019), associada a minerais de dolomita (MARTÍNEZ-LAGE et al., 2016, quartzo (CUSMA, 2015; SANTOS et al., 2019), pirssonita, portlandita, wustita (FeO), larnita (Ca₂SiO₄) e brucita (MARTINS et al., 2007). Há forte semelhança entre a composição dos *dregs* e *grits*, o que pode ser observado nas curvas de decomposição térmica da Figura 7, comparadas com a curva da calcita. Sua morfologia também é identificada como partículas lisas com formato irregular, típico do observado na calcita (SIQUEIRA; HOLANDA, 2013).

Cerca de 70% de suas partículas está entre as frações de 0,425 mm e 4,75 mm. A umidade varia entre 15,7% a 28,4%, exibindo pH entre 12,6 e 13,1 e densidade no intervalo de 2,66 g/cm³ a 2,703 g/cm³ (ADAMS, 1997; SANTOS et al., 2019; QUINA; PINHEIRO, 2020). Este resíduo foi classificado como não

inerte e não perigoso (II A) de acordo com o estabelecido na NBR 10004/2004, (MACHADO et al., 2008; SIQUEIRA; HOLANDA, 2013).

Figura 7 - Curvas de decomposição térmica da calcita, dregs e grits



Fonte: Santos et al. (2019)

2.2.3 Lama de Cal

A lama obtida juntamente com o licor branco após a caustificação do licor verde clarificado é lavada e encaminhada para o forno de calcinação para a recuperação da cal virgem. Esta lama pode conter quantidade de impurezas que inviabilizam a continuidade dos processos de recuperação dos reagentes ou ser produzida excessivamente ou pela interrupção do forno de cal para manutenções, inserindo cal comprada no processo, induzindo à necessidade de descarte desse material como um resíduo industrial (MARTINS et al., 2007; WOLFF, 2008; QUINA; PINHEIRO, 2020).

A composição mineralógica deste resíduo exibe cerca de 85 a 95% de calcita (CaCO_3), podendo conter de 5 a 15% de compostos inertes tais como silicatos, fosfatos e óxido de magnésio (MARTINS et al., 2007; WOLFF, 2008; CABRAL et al., 2008). A composição química dessa lama pode ser verificada no Quadro 6.

Quadro 6 - Análise química (FRX) da lama de cal

Óxidos (%)*	Mahmoudkhani et al. (2004)	Martins et al. (2007)	Qin et al. (2015)	Cusma (2015)	Simão et al. (2018)
CaO	54,10	36,02	44,4 - 52,0	54,5	57,12
MgO	0,86	1,30	0,06 - 3,4	0,5	0,91
SiO ₂	0,34	0,37	3,4 - 11,0	0,2	3,58
Al ₂ O ₃	0,07	0,4	0,5 - 1,4	0,1	0,07
Fe ₂ O ₃	0,15	0,37	0,2 - 1,2	0,1	0,20
Na ₂ O	0,91	0,82	-	0,7	2,33
K ₂ O	0,06	-	-	-	0,26
P ₂ O ₅	0,96	0,35	-	0,4	0,03
TiO ₂	-	-	-	-	-
MnO	0,09	0,45	-	-	-
SO ₃	-	0,54	-	0,2	0,40
**P.F.	-	59,00	31,5 - 43,5	43,06	-

Nota: *Percentuais de óxidos em relação à massa.

**P.F. (perda ao fogo) corresponde ao percentual de perda em massa pela volatilização de compostos como matéria orgânica e carbonatos presentes nas amostras.

Fonte: Autoria própria

O pH da lama é de 12,6 (PÖYKIÖ; NURMESNIEMI, 2008) e a densidade é próxima a 2,43 g/cm³ (MODOLO et al., 2014). A umidade pode apresentar intervalo de variação entre 28% e 60% (QUINA; PINHEIRO, 2020).

Os resíduos gerados na indústria de papel e celulose, *dregs*, *grits* e lama de cal, apresentam características físico-químicas semelhantes àquelas das matérias-primas utilizadas na indústria da Construção Civil, tornando esses materiais atrativos quando intenta-se diminuir a extração mineral de minerais usados na cadeia produtiva de materiais para construção civil, mitigando os efeitos que a produção desses resíduos tem no ambiente.

2.3 Entulho: mistura dos resíduos da construção

Os resíduos da construção civil (RCC), também classificados como entulhos ou resíduos da construção e demolição (RCD), são materiais resultantes, desde a preparação e escavação de terrenos, até àqueles empregados diretamente em obras, que são materiais cerâmicos, argamassas, concretos, tintas, asfaltos, madeiras, fiação elétrica, gesso, vidros, dentre outros (CONAMA, 2002).

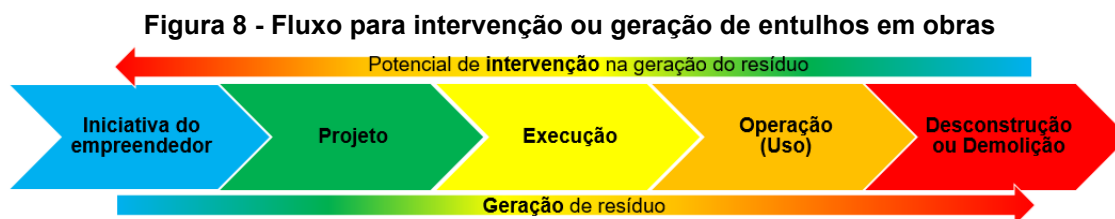
O elevado crescimento das cidades, diretamente acompanhado pela construção civil, ocasiona uma série de problemas do processo de urbanização,

evidenciando questões relativas aos resíduos sólidos (BROWN; MILKE; SEVILLE, 2011; ASLAM; HUANG; CUI, 2020). Nesse panorama, a construção civil desempenha papel significativo, podendo ser responsável por 36% do montante global de resíduos sólidos produzidos no mundo (UNEP; ISWA, 2015), valores que podem ser quinze vezes maiores que o total de resíduos sólidos municipais, como no caso da China (DUAN et al., 2019).

Incidentes em barragens de contenção de rejeitos de minério de ferro foram previamente citados, o que não se imagina é a ocorrência de fatos semelhantes devido à destinação incorreta ou mal dimensionamento de aterros que acomodam os resíduos da construção civil. O colapso de um depósito contendo aproximadamente 10 milhões de toneladas de entulhos causou a morte de 73 pessoas na China; o acúmulo indiscriminado de entulhos, juntamente com resíduos municipais, acarretou em uma enchente que, além dos danos econômicos, deu fim a 400 vidas na Índia; um deslizamento de aterro de entulhos ocasionou a morte de 115 pessoas no Sri Lanka em 2017 (DUAN et al., 2019). Impactos relacionados à toxicidade de materiais presentes nos entulhos, poluição do ar pela poeira, do solo e da água pela lixiviação provocada pelas chuvas e emissão de sulfetos também são preocupantes, exigindo intervenções (YANG et al., 2006).

A geração dos entulhos pode acontecer em todas as etapas relacionadas a um projeto, desde sua idealização, construção, no uso até a demolição, onde haverá maiores volumes dos resíduos. Desastres naturais, como furacões ou inundações também podem gerar volume considerável, aumentando a preocupação dos governos com a correta destinação desses materiais (PINTO, 1999; BROWN; MILKE; SEVILLE, 2011).

Na Figura 8 é exposto o fluxo do desenvolvimento de obras, ilustrando-se as etapas com maior possibilidade de intervenção e aquelas em que se observa aumento na quantidade de entulhos gerados. Detalhes como o tipo de material utilizado, se a produção se dará *in loco* ou pré-moldada e o nível de especialidade de mão de obra são exemplos de decisões iniciais em conjunto ao empreendedor, que refletirão no consumo, desperdício e durabilidade do projeto.



Fonte: Autoria própria

Medidas governamentais movimentam o mercado da construção civil com o intuito de promover redução na geração dos resíduos. No Brasil, a gestão dos resíduos da construção civil, classificando-os conforme o exposto no Quadro 7, é tratada nas Resoluções nº 307 (CONAMA, 2002), nº 448 (CONAMA, 2012) e nº 469 (CONAMA, 2015).

Quadro 7 - Classificação dos resíduos segundo as Resoluções do Conama

Classe	Descrição	Exemplos
A	Reutilizáveis ou recicláveis como agregados	Tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto
B	Recicláveis para outras destinações	Plásticos, papel, papelão, metais, vidros, gesso, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias
C	Sem tecnologia ou aplicação economicamente viável para reciclagem ou recuperação	Espuma expansiva, fitas de amarração de blocos de concreto (embalagem), etc.
D	Perigosos	Tintas, solventes, óleos, que contenham amianto, de reparos ou material radioativo, genericamente prejudiciais à saúde

Fonte: Adaptado de Conama (2002) e Conama (2015)

Legislações são importantes para alinhar o comportamento dos construtores na busca por soluções que repercutam na minimização de geração de resíduos. Na etapa de projeto torna-se cada vez mais interessante o emprego da tecnologia BIM (*Building Information Modeling*), onde a cada linha do projeto podem ser atribuídos materiais, índices de rendimento, desperdício, propriedades técnicas (resistência mecânica, eficiência térmica, entre outras), intermediadores para destinação dos resíduos, entre outras variáveis.

Outra maneira de proporcionar maior controle na geração de resíduos pode ser retratada na forma das variadas certificações ambientais disponíveis (selos verdes) para a indústria da construção civil. Iniciativas como o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), HQE (*Haute Qualité Environnementale* – “Alta Qualidade Ambiental”), BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), entre outras, valorizam

ações voltadas ao desenvolvimento sustentável, com inúmeros critérios que atingem até mesmo os fornecedores de materiais, incentivando-os também em readequações voltadas a maiores cuidados com o planeta (CHEN; WEISHENG; WANG, 2015; CHI et al., 2020).

Uma opção voltada ao planejamento estratégico mais sustentável pode ser apreciada em trabalhos voltados à previsão da quantidade de entulhos que estarão disponíveis futuramente nas cidades, considerando as edificações como um estoque de materiais a ser utilizado para redução no consumo de matérias-primas. Modelos criados para a cidade de Beijing (China) por Hu; Van der Voet e Huppes (2010), Gao et al. (2020) com estimativas para Shanghai (China), estoques em Ydalir (Noruega) por Lausselet et al. (2020), Mollaei et al. (2021) em Kitchener (Canadá) e Lederer et al. (2021) na cidade de Viena (Áustria), contribuem para evidenciar a necessidade real de novos materiais para construção (como concreto ou agregados), inferindo na demanda disponível em “estoque” para reuso dos materiais ou de evitar demolições, o que diminuiria a demanda por novas estruturas, que por sua vez consomem mais recursos e estão associadas a maiores volumes de entulhos e emissões de CO₂.

Há uma certa complexidade na classificação dos entulhos, e ampla heterogeneidade pode ser observada pelos dados do Quadro 8, em que Bakchan e Faust (2019) analisam e classificam 535 fichas de transportadores de RCC. Aspectos regionais, diferentes técnicas construtivas, técnicas de fabricação de materiais e origem da matéria-prima implicam em diferentes composições química e mineralógica, que se traduz também em diferenças na morfologia das partículas (PINTO, 1999; WU; YU; POON, 2019).

Quadro 8 - Percentual de materiais contidos em entulhos

Etapa obra	Percentual em massa (%)						
	Concreto / Alvenaria	Metais	Madeira	Papel / Papelão	Plásticos	Outros	Lixo
Fundação	45,9	12,0	17,6	1,4	0,0	0,3	22,7
Estrutura	87,6	0,9	7,6	0,3	0,4	0,0	3,2
Alvenaria e acabamentos	35,3	1,8	53,6	1,5	0,3	0,2	7,3

Fonte: Adaptado de Bakchan e Faust (2019)

Observa-se que entre as classes apresentadas no Quadro 8, materiais como concreto, blocos de alvenaria, argamassas e agregados são classificados

em concreto/alvenaria; fios condutores, latas, aço e outras estruturas metálicas na categoria de metais; formas deterioradas, tocos de madeira serrada, pallets e caixotes em madeira; materiais associados à limpeza de terreno na classe outros e como lixo estão materiais de escavação ou outros que não são reaproveitáveis e são destinados para uso em aterros. No mesmo trabalho os autores ainda estimam a geração de entulho por metro quadrado de construção, chegando ao total de 69,31 kg/m², conforme apresentado no Quadro 9.

No Brasil a estimativa de produção de resíduos pela indústria da construção civil já foi de 150 kg/m² (PINTO, 1999), variando também de 44 a 115 kg/m² de acordo com Mália et al. (2011). Com dados da ABRELPE (2020) foi possível estimar que a quantidade de resíduos gerados no país no ano de 2019 foi de 45 milhões de toneladas.

Quadro 9 - Estimativa de geração de entulhos por m² de construção

Classe de material	Quantidade (kg/m²)
Concreto/Alvenaria	33,61
Metais	1,47
Madeira	28,21
Papel/Papelão	0,82
Plásticos	0,19
Outros	0,1
Lixo	4,9
Total	69,31

Fonte: Adaptação de Bakchan e Faust (2019)

A cada ano há um acréscimo na quantidade de resíduos gerados pela indústria da construção civil, desde a transformação de matérias-primas até o emprego desses materiais na consolidação de edificações. No Brasil observou-se aumento próximo a 20% entre os anos de 2010 e 2019 (ABRELPE, 2020), o que evidencia a necessidade de mudanças de paradigmas em relação ao que se considera matéria-prima, primando pela reutilização dos resíduos gerados no desenvolvimento de novas tecnologias e materiais que venham a atender às demandas exigidas pela construção civil.

A reutilização dos RCC demanda estudos relacionados ao comportamento mecânico que o material pode exibir em determinado compósito, ao tipo de material predominante nas misturas, podendo apresentar lixiviação de sais que eventualmente provocam eflorescências, entre outras questões que são

dependentes dos constituintes presentes na fração considerada RCC. Por isso é importante a completa caracterização dos resíduos e avaliação do comportamento físico-químico que os materiais exibem quando combinados com outros materiais.

2.4 A cal e seu resíduo de produção

A cal é o aglomerante aéreo de uso mais antigo que se tem conhecimento, pois a primeira informação escrita que se tem sobre seu uso é de origem romana, por volta do ano 600 a.C. (PETRUCCI, 1976; GUIMARÃES, 2002). Porém é sabido que foi utilizada por outras culturas mais antigas como os chineses, egípcios e gregos, sendo difundida por todas outras culturas que foram se desenvolvendo até os tempos atuais (LEPREVOST, 1953; GUIMARÃES, 2002).

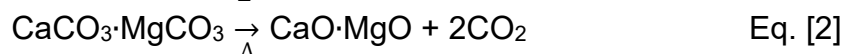
A consolidação do conhecimento científico da cal começa por volta do ano 1756, por intermédio de Joseph Black, com o enunciado de que o calcário reage com calor resultando em cal e “ar fixo”. Os estudos continuam com a avaliação da mistura entre cal e areia por Bryan Higgins (1779), o isolamento do composto químico denominado Cálcio (Ca) por Humphry Davis (1808), a publicação de um artigo sobre a cal hidratada por Collet Descortils (1813), a invenção de um cimento artificial a base de cal por Louis-Joseph Vicat (1818). O ápice foi atingido quando Joseph Aspdin (1824) produziu a partir da calcinação do calcário e argila o conhecido cimento Portland (LEPREVOST, 1953; MILLAR, 1996; GUIMARÃES, 2002; ABCP 2020).

A sequência de exploração de uma jazida de calcário inicia pela (1) extração da rocha calcária, com posterior transporte até o local de beneficiamento; (2) britagem, peneiramento e transporte do calcário para os fornos; (3) Calcinação em temperaturas entre 900 °C a 1.200 °C; (4) moagem e; se o destino for a comercialização como cal virgem é acondicionada em silos para posterior ensacamento; ou é encaminhada para o processo de hidratação para produção de cal hidratada (COELHO; TORRAL, JALALI, 2009, JOHN; PUNHAGUI, CINCOTTO, 2014).

Esse processo produtivo causa impactos ambientais da ordem de consumo de energia, consumo de água, mudanças na paisagem devido aos cortes no relevo, geração de ruído e poeira, tanto pela exploração e moagem

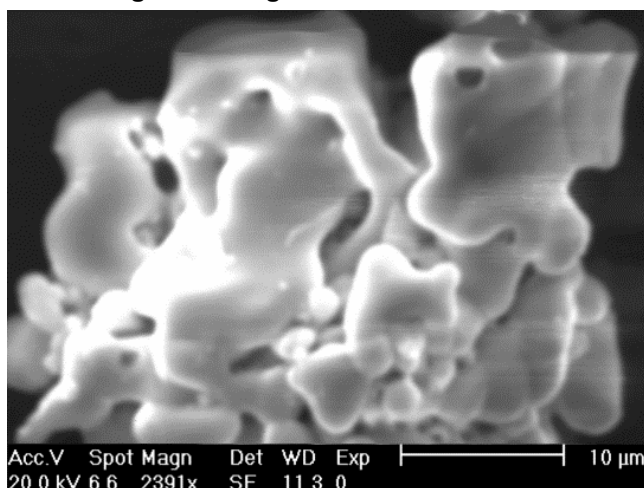
das rochas quanto pelo pó de forno de cal (*lime kiln dust*), e emissões de gases do efeito estufa como o dióxido de carbono (CO₂) (JOHN; PUNHAGUI, CINCOTTO, 2014).

O calcário apresenta em sua composição mineralógica principal os minerais de calcita (CaCO₃) e dolomita (CaMg.2CO₃), que efervesce em presença de ácido clorídrico (HCl), sendo classificado em consonância à relação que existe entre esses minerais na rocha matriz em calcíticos, magnesianos ou dolomíticos (CINCOTTO; QUARCIONI V.A., JOHN, 2010). Devido a essa peculiaridade, o processo de calcinação, representado pelas Equações [1] para a calcita e [2] para a dolomita, também ocorre de maneira diferente, pois a temperatura de calcinação da calcita é da ordem de 898 °C e, da dolomita entre 500 °C e 700 °C (GUIMARÃES, 2002; SOARES, 2007; JOHN; PUNHAGUI, CINCOTTO, 2014). Observa-se também que calcários dolomíticos exibem maior porosidade e rugosidade do que calcários calcíticos, podendo estar relacionado à menor temperatura de calcinação (CRNKOVIC et al., 2004).



A temperatura de calcinação pode ser insuficiente ou exceder o limite necessário, ocasionando o que se conhece por sinterização da cal virgem. Quando isso ocorre há diminuição na qualidade da cal produzida, tornando-a menos reativa (CINCOTTO, 1977). Na Figura 9 é possível visualizar o aspecto vítreo e formato arredondado de grãos de CaO que passaram pelo processo de sinterização. A cal de boa reatividade é denominada cal gorda enquanto o oposto é tratado por cal magra (GUIMARÃES, 2002; SOARES, 2007; JANUZZI, 2008; JOHN; PUNHAGUI, CINCOTTO, 2014).

Figura 9 - Micrografia dos grãos de CaO com baixa reatividade

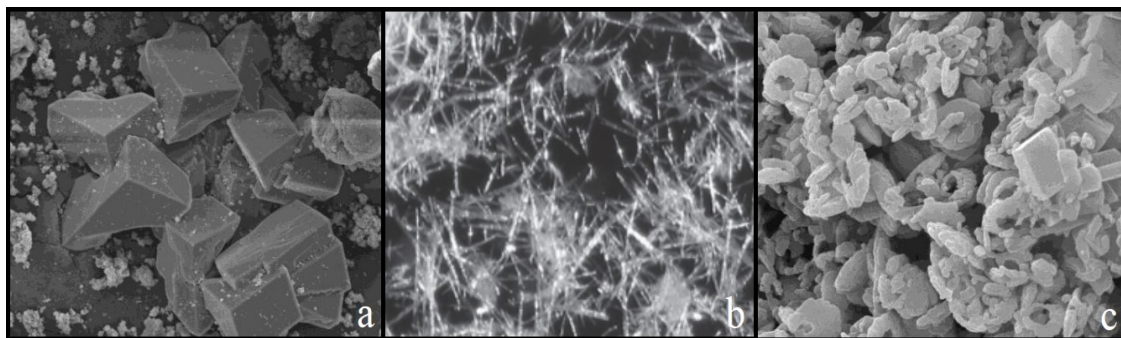


Fonte: Januzzi (2008)

Na composição desses calcários, sob forma de impurezas ou minerais secundários, os tipos mais comuns encontrados são: quartzo, silicatos argilosos, óxidos metálicos de ferro e manganês, matéria orgânica, fosfatos, sulfetos, sulfatos, fluoretos e brucita (hidróxido de magnésio); o óxido de sódio (NaO) contribui para reduzir a retração durante a queima, enquanto sílica, ferro e alumina tendem a formar silicatos (SAMPAIO; ALMEIDA, 2008).

Como componente principal, a calcita exibe dois tipos de polimorfismo, que na ordem decrescente de estabilidade estão respectivamente os minerais de aragonita e vaterita. A calcita cristaliza no sistema trigonal (romboédrico), a aragonita cristaliza no arranjo ortorrômbico, e geralmente se mostra em cristais aciculares e, a vaterita, mineral mais raro e mais instável entre os polimorfos, cristaliza no sistema hexagonal. A morfologia desses minerais é exposta nas micrografias na Figura 10.

**Figura 10 - Micrografias dos cristais de calcita (a), aragonita (b) e vaterita (c)
Aumento de 3.000x (sem escala)**



Fontes: (a) e (b) Bessler e Rodrigues (2008); (c) Alvarez; Marquez e Velazco (2018)

Comercialmente a cal pode ser encontrada na forma de cal virgem (CaO) ou cal hidratada (Ca(OH)₂). Na Norma Brasileira NBR 6453 (ABNT, 2003) a cal virgem (CV) é classificada em CV-E, CV-C e CV-P, sendo: E (especial), C (comum) e P (em pedra). As exigências químicas e físicas da norma são apresentadas no Quadro 10.

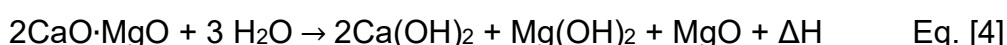
Quadro 10 - Limites da NBR 6453 na classificação da cal virgem de fábrica

Exigências	Parâmetro	CV-E	CV-C	CV-P
Químicas	CO ₂	≤ 6,00%	≤ 12,00%	≤ 12,00%
	Água combinada	≤ 3,00%	≤ 3,50%	≤ 15,00%
	CaO total + MgO total	≥ 90,00%	≥ 88,00%	≥ 88,00%
Físicas	Peneira 1,00 mm	≤ 2,00%	≤ 5,00%	≤ 85,00%
	Peneira 0,30 mm	≤ 15,00%	≤ 30,00%	-

Fonte: Adaptado da ABNT (2003)

Obviamente a hidratação da cal virgem está relacionada ao tipo de cal disponível, variando as quantidades de hidróxido de cálcio (portlandita) e hidróxido de magnésio (brucita) produzidas. O início da reação é o mesmo para os dois minerais, com menor desenvolvimento para a hidratação do MgO, comportamento relacionado à possível sinterização sofrida pelo óxido como também grãos menores de MgO se aglomerando mais facilmente, dificultando sua hidratação (CINCOTTO, 1987; LANAS; ALVAREZ, 2004).

Guimarães (2002) ainda ressalta que apenas 10 a 25% do óxido de magnésio de uma cal virgem dolomítica é hidratado nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Os óxidos não hidratados em excesso podem prejudicar a qualidade da cal devido à alta expansibilidade desses causar efeitos adversos quando aplicados em argamassas (CARASEK, 2010). As reações de hidratação para cales dos tipos calcítica e dolomítica são apresentadas nas Equações [3] e [4], respectivamente.



A energia liberada (ΔH) na hidratação de cales calcíticas [3] é da ordem de 272 kcal/kg, enquanto para dolomíticas [4] é em torno de 211 kcal/kg. A quantidade estequiométrica de água necessária para hidratar a cal virgem rica

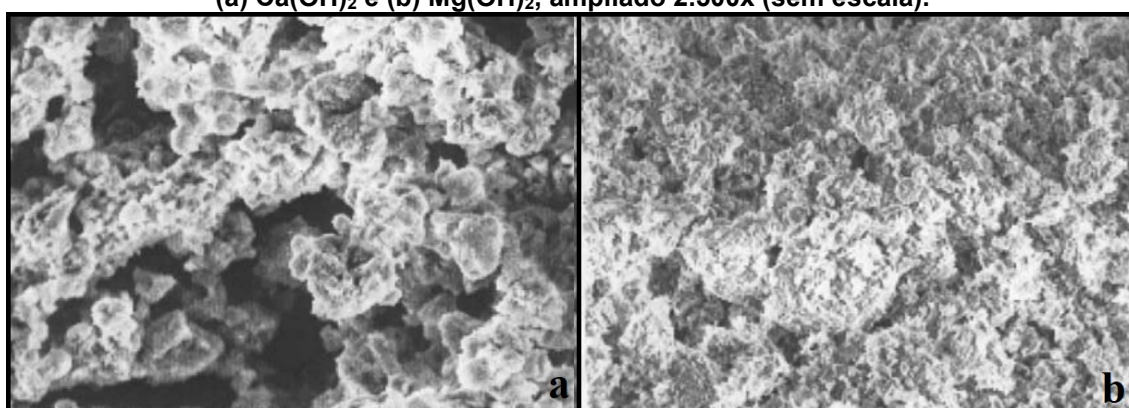
em cálcio é de 32,1%, sendo experimentalmente encontrados valores entre 45% e 60%. Essa diferença ocorre devido à reação de hidratação ser fortemente exotérmica, contribuindo para evaporação da água durante o processo (CINCOTTO, 1977; GUIMARÃES, 2002).

O processo de hidratação da cal virgem denomina-se extinção da cal, o qual acontece com adição de água em quantidade e temperatura controladas (CINCOTTO; QUARCIONI, JOHN, 2010). Pode ocorrer o “afogamento” da cal caso a hidratação se dê muito rapidamente ou, pode haver a “requeima” da cal quando pouca água é adicionada, transformando os produtos já hidratados em óxido pelo excesso de calor pontual (GUIMARÃES, 2002).

Morfologicamente a cal cálcica hidratada se apresenta em um aglomerado de placas, enquanto a magnésiana apresentando um aglomerado de flocos (CINCOTTO, 1977). Na Figura 11 são apresentadas as estruturas do hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio puros, principais produtos da hidratação das cales.

A reatividade das cales é determinada pelo teor de hidróxidos presentes, são essas hidroxilas que determinarão o poder de ligante do material que está atrelada ao tamanho dos grãos desses hidróxidos (CINCOTTO; QUARCIONI, JOHN, 2010).

Figura 11 - Micrografias dos produtos de hidratação da cal (a) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e (b) $\text{Mg}(\text{OH})_2$, ampliado 2.500x (sem escala).



Fonte: Sébaibi; Dheilly e Quéneudec (2004)

Devido ao seu caráter alcalino, a cal ainda possibilita que ocorram reações pozolânicas, formando compostos semelhantes ao C-S-H obtido pela hidratação do cimento Portland, e responsável pela resistência mecânica de compósitos à base de cimento. Essas formações ocorrem pelo potencial de

dissolução que ocorre na hidratação em idades iniciais de compostos minerais e amorfos presentes nas misturas (MYMRINE, 1978; 1981; NEVILLE, 1997).

Outro processo conhecido por reação álcali-agregado tem papel similar quando compostos alcalinos presentes no cimento (hidróxidos de cálcio, sódio e potássio) dissolvem a superfície silicosa dos agregados (areia e brita) formando um composto amorfo, semelhante ao C-S-H (SWAMMY, 1992; ROLIM, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

É inquestionável a versatilidade que uma substância inorgânica como a cal, porém, e para que todas as vantagens sejam alcançadas, é necessário que o material tenha alta reatividade, que é dependente dos fatores citados neste tópico (GARCIA, 2008).

Técnicas de caracterização como análise química por fluorescência de raios-x (FRX), identificando a quantidade de óxidos presentes nas amostras; difratometria de raios-x (DRX) apontando os minerais contidos no material e, microscopia eletrônica de varredura (MEV) na avaliação da morfologia exibida na microestrutura do material; são primordiais para correlacionar a alta ou baixa reatividade da cal, determinando sua possível classificação como resíduo de produção de cal (GARCIA, 2008; PEDROSO, 2020; PIAZZA, 2020). No Quadro 11 são apresentados os valores obtidos por análise química de resíduos de produção de cal para seis diferentes autores. Nota-se que os valores de óxidos diferentes dos de cálcio e magnésio, somados à perda ao fogo são bem superiores aos 12% indicados na norma.

Quadro 11 - Análise química dos resíduos de produção de cal

Componente	Percentual (%) em massa					
	Corrêa (2005)	Waltrick (2010)	Andrade (2012)	Pedroso, D. (2020)	Pedroso, C. (2020)	Piazza (2020)
CaO	47,69	42,70	43,10	51,60	49,80	55,30
MgO	33,10	32,10	26,30	29,00	30,60	29,50
SiO ₂	2,82	21,30	1,90	1,50	1,90	2,10
Al ₂ O ₃	0,25	0,42	0,20	0,20	0,70	0,40
Fe ₂ O ₃	0,24	0,20	0,40	0,10	0,50	0,20
Traços	0,16	0,36	0,18	0,11	0,30	0,13
Perda ao Fogo	15,74	2,92	27,92	17,49	16,20	12,37
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autoria própria

A cal encontrada comercialmente não pode ser considerada como um produto de elevada pureza. Conforme disposto na NBR 6453 (ABNT, 2003) são considerados como resíduos da indústria calcária quando o material produzido apresenta teores de óxidos diferentes do de cálcio e magnésio em valores superiores a 12% em massa, considerando a perda ao fogo como dióxido de carbono e umidade expulsos do material (WALTRICK, 2010; ANDRADE, 2012; SILVA, 2014).

Mesmo classificado como um resíduo, devido sua reatividade ser mais baixa do que ideal, o RPC tem grande espaço de aplicação na indústria da construção civil, como um aglomerante potencial na formação de novas estruturas em compósitos (HART; SHAKOOR, WILSON, 1993; MOHAMMED et al., 2002; KUMAR, 2003; BHATTY; GAJDA; 2004; DO; MUN, KEUN, 2008; STROEVEN et al., 2011; MILLOGO et al., 2012; AL-SAYED et al., 2015). As aplicações relacionadas ao resíduo de produção de cal são melhor exploradas no próximo tópico deste capítulo.

2.5 Materiais com base em resíduos industriais

A indústria da construção civil tem grande abrangência na transformação de matéria inorgânica e orgânica em subprodutos que irão permanecer por algum tempo de forma inerte ao ambiente na forma de uma edificação, consumindo cerca de 75% dos recursos naturais no planeta (JOHN; OLIVEIRA; AGOPYAN, 2006). Na norma brasileira NBR 15575 são propostos três critérios a serem atendidos por uma edificação: segurança, sustentabilidade e habitabilidade (ABNT, 2013). O reaproveitamento de resíduos é consoante aos propósitos da sustentabilidade e possibilita a formulação de novos materiais, que devem ser testados para garantir a segurança e os outros sete quesitos que a norma engloba no critério da habitabilidade.

No que tange os resíduos da mineração do ferro (RMF), relaciona-se seu uso com a produção de cerâmicas vermelhas (VIEIRA et al., 2006; YELLISHETTY; KARPE, REDDY, 2008; SOUZA; VIEIRA, MONTEIRO, 2008; NOCITI, 2011; MENDES et al., 2019); bloquetes de pavimentação (COSTA; GUIMERI; BRANDÃO., 2014); substituição parcial de areia em concretos (ZHAO; FAN, SUN, 2014; TOFFOLO et al., 2014; SHETTIMA et al., 2016); produção de cimento (DO; MUN; KEUN, 2008; LUO et al., 2016); melhoramento

de suporte em solos (FERNANDES, 2005; BASTOS, 2013) e usos com o cimento para pavimentação (CAMPANHA, 2011).

O elevado teor de finos desses materiais, aliado às características químicas tem mostrado bons resultados quando utilizados como precursores de matrizes alcalinamente ativadas (SATA; SATHONSAOWAPHAK, CHINDAPRASIRT, 2012; KUMAR; KRYSTÁLY; MUCSI, 2015). Pastas moldadas com cinzas volantes e RMF chegaram a apresentar resistência à compressão da ordem de 50 MPa (DUAN et al., 2015) e, com a mistura de lã de vidro e RMF foi possível atingir resistências superiores a 100 MPa (DEFÁVERI et al., 2019). A combinação de RMF (86%) com sílica ativa (5%) e hidróxido de sódio em escamas (9%) resultou em pastas que atingiram 13 MPa sem ativação térmica ou mecanoquímica (ELÓI, 2020).

No contexto de promoção de um ambiente alcalino, os resíduos do processo de recuperação química dos reagentes envolvidos na produção da polpa da celulose (RPEL) também são objeto de interesse para produção de novos materiais. São materiais usualmente lançados em aterros (SANTOS et al., 2019; FARAGE et al., 2019) que também encontram novas aplicações com o desenvolvimento de mais pesquisas científicas. Na produção do cimento foi observado que esses materiais têm boa empregabilidade (TORRES et al., 2017; SIMÃO, et al., 2019; ALVARENGA et al., 2019); aumento das propriedades mecânicas em argamassas quando usados em até 25% como *filler* (NOVAIS et al., 2019); na produção de blocos de solo cimento (SIQUEIRA; HOLANDA, 2013); incorporação em misturas de argila para confecção de blocos queimados (WOLFF, 2008; RIBEIRO, 2010), e também misturas de apenas solo e lama de cal (SARKAR et al., 2017). Em misturas de *dregs* com escórias granuladas foi observada formação de um gel denso, possivelmente relacionado com o processo de geopolimerização (LOUZADA; BIZINOTO; RAMONICH, 2009).

Do lado daqueles materiais com capacidade de fornecer elementos suficientes para formação de géis e outras substâncias amorfas e/ou cristalinas estão os entulhos, ou resíduos da construção e demolição (RCD) e também os rejeitos de beneficiamento de minério de ferro (RMF). São normalmente materiais com silício, alumínio e ferro, que se usados sozinhos quase não possuem propriedade ligante, porém com água e hidróxido de cálcio apresentam propriedades ligantes (JOHN, 2003).

O uso de entulhos como material de construção é conhecido já nas civilizações mais antigas, porém seu uso significativo foi registrado após a segunda guerra mundial, como forma de reconstrução das cidades europeias que encaravam à época grande escassez de matérias-primas (WEDLER; HUMMEL, 1946). É um material que apresenta grande variabilidade, podendo conter diferentes quantidades de cimentos, tijolos, vidros, limalhas de aço, madeira, entre outros costumeiramente empregados nas construções (PINTO, 1999; BRASILEIRO; MATOS, 2015). Com essa particularidade é comum classificar sua composição, de forma a evitar a incorporação de materiais mais porosos (como cerâmicas) em materiais como concretos com elevadas resistências. Registros do uso de entulhos em materiais de construção vão desde incorporação em concretos (ZORDAN, 1997; SANTOS, 2006); argamassas (PINTO, 1986; LEVY, 1997); como base ou sub-base de estradas (SCHNEIDER, 2003); fabricação de blocos para alvenaria (STELLA, 2013; SILVA, 2014; CONTRERAS et al., 2016); em todas essas aplicações os entulhos contribuem para redução no consumo de matérias-primas, atingindo os requisitos de utilização como material de construção.

Começa a ser interessante quando são encontradas possibilidades de explorar o potencial pozolânico que esse material pode apresentar, como a produção de concretos com adição de apenas cinza volante e resíduo de concreto (HANSEN, 1990), ou blocos cerâmicos por geopolimerização em ambiente alcalino (RAPAZOTE; LAGINHAS; PINTO, 2011), tendência que tem se confirmado na fabricação de blocos cerâmicos pelo processo de geopolimerização (MONTEIRO; VIEIRA, 2014).

Resíduos da produção da cal (RPC) são colocados como excelentes candidatos para incorporação em materiais da construção, principalmente agindo como ligantes, formadores de novos compostos e mantenedores de um ambiente alcalino ($\text{pH} > 12$). Como aglomerante aéreo esse material pode envolver partículas ao seu redor e carbonatar, formando um aglomerado com resistência mecânica típica de rochas (GUIMARÃES, 2002; CINCOTTO; QUARCIONI, JOHN, 2010).

Na formação de outros compostos tem-se no exemplo do cimento o papel que o hidróxido de cálcio, resultado da hidratação do óxido de cálcio,

apresenta interagindo com íons de silício na formação dos silicatos de cálcio hidratados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em ambiente alcalino há conhecimento da formação de matrizes alcalinamente ativadas, provenientes do ataque alcalino a aluminossilicatos amorfos, gerando uma rede tridimensional complexa de silicatos amorfos, com características semelhantes às do C-S-H, em que podem ocorrer substituições iônicas entre íons de alumínio (Al) e ferro (Fe), conferindo boa resistência mecânica à compressão, ataques ácidos e baixa retração (PROVIS; DEVENTER, 2009; NG et al., 2018; ELOI, 2020). Também foram observadas transformações de C-S-H em tobermorita e posteriormente em xonotlita, pela expulsão de quantidade de água, promovendo maior densificação da matriz (ZANNI et al., 1996).

Há relatos do uso dos resíduos da produção da cal em misturas asfálticas com ganho de resistência em temperaturas elevadas (AL-SAYED et al., 2004), melhorias na deformação permanente, rigidez e resistência à fadiga em concretos asfálticos (DO; MUN; KEUN, 2008), aumento da capacidade de suporte em bases de estradas (GUIMARÃES, 2002), otimização da produção de cimento pela conservação da energia no processo de clínquerização (BHATTY; GADJA, 2004), combinação com misturas de cimento, cinzas volantes e gesso na obtenção de aglomerantes de baixo custo na Índia (SINGH; GARG, SOMANI, 2006), imobilização química de contaminantes gerados em processos de pinturas, devido à carbonatação (ARCE et al., 2009), melhorando o desempenho em coberturas de aterros, barreiras hidráulicas e preenchimento estrutural em solos (HART; SHAKOOR; WILSON, 1993), na incorporação em concretos de alta resistência e durabilidade (KANELLOPOULOS; NICOLAIDES; PETROU, 2014), pó de serragem com RPC na formulação de painéis de madeira (TURGUT, 2007), aumento na resistência à compressão em concretos adensáveis com substituição de 10% de cimento por RPC (FELEKOGLU, 2007) e concretos leves utilizando RPC em substituição a 30% de agregados (KITOUNI; HOUARI, 2013).

Composições entre RPC e outros resíduos tem fornecido materiais com características aceitáveis para utilização em tijolos ou blocos vazados. Resistências à compressão acima dos valores mínimos recomendáveis pelas normatizações ao redor do mundo são observadas em misturas de RPC com

fosfogesso e cinzas volantes (KHUMAR, 2003); lodo de estações de tratamento de água (LETA); cinza de madeira (CM) e RPC (ANDRADE, 2012); pó de serragem e RPC (TURGUT; ALGIN, 2007); resíduos de algodão e RPC (ALGIN; TURGUT, 2008); resíduos de papel e celulose (RPEL) com RPC (CUSMA, 2015; PEDROSO, 2020; PIAZZA, 2020); resíduos de concreto (RC) e RPC (CORRÊA, 2005; PEDROSO, 2016; PEDROSO, 2020); anodização de alumínio (AAI) com RPC (MOLINETTI, 2016; PEDROSO, 2016; PEDROSO, 2020); resíduos da dragagem de sedimentos em portos (RDSP) e RPC (STELLA, 2013; SCREMIN, 2019); resíduos de MDF com RPC (PIAZZA, 2020) e entulhos com RPC (STELLA, 2013; SILVA, 2014). No Quadro 12 são apresentados os valores de parâmetros de resistência à compressão, absorção de água e densidade aparente de alguns dos trabalhos mencionados que utilizaram o resíduo da produção de cal com o percentual em massa do material utilizado exibido.

Quadro 12 - Materiais com base em resíduos industriais

(continua)

Autores	Resíduos utilizados nos compósitos	Teor RPC (% massa)	Resistência à Compressão (MPa)			Absorção de água (%)		Massa específica (g/cm ³)		
			3d	28d	90d	28d	90d	3d	28d	90d
Corrêa (2005)	Concreto e cal	30	15,91	18,35	24,12	12,00	-	-	-	-
Cunha (2007)	Varvito e cal	35	1,91	10,30	15,84	17,50	-	-	-	-
Andrade (2012)	Lodo ETA, cinza de madeira, cal	20	12,76	10,17	9,66	16,07	14,50	1,68	1,67	1,71
Ferrari (2012)	Fosfogesso, areia de ouro e cal	20	8,30	9,80	13,50	8,60	-	-	-	-
Stella (2013)	Dragagem porto, entulho e cal	30	6,30	13,70	14,49	-	-	-	-	-
Silva (2014)	Entulho e cal	25-30	4,00	9,30	10,40	10,25	-	-	-	-
Cunha (2015)	Cerâmicas, lodo ETE e cal	15	3,50	9,00	13,00	24,62	-	-	-	-
Cusma (2015)	Celulose e cal	20	5,88	6,42	12,14	12,30	11,80	1,74	1,73	1,78
Hackbart (2015)	Lodo ETA, lama mármore e cal	25	4,65	6,17	7,52	22,12	16,00	-	-	-

Quadro 12 - Materiais com base em resíduos industriais

(conclusão)

Autores	Resíduos utilizados nos compósitos	Teor RPC (% massa)	Resistência à Compressão (MPa)			Absorção de água (%)		Massa específica (g/cm ³)		
			3d	28d	90d	28d	90d	3d	28d	90d
Molinetti (2016)	Anodização (Al), argamassa e cal	20	4,88	5,98	8,03	10	14	1,64	1,59	1,73
Pedroso (2016)	Anodização (Al), concreto e cal	30	5,98	6,76	9,24	11,86	10,7	-	-	-
Scremin (2019)	Dragagem porto, cinza madeira e cal	25-30	1,66	2,3	2,74	15,1	14,6	2,79	2,82	2,66
Pedroso (2020)	Mineração ferro, concreto, celulose e cal	25	4,94	6,92	7,72	9,62	8,33	-	-	-
Pedroso (2020)	Mineração ferro, anod. (Al), concreto e cal	25	4,49	8,56	8,81	7,17	7,03	3,67	3,67	3,7
Piazza (2020)	MDF, celulose, cal	15	3,48	5,01	7,32	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria

Há de se notar o bom desempenho dessas misturas como potencial uso em blocos ou tijolos para edificações. Comumente os resultados são devido a transformações químicas que ocorrem em soluções coloidais, íons dissolvidos de minerais originalmente presentes nas misturas adquirem aumento na densidade, passando para o estado de gel que, ao envelhecer, perde água e apresenta um estado amorfo com resistências que podem chegar a ordem de 50 MPa (MYMRINE, 1968; MYMRIN; CORRÊA, 2005; MYMRIN et al., 2020; ELÓI, 2020). Observou-se que essas misturas exibiram a diminuição da intensidade em determinados picos de difratometria de raios X (DRX) no decorrer do tempo.

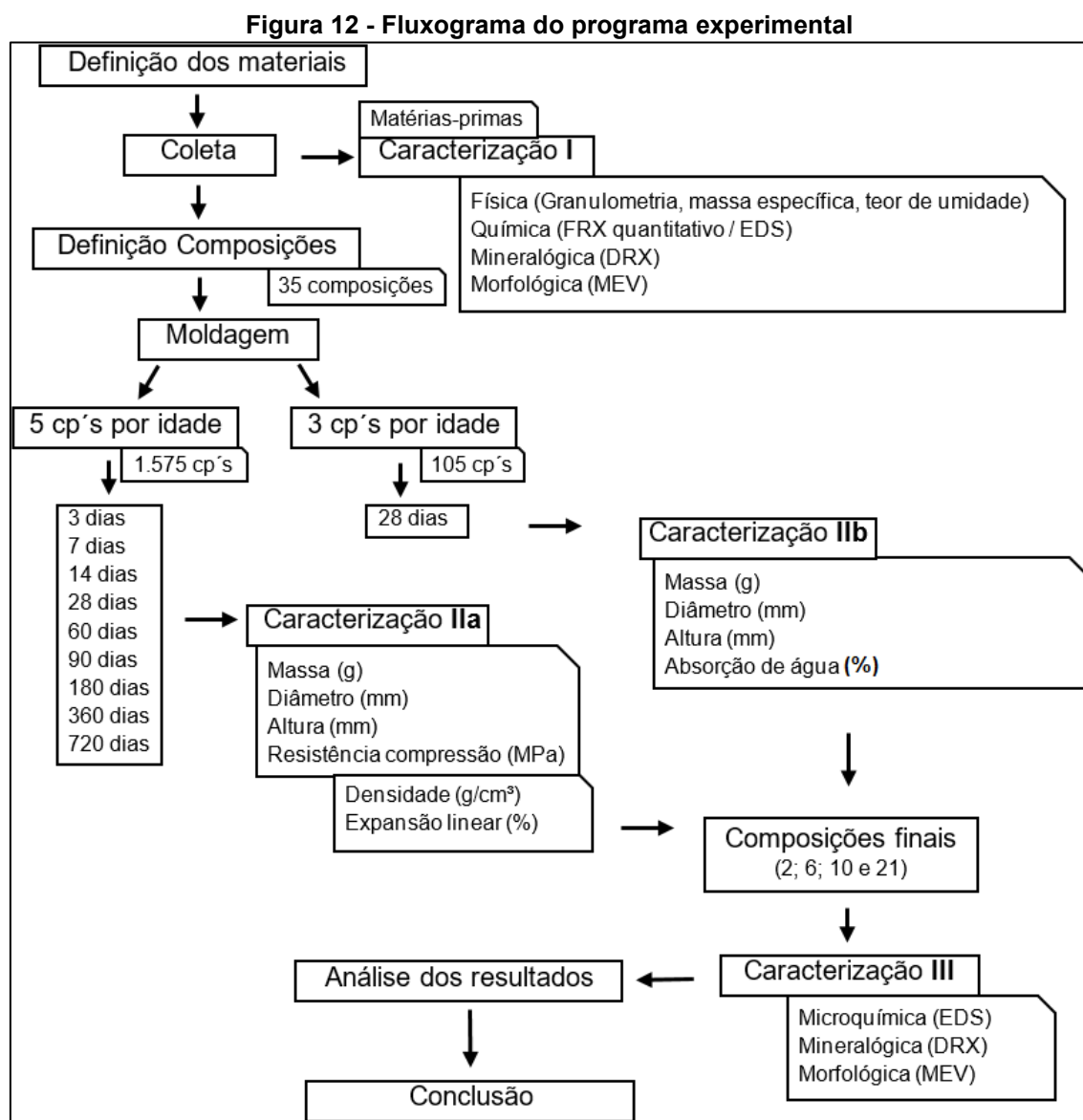
O desaparecimento de CaO, periclásio (MgO), brucita, muscovita e portlandita puderam ser constatados por DRX, o que é acompanhado pelo crescimento de fases como ancerita (Ca(Mg,Fe)(CO₃)₂), calcita, dolomita, tobermorita, afwillita (Ca₃(SiO₃)₂(OH)₂ · 2H₂O), resultados de análises térmicas (ATG) colaboram com essas descobertas (CORRÊA, 2005; HACKBART, 2015). Esses processos foram observados entre os 60 e 90 dias de cura em condições ambientes, consoante ao processo de redução na concentração de portlandita

entre os 50 e 55 dias observados em reações entre cal e cinzas volantes (BASUMAJUMDAR et al., 2008). Esses processos podem ser traduzidos nos ganhos de resistência, diminuição da absorção de água e aumento da massa específica evidenciados na Quadro 12.

Nota-se pelos estudos apresentados que há enorme potencial de aplicação de resíduos industriais na indústria da construção civil. A evolução tecnológica pelo implemento de tecnologias de modelagem virtual (BIM) juntamente com estudos laboratoriais direcionados à caracterização de quaisquer materiais com potencial de utilização na construção civil, contribuem grandemente com a produção de dados que, se sabiamente empregados, tem o potencial de reduzir em quantidades significativas a deterioração do ambiente pelo extrativismo descontrolado e geração de mais resíduos, comumente acumulados em aterros. Já se tem conhecimento dos avanços que a Inteligência Artificial (IA) tem desencadeado com decisões baseadas em grandes volumes de dados, dessa forma é louvável estimular que estudos dessa ordem continuem a ser realizados, pois é com o conhecimento que grandes mudanças ocorrem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 12 é apresentado um fluxograma com as etapas conduzidas para realização deste trabalho, que contempla a definição e coleta dos materiais, caracterizações e misturas das composições direcionadas à produção de novos compósitos com base em resíduos industriais.



3.1 Coleta e caracterização inicial das matérias-primas

Os materiais apresentados na Figura 13 e utilizados como as matérias-primas na fabricação dos compósitos deste estudo foram coletados e acondicionados de forma a se evitar contato com outros contaminantes. Na

cidade de Mariana/MG, foi coletada a lama que inundou a cidade pelo rompimento da barragem de armazenamento do rejeito da mineração do ferro; numa cidade no interior do Estado do Paraná foram coletados os resíduos do processo de recuperação química da indústria de papel e celulose; os entulhos foram fornecidos por uma empresa sediada na cidade de Curitiba/PR, que recolhe entulhos de construção e demolição, separando-os na fração comercializável (madeira, ferro e materiais sintéticos) e a fração mais fina, de pouca comercialização, utilizada nesta pesquisa, compreendida por restos cerâmicos, argamassas e concretos; contendo traços de madeira e aço, vidros, dentre outros, classificado por resíduo de classe A, conforme as resoluções do CONAMA. Os entulhos não são categorizados pela empresa, sendo visualmente identificados como na maioria materiais cerâmicos e restos de argamassa.

O resíduo da produção de cal foi coletado de uma indústria beneficiadora de cal na região Metropolitana de Curitiba/PR.

Figura 13 - Amostras utilizadas na pesquisa
(A) RMF, (B) *Grits*, (C) *Dregs*, (D) Lama de cal, (E) Entulho e (F) RPC.



Fonte: Autoria própria

No Quadro 13 relacionam-se as caracterizações às quais foram submetidas as matérias-primas do trabalho.

Quadro 13 - Caracterização inicial das amostras

Caracterização	Método	Avaliado por:
Teor de umidade	Secagem em estufa	Autor
Distribuição granulométrica	Peneiramento e sedimentação	Autor
Massa específica/unitária	Molde/Frasco aferido	Autor
Composição química	Fluorescência de Raios-X (FRX)	LAMIR/UFPR
Análise mineralógica	Difratometria de Raios-X (DRX)	CMCM-UTFPR
Morfologia das partículas	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	CMCM-UTFPR
Mapeamento químico	Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)	CMCM-UTFPR

Fonte: Autoria própria

São 35 propostas de composições partindo do teor de ligante (RPC) de 10 a 25%, teores de RPCEL entre 15 e 90%, entulho variando entre 20 a 90% e variação de 5 a 20% nos teores de RMF. A definição dos teores de cada composição foi com base na experiência do Professor Orientador (Mymrine, V.) com grande quantidade de interações entre resíduos industriais e outros trabalhos conduzidos com os resíduos propostos (MYMRINE 1978; 1981, MYMRIN; CORRÊA, 2005, MYMRIN et al., 2020).

O teor de RPCEL é composto por uma mistura entre os três principais resíduos da indústria da celulose, *dregs*, *grits* e lama de cal, preparada previamente à mistura com os outros materiais. O percentual de cada componente nesta mistura foi estabelecido em 34% de *dregs*, 37% de *grits* e 29% de lama de cal, tendo como base os valores médios produzidos pelas indústrias de papel e celulose no Brasil (BRACELPA, 2013), objetivando simplificar os experimentos e otimizar a redução do armazenamento desses resíduos por parte da indústria. Esses valores ainda estão de acordo com a produção indicada pela empresa no período em que foi conduzida a pesquisa.

No Quadro 14 é apresentado o percentual utilizado em cada uma das composições do estudo. As composições foram elaboradas de forma a se estudar separadamente o comportamento das misturas entulho e RPC (1 a 4) e de RPCEL e RPC (5 a 8), variando-se o teor desses resíduos juntos entre as composições 9 a 20 e, com a adição de RMF para as composições 21 a 35.

Quadro 14 - Percentual de matéria-prima nas composições

Composição	RMF (%)	RPCEL (%)	Entulho (%)	RPC (%)
1		0	90	10
2			85	15
3			80	20
4			75	25
5			0	10
6				15
7				20
8				25
9	0			15
10				15
11				15
12				15
13				20
14				20
15				20
16				20
17				25
18				25
19				25
20				25
21	5	30	50	15
22	5	35	45	15
23	5	40	40	15
24	5	45	35	15
25	5	50	30	15
26	10	30	40	20
27	10	35	35	20
28	10	40	30	20
29	15	25	35	25
30	15	30	30	25
31	15	35	25	25
32	20	20	35	25
33	20	25	30	25
34	20	30	25	25
35	20	35	20	25

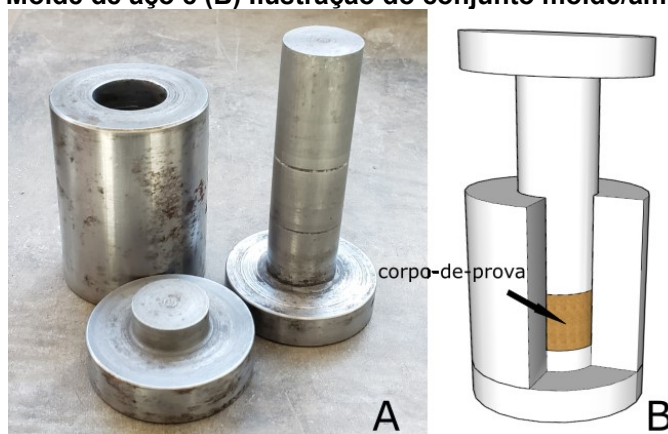
Fonte: Autoria própria

3.2 Moldagem e caracterização dos compósitos

O preparo para a moldagem dos compósitos se deu com o material seco em estufa durante 24 h a temperatura de 105 ± 5 °C. Os materiais foram peneirados para utilização da fração passante na peneira de 2,4 mm (nº 8 da

série de peneiras da NBR 248/03). O molde de aço utilizado na pesquisa é apresentado na Figura 14, com as dimensões especificadas no APÊNDICE A.

Figura 14 - Molde utilizado na pesquisa
(A) Molde de aço e (B) Ilustração do conjunto molde/amostra



Fonte: Aatoria própria

A quantidade de água necessária para a moldagem de cada uma das 35 composições foi previamente determinada misturando-se o material seco, em um almofariz cerâmico com auxílio de uma colher de metal e um pistilo cerâmico até a homogeneidade da mistura. O teor inicial de água foi de 20% em relação à massa de materiais secos, com adição de 1% de água a cada teste de verificação de moldagem.

O teor de água foi considerado suficiente a partir da observação de uma fina película de água na superfície da amostra ainda dentro do molde, após aplicação da pressão de 2 MPa, com prensa manual de capacidade para 10 toneladas. Abaixo desse patamar pode não haver água suficiente para atingir a densidade ótima dos compósitos e hidratar adequadamente os grãos que tendem a reagir na presença de água. Acima desse ponto pode ocorrer lixiviação dos componentes reativos, desfavorecendo as reações químicas responsáveis pelo ganho de resistência desejado.

A quantidade ideal de água observada ficou entre 22 a 25% da massa seca da mistura. A massa total das amostras (material seco + água) resultou entre 12,00 a 12,10 g.

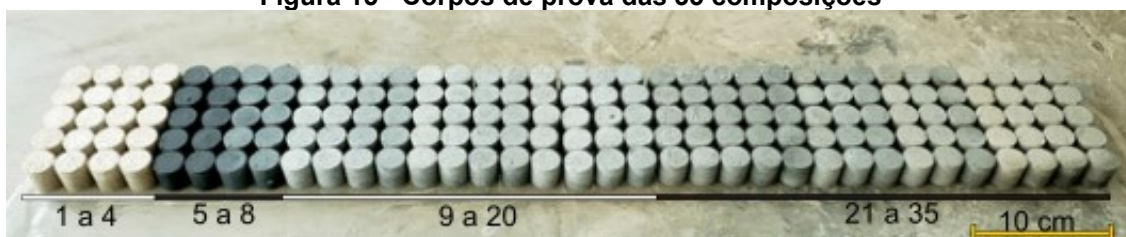
Fixados os parâmetros da moldagem (teor de água, altura dos corpos-de-prova e massa adicionada aos moldes) foram então moldadas as 35 composições para cada uma das idades propostas no estudo. A ordem de

mistura e homogeneização dos materiais secos no almofariz cerâmico foi com a adição do entulho, seguido pelo RPCEL, RMF e 50% da água da mistura, garantindo boa homogeneização para então a adição do RPC, com o restante da água. A homogeneização se deu visualmente com o desaparecimento de pequenas esferas brancas que tendem a se aglomerar em presença de água.

Em uma balança (Marte modelo AD 3300) com 0,01 g de precisão foi colocado um recipiente plástico com a posterior tara da balança. Neste recipiente foi determinada a massa de 12,0 g do material homogeneizado para o preenchimento do molde metálico, que depois de tampado foi submetido a pressão de 2 MPa durante 30 segundos. Com o alívio da tensão, o molde foi rotacionado de forma a manter a parte inferior voltada para cima, removendo-se a tampa e aplicando na lateral do cilindro metálico (com a prensa) a força necessária para extração da amostra de dentro do molde, fazendo o cilindro interno, utilizado no processo de compressão inicial, empurrar a amostra para cima, expelindo-a do molde.

O total de 5 corpos-de-prova para cada uma das nove idades de ensaio (3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 360 e 720 dias) à compressão e mais 3 corpos-de-prova por composição para a idade de 28 dias para ensaios de absorção de água. Na Figura 15 são exibidos os corpos-de-prova nas composições de 1 a 35.

Figura 15 - Corpos de prova das 35 composições



Fonte: Autoria própria

Durante a moldagem das amostras o almofariz contendo as misturas foi coberto com um pano úmido para evitar a evaporação excessiva da água da mistura, que é favorecida pela reação exotérmica observada no processo de hidratação do RPC.

Depois de moldadas, as amostras foram condicionadas em um recipiente plástico, coberto por um filme plástico, até a moldagem do último corpo-de-prova, quando iniciou-se o procedimento de medição das dimensões de altura, diâmetro (com paquímetro aferido) e massa de cada corpo-de-prova,

perfazendo os dados da moldagem para comparação com as demais idades subsequentes. Findados esses procedimentos, as amostras foram armazenadas em uma caixa de papelão forrada com plástico para evitar a perda de água pelo contato com o papelão durante o período de cura ambiente.

3.2.1 Caracterizações dos Compósitos Moldados

A cada idade programada atingida, as amostras eram retiradas do local de armazenagem, com suas massas e dimensões aferidas, para caracterização dos comportamentos por:

- Variação linear e diametral (paquímetro 150 mm);
- Densidade aparente (cálculo da relação 'massa/volume');
- Resistência à compressão uniaxial (NBR 5739:2007);
- Absorção de água (28 dias - NBR 15270:2005).

Os resultados foram avaliados por comparação das médias obtidas entre cada um dos parâmetros avaliados em relação ao tempo de cura, com homogeneidade dos dados avaliada por um coeficiente de variação (média ÷ desvio padrão) inferior a 10%.

A partir dos resultados obtidos, quatro composições foram selecionadas para investigação dos processos físico-químico-morfológicos. A escolha foi com base nas maiores resistências à compressão exibidas pelas amostras entre cada um dos quatro grupos representados (grupo 1: 1 a 4, grupo 2: 5 a 8, grupo 3: 9 a 20 e grupo 4: 21 a 35).

3.3 Seleção e caracterização dos compósitos escolhidos

Conforme a indicação do ganho de resistência apresentado pelas amostras, correlacionando os teores de cada resíduo presente nas composições, escolheu-se as composições 2, 6, 10 e 21 para os estudos relacionados às modificações estruturais que implicaram nos ganhos de resistência mais evidentes entre as amostras, com os métodos de:

- Difractometria de Raios-X (DRX) para alterações mineralógicas;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na morfologia das estruturas formadas;

- Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) para mapeamento microquímico dos pontos assinalados no MEV.

Os ensaios de DRX foram desenvolvidos com o difratômetro Shimadzu, modelo XRD-7000, com interpretação dos dados através do software *HighScore Plus* da *Malvern Panalytical*. As análises de MEV e EDS foram obtidas por um microscópio da Zeiss modelo EVO MA 15. Essas análises foram conduzidas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (CMCM-UTFPR).

3.4 Avaliação ambiental de lixiviados solúveis

A avaliação do comportamento frente à lixiviação e solubilização de compostos perigosos das matérias-primas, conforme descrito nas NBR 10004/2004, 10005/2004 e 10006/2004 foi verificada em outros trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisas do professor Vsévolod Mymrine, nos quais foram utilizadas as mesmas matérias-primas de resíduo de mineração do ferro (RMF) (PEDROSO, 2020; CHECHIN, 2021) e RPCEL (PIAZZA, 2020; PEDROSO, 2020) em combinação com outros resíduos industriais incorporados. Os autores demonstraram que os resíduos RMF e RPCEL exibem quantidades inferiores aos limites fixados pela norma de lixiviados e solubilizados de metais pesados, classificando os materiais como classe IIA (resíduos não perigosos e não inertes).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são expostos de acordo com as caracterizações propostas no fluxograma da Figura 12 do capítulo 3 deste trabalho, iniciando pela caracterização das matérias-primas, as 35 composições propostas e as composições 2, 6, 10 e 21 escolhidas para avaliação das microestruturas formadas.

4.1 Caracterização das matérias-primas

4.1.1 Caracterização das Propriedades Físicas

A granulometria das partículas está relacionada ao comportamento físico-químico que as matérias-primas tendem a exibir em termos de quantidade e diâmetro de poros, capacidade de retenção de água, trabalhabilidade entre os grãos quando submetidos a esforços mecânicos e reatividade química em soluções.

É possível verificar pelos dados na Tabela 1, que o RMF, o Entulho e o RPC (coletados para este estudo) são compostos na maior parte por grãos acima de 1,18 mm, que são grãos com melhor formação, e estabilidade físico-química. Em relação ao RMF cabe ressaltar que, na classificação feita por Guimarães (2011) e Silva (2014), os grãos apresentaram diâmetros inferiores a 1,00 mm. Essa diferença encontrada está relacionada à maneira que o resíduo utilizado nesta pesquisa foi coletado. Enquanto os autores citados trabalharam diretamente com a lama em forma de polpa, o RMF coletado para este estudo foi coletado diretamente das casas que foram soterradas pelo resíduo que escoou pelo rompimento da barragem de Mariana (MG), ou seja, mais secos e empelotados, formando torrões maiores.

Os resíduos da produção de papel e celulose (*dregs*, *grits* e lama de cal) exibem granulometria mais fina, não tão bem formados, portanto mais reativos e possivelmente amorfos. Os *dregs*, conforme Foelkel (2013) estão com mais de 90% da granulometria inferior a 1,19 mm. O *grits* exibe faixa significativa acima de 1,18 mm (40,03%), sendo o restante bem dividido nas faixas inferiores, valores de acordo com o encontrado por Santos et al. (2019) e Quina e Pinheiro (2020) que indicam que cerca de 70% dos *grits* está no intervalo de 0,425 mm e 4,75 mm. Nesses casos a presença de grãos maiores é relacionada às

impurezas do processo de recuperação da cal virgem no processo de calcinação da lama de cal.

Na Tabela 1 a coluna do RPCEL representa a mistura entre os resíduos de produção de papel e celulose, conforme exposto no item 3.1 deste trabalho (34% *dregs*, 37% *grits* e 29% lama de cal).

Tabela 1 - Composição granulométrica das matérias-primas

Faixa granulométrica (mm)	RMF (%)	Dregs (%)	Grits (%)	Lama de cal (%)	RPCEL (%)	Entulho (%)	RPC (%)
6,3 - 4,75	0,05	0,00	20,23	0,00	7,49	0,80	0,00
4,75 - 2,36	37,60	0,30	13,10	0,00	4,95	76,50	42,15
2,36 - 1,18	59,20	0,20	6,70	0,00	2,55	20,72	55,03
1,18 - 0,6	1,00	2,60	8,44	0,00	4,01	0,54	1,11
0,6 - 0,15	0,40	5,42	9,83	0,00	5,48	0,56	0,71
0,15 - 0,75	0,25	8,04	1,75	0,00	3,38	0,63	0,10
0,75 - 0,01	1,35	16,59	5,37	0,05	7,64	0,25	0,16
0,063 - 0,043	0,15	21,13	7,08	1,22	10,16	-	0,32
0,043 - 0,036	-	28,26	3,62	4,04	12,12	-	0,42
0,036 - 0,028	-	7,76	4,86	13,45	8,34	-	-
0,028 - 0,02	-	4,78	5,58	25,70	11,14	-	-
0,02 - 0,01	-	3,61	6,87	33,29	13,42	-	-
0,01 - 0,006	-	1,31	2,15	8,91	3,82	-	-
0,006 - 0,003	-	-	1,64	4,32	2,50	-	-
0,003 - 0,001	-	-	2,78	9,02	3,00	-	-
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Nota: Percentual em relação à massa das amostras.

Fonte: Autoria própria

Fisicamente as partículas mais finas contribuem para maior compacidade nas misturas que, com o envolvimento dos grãos de maior diâmetro tornam os espaços entre estes preenchidos, o que resulta na menor quantidade e tamanho dos poros. A elevada superfície específica dos materiais mais finos (razão entre a área de superfície e a massa das partículas) também interfere na propriedade de retenção de água e maior lubrificação entre os grãos em uma mistura, o que contribui para a redução da energia total necessária durante a mistura e a compactação. (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Interações químicas em materiais de menor diâmetro dos grãos também são favorecidas. A maior superfície específica é relacionada à maior área de contato entre os constituintes químicos do grão e das substâncias que o

envolvem. Com isso pode haver favorecimento da dissolução de determinados íons presentes nas partículas mais finas enriquecendo a solução e propiciando a formação de géis que tendem a aumentar a resistência mecânica de compósitos em função do tempo. (MYMRINE, 1978; SWAMMY, 1992; CINCOTTO; QUARCIONI, JOHN, 2010).

Os valores de umidade contida nos materiais logo após a coleta, e a massa específica de cada um deles são indicados pelos valores na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterizações físicas das matérias-primas

Material	Umidade (% massa)	Massa específica (g/cm³)
RMF	< 1,0	3,27
<i>Dregs</i>	64,25	2,21
<i>Grits</i>	16,13	2,49
Lama de cal	18,97	2,66
RPCEL*	32,93	2,44
Entulho	< 1,0	2,42
RPC	< 1,0	2,63

Nota: *(34%D/37%G/29%LC).

Fonte: Autoria própria

Dentre os resíduos caracterizados, o de maior massa específica é o RMF (3,27 g/cm³) devido à presença de minerais de ferro em sua constituição. Valor próximo ao observado na fração mais fina dos RMF nos trabalhos de Guimarães (2011) e Silva (2014), característica que potencializa a reatividade do material em soluções alcalinas, conforme observado por Duan et al. (2015) Defáveri et al. (2019), Elói (2020), dentre outros.

A massa específica para o *dregs* (2,21 g/cm³) está abaixo do que foi observado por Modolo et al. (2014) e Cherian e Siddiqua (2019) de 2,40 a 2,83 g/cm³. O *grits* (2,49 g/cm³) também apresenta a massa específica abaixo ao intervalo encontrado na literatura de 2,66 a 2,70 g/cm³ (ADAMS, 1997; SANTOS et al., 2019; QUINA; PINHEIRO, 2020). A lama de cal (2,66 g/cm³), no entanto, tem a massa específica acima do valor observado na literatura (2,43 g/cm³) (MODOLO et al., 2014). As diferenças observadas podem estar relacionadas a melhorias na eficiência dos processos de recuperação do licor branco.

Os teores de umidade dos materiais provenientes dos processos de produção de celulose são os de valor mais pronunciado, uma vez que todo o processo se utiliza de soluções e são descartados com água que não pôde ser reaproveitada no processo.

A massa específica do entulho obtido para este estudo foi de 2,42 g/cm³, condizente com a massa específica de restos de argamassa e agregados miúdos (areia) (NEVILLE, 1997), derivados do processo de tratamento e separação de materiais diretamente na empresa fornecedora.

Dependendo do percentual de matérias-primas e da energia de compactação empregada é possível a formulação de compósitos com densidade próxima a 2,0 g/cm³.

4.1.2 Composição Química das Matérias-Primas pelo Método de FRX

A composição química quantitativa (FRX), expressada em teor de óxidos, dos resíduos utilizados neste estudo é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química (FRX) das matérias-primas

Óxidos	RMF (%)	Entulho (%)	RPC (%)	Dregs (%)	Grits (%)	LC (%)	RPCel* (%)
CaO	0,10	11,27	47,12	41,10	53,50	54,80	49,32
MgO	0,10	1,22	32,54	2,80	0,50	0,50	1,28
SiO ₂	58,30	68,03	3,57	2,40	2,10	0,40	1,71
Al ₂ O ₃	3,41	6,23	0,60	0,50	0,60	0,10	0,42
Fe ₂ O ₃	35,20	3,54	0,24	2,10	0,30	0,10	0,85
Na ₂ O	0,10	0,22	0,01	0,80	3,50	0,80	1,80
K ₂ O	0,30	0,67	0,10	0,50	0,30	0,05	0,30
P ₂ O ₅	0,10	0,12	0,02	0,40	0,70	0,70	0,60
TiO ₂	0,10	0,63	-	0,10	0,07	-	0,06
MnO	0,10	0,00	0,03	4,30	0,10	0,10	1,53
SO ₃	0,08	0,47	0,03	4,00	1,20	0,20	1,96
Cr ₂ O ₃	-	-	-	2,30	0,33	-	0,89
SrO	-	0,03	-	0,40	-	0,30	0,22
P.F.**	2,11	7,57	15,74	38,30	36,73	41,93	38,85
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Nota: *Valores para a mistura dos resíduos de papel e celulose (34%D/37%G/29%LC).

**P.F. (perda ao fogo) corresponde ao percentual de perda em massa pela volatilização de compostos como matéria orgânica e carbonatos presentes nas amostras.

Fonte: Autoria própria

A presença de sílica juntamente com óxidos alcalinos torna as misturas ricas na possibilidade de crescimento e densificação de soluções sol-gel entre os poros dos compósitos. O Cromo (Cr), considerado metal pesado (tóxico), é observado na quantidade de 2,30% no *dregs* e 0,30% no *grits*, o que demanda cuidado em relação à incorporação desse metal na estrutura dos compósitos propostos de forma a não ser solubilizado e lixiviado para o ambiente, causando contaminação. No entanto Jia et al. (2019) relatam baixa mobilidade de metais

pesados em *dregs*, que é um resíduo Classe IIb de acordo com a classificação da NBR 10004/2004 (FOELKEL, 2013).

Ao somar o teor de CaO e MgO no RPC obtém-se o total de 79,66%, valor abaixo do recomendado pela norma brasileira NBR 6453 (ABNT, 2003) que estipula os teores acima de 88%. O teor de carbonatos, medido através da perda ao fogo, também está acima do valor permitido pela norma (15,75%), que admite valores menores ou iguais a 12% para cales comuns e em pedra e ainda mais rigorosa para cales especiais, valores menores ou iguais a 6%, conforme pode ser observado no Quadro 10.

A composição química das matérias-primas de RMF e Entulho indica maiores quantidades de óxido de silício, enquanto do RPC e RPCEL se pronunciam os óxidos alcalinos (CaO e MgO). Combinações entre esses elementos possibilitam a formação de silicatos e carbonatos que podem se formar com certa cristalinidade ou ainda amorfos, densificando a matriz dos compósitos propostos, favorecendo tanto o aumento da resistência mecânica dos compósitos quanto a imobilização de metais pesados, evidência observada nos estudos de lixiviação e solubilização de Yellishetty et al. (2008), Arce et al. (2009) e Cechin (2021).

4.1.3 Composição Mineralógica das Matérias-Primas

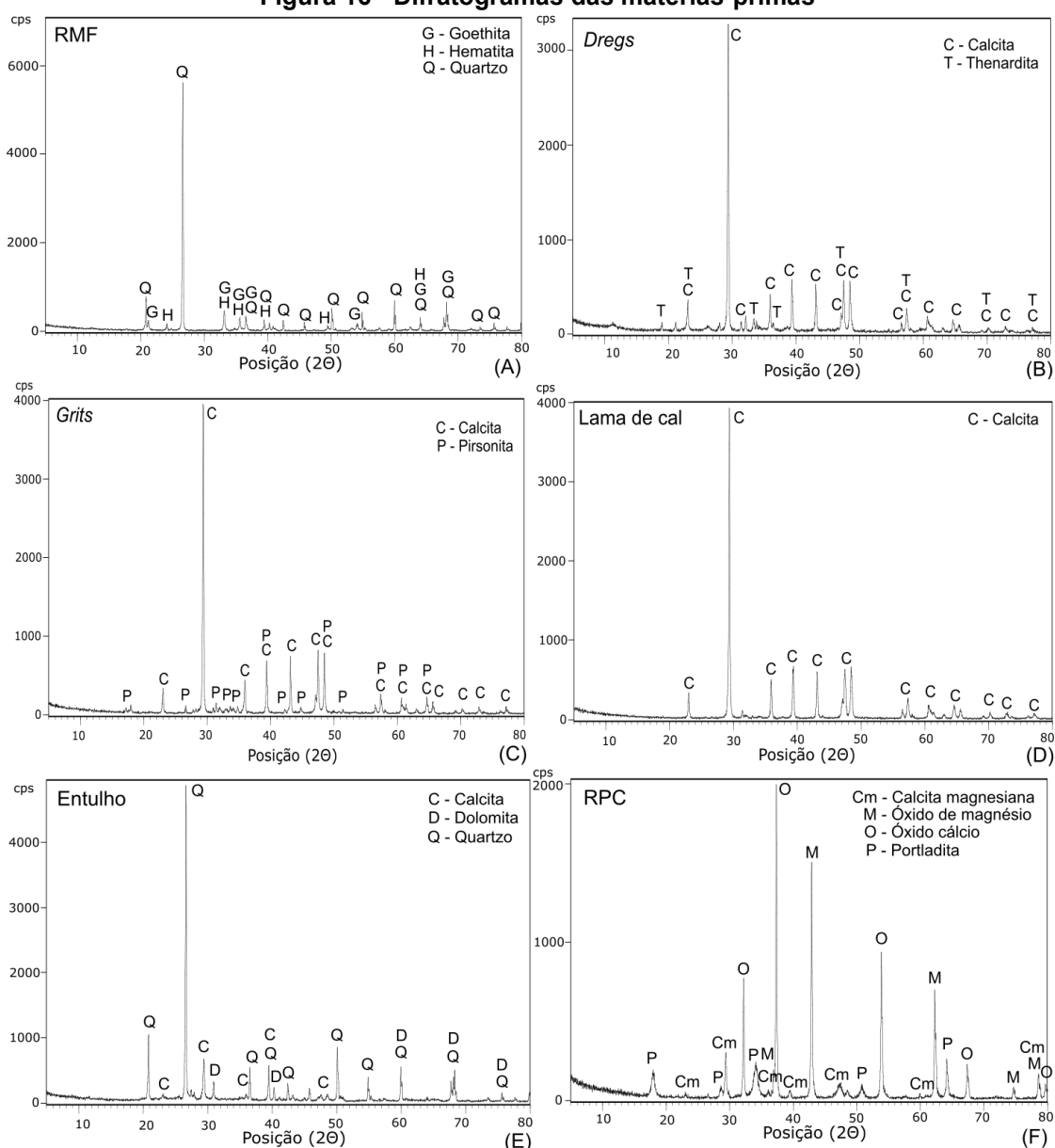
Os difratogramas obtidos das matérias-primas são apresentados na Figura 18, com o resumo dos minerais observados indicado no Quadro 15.

Quadro 15 - Composição mineralógica dos resíduos

Resíduo	Mineralogia Observada
RMF	Goethita, Hematita, Quartzo
<i>Dregs</i>	Calcita, Thenardita
<i>Grits</i>	Calcita, Pirsonita
Lama de cal	Calcita
Entulho	Calcita; Dolomita, Quartzo
RPC	Calcita magnesiana, Óxido de cálcio, Óxido de magnésio, Portlandita

Fonte: Autoria própria

Figura 16 - Difratomogramas das matérias-primas



Legenda: (A) RMF, (B) *Dregs*, (C) *Grits*, (D) Lama de cal, (E) Entulho e (F) RPC.
Fonte: Autoria própria

Os minerais de goethita, hematita e quartzo condizem com aqueles observados por Nocitti (2011), Bastos (2013), Andrade (2014), Elói (2020), dentre outros. Alguns autores ainda relatam a presença de cristobalita (ELÓI, 2020; CECHIN, 2021), e do argilomineral caulinita (CHAVES, 2009; BASTOS, 2013; PEDROSO, 2020).

No resíduo de *dregs* é normalmente observada a calcita (MARTINS et al., 2007; JIA et al., 2019; SANTOS et al., 2019). A thenardita não foi observada nos trabalhos consultados. Os *grits* são formados por calcita (SAELI et al., 2019; SANTOS et al., 2019; MARTÍNEZ-LAGE et al., 2016) e pirsonita (MARTINS et

al., 2007). A lama de cal contém apenas calcita, mineral que compõem de 85 a 95% nas lamas de cal já estudadas (MARTINS et al., 2007; WOLFF, 2008; CABRAL et al., 2008).

A mineralogia dos entulhos é coincidente com a de materiais cerâmicos e argamassas, contendo calcita, dolomita e quartzo. No RPC a presença de calcita magnesiana pode estar atrelada a má queima do calcário, resultando em cales que não atendem aos parâmetros normativos propostos (ABNT, 2003).

A composição mineralógica das matérias-primas selecionadas é próxima aos minerais encontrados em materiais de construção como tijolos, telhas, blocos, agregados (areia e pedra britada), cimentos, concretos, dentre outros.

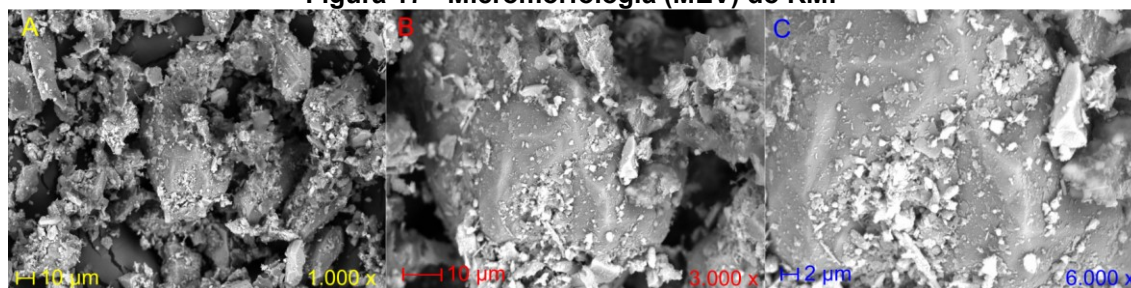
4.1.4 Micromorfologia e Composição Microquímica das Matérias-Primas

Neste tópico são apresentadas as imagens da microestrutura e mapeamento de elementos obtidos por MEV e a composição microquímica por EDS, que em alguns casos se dá na área da micrografia e em outros, nos pontos de interesse da caracterização microquímica.

4.1.4.1 Micromorfologia e composição microquímica do RMF

A estrutura micromorfológica do RMF é apresentada na Figura 17 (A - ampliação de 1.000x, B - ampliação de 3.000x e C - ampliação de 6.000x). É possível verificar que o resíduo apresenta microestrutura porosa com incrustações de pequenos minerais em grãos de minerais maiores.

Figura 17 - Micromorfologia (MEV) do RMF

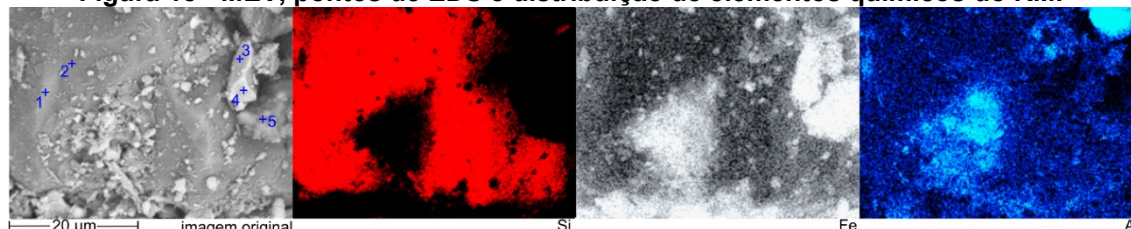


Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Na Figura 18 são indicados os pontos de 1 a 6 em que foi avaliada a composição microquímica por EDS da imagem da Figura 17c e o mapeamento de elementos químicos na área da micrografia. Os resultados evidenciam a

existência de um grão de sílica (quartzo) com incrustações de minerais de ferro e alumínio, podendo ser hematita nos pontos 3, 4 e 5. A composição microquímica é indicada na Tabela 4.

Figura 18 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos químicos do RMF



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 4 - Composição microquímica (EDS) dos pontos indicados no RMF

Pontos	Al	Si	Fe	Total
1	0,00	97,19	2,81	100,00
2	0,00	96,97	3,03	100,00
3	3,21	10,74	86,05	100,00
4	2,87	8,79	88,34	100,00
5	2,82	7,18	90,00	100,00

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

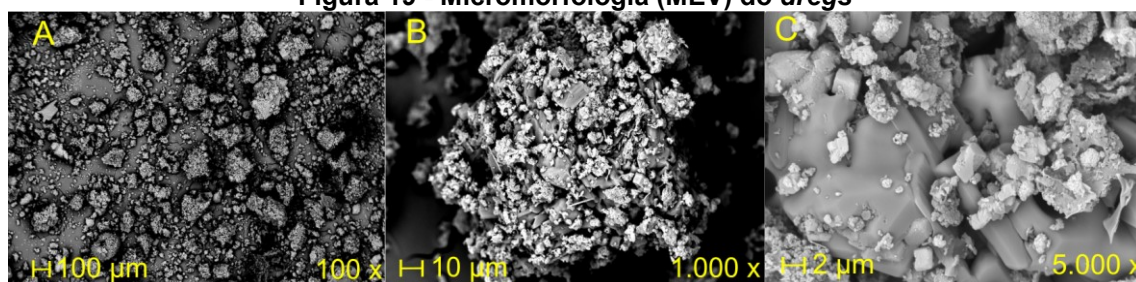
Fonte: Autoria própria

Os valores indicados na Tabela 4 revelam grande quantidade de SiO_2 nos pontos 1 e 2 da micrografia, o que condiz com a possibilidade de ser um grão de quartzo, mineral observado pelo método de DRX. A matriz do alumínio (Al), na Figura 18, aparenta ser bem distribuída com densificação mais ao centro e no canto superior direito, podendo ser um indício da presença de caulinita, argilomineral já observado no RMF por Prates (2018), Pedroso (2020), Elói (2020), dentre outros autores. A micrografia do ferro (Fe) indica maior densidade no local dos pontos 3, 4 e 5, que podem ser grãos de hematita ou goethita.

4.1.4.2 Micromorfologia e composição microquímica dos RPCEL

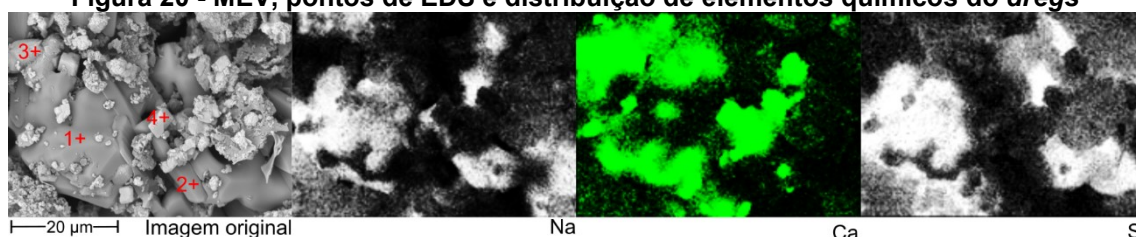
Na Figura 19 são apresentadas as imagens da microestrutura do *dregs*, com ampliação de 100x (Figura 19a), 1.000x (Figura 19b) e 5.000x (Figura 19c). É possível identificar pequenos grãos com espaços vazios (poros) sem aparente ligação estrutural entre eles, posicionados em meio a uma matriz com aparência de lama. Na Figura 20 são apresentados os pontos da análise microquímica referente à ampliação da Figura 19c.

Figura 19 - Micromorfologia (MEV) do *dregs*



Fonte: Autorial própria e CMCM-UTFPR

Figura 20 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos químicos do *dregs*



Fonte: Autorial própria e CMCM-UTFPR

Na Figura 20 é visível a formação da thenardita, coincidência de maior densidade nas áreas das micrografias do sódio (Na) e enxofre (S), coerente com os resultados dos pontos 1 e 2 da micrografia, apresentados na Tabela 5, onde prevalecem as quantidades de Na e S. Nos pontos 3 e 4 são prováveis as formações de calcita com 73,9 e 79,88%, respectivamente, de cálcio (Ca).

Tabela 5 - Composição microquímica (EDS) dos pontos do *dregs*

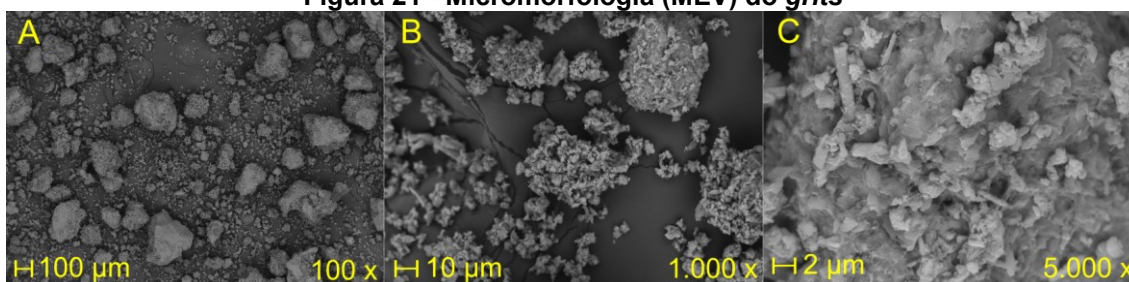
Pontos	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Cu	Total
1	41,51	-	-	-	52,27	6,22	-	-	-	100,0
2	77,85	-	-	-	17,12	5,03	-	-	-	100,0
3	16,72	1,83	1,20	-	-	73,90	2,15	2,32	1,88	100,0
4	8,85	3,15	1,39	2,39	-	79,88	1,78	1,41	1,15	100,0

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

Fonte: Autorial própria

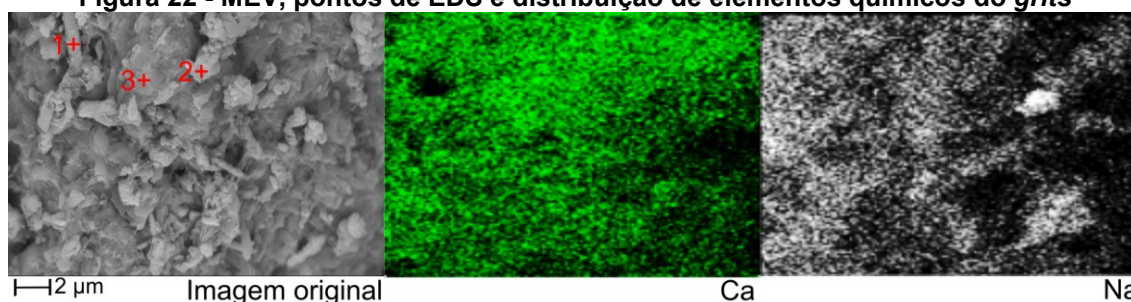
Na Figura 21 é apresentada a microestrutura de uma amostra de *grits*, sendo ampliadas em 100x (Figura 21a), 1.000x (Figura 21b) e 5.000x (Figura 21c). A microestrutura é composta por pequenos grãos espalhados em uma matriz de lama (fina). A ampliação de um grão na Figura 21c foi utilizada para a marcação de pontos de EDS e mapeamento dos elementos químicos principais (Figura 22).

Figura 21 - Micromorfologia (MEV) do *grits*



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Figura 22 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos químicos do *grits*



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

As imagens da Figura 22 expõem a estrutura e o mapeamento microquímico do *grits*. As imagens da análise microquímica exibem maior densidade de cálcio (Ca) pouco acima do centro da imagem, indicando a possibilidade de calcita juntamente a pirsonita ($\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2$). Os pontos 1, 2 e 3 indicados na micrografia exibem composição química com maiores teores de cálcio de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Composição microquímica (EDS) dos pontos do *grits*

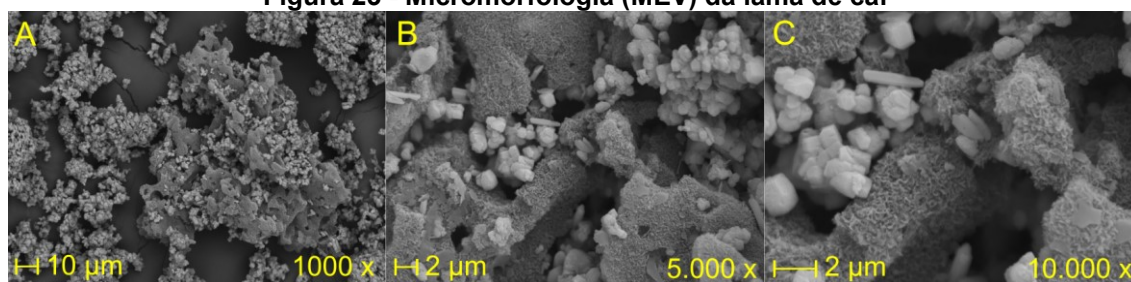
Pontos	Na	Mg	Al	Si	Ca	K	Total
1	4,12	2,30	1,33	7,34	84,53	0,38	100,0
2	2,90	1,17	0,83	2,15	92,45	0,50	100,0
3	1,65	0,41	0,62	5,15	91,94	0,23	100,0

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

Fonte: Autoria própria

A lama de cal exhibe estruturas aparentemente amorfas, com algumas incrustações de cristais de calcita, estrutura bastante porosa com algumas formações cristalinas dentro de poros entre material amorfo. Na Figura 23 é possível verificar as imagens ampliadas da microestrutura do material, com ampliação de 1.000x (Figura 23a), 5.000x (Figura 23b) e 10.000x (Figura 23c).

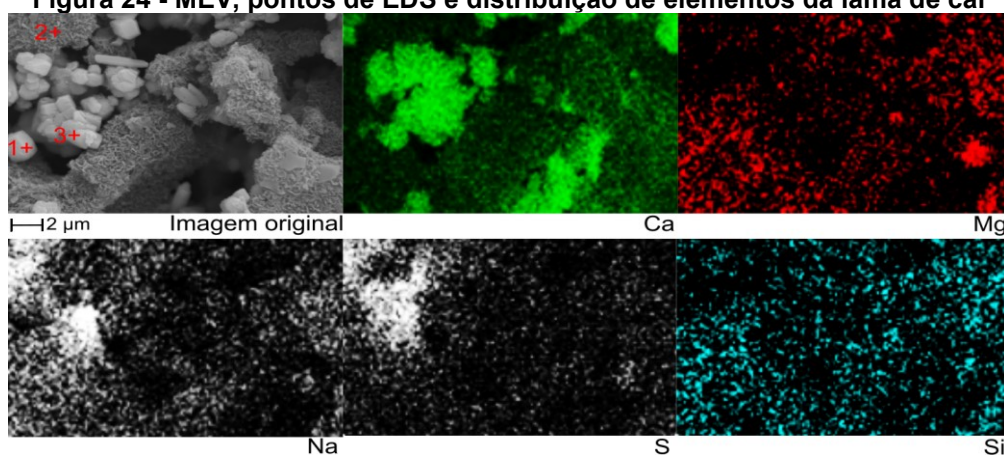
Figura 23 - Micromorfologia (MEV) da lama de cal



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Na imagem da Figura 24 são apresentadas as estruturas observadas e o mapeamento por EDS nas formações da ampliação da Figura 23c. A composição microquímica dos pontos 1 a 3 identificados na imagem é indicada na Tabela 7.

Figura 24 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos da lama de cal



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 7 - Composição microquímica (EDS) da lama de cal

Pontos	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	K	Total
1	11,01	3,15	1,11	1,18	-	83,55	-	100,0
2	26,55	13,47	2,93	7,41	10,20	38,59	0,85	100,0
3	7,94	4,81	1,30	2,75	-	83,20	-	100,0

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

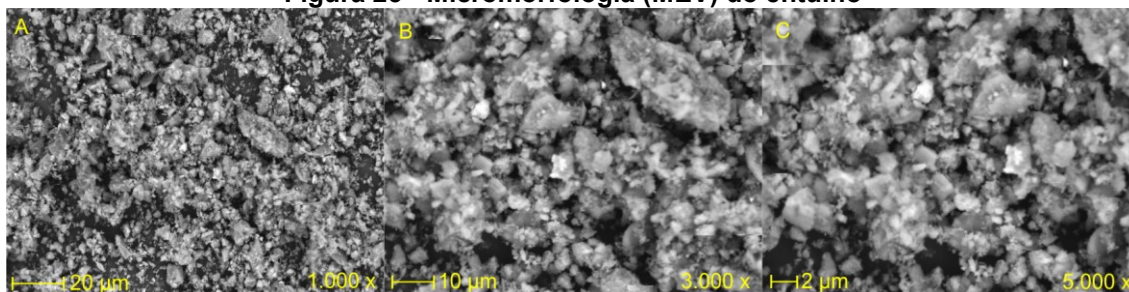
Fonte: Autoria própria

Na região do ponto 2 da micrografia há maiores concentrações de sódio (Na) (26,55%) e enxofre (S) (10,20%). Os pontos 1 e 3 tem elevada concentração de cálcio (Ca) (83%), podendo ser cristais de calcita, que tem maior densidade na imagem do mapeamento do elemento Ca.

4.1.4.3 Micromorfologia e composição microquímica do entulho

Na Figura 25 são apresentadas as imagens da microestrutura de uma amostra de entulho. As ampliações de 1.000x (Figura 25a), 3.000x (Figura 25b) e 5.000x (Figura 25c) confirmam a porosidade da matriz, com partículas pequenas e heterogêneas, sem ligação entre elas, contendo elementos de materiais cerâmicos e traços de argamassas, com possibilidade para sulfoaluminatos e ferroaluminatos que tornam o material propício para a dissolução de íons em ambiente alcalino.

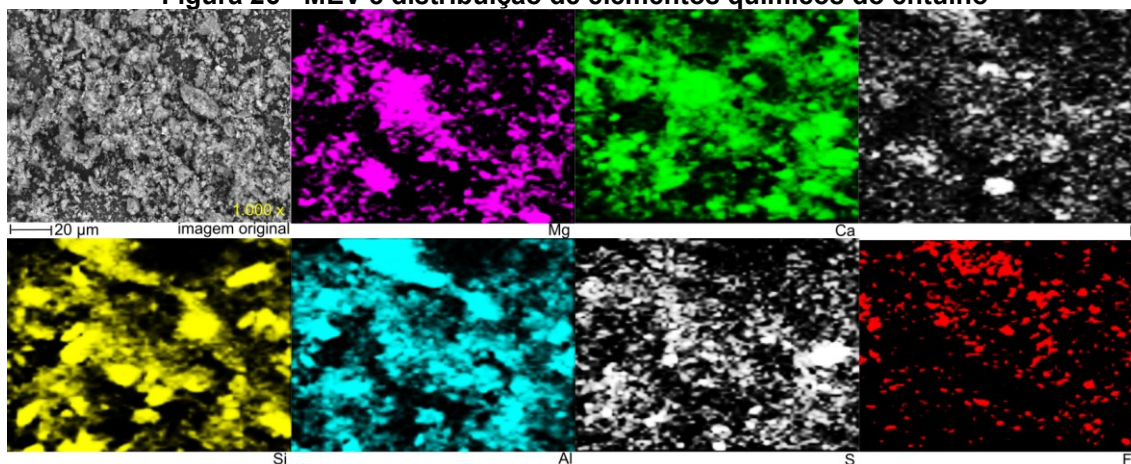
Figura 25 - Micromorfologia (MEV) do entulho



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

A análise microquímica da área da micrografia (Figura 25a), e a distribuição dos elementos químicos nessa matriz são apresentados na Figura 26. O percentual de elementos químicos do mapeamento microquímico (EDS), também realizado pela área da micrografia citada, é exposto na Tabela 8.

Figura 26 - MEV e distribuição de elementos químicos do entulho



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 8 - Composição microquímica (EDS) da área de entulho

	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Total
Área	0,61	3,33	13,77	43,52	2,07	2,41	28,34	1,16	4,79	100,0

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

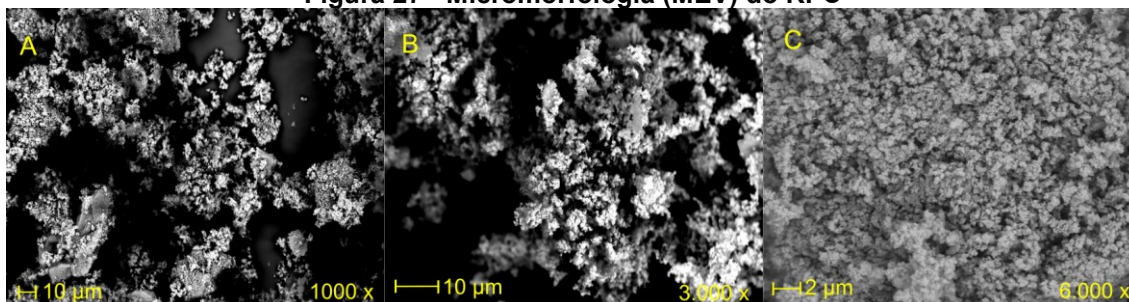
Fonte: Autoria própria

As imagens da distribuição química na Figura 26 exibem grãos de Si (possivelmente quartzo conforme o DRX) distribuídos em uma matriz com cálcio e magnésio (calcita e dolomita) e também alumínio, proveniente de argilominerais de materiais cerâmicos e cimentos. O enxofre (S) aparece bem distribuído, em pequena quantidade (2,07%) e pode ser oriundo de sulfoaluminatos (a exemplo da etringita).

Tanto a caracterização química por FRX quanto a microquímica por EDS revelam a predominância de silício (Si) no material (68,03% FRX e 43,52% EDS), com o segundo elemento de maior concentração sendo o cálcio. É de conhecimento que esses elementos participam ativamente em processos de dissolução e combinação para a formação de novas estruturas complexas.

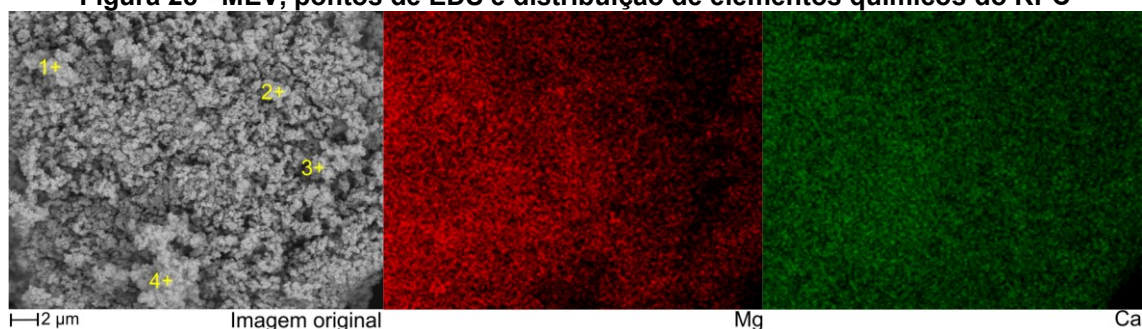
4.1.4.4 Micromorfologia e composição microquímica do RPC

A morfologia do RPC é apresentada na Figura 27, onde há ampliações de 1.000x (Figura 27a), 3.000x (Figura 27b) e 6.000x (Figura 27c). A estrutura dos grãos aparenta ser porosa e amorfa, própria para reatividade química. As estruturas microscópicas são de calcita magnesiana, óxido de magnésio e portlandita, conforme o resultado de DRX. A partir da Figura 27c foram assinalados quatro pontos para análise de EDS e verificação da distribuição dos elementos químicos principais, resultando na Figura 28.

Figura 27 - Micromorfologia (MEV) do RPC

Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Figura 28 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos químicos do RPC



Fonte: Aatoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 9 - Composição microquímica (EDS) dos pontos de RPC

Pontos	Mg	Al	Ca	Total
1	38,61	0,73	60,66	100,0
2	38,40	0,61	60,99	100,0
3	34,91	0,88	64,21	100,0
4	31,57	0,86	67,57	100,0

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

Fonte: Aatoria própria

A composição microquímica dos pontos, apresentada na Tabela 9, consolida a caracterização da calcita magnesiana, com proporção química entre cálcio e magnésio (Ca:Mg) sendo em torno de 1:2, diferente do que ocorre com a dolomita que ocorre na razão de 1:1 (Ca:Mg). Os elementos de Ca e Mg aparecem bem distribuídos por toda a área da micrografia.

4.2 Caracterização dos materiais desenvolvidos

Os novos materiais foram caracterizados em termos de resistência mecânica à compressão, massa, altura e diâmetro e densidade, parâmetros acompanhados a partir da moldagem e nas idades de 3, 7, 14, 28, 60, 180, 360 e 720 dias de cura. A absorção de água foi avaliada na idade de 28 dias.

Os dados completos de cada um desses parâmetros, com os cálculos de médias, desvios-padrão e coeficientes de variação estão disponibilizados no APÊNDICE B. Para melhor apreciação dos resultados escolheu-se a exposição por meio de gráficos e tabelas no corpo do texto.

Por se tratarem de 35 composições, com algumas similaridades entre elas, resolveu-se dividi-las em quatro grupos. As amostras contendo apenas entulho e RPC formam o grupo 1 (composições 1 a 4); no grupo 2 estão as misturas entre RPCEL e RPC (composições 5 a 8); misturas entre RPCEL, Entulho e RPC formam o grupo 3 (composições 9 a 20) e misturas entre os

resíduos de RMF, RPCEL e RPC são representadas no grupo 4 (composições 21 a 35).

4.2.1 Resistência Mecânica à Compressão Axial

Em razão do tempo de cura há aumento na resistência mecânica dos compósitos moldados. Na Tabela 10 é apresentada a variação da resistência em função do tempo de cura para as composições de 1 a 8.

Tabela 10 - Resistência à compressão dos compósitos 1 a 8

Composições (RMF/RPCEL/Entulho/RPC)	σ (MPa)								
	3d	7d	14d	28d	60d	90d	180d	360d	720d
1 (0/0/90/10)	1,38	3,38	3,88	4,14	3,60	3,81	3,75	6,56	6,67
2 (0/0/85/15)	1,70	3,86	4,53	4,82	4,84	5,16	5,91	13,72	13,28
3 (0/0/80/20)	4,17	5,38	6,02	6,92	7,21	6,94	7,50	10,16	11,86
4 (0/0/75/25)	4,40	5,94	6,34	6,86	7,70	6,93	7,67	7,61	10,52
5 (0/90/0/10)	0,46	0,40	0,52	0,48	0,71	0,52	1,22	1,52	2,11
6 (0/85/0/15)	0,49	0,47	0,59	0,54	0,82	0,81	0,87	2,88	5,34
7 (0/80/0/20)	0,45	0,52	0,60	0,53	0,78	0,57	0,87	3,20	3,73
8 (0/75/0/25)	0,59	0,70	0,86	0,77	1,00	0,93	1,16	1,86	4,03

Nota: A letra 'd' se refere a dias (3d = 3 dias).

Fonte: Autoria própria

Nos compósitos de 1 a 4 as resistências ultrapassam 1,3 MPa (composições 1 e 2) e 4 MPa (composições 3 e 4) aos 3 dias de cura. A composição 2 atingiu 13,72 MPa aos 360 dias de cura. Nas composições de 5 a 8 as resistências foram baixas quando comparadas com todas composições do estudo, atingindo valores acima de 1,0 MPa a partir dos 360 dias de cura.

Maiores teores de RPC resultaram em maiores resistências iniciais nos compósitos, com redução nos valores na idade de 90 dias (comparado aos resultados de 60 dias). O compósito 4 apresenta resistência de 7,70 MPa aos 60 dias e, aos 90 dias o valor diminui para 6,93 MPa, voltando a subir a partir dos 180 dias de cura. Nos compósitos 1 e 2 (10 e 15% de RPC, respectivamente) esse fenômeno não é observado, apenas a discreta redução no valor da composição 2 de 360 para 720 dias. Conteúdos acima de 15% de RPC podem estar acelerando as reações de formação de novas estruturas entre os espaços vazios dos compósitos, porém na idade de 360 dias houve desaceleração no ganho de resistência, com possibilidade de empolamento dos grãos de RPC que dificultam o progresso das reações químicas responsáveis pelo crescimento de

novos materiais. Na Tabela 11 são indicados os valores para resistência mecânica das composições de 9 a 20.

Tabela 11 - Resistência à compressão dos compósitos 9 a 20

Composições (RMF/RPCEL/Entulho/RPC)	σ (MPa)								
	3d	7d	14d	28d	60d	90d	180d	360d	720d
9 (0/20/65/15)	2,38	3,17	3,48	3,80	4,78	4,58	4,96	14,75	12,83
10 (0/25/60/15)	2,33	3,06	3,39	3,75	5,34	4,27	5,47	18,69	21,47
11 (0/30/55/15)	1,95	2,68	2,99	3,58	5,00	4,51	5,55	12,12	9,46
12 (0/35/50/15)	1,61	2,09	2,55	3,19	3,97	3,67	4,32	12,01	10,98
13 (0/15/65/20)	2,97	4,15	4,72	5,04	6,91	6,01	8,26	11,38	11,55
14 (0/20/60/20)	2,34	3,84	4,18	4,49	5,92	5,41	7,35	12,41	11,66
15 (0/25/55/20)	1,82	3,09	3,26	4,26	5,37	4,20	5,94	13,36	12,81
16 (0/30/50/20)	1,50	2,36	2,68	3,42	4,67	3,53	5,55	7,16	8,32
17 (0/15/60/25)	2,05	3,50	4,32	4,46	5,98	4,35	5,57	10,94	12,83
18 (0/20/55/25)	1,66	2,49	3,56	3,70	4,45	3,28	3,91	11,97	13,41
19 (0/25/50/25)	1,50	2,59	3,19	3,09	4,19	3,31	5,45	10,36	13,00
20 (0/30/45/25)	1,70	2,25	2,66	2,72	4,19	3,08	4,54	8,37	11,68

Nota: A letra 'd' se refere a dias (3d = 3 dias).

Fonte: Autoria própria

Entre as composições apresentadas na Tabela 11, a de número 10 exibiu o maior valor para a resistência à compressão, 21,31 MPa aos 720 dias, contendo 15% de RPC, teor que também conferiu maior resistência para as composições 2 e 6. Observa-se que o aumento na quantidade de RPCEL nas misturas é acompanhado por valores mais baixos de resistência mecânica. A relação entre quantidade de entulho e RPCEL (entulho ÷ RPCEL) com melhores resultados ficou entre 0,36 (composição 18) a 0,45 (composição 15), com melhores resultados para a relação de 0,42 utilizada na composição 10.

A partir de 7 dias de cura todas essas composições ultrapassam o valor de 2 MPa. Na Tabela 12 são indicados os valores de resistência das composições 21 a 35.

Nas composições com adição de RMF (21 a 35) os valores de resistência mecânica ficam mais próximos a 2 MPa a partir dos 14 e 28 dias de cura, diferente do observado para as demais composições (excluindo as de 5 a 8). De maneira análoga ao observado nas outras composições, os maiores valores de resistência mecânica nas idades de 360 e 720 dias ocorre para as composições com 15% de RPC e, maiores quantidades de RPCEL resultaram em valores mais baixos de resistência mecânica.

Tabela 12 - Resistência à compressão dos compósitos 21 a 35

Composições (RMF/RPCEL/Entulho/RPC)	σ (MPa)								
	3d	7d	14d	28d	60d	90d	180d	360d	720d
21 (5/30/50/15)	1,38	1,96	2,33	3,40	3,66	3,20	4,06	15,32	15,88
22 (5/35/45/15)	1,18	1,80	2,02	3,10	4,07	3,30	4,35	12,11	11,44
23 (5/40/40/15)	0,97	1,49	1,52	2,55	2,95	2,71	3,24	7,83	7,88
24 (5/45/35/15)	0,86	1,23	1,33	1,96	2,44	2,39	2,58	6,29	5,75
25 (5/50/30/15)	0,78	0,95	1,32	1,71	2,06	1,87	2,12	4,07	5,28
26 (10/30/40/20)	1,32	1,90	2,21	2,98	3,27	3,45	3,76	9,11	10,18
27 (10/35/35/20)	0,97	1,67	1,69	2,23	2,93	2,97	3,15	10,19	13,28
28 (10/40/30/20)	0,86	1,20	1,56	2,06	2,56	2,64	2,88	7,64	9,77
29 (15/25/35/25)	1,29	2,01	2,33	2,87	3,48	3,26	3,03	8,55	9,67
30 (15/30/30/25)	1,43	1,72	1,77	2,12	2,99	3,78	3,19	10,28	13,53
31 (15/35/25/25)	1,20	1,52	1,77	2,21	2,81	3,22	3,42	7,85	10,32
32 (20/20/35/25)	1,71	2,48	2,95	3,62	4,27	3,97	5,05	7,20	8,14
33 (20/25/30/25)	1,11	1,54	2,31	2,27	4,15	3,10	3,35	6,27	8,39
34 (20/30/25/25)	1,07	1,35	1,80	2,43	3,57	2,51	3,38	6,64	8,41
35 (20/35/20/25)	1,00	1,38	2,51	2,08	3,88	2,06	4,02	7,02	10,30

Nota: A letra 'd' se refere a dias (3d = 3 dias).

Fonte: Autoria própria

Maiores quantidades na adição de RMF revelam efeito positivo para ganho de resistência mecânica. Comparando as composições 23 com a 30, onde a relação de RPCEL e entulho é igual (1:1), houve maior ganho de resistência na composição 30, formulada com maior quantidade de RMF (15%). Esse comportamento pode estar atrelado ao efeito pozolânico que o RMF exibe em meio alcalino (MUCSI, 2015; DEFÁVERI et al., 2019; PEDROSO, 2020).

Todas composições estudadas apresentam o desenvolvimento próximo de resistência à compressão, com visível salto nos valores da idade de 180 dias para os 360 dias. Esse ganho elevado está relacionado ao fechamento de pequenas fissuras na microestrutura dos materiais, densificando suas estruturas.

Quando observadas as resistências mecânicas entre 60, 90 e 180 dias é possível notar a diminuição nos valores de resistência aos 90 dias de cura, comportamento mais evidente entre as composições de 13 a 20 e naquelas contendo 20% de RMF nas misturas (32 a 25). Tal comportamento começou a ser estudado por Mymrine (1978), e está relacionado ao entendimento da maneira em que os componentes das misturas interagem em meio alcalino. Conforme descrito pelo autor, inicialmente há o preenchimento das microfissuras por uma solução com íons difundidos que se combinam, passando para o estado sol-gel que endurece e forma um gel com a idade. Ao endurecer o gel perde água e são formadas novas fissuras na estrutura. Sendo alcalina a solução contida nessas fissuras, desencadeará o ataque alcalino na superfície das

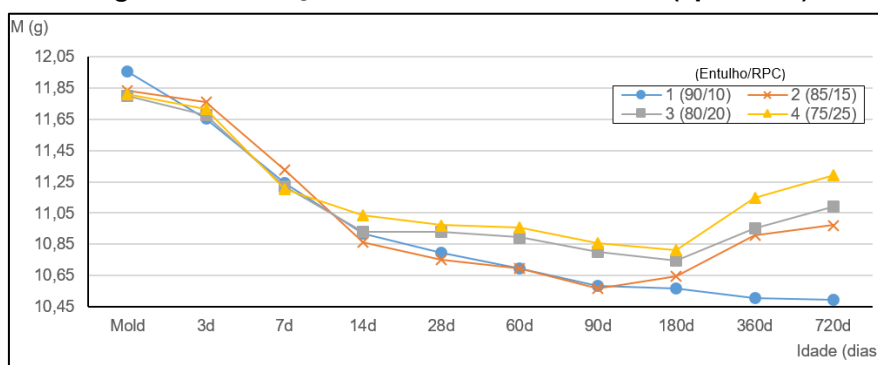
partículas formadas e terá início um novo processo de formação de estruturas nas fissuras causadas pela sinérese (fissuras por envelhecimento do gel). Neste momento ocorre um rearranjo das partículas que refletirá na diminuição da resistência mecânica em ciclos periódicos nos compósitos, explicando algumas variações na resistência mecânica observáveis durante o período de cura (MYMRINE, 1978; 1981; MYMRINE et al., 2020).

Em relação à aplicabilidade desses materiais nota-se que a resistência mecânica é suficiente para se utilizar como tijolos maciços para alvenaria, classificados em três classes de resistência à compressão, conforme a norma NBR 7170/83. Tijolos com resistência entre 1,5 e 2,5 MPa são da classe A, entre 2,5 e 4,0 MPa classe B e acima dos 4,0 MPa são da classe C (ABNT, 1983). A partir dos 7 dias de moldagem a maior parte das composições propostas já exibe resistências que os classificam como tijolos classe C, com a vantagem de ganho de resistência ao decorrer do tempo.

4.2.2 Variação de Massa dos Materiais

Na Figura 29 são apresentados os gráficos do percentual de variação de massa das composições 1 a 4. É possível observar que logo após a moldagem já houve perda de massa, sendo menor na composição 1 provavelmente devido ao menor calor de hidratação da composição com menor teor de RPC (10%), com menor evaporação inicial.

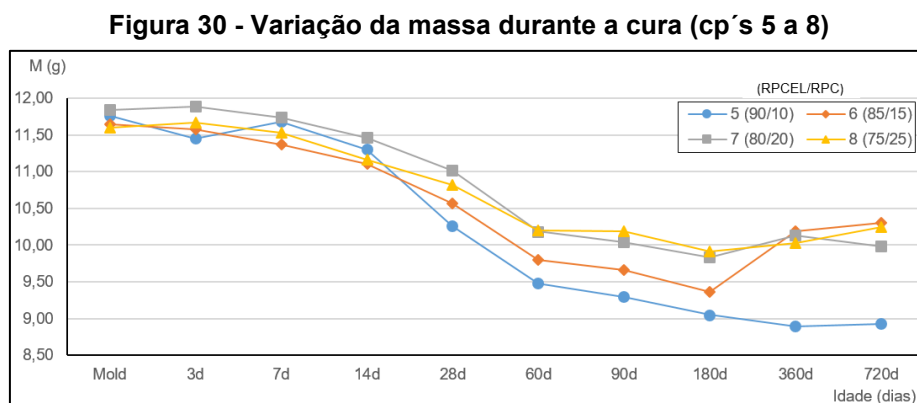
Figura 29 - Variação da massa durante a cura (cp's 1 a 4)



Fonte: Autoria própria

A diminuição da massa é similar até os 14 dias de cura, quando a composição 4 (25% RPC) exibe menor perda de massa que as demais. Isso pode ser atrelado ao potencial de retenção de água da cal (ou RPC) e também

maior carbonatação da superfície em razão do maior conteúdo de RPC, o que evita a perda de água. Aos 180 dias de cura há ganho de massa nas composições 2 e 4, comportamento que a composição 3 passa a exibir aos 360 dias de cura, quando apenas a composição 1 não apresenta ganho de massa. Nas composições de 5 a 8 a variação da massa é ilustrada na Figura 30.

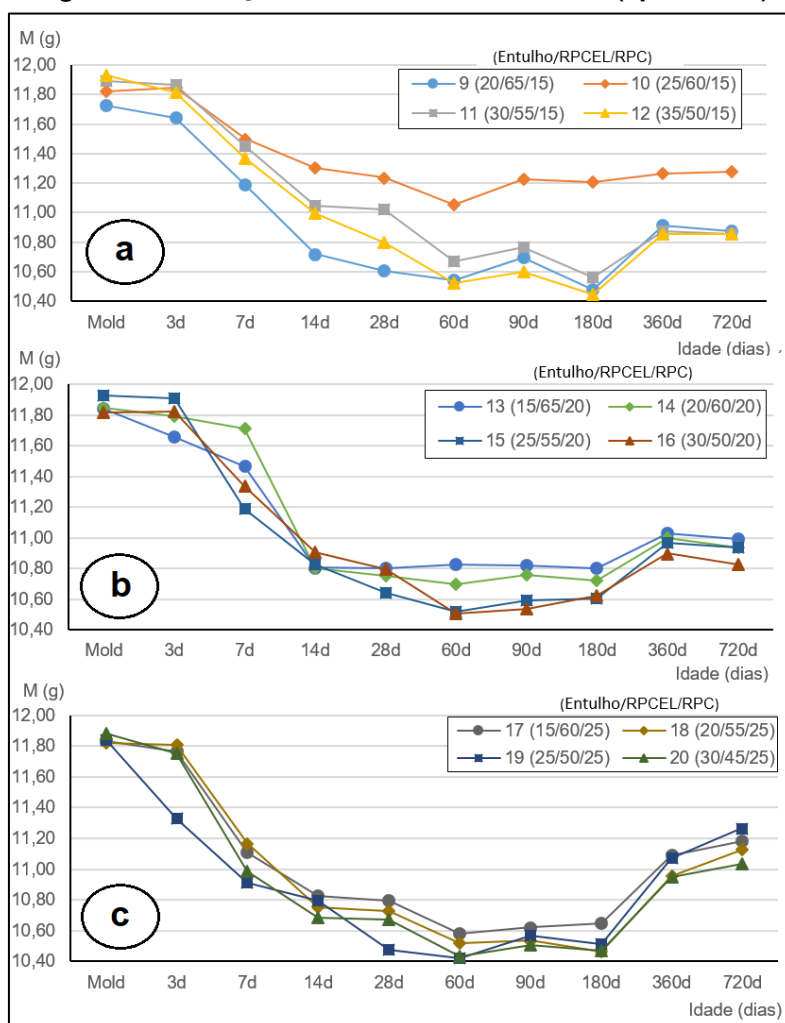


Fonte: Autoria própria

A perda de água nas composições 5 a 8 ocorre com menor intensidade até os 14 dias quando comparadas com as composições de 1 a 4, fenômeno possivelmente atrelado à maior quantidade de finos nos compósitos 5 a 8. Aos 360 dias de cura há ganho de massa nas composições 6 a 8, com teores de RPC entre 15 a 25%, o que não foi observado nas composições 1 e 5, ambas com 10% de RPC.

Na Figura 31 são expostas as curvas de variação de massa em relação ao tempo de cura das composições 9 a 12 (Figura 31a) com teor de RPC de 15%, 13 a 16 (Figura 31b) com teor de RPC 20% e 17 a 21 (Figura 31c) contendo 25% de RPC.

Figura 31 - Variação da massa durante a cura (cp's 9 a 20)

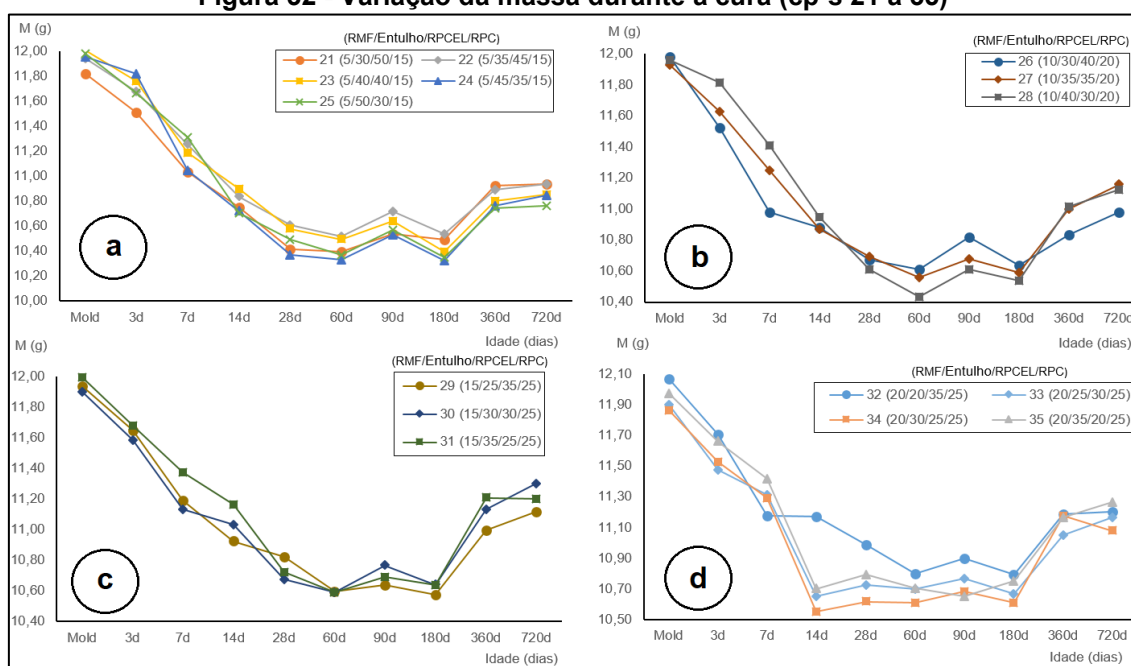


Fonte: Autoria própria

A mistura mais estável em termos de perda de massa foi a composição 10, contendo 15% de RPC e relação de 0,42 entre a quantidade de Entulho/RPCEL. Aos 90 dias de cura os gráficos exibem tendência de ganho de massa em relação aos 60 dias. Esse ganho de massa pode estar relacionado ao rearranjo entre os compostos químicos formados pela interação em meio alcalino, assimilando água em suas estruturas, de maneira similar à formação dos géis formados na reação álcali-agregado.

Os gráficos das composições 21 a 35, em que se incorpora o RMF às misturas, são exibidos na Figura 32.

Figura 32 - Variação da massa durante a cura (cp's 21 a 35)



Fonte: Autoria própria

A diminuição na massa nas amostras contendo RMF exibe curvas similares com 5% de RMF (Figura 32a), 10% (Figura 32b) e 15% (Figura 32c). As amostras com 20% de RMF exibem queda acentuada de massa entre 7 e 14 dias de cura (Figura 32d) com posterior ganho de massa entre 14 e 28 dias. Esse comportamento pode estar relacionado à pozolanicidade do RMF entre os 7 e 14 dias, avaliada por Pedroso (2020), refletindo em variações bruscas no intervalo, com posterior ganho de massa devido à formação de novos compostos na mistura.

O mesmo comportamento de ganho de massa aos 90 dias de cura pôde ser observado nas amostras contendo o RMF, de forma mais pronunciada, possivelmente pela incorporação do RMF propiciar formação de compostos pozolânicos que aos 90 dias tem o rompimento das camadas superficiais, das estruturas mineralógicas existentes, conforme observado por Mymrine (1978; 1981), Mymrin e Corrêa (2005), Mymrin et al. (2020) e Pedroso (2020).

4.2.3 Variações Lineares (altura e diâmetro)

Nas Tabela 13 e Tabela 14 são exibidas as variações lineares dos materiais.

Tabela 13 - Percentual de variação da altura em relação à data da moldagem									
Composições (RMF/RPCEL/Entulho/RPC)	% de variação da altura em relação à moldagem								
	3d	7d	14d	28d	60d	90d	180d	360d	720d
1 (0/0/90/10)	-0,05	0,07	0,04	-0,30	-0,40	-0,37	-0,25	-0,35	-0,30
2 (0/0/85/15)	-0,85	-0,82	-0,94	-0,57	-0,90	-0,65	-0,55	-0,55	-0,76
3 (0/0/80/20)	-0,05	0,07	0,04	-0,30	-0,40	-0,37	-0,25	-0,35	-0,30
4 (0/0/75/25)	-0,90	-0,87	-0,99	-0,62	-0,95	-0,70	-0,60	-0,71	-0,81
5 (0/90/0/10)	-0,15	-0,03	-0,06	-0,40	-0,50	-0,47	-0,35	-0,45	-0,40
6 (0/85/0/15)	-0,65	-0,62	-0,74	-0,37	-0,70	-0,45	-0,35	-0,46	-0,56
7 (0/80/0/20)	-0,05	0,07	0,04	-0,30	-0,40	-0,37	-0,25	-0,35	-0,30
8 (0/75/0/25)	-0,85	-0,82	-0,94	-0,57	-0,90	-0,65	-0,55	-0,66	-0,76
9 (0/20/65/15)	0,20	0,32	0,29	-0,05	-0,15	-0,12	0,00	-0,10	-0,05
10 (0/25/60/15)	-0,65	-0,62	-0,74	-0,37	-0,70	-0,45	-0,35	-0,46	-0,56
11 (0/30/55/15)	-0,40	-0,28	-0,31	-0,65	-0,74	-0,71	-0,60	-0,69	-0,65
12 (0/35/50/15)	-0,15	-0,12	-0,24	0,13	-0,19	0,05	0,15	0,04	-0,06
13 (0/15/65/20)	0,55	0,67	0,64	0,30	0,20	0,23	0,35	0,25	0,30
14 (0/20/60/20)	-0,90	-0,87	-0,99	-0,62	-0,95	-0,70	-0,60	-0,71	-0,81
15 (0/25/55/20)	0,10	0,22	0,19	-0,15	-0,25	-0,22	-0,10	-0,20	-0,15
16 (0/30/50/20)	-0,60	-0,57	-0,69	-0,32	-0,65	-0,40	-0,30	-0,41	-0,51
17 (0/15/60/25)	0,15	0,27	0,24	-0,10	-0,20	-0,17	-0,05	-0,15	-0,10
18 (0/20/55/25)	-0,90	-0,87	-0,99	-0,62	-0,95	-0,70	-0,60	-0,71	-0,81
19 (0/25/50/25)	-0,05	0,07	0,04	-0,30	-0,40	-0,37	-0,25	-0,35	-0,30
20 (0/30/45/25)	-0,85	-0,82	-0,94	-0,57	-0,90	-0,65	-0,55	-0,66	-0,76
21 (5/30/50/15)	-0,05	0,07	0,04	-0,30	-0,40	-0,37	-0,25	-0,35	-0,30
22 (5/35/45/15)	-0,85	-0,82	-0,94	-0,57	-0,90	-0,65	-0,55	-0,66	-0,76
23 (5/40/40/15)	0,10	0,22	0,19	-0,15	-0,25	-0,22	-0,10	-0,20	-0,15
24 (5/45/35/15)	0,10	0,13	0,01	0,38	0,05	0,30	0,40	0,29	0,19
25 (5/50/30/15)	-0,25	-0,13	-0,16	-0,50	-0,60	-0,57	-0,45	-0,55	-0,50
26 (10/30/40/20)	-0,30	-0,27	-0,39	-0,02	-0,35	0,20	0,00	-0,11	-0,21
27 (10/35/35/20)	-0,05	0,07	0,04	-0,40	-0,40	-0,37	-0,25	-0,35	-0,30
28 (10/40/30/20)	-0,40	-0,37	-0,49	0,04	-0,45	-0,20	-0,10	-0,21	-0,31
29 (15/25/35/25)	0,43	0,55	0,52	0,08	0,08	0,11	0,23	0,13	0,18
30 (15/30/30/25)	0,18	0,21	0,09	0,46	0,13	0,38	0,48	0,37	0,27
31 (15/35/25/25)	-0,03	0,09	0,06	-0,28	-0,38	-0,35	-0,23	-0,33	-0,28
32 (20/20/35/25)	0,25	0,28	0,16	0,53	0,20	0,45	0,55	0,44	0,34
33 (20/25/30/25)	0,60	0,72	0,69	0,35	0,25	0,28	0,40	0,30	0,35
34 (20/30/25/25)	0,26	0,29	0,17	0,54	0,21	0,46	0,56	0,45	0,35
35 (20/35/20/25)	0,54	0,66	0,63	0,29	0,19	0,22	0,34	0,24	0,29

Nota: A letra 'd' se refere a dias (3d = 3 dias).

Fonte: Autoria própria

Tabela 14 - Variação do diâmetro em relação à data da moldagem

Composições (RMF/RPCEL/Entulho/RPC)	% de variação do diâmetro em relação à moldagem								
	3d	7d	14d	28d	60d	90d	180d	360d	720d
1 (0/0/90/10)	0,54	0,33	0,23	-0,05	-0,10	-0,25	0,05	0,10	0,10
2 (0/0/85/15)	0,35	0,29	0,48	0,30	0,30	0,40	0,35	0,56	0,65
3 (0/0/80/20)	0,49	0,33	0,23	-0,05	-0,10	-0,25	0,05	0,10	0,10
4 (0/0/75/25)	0,25	0,19	0,38	0,20	0,20	0,30	0,25	0,46	0,55
5 (0/90/0/10)	1,19	0,83	0,73	0,45	0,40	0,25	0,55	0,60	0,60
6 (0/85/0/15)	0,65	0,59	0,78	0,60	0,60	0,70	0,65	0,86	0,95
7 (0/80/0/20)	0,69	0,33	0,23	-0,05	-0,10	-0,25	0,05	0,10	0,10
8 (0/75/0/25)	0,35	0,29	0,48	0,30	0,30	0,40	0,35	0,56	0,65
9 (0/20/65/15)	0,94	0,58	0,48	0,20	0,15	0,00	0,30	0,35	0,35
10 (0/25/60/15)	0,50	0,44	0,63	0,45	0,45	0,55	0,50	0,71	0,80
11 (0/30/55/15)	0,25	0,28	0,18	-0,10	-0,15	-0,30	0,00	0,05	0,05
12 (0/35/50/15)	0,10	0,04	0,23	0,05	0,06	0,15	0,10	0,31	0,40
13 (0/15/65/20)	-0,15	-0,17	-0,27	-0,54	-0,59	-0,74	-0,44	-0,39	-0,39
14 (0/20/60/20)	0,00	-0,06	0,13	-0,05	-0,05	0,05	0,00	0,21	0,30
15 (0/25/55/20)	1,04	0,67	0,58	0,30	0,25	0,10	0,40	0,45	0,45
16 (0/30/50/20)	0,10	0,04	0,23	0,05	0,05	0,15	0,10	0,31	0,40
17 (0/15/60/25)	0,89	0,53	0,43	0,15	0,10	-0,05	0,25	0,30	0,30
18 (0/20/55/25)	0,45	0,39	0,58	0,40	0,40	0,50	0,45	0,66	0,75
19 (0/25/50/25)	0,69	0,33	0,23	-0,05	-0,10	-0,25	0,05	0,10	0,10
20 (0/30/45/25)	0,35	0,29	0,48	0,30	0,30	0,40	0,35	0,56	0,65
21 (5/30/50/15)	0,01	-0,35	-0,45	-0,72	-0,77	-0,92	-0,62	-0,58	-0,58
22 (5/35/45/15)	-0,43	-0,49	-0,30	-0,48	-0,48	-0,38	-0,43	-0,22	-0,13
23 (5/40/40/15)	0,16	-0,20	-0,30	-0,58	-0,63	-0,77	-0,48	-0,43	-0,43
24 (5/45/35/15)	-0,37	-0,43	-0,24	-0,42	-0,42	-0,32	-0,37	-0,16	-0,07
25 (5/50/30/15)	0,22	-0,15	-0,24	-0,52	-0,57	-0,72	-0,42	-0,37	-0,37
26 (10/30/40/20)	-0,23	-0,29	-0,10	-0,28	-0,28	-0,18	-0,23	-0,03	0,06
27 (10/35/35/20)	0,51	0,14	0,04	-0,28	-0,28	-0,43	-0,13	-0,08	-0,08
28 (10/40/30/20)	-0,05	-0,11	0,08	-0,15	-0,10	0,00	-0,05	0,16	0,25
29 (15/25/35/25)	0,67	0,30	0,20	-0,12	-0,12	-0,27	0,03	0,08	0,08
30 (15/30/30/25)	-0,25	-0,31	-0,12	-0,30	-0,30	-0,20	-0,25	-0,04	0,05
31 (15/35/25/25)	0,73	0,36	0,26	-0,01	-0,06	-0,21	0,08	0,13	0,13
32 (20/20/35/25)	0,01	-0,05	0,14	-0,04	-0,04	0,06	0,01	0,22	0,31
33 (20/25/30/25)	0,34	-0,03	-0,13	-0,40	-0,45	-0,60	-0,30	-0,25	-0,25
34 (20/30/25/25)	-0,12	-0,18	0,01	-0,17	-0,17	-0,07	-0,12	0,09	0,18
35 (20/35/20/25)	0,47	0,10	0,00	-0,27	-0,32	-0,47	-0,18	-0,13	-0,13

Nota: A letra 'd' se refere a dias (3d = 3 dias).

Fonte: Autoria própria

Os dados apresentados demonstram a estabilidade dimensional que os corpos-de-prova das 35 composições têm na variação em relação à altura (Tabela 13) e diâmetro (Tabela 14), com percentuais inferiores a 1,2%, na expansão e retração. Por se tratarem das médias observadas entre os cinco corpos-de-prova para cada idade esses resultados apenas indicam a baixa variação dimensional dos materiais em decorrência do tempo de cura.

4.2.4 Densidade dos Materiais

A densidade dos corpos-de-prova pôde ser calculada com a relação entre as dimensões (altura e diâmetro) e a massa das amostras. Na Tabela 15 são apresentados os resultados das densidades na data da moldagem e nos dias de cura.

Tabela 15 - Variação da densidade em relação à data da moldagem

Composições (RMF/RPCEL/Entulho/RPC)	Densidade (ρ) dos compósitos (g/cm ³)									
	Mold	3d	7d	14d	28d	60d	90d	180d	360d	720d
1 (0/0/90/10)	1,85	1,79	1,73	1,69	1,68	1,67	1,66	1,64	1,63	1,63
2 (0/0/85/15)	1,85	1,84	1,77	1,70	1,68	1,67	1,65	1,66	1,70	1,70
3 (0/0/80/20)	1,83	1,79	1,73	1,69	1,70	1,70	1,69	1,67	1,70	1,72
4 (0/0/75/25)	1,84	1,83	1,75	1,72	1,71	1,72	1,69	1,69	1,73	1,75
5 (0/90/0/10)	1,84	1,75	1,80	1,74	1,60	1,48	1,45	1,41	1,38	1,39
6 (0/85/0/15)	1,83	1,81	1,78	1,73	1,65	1,53	1,51	1,46	1,58	1,60
7 (0/80/0/20)	1,84	1,82	1,81	1,77	1,71	1,59	1,57	1,53	1,57	1,55
8 (0/75/0/25)	1,81	1,82	1,80	1,74	1,69	1,60	1,59	1,54	1,56	1,59
9 (0/20/65/15)	1,83	1,78	1,72	1,65	1,65	1,64	1,67	1,63	1,69	1,69
10 (0/25/60/15)	1,85	1,85	1,80	1,76	1,75	1,73	1,75	1,75	1,75	1,75
11 (0/30/55/15)	1,84	1,83	1,76	1,70	1,72	1,66	1,68	1,64	1,69	1,69
12 (0/35/50/15)	1,86	1,85	1,78	1,72	1,69	1,65	1,65	1,63	1,69	1,69
13 (0/15/65/20)	1,83	1,80	1,77	1,67	1,68	1,69	1,69	1,68	1,71	1,71
14 (0/20/60/20)	1,83	1,84	1,83	1,69	1,68	1,67	1,68	1,67	1,71	1,70
15 (0/25/55/20)	1,87	1,82	1,72	1,67	1,66	1,64	1,66	1,65	1,70	1,70
16 (0/30/50/20)	1,84	1,85	1,77	1,70	1,68	1,64	1,64	1,66	1,69	1,68
17 (0/15/60/25)	1,84	1,80	1,71	1,67	1,68	1,65	1,66	1,65	1,72	1,74
18 (0/20/55/25)	1,85	1,85	1,75	1,68	1,67	1,65	1,64	1,63	1,70	1,73
19 (0/25/50/25)	1,84	1,73	1,68	1,67	1,63	1,63	1,65	1,63	1,72	1,75
20 (0/30/45/25)	1,85	1,84	1,72	1,67	1,67	1,63	1,64	1,63	1,70	1,71
21 (5/30/50/15)	1,81	1,76	1,70	1,66	1,62	1,62	1,65	1,63	1,70	1,70
22 (5/35/45/15)	1,84	1,83	1,76	1,69	1,66	1,65	1,67	1,64	1,69	1,70
23 (5/40/40/15)	1,85	1,80	1,72	1,68	1,65	1,64	1,66	1,62	1,68	1,69
24 (5/45/35/15)	1,86	1,85	1,73	1,67	1,62	1,62	1,64	1,61	1,67	1,68
25 (5/50/30/15)	1,84	1,79	1,74	1,65	1,63	1,62	1,65	1,61	1,67	1,67
26 (10/30/40/20)	1,86	1,80	1,72	1,70	1,67	1,66	1,68	1,66	1,68	1,70
27 (10/35/35/20)	1,84	1,78	1,73	1,68	1,67	1,65	1,67	1,64	1,71	1,73
28 (10/40/30/20)	1,86	1,85	1,79	1,71	1,65	1,63	1,65	1,64	1,71	1,73
29 (15/25/35/25)	1,86	1,78	1,72	1,69	1,69	1,65	1,66	1,64	1,71	1,73
30 (15/30/30/25)	1,85	1,81	1,74	1,72	1,67	1,66	1,68	1,66	1,73	1,76
31 (15/35/25/25)	1,86	1,79	1,75	1,72	1,67	1,65	1,67	1,65	1,74	1,74
32 (20/20/35/25)	1,89	1,83	1,75	1,74	1,71	1,69	1,70	1,68	1,74	1,74
33 (20/25/30/25)	1,84	1,76	1,74	1,64	1,67	1,67	1,68	1,66	1,72	1,73
34 (20/30/25/25)	1,85	1,80	1,77	1,65	1,66	1,66	1,67	1,65	1,74	1,72
35 (20/35/20/25)	1,86	1,78	1,76	1,65	1,68	1,67	1,67	1,67	1,73	1,75

Nota: A letra 'd' se refere a dias (3d = 3 dias).

Fonte: Autoria própria

Os valores para a densidade na data da moldagem resultaram superiores a 1,80 g/cm³ e diminuíram conforme o comportamento observado em

relação à massa das amostras. Com exceção das composições 1 e 5 todas as demais composições apresentam um acréscimo na densidade na idade de 180 para 360 dias. A composição 10 atinge a estabilidade em relação a essa propriedade a partir dos 90 dias de cura, com $1,75 \text{ g/cm}^3$, o maior valor observado entre todas as composições nas datas finais.

Ao comparar a variação da densidade (diminuição), sem variação aparente nas dimensões das amostras com a variação de massa, é possível notar que o mesmo percentual que as amostras perdem em massa (em torno de 13%) desde a moldagem até as idades de estabilização do fenômeno (entre os 28 e 90 dias) é semelhante ao percentual de diminuição da densidade. Os ganhos de densidade a partir dos 360 dias de cura, pode estar relacionado a incorporação da umidade ambiente nas novas estruturas.

4.2.5 Absorção de água

A absorção de água dos compósitos é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Percentual de absorção de água aos 28 dias

Composições (RMF/RPCEL/Entulho/RPC)	Absorção Água (%)			Composições (RMF/RPCEL/Entulho/RPC)	Absorção Água (%)		
	Média	Sd	CV		Média	Sd	CV
1 (0/0/90/10)	18,90	0,22	1,16	19 (0/25/50/25)	21,30	1,60	7,49
2 (0/0/85/15)	19,60	0,45	2,29	20 (0/30/45/25)	21,30	0,65	3,07
3 (0/0/80/20)	19,60	0,33	1,68	21 (5/30/50/15)	24,20	1,82	7,53
4 (0/0/75/25)	18,20	0,21	1,16	22 (5/35/45/15)	25,40	0,40	1,59
5 (0/90/0/10)	25,70	0,44	1,70	23 (5/40/40/15)	24,20	1,16	4,79
6 (0/85/0/15)	26,20	0,95	3,62	24 (5/45/35/15)	22,60	0,41	1,81
7 (0/80/0/20)	26,80	0,87	3,26	25 (5/50/30/15)	24,00	0,39	1,64
8 (0/75/0/25)	25,00	0,65	2,61	26 (10/30/40/20)	23,00	1,01	4,39
9 (0/20/65/15)	22,20	0,55	2,50	27 (10/35/35/20)	21,70	0,05	0,24
10 (0/25/60/15)	20,80	0,07	0,30	28 (10/40/30/20)	22,40	0,20	0,90
11 (0/30/55/15)	23,30	0,03	0,12	29 (15/25/35/25)	20,60	0,24	1,16
12 (0/35/50/15)	21,80	0,24	1,08	30 (15/30/30/25)	20,80	0,22	1,08
13 (0/15/65/20)	21,50	1,05	4,89	31 (15/35/25/25)	21,50	0,17	0,80
14 (0/20/60/20)	23,10	1,42	6,17	32 (20/20/35/25)	20,00	0,20	1,01
15 (0/25/55/20)	21,30	0,99	4,65	33 (20/25/30/25)	20,90	0,33	1,57
16 (0/30/50/20)	21,90	1,00	4,57	34 (20/30/25/25)	21,40	0,02	0,11
17 (0/15/60/25)	21,00	1,11	5,27	35 (20/35/20/25)	21,40	0,11	0,52
18 (0/20/55/25)	22,50	0,93	4,11				

Fonte: Autoria própria

O fenômeno de absorção de água está relacionado à porosidade dos materiais, que influenciará na ligação entre diferentes materiais, à exemplo ao que ocorre entre a argamassa e blocos cerâmicos, em que os compostos

hidratados do cimento são absorvidos nos poros dos blocos cerâmicos, conferindo resistência na ligação entre os dois materiais.

As composições de 1 a 4 têm menor absorção de água em relação às demais composições. As amostras de 5 a 8, formadas com RPCEL e RPC apresentam absorção de água acima dos 25%, relacionável à natureza porosa dos seus componentes.

Do ponto de vista de utilização desses materiais como blocos ou tijolos cerâmicos, a NBR 15270-2 (2005) prescreve que a absorção de água para esses tipos de material deve estar entre 8 a 22%, valores atendidos pela maior parte dos compósitos. Já para blocos de concreto (NBR 12118) os valores especificados são inferiores a 13% não sendo recomendado o uso desses materiais neste caso (ABNT, 2013).

4.3 Processos de formação das estruturas nos materiais

As mudanças das composições mineralógicas e estruturas dos materiais desenvolvidos dependem dos processos físico-químicos de interação das matérias-primas e síntese das novas formações, responsáveis pelas propriedades previamente citadas.

Para estudo destes processos foram escolhidas as composições 2, 6, 10 e 21. A comparação de processos das composições 2 e 6 permitem esclarecer a influência de 85% de entulho (composição 2) e 85% de RPCEL (composição 6) com conteúdo nulo dos outros dois componentes (RMF e entulho). O estudo dos processos da composição 10 permite avaliar a influência da diminuição de entulho de 85 até 60%, com inclusão de 25% do RPCEL no teor de 15% de RPC e zero adição de RMF; composição que apresentou os valores mais elevados (18,69 e 21,47 MPa) de resistência à compressão axial nas idades de 360 e 720 dias. A composição 21 inclui 5% do RMF, 30% do RPCEL, 60% do entulho e o mesmo teor do RPC (15%) das demais, atingindo o segundo maior valor de resistência axial depois da composição 10 em 720 dias (15,88 MPa).

O estudo dos processos físico-químicos de formação dos compósitos 2, 6, 10 e 21, nas idades da moldagem e aos 180, 360 e 720 dias de cura, foi realizado pelos métodos DRX, MEV, EDS e mapeamento (distribuição) dos elementos químicos em novas formações em meio alcalino. No APÊNDICE C

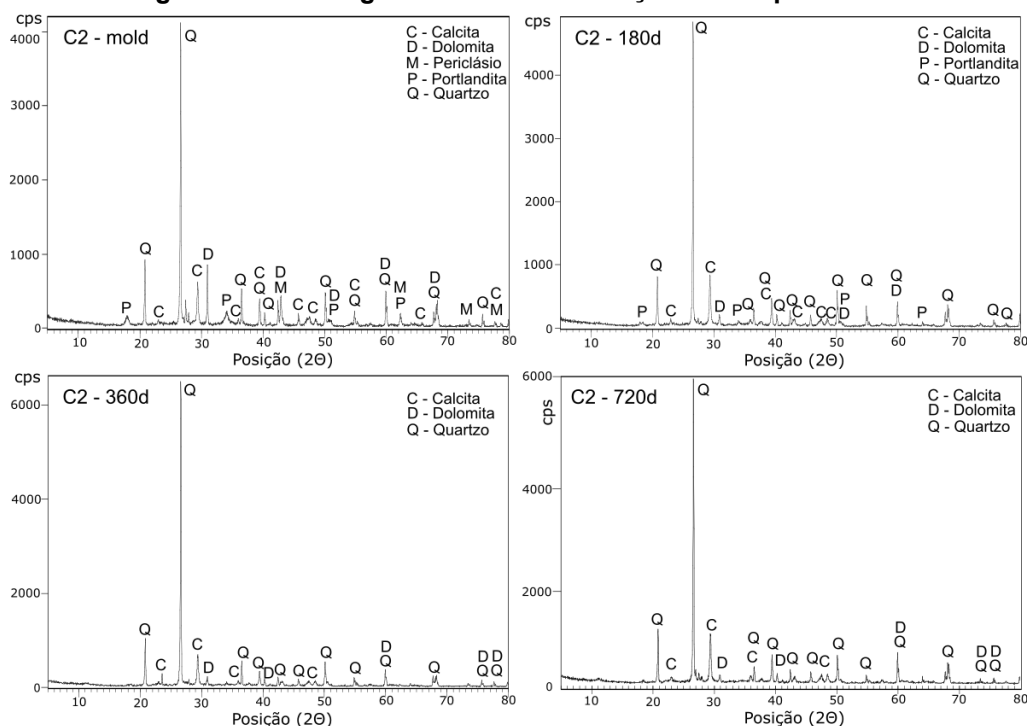
são apresentados os valores de intensidade dos picos de difratometria para as composições citadas.

4.3.1 Formação de Novas Estruturas na Composição 2 (c.2)

4.3.1.1 Alterações mineralógicas (DRX) na c.2

Os difratogramas expostos na Figura 33 representam a evolução na intensidade dos picos de difração de raios-X em cada idade de cura das amostras da composição 2. Observa-se os difratogramas de amostras logo após a moldagem e aos 180, 360 e 720 dias de cura. O percentual de entulho é de 85% e 15% de RPC.

Figura 33 - Difratogramas da c.2 em função do tempo de cura



Fonte: Autoria própria

Na data da moldagem podem ser observados os compostos de calcita (C) CaCO_3 , dolomita (D) $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, periclásio (M) MgO , portlandita (P) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e quartzo (Q) SiO_2 . Com 180 dias de cura, os picos de periclásio desaparecem acompanhados pela diminuição da intensidade dos picos de portlandita e dolomita ($2\theta = 30,94^\circ$), que diminui consideravelmente de 809,68 na data da moldagem para valores entre 111 e 168 cps de intensidade. O mesmo comportamento pode ser observado no pico de quartzo em $2\theta = 42,45^\circ$,

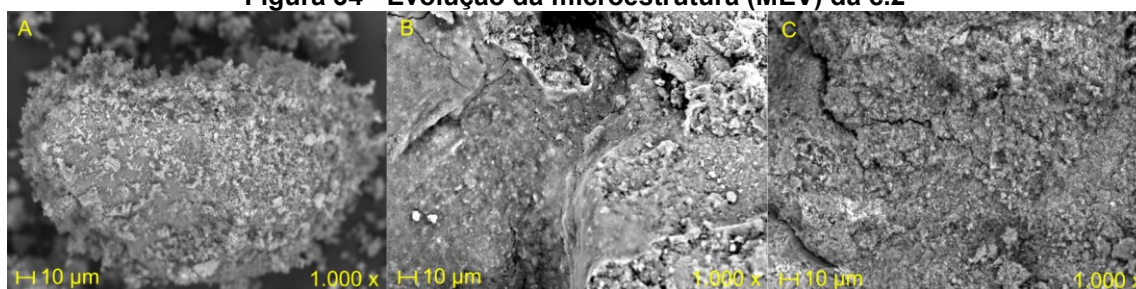
diminuindo a intensidade de 809,68 para 231,58 cps aos 180 dias. Enquanto é possível observar a diminuição na intensidade dos picos citados também se verifica alguns picos aumentando em intensidade, como no caso do quartzo em $2\Theta = 26,61^\circ$, iniciando em 4.152,73 cps e aumentando até 6.567,61 cps aos 360 dias. Este fato pode ser explicado em razão da dissolução camada amorfa superficial em ambiente alcalino. Os núcleos mono-cristalinos das partículas de quartzo, não destruídos em meio alcalino, sempre apresentam maior refletividade de raios-X, criando a impressão errônea de síntese de novas partículas de quartzo. A síntese de cristais de quartzo ocorre a temperatura de 400°C e uma pressão de 1.000 a 2.000 atmosferas.

O comportamento variável da calcita em $2\Theta = 29,39^\circ$, com valores de intensidade subindo aos 180 dias (763,94 cps), descendo novamente aos 360 dias (566,87 cps) e voltando a subir aos 720 dias (831,13 cps) podem estar relacionados ao fenômeno de dissolução das camadas superficiais de minerais aos 90 dias que favorecem o surgimento de outros compostos e até mesmo melhorando a cristalinidade dos compostos já existentes.

4.3.1.2 Mudanças na microestrutura (MEV) da c.2

Na Figura 34 são apresentadas as imagens da microestrutura das amostras da composição 2, onde é possível notar a evolução da microestrutura desde a data da moldagem (Figura 34a) que apresenta estrutura porosa, com crescimento de pequenas estruturas em um grão. Aos 360 dias da cura (Figura 34b) com microestrutura mais densa, semelhante a um gel com fissuras de sinérese, o que explica a elevada resistência mecânica axial (13,72 MPa). Com 720 dias de cura (Figura 34c) a microestrutura aparenta ser menos porosa, porém com algumas fissurações que podem ser provenientes da retração do gel envelhecido, que pode ter contribuído para a diminuição da resistência à compressão nessa idade (13,28 MPa).

Figura 34 - Evolução da microestrutura (MEV) da c.2



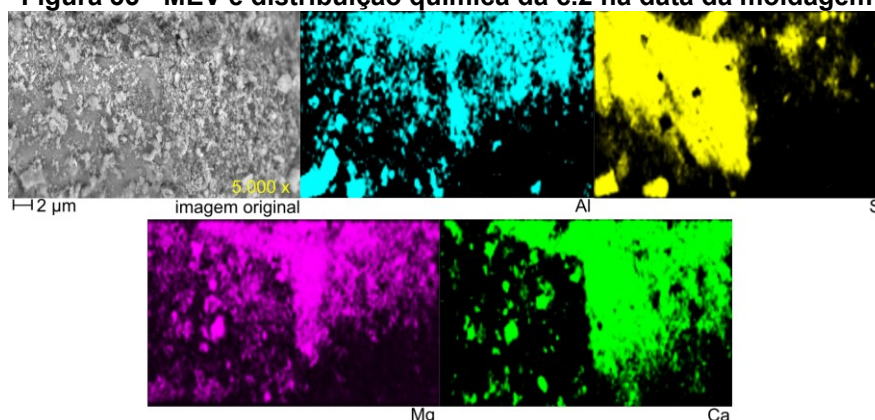
Legenda: moldagem (A), 360 dias (B) e 720 dias (C).

Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

4.3.1.3 Composição microquímica das novas formações da c.2

A morfologia da composição 2 na data da moldagem, o mapeamento por EDS e a distribuição dos elementos químicos principais da área da micrografia são representadas na Figura 35 (ampliação da Figura 34a), onde se nota a concentração de elementos químicos em áreas específicas, ainda sem serem difundidos pela matriz do compósito. Os resultados da quantificação (EDS) dos elementos na área da imagem são indicados na Tabela 17.

Figura 35 - MEV e distribuição química da c.2 na data da moldagem



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 17 - Composição microquímica (EDS) na data da moldagem da c.2

Ponto	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Total
Área	10,12	5,51	47,32	0,78	33,34	2,93	100,00

Nota: Percentual de elementos na área da micrografia.

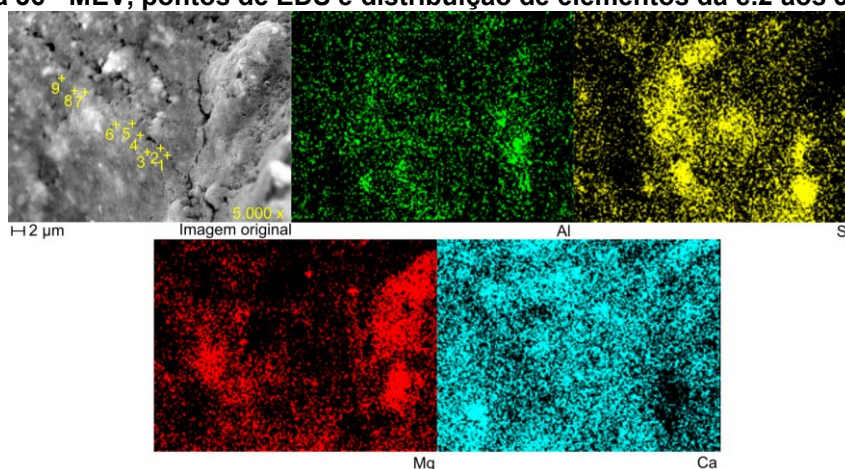
Fonte: Autoria própria

No mapeamento de elementos químicos é possível notar um possível grão de quartzo na área de maior concentração de silício (Si). À direita dessa área observa-se a formação de pequenos cristais ainda sem muita ligação entre si (pouco difundidos), possivelmente calcita e dolomita de acordo com a intensidade das imagens de Ca e Mg e os valores percentuais desses elementos

na área da micrografia (Tabela 17). O mapeamento dos elementos demonstra que não há dispersão pronunciada dos elementos na matriz, um indicativo de que os compostos iniciais ainda mantem suas configurações cristalinas.

Na Figura 36 (ampliação da Figura 34b) são apresentados os pontos de EDS na região com aparência de gel, juntamente com a distribuição dos principais elementos químicos na área da micrografia. A composição microquímica dos pontos de EDS é apresentada na Tabela 18.

Figura 36 - MEV, pontos de EDS e distribuição de elementos da c.2 aos 360 dias



Fonte: Aatoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 18 - Composição microquímica (EDS) aos 360 dias de cura da c.2

Pontos	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Total
1	21,68	12,82	22,15	2,97	0,83	36,92	2,61	100,0
2	20,77	12,81	23,23	3,13	2,18	35,15	2,72	100,0
3	24,97	13,68	19,64	2,68	0,55	36,26	2,23	100,0
4	18,03	12,59	26,83	3,20	3,42	34,04	1,90	100,0
5	25,26	14,02	20,25	3,62	1,39	33,79	1,68	100,0
6	23,23	13,16	18,07	2,83	0,74	40,21	1,76	100,0
7	22,75	12,66	21,79	2,17	1,40	37,55	1,69	100,0
8	24,21	13,55	22,24	-	1,48	36,87	1,65	100,0
9	23,82	13,47	20,21	-	0,44	40,39	1,68	100,0
Média	22,75	13,19	21,60	2,94	1,38	36,80	1,99	100,0

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

Fonte: Aatoria própria

Pelo mapeamento químico é possível notar que os elementos se apresentam melhor difundidos pela matriz do compósito, sinal de que houve dissolução dos compostos originais e incorporação desses íons nas novas formações de estrutura. Aos 360 dias da moldagem (Figura 36) as imagens

revelam maior difusão dos elementos pela matriz do compósito. Elementos antes concentrados em áreas separadas exibem distribuição mais homogênea na amostra. A matriz da 'imagem original' apresenta aspecto de grãos ligados por com aparência amorfa, provavelmente de silicatos de cálcio e magnésio.

São evidentes as fissurações promovidas durante o rompimento por compressão dessa composição. Ao longo dos pontos de 1 a 9, sinalizados na micrografia é possível verificar que a composição microquímica dessa região apresenta em média 22,75% de Mg, 21,60% de Si e 36,80% de Ca, proporção aproximada de 1,70 na relação Ca/Si, valores que favorecem a formação de géis do tipo C-S-H. Ao avaliar o comportamento de resistência mecânica para este compósito os resultados até 180 dias de cura crescem ao longo do tempo, porém há um acréscimo de 5,91 MPa (180 dias) para 13,72 MPa aos 360 dias. Quando se observa a variação da densidade dos corpos-de-prova também é possível notar o salto entre 1,66 g/cm³ (aos 180 dias) para 1,70 g/cm³ aos 360 dias. Essas evidências corroboram com a densificação durante a cura com valores de resistência e densidade que podem estar relacionados com géis do tipo C-S-H.

A difusão de íons na estrutura é visível nos mapeamentos de elementos químicos, com elementos bem distribuídos por toda a área da matriz avaliada. A exemplo se tem o comportamento do Al (alumínio) que na data da moldagem estava mais concentrado e ao longo dos dias de cura é difundido pela matriz. Formações semelhantes foram observadas por Stella (2013) e Silva (2014) ao estudarem as interações entre entulho e RPC.

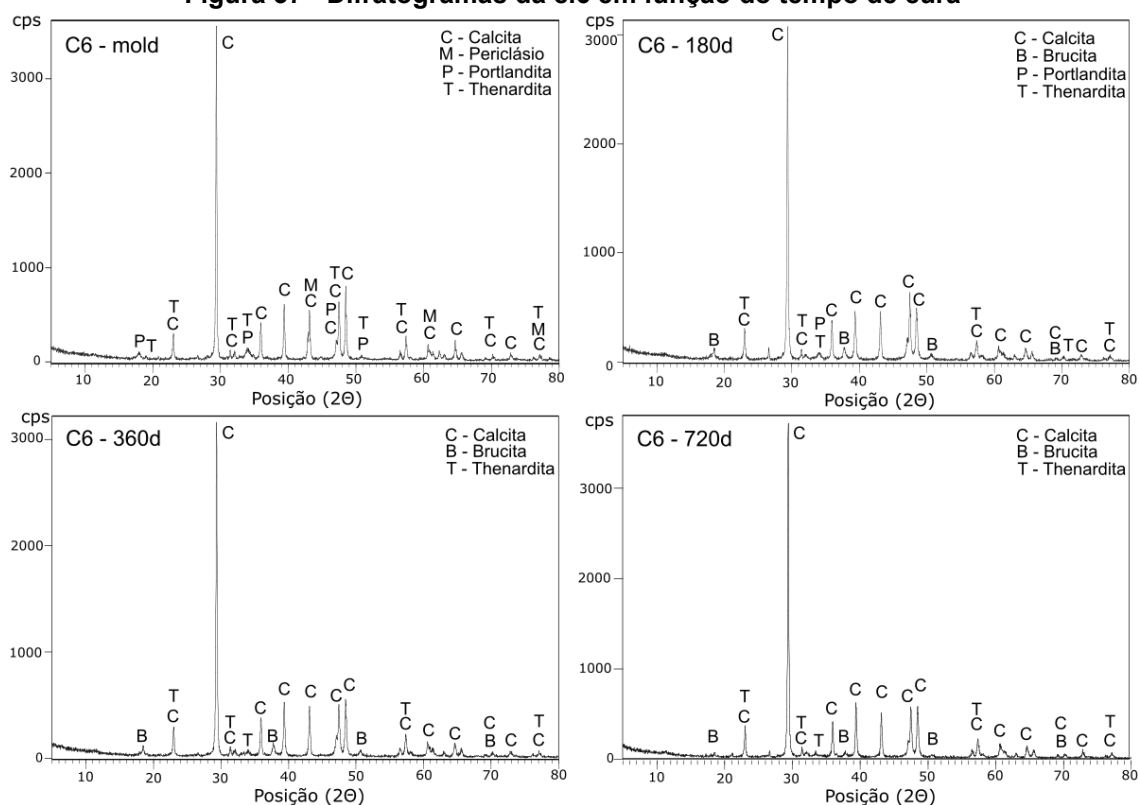
4.3.2 Formação de Novas Estruturas na Composição 6 (c.6)

4.3.2.1 Alterações mineralógicas (DRX) na c.6

A mistura de 85% de RPCEL e 15% de RPC resultou na composição 6 que, igualmente às outras amostras moldadas apenas com RPCEL e RPC, exibiram valores muito baixos de resistência mecânica. A razão do estudo dessa composição está no entendimento das possíveis nuances relacionáveis à interação entre o RPCEL e o RPC nas outras composições moldadas.

Os difratogramas da composição 6 da data da moldagem, dos 180, 360 e 720 dias após a cura estão apresentados na Figura 37.

Figura 37 - Difratomogramas da c.6 em função do tempo de cura



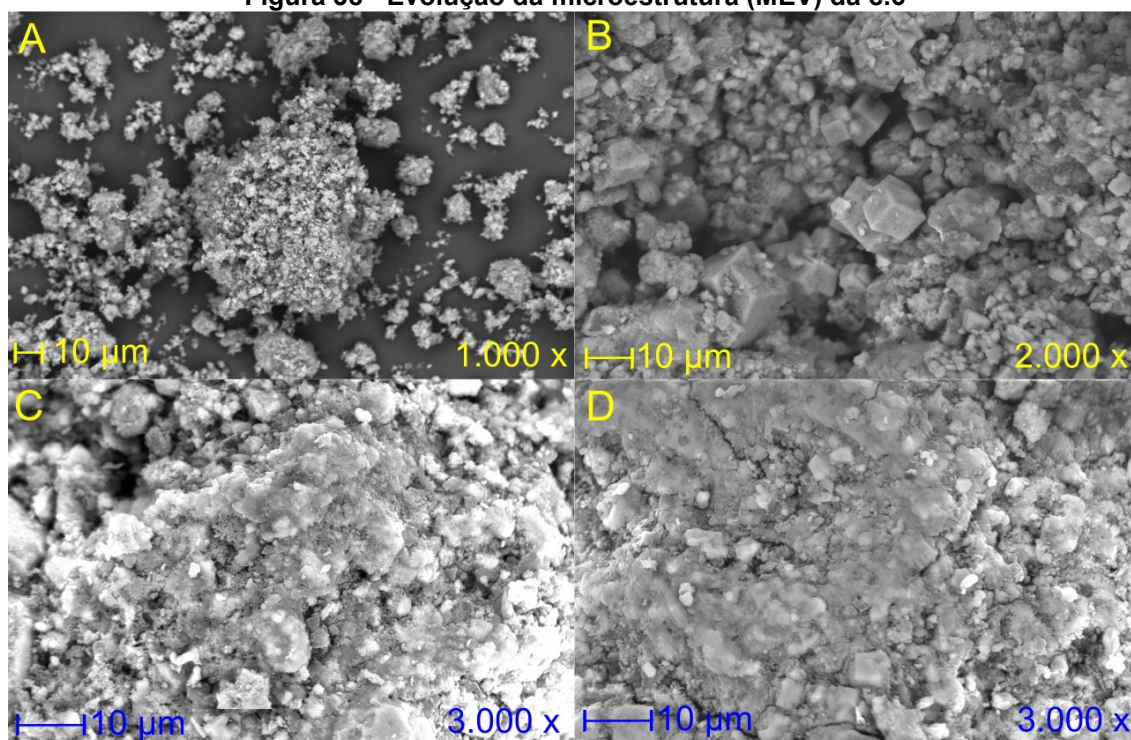
Fonte: Autoria própria

Posterior à moldagem são observados os compostos de calcita (C), periclásio (M) MgO , portlandita (P) $Ca(OH)_2$ e thenardita (T) Na_2SO_4 . Com 180 dias há o desaparecimento dos picos de periclásio e o surgimento de picos de brucita (B) $Mg(OH)_2$, comportamento que pode ocorrer na hidratação do periclásio (MgO). Aos 360 dias desaparece completamente a portlandita, ficando evidentes apenas os picos de calcita, brucita e thenardita.

4.3.2.2 Mudanças na microestrutura (MEV) da c.6

Na Figura 38 são apresentadas as imagens da microestrutura de uma amostra da composição 6 na data da moldagem (Figura 38a), aos 180 dias de cura (Figura 38b) e nas idades de 360 (Figura 38c) e 720 (Figura 38d) dias após a moldagem.

Figura 38 - Evolução da microestrutura (MEV) da c.6



Legenda: moldagem (A), 180 dias (B), 360 dias (C) e 720 dias (D).

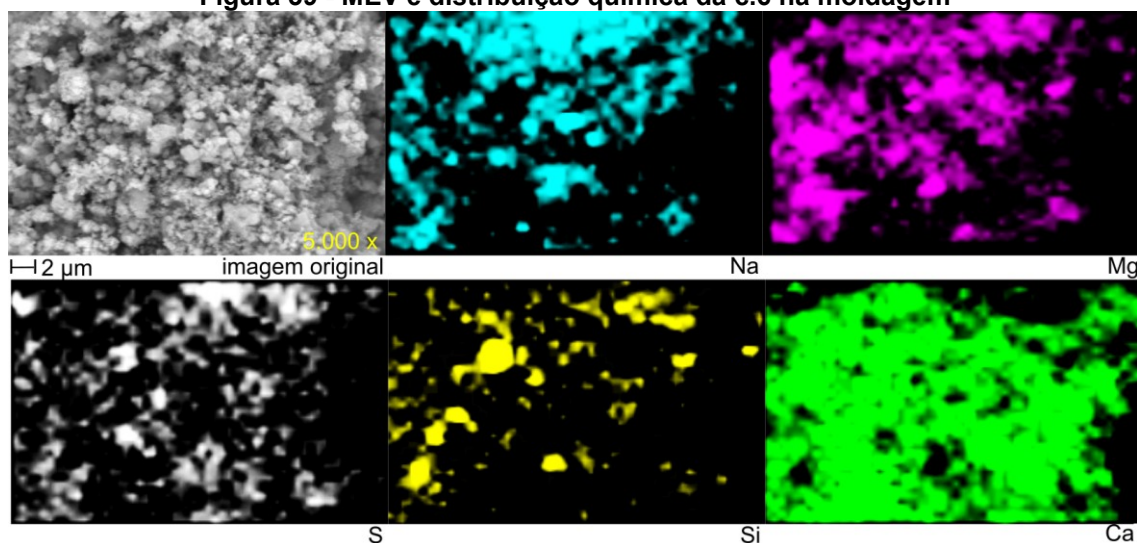
Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

A microestrutura logo após a moldagem tem o aspecto de agrupamento de microcristais com grande quantidade de poros (absorção de água = 26,20% aos 28 dias de cura). Com 180 dias de cura são evidentes estruturas cúbicas que provavelmente são óxido de cálcio (CaO) não hidratados. Ainda há espaços vazios (poros) em que há possibilidade para o crescimento de substâncias amorfas. O fechamento dos poros começa a intensificar a partir dos 360 dias (Figura 38c), tornando a estrutura mais densa aos 720 dias, consoante aos valores de resistência mecânica que variam de 0,87 MPa aos 180 dias para 2,88 MPa aos 360 dias e, 5,34 MPa aos 720 dias de cura.

4.3.2.3 Composição microquímica das novas formações da c.6

Nas imagens da Figura 39 é apresentada a ampliação em 5.000x da micrografia da Figura 38a, na área em que foi realizado o mapeamento microquímico por EDS (Tabela 19) e a verificação da distribuição dos elementos químicos na data da moldagem.

Figura 39 - MEV e distribuição química da c.6 na moldagem



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 19 - Composição microquímica (EDS) da c.6 na data da moldagem

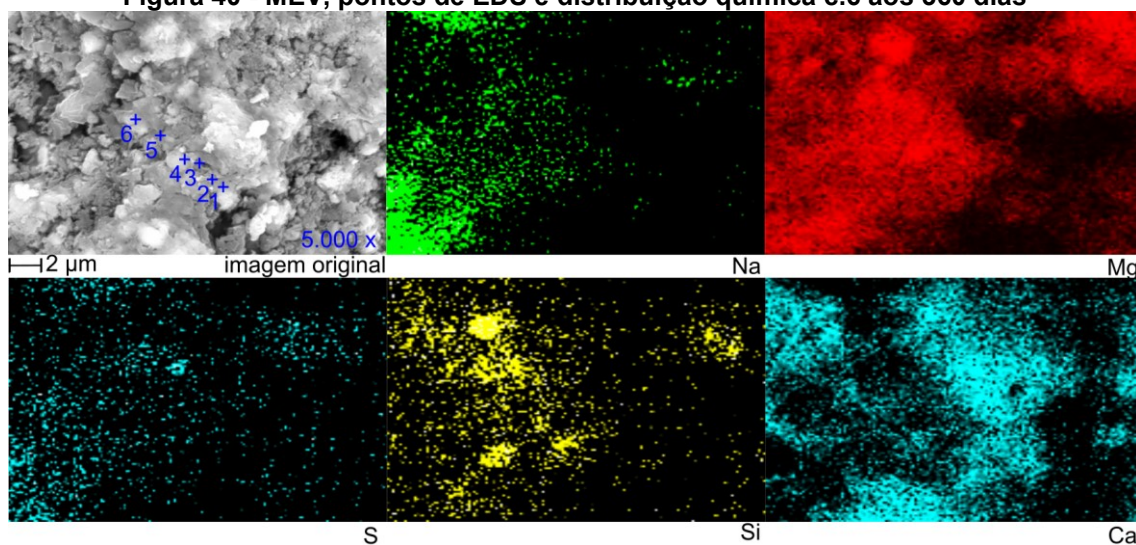
Ponto	C	Na	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Total
Área	24,29	4,98	8,20	0,66	1,66	1,36	56,42	0,26	0,50	1,13	99,46

Nota: Percentual de elementos na área da micrografia.

Fonte: Autoria própria

Os elementos químicos aparecem concentrados em pontos específicos, sem aparente dissociação pela matriz. Os percentuais de elementos químicos na área da micrografia são de maior concentração de cálcio (Ca = 56,42%) e carbono (C = 24,29%), relativos à calcita que aparece bem distribuído por toda a matriz do compósito. Na Figura 40 se apresentam a micrografia com indicação dos pontos de EDS e a distribuição dos elementos químicos em uma amostra com 360 dias de cura. A composição microquímica dos pontos de EDS é apresentada na Tabela 20.

Figura 40 - MEV, pontos de EDS e distribuição química c.6 aos 360 dias



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 20 - Composição microquímica (EDS) aos 360 dias de cura da c.6

Pontos	C	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Total
1	54,37	2,07	13,51	1,30	1,59	-	-	26,44	-	0,40	0,32	100,0
2	-	4,39	39,57	3,58	7,22	1,91	0,57	39,02	0,97	1,79	0,98	100,0
3	-	5,60	44,68	3,12	4,90	-	0,36	38,99	0,56	1,14	0,65	100,0
4	-	6,49	42,74	5,23	7,38	-	0,68	35,04	0,56	1,17	0,71	100,0
5	-	5,90	38,22	2,40	4,84	3,54	-	43,01	0,49	0,95	0,65	100,0
6	-	10,97	39,92	3,47	11,97	5,85	0,64	23,33	0,83	1,65	0,93	99,6
Média	54,37	5,90	36,44	3,18	6,32	3,77	0,56	34,31	0,68	1,18	0,71	99,9

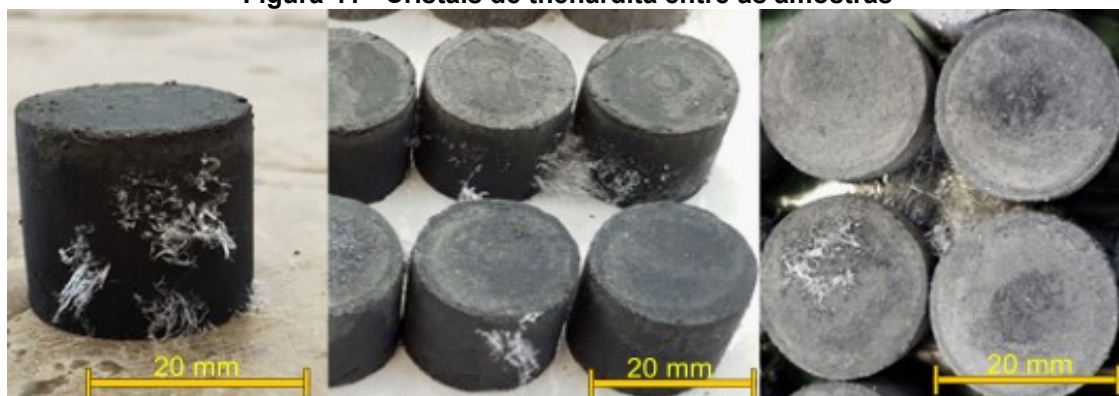
Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

Fonte: Autoria própria

A quantificação dos elementos presentes na área da micrografia, indicados na Tabela 20, revela a presença de carbonatos de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e elementos de sódio, enxofre (thenardita), além de outros como o cromo em menor quantidade. É evidente a dissociação dos elementos químicos na área avaliada em razão da alcalinidade da solução dos poros.

Durante o período de armazenagem das amostras notou-se o surgimento de uma substância entre as amostras das composições 5 a 8; o aspecto pode ser verificado pelas fotografias na Figura 41. Ao encaminhar o material para análise por DRX, MEV e EDS constatou-se que são formações de thenardita (Na_2SO_4) juntamente com calcita.

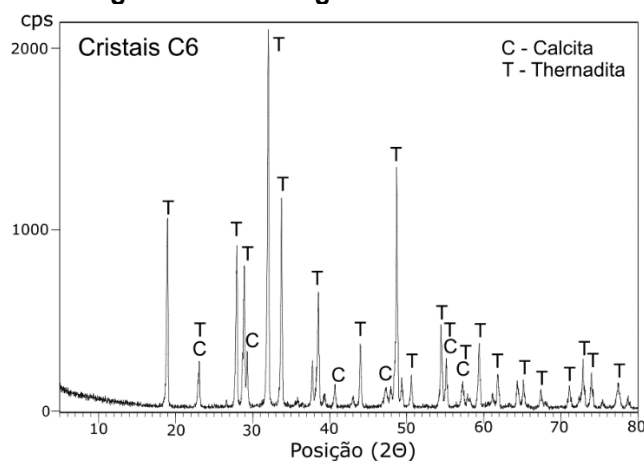
Figura 41 - Cristais de thenardita entre as amostras



Fonte: Autoria própria

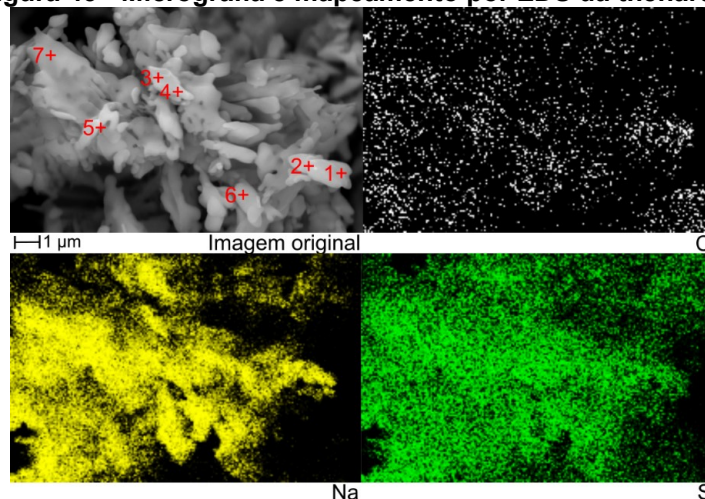
Na Figura 42 é apresentado o difratograma desses cristais e, na Figura 43 a micrografia contendo a indicação dos pontos de mapeamento EDS e distribuição química dos elementos na estrutura.

Figura 42 - Difratograma da thenardita



Fonte: Autoria própria

Figura 43 - Micrografia e mapeamento por EDS da thenardita



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Os resultados da Tabela 21 exibem a composição microquímica observada nos grãos da thenardita (Na_2SO_4).

Tabela 21 - Composição microquímica (EDS) da thenardita

Pontos	C	Na	S	Total
1	50,85	20,76	28,39	100,00
2	50,37	24,12	25,51	100,00
3	31,00	32,66	36,34	100,00
4	27,94	30,82	41,24	100,00
5	37,44	30,62	31,93	99,99
6	33,95	27,41	38,64	100,00
7	37,16	31,73	31,11	100,00
Média	38,38	28,30	33,30	100,00

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

Fonte: Aatoria própria

O elevado percentual de carbono (C) (38,38% em média) pode estar relacionado à presença de traços de calcita na amostra ou à contaminação de óleo na câmara de vácuo do microscópio (MEV).

Apesar das amostras da composição 6 apresentarem resultados de resistência à compressão abaixo de 1,0 MPa até aos 180 dias de cura, os valores também aumentam de modo considerável aos 360 dias (2,88 MPa) e aos 720 dias (5,34 MPa), com provável densificação da estrutura, conforme é verificado pelo aumento da densidade das amostras de 180 dias ($1,46 \text{ g/cm}^3$) para 360 dias ($1,58 \text{ g/cm}^3$), continuando a aumentar até os 720 dias ($1,60 \text{ g/cm}^3$). Cusma (2015) atingiu valores dessa ordem de resistência à compressão axial, para misturas de RPCEL e RPC, na idade de 3 dias de cura, porém os compósitos foram moldados com a tensão de 10 MPa, muito acima do valor utilizado neste trabalho (2 MPa). Dessa forma, é provável que o compósito 6 seja utilizável como material de construção, especialmente tijolos maciços ou blocos para pavimentação caso a tensão utilizada na moldagem seja da ordem de 10 MPa.

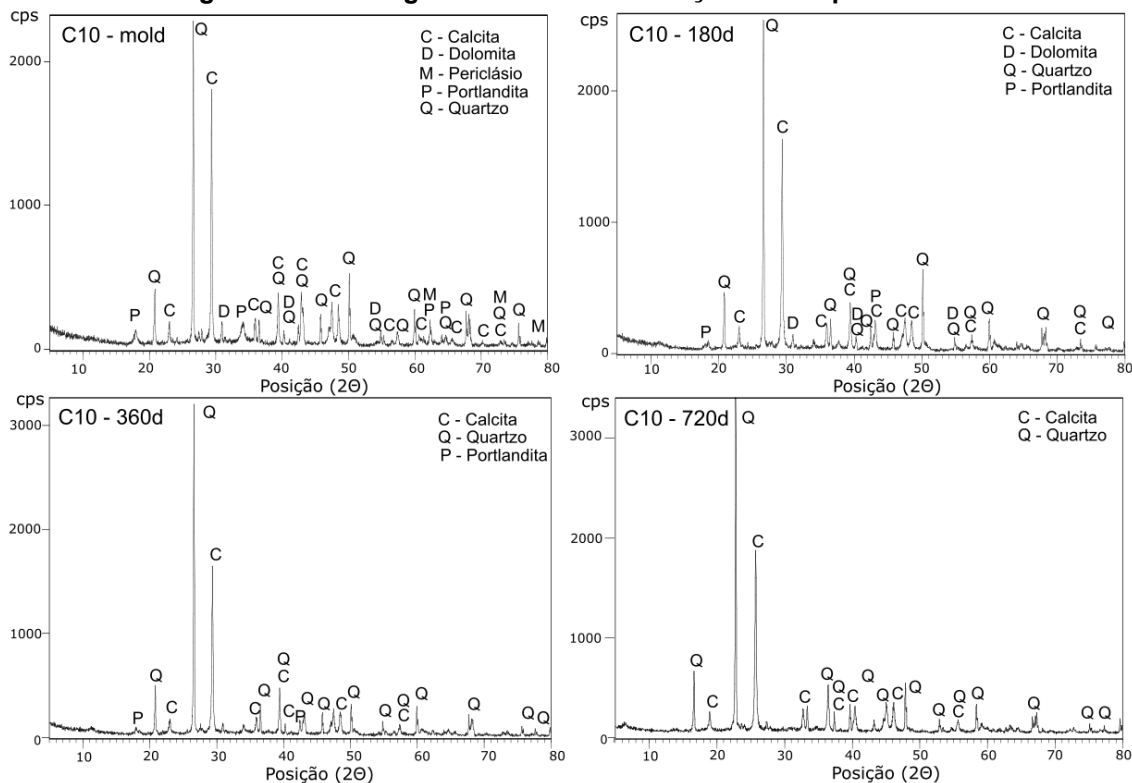
4.3.3 Formação de Novas Estruturas na Composição 10 (c.10)

4.3.3.1 Alterações mineralógicas (DRX) na c.10

As amostras da composição 10 foram moldadas com 25% RPCEL, 60% de Entulho e 15% de RPC. Foi a composição que exibiu a maior resistência mecânica aos 360 (18,69 MPa) e 720 dias (21,47 MPa) de cura. Os

difratogramas correspondentes às idades de cura para esta composição são exibidos na Figura 44.

Figura 44 - Difratogramas da c.10 em função do tempo de cura



Fonte: Autoria própria

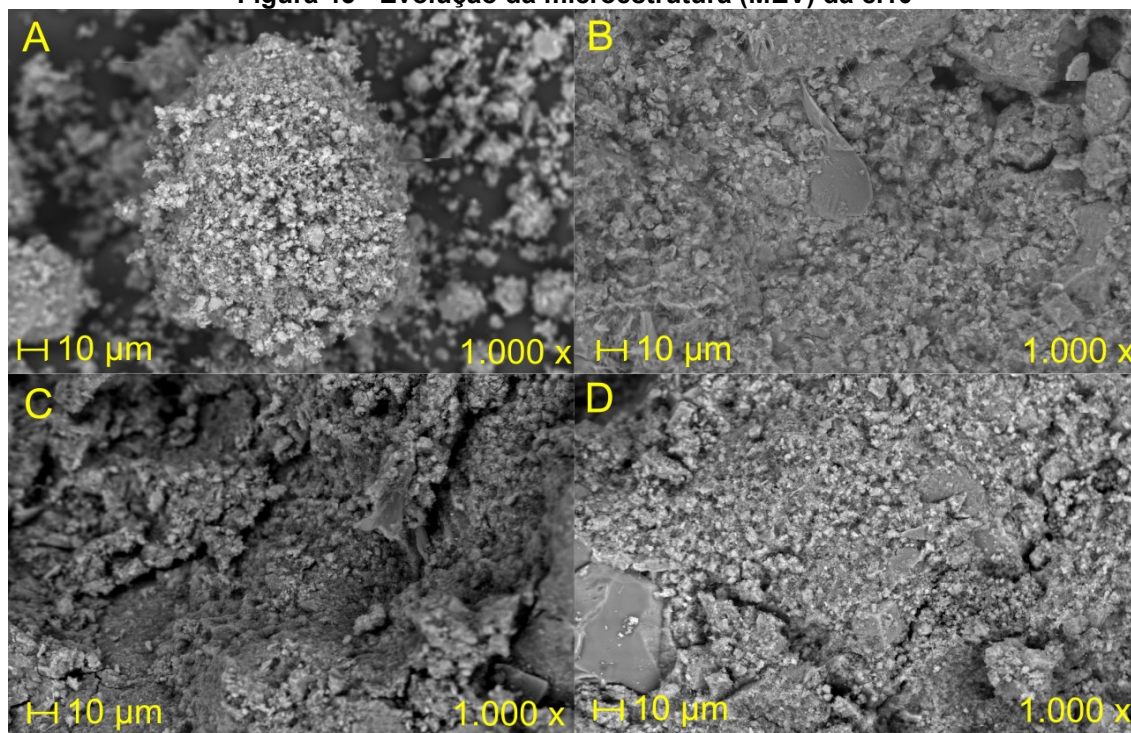
Os compostos observados logo após a moldagem foram a calcita (C), dolomita (D), periclásio (M), portlandita (P) e quartzo (Q). De forma análoga às outras composições, na idade de 180 dias da moldagem houve consumo do periclásio e diminuição nos picos da portlandita em $2\theta = 17,87^\circ$ e $34,14^\circ$. Aos 360 dias de moldagem persistem apenas os picos de calcita, quartzo e portlandita. De maneira geral os principais picos de minerais de quartzo ($2\theta = 20,82^\circ$ e $26,61^\circ$) exibem aumento de valores desde a moldagem até aos 720 dias de cura. É interessante que nas idades de 360 e 720 dias não foram identificados picos de dolomita.

4.3.3.2 Mudanças na microestrutura (MEV) da c.10

A microestrutura logo após a moldagem é semelhante à das composições 2 e 6, com microcristais e material amorfo próximos entre si, porém sem ligação aparente (Figura 45a). Aos 180 dias de cura (Figura 45b) a

microestrutura aparenta estar bem ligada, sem poros muito profundos. Com 360 dias (Figura 45c) são observáveis pequenas fissuras que diminuem a partir dos 720 dias (Figura 45d).

Figura 45 - Evolução da microestrutura (MEV) da c.10



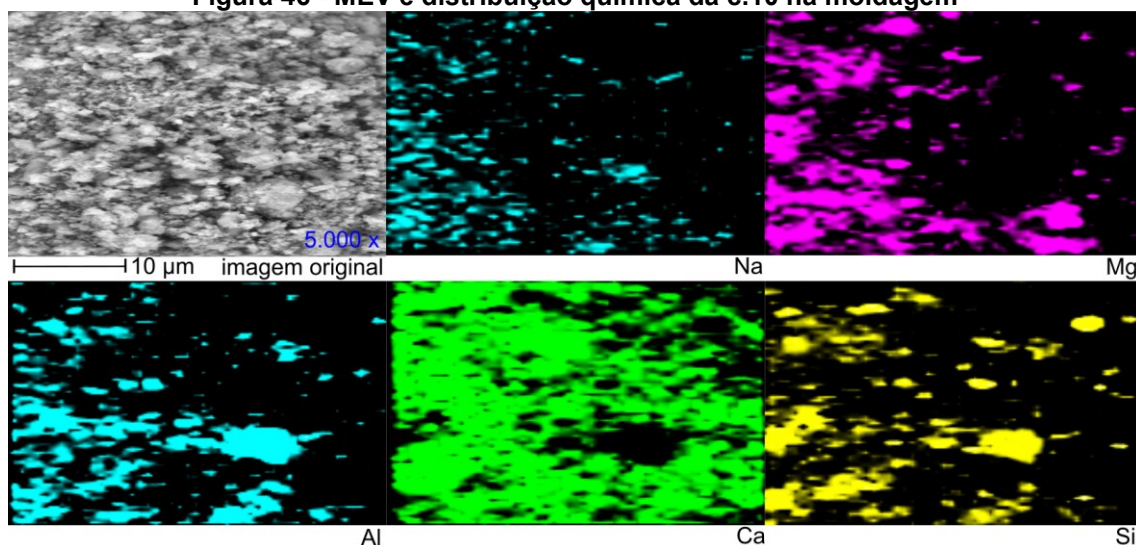
Legenda: moldagem (A), 180 dias (B), 360 dias (C) e 720 dias (D).

Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

4.3.3.3 Composição microquímica das novas formações da c.10

Na Figura 46 são apresentadas as imagens de ampliação da micrografia da Figura 45a em 5.000x. Área em que foi realizado o mapeamento microquímico (EDS) (Tabela 22) e verificada a distribuição dos principais elementos químicos na amostra.

Figura 46 - MEV e distribuição química da c.10 na moldagem



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 22 - Composição microquímica (EDS) da c.10 na data da moldagem

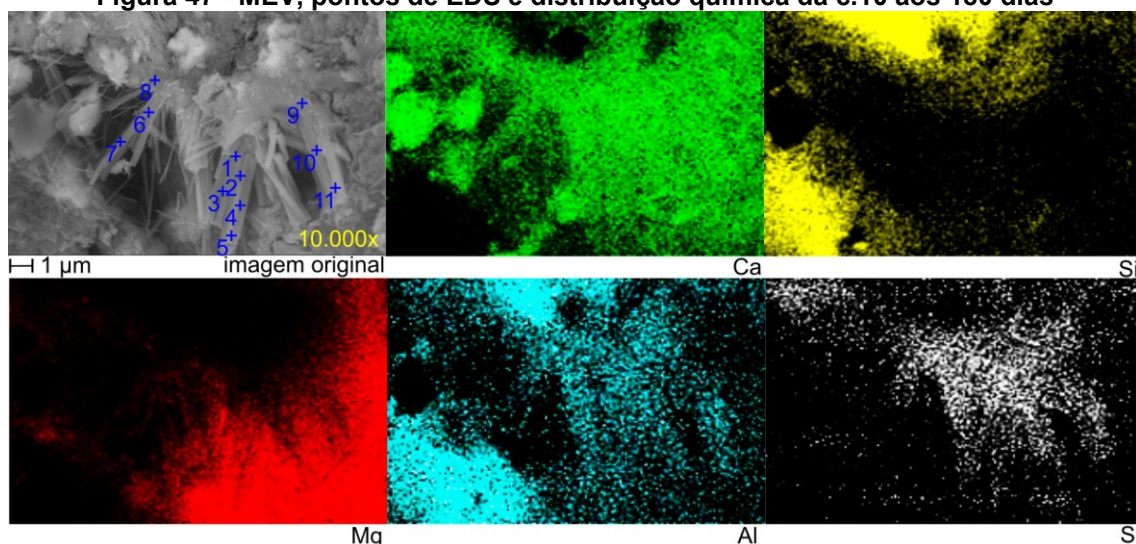
Ponto	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Total
Área	1,6	13,36	7,37	16,66	0,67	56,33	0,48	3,13	99,6

Nota: Percentual de elementos na área da micrografia

Fonte: Autoria própria

Na data da moldagem os elementos não exibem difusão pela matriz do compósito, diferente do que é observado na Figura 47, quando a distribuição dos elementos se revela melhor distribuída em toda a matriz.

Figura 47 - MEV, pontos de EDS e distribuição química da c.10 aos 180 dias



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

Aos 180 dias de cura são observáveis na Figura 47 estruturas de agulhas que, com auxílio do mapeamento EDS (Tabela 23) que pode estar relacionado à etringita, um sulfato de cálcio e alumínio hidratado. A média observada para

os elementos de Ca (37,52%), S (10,30%) e Al (10,62%) corrobora com essa possibilidade.

Tabela 23 - Composição microquímica (EDS) aos 180 dias de cura da c.10

Pontos	C	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Total
1	-	0,97	23,00	13,03	4,74	13,25	-	43,94	-	1,06	100,0
2	-	1,05	27,41	12,89	5,42	11,32	-	40,84	-	1,06	100,0
3	-	1,16	29,72	12,20	5,65	9,88	0,28	39,42	0,48	1,21	100,0
4	35,96	0,80	18,99	7,66	3,35	5,97	-	26,10	0,34	0,83	100,0
5	-	1,38	33,78	12,47	6,12	7,81	-	36,79	0,55	1,11	100,0
6	36,10	0,77	6,70	8,35	4,04	10,05	0,30	32,16	-	1,25	99,7
7	-	1,28	14,32	12,76	6,65	12,59	0,44	49,11	-	2,85	100,0
8	-	1,30	6,35	13,15	11,42	15,70	1,19	47,17	-	2,03	98,3
9	28,04	0,75	12,76	7,80	3,96	9,75	-	36,10	-	0,84	100,0
10	30,56	0,48	15,65	8,67	2,10	9,76	-	32,45	-	0,33	100,0
11	34,28	0,56	19,26	7,82	2,23	7,26	-	28,59	-	-	100,0
Média	32,99	0,95	18,90	10,62	5,06	10,30	0,55	37,52	0,46	1,26	99,8

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

Fonte: Autoria própria

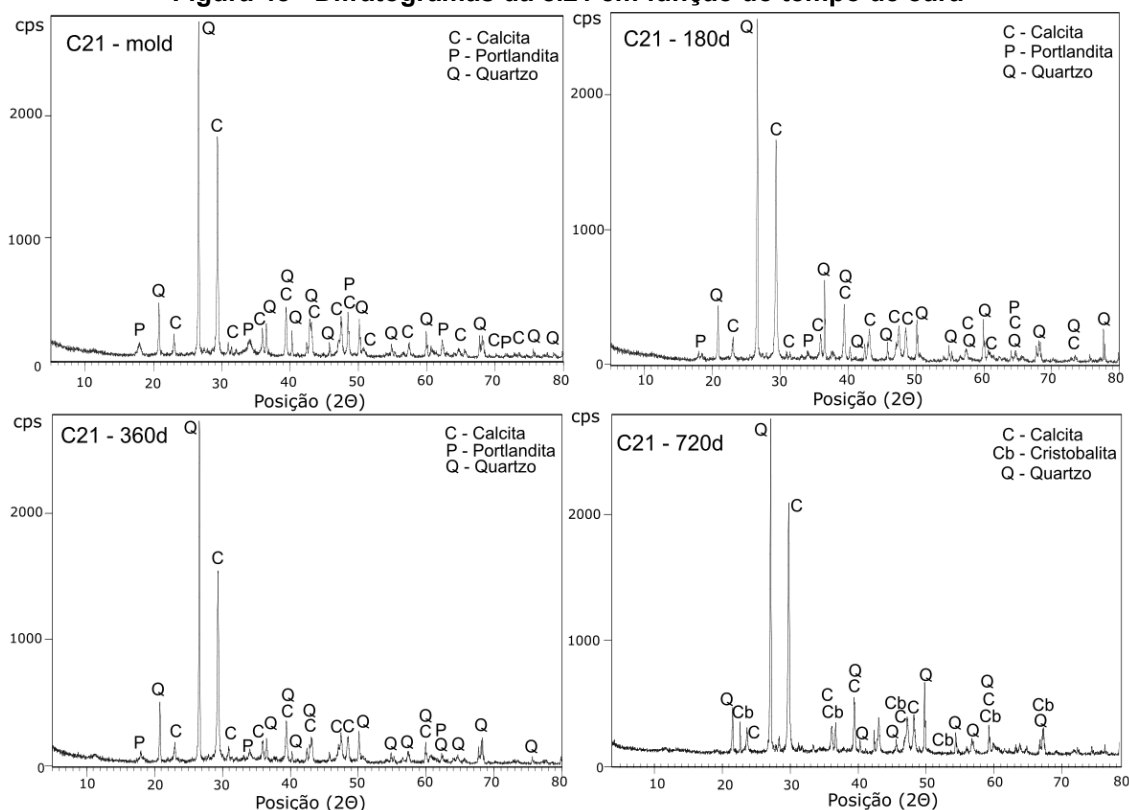
A densificação das matrizes entre as idades de 180 e 720 dias é relacionável com o aumento da resistência mecânica de 5,47 MPa aos 180 dias, para 18,69 MPa aos 360 dias e 21,47 MPa aos 720 dias. A resistência aos 3 dias de cura foi de 2,33 MPa, valor que supera o mínimo exigido para tijolos maciços (1,5 MPa) e, aliado aos resultados de absorção de água aos 28 dias (20,80%) e a estabilidade nos valores de densidade (1,75 g/cm³) a partir dos 90 dias, torna-se uma opção viável para esta finalidade, podendo suprir a demanda de outros de materiais com essas características.

4.3.4 Formação de Novas Estruturas na Composição 21 (c.21)

4.3.4.1 Alterações mineralógicas (DRX) na c.21

Contendo 5% de RMF, 30% RPCEL, 50% entulho e 15% RPC, a composição 21 exibe valores de resistência acima de 2 MPa aos 14 dias, atingindo 15,32 MPa aos 360 dias. Os difratogramas desde a moldagem e nas datas de 180, 360 e 720 dias são ilustrados na Figura 48.

Figura 48 - Difratomogramas da c.21 em função do tempo de cura



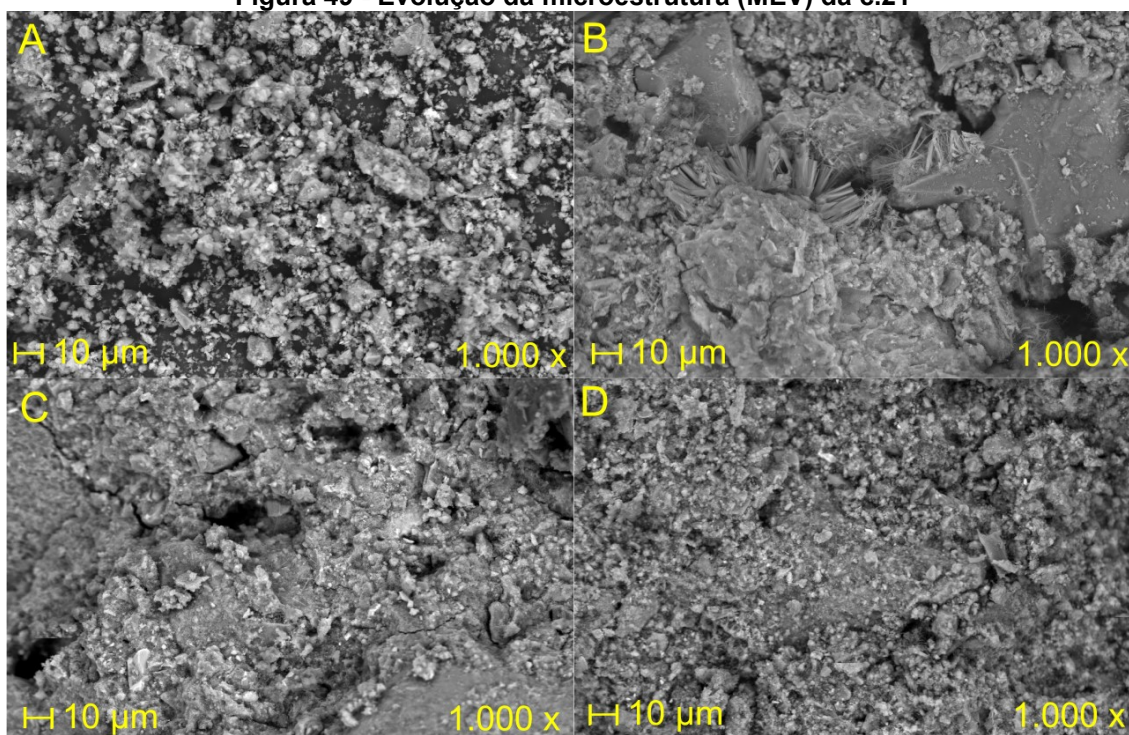
Fonte: Autoria própria

A mineralogia observada compreende calcita, portlandita e quartzo, desde a moldagem até os 360 dias de cura, com o aparecimento de cristobalita ($2\theta = 21,92^\circ, 35,92^\circ, 43,18^\circ, 59,91^\circ, 67,73^\circ$ e $68,31^\circ$) um polimorfo do quartzo (SiO_2), aos 720 dias. Observa-se pequenas variações de intensidade nos picos de DRX.

4.3.4.2 Mudanças na microestrutura (MEV) da c.21

Contendo 5% de RMF, 30% RPCEL, 50% entulho e 15% RPC, a composição 21 exibe valores de resistência acima de 2 MPa a partir dos 14 dias. Na Figura 49 é apresentada a evolução da microestrutura de uma amostra da composição 21 nas idades da moldagem (Figura 49a), com compostos separados, sem ligação entre eles, aos 180 dias (Figura 49b) com o aparecimento de cristais em forma de agulha em uma matriz com compostos ligados por estruturas amorfas. Aos 360 dias (Figura 49c) a estrutura de gel aparenta estar coberta por pequenos cristais que crescem em quantidade aos 720 dias (Figura 49c).

Figura 49 - Evolução da microestrutura (MEV) da c.21

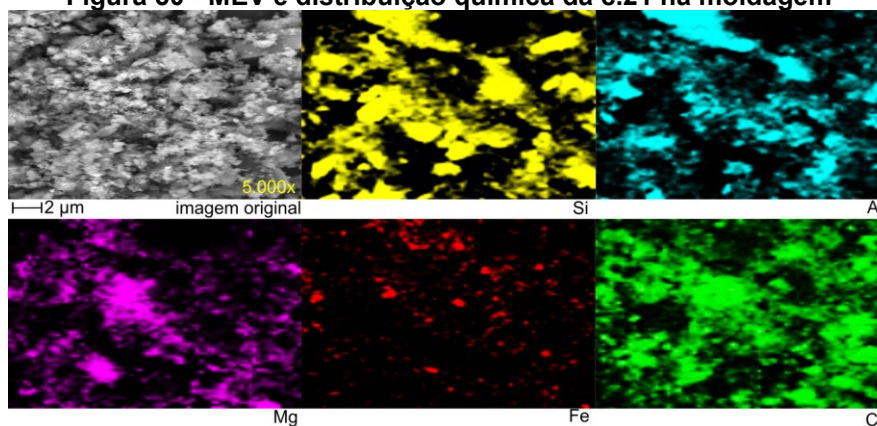


Legenda: moldagem (A), 180 dias (B), 360 dias (C) e 720 dias (D).
 Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

4.3.4.3 Composição microquímica das novas formações da c.21

Nas imagens da Figura 50 é apresentada a ampliação da (Figura 49a) em 5.000x, área da micrografia em que foi realizado o mapeamento microquímico por EDS (Tabela 24).

Figura 50 - MEV e distribuição química da c.21 na moldagem



Fonte: Autoria própria e CMCM-UTFPR

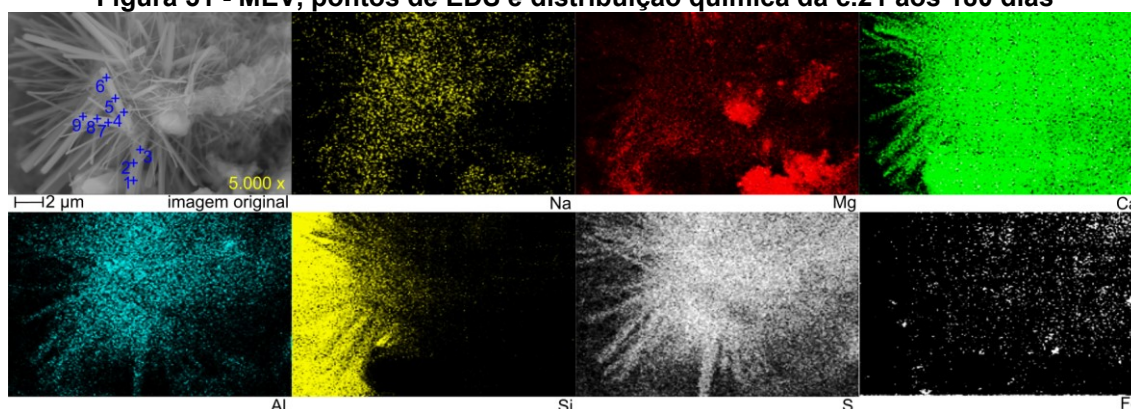
Tabela 24 - Composição microquímica (EDS) na data da moldagem da c.21

Ponto	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe	Total
Área	0,61	3,33	13,77	43,52	2,07	2,41	28,34	0,5	4,79	99,34

Nota: Percentual de elementos na área da micrografia.

Fonte: Aatoria própria

Novamente na data da moldagem os elementos químicos não estão dissociados pela matriz da micrografia, esse fenômeno passa a ser observado nas imagens da Figura 51, como resultado da dissociação de íons em meio alcalino. São observáveis estruturas em forma de agulhas compostas por enxofre (S), alumínio (Al), e cálcio (Ca), elementos que formam etringita. A composição microquímica nos pontos de EDS (Tabela 25) revela maiores Ca (42,75%), S (9,84%) e Al (6,28%) em média.

Figura 51 - MEV, pontos de EDS e distribuição química da c.21 aos 180 dias

Fonte: Aatoria própria e CMCM-UTFPR

Tabela 25 - Composição microquímica (EDS) aos 180 dias de cura da c.21

Pontos	C	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe	Total
1	35,94	1,00	5,13	4,34	7,02	6,37	37,71	-	1,97	99,48
2	30,26	0,79	4,20	4,01	2,83	5,60	51,14	0,34	1,17	100,34
3	31,81	0,76	4,28	3,54	3,21	4,94	50,25	-	1,21	99,40
4	41,16	1,97	5,83	9,46	16,13	15,46	47,85	-	3,31	141,17
5	-	1,28	3,72	4,66	11,97	6,95	28,02	-	2,24	58,84
6	-	2,01	6,80	7,92	22,55	12,48	44,84	-	3,39	99,99
7	-	2,02	7,85	7,99	20,70	13,17	44,30	0,50	3,47	100,00
8	-	1,84	8,44	7,69	23,22	12,55	41,98	0,54	3,74	100,00
9	-	1,69	8,82	6,91	28,76	11,01	38,76	-	4,04	99,99
Média	35,79	1,48	6,12	6,28	15,15	9,84	42,76	0,46	2,73	99,91

Nota: Percentual de elementos nos pontos da micrografia.

Fonte: Aatoria própria

Nas imagens de distribuição química do silício (Si) na Figura 51 o alto contraste na solução contida entre as agulhas formadas é um indício da

dissociação do Si que, na presença de cálcio (Ca) pode se combinar em géis do tipo C-S-H.

A resistência mecânica aos 3 dias de cura é de 1,38 MPa, chegando a 4,06 MPa aos 180 dias de cura, idade que ainda é possível observar pela micrografia que há um espaço entre agulhas de etringita que pode ser preenchido por géis com tendência de endurecimento ao longo do tempo. Esse comportamento é verificado aos 360 dias de cura, quando a resistência mecânica atinge 15,32 MPa, e os valores de densidade também variam de 1,63 g/cm³ (180 dias) para 1,70 g/cm³ aos 360 e 720 dias, comprovação de que houve a formação de géis que conferiram resistência mecânica à matriz do compósito.

4.4 Parâmetros ambientais para os novos materiais

Os novos materiais formulados à base dos resíduos industriais classificados como não perigosos e não inertes (classe IIA NBR 10004/04), com elevado potencial para utilização como materiais para a construção civil não apresentam riscos de contaminação ambiental por metais pesados, conforme apontado por Piazza (2020), Pedroso (2020) e Cechin (2021), ao avaliarem as matérias-primas de RMF e RPCEL e Jia et al. (2019), constatando a baixa mobilidade de metais pesados no *dregs*, parte da mistura de RPCEL que apresenta metais pesados.

Os ensaios relacionados à avaliação de solubilizados e lixiviados de resíduos sólidos utilizam a matéria-prima pura, pulverizada, para avaliação dos limites de quantidade de solubilizados e lixiviados presentes em uma solução. No caso dos compósitos moldados, o comportamento de lixiviação (NBR 10005/04) e solubilidade (NBR 10006/04) de metais pesados deveria ser avaliado na forma em que os compósitos foram moldados (monólitos) a fim de reproduzirem com acurácia seu comportamento em serviço. No entanto ainda não há metodologia prevista para esse tipo de avaliação, que seria a solubilização e lixiviação de monólitos.

5 CONCLUSÕES

Os resíduos utilizados como matérias-primas para confecção de materiais destinados à construção civil apresentam a composição química majoritariamente de óxido de cálcio (CaO) e sílica (SiO₂), sendo que o RMF tem mais óxido de ferro (Fe₂O₃) do que CaO. A presença desses compostos torna favorável a formação de novas substâncias cristalinas e amorfas pela dissolução de íons em ambiente alcalino. Essas substâncias estão reafirmam a presença de minerais de quartzo, calcita, portlandita, hematita e goethita reveladas por DRX. A distribuição desses elementos é concentrada em pontos específicos das micrografias de MEV. A granulometria dos materiais é de caráter fino, o que contribui para o aumento da reatividade química em meio alcalino.

Dentre as 35 composições moldadas a resistência mecânica à compressão nas idades iniciais de 3 e 7 dias foi da ordem de 1 a 2 MPa, com a composição 4 atingindo o valor de 5,94 MPa aos 7 dias de cura. Os valores aumentam em relação ao tempo de cura com tendência de diminuição aos 90 dias de cura, devido ao fenômeno de sinérese química e destruição das camadas superficiais das matérias-primas, dissociando elementos químicos que se combinam na forma de gel. O ganho de resistência foi vertiginoso nas idades de 1 e 2 anos, representado pelo valor de 21,47 MPa atingido com a composição 10 aos 2 anos de cura. Os compósitos apresentaram pequenas variações dimensionais e teores de absorção de água entre 18 e 26%.

Nas composições de número 2, 6, 10 e 21, selecionadas para estudos com técnicas avançadas de DRX, MEV e EDS, foram constatadas alterações microestruturais na estrutura morfológica e distribuição de elementos químicos em comparação com a idades da moldagem e aos 180 e 360 dias de cura. Nos exemplos citados foi observado o preenchimento dos poros com materiais amorfos (géis) com pronunciada dissociação química dos elementos de silício, cálcio, enxofre, magnésio, alumínio, entre outros. Houve a constatação da formação de estruturas de etringita nos compósitos 10 e 21, cercada por uma solução de poros com dissociação de sílica. Outro ponto observado nas análises de DRX foi o consumo de portlandita (Ca(OH)₂) periclásio (MgO) e dolomita CaMg(CO₃)₂ e a formação de brucita (Mg(OH)₂) na composição 6 e cristobalita (SiO₂) na composição 21.

Os melhores resultados foram observados para amostras com o teor de RPC de 15% e a relação entre RPCEL/entulho próxima a 0,42. O aumento no teor de RMF de 5 para 15% está relacionado a melhoria da microestrutura para mesmos teores entre RPCEL e entulho. A aplicabilidade desses materiais é perfeitamente viável quando a exigência de resistência mecânica inicial é superior a 1,5 MPa e os teores de absorção de água sejam entre 18 a 26%. Para esses casos há possibilidade de utilização das matérias-primas na confecção de tijolos maciços, *pavers* e reforço para bases de estradas com o fator limitante ser a disponibilidade dessas matérias-primas na região em que serão desenvolvidos os novos materiais. As matérias-primas foram classificadas como classe IIA (NBR 10004/2004), não sendo perigosos, porém não inertes. A possibilidade de dissolução de metais em ambiente aquoso diminui ao longo do tempo com a imobilização desses metais por carbonatação dos compostos formados no processo.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

- Confecção dos compósitos em escala real, tanto na forma de tijolos maciços como também a possibilidade de blocos extrudados com tensão controlada;
- Avaliação da condutividade térmica, elétrica, isolamento acústico e resistência mecânica pela simulação em prismas de alvenaria;
- Estudar a lixiviação por meio de um ensaio de lixiviação de monólitos, com a criação de uma metodologia para tal, com possibilidade de submissão para padrão normativo;
- Avaliar os parâmetros densidade, resistência mecânica e absorção de água dos compósitos com tensões de compactação acima de 2 MPa;
- Aplicação de cura úmida nos compósitos;
- Desenvolver estudos econômicos para aplicação em escala industrial.

REFERÊNCIAS

ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>. Acessado em 15/11/2020.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6453:2003**: Cal virgem para construção civil - requisitos. ABNT, 2003.

_____ - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248:2003**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. ABNT, 2003.

_____ - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004:2004**: Resíduos Sólidos - Classificação. ABNT, 2004.

_____ - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15270-2:2005**: Componentes cerâmicos parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural. ABNT, 2005.

_____ - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575:2013**: Desempenho de edificações habitacionais. ABNT, 2013.

_____ - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12118:2013**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria. ABNT, 2013.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil 2019/2020**. São Paulo, 2020.

ABRAINCC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INCORPORADORAS IMOBILIÁRIAS. **ESG chega ao mercado imobiliário e pode amenizar impactos socioambientais do setor**. Disponível: <https://www.abraincc.org.br/esg/2021/10/19/esg-chega-ao-mercado-imobiliario-e-pode-amenizar-impactos-socioambientais-do-setor/>. Acesso 26/01/2022.

ACHTERBERG, E.P., BRAUNGARDT, C., MORLEY, N.H., ELBAZ-OUICHET, F. & LEBLANC, M. **Impact of Los Frailes mine spill on riverine, estuarine and coastal waters in southern Spain**. Water Research, v. 33, n. 16. p. 3387-3394, 1999.

ALGIN, H. M., TURGUT, P. **Cotton and limestone powder wastes as brick material.** Construction and Building Materials, v. 22, p. 1074-1080, 2008.

AL-SAYED, M. H.; MADANY, I. M.; AL-KHAJA; W. A., DARWISH, A. A. **Properties of asphaltic paving mixes containing hydrated lime waste.** Waste Management & Research, v. 10, p. 183-194, 2015.

ALVARENGA, P., RODRIGUES, D., MOURINHA, C., PALMA, P., VARENNES, A., CRUZ, N., TARELHO, L.A.C., RODRIGUES, S. **Use of wastes from the pulp and paper industry for the remediation of soils degraded by mining activities: Chemical, biochemical and ecotoxicological effects.** Sci. Total Environ. 2019, 686, 1152–1163.

ÁLVAREZ, L., MARQUEZ, E., VELAZCO, E. **Obtención y caracterización de la fase vaterita metaestable del carbonato de calcio catalizada por Ag-Mg a temperatura ambiente,** 2018 SABER. 30. 67-77.

ADAMS, T.N. **Kraft Recovery Boilers.** Tappi press, AF&PA, 1997.

ANDRADE, C. **Materiais para construção civil à base de cinzas de madeira, lodo de ETA e resíduos da produção de cal.** PIPE – UFPR. Curitiba, 2012. Dissertação de mestrado. p.56.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, 2014.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resumo Campanha Entrega DCE setembro 2020.** Disponível em < <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/declaracao-de-condicao-de-estabilidade-dce/resumo-campanha-entrega-dce-setembro-2020/view>. Acesso em outubro de 2020.

ARAÚJO, C.B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2006.

ARCE, R.; GALÁN, B.; COZ, A.; ANDRÉS, A.; VIGURI, J. R. **Stabilization /solidification of an alkyd paint waste by carbonation of waste-lime based formulations.** Journal of Hazardous Materials, v. 177, p. 428–436, 2009.

ARÊDES, M. L. A. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro.** Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

ASLAM, M. S., HUANG, B., CUI, L. **Review of construction and demolition waste management in China and USA,** Journal of Environmental Management, Volume 264, 2020, 110445, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>.

BAKCHAN, A., FAUST, K. M. **Construction waste generation estimates of institutional Building projects: Leveraging waste hauling tickets,** Waste Management, Volume 87, 2019, Pages 301-312, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.024>.

BAKCHAN, A., FAUST, K. M., LEITE, F. **Seven-dimensional automated construction waste quantification and management framework: Integration with project and site planning,** Resources, Conservation and Recycling, Volume 146, 2019, Pages 462-474, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.020>.

BAKER, P. SWEENEY, M. S. MCELROY, J. **Residents calling it an environmental disaster: tailings pond breach at Mount Polley Mine near Likely, BC.** Globo News, Canada, 04 ago. 2014.

BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R. **Relações pedomorfogeológicas nas chapadas elevadas do Distrito Federal.** Revista Brasileira Ciência do Solo, v.33, n.5, p.1373 – 138, 2009.

BASTOS, L. A. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria-prima para infraestrutura rodoviária.** Ouro Preto: UFOP. 98 p. 2013. (Dissertação de Mestrado).

BASUMAJUMDAR, A., DAS, A.K., BANDDYOPADHYAY, N., MAITRA, S. **Some studies on the reaction between fly ash and lime.** Bulletin of Material Science, 28(2), 131-136 (2008).

BESSLER, K. E., RODRIGUES, L. C. **Os polimorfos de carbonato de cálcio: uma síntese fácil de aragonita.** Quím. Nova, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 178-180, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000100032>.

BHATTY J.I.; GAJDA J. **Alternative materials.** World Cem 2004; 35(12):41–8.

BOSCOV, M.E.G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p.185-207.

BRACELPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Dados do Setor**. Brasília, 2013.

BRASIL, **Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010** - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

BRASILEIRO, L. L., MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica**: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica*, 61(358), 178-189. <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>

BROWN, C., MILKE, M., SEVILLE, E. **Disaster waste management**: A review article, *Waste Management*, Volume 31, Issue 6, 2011, Pages 1085-1098, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.027>.

CABRAL, F., RIBEIRO, H.M., HILÁRIO, L., MACHADO, L., VASCONCELOS, E., 2008. **Use of pulp mill inorganic wastes as alternative liming materials**. *Bioresour. Technol.* 99, 8294e8298.

CAMPANHA, A. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. Universidade Federal de Viçosa. 106 p. 2011. (Dissertação Mestrado).

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil**. 2ed. v. 2. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo. 2010.

CARVALHO, P. S. L., SILVA, M. M. S., ROCIOM M. A. R., MOSZKOWICZ, J. **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.

CASTRO, H. **Papel e celulose**. Processos Químicos Industriais II – Apostila 4. Universidade de São Paulo (USP) Escola de Engenharia de Lorena (EEL), 2009.

CASTRO, F., VILARINHO, C., TRANCOSO, D., FERREIRA, P., NUNES, F., MIRAGAIA, A., 2009. **Utilization of pulp and paper industry wastes as raw materials in cement clinker production**. *Int. J. Mater. Eng. Innov.* 1, 74e90.

CASTRO, T. A.; NALINI JR, H. A.; LIMA, H. M. **Entendendo a Mineração no Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: Ecológico. 93 p. 2011.

CECHIN, L. **Análise da viabilidade técnica da produção de compósitos cerâmicos utilizando resíduos de minério de ferro da Barragem de Fundão, Mariana-MG e escória de alto-forno à carvão vegetal**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

CELAJ, D., DESMOND, J., SHAN, A., SHIRAI, S. **Preparing for the Use of Big Data in Denmark's Waste Management Sector**. Qualifying project report. Worcester Polytechnic Institute. October 2017.

CHAVES, L. F. M. **Estudo da adição do resíduo proveniente da extração de minério de ferro em argilas do Rio Grande do Norte**. 2009. 167 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

CHEN, X. WEISHENG, L., WANG, H.D. **The impact of green buildings accreditation on construction and demolition waste minimization: A study of Hong Kong Building Environment Assessment Method using big data**. Conference: Global Cleaner Production & Sustainable Consumption Conference, 1-4 November 2015, Sitges, Barcelona, Spain.

CHERIAN, C., SIDDIQUA, S. **Pulp and Paper Mill Fly Ash: A Review**. Sustainability 2019, 11, 4394.

CHI, B., LU, W., YE, M., BAO, Z., ZHANG, X. **Construction waste minimization in green building: A comparative analysis of LEED-NC 2009 certified projects in the US and China**, Journal of Cleaner Production, Volume 256, 2020, 120749, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120749>.

CINCOTTO, M. A. **Estudo da composição química da cal hidratada produzida no Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1977. 57p.

CINCOTTO, M. A. **Influência da matéria-prima e dos fornos de calcinação nas características da cal virgem**. 2 Vol., Escola Politécnica – USP, 1987 (Tese de Doutorado).

CINCOTTO, M. A., QUARCIONI V.A., JOHN, V.M. J. F. **A cal na construção civil.** In: ISAIA, G.C. (Ed). *Materiais de construção civil – e princípios de ciência e engenharia de materiais.* São Paulo - SP - Brasil: IBRACON, 2010. p. 695-726.

COELHO, A. Z. G.; TORGAL, F. P.; JALALI, S. **A Cal da Construção.** Edição TecMinho. Guimarães, 2009.

COELHO, E.F.F. **Estudos do comportamento mecânico de rejeitos de minério de erro reforçados com fibras sintéticas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, MG. 2008.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 448 de 18 de janeiro de 2012.** Altera os arts. 2o, 4o, 5o, 6o, 8o, 9o, 10, 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 469 de 29 de julho de 2015.** Altera a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002.

CONTRERAS, M., TEIXEIRA, S.R., LUCAS, M.C., LIMA, L.C.N., CARDOSO, D.S.L., SILVA, G.A.C., GREGÓRIO, G.C., SOUZA, A.E., SANTOS. **A Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study)**, *Construction and Building Materials*, Volume 123, 2016, Pages 594-600, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.044>.

CORRÊA, S. M. **Compósito à base de resíduos de concreto e resíduo de produção de cal.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia - PIPE. Curitiba, 2005. 105 p.

COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDAO, P. R. G. **Piso intertravado produzido com rejeito de sinter feed.** *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* São Paulo, v. 7, n. 2, Apr. 2014.

CRNKOVIC, P. M.; POLITO, W. L.; SILVA FILHO, C. G.; MILIOLI, F. E.; PAGLIUSO J. D. **O efeito da granulometria na decrepitação durante a decomposição térmica de calcários e carvão.** *Quim. Nova*, v. 27, n. 1, p. 58-61, 2004.

CRUZ, L. **Deslizamento de terra em mina deixa vítimas e mobiliza bombeiros em Itabirito.** Estado de Minas, Belo Horizonte, 10 set. 2014.

CUSMA, D. F. **Compósitos à base de resíduos da recuperação química da produção Kraft de celulose.** 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

DANTAS, A. A. N. **Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2015.

DAS, S.K., KUMAR, S. RAMACHANDRARAO, P. **Exploration of iron ore tailing for the development of ceramic tiles.** Waste Management. V.20, p.725-729, 2000.

DAVIES, M., McROBERTS, E., MARTIN, T. **Static liquefaction of tailings: Fundamentals and case histories.** In: AMEC EARTH & ENVIRONMENTAL. Vancouver and Edmonton. Proceedings. Edmonton, Canadá, 2002.

DEFÁVERI, K. C., SANTOS, L. F., CARVALHO, J. M., PEIXOTO, R. A., BRIGOLINI, G. **Iron Ore Tailing-Based Geopolymer Containing Glass Wool Residue: A Study Of Mechanical And Microstructural Properties.** Construction and Building Materials, 2019.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - **Portaria DNPM n. 416 de 03 de setembro de 2012.**

_____. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - **Classificação de Barragens de Mineração,** 2016.

_____. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - **Classificação de Barragens de Mineração,** 2020.

DO, H. S.; MUN, P. H.; KEUN, R. S. **A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime.** Waste Management, v. 28, p. 191-199, 2008.

DUAN, H., MILLER, T. T., LIU, G., TAM, V. W. Y. **Construction debris becomes growing concern of growing cities**, Waste Management, Volume 83, 2019, Pages 1-5, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.044>.

DUAN, P., YAN, C., ZHOU, W., LUO, W., SHEN, C. **An Investigation of The Microstructure And Durability Of A Fluidized Bed Fly Ash–Metakaolin Geopolymer After Heat And Acid Exposure**. Materials and Design, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.009>

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Belo Horizonte, 2008. 130 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

ELÓI, F. P. F. **Ativação alcalina do rejeito de barragem de minério de ferro com adição de sílica ativa**. Dissertação (mestrado acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

FARAGE, R.M.P., SILVA, C.M., REZENDE, A.A.P.; SOUZA, J.J.L.L., MATOS, A.T.; ZANUNCIO, A.J.V. **Intermediate covering of municipal solid waste landfills with alkaline grits, dregs and lime mud by-products of kraft pulp production**. J. Clean. Prod. 2019, 239, 117985.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - **Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração** ano base 2010.

_____. **FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração** ano base 2011.

_____. **FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE Inventário de Barragens do Estado de Minas Gerais** ano base 2017, Belo Horizonte, 2018.

FELEKOGLU, B. **Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case)**. Resources, Conservation and Recycling, v.51, p. 770-791, 2007.

FERNANDES, G. **Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ ou Resíduos de Mineração de Ferro**

Associados a Geossintéticos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília. 2005.

FERRANTE, F. **Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens.** Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2014.

FOELKEL, C. **Aspectos Práticos e Conceituais sobre a Fabricação de Celulose de Mercado do Tipo Kraft Branqueada a Partir de Madeira de Eucalipto.** Capítulo 31: O Processo Kraft de Fabricação de Celulose. Eucalyptus Online Book, 2013.

FONTES, W. C. **Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento.** Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

FONTES, W. C. JANUZZI, R. V. BORGES, R. A. CURY, A. A. PEIXOTO, R. A. F. **Resíduo da mineração de ferro como matéria-prima alternativa no desenvolvimento de argamassas de revestimento e assentamento.** In: Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC. 2014.

FOURIE, A.B., BLIGHT, G.E., PAPAGEORGIOU, G. **Static liquefaction as a possible explanation for Merriespruit tailings dam failure.** Canadian Geotechnical Journal, Canada, v. 38, p. 707-719, 2001.

GAO, X., NAKATANI, J., ZHANG, Q., HUANG, B., WANG, T., MORIGUCHI, Y., 2020. **Dynamic material flow and stock analysis of residential buildings by integrating rural-urban land transition: a case of Shanghai.** J. Clean. Prod. 253, 119941.

GARCIA, A. **Setor de fabricação de cimento e cal.** Inspeção geral do ambiente e do ordenamento do território. Lisboa. 2008.

GOMES, L.A., SANTOS, A.F., GÓIS, J.C., QUINA, M.J. **Thermal dehydration of urban biosolids with green liquor dregs from pulp and paper mill,** Journal of Environmental Management. J. Environ. Manage. 2020, 261, 109944.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro.** Ouro Preto: UFOP. 77p. 2009. (Dissertação de mestrado).

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A., PERES, A. E. C. **Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro.** Rem: Rev. Esc. Minas [online]. vol. 64. n.2. 233-236 p. 2011.

GUERRA, B. C., LEITE, F., FAUST, K. M. **4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning:** Case studies on concrete and drywall waste streams, Waste Management, Volume 116, 2020, Pages 79-90, ISSN 0956-053X. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.035>.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: Fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2ed. Editora Pini, São Paulo, 2002.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, 2011.

HACKBART, F. M. **Material para a construção civil a partir de lodo de estação de tratamento de água, lama de polimento de mármore e resíduos de produção de cal.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

HANSEN, T. C. **Recycled concrete aggregate and fly ash produce concrete without strength cement.** Cement and Concrete Research, v. 20, n.3, p. 355-356, 1990.

HART M. L., SHAKOOR A., WILSON T. P. **Characterization of lime sludge for engineering applications,** Waste Management, Volume 13, Issue 1, 1993, Pages 55-63, ISSN 0956-053X, [http://dx.doi.org/10.1016/0956-053X\(93\)90034-T](http://dx.doi.org/10.1016/0956-053X(93)90034-T).

HILGEMBERG, E., BACHA, C. J. **A evolução da indústria brasileira de celulose e sua atuação no mercado mundial.** Artigo para BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) – Revista Análise Econômica, ano 19, n.36 (2001).

HU, M., VAN DER VOET, E., HUPPES, G., 2010. **Dynamic material flow analysis for strategic construction and demolition waste management in Beijing.** J. Ind. Ecol. 14 (3), 440e456.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório Anual de Atividades**, 2018.

_____. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório Anual de Atividades**, 2019.

JANUZZI, A. **Análise de aglomeração a frio no processo HPS (Hybrid Pelletized Sínter) com ênfase nas matérias-primas envolvidas.** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas.** V Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassa, São Paulo. 2003.

JOHN, V. M.; OLIVEIRA, D. P. de; AGOPYAN, V. **Critérios de sustentabilidade para seleção de materiais e componentes: uma perspectiva de países em desenvolvimento.** Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

JOHN, V. M.; PUNHAGUI, K. R. G.; CINCOTTO, M. A. **Produção de cal em economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas.** Ribeirão Preto-SP, 2014.

JIA, Y., HAMBERG, R., QURESHI, A., MÄKITALO, M., MAURICE, C. **Variation of green liquor dregs from different pulp and paper mills for use in mine waste remediation.** Environ. Sci. Pollut. Res. 2019, 26, 31284–31300.

KANELLOPOULOS A., NICOLAIDES D., PETROU, M. F. **Mechanical and durability properties of concretes containing recycled lime powder and recycled aggregates,** Construction and Building Materials, Volume 53, 28 February 2014, Pages 253-259, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.102>.

KINNARINEN, T., GOLMAEI, M., JERNSTRÖM, E., HÄKKINEN, A. **Separation, treatment and utilization of inorganic residues of chemical pulp mills.** J. Clean. Prod. 2016, 133, 953–964.

KITOUNI, S., HOUARI, H. **Lightweight concrete with Algerian limestone dust. Part I: study on 30% replacement to normal aggregate at early age.** Cerâmica, v. 59, p. 600-608, 2013.

KUMAR, S. **Fly ash-lime-phosphogypsum hollow blocks for walls and partitions.** Building and Environment, v. 38, p. 291-295, 2003.

KUMAR, S., KRISTÁLY, F., MUCSI, G. **Geopolymerisation behaviour of size fractioned fly ash.** Advanced Powder Technology, 2015.

LANAS, J., ALVAREZ, J.I., **Dolomitic limes: evolution of the slaking process under different conditions.** Thermochemica Acta. v. 423, p. 1-12. 2004.

LAUSSELET, C., URREGO, J.P.F., RESCH, E., BRATTEBØ, H., 2020. **Temporal analysis of the material flows and embodied greenhouse gas emissions of a neighborhood building stock.** J. Ind. Ecol. <https://doi.org/10.1111/jiec.13049>.

LEDERER, J., GASSNER, A., FELLNER, J., MOLLAY, U., SCHREMMER, C. **Raw materials consumption and demolition waste generation of the urban building sector 2016–2050: A scenario-based material flow analysis of Vienna,** Journal of Cleaner Production, Volume 288, 2021, 125566, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125566>.

LEPREVOST, A. **Cal hidratada e cal hidráulica.** Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas, Curitiba. Brasil, 1953.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização como agregados para argamassas e concretos.** 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

LIMA, L. M. K. **Retro análise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo.** Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2006, 90 p. (Dissertação de Mestrado).

LOUZADA, D. M.; BIZINOTO, M. B.; RAMONICH, E. V. **Ativação de escórias com resíduos de celulose.** São Paulo, SP: ABTCP-PI, 2009. 42° Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel, de 26 a 29 de outubro de 2009. Transamérica Expo Center, São Paulo, Brasil.

LUO L.; ZHANG Y.; BAO S.; CHEN T. **Utilization of iron ore tailings as raw material for portland cement clinker production**, Adv. Mater. Sci. Eng. 2016 (2016), <https://doi.org/10.1155/2016/1596047>.

LUZ, A.B., LINS, F.A.F. **Introdução ao Tratamento de Minérios** - Tratamento de Minérios, 4ª Edição, Revisada e Ampliada, CETEM-MCT, 2004.p.3.

LYTLE, Mark H. **The gentle subversive: Rachel Carson, Silent Spring, and the rise of the environmental movement**. New York: Oxford University Press, 2007.

MACHADO, C. C., PEREIRA, R. S., LIMA, D.C., CARVALHO, C. A. B., PIRES, J. **Caracterização Tecnológica da mistura solo-grits para pavimento de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas**. Viçosa: Revista Árvore, V.31, N°3, 2008.

MAHMOUDKHANI, M., RICHARDS, T., THELIANDER, H. **Recycling of solid residues to the forest: Experimental and theoretical study of the release of sodium from lime mud and green liquor dregs aggregates**. Process Saf. Environ. Prot. 2004, 82, 230–237.

MÁLIA, M., BRITO, J. de, BRAVO, M. **Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 117-130, jul./set. 2011.

MARTÍNEZ-LAGE, I., VELAY-LIZANCOS, M., VÁZQUEZ-BURGO, P., RIVAS-FERNÁNDEZ, M., VÁZQUEZ -HERRERO, C., RAMÍREZ-RODRÍGUEZ, A., MARTÍN-CANO, M. **Concretes and mortars with waste paper industry: Biomass ash and dregs**. J. Environ. Manage. 2016, 181, 863–873.

MARTINS, E.S. **Petrografia, mineralogia e geomorfologia de regolitos lateríticos no Distrito Federal**. Brasília: Universidade de Brasília. 196p. 2000.

MARTINS, F.M., MARTINS, J.M., FERREIRA, L.C., CUNHA, C.J., 2007. **Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a kraft pulp and paper mill**. J. Hazard. Mater. 147, 610e617.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2014.

MENDES, B., PEDROTI, L., FONTES, M., RIBEIRO, J. C. L. VIEIRA, C. M. F. PACHECO, A. A., AZEVEDO, A. R. G. **Technical and Environmental Assessment of the Incorporation of Iron Ore tailings in Construction Clay Bricks.** Construction and Building Materials, Volume 227, 2019, 116669, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.050>.

MILLAR, D. et al. **The Cambridge Dictionary of Scientists.** Cambridge University Press, 1996.

MILLOGO Y., MOREL J., TRAORÉ K., OUEDRAOGO R. **Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction,** Construction and Building Materials, Volume 26, Issue 1, January 2012, Pages 663-669, ISSN 0950-0618, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.069>.

MILONAS, J. G. **Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro em aterro hidráulico.** Dissertação de mestrado, Publicação G.DM-148/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006, 146 p.

MODOLO, R.C.E., SENFF, L., LABRINCHA, J.A., FERREIRA, V.M., TARELHO, L.A.C. **Lime mud from cellulose industry as raw material in cement mortars.** Mater. Construct. 64 [316], 2014 e033 <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00214>.

MOHAMMED H. A.; ISMAIL M. M.; WAHEEB A. K.; ABDULHANNAN D. **Properties of asphaltic paving mixes containing hydrated lime waste.** Waste Management & Research, v.10, p. 183-194, 2002.

MOLINETI, A. **Utilização de resíduos de argamassa, lodo de anodização de alumínio e cal para a formação de um novo compósito.** 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

MOLLAEI, A., IBRAHIM, N., HABIB, K. **Estimating the construction material stocks in two Canadian cities: a case study of Kitchener and Waterloo.** J. Clean. Prod. 280, 2021.

MONTEIRO, S.N., VIEIRA, C.M.F. **On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update,** Construction and Building Materials, Volume 68,

2014, Pages 599-610, ISSN 0950-0618,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.006>.

MORINI, A. A., OLIVEIRA, K. A., PEREIRA, F. R., HOTZA, D. **Avaliação da Potencialidade do Uso de Resíduos Industriais Através de Ferramenta de Seleção de Materiais para Projeto de Produtos Cerâmicos.** Cerâm. ind., vol.21, n2, p.0, 2016.

MOTTA, P.E.F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J.C.; PEREIRA, N.R. **Relações solo-superfície geomórfica evolução da paisagem em uma área do planalto central brasileiro.** Pesq. Agropec. Bras. Vol: 37:869-878. 2002.

MOURÃO, J.M. **Estudo prospectivo do Setor Siderúrgico:** Caderno de Informações de Base. Associação de Metalurgia e Materiais, ABM, Brasília: CGGE, 2008.

MYMRIN, V.A. **Synthesis of five main mono-minerals of Portland Cement. Report of the Research Department of Geology Faculty,** Moscow State University of Lomonosov (MGU), 7.1967 - 12.1968

MYMRIN, V. A., CORRÊA, S. M. **New construction material from concrete production and demolition wastes and lime production waste.** Construction and Building Materials, v. 21, p. 578-582, 2005.

MYMRIN, V., PEDROSO, C. L. PEDROSO, D. E., AVANCI, M. A., MEYER, S. A. S., ROLIM; P. H. B., ARGENTA, M. A., PONTE, M. J. J., GONÇALVES, A. J. **Efficient application of cellulose pulp and paper production wastes to produce sustainable construction materials,** Construction and Building Materials, Volume 263, 2020, 120604, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120604>.

MYMRINE, V. **Hardening process of blast furnace slags on their geocological utilization.** Stratto da geologia Applicata e Idrogeologia, Bary, Italy., v. XIII, p. 293-298, 1978.

MYMRINE, V. **The influence of loading on the structure and properties of ashes.** Proceedings of Warsaw University, Bulletin of Geology, Warsaw, Poland, v. 24, p. 183-196, 1981.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giamusso. 2a edição. São Paulo: PINI, 1997.

NG, C., ALENGARAM, U. J., WONG, L. S., MO, K. H., JUMAAT, M. Z., RAMESH, S. **A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete**. Construction and Building Materials, 2018.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelha**. Guaratinguetá: UNESP. 101 p. 2011. (Dissertação Mestrado).

NOVAIS, R.M.; CARVALHEIRAS, J.; SEN, L.; LABRINCHA, J.A. **Upcycling unexplored dregs and biomass fly ash from the paper and pulp industry in the production of eco-friendly geopolymer mortars: A preliminary assessment**. Constr. Build. Mater. 2018, 184, 464–472.

PARRA, P.C., LASMAR, N.T. **Ruptura da barragem de rejeito da Mina de Fernandinho**. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS E DE MINERAÇÃO, REGEO'87. 1987, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 1987. v. 1, p. 423-444.

PEDROSO, C. L. **Compósitos à base do rejeito de minério de ferro, resíduo de concreto, resíduos de produção de celulose e resíduo de produção da cal**. 2020. 144f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

PEDROSO, D. E. **Compósitos a base de resíduos de concreto, lodo de anodização de alumínio e resíduos da produção de cal**. 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

PEDROSO, D. E. **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil**. 2020. 115 f. Tese (Doutorado na área de concentração de Construção Civil.) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

PEREIRA, E. L. **Estudo Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estatístico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto, 2005. 185p.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: Globo, 1976.

PIAZZA, S. A. S. M. **Geração e valoração de um novo compósito para a construção civil utilizando resíduos da produção de painéis de mdf, de celulose e de cal**. Tese (doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - Universidade Federal do Paraná, 2020.

PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas**. São Carlos, 1986. 140p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos - Universidade de São Paulo.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1999, 189p.

PÖKYÖ, R., NURMESNIEMI, H. **Calcium carbonate waste from an integrated pulp and paper mill as a potential liming agent**. Environ. Chem. Lett. 2008, 6, 47–51.

PRAKASH, S., DAS, B., MOHANTHY, J.K., VENUGOPAL, R. **The recovery of fine iron minerals from quartz and corundum mixtures using selective magnetic coating**. International Journal of Mineral Processing, v.57, p.87-103, 1999.

PRATES, C. D. **Utilização de um rejeito de minério de ferro no desenvolvimento de um catalisador heterogêneo ácido para a síntese de biodiesel**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Química, 2018.

PRESOTTI, E. S. **Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 2002; 153p.

PROVIS, J. L., DEVENTER, J. S. **Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications**, 2009. CRC Press.

QIN, J.; CUI, C., CUI, X., HUSSAIN, A. YANG, C., YANG, S. **Recycling of lime mud and fly ash for fabrication of anorthite ceramic at low sintering temperature**. Ceram. Int. 2015, 41, 5648–5655.

QUINA, M.J.; PINHEIRO, C.T. **Inorganic Waste Generated in Kraft Pulp Mills: The Transition from Landfill to Industrial Applications.** *Appl. Sci.* 2020, 10, 2317.

RAPAZOTE, G., LAGINHAS, C. PINTO, A. T. **Development of building materials through alkaline activation of construction and demolition waste (CDW) - Resistance to acid attack.** *Adv Sci Technol*, 69 (2011), pp. 156-163

RIBEIRO, A. P. **Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos.** São Paulo, SP: USP, 2010, 142 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, 2010.

ROCHE, C., THYGESEN, K., BAKER, E. **Mine Tailings Storage: Safety is no Accident.** 2017. UNEP.

ROLIM, P.H.B. **Reação álcali-agregado: avaliação do método químico de ensaio.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2010.

SAELI, M.; SEN, L., TOBALDI, D.M., LA SCALIA, G., SEABRA, M.P., LABRINCHA, J.A. **Innovative recycling of lime slaker grits from paper-pulp industry reused as aggregate in ambient cured biomass fly ash-based geopolymers for sustainable construction material.** *Sustainability* 2019, 11, 3481.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Calcário e dolomito.** IN: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 363-387.

SANTOS, A.G. **Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2004, 191 p.

SANTOS, D.R. **Propriedades do Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Resíduos da Etapa de Produção das Alvenarias.** Dissertação. Universidade Federal de Goiás, 2006.

SANTOS, I. **Estudo da produção de concentrados de minério de ferro a partir dos rejeitos da barragem de Germano.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2003.

SANTOS, V. R., CABRELON, M. D., TRICHÊS, E. S., QUINTEIRO, E. **Green liquor dregs and slaker grits residues characterization of a pulp and paper mill for future application on ceramic products**, Journal of Cleaner Production, Volume 240, 2019, 118220, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118220>.

SARKAR, R., KURAR, R., GUPTA, A.K., MUGDAL, A., GUPTA, V. **Use of papermill waste for brickmaking**. Cogent Eng. 2017, 4, 1405768.

SATA, V., SATHONSAOWAPHAK, A., CHINDAPRASIRT, P. **Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack**. Cement and Concrete Composites, 2012.

SCHNEIDER, D.M. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo**. Dissertação. Universidade de São Paulo – Faculdade de Saúde Pública. São Paulo, 2003.

SCREMIM, C. B. **Potenciais materiais para construção civil à base de sedimentos marítimos e resíduos da produção de cal**. 2019. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

SÉBAIBI, Y.; DHEILLY, R.M.; QUÉNEUDEC, M. **A study of the viscosity of lime cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime**. Construction and Building Materials, v. 18, p. 653-660. Paris, 2004.

SHETTIMA A. U.; HUSSIN M. W.; AHMAD Y.; J. MIRZA, **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete**, Constr. Build. Mater. 120 (2016) 72–79, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>.

SILVA, F. L. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica**. Ouro Preto: REDMAT. 109 p. 2014. (Dissertação de Mestrado).

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados por mineração**. Revista Espaço da Sophia. n.8. 2007.

SILVA, M. B. L. **Novos materiais à base de resíduos de construção e demolição (RCD) e resíduos de produção de cal (RPC) para uso na Construção Civil**. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SIMÃO, L., HOTZA, D., PEREIRA, F. R., LABRICHA, J.A., MONTEDO, O. **Characterization of pulp and paper mill waste for the production of waste-based cement.** Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 2019. 35. 237-246. 10.20937/RICA.2019.35.01.17.

SINGH, M.; GARG, M.; SOMANI, K.K. **Experimental investigations in developing low cost masonry cement from industrial wastes.** Indian Concrete Journal, v 80, n 3, p 31-36, March, 2006.

SIQUEIRA, F.B., HOLANDA, J.N.F. **Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks,** Journal of Environmental Management, Volume 131, 2013, Pages 1-6, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.040>.

SOARES, B D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. - 2007.

SOUZA, C. C.; VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N. **Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro.** Rio de Janeiro: Revista Matéria. v. 13, n. 1, pp. 194 – 202. 2008.

SRIVASTAVA, M. P., PAN, S.K., PRASSAD, N. MISHRA, B. K. **Characterization and processing of iron ore fines of Kiriburu deposits of India.** International Journal of Mineral Processing. V.61. p.93-107.

STELLA, J. C. **Elaboração e caracterização de compósito para a construção civil a base de material dragado de porto marítimo, entulho e cal residual.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

STROEVEN, P.; VU, D.D.; BUI, D.D.; DONG, A.V. **Research on cementitious materials to promote sustainable developments in Vietnam.** International Conference on Concrete and Development, 1, Tehran, 2011. Proceedings. Building and Housing Research Center, 2011.

SWAMMY, R.N. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete.** Glasgow/London: Blackie/New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

TOFFOLO, R. V. M. SANT'ANA, F. J. N. BATISTA, J. O. S. SILVA, S. N. CURY, A. A. PEIXOTO, R. A. F. **Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro.** In: Anais do 56º Congresso Brasileiro Do Concreto - CBC2014 – 56CBC. 2014.

TORRES, C.M. SILVA, C.M.; PEDROTI, L.G.; FERNANDES, W.; BALLOTIN, F.C.; ZANUNCIO, J.C. **Cement Portland production with dregs and grits from kraft pulp mills incorporated to clinker.** In Proceedings of the 6th International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, Brazil, 24–26 May 2017; pp. 1–12.

TURGUT, P. **Cement composites with limestone dust and different grades of wood sawdust.** Building and Environment, v. 42, p. 3801-3807, 2007

TURGUT, P., ALGIN, H. M. **Limestone dust and wood sawdust as brick material.** Building and Environment, v. 42, p. 3399-3403, 2007.

UNEP & ISWA. **The Global Waste Management Outlook (GWMO).** UNEP & ISWA, 2015.

USGS - U.S. Geological Survey, 2020, **Mineral commodity summaries 2020:** U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/mcs2020>.

VALE. **Projeto Ferro Carajás.** 48 p. 2012.

VAN ZALINGE, B. C., FENG, Q. Y., AENGENHEYSTER, M., and DIJKSTRA, H. A.: **On determining the point of no return in climate change,** Earth Syst. Dynam., 8, 707–717, <https://doi.org/10.5194/esd-8-707-2017>, 2017.

VERDUGO, R. **Seismic failure of tailings dams.** In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, ICEG, 4. 2002, Rio de Janeiro. Contribution PS2. Rio de Janeiro, 2002, 10 p.

ZHAO, S. FAN, J. SUN, W. **Construction and Building Materials.** Construction and Building Materials. Vol.50. 540–548. 2014.

ZHANG, S. XUE, X. LUI, X. DUAN, P. YANG, H. JIANG, T. WANG, T. LIU, R. **Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources.** Journal of Mining Science. Vol 42. N. 4. 2006.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**, Diss. Mestrado, Fac. Eng. Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (1997) 140p.

YANG, K., XU, Q., TOWNSEND, T.G., CHADIK, P., BITTON, G., BOOTH, M. **Hydrogen sulfide generation in simulated construction and demolition debris landfills: impact of waste composition.** J. Air Waste Manage. Assoc. 56, 1130–1138.

YELLISHETTY, M. KARPE, V. REDDY. E. **Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: a case study.** Resour Conserv Recycle. Vol. 52:1283–9. 2008.

WALTRICK, C. E. **Elaboração e caracterização de compósitos para a construção civil a base de resíduos de argamassa, entulho e cal residual.** Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010. 92 p.

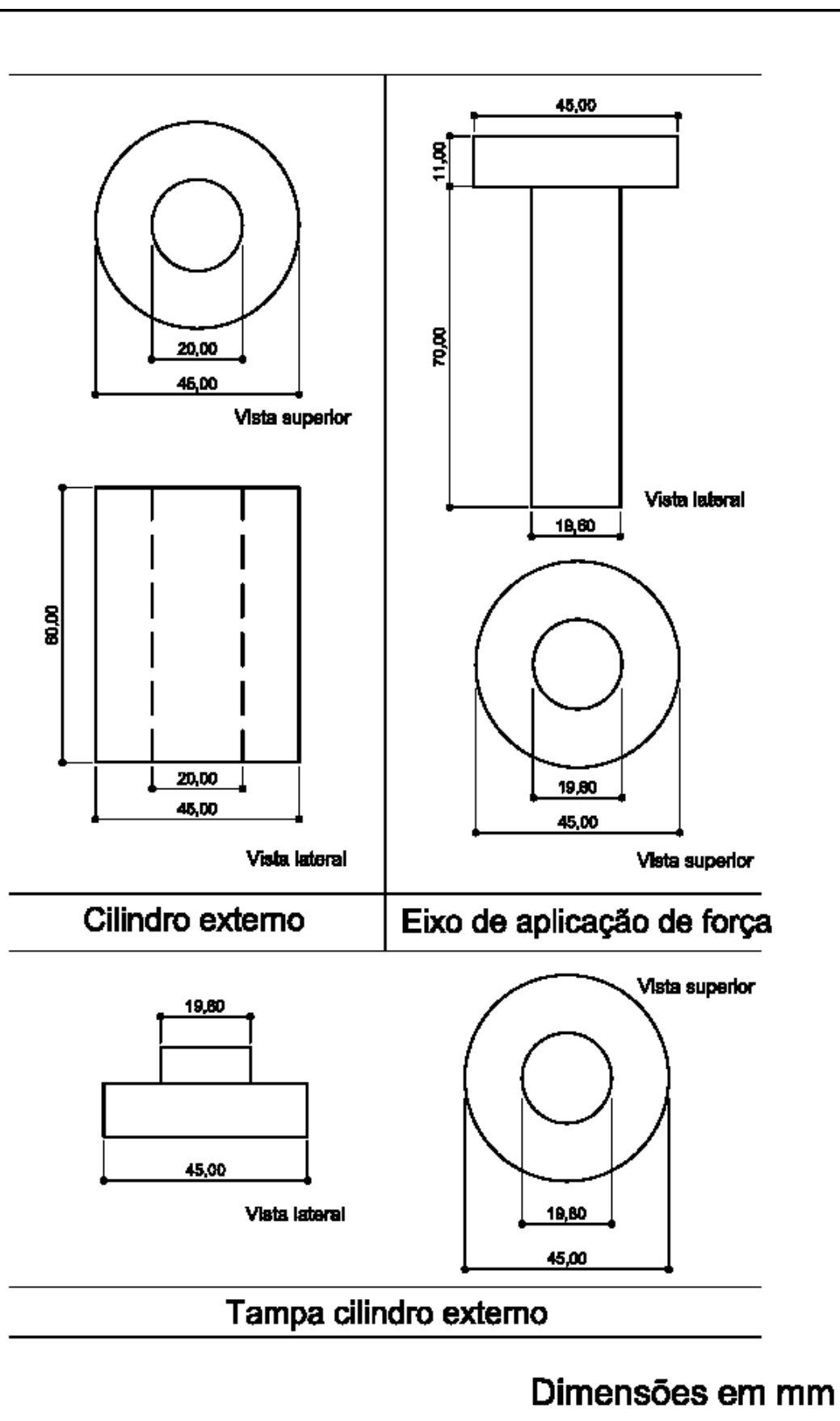
WEDLER, B. HUMMEL, A. **Trümmerverwertung und Ausbau von Brandruinen.** Wilhelm Ernest & Sohn, Berlin, 1946.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE.** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. 107 p. 2009. (Dissertação Mestrado).

WOLFF, E. **Uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha.** Belo Horizonte, MG: UFMG, 2008, 188p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

WU, Z., YU, A. T. W, POON, C. S. **An off-site snapshot methodology for estimating building construction waste composition** - a case study of Hong Kong, Environmental Impact Assessment Review, Volume 77, 2019, Pages 128-135, ISSN 0195-9255, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.03.006>.

APÊNDICE A - Dimensões do molde utilizado na pesquisa



APÊNDICE B - Resultados Obtidos
Resistência à compressão, Densidade, Diâmetro, Altura e Massa.

σ (MPa)																											
Comp.	3d			7d			14d			28d			60d			90d			180d			360d			720d		
	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV
1	1.39	0.13	9.54	3.38	0.16	4.77	3.88	0.33	8.62	4.13	0.19	4.49	3.60	0.31	8.69	3.79	0.12	3.11	3.75	0.33	8.87	6.58	0.49	7.51	6.67	0.49	7.29
2	1.72	0.19	10.97	3.91	0.22	5.74	4.55	0.26	5.63	4.82	0.35	7.18	4.84	0.36	7.34	5.16	0.24	4.69	5.88	0.41	7.04	13.72	0.56	4.11	13.29	0.15	1.14
3	4.19	0.30	7.20	5.40	0.30	5.58	6.04	0.30	4.89	6.93	0.44	6.35	7.18	0.36	4.96	6.96	0.25	3.58	7.48	0.60	8.08	10.29	0.82	7.99	11.96	0.54	4.53
4	4.45	0.38	8.62	6.00	0.27	4.51	6.38	0.17	2.62	6.86	0.39	5.66	7.69	0.67	8.69	6.91	0.37	5.40	7.65	0.51	6.61	7.85	0.57	7.23	10.79	0.37	3.45
5	0.46	0.04	8.33	0.40	0.02	5.21	0.53	0.04	8.45	0.49	0.03	6.89	0.72	0.03	4.51	0.54	0.05	9.52	1.25	0.09	7.54	1.51	0.13	8.68	2.12	0.04	1.95
6	0.49	0.04	8.58	0.47	0.04	9.35	0.59	0.04	7.25	0.54	0.03	5.14	0.83	0.07	8.46	0.82	0.07	8.24	0.88	0.07	7.76	2.85	0.21	7.50	5.31	0.34	6.42
7	0.45	0.04	9.48	0.53	0.03	6.11	0.60	0.06	9.98	0.53	0.03	6.12	0.78	0.06	7.75	0.58	0.03	5.16	0.88	0.08	9.26	3.25	0.23	7.07	3.76	0.27	7.30
8	0.60	0.05	8.80	0.72	0.03	4.36	0.88	0.08	8.94	0.78	0.06	7.50	1.01	0.08	7.91	0.93	0.06	6.15	1.19	0.10	8.19	1.88	0.16	8.44	4.08	0.32	7.85
9	2.36	0.16	6.75	3.18	0.28	8.86	3.52	0.33	9.33	3.85	0.13	3.43	4.82	0.33	6.89	4.62	0.36	7.70	4.98	0.43	8.57	14.73	1.17	7.98	12.82	0.65	5.11
10	2.37	0.19	8.21	3.11	0.11	3.45	3.42	0.12	3.57	3.77	0.30	7.97	5.36	0.35	6.54	4.26	0.36	8.51	5.48	0.26	4.78	18.57	1.05	5.66	21.31	1.38	6.46
11	1.94	0.05	2.48	2.70	0.20	7.50	3.02	0.21	7.01	3.61	0.20	5.47	5.01	0.34	6.77	4.56	0.27	5.87	5.54	0.29	5.24	12.19	1.00	8.21	9.47	0.39	4.07
12	1.64	0.07	4.33	2.11	0.19	9.16	2.56	0.20	7.69	3.23	0.11	3.33	3.97	0.30	7.47	3.68	0.26	6.97	4.34	0.44	10.12	11.98	0.80	6.70	10.95	1.06	9.71
13	3.00	0.22	7.18	4.18	0.19	4.57	4.72	0.13	2.71	5.07	0.18	3.65	6.93	0.41	5.89	6.04	0.10	1.74	8.25	0.36	4.42	11.52	0.42	3.60	11.60	0.81	7.01
14	2.38	0.14	6.02	3.91	0.25	6.35	4.19	0.33	7.81	4.53	0.27	5.93	5.92	0.33	5.56	5.42	0.36	6.62	7.33	0.68	9.25	12.53	0.84	6.68	11.80	1.03	8.74
15	1.83	0.11	6.06	3.12	0.21	6.70	3.26	0.32	9.88	4.28	0.14	3.24	5.39	0.42	7.74	4.23	0.31	7.38	5.93	0.45	7.65	13.50	0.84	6.23	12.95	0.68	5.28
16	1.52	0.12	7.93	2.41	0.09	3.84	2.69	0.14	5.34	3.44	0.19	5.58	4.69	0.12	2.47	3.53	0.26	7.28	5.56	0.32	5.78	7.29	0.57	7.87	8.43	0.30	3.59
17	2.06	0.15	7.12	3.52	0.28	7.97	4.32	0.37	8.56	4.47	0.09	2.01	5.98	0.32	5.35	4.40	0.38	8.62	5.55	0.47	8.44	11.11	0.72	6.48	12.98	0.20	1.51
18	1.69	0.14	8.04	2.52	0.09	3.74	3.57	0.24	6.68	3.72	0.20	5.30	4.47	0.17	3.74	3.29	0.26	8.03	3.91	0.19	4.86	12.18	0.84	6.88	13.53	0.92	6.82
19	1.51	0.10	6.56	2.60	0.22	8.48	3.19	0.29	9.22	3.11	0.30	9.58	4.23	0.21	5.06	3.33	0.18	5.54	5.46	0.18	3.27	10.62	0.91	8.60	13.22	0.50	3.81
20	1.72	0.13	7.72	2.27	0.18	8.01	2.67	0.18	6.90	2.75	0.21	7.77	4.20	0.33	7.97	3.10	0.26	8.54	4.53	0.42	9.25	8.57	0.18	2.15	11.89	0.99	8.30
21	1.38	0.13	9.56	1.98	0.17	8.39	2.34	0.17	7.31	3.41	0.22	6.57	3.68	0.24	6.44	3.21	0.29	8.97	4.07	0.31	7.66	15.24	0.59	3.84	15.84	0.17	1.10
22	1.20	0.10	8.66	1.82	0.09	5.22	2.03	0.14	6.88	3.13	0.25	7.96	4.08	0.12	2.89	3.31	0.13	4.00	4.34	0.16	3.61	12.11	0.71	5.91	11.35	0.78	6.85
23	0.97	0.05	5.30	1.50	0.14	9.08	1.53	0.10	6.24	2.58	0.17	6.77	2.96	0.18	5.95	2.75	0.13	4.85	3.24	0.19	5.74	7.85	0.54	6.91	7.86	0.56	7.14
24	0.88	0.06	6.69	1.25	0.10	8.05	1.34	0.04	2.86	1.98	0.12	5.96	2.45	0.05	2.03	2.40	0.13	5.34	2.59	0.26	10.09	6.28	0.38	6.02	5.72	0.30	5.21
25	0.78	0.06	8.00	0.96	0.05	5.18	1.33	0.05	3.93	1.72	0.17	9.84	2.08	0.18	8.82	1.90	0.19	10.00	2.14	0.10	4.86	4.09	0.13	3.15	5.31	0.31	5.92
26	1.34	0.08	6.06	1.92	0.15	7.58	2.23	0.12	5.54	3.00	0.27	8.85	3.28	0.19	5.71	3.47	0.17	4.85	3.78	0.30	7.99	9.23	0.53	5.71	10.24	0.16	1.58
27	0.97	0.04	4.44	1.68	0.12	7.24	1.71	0.15	9.01	2.26	0.20	9.00	2.97	0.25	8.27	3.02	0.28	9.11	3.16	0.16	4.95	10.16	0.60	5.87	13.19	0.90	6.79
28	0.88	0.08	9.49	1.22	0.11	8.73	1.57	0.10	6.36	2.09	0.10	4.77	2.58	0.17	6.67	2.66	0.20	7.58	2.91	0.19	6.52	7.70	0.37	4.86	9.72	0.79	8.16
29	1.30	0.11	8.32	2.04	0.09	4.25	2.35	0.17	7.11	2.91	0.08	2.87	3.51	0.22	6.35	3.25	0.29	9.02	3.06	0.23	7.42	8.67	0.70	8.03	9.80	0.37	3.81
30	1.46	0.12	8.32	1.76	0.13	7.47	1.79	0.12	6.59	2.14	0.11	5.01	3.02	0.18	6.12	3.77	0.29	7.58	3.21	0.27	8.50	10.36	0.81	7.79	13.53	1.20	8.85
31	1.21	0.03	2.57	1.53	0.10	6.67	1.79	0.13	7.29	2.24	0.22	9.63	2.85	0.15	5.44	3.27	0.30	9.16	3.46	0.32	9.16	7.97	0.40	4.98	10.39	0.94	9.01
32	1.74	0.17	9.58	2.52	0.12	4.69	2.97	0.29	9.78	3.66	0.13	3.55	4.32	0.28	6.58	4.01	0.36	9.09	5.10	0.34	6.73	7.38	0.57	7.76	8.21	0.34	4.19
33	1.12	0.11	9.67	1.56	0.15	9.62	2.33	0.17	7.46	2.30	0.22	9.47	4.19	0.23	5.51	3.16	0.21	6.57	3.38	0.28	8.30	6.41	0.42	6.51	8.55	0.56	6.49
34	1.09	0.10	9.02	1.36	0.12	9.13	1.82	0.13	7.08	2.46	0.23	9.33	3.60	0.23	6.32	2.53	0.22	8.89	3.42	0.34	9.81	6.81	0.49	7.20	8.49	0.39	4.65
35	1.00	0.08	7.55	1.39	0.07	5.04	2.52	0.19	7.52	2.11	0.11	5.22	3.91	0.20	4.99	2.10	0.20	9.56	4.07	0.25	6.16	7.22	0.64	8.93	10.48	0.29	2.75

Comp.	ρ (g/cm ³)																													
	Moldagem			3d			7d			14d			28d			60d			90d			180d			360d			720d		
	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV
1	1,85	0,02	0,83	1,79	0,01	0,71	1,73	0,02	1,04	1,69	0,01	0,65	1,68	0,01	0,48	1,67	0,01	0,77	1,66	0,02	1,08	1,64	0,01	0,40	1,63	0,01	0,55	1,63	0,01	0,83
2	1,85	0,01	0,73	1,84	0,03	1,41	1,77	0,02	1,19	1,70	0,02	0,94	1,68	0,01	0,80	1,67	0,01	0,78	1,65	0,01	0,40	1,66	0,01	0,64	1,70	0,02	1,09	1,70	0,02	0,94
3	1,83	0,02	1,24	1,79	0,02	1,27	1,73	0,02	1,33	1,69	0,02	0,91	1,70	0,01	0,58	1,70	0,01	0,70	1,69	0,01	0,72	1,67	0,01	0,49	1,70	0,00	0,25	1,72	0,02	1,07
4	1,84	0,01	0,62	1,83	0,03	1,88	1,75	0,03	1,72	1,72	0,02	1,13	1,71	0,02	1,36	1,72	0,01	0,62	1,69	0,01	0,78	1,69	0,01	0,86	1,73	0,02	1,03	1,75	0,03	0,00
5	1,84	0,03	1,42	1,75	0,03	1,82	1,80	0,04	2,12	1,74	0,03	1,96	1,60	0,02	1,20	1,48	0,01	0,39	1,45	0,02	1,33	1,41	0,02	1,41	1,38	0,01	0,43	1,39	0,01	0,68
6	1,83	0,01	0,80	1,81	0,02	0,86	1,78	0,02	1,34	1,73	0,02	1,24	1,65	0,03	1,63	1,53	0,01	0,93	1,51	0,01	0,53	1,46	0,01	0,37	1,58	0,02	1,34	1,60	0,02	1,17
7	1,84	0,03	1,58	1,82	0,02	0,87	1,81	0,01	0,78	1,77	0,02	1,01	1,71	0,02	1,42	1,59	0,01	0,93	1,57	0,04	2,64	1,53	0,02	1,08	1,57	0,01	0,42	1,55	0,02	1,11
8	1,81	0,04	2,07	1,82	0,03	1,75	1,80	0,02	1,19	1,74	0,03	1,90	1,69	0,03	1,52	1,60	0,01	0,92	1,59	0,02	1,04	1,54	0,01	0,93	1,56	0,03	1,69	1,59	0,02	1,55
9	1,83	0,01	0,71	1,78	0,01	0,70	1,72	0,01	0,70	1,65	0,03	1,73	1,65	0,01	0,60	1,64	0,01	0,51	1,67	0,01	0,84	1,63	0,01	0,68	1,69	0,00	0,25	1,69	0,01	0,80
10	1,85	0,01	0,42	1,85	0,02	1,21	1,80	0,04	1,97	1,76	0,03	1,77	1,75	0,02	1,04	1,73	0,01	0,31	1,75	0,01	0,67	1,75	0,01	0,75	1,75	0,01	0,75	1,75	0,02	1,07
11	1,84	0,01	0,76	1,83	0,03	1,49	1,76	0,02	1,41	1,70	0,02	1,29	1,72	0,02	0,95	1,66	0,01	0,69	1,68	0,02	1,39	1,64	0,01	0,68	1,69	0,01	0,44	1,69	0,01	0,60
12	1,86	0,01	0,72	1,85	0,03	1,75	1,78	0,04	2,23	1,72	0,02	1,42	1,69	0,03	1,65	1,65	0,01	0,72	1,65	0,01	0,56	1,63	0,01	0,53	1,69	0,01	0,65	1,69	0,02	1,04
13	1,83	0,01	0,65	1,80	0,02	1,30	1,77	0,01	0,52	1,67	0,02	1,00	1,68	0,01	0,42	1,69	0,01	0,46	1,69	0,01	0,71	1,68	0,01	0,77	1,71	0,01	0,47	1,71	0,02	0,95
14	1,83	0,02	1,07	1,84	0,03	1,54	1,83	0,03	1,38	1,69	0,01	0,63	1,68	0,02	1,00	1,67	0,01	0,50	1,68	0,01	0,49	1,67	0,01	0,31	1,71	0,02	1,25	1,70	0,03	1,51
15	1,87	0,01	0,44	1,82	0,01	0,64	1,72	0,02	0,89	1,67	0,02	1,46	1,66	0,01	0,70	1,64	0,01	0,67	1,66	0,02	0,95	1,65	0,01	0,61	1,70	0,00	0,24	1,70	0,01	0,75
16	1,84	0,01	0,49	1,85	0,02	1,28	1,77	0,03	1,88	1,70	0,03	1,55	1,68	0,02	1,11	1,64	0,02	1,06	1,64	0,01	0,57	1,66	0,02	0,97	1,69	0,01	0,81	1,68	0,02	1,22
17	1,84	0,02	1,03	1,80	0,01	0,68	1,71	0,02	1,03	1,67	0,02	1,46	1,68	0,02	1,44	1,65	0,01	0,64	1,66	0,01	0,84	1,65	0,02	1,05	1,72	0,01	0,32	1,74	0,01	0,79
18	1,85	0,01	0,38	1,85	0,02	1,08	1,75	0,02	1,07	1,68	0,01	0,74	1,67	0,02	1,15	1,65	0,01	0,70	1,64	0,01	0,41	1,63	0,01	0,69	1,70	0,01	0,83	1,73	0,02	1,39
19	1,84	0,01	0,54	1,73	0,02	1,21	1,68	0,02	1,43	1,67	0,01	0,86	1,63	0,02	1,37	1,63	0,01	0,65	1,65	0,00	0,12	1,63	0,02	0,99	1,72	0,01	0,48	1,75	0,01	0,70
20	1,85	0,01	0,59	1,84	0,03	1,46	1,72	0,02	1,41	1,67	0,01	0,74	1,67	0,02	1,16	1,63	0,01	0,77	1,64	0,01	0,82	1,63	0,01	0,70	1,70	0,02	0,98	1,71	0,02	1,39
21	1,81	0,01	0,67	1,76	0,01	0,49	1,70	0,02	1,22	1,66	0,01	0,61	1,62	0,01	0,70	1,62	0,01	0,63	1,65	0,01	0,76	1,63	0,01	0,60	1,70	0,01	0,31	1,70	0,01	0,68
22	1,84	0,02	1,02	1,83	0,03	1,90	1,76	0,03	1,58	1,69	0,02	0,98	1,66	0,01	0,89	1,65	0,01	0,79	1,67	0,01	0,69	1,64	0,01	0,66	1,69	0,01	0,78	1,70	0,02	1,32
23	1,85	0,02	1,01	1,80	0,01	0,48	1,72	0,02	1,12	1,68	0,02	0,90	1,65	0,01	0,68	1,64	0,01	0,61	1,66	0,01	0,62	1,62	0,01	0,68	1,68	0,01	0,41	1,69	0,02	0,90
24	1,86	0,02	1,04	1,85	0,04	2,22	1,73	0,03	1,86	1,67	0,02	1,21	1,62	0,02	1,19	1,62	0,01	0,76	1,64	0,01	0,60	1,61	0,01	0,42	1,67	0,02	0,92	1,68	0,03	1,61
25	1,84	0,02	0,84	1,79	0,01	0,44	1,74	0,03	1,64	1,65	0,03	1,56	1,63	0,02	0,98	1,62	0,01	0,43	1,65	0,02	0,94	1,61	0,01	0,65	1,67	0,02	0,98	1,67	0,01	0,78
26	1,86	0,01	0,64	1,80	0,03	1,57	1,72	0,02	1,30	1,70	0,02	1,47	1,67	0,02	1,13	1,66	0,01	0,85	1,68	0,01	0,56	1,66	0,01	0,60	1,68	0,02	1,02	1,70	0,02	1,38
27	1,84	0,02	1,27	1,78	0,01	0,60	1,73	0,02	1,17	1,68	0,01	0,40	1,67	0,01	0,90	1,65	0,01	0,57	1,67	0,01	0,64	1,64	0,01	0,74	1,71	0,01	0,81	1,73	0,01	0,83
28	1,86	0,02	0,89	1,85	0,02	1,34	1,79	0,03	1,67	1,71	0,03	1,48	1,65	0,02	1,05	1,63	0,01	0,72	1,65	0,01	0,65	1,64	0,01	0,61	1,71	0,02	1,10	1,73	0,03	1,67
29	1,86	0,03	1,41	1,78	0,03	1,46	1,72	0,01	0,57	1,69	0,03	1,96	1,69	0,01	0,59	1,65	0,02	0,93	1,66	0,01	0,71	1,64	0,02	1,00	1,71	0,02	1,20	1,73	0,02	1,04
30	1,85	0,02	1,23	1,81	0,03	1,85	1,74	0,03	1,85	1,72	0,02	0,96	1,67	0,02	1,26	1,66	0,01	0,89	1,68	0,01	0,60	1,66	0,01	0,63	1,73	0,02	1,22	1,76	0,03	1,83
31	1,86	0,02	1,18	1,79	0,02	1,14	1,75	0,04	2,00	1,72	0,03	1,86	1,67	0,01	0,86	1,65	0,02	0,98	1,67	0,02	0,91	1,65	0,01	0,89	1,74	0,01	0,79	1,74	0,03	1,69
32	1,89	0,02	1,31	1,83	0,04	1,98	1,75	0,03	1,52	1,74	0,02	1,16	1,71	0,01	0,79	1,69	0,01	0,79	1,70	0,01	0,59	1,68	0,02	0,96	1,74	0,02	1,09	1,74	0,03	1,48
33	1,84	0,03	1,41	1,76	0,02	0,89	1,74	0,02	1,27	1,64	0,01	0,61	1,67	0,02	1,07	1,67	0,01	0,75	1,68	0,01	0,66	1,66	0,01	0,70	1,72	0,01	0,47	1,73	0,02	1,21
34	1,85	0,02	1,22	1,80	0,03	1,74	1,77	0,02	1,19	1,65	0,02	0,91	1,66	0,02	1,12	1,66	0,01	0,77	1,67	0,01	0,77	1,65	0,01	0,71	1,74	0,02	1,02	1,72	0,03	1,57
35	1,86	0,02	1,09	1,78	0,02	1,25	1,76	0,02	0,91	1,65	0,00	0,14	1,68	0,01	0,70	1,67	0,01	0,63	1,67	0,02	1,26	1,67	0,02	1,08	1,73	0,02	0,87	1,75	0,02	0,99

Comp.	M (g)																													
	Moldagem			3d			7d			14d			28d			60d			90d			180d			360d			720d		
	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV	Méd	Sd	CV
1	11,96	0,09	0,74	11,66	0,05	0,46	11,24	0,11	1,00	10,92	0,08	0,71	10,79	0,05	0,48	10,69	0,08	0,74	10,58	0,07	0,64	10,57	0,05	0,48	10,51	0,05	0,44	10,50	0,03	0,33
2	11,83	0,08	0,63	11,76	0,09	0,80	11,33	0,07	0,60	10,87	0,07	0,68	10,75	0,03	0,25	10,69	0,07	0,69	10,57	0,04	0,41	10,65	0,05	0,43	10,91	0,04	0,35	10,97	0,04	0,35
3	11,80	0,07	0,62	11,68	0,11	0,97	11,22	0,14	1,28	10,93	0,10	0,94	10,93	0,02	0,14	10,89	0,08	0,70	10,80	0,05	0,43	10,75	0,05	0,46	10,95	0,04	0,38	11,09	0,05	0,42
4	11,81	0,06	0,54	11,72	0,12	1,04	11,20	0,12	1,07	11,03	0,09	0,81	10,97	0,08	0,74	10,96	0,03	0,26	10,86	0,06	0,51	10,81	0,06	0,52	11,15	0,04	0,33	11,29	0,08	0,71
5	11,77	0,08	0,67	11,45	0,27	2,35	11,68	0,27	2,32	11,30	0,25	2,23	10,26	0,12	1,18	9,47	0,05	0,48	9,30	0,06	0,64	9,05	0,09	0,99	8,89	0,04	0,42	8,93	0,03	0,36
6	11,64	0,08	0,65	11,57	0,09	0,82	11,37	0,13	1,15	11,11	0,14	1,22	10,57	0,11	1,05	9,80	0,06	0,59	9,66	0,08	0,81	9,36	0,06	0,65	10,19	0,08	0,78	10,30	0,06	0,56
7	11,84	0,05	0,42	11,89	0,07	0,63	11,74	0,09	0,80	11,46	0,13	1,12	11,01	0,11	0,99	10,18	0,07	0,66	10,04	0,21	2,05	9,83	0,16	1,64	10,13	0,05	0,48	9,98	0,13	1,28
8	11,60	0,19	1,67	11,67	0,26	2,25	11,53	0,24	2,09	11,17	0,25	2,20	10,82	0,10	0,90	10,20	0,05	0,48	10,19	0,12	1,20	9,91	0,15	1,49	10,02	0,12	1,18	10,25	0,07	0,71
9	11,73	0,04	0,31	11,64	0,03	0,22	11,19	0,04	0,39	10,72	0,14	1,34	10,61	0,05	0,47	10,54	0,03	0,30	10,69	0,06	0,60	10,48	0,04	0,34	10,91	0,01	0,10	10,87	0,03	0,24
10	11,82	0,06	0,47	11,85	0,06	0,49	11,50	0,16	1,35	11,31	0,22	1,96	11,24	0,06	0,50	11,05	0,08	0,70	11,23	0,04	0,39	11,21	0,04	0,39	11,26	0,06	0,50	11,28	0,03	0,29
11	11,89	0,09	0,78	11,87	0,13	1,06	11,45	0,18	1,57	11,05	0,11	0,96	11,02	0,06	0,50	10,67	0,03	0,27	10,77	0,09	0,85	10,56	0,03	0,28	10,88	0,03	0,30	10,85	0,02	0,21
12	11,93	0,05	0,44	11,81	0,12	1,01	11,37	0,16	1,37	11,00	0,16	1,45	10,80	0,16	1,48	10,52	0,02	0,17	10,60	0,03	0,24	10,44	0,03	0,32	10,86	0,03	0,24	10,86	0,03	0,28
13	11,84	0,04	0,32	11,66	0,07	0,60	11,47	0,04	0,32	10,80	0,08	0,71	10,80	0,10	0,91	10,83	0,04	0,38	10,82	0,04	0,38	10,80	0,05	0,44	11,03	0,06	0,52	10,99	0,03	0,25
14	11,85	0,05	0,42	11,79	0,09	0,74	11,71	0,08	0,70	10,80	0,07	0,61	10,75	0,07	0,61	10,70	0,03	0,27	10,76	0,02	0,17	10,72	0,06	0,54	11,00	0,12	1,08	10,94	0,10	0,92
15	11,93	0,04	0,31	11,91	0,05	0,40	11,19	0,08	0,73	10,82	0,12	1,11	10,64	0,06	0,54	10,52	0,02	0,21	10,59	0,05	0,47	10,60	0,10	0,95	10,97	0,04	0,34	10,93	0,05	0,43
16	11,82	0,02	0,15	11,82	0,02	0,18	11,34	0,13	1,16	10,91	0,16	1,47	10,79	0,05	0,46	10,50	0,06	0,61	10,54	0,05	0,50	10,62	0,05	0,45	10,90	0,01	0,10	10,82	0,12	1,10
17	11,83	0,08	0,68	11,76	0,11	0,90	11,11	0,06	0,55	10,82	0,12	1,14	10,79	0,12	1,14	10,58	0,04	0,37	10,62	0,07	0,69	10,65	0,04	0,38	11,09	0,02	0,16	11,18	0,02	0,19
18	11,82	0,04	0,37	11,81	0,03	0,28	11,17	0,04	0,39	10,75	0,09	0,80	10,73	0,09	0,81	10,52	0,04	0,43	10,53	0,02	0,23	10,46	0,06	0,57	10,96	0,02	0,19	11,12	0,03	0,30
19	11,84	0,08	0,67	11,33	0,15	1,33	10,91	0,12	1,12	10,80	0,10	0,91	10,48	0,10	0,93	10,42	0,01	0,13	10,57	0,08	0,79	10,51	0,06	0,55	11,07	0,05	0,42	11,26	0,03	0,23
20	11,88	0,04	0,37	11,75	0,06	0,53	10,99	0,07	0,64	10,68	0,07	0,68	10,67	0,07	0,68	10,43	0,02	0,16	10,51	0,06	0,59	10,47	0,04	0,39	10,95	0,05	0,44	11,03	0,06	0,55
21	11,82	0,06	0,48	11,51	0,09	0,76	11,03	0,10	0,91	10,75	0,04	0,38	10,42	0,02	0,16	10,40	0,02	0,21	10,54	0,03	0,24	10,49	0,02	0,22	10,93	0,02	0,23	10,94	0,02	0,21
22	11,95	0,05	0,42	11,68	0,08	0,72	11,26	0,10	0,86	10,84	0,12	1,11	10,61	0,03	0,27	10,52	0,04	0,38	10,72	0,04	0,38	10,54	0,02	0,21	10,89	0,03	0,27	10,94	0,05	0,43
23	12,01	0,06	0,52	11,76	0,09	0,80	11,19	0,12	1,12	10,90	0,07	0,62	10,58	0,02	0,18	10,50	0,02	0,14	10,64	0,07	0,68	10,40	0,02	0,22	10,80	0,04	0,35	10,85	0,05	0,44
24	11,96	0,05	0,38	11,82	0,14	1,20	11,05	0,16	1,49	10,72	0,12	1,07	10,37	0,04	0,35	10,33	0,04	0,41	10,53	0,04	0,39	10,33	0,06	0,58	10,76	0,03	0,29	10,85	0,08	0,73
25	11,99	0,06	0,48	11,67	0,09	0,74	11,31	0,15	1,29	10,70	0,13	1,20	10,49	0,07	0,69	10,37	0,05	0,46	10,57	0,03	0,28	10,35	0,09	0,83	10,74	0,11	1,04	10,76	0,01	0,12
26	11,98	0,06	0,50	11,52	0,09	0,75	10,98	0,08	0,77	10,88	0,14	1,30	10,67	0,04	0,35	10,61	0,03	0,32	10,82	0,05	0,46	10,64	0,04	0,35	10,83	0,05	0,49	10,98	0,07	0,68
27	11,93	0,06	0,50	11,63	0,09	0,76	11,25	0,13	1,18	10,87	0,07	0,66	10,69	0,07	0,63	10,56	0,02	0,22	10,68	0,03	0,31	10,59	0,06	0,56	11,00	0,09	0,86	11,16	0,04	0,34
28	11,96	0,07	0,54	11,81	0,11	0,90	11,41	0,10	0,87	10,95	0,13	1,19	10,61	0,04	0,34	10,44	0,04	0,36	10,61	0,04	0,41	10,54	0,08	0,71	11,02	0,10	0,92	11,12	0,07	0,60
29	11,94	0,08	0,69	11,65	0,13	1,12	11,19	0,06	0,54	10,93	0,18	1,66	10,83	0,01	0,12	10,60	0,10	0,90	10,64	0,07	0,70	10,58	0,12	1,18	11,00	0,15	1,37	11,12	0,06	0,54
30	11,90	0,07	0,61	11,59	0,10	0,87	11,13	0,17	1,54	11,03	0,11	0,98	10,68	0,04	0,41	10,59	0,06	0,59	10,77	0,03	0,31	10,64	0,07	0,63	11,14	0,08	0,72	11,30	0,11	1,00
31	12,00	0,07	0,59	11,68	0,08	0,67	11,37	0,20	1,71	11,16	0,18	1,65	10,72	0,03	0,32	10,59	0,07	0,70	10,69	0,04	0,40	10,64	0,09	0,85	11,21	0,09	0,81	11,20	0,13	1,20
32	12,07	0,05	0,45	11,71	0,08	0,71	11,18	0,12	1,06	11,17	0,11	0,97	10,99	0,03	0,31	10,80	0,07	0,68	10,90	0,04	0,33	10,79	0,06	0,53	11,19	0,05	0,44	11,20	0,08	0,68
33	11,90	0,09	0,77	11,48	0,15	1,33	11,31	0,16	1,39	10,65	0,02	0,17	10,73	0,06	0,52	10,70	0,04	0,36	10,77	0,04	0,41	10,67	0,08	0,74	11,05	0,07	0,60	11,17	0,08	0,70
34	11,87	0,10	0,82	11,53	0,06	0,55	11,29	0,06	0,51	10,55	0,06	0,55	10,62	0,04	0,35	10,61	0,04	0,42	10,69	0,08	0,75	10,61	0,09	0,82	11,18	0,04	0,38	11,08	0,21	1,87
35	11,97	0,09	0,77	11,66	0,10	0,86	11,42	0,08	0,69	10,70	0,04	0,37	10,79	0,03	0,28	10,70	0,10	0,95	10,65	0,06	0,53	10,75	0,06	0,56	11,17	0,09	0,83	11,27	0,11	1,01

APÊNDICE C - Picos de DRX das composições 2,6,10 e 21

Composição 2					
Ângulo 2θ	Intensidade (cps)				Fases observadas
	Moldagem	180 d	360 d	720 d	
17,91	106,85	36,66	0,00	0,00	Portlandita
20,83	884,36	752,67	1004,56	958,39	Quartzo
22,99	53,82	71,09	210,35	82,92	Calcita
26,61	4152,73	4868,86	6567,61	5530,71	Quartzo
29,39	549,80	763,94	566,87	831,13	Calcita
30,94	809,68	145,58	167,38	111,42	Dolomita
34,08	138,19	40,45	38,41	0,00	Portlandita
36,51	486,54	245,51	470,77	251,65	Quartzo
39,44	358,51	419,55	291,14	419,31	Quartzo; Calcita
40,25	176,39	163,28	136,22	146,03	Quartzo
42,45	809,68	231,58	176,42	188,86	Quartzo
42,86	388,56	0,00	0,00	0,00	Periclásio
45,75	153,87	167,70	137,67	150,88	Quartzo; Dolomita
47,56	95,77	76,39	74,99	111,97	Calcita
48,55	61,40	84,08	91,86	123,56	Calcita
50,10	430,14	551,22	514,19	493,37	Quartzo; Dolomita
54,84	199,65	315,23	198,45	134,60	Quartzo
55,28	60,86	146,03	67,27	0,00	Quartzo
59,93	457,83	330,82	360,58	547,57	Quartzo
60,12	253,44	153,67	176,13	264,54	Dolomita
62,26	155,92	21,66	18,47	0,00	Periclásio; Portlandita
67,72	171,78	187,96	224,42	178,49	Quartzo
68,11	259,95	310,62	216,44	364,78	Quartzo
68,29	347,48	247,89	210,10	340,45	Quartzo
74,74	11,09	0,00	0,00	0,00	Periclásio; Dolomita
75,63	146,84	103,48	106,61	67,30	Quartzo
78,57	37,59	0,00	0,00	0,00	Periclásio; Calcita
79,86	51,24	132,80	86,33	112,00	Quartzo; Dolomita

Composição 6					
Ângulo 2θ	Intensidade (cps)				Fases observadas
	Moldagem	180 d	360 d	720 d	
17,96	61,60	0,00	0,00	0,00	Portlandita
18,41	0,00	69,77	84,36	39,87	Brucita
19,00	31,90	0,00	0,00	0,00	Thenardita
23,06	260,56	248,05	246,66	334,72	Calcita; Thenardita
29,37	3629,30	3024,40	3129,08	3736,42	Calcita
31,37	70,13	73,79	80,94	79,37	Calcita; Thenardita
33,95	86,13	44,73	34,41	0,00	Thenardita; Portlandita
35,96	383,35	344,78	343,32	391,15	Calcita
37,75	0,00	88,04	104,49	40,23	Brucita
39,38	560,64	432,70	508,34	536,49	Calcita
42,87	206,50	0,00	0,00	0,00	Periclásio
43,14	519,23	440,38	425,25	475,22	Calcita
47,07	190,26	138,42	170,78	171,22	Calcita; Portlandita
47,44	604,88	549,49	477,12	515,71	Calcita; Thenardita
48,47	773,45	442,82	489,06	537,78	Calcita
50,84	23,79	29,43	42,22	0,00	Portlandita; Thenardita
56,52	69,71	46,45	60,80	74,46	Calcita
57,37	223,05	148,86	193,03	203,14	Calcita; Thenardita
60,63	148,58	92,30	128,88	135,56	Calcita
61,33	62,45	30,59	59,57	0,00	Calcita; Thenardita
62,27	81,57	0,00	0,00	0,00	Periclásio
64,63	207,00	94,06	121,58	116,16	Calcita
65,56	58,50	59,66	60,04	73,05	Calcita
69,15	19,69	12,29	16,19	23,21	Calcita; Thenardita
70,19	57,13	26,31	29,88	36,85	Calcita
72,81	56,89	26,73	39,26	69,14	Calcita; Thenardita
77,12	54,47	32,53	35,49	39,21	Calcita; Thenardita
78,65	16,31	0,00	0,00	0,00	Periclásio; Thenardita

Composição 10					
Ângulo 2θ	Intensidade (cps)				Fases observadas
	Moldagem	180 d	360 d	720 d	
17,87	84,74	29,69	50,32	0,00	Portlandita
20,82	389,10	375,92	476,63	586,41	Quartzo
23,00	132,09	156,64	133,66	178,70	Calcita
26,61	2303,58	2489,82	3217,47	3442,98	Quartzo
29,35	1754,37	1512,87	1638,78	1847,36	Calcita
30,89	132,11	95,04	72,21	83,76	Dolomita
34,14	122,61	41,05	62,99	0,00	Portlandita
35,92	158,75	163,67	132,66	204,28	Calcita
36,51	150,16	209,08	273,30	243,53	Calcita
39,39	360,66	349,14	439,00	451,20	Quartzo; Calcita
40,23	97,50	77,62	94,86	176,70	Quartzo
42,42	117,02	159,08	118,88	273,59	Quartzo
42,84	317,81	0,00	0,00	0,00	Periclásio
43,14	231,07	187,78	195,94	247,45	Calcita
45,76	172,41	91,09	179,51	99,50	Quartzo; Dolomita
47,46	285,14	190,99	203,07	261,16	Calcita
48,46	267,60	184,77	188,24	272,07	Calcita
50,10	496,80	617,12	282,07	497,47	Quartzo; Dolomita
50,25	200,56	265,34	114,54	242,76	Quartzo
54,84	102,60	73,77	27,64	113,32	Quartzo
56,55	27,54	25,35	77,90	35,32	Calcita
57,35	88,11	85,39	282,86	100,82	Quartzo; Calcita
59,93	244,16	216,83	139,57	245,35	Quartzo
60,62	50,33	44,88	50,04	64,72	Quartzo
62,25	149,57	22,05	27,67	0,00	Periclásio; Portlandita
64,03	52,96	45,39	23,71	22,04	Calcita
65,57	36,85	18,59	21,84	0,00	Quartzo; Calcita
67,71	240,69	164,12	203,95	163,18	Quartzo
68,30	185,25	179,25	153,10	170,20	Quartzo
73,51	22,41	81,41	47,71	0,00	Quartzo; Calcita
74,64	14,29	0,00	0,00	0,00	Periclásio
75,63	161,11	34,58	85,79	72,54	Quartzo
77,62	33,43	18,24	64,08	66,71	Quartzo
78,61	29,37	0,00	0,00	0,00	Periclásio

Composição 21					
Ângulo 2θ	Intensidade (cps)				Fases observadas
	Moldagem	180 d	360 d	720 d	
17,93	88,92	27,50	71,96	0,00	Portlandita
20,78	349,21	277,43	453,23	348,68	Quartzo
21,92	0,00	0,00	0,00	202,30	Cristobalita
23,01	173,84	48,52	141,80	188,30	Calcita
26,61	2801,29	1907,32	2688,86	2661,66	Quartzo
29,38	1742,45	1218,15	1529,21	2013,52	Calcita
30,93	82,38	28,97	88,24	44,42	Calcita
34,07	102,36	29,35	0,00	0,00	Portlandita
35,92	188,70	130,22	154,92	189,75	Calcita; Cristobalita
36,51	256,42	554,78	146,34	221,78	Quartzo
39,46	342,62	341,40	327,64	348,24	Quartzo; Calcita
40,27	191,66	96,23	67,42	68,78	Quartzo
43,18	208,93	213,37	193,33	277,24	Calcita; Cristobalita
45,76	104,06	122,66	69,62	100,07	Quartzo
47,05	107,29	0,00	0,00	0,00	Portlandita
47,43	320,30	233,52	206,79	271,36	Calcita
48,47	330,02	215,45	188,22	274,23	Calcita; Cristobalita
50,14	301,27	262,10	239,90	563,18	Quartzo
54,06	0,00	0,00	0,00	8,16	Cristobalita
54,84	93,81	112,34	72,73	165,11	Quartzo
56,56	29,08	21,66	26,19	39,14	Calcita
57,35	95,85	67,85	67,19	109,93	Calcita
59,91	197,53	282,41	157,19	196,07	Quartzo; Calcita; Cristobalita
60,61	56,21	56,26	42,58	64,15	Calcita
62,22	118,71	22,00	43,49	0,00	Portlandita
64,64	48,58	61,52	43,68	55,97	Calcita
65,61	39,18	19,53	25,23	38,90	Quartzo; Calcita
67,73	174,67	109,88	118,45	111,64	Quartzo; Cristobalita
68,11	177,67	143,82	177,04	181,18	Quartzo
68,31	138,33	133,83	186,95	189,52	Quartzo; Cristobalita
71,60	17,12	0,00	0,00	0,00	Portlandita
75,63	38,50	31,03	41,72	50,54	Quartzo
77,64	30,71	248,81	15,73	78,49	Quartzo
78,66	19,04	122,16	52,08	6,08	Quartzo

APÊNDICE D - Resistência à compressão dos compósitos

