

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ISABEL CRISTINA MAGRO

**COMPORTAMENTO DO CIMENTO SUPERSULFATADO (CSS) EXPOSTO À
CARBONATAÇÃO ACELERADA**

PATO BRANCO

2021

ISABEL CRISTINA MAGRO

COMPORTAMENTO DO CIMENTO SUPERSULFATADO (CSS) EXPOSTO À
CARBONATAÇÃO ACELERADA

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação do Curso de Engenharia Civil
do Departamento de Construção Civil da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná – Campus Pato Branco como
requisito parcial para obtenção do Título de
Engenharia Civil

Orientador: Dra. Caroline Angulski da Luz

PATO BRANCO

2021

TERMO DE APROVAÇÃO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC
COMPORTAMENTO DO CIMENTO SUPERSULFATADO (CSS) EXPOSTO À CARBONATAÇÃO ACELERADA

Por

ISABEL CRISTINA MAGRO

Monografia apresentada 16, de AGOSTO de 2021, às 10h20min, no Campus PATO BRANCO da UTFPR, como requisito parcial, para conclusão do Curso de ENGENHARIA CIVIL da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. A candidato foi arguida pela Banca Examinadora composta pelas professoras abaixo assinadas. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.

Banca examinadora:

Me. CLÁUDIA R BERNARDI BALDIN	Membro
Me. PRISCILA ONGARATTO TRENTIN	Membro
Profª. Drª. CAROLINE ANGULSKI LUZ	Orientador
Profª. Drª. ELIZÂNGELA MARCELO SILIPRANDI	Professor(a) responsável TCCII



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **CAROLINE ANGULSKI DA LUZ, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em (at) 19/08/2021, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasília-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **CLAUDIA REGINA BERNARDI BALDIN, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em (at) 19/08/2021, às 14:46, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasília-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **Priscila Ongaratto Trentin, Usuário Externo**, em (at) 23/08/2021, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasília-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por (Document electronically signed by) **ELIZANGELA MARCELO SILIPRANDI, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em (at) 23/08/2021, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília (according to official Brasília-Brazil time), com fundamento no (with legal based on) art. 4º, § 3º, do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site (The authenticity of this document can be checked on the website) https://sei.utfpr.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orcao_acesso_externo=0, informando o código verificador (informing the verification code) **2172979** e o código CRC (and the CRC code) **494F7218**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter guiado cada passo da minha vida para chegar até aqui hoje.

Aos meus pais, Ademir e Rosilene, por serem meus exemplos e por sempre me proporcionar os melhores acessos aos estudos e me incentivar nas minhas escolhas.

Ao meu esposo Bruno, por ter estado sempre ao meu lado em cada momento, por cada conversa, cada conselho, cada palavra de motivação e apoio.

A minha irmã Valéria, por ser sempre ótima companheira e por dividir muitas alegrias ao longo de todos esses anos.

Às minhas avós, Erci e Glacir, por todo exemplo de dedicação e amor.

Às minhas amigas Anna Luiza, Camila, Renata e Eduarda, por todos esses 6 anos onde aprendemos muitas coisas juntas e dividimos muitos sorrisos e conquistas.

Aos meus amigos do Laboratório de Materiais e Iniciação Científica, que em todos os dias estiveram comigo trabalhando no desenvolvimento de novos trabalhos e pesquisas, e ajudando a passar os dias com mais leveza.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Caroline Angulski da Luz, por aceitar fazer parte desse momento tão importante da minha vida acadêmica e com sabedoria orientar esse estudo.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil da UTFPR – Pato Branco por toda dedicação em ensinar para a vida profissional e pessoal.

À Central de Análises da UTFPR – Pato Branco, pela realização das análises químicas.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro ao projeto do Edital de 2018.

E a todas as pessoas que de alguma forma estiveram envolvidos com esse trabalho.

Muito Obrigada!

“Pois tu, ó Senhor
abençoas o justo;
o teu favor o
protege como um
escudo”

Salmos 5:12

RESUMO

MAGRO, Isabel Cristina. Comportamento do cimento supersulfatado (CSS) exposto à carbonatação acelerada, 2021. 100 pg. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico da Construção Civil – UTFPR, Pato Branco, 2021.

O cimento supersulfatado (CSS) é um material hidráulico formado por três compostos principais, a escória granulada de alto forno, uma fonte de sulfato de cálcio e um ativador alcalino. Comparado ao cimento Portland (CP), o CSS é um material que, por ser produzido com resíduos de outras indústrias, possui vantagens em questões ambientais e ecológicas. Suas diferentes possibilidades de formulações em relação a quantidade dessa matéria prima empregada, favorece diferentes teores de produtos da matriz cimentícia quando passado pela reação de hidratação. A durabilidade é uma característica necessária para matriz cimentícia, por é ela quem garantirá que as propriedades físicas e químicas se mantenham por mais tempo. A ocorrência da carbonatação nas estruturas de concreto armado reduz a durabilidade do material, pois pode causar despassivação das armaduras e perda de resistência da matriz cimentícia. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo, comparar o comportamento à carbonatação do CSS com o CP IV e, de maneira específica, analisar as diferenças dessa reação em duas formulações diferentes de CSS. Para isso, foram realizados ensaios de resistência à compressão, índice de vazios, medidas de profundidade de carbonatação e análises de microestrutura com difratometria de raios X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). Os resultados de profundidade de carbonatação já em duas semanas de ensaio acelerado mostram que o CSS, em ambas as formulações, sofre a carbonatação mais intensa que o CP IV, chegando a uma frente de carbonatação 5 vezes maior. Entre as formulações de CSS, o CSS 90.10 G obteve resultados finais 8% melhores que o CSS 80.20 G. As análises de resistência à compressão e microestrutura comprovam a perda de resistência com o passar do tempo em ensaio de carbonatação e a decomposição de produtos de hidratação responsáveis pela resistência (etringita e CSH) da matriz em precipitação de carbonatos de cálcio. Demonstrando assim, que o CSS não possui resistência à carbonatação, pois atinge grande profundidade e perde significativamente sua resistência à compressão, que é essencial nas estruturas de concreto existentes, principalmente as que estão em ambientes industriais e centros urbanos.

Palavras Chave: Cimento Supersulfatado. Carbonatação. Durabilidade.

ABSTRACT

MAGRO, Isabel Cristina. Behavior of supersulphated cement (SSC) exposed to accelerated carbonation, 2021. 100 pg. Civil Engineering Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree) – Department of Building Construction, Federal Technological University of Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2021.

Supersulphated cement (SSC) is a hydraulic material made up of three main compounds, granulated blast furnace slag, a source of calcium sulphate and an alkaline activator. Compared to Portland cement (PC), SSC is a material that, as it is produced with waste from other industries, has advantages in environmental and ecological issues. Its different formulation possibilities in relation to the amount of this raw material used, favors different contents of cement matrix products when passed through the hydration reaction. Durability is a necessary characteristic for cementitious matrix, as it will ensure that the physical and chemical properties are maintained for longer. The occurrence of carbonation in reinforced concrete structures reduces the durability of the material, as it can cause passivation of the reinforcement and loss of strength in the cementitious matrix. Thus, this work aims to compare the carbonation behavior of SSC with PC IV, and specifically analyze the differences of this reaction in two different formulations of SSC. For this, tests of compressive strength, void index, carbonation depth measurements and microstructure analyze with X-ray diffraction (DRX) and thermogravimetry (TG/DTG) were carried out. The results of carbonation depth in two accelerated tests show that SSC, in both formulations, undergoes carbonation much more intensely than PC, reaching a carbonation front 5 times greater. Among the SSC formulations, SSC 90.10 G obtained final results 8% higher than SSC 80.20 G. Compressive strength and microstructure analyzes prove the loss of strength over time in carbonation testing and the decomposition of products of hydration responsible for the resistance (ettringite and CSH) of the matrix in calcium carbonate precipitation. Thus, demonstrating that SSC does not have carbonation resistance, as it reaches great depth and significantly loses its compressive strength, which is essential in concrete structures, mainly those in industrial environments and urban centers.

Key Words: Supersulphated cement. Carbonation. Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre tempo de hidratação e quantidade de produtos hidratados	22
Figura 2 – Porcentagens de adições nos tipos de cimento Portland	23
Figura 3 – Relação da diminuição do calor de hidratação quanto às porcentagens de pozolana adicionadas ao cimento.	24
Figura 4 – Quadro comparativo entre composição química de duas escórias disitintas.	27
Figura 5 – Gráfico da quantidade % de escória que reage no CSS de acordo com o tempo de hidratação de CSS diferenciadas pelo módulo de finura utilizados.	28
Figura 6 – Gráfico do desenvolvimento do calor de hidratação de formulações de CSS com diferentes módulos de finura.	28
Figura 7 – Distribuição de etringita (1) e C-S-H (2) na matriz de CSS nas primeiras 4 horas em MEV.	30
Figura 8 – Distribuição de etringita e C-S-H da matriz de CSS depois de 2 dias de hidratação em MEV.	30
Figura 9 – Quantidade das fases hidratadas presentes em função de escória dissolvida.	31
Figura 10 – Representação da frente de carbonatação e a alteração de pH conforme o tempo	33
Figura 11 – Fração de carbonatação das fases hidratadas do CP em função do tempo.	35
Figura 12 - Microestrutura do CSS não carbonatado com 2 anos de idade e formulados com: fator a/c = 0,6 (a) e a/c= 0,3 (b)	37
Figura 13 - Microestrutura de CSS carbonatado, respectivamente com (a) um ano e (b) dois anos sob ação da carbonatação.	37
Figura 14 - Difratogramas de amostras não carbonatadas (referência) e carbonatadas depois de 84 dias de exposição em CO ₂	38
Figura 15 - Fluxograma de fatores que influenciam na carbonatação da matriz cimentícia.	39
Figura 16 – Efeito da umidade relativa na profundidade de carbonatação.	40
Figura 17 - Escória de alto forno já moída.	48

Figura 18 - DRX da escória granulada de alto forno (G: gipsita, P: gesso e S: dióxido de silício).....	48
Figura 19 - DRX do sulfato de cálcio in natura e calcinado a 650°C.....	50
Figura 20 - Gipsita em sua forma anidra (Anidrita) depois do processo de calcinação.	50
Figura 21 - Porção de CP V utilizada como ativador alcalino para as misturas	51
Figura 22 - CP IV separado em porção para a mistura e moldagem das pastas	52
Figura 23 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo de acordo com os limites da NBR 7211.....	53
Figura 24 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo de acordo com os limites na NBR 7211.....	54
Figura 25 - Moldes cúbicos de 3x3x3 cm.	55
Figura 26 - Moldes metálicos nos formatos de 5x10 cm.	56
Figura 27 - Equipamento de ensaios para obtenção da resistência a compressão – EMIC	57
Figura 28 - Amostras no processo de ensaio de índice de vazios.	58
Figura 29 - Amostras de CSS na câmara climatizada após o período de cura úmida.	60
Figura 30 – Amostras de concreto e pasta envoltas em plástico filme na etapa de pré-condicionamento.....	60
Figura 31 - Equipamento utilizado para carbonatação acelerada.	61
Figura 32 – Ilustração da medida de profundidade de carbonatação.....	63
Figura 33 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 2 semanas de exposição à carbonatação acelerada.....	67
Figura 34 - Amostras de pasta com aplicação de fenolftaleína após 2 semanas de exposição à carbonatação acelerada.....	67
Figura 35 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 4 semanas de exposição à carbonatação acelerada.....	68
Figura 36 - Amostras de pasta com aplicação de fenolftaleína após 4 semanas de exposição à carbonatação acelerada.....	68
Figura 37 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 8 semanas de exposição à carbonatação acelerada.....	69
Figura 38 - Amostras de pasta com aplicação de fenolftaleína após 8 semanas de exposição à carbonatação acelerada.....	69

Figura 39 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 12 semanas de exposição à carbonatação acelerada.....	69
Figura 40 - Amostras de pasta com aplicação de fenolftaleína após 12 semanas de exposição à carbonatação acelerada.....	70
Figura 41 - Profundidade de carbonatação dos concretos. Em 0 indicando a idade não carbonatada e as demais idades em carbonatação acelerada em semanas.	71
Figura 42 - Linearização das profundidades de carbonatação acelerada em função do tempo para obtenção dos coeficientes de carbonatação das formulações em estudo.	71
Figura 43 - Resistência à compressão de pastas de CSS e CPIV sob ação da carbonatação acelerada em 2, 4, 8 e 12 semanas de análise.	72
Figura 44 - Resistência à compressão de concretos de CSS e CPIV sob ação da carbonatação acelerada em 2, 4, 8 e 12 semanas de análise.	73
Figura 45 - Difratoograma das pastas de CSS 80.20 G carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas.....	76
Figura 46 - Intensidade de gipsita, calcita e vaterita no CSS 80.20 C em relação ao tempo de carbonatação.....	77
Figura 47 - Difratoograma detalhado do pico de 29° de CSS 80.20 G em 4 semanas de carbonatação (G: gipsita em 29,1° e C: calcita em 29,4°).....	77
Figura 48 - Difratoograma das pastas de CSS 90.10 G carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas.....	78
Figura 49 - Intensidade de calcita, gipsita e vaterita na formulação de CSS 90.10 G em relação ao tempo de carbonatação.	79
Figura 50 - Difratoograma detalhado do pico de 29° de CSS 90.10 G em 8 semanas de carbonatação (G: gipsita em 29,1° e C: calcita em 29,4°).	79
Figura 51 - Difratoograma das pastas de CPIV carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas	80
Figura 52 – Intensidade dos picos de calcita, vaterita, gipsita, CSH e portlandita das pastas de CPIV carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas	81
Figura 53 - Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas de CSS 80.20 G: em 7 dias de cura úmida (Trentin, 2020) e em 2, 4 semanas de carbonatação.....	82
Figura 54 - Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas de CSS 90.10 G em: 7 dias de cura úmida (Trentin, 2020) e em 2, 4 semanas de carbonatação.....	83

Figura 55 - Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas de CSS 90.10 G em 2 e 4 semanas de carbonatação.84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland.....	20
Tabela 2 - Protocolos de testes de carbonatação existentes	43
Tabela 3 – Composição química e caracterização da escória de alto forno	49
Tabela 4 - Composição química da fonte de sulfato de cálcio.	50
Tabela 5 - Composição química do CP V ARI.....	51
Tabela 6 - Composição química do CP IV 32 RS.....	52
Tabela 7 – Quantidade de materiais para pasta em 100g de cimento	55
Tabela 8 - Tabelas de ensaios realizados e respectivas quantidades de amostras para caracterização dos cimentos antes de serem submetidos à carbonatação acelerada.....	57
Tabela 9 - Tabelas de ensaios realizados e respectivas quantidades de amostras para caracterização dos cimentos submetidos à carbonatação acelerada.	59
Tabela 10 - Estimativa da porcentagem de índice de vazios das formulações com valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados obtidos.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11 – Resistência à compressão média de pastas e concretos aos 28 dias de cura em água com cal.	66
Tabela 13 - Resistência à carbonatação residual das pastas e concretos em função do tempo de exposição à carbonatação acelerada.	75
Tabela 14 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo em 28 dias de cura úmida.	91
Tabela 15 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo em 2 semanas de carbonatação acelerada.	92
Tabela 16 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo 4 semanas de carbonatação acelerada.	93
Tabela 17 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo 8 semanas de carbonatação acelerada.	94
Tabela 18 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo 12 semanas de carbonatação acelerada	95
Tabela 19 - Resultados de profundidade de carbonatação para os concretos 2 semanas de carbonatação acelerada.	96

Tabela 20 - Resultados de profundidade de carbonatação para os concretos 4 semanas de carbonatação acelerada.	97
Tabela 21 - Resultados de profundidade de carbonatação para os concretos 8 semanas de carbonatação acelerada.	98
Tabela 22 - Resultados de profundidade de carbonatação para os concretos 12 semanas de carbonatação acelerada.	99

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

A	Al_2O_3
A/C	Fator água/cimento
AFm	Monossulfato
AFt	Etringita
Al_2O_3	Alumina - Óxido de Alumínio
Ar	Aragonita
DRX	Difratometria de raios X
DTG	Termogravimetria derivada
C	Calcita - (CaCO_3)
CaO	Óxido de Cálcio
C_2S	Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
CH	Portlandita - $\text{Ca}(\text{OH})_2$
CO_2	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CP IV RS	Cimento Portland tipo IV, resistente a sulfatos
CP V ARI	Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CSS	Cimento Supersulfatado
E	Etringita - $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_3$
F	Óxido de ferro - (Fe_2O_3)
G	G
H	H_2O
K_2O	Óxido de Pótássio
KOH	Hidróxido de Potássio
K_2CO_3	Carbonato de Potássio
MgO	Óxido de Magnésio
NaOH	Hidróxido de sódio
Na_2CO_3	Carbonato de Sódio

NBR	Norma Brasileira
P	Gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$)
S	Óxido de Silício - SiO_2
Š	Sulgato SO_3
TG	Termogravimetria
TiO_2	Óxido de Titânio
V	Vaterita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	JUSTIFICATIVA	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	CIMENTO PORTLAND	20
2.1.1	Produtos da hidratação do cimento Portland	21
2.1.2	Adições no Cimento Portland	22
2.2	CIMENTO SUPERSULFATADO	24
2.2.1	Materiais componentes e processo de hidratação	25
2.3	CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS	32
2.3.1	Fatores que influenciam o processo de carbonatação	38
2.3.2	Determinação da carbonatação	42
3	METODOLOGIA	46
3.1	MATERIAIS	48
3.1.1	Cimento Supersulfatado (CSS)	48
3.1.2	Cimento Portland – IV 32 RS	51
3.1.3	Agregado miúdo	53
3.1.4	Agregado graúdo	53
3.2	MÉTODOS	54
3.2.1	Definição das formulações e confecções das amostras	54
3.2.2	Caracterização dos cimentos	56
3.2.3	Análise da carbonatação	58
3.2.4	Análises de microestrutura das pastas de cimento	63
4	RESULTADOS	65
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS	65
4.1.1	Índice de Vazios	65
4.1.2	Resistência mecânica de concretos das formulações não carbonatadas	65
4.2	PROFUNDIADE DE CARBONATAÇÃO	66
4.3	RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS MISTURAS CARBONATADAS	72

4.4	ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	75
4.4.1	Difração de Raio-X (DRX).....	75
4.4.2	Análise Térmica (TG/DTG).....	81
5	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS.....	86
	APENDICE A	91
	APENDICE B	96

1 INTRODUÇÃO

O Cimento Supersulfatado (CSS), é um material baseado totalmente nas propriedades hidráulicas da escória de alto forno. Ele é composto de 80 a 85% de escória, somado a 10 ou 15% de sulfato de cálcio e 5% de um ativador alcalino para a mistura. A escória é um subproduto da indústria de produção do ferro gusa, que já é utilizado como adição de substituição parcial do clínquer no CP (Cimento Portland), entretanto, ainda não é utilizada em todo seu potencial na indústria do cimento. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Devido ao grande impacto ambiental do cimento Portland, muito discutido no mundo, o CSS passou a estar novamente em evidência, por possibilitar vantagens, entre elas: a de atenuar a demanda por matérias primas naturais, reduzir até 90% as emissões de CO₂ da indústria cimenteira para a atmosfera e diminuir a quantidade de energia necessária para produzir um material aglomerante. (GRUSKOVNJAK *et al.*, 2008).

Tratando-se da construção civil, outro fator importante que deve ser levado em consideração na hora da aplicação de um material a ser utilizado é a sua durabilidade. A durabilidade do concreto e dos compósitos de cimentos é uma propriedade essencial. Tudo o que é projetado e executado na área da engenharia civil precisa levar em consideração o tempo de vida útil dessas obras. E se os materiais estruturais não forem capazes de suportar algumas condições de possível degradação, diminuirá drasticamente a vida útil tanto funcional como estrutural dessa obra (BRANCO; PAULO; GARRIDO, 2013). Portanto, os estudos de durabilidade nesses novos materiais são extremamente relevantes para seu desenvolvimento.

No tópico de durabilidade dos materiais cimentícios, um tema muito recorrente é a carbonatação desses compostos. Ela é uma reação química que acontece entre o CO₂, presente na atmosfera, e os compósitos da hidratação do cimento, que acaba por reduzir o pH da solução dos poros do concreto e, com isso, pode dar início ao processo de corrosão das armaduras do concreto armado (PAULETTI, 2009).

Diante disso, entende-se também que antes da aplicação em âmbito industrial de novos produtos, precisam, ser compreendidas algumas de suas características através do meio científico, para proporcionar a visão quanto a viabilidade de utilização do mesmo.

O CSS é um material no qual ainda existem muitas questões a serem analisadas quanto ao seu comportamento e durabilidade. Por haver vários questionamentos, os quais iniciam desde a definição da formulação do CSS, faz-se necessário compreender como as possibilidades de composições de escória, sulfato de cálcio e ativador alcalino, influenciam nas características das pastas e concretos, nos produtos de hidratação formados e como eles reagem a situações adversas.

No CSS, os principais produtos da hidratação são a etringita e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Como os teores de escória e sulfato de cálcio são variáveis, dependendo desses teores a formação dos produtos de hidratação são influenciados. Evidenciados por Rubert *et al.*, (2018), quanto menor a disponibilidade de sulfato de cálcio para a reação com a escória, em vez de formar etringita a reação induzirá a formação de C-S-H.

Desse modo, a questão norteadora desse trabalho é quanto a durabilidade do CSS sob a ação da carbonatação; como a composição desse cimento, as proporções de produtos hidratados influência na sua durabilidade.

Sendo assim, esse trabalho passará pelas seguintes etapas: levantamento dos objetivos principais a serem atingidos, sendo eles justificados pelos principais motivos que levaram a essa pesquisa, uma revisão de literatura quanto ao assunto a ser abordado levando em consideração a utilização de um cimento especial, suas principais características de produtos hidratados e durabilidade quanto à carbonatação. Na sequência serão apresentados os materiais necessários para desenvolvimento do trabalho, os métodos de ensaio utilizados, a análise dos resultados de carbonatação obtidos e a conclusão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a durabilidade à carbonatação da matriz cimentícia do cimento supersulfatado.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar a resistência a carbonatação do CSS em relação ao CP IV;
- Comparar o comportamento à carbonatação do CSS em relação aos diferentes teores de sulfato de cálcio na formulação;
- Determinar as taxas de carbonatação de todas as formulações em estudo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Construir com qualidade é um dos grandes objetivos da engenharia civil, e como consequência disso, passa-se a ter a necessidade de empregar materiais que atendam aos requisitos de durabilidade. Conforme a ISO 13823 (2008), durabilidade é a capacidade de uma estrutura ou de seus componentes de satisfazer, com dada manutenção planejada, os requisitos de desempenho do projeto, por um período específico de tempo sob influência das ações ambientais, ou como resultado do processo de envelhecimento natural. Dessa maneira, é possível compreender qual a importância de, no desenvolvimento de novos materiais, aplicar estudo de durabilidade no âmbito das pesquisas científicas. É possível, apenas por meio delas, visualizar toda a capacidade de desempenho desses novos produtos e suas características antes de entrar no mercado e ser produzido em larga escala.

Os elevados teores de CO₂ na atmosfera, nessa pesquisa, influenciam diretamente duas questões importantes desse trabalho. A primeira, no âmbito ambiental, é a contribuição da indústria cimentícia para esses valores, que compreende cerca de 5 a 7% das emissões globais de CO₂ (MEHTA; MONTEIRO; 2014), e tudo isso é resultado da grande proporção entre a quantidade emitida de gás carbônico, que segundo Lima (2010) para cada tonelada de clínquer produzido a quantidade de CO₂ fica em torno de 700 a 1100kg. Só no Brasil, a produção anual do cimento foi, em média., 56 milhões de toneladas nos últimos anos, e em 2014 chegou a produzir cerca de 72 milhões de toneladas de cimento Portland (SNIC, 2019). Por isso, a importância em estudar novos materiais onde é possível prever uma possibilidade de substituição de materiais que degradem em grande proporção o meio ambiente.

A segunda questão relaciona-se com o desencadeamento das reações de carbonatação nos elementos estruturais de concreto armado, é diretamente ligada ao teor de CO_2 e a umidade relativa do ar, presentes no ambiente em que esses elementos estruturais se encontram, acontecendo principalmente em grandes centros urbanos e parques industriais (PERIN; 2013). Em estruturas de concreto armado nesses locais é extremamente importante utilizar um material construtivo, um que possa garantir a durabilidade quanto às reações de carbonatação.

A indústria do cimento já passa por um processo de evolução grande nos últimos anos, a partir do momento que abriu as portas para utilização de adições na composição, diversas possibilidades começaram a surgir, entre elas a adição de escória que no CP pode ser utilizada entre 35 a 70% da composição total do cimento. Portanto, há possibilidades de considerar que essas proporções podem ser aumentadas e evoluir a ponto de chegar aos 80 ou 85% de escória e então abrir espaço para a utilização do CSS no mercado da indústria cimentícia.

Baseado nas pesquisas científicas já realizadas com objetivo de compreender mais das principais características do CSS, como Rubert (2015), Pinto (2019) e Trentin (2020), acredita-se que entender a diferença do processo de carbonatação em diferentes formulações de CSS é um estudo que virá para complementar a sequência de pesquisas que já tem sido realizada nos últimos anos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo irá abordar brevemente conhecimentos e conceitos da área acadêmica de materiais de construção focado especialmente nos materiais cimentícios, Cimento Portland (CP) e Cimento Supersulfatado (CSS), suas características quanto composição, produtos hidratados e como acontece o processo de carbonatação na matriz cimentícia desses dois materiais.

Para fins de facilitar a compreensão das fórmulas químicas, o estudo da área de materiais cimentícios utiliza das siglas e abreviações presentes na página 13.

2.1 CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland (CP) é um aglomerante hidráulico, ou seja, possui a capacidade de endurecer pela ação exclusiva da água através de um processo conhecido como hidratação e foi patenteado por Joseph Aspadin em 1824. É um material que tem como matéria-prima o calcário (CaO) e a argila (que contém sílica - SiO₂, alumina - Al₂O₃ e óxido de ferro - Fe₂O₃) que passam pelo processo de clinquerização, com etapas de moagem, mistura e queima em fornos rotativos em até 1500°C, e ao final é moído novamente com adição da gipsita (CaSO₄) na mistura, resultando em um material em pó bem fino, comercializado em grande escala no mundo todo (NEVILLE; BROOKS, 2013)

Desse processo produtivo os principais constituintes do clínquer produzido para o cimento Portland podem ser visualizados na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland

Nome Do Composto	Abreviatura	Composição
Silicato tricálcico	C ₃ S	3CaO.SiO ₂
Silicato dicálcico	C ₂ S	2CaO.SiO ₂
Aluminato tricálcico	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃
Ferroaluminato tetracálcico	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃

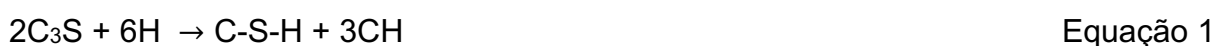
Fonte: Neville e Brooks (2013)

A gipsita adicionada a mistura tem como função principal controlar as reações iniciais da hidratação e prevenir que ocorra a pega imediata (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

2.1.1 Produtos da hidratação do cimento Portland

Na mistura com a água, o processo de hidratação se inicia, e resulta em compostos hidratados que produzem uma massa sólida e resistente. Os principais produtos da reação de hidratação do cimento Portland podem ser divididos em dois grupos: os hidratados dos silicatos e os hidratados dos aluminatos (MEHTA; MONTEIRO; 2014).

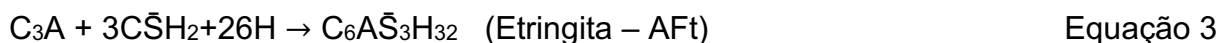
Segundo Neville e Brooks (2013), os silicatos, presentes em maior quantidade do CP, são os responsáveis pelo ganho de resistência do cimento no processo de hidratação, sendo que, o C_3S contribui para isso durante as primeiras quatro semanas, enquanto o C_2S influencia no ganho de resistência posterior. Os principais produtos dessa hidratação são: silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a portlandita (CH). As reações de hidratação dos respectivos silicatos, estão apresentadas nas Equações 1 e 2.



Do ponto de vista da durabilidade à ataques químicos, alguns tipos de cimento se atentam para os limites máximos de C_3S na composição, ou optam por utilização de adições pozolânicas a fim de reduzir a quantidade de portlandita na hidratação da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014), tendo em vista, principalmente, a carbonatação de matrizes cimentícias que será abordado no item 2.3 deste capítulo.

Se não fosse a adição de gipsita ao final do processo produtivo do CP, a reação do C_3A com a água seria instantânea e resultaria a pega imediata, por esse motivo, o que passa interessar na reação de hidratação desse composto não é apenas com a água, mas sim, o produto formado dessa reação conjunta com o sulfato de cálcio (MEHTA; MONTEIRO; 2014). Por esse motivo também é que os produtos dessa reação são os primeiros a surgir no processo de hidratação do CP, e os produtos de

hidratação do C_4AF , na presença de sulfato de cálcio são estruturalmente semelhantes aos de C_3A , então apresenta-se apenas as Equações de reação de C_3A .



O principal produto dessa reação é a etringita (Equação 3), que acontece de forma rápida ainda nas primeiras horas do processo de hidratação, quando ainda se apresentam elevados teores de sulfato disponível na mistura. A partir do momento que essa taxa de sulfato começa a diminuir, e ainda existem íons de aluminato na solução, a etringita se torna instável e passa a fazer parte do equilíbrio químico, sendo assim o principal produto dessa reação passa a ser o monossulfato (Equação 4) que acontece de forma mais lenta.

Na Figura 1, é possível visualizar como é a relação de quantidade de compostos formados na hidratação do CP com o passar do tempo.

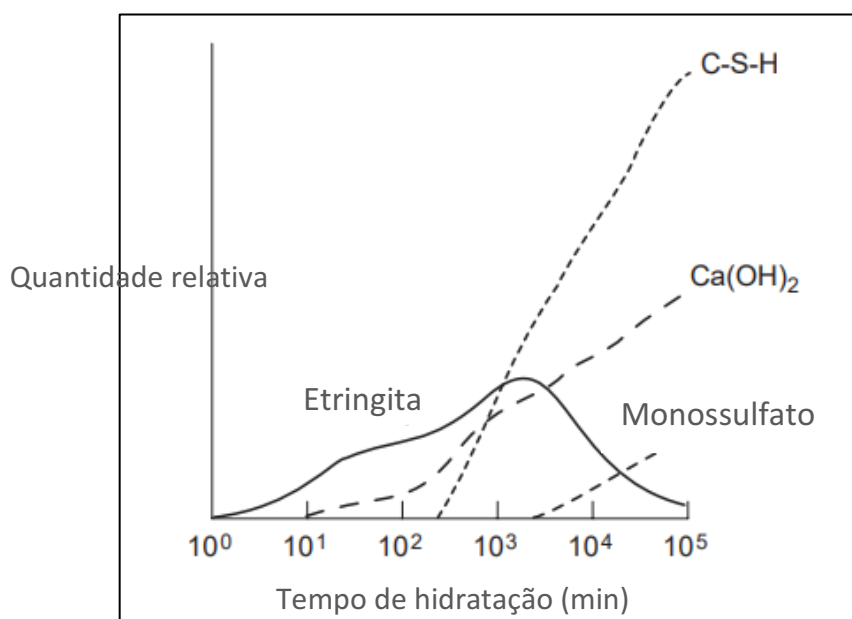


Figura 1 – Relação entre tempo de hidratação e quantidade de produtos hidratados
Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014

2.1.2 Adições no Cimento Portland

Segunda a ABCP (2002), as adições são matérias primas que podem atuar como substitutas parciais do clínquer no cimento e são adicionadas a ele na etapa da

moagem. Elas são capazes de melhorar algumas características do concreto e também como consequência ajudam a diminuir as emissões de gases poluentes do processo produtivo do cimento.

No cimento Portland, as adições utilizadas são: material carbonático, escória granulada de alto forno e materiais pozolânicos. Como é possível ver na Figura 2 os tipos de cimento Portland são classificados de acordo com qual adição está inclusa e o seu teor em porcentagem presente na mistura.

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	25, 32 ou 40		75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural	–	–	50 – 74	–	–	26 – 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Figura 2 – Porcentagens de adições nos tipos de cimento Portland
Fonte: NBR 16697:2018

O material carbonático, também conhecido como filler calcário, como adição do CP II - F serve para dar mais trabalhabilidade aos concretos e argamassas pois as suas partículas possuem dimensões adequadas para se alojar entre os grão e partículas do cimento, funcionando como um lubrificante para a mistura (ABCP, 2002).

Já a escória granulada de alto forno é um material subproduto da produção do ferro gusa que contém em sua composição CaO, SiO₂ e Al₂O₃, ou seja, mesmos compostos necessários para obtenção do clínquer. Utilizada nos tipos CP II – E e CP III, ela é capaz de proporcionar ao cimento uma redução do calor de hidratação e

melhora quanto a resistência à ataques químicos, por apresentar teores reduzidos de C_3A da composição (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo a NBR 16 697 (ABNT 2018), as adições pozolânicas são materiais silicosos ou silicoaluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade hidráulica, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio (CH) a temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentícias (C-S-H). Os tipos de cimento com adições pozolânicas são CP II – Z e CP IV e os exemplos de materiais pozolânicos são, cinza da casca de arroz, sílica ativa, argila calcinada e metacaulim. Elas ajudam na redução do calor de hidratação do cimento (Figura 3), aumentam a durabilidade em ambientes agressivos e confere maior impermeabilidade a concretos e argamassas (ABCP, 2002).

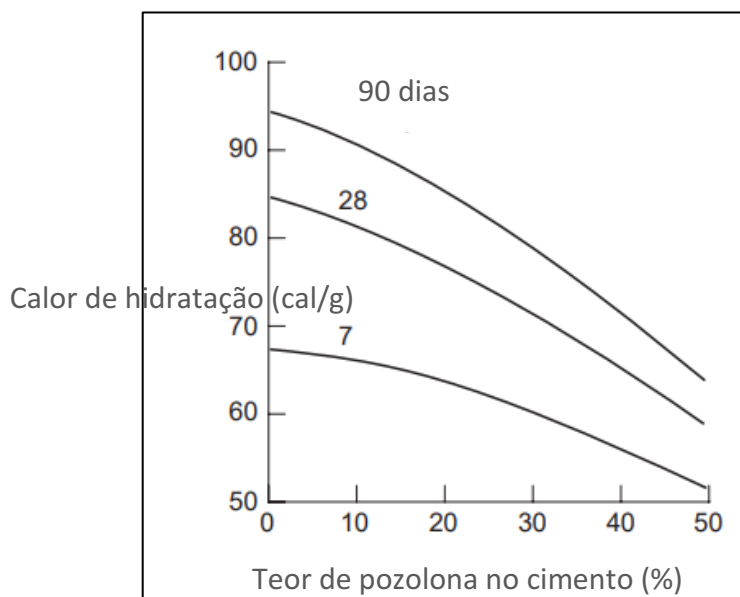


Figura 3 – Relação da diminuição do calor de hidratação quanto às porcentagens de pozolona adicionadas ao cimento.

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014

2.2 CIMENTO SUPERSULFATADO

O Cimento Supersulfatado (CSS) é um aglomerante hidráulico, categorizado como cimento especial, que apresenta mínima, ou nenhuma, presença de clínquer em sua composição. Foi descoberto em 1909 por Hans Kühl quando se tornou conhecida a propriedade de ativação da escória granulada de alto forno por meio de sulfato de cálcio e um ativador alcalino. No período da Segunda Guerra Mundial, em meados de

1940 e 1960, quando houve escassez de matéria prima para produção do clínquer para o CP, países como Alemanha e Reino Unido padronizaram essa produção de CSS. Entretanto, mais tarde, algumas mudanças foram realizadas na produção do ferro, e os teores de compostos como alumina (Al_2O_3) das escórias não atendia mais ao mínimo de 13% solicitado pela antiga norma alemã DIN 4210. A escória passou então, a ser utilizada apenas em combinação com o CP, o que resultou em dois tipos distintos de CP com adições de escória, o CP III e CP II - E (JUENGER *et al.*, 2011).

Atualmente a norma europeia EN 15743:2010 é a que regulamenta a composição, as especificações e os critérios de conformidade do CSS. Essa normativa determina que para composição do CSS, ele deve apresentar teores acima de 75% de escória granulada de alto forno, entre 5 e 20% de uma fonte de sulfato de cálcio e no máximo 5% de um ativador alcalino. Ela não impõe limites mínimos de alumina nas escórias como a antiga norma alemã DIN 4210, mas como exigência para possibilidade de produção do CSS impõe que:

- A soma dos teores dos principais óxidos da escória ($CaO+MgO+SiO_2$) seja $\geq 66,7\%$;
- A relação $(CaO+MgO)/SiO_2$ seja $> 1,0$.

Hoje, já aplicado em escala industrial em alguns países na Europa, o CSS proporciona soluções de alta qualidade do concreto, muitas vezes necessárias e não alcançadas pelo CP, entre elas pode-se citar: a boa resistência a sulfatos, baixos valores de permeabilidade, baixa penetração de cloretos, baixo calor de hidratação e alta resistência a reações álcali-agregado (WOLTRON, 2009). Apesar disso, se a etapa de cura não for suficiente, poderá levar a ocorrência da carbonatação da pasta do cimento, devido a decomposição da etringita, e ocasionará em um forte aumento da porosidade capilar (JUNGER *et al.*, 2011).

2.2.1 Materiais componentes e processo de hidratação

A escória é um resíduo da produção do ferro gusa, obtida após a liquefação de todos os materiais sólidos no alto forno. Estando no estado líquido, ela se acumula totalmente sobre o ferro gusa, por possuir menor densidade, facilitando assim a separação entre esses dois produtos. Sua composição vem dos silicatos, carbonatos

e aluminatos de todo minério utilizado na fabricação do ferro gusa, que pode variar de acordo com a fonte de minério utilizada, mas resulta de forma geral em teores de SiO_2 entre 30 a 40 %, Al_2O_3 entre 5 a 15 %, CaO entre 35 a 45 %, MgO entre 5 a 15 % (ISENMANN, 2013).

Para que a escória possa ter atividade hidráulica, é preciso que esteja em estado vítreo, obtido através do resfriamento rápido de 1500°C para 200°C por meio de jatos de água que a transforma em pequenos grãos, chamada então de escória granulada de alto forno (ARCELLORMITAL, 2015)

Segundo Gruskovnjak *et al.* (2008), a possibilidade de a escória ser utilizada para a produção de materiais cimentícios depende primariamente da sua reatividade, que possui como fator principal de influência a composição química e estrutural do grão vítreo formado. Maiores proporções de Al_2O_3 e CaO podem acelerar o processo de hidratação e resultar em maior resistência nas idades iniciais.

Como o processo de produção do ferro gusa é variável em relação a quantidade de matéria prima adicionadas no processo, pode ocorrer diferentes composições para escória. Como mostra a Figura 4, de estudos realizados por Angulski e Hooton (2015) sobre a influência da temperatura de cura de pastas de CSS com 10% de sulfato de cálcio, as diferentes composições de óxidos em porcentagem de uma escória A e uma escória B. Nesse estudo, as pastas da escória B, que possui um teor de alumina (Al_2O_3) de 13,74%, apresentaram os maiores resultados de resistência a compressão em todas as temperaturas de cura diferentes.

Óxidos	Escória A	Escória B	EN 15743
SiO ₂	39.37	32.56	-
Al ₂ O ₃	8.15	13.74	-
Fe ₂ O ₃			
CaO	38.90	42.27	-
MgO	11.08	6.04	-
SO ₃	2.63 ^a	2.00 ^a	-
Na ₂ O	0.29	0.19	-
K ₂ O	0.35	0.31	-
P ₂ O ₅	0.01	0.03	-
TiO ₂	0.35	0.59	-
Mn ₂ O ₃	0.57	0.30	-
CaO + MgO + SiO ₂	89.4	80.9	≥66.7
Free lime (CaO + MgO)/SiO ₂	1.3	1.5	≥1.0

**Figura 4 – Quadro comparativo entre composição química de duas escórias distintas.
Fonte: Angulski da Luz e Hooton (2015)**

Hooton e Massoudi (2019), concluíram em seus estudos que a composição da escória, somada ao seu índice de finura (superfície específica) dos grãos, possuem grandes impactos no desenvolvimento de resistência mecânica das formulações. Comparando escórias com diferentes módulos de finura no período de 1 a 3 dias de idade, obtiveram resultados de maior taxa de ganho de resistência com a formulação de escória com maior área superficial. Matschei, Bellmann e Stark (2005), também obtiveram resultados que mostram a influência do grau de finura do cimento na resistência mecânica adquirida pela pasta, quanto maior foi o módulo de Blaine da escória, maior resistência adquirida, como mostra a Figura 5.

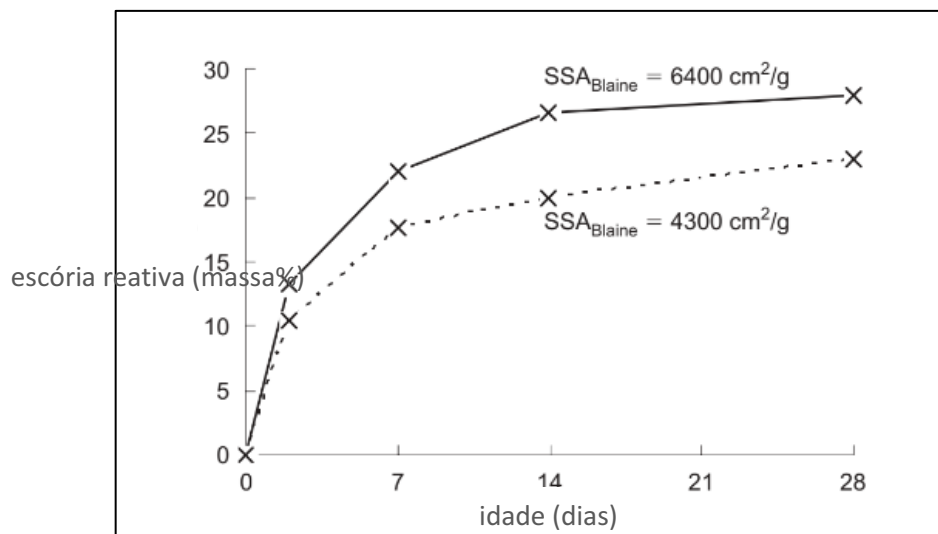


Figura 5 – Gráfico da quantidade % de escória que reage no CSS de acordo com o tempo de hidratação de CSS diferenciadas pelo índice de finura utilizados.
Fonte: Matschei, Bellmann e Stark(2005)

Conforme maior for a superfície específica do cimento, mais rapidamente se iniciará a reação de hidratação e também maior a quantidade de calor liberado nesse processo, mas esse calor de hidratação é muito inferior comparado com os valores liberados na hidratação do CP (LIU *et al.*, 2015). Na Figura 6 mostra todo o desenvolvimento do calor de hidratação com o decorrer do tempo para as formulações de CSS com diferentes índices de finura SSC1 com 335m²/kg, SSC2 com 445m²/kg e SSC3 com 518m²/kg.

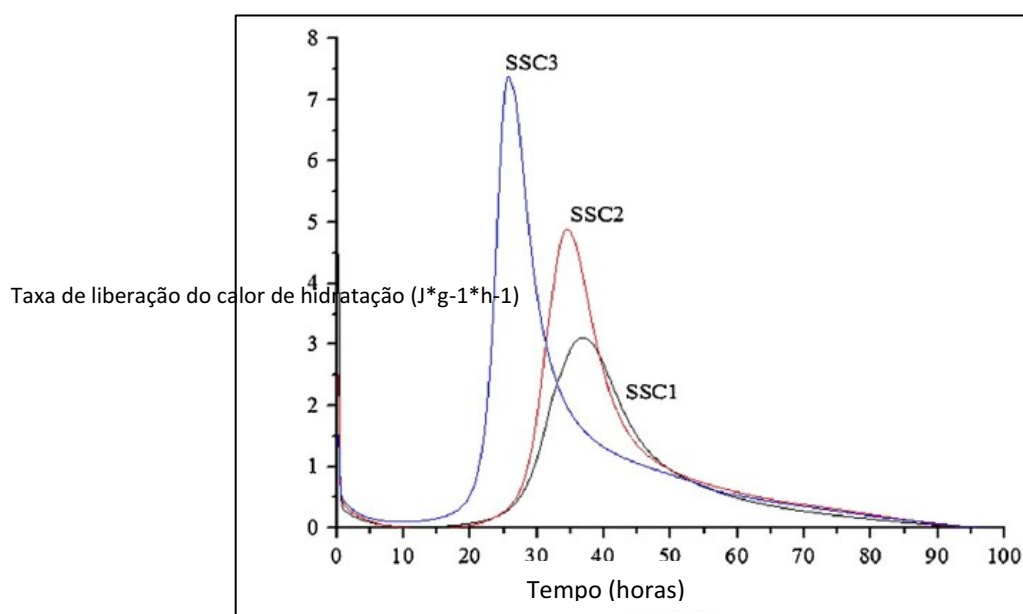


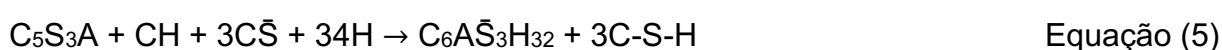
Figura 6 – Gráfico do desenvolvimento do calor de hidratação de formulações de CSS com diferentes índices finura.
Fonte: Liu *et al.*, (2015)

A quantidade de alumina (Al_2O_3) é tão importante como a quantidade de sulfato de cálcio (CaSO_4) utilizada na formulação do CSS, pois é da reação entre eles que se origina a etringita como produto da hidratação do cimento supersulfatado, responsável pelo desenvolvimento de resistência nas primeiras idades (MASSOUDI; HOOTON, 2019).

Segundo Bijen e Niël (1981) para formulação do CSS, as fontes de sulfato de cálcio (CaSO_4) podem ser: a anidrita, que é conhecida como matéria prima da indústria de fertilizantes, ou o fosfogesso, que é um resíduo do processo da fabricação de fertilizantes fosfatados.

Para que o CSS possa reagir com a água, é requerido um ambiente alcalino, por esse motivo adiciona-se um ativador na mistura. Como ativador alcalino pode ser utilizado KOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou até mesmo o CP, que é o mais utilizado para proporcionar essa alcalinidade ao ambiente de hidratação do CSS (JUNGER *et al.*, 2011).

A hidratação do CSS se inicia quando, adicionada água (H) à mistura, a porção de CP utilizada como ativador alcalino proporciona CH para o meio e promove a dissolução dos grãos de escória ($\text{C}_5\text{S}_3\text{A}$) em íons de cálcio (Ca^{+2}), sílica (Si^{+2}) e alumínio (Al^{+2}) que, ao reagirem com o $\text{C}\bar{\text{S}}$, darão origem aos principais produtos de hidratação do CSS, etringita ($\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$) e C-S-H, segundo a simplificação na Equação 5. Além dessas fases hidratadas ainda podem ocorrer a formação de hidrotalcita ($\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}.4\text{H}_2\text{O}$) e gipsita ($\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$) (GRUSKOVNJAK *et al.*, 2008).



Ambos produtos são responsáveis pelo desenvolvimento de resistência mecânica da pasta, a etringita nas primeiras idades (até 7 dias) e o silicato de cálcio em idades tardias (MASSOUDI; HOOTON, 2019; DUTTA; BORTHAKUR, 1990).

Segundo Grounds *et al.*, (2003) o produto inicial dessa reação é a etringita, que é formada quase que imediatamente e finaliza em até 7 dias. O silicato de cálcio hidratado começa a ser detectado depois de 2 ou 3 dias e cresce progressivamente, de acordo com o processo de hidratação.

Nos estudos de Matschei, Bellmann e Stark (2005) através de análises de MEV (microscopia eletrônica de varredura) é possível perceber a estrutura da etringita e do C-S-H formados nas primeiras horas de hidratação, na Figura 7, onde a etringita se apresenta em muito mais quantidade que o C-S-H, porque a sua formação se inicia

desde os primeiros minutos de hidratação, quando que o C-S-H, passa a surgir depois de algumas horas.

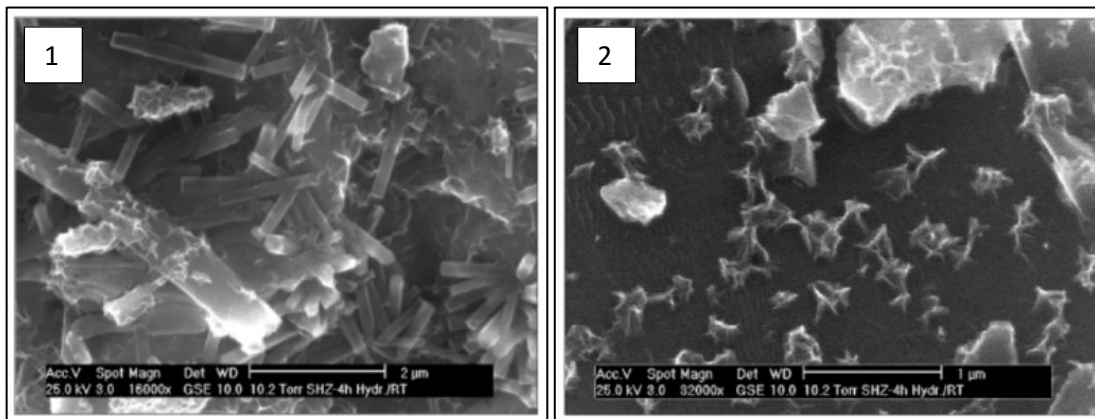


Figura 7 – Distribuição de etringita (1) e C-S-H (2) na matriz de CSS nas primeiras 4 horas em MEV

Fonte: Matschei, Bellmann e Stark (2005)

Após dois dias de hidratação passa ser possível perceber uma densa matriz formada, a etringita toda envolta pelo C-S-H (Figura 8), indicando que o principal desenvolvimento da etringita já tem terminado e o desenvolvimento do silicato de cálcio está começando e continuará crescendo até idades tardias (MATSCHEI; BELLMAN; STARK, 2005).

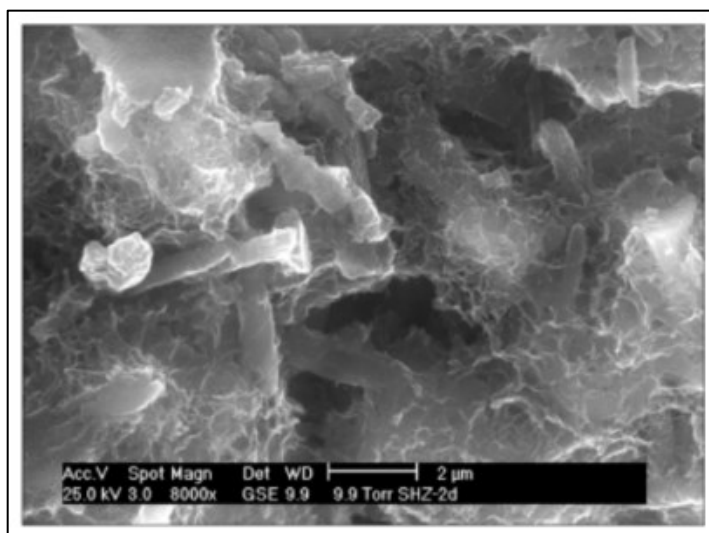


Figura 8 – Distribuição de etringita e C-S-H da matriz de CSS depois de 2 dias de hidratação em MEV.

FONTE: Matschei, Bellmann e Strak (2005)

Segundo Gruskovnjak *et al.*, (2008), a quantidade de fases formadas na hidratação aumenta conforme maior consumo da escória, e à medida que são gerados os produtos da hidratação e incorporada água a essas fases, a solução dos poros diminui. Na Figura 9 é apresentada em forma de gráfico o consumo da escória conforme a quantidade de produtos da hidratação formados.

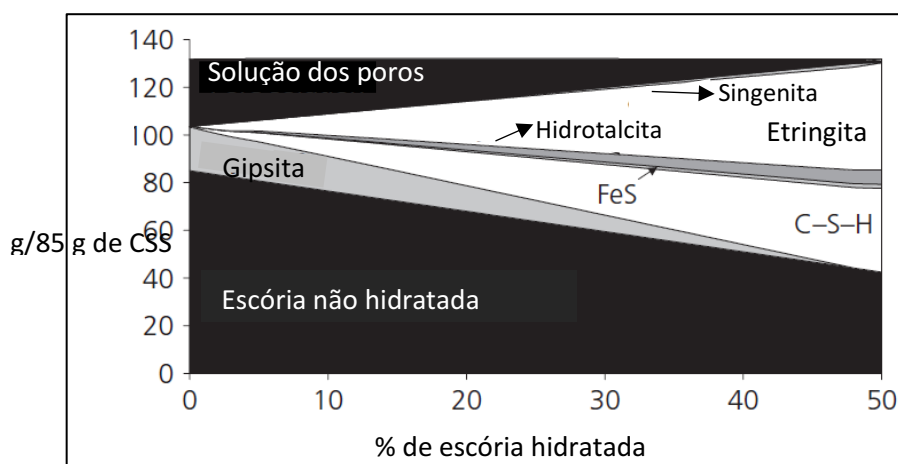


Figura 9 – Quantidade das fases hidratadas presentes em função de escória dissolvida
 Fonte: Gruskovnjak *et al.*, (2011)

Erdem e Ölmez (1993), que realizaram estudo referentes as propriedades mecânicas de diferentes formulações de CSS, com o fosfogesso como fonte de sulfato de cálcio em teores de 10 a 18% e CP como ativador alcalino com teores de 2 e 5 %, concluíram que a redução dos teores do ativador resulta em queda drástica dos valores de resistência, pois a concentração deles não é suficiente para acelerar as reações. Para os autores a formulação ideal de CSS nos estudos foi a com 85% de escória, 15% de sulfato de cálcio e 5% de CP como ativador alcalino.

Em estudos de mecanismos de hidratação do CSS, Rubert *et al.*, (2018) verificam que, as variações de teores de sulfato de cálcio e de quantidade de ativador alcalino influenciam na formação de C-S-H na matriz. De todas as formulações de CSS estudadas, com 10, 15 e 20% de sulfato de cálcio e cada uma delas com teores de 0,2, 0,5 e 0,8% de KOH como ativador alcalino, foi possível observar a presença de C-S-H em todas as formulações com 10% de sulfato de cálcio e apenas nas formulações com 15 e 20% com 0,2% de ativador KOH. Assim, concluíram que a baixa disponibilidade de sulfato para reagir ou baixo teor de ativador alcalino com a escória induz a uma reação que forma C-S-H em vez de etringita.

Segundo Gracioli *et al.*, (2020) o processo de hidratação do CSS é influenciado pela quantidade de ativador alcalino, pela quantidade de sulfato de cálcio e pela temperatura de calcinação da fonte de sulfato de cálcio. Com formulações de CSS, com 10 e 20% de fosfogesso como fonte de sulfato de cálcio e calcinadas em 350°C e 650°C, chegaram à conclusão de que em CSS com escórias que possuem baixo teores de alumina: a menor temperatura de calcinação do sulfato de cálcio aumenta a cinéticas das reações de hidratação e a menor quantidade de fosfogesso (10%) previne a formação de gipsita secundária. Também verificaram que elevadas quantidades de fosfogesso (20%) na formulação intensifica a formação de gipsita secundária na hidratação, o que acaba por ser prejudicial para a resistência a compressão.

Angulski e Hooton (2019) estudaram a influência da composição no processo de hidratação do CSS variando: escórias com baixo e alto teor de alumina, teores de sulfato de cálcio, teores 2, 5 e 8% de ativador alcalino e fator água/cimento igual a 0,4 e 1. Nas variações dos teores de ativador entre 2, 5 e 8%, para as escórias de baixo teor de alumina os resultados aumentam conforme aumenta o teor de ativador, mas não passam de 20MPa. Já para as escórias de maior teor de alumina os resultados de resistência decrescem conforme aumenta o teor do ativador, podendo variar de 60 para 20 MPa. Para escória com alto teor de alumina foi verificado que o fator água/cimento menor inibe a formação da etringita e promove a formação de gipsita.

2.3 CARBONATAÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS

A carbonatação da matriz cimentícia acontece quando o dióxido de carbono presente na atmosfera (CO_2) se dissolve em meio a solução dos poros da pasta de cimento e produz os íons CO_3^{2-} , que reagem com os íons Ca^{+2} dos compostos hidratados do cimento, produz $CaCO_3$ (TAYLOR, 1990; HOUST; WITTMANN, 2002; POSSAN, 2010). Essa reação pode afetar com grande intensidade a durabilidade ao longo prazo das estruturas de concreto na construção civil, sendo considerada um dos processos de degradação mais nocivos (NEDELIJKOVIC *et al.*, 2018).

De acordo com Neville e Brooks (2013), a carbonatação acontece da superfície para o interior e é extremamente lenta. Ela neutraliza a natureza alcalina do meio, ou seja, diminui o pH da pasta de cimento hidratada, prejudicando assim a

proteção das armaduras no concreto armado, como pode ser visualizado na Figura 10. E como consequência disso, se a profundidade de carbonatação do concreto ultrapassar a espessura do cobrimento da armadura nas estruturas, haverá o ingresso de CO₂ e umidade e iniciará o processo de corrosão das mesmas. Essa corrosão causa ao concreto manifestações de expansão, fissuração e lascamento do cobrimento (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

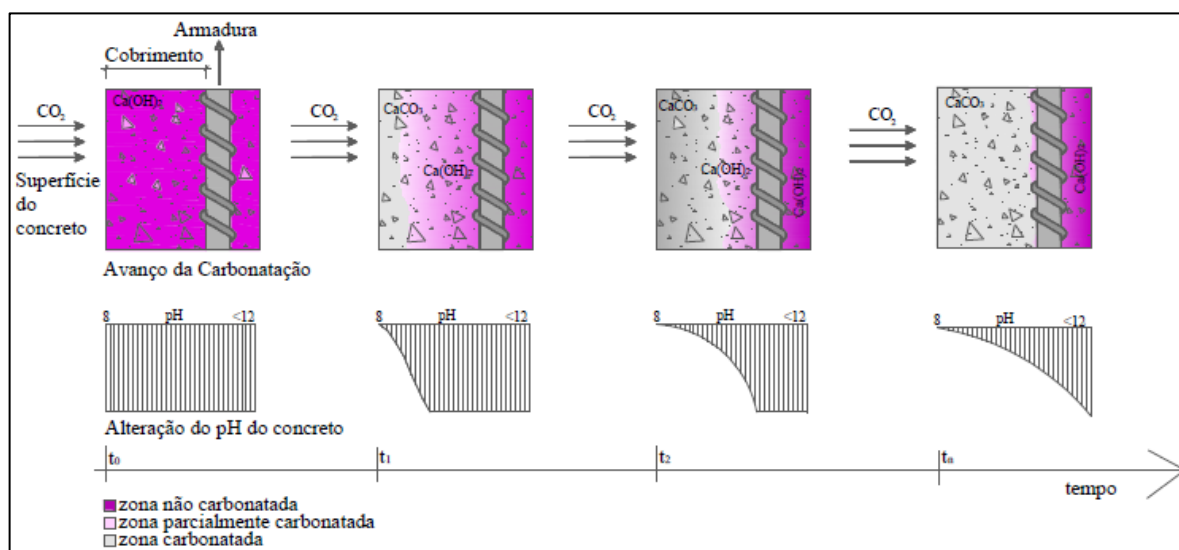
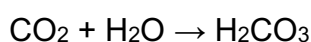


Figura 10 – Representação da frente de carbonatação e a alteração de pH conforme o tempo
Fonte: Possan (2010)

Segundo Castellote *et al.* (2008), a carbonatação da matriz cimentícia é considerada um sistema de reação heterogêneo em que as diferentes fases sólidas existentes reagem paralelamente com o gás dióxido de carbono. Ela altera a natureza dos compostos hidratados de básica para ácida, por transformá-los em sais ao reagirem com o ácido carbônico (H₂CO₃) proveniente na primeira reação que acontece nos poros da matriz, a dissolução do CO₂ na água dos poros, conforme Equação 6 (CADORE, 2018). Isso resulta em uma carbonatação dos compostos hidratados em etapas, devido a reação indireta deles com o CO₂ através do ácido carbônico. (PAULETTI, 2009).



Equação (6)

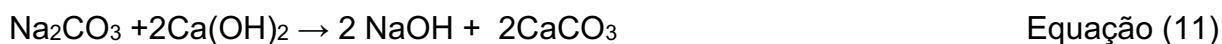
No CP a principal reação de carbonatação consiste na carbonatação da portlandita, visto que é o composto hidratado em maior quantidade presente na pasta

de cimento. Então, o ácido carbônico, ao reagir com a portlandita, da origem ao carbonato de cálcio na pasta de cimento, conforme Equação 7 (HOPPE FILHO, 2008).



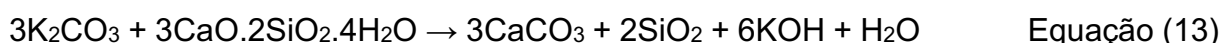
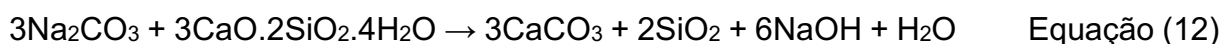
Mas como também existem outros hidróxidos na pasta de CP, esse ácido carbônico também reage com KOH e NaOH, presentes na pasta, formando carbonato de potássio (K_2CO_3) e carbonato de sódio (Na_2CO_3), demonstradas nas Equações 8 e 9.

Entretanto, como são menos estáveis que o carbonato de cálcio (CaCO_3), reagem novamente com o hidróxido de cálcio, reação chamada de realcalinização, que forma como produto o CaCO_3 e os hidróxidos KOH e NaOH, respectivamente (Equações 10 e 11)

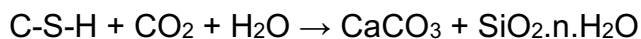


Dessa maneira, o ciclo de consumo de portlandita segue até que ela já não esteja mais disponível na matriz (HOUST; WITTMANN, 2002).

De acordo com Houst e Wittmann (2002), o C-S-H reage com íons carbonato, conforme as Equações 12 e 13, o que dá origem novamente a hidróxidos que podem reagir novamente com o CO_2 e dar continuidade ao processo de carbonatação. Até que existam CH e C-S-H na pasta do cimento, a carbonatação continua.



No entanto, os silicatos e aluminatos de cálcio C-S-H também podem ser convertidos em carbonatos em reações diretas com CO_2 , embora com pouca intensidade, assim como apresentado na Equação 14 (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1992).



Equação (14)

Segundo Nedeljkovic *et al.* (2018), a portlandita (CH) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), são as principais fontes de íons de cálcio para a reação de carbonatação. Entretanto, a carbonatação não advém apenas desses dois produtos hidratados, mas ocorre também a carbonatação da etringita, e em seus resultados é possível perceber que elas acontecem de forma simultânea (CASTELLOTE *et al.*, 2008).

Segundo os estudos de Castellote *et al.*, (2008) cada uma dessas fases hidratadas da pasta possui uma constante de decaimento para a formação de calcita no processo de carbonatação, quanto maior essa constante, mais lentamente essa reação ocorre. No CP os valores dessa constante de decaimento (t_1) obtido para a portlandita é 400, para o C-S-H está entre 200 e 300, e para a etringita é menor que 200. Portanto, mesmo que a portlandita seja o principal fornecedor de Ca para a carbonatação da matriz, a sua reação até carbonatar é lenta e levará mais tempo até ser consumida por completo, já a etringita é consumida muito mais rapidamente em função do tempo em reação, como pode ser visualizado na Figura 11.

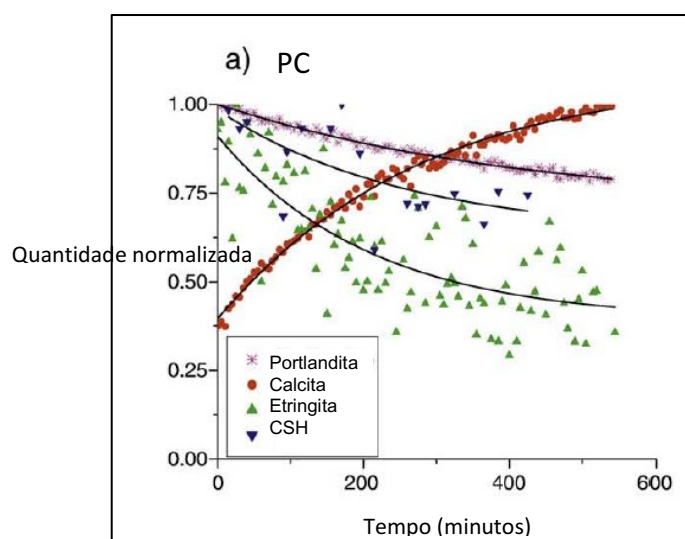
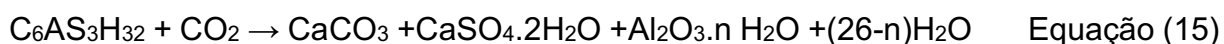


Figura 11 – Fração de carbonatação das fases hidratadas do CP em função do tempo.
Fonte: Castellote *et al.* (2008)

O CSS possui reações diferentes quanto à ação do CO_2 na matriz cimentícia. De acordo com estudo realizados por Majumdar, Singh e Evans (1981), no CSS ocorre como principal a carbonatação da etringita, dando origem à gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),

calcita e vaterita (CaCO_3). Por meio de análises de MEV, foi possível perceber enfraquecimento das agulhas de etringita, indicando que haviam passado pelo processo de carbonatação, devido à presença de gipsita e calcita em pequenas quantidades.

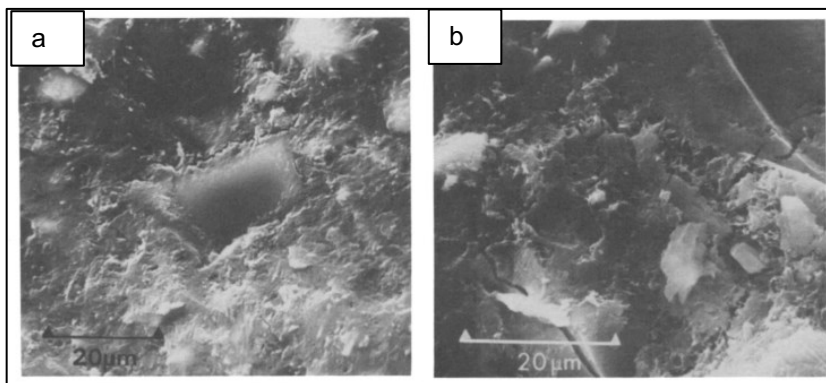
A Equação que demonstra a decomposição da etringita devido à ação do CO_2 sobre essa fase hidratada pode ser verificada na Equação 15. (NISHIKAWA, SUZUKI; ITO, 1992)



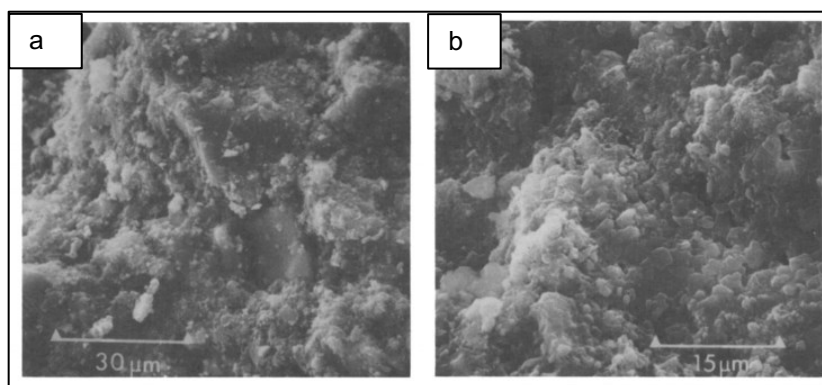
Para Bijen e Niël (1980), durante o desenvolvimento de resistência do CSS, se a pasta for exposta ao CO_2 , ele pode ser absorvido pela água da pasta do cimento, e com isso a pequena quantidade alcalina de portlandita proporcionada pela utilização do CP como ativador alcalino, pode ser consumida pelo CO_2 , assim a escória não irá ser ativada e nem hidratada. Como resultado disso, é criada uma camada superficial pouco resistente na pasta do CSS.

Ainda sobre as análises de microscopia realizadas por Majumdar e Stucke (1981), nas pastas de CSS com composições de 85% de escória, 10% de sulfato de cálcio e 5% de CP como ativador, para estudos de resistência mecânica, explica como modelo de carbonatação do CSS a destruição de CSH e etringita sob ação do CO_2 , uma reação rápida e que gera uma porosidade adicional a matriz, dificultando que exista uma boa ligação entre as massas hidratadas, explicando assim a perda significativa de resistência mesmo que a porção de etringita carbonatada tenha sido pequena.

Na Figura 12 e Figura 13, é possível ver a diferença entre a matriz que não passou pelo processo de carbonatação e a qual foi carbonatada e apresenta grandes proporções de materiais friáveis como resultado da carbonatação da etringita.



**Figura 12 - Microestrutura do CSS não carbonatado com 2 anos de idade e formulados com: fator $a/c = 0,6$ (a) e $a/c = 0,3$ (b)
Fonte: Majumdar e Stucke (1981)**



**Figura 13 - Microestrutura de CSS carbonatado, respectivamente com (a) um ano e (b) dois anos sob ação da carbonatação.
Fonte: Majumdar e Stucke (1981)**

Para Pinto *et al.*, (2020) os concretos de CSS apresentaram elevadas profundidades de carbonatação em pouco tempo de ensaio de carbonatação acelerada. De acordo com os resultados de DRX obtidos (Figura 14) confirmam que a carbonatação do CSS ocorre com mais força nas fases de CSH e de etringita. Quanto aos resultados de resistência a compressão, enquanto CPV e CPIII apresentaram perda de resistência de 4 a 6% e 11 a 18%, a formulação de CSS teve a redução mais significativa, cerca de 27%. Esse decaimento de resistência do CSS foi atribuído a nula quantidade de hidróxido de cálcio nos produtos de hidratação.

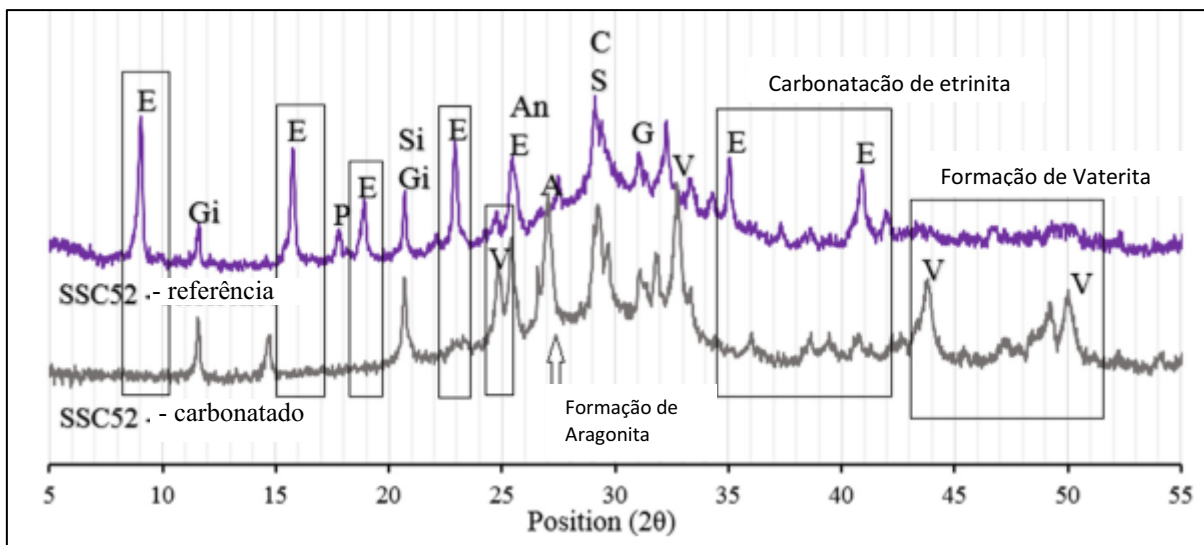


Figura 14 - Difratomogramas de amostras não carbonatadas (referência) e carbonatadas depois de 84 dias de exposição em CO₂.
 Fonte: Pinto *et al.*, (2020).

Corroborando com Castellote *et al.* (2008), os resultados de Pinto *et al.* (2020), demonstram que a carbonatação do CSS acontece de forma bem rápida por carbonatar as fases de etringita e C-S-H da matriz. Nas amostras de CSS submetidas a carbonatação acelerada também verificaram diferentes colorações antes de aplicar a solução de fenolftaleína e que estão possivelmente associados ao processo de carbonatação.

2.3.1 Fatores que influenciam o processo de carbonatação

A intensificação da frente de carbonatação do concreto se correlaciona com a capacidade que o CO₂ encontra para se difundir na matriz cimentícia, ou seja, está intimamente ligada às condições ambientais e às propriedades do composto de cimento (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007).

Na Figura 15 é apresentado um fluxograma dos fatores internos e externos que podem influenciar o processo de carbonatação.

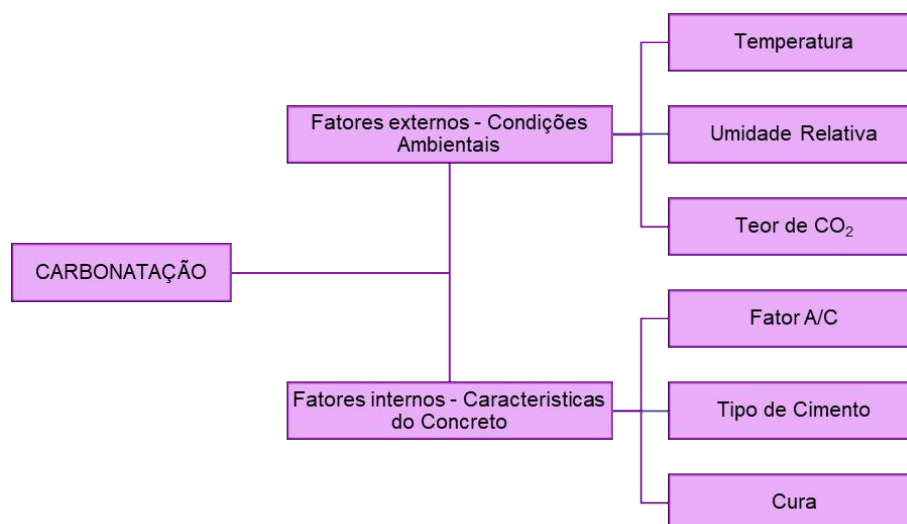


Figura 15 - Fluxograma de fatores que influenciam na carbonatação da matriz cimentícia.
Fonte: Autor.

2.3.1.1 Condições Ambientais

A temperatura é um agente catalizador de reações químicas, de maneira geral, aumentando a velocidade da reação de acordo com o aumento de temperatura. Mesmo por não afetar diretamente a velocidade da carbonatação em si, esse assunto deve ser levado em consideração pois exerce influência na taxa de corrosão das armaduras (PAULETTI, 2004). Segundo Papadakis, Fardis e Vayenas (1991), no intervalo de temperatura de 20 a 40°C, a carbonatação não tem influência da temperatura. Isso explica que em estudos com foco no desenvolvimento da carbonatação da matriz cimentícia, geralmente têm sido desenvolvidos em temperatura ambiente, não desenvolvem tanto essa influência.

A umidade relativa do ambiente, ao ser elevada, eleva também a saturação dos poros da matriz cimentícia com água, e com isso, dificulta a difusão de CO₂ e retarda o processo de carbonatação (Figura 16). De acordo com os resultados obtidos por Papadakis, Fardis e Vayenas (1989), foi possível observar que a velocidade máxima da carbonatação acontece em valores de umidade relativa entre 50 e 65%.

Segundo Neville (2013), em valores a baixo de 25% de umidade relativa, não há água suficiente nos poros para proporcionar a difusão do CO₂ e formar o ácido carbônico. De maneira geral, é compreensível que a carbonatação aconteça com maior facilidade em estruturas protegidas da ação da chuva, mas, sob ação de um ar úmido, do que, em estruturas expostas a chuvas periódicas.

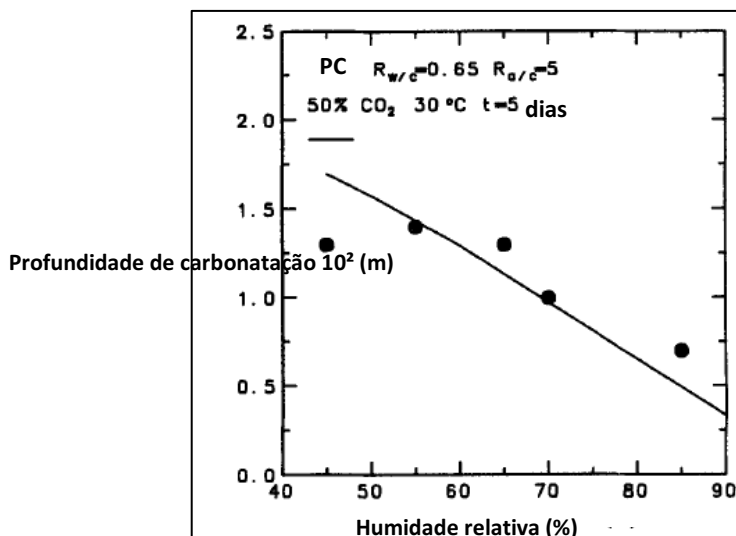


Figura 16 – Efeito da umidade relativa na profundidade de carbonatação.
Fonte: Papadakis, Fardis e Vayenas (1989)

Quanto à concentração de CO_2 , como fator de influência no desenvolvimento da carbonatação, os compostos hidratados da matriz podem reagir com ele mesmo em concentrações atmosféricas normais, com valores de 0,03% em volume (PAULETTI, 2004). O ponto especial de ser chamado atenção é que, mesmo que em ambientes onde o CO_2 está disponível facilmente para a reação de carbonatação, para que ela continue a acontecer, o CO_2 precisa de difundir através da camada já carbonatada até atingir a zona de reação (PARROT, 1986 *apud* PAULETTI, 2004).

A questão da concentração de CO_2 é principalmente levantada pelo fato de que, as reações de carbonatação de forma natural, com valores de concentração atmosféricos, ocorrem de forma lenta, demorando anos para atingir resultados esperados. Por isso, para ensaios de forma acelerada, as concentrações de CO_2 se apresentam geralmente entre 4 e 5% (NEVILLE, 1997).

2.3.1.2 Características do concreto

O tipo de cimento influencia nas propriedades físicas e mecânicas do concreto, o que está diretamente ligado à sua composição. Dessa maneira, diferentes composições químicas do cimento, ao passarem pelo processo de hidratação, apresentam diferentes propriedades. Vários cimentos passaram a ser desenvolvidos a fim de garantir melhores condições de durabilidade, entretanto, ao obter melhoras em algumas propriedades, outras podem ser prejudicadas (NEVILLE; BROOKS, 2013).

De acordo com resultados de alguns autores, como Castro *et al.* (2004), que estudaram o emprego de diferentes adições como substituição parcial do clínquer, verificaram que elas apresentaram profundidades de carbonatação maiores, indicando que o que favoreceu esse tipo de resultado é a diminuição da reserva alcalina (CH) da matriz, acarretando em um menor pH da mesma. Mesmo resultado foi obtido por Costa *et al.* (2005), que ao estudar diferentes teores de escória como adição, verificaram que conforme aumentavam os teores, mais elevada era a profundidade de carbonatação.

Quanto aos tipos de cimento de CP com adições de pozolana, por exemplo, nos estudos de Kulakowski, Pereira e Dal Molin (2009), concluiu-se que a variação da concentração de sílica adicionada ao cimento, aumenta a profundidade de carbonatação, devido ao mesmo efeito causado na referência anterior. Segundo Neville (1977) é a qualidade de cura do concreto que, irá definir qual efeito das adições será preponderante na durabilidade à carbonatação: a redução do tamanho dos poros da matriz, ou a redução do pH originada de uma menor concentração de reserva alcalina.

A influência da cura do concreto não pode ser negligenciada. Ela é o procedimento que promove a hidratação do cimento e por consequência o ganho de resistência e durabilidade (NEVILLE; BROOKS, 2013). Quanto maior o grau de hidratação do cimento, menor será a porosidade e permeabilidade, dificultando que a carbonatação aconteça (FIGUEIREDO *et al.*, 1993). Segundo Barin (2008) a carbonatação é significativamente reduzida quando existe um equilíbrio entre a umidade externa e umidade da superfície de cobertura do concreto, por produzir melhor hidratação dessa área, reduzindo a porosidade e promovendo melhor resistência.

A relação água/cimento é o principal fator da porosidade de um concreto, influenciando a sua correlação com propriedades mecânicas e durabilidade, de forma a ser considerado que o aumento da relação a/c propicia o aumento da porosidade do concreto, facilitando a difusão de CO₂ nos poros da matriz cimentícia, influenciando na profundidade de carbonatação (NEVILLE E BROOKS, 2013).

Em resultados obtidos por Pinto (2019) em carbonatação de CSS, os concretos com o menor valor de relação a/c=0,4, tiveram a velocidade do processo de carbonatação atenuados no período de 56 a 84 dias de idade em estudos de

carbonatação acelerada, diferente das relações $a/c = 0,46$ e $0,52$. Sendo assim, esse é um dos fatores decisivos para diminuir os efeitos da carbonatação.

2.3.2 Determinação da carbonatação

Segundo Pauletti (2009), devido a ação da carbonatação natural ser um processo lento e que necessita de grande tempo de exposição a fim de conseguir bons resultados, existem poucas pesquisas sobre carbonatação em concretos que se apropriam de concentrações de CO_2 iguais as presente na atmosfera. Na grande maioria, se assim realizadas, geralmente são acompanhadas de processo acelerado a fim de correlacionar os dados obtidos para estabelecer coeficientes de aceleração capazes de prever qual o tempo necessário para que tal profundidade seja alcançada de forma natural.

A concentração de CO_2 da atmosfera ser em torno de $0,03\%$ a $0,04\%$ torna o processo de carbonatação natural lento devido à dificuldade de o gás penetrar em uma superfície endurecida como a matriz cimentícia. Sendo assim, para que seja possível obter resultados significativos de frente de carbonatação natural, faz-se necessário realizar ensaios com grandes tempos de exposição ao CO_2 atmosférico (ASHRAF, 2016; CADORE, 2018).

Por meio de uma câmara de carbonatação é possível aumentar a concentração de CO_2 no meio e manter a temperatura e a umidade relativa constantes, garantindo um controle total das condições do ambiente de ensaio (BERNAL, 2015).

As pesquisas de carbonatação acelerada geralmente se apresentam de maneira a fazer comparativos de durabilidade entre diferentes composições de cimentos, compreender como efetivamente a carbonatação atua na matriz cimentícia e como poderá afetar a estrutura no decorrer do tempo. Mas, o mais importante é que, para que esse modelo de carbonatação acelerado seja usado de maneira coerente, é necessário definir as condições de ensaio de forma correta e sem extrapolações (BERNAL *et al.*, 2012; PAULETTI, 2009).

Como foi possível perceber no item 2.3.1, existem diversos fatores que influenciam resultados de carbonatação, por isso, não devem ser negligenciados no momento preparar e submeter amostras ao modelo de carbonatação acelerada.

Existem diferentes métodos de testes específicos para a realização de carbonatação acelerada no mundo, mas no Brasil ainda não há um método definido. Esses métodos especificam as etapas de pré-condicionamento, preparação da solução de indicador e as condições ambientais aos quais devem ser expostas as amostras (BERNAL, 2015; CADORE, 2018; PERARDT, 2020).

A Tabela 2 apresenta os detalhes desses métodos.

Tabela 2 - Protocolos de testes de carbonatação existentes

Teste	Pré-Condicionamento das amostras	Indicador	Exposição
BS EN 13295:2004	Amostras cobertas com plástico filme durante 24 h, desmoldado e selado novamente com uma película de plástico por 48 h, seguido de cura das amostras sob água aos 21 ± 2 ° C durante 27 dias. Depois, as amostras devem ser levadas a um mesmo teor de umidade, que é alcançado armazenando as amostras a 21 ± 2 ° C e 60 ± 10 UR até peso constante, para um mínimo de 14 dias.	1 g de fenolftaleína dissolvido em 70 mL de etanol diluído para 100 mL com destilado ou água deionizada	[CO ₂]: 1%, T: 21 ± 2 °C RH: $60 \pm 10\%$
RILEM CPC-18	Não especificado.	Solução de 1% fenolftaleína em 70% de etanol	[CO ₂]: Não especificado T: 20°C RH: 65%
Nordtest Method: NT Build 357	As amostras são removidas dos moldes depois de 1 dia de moldagem. Após, são curadas em água 20 ± 2 °C por 14 dias. Depois curadas a ar $50 \pm 5\%$ de UR, 20 ± 2 °C até atingir um total de 28 dias de cura.	1 g de fenolftaleína dissolvido em 500 mL de água destilada e 500 mL de etanol	[CO ₂]: 3%, T: Não especificado RH: 55–65%
Portuguese Standard LNEC E391	Amostras curadas submersas em água durante 14 dias a 20 ± 2 °C, e armazenado em ambiente fechado a $50 \pm 5\%$ de UR e 20 ± 2 °C até 28 dias.	0,1% de fenolftaleína em solução alcoólica	[CO ₂]: $5 \pm 0.1\%$ T: 23 ± 3 °C RH: 55–65%
French test method Afpc Afrem (1997)	Amostras curadas por 28 dias são saturado com água antes do CO ₂ exposição, e depois seca na estufa 40 ° C por 2 dias.	0,1% de fenolftaleína em solução alcoólica	[CO ₂]: 50%, T: 20°C RH: 65%

Fonte: BERNAL (2015) - Adaptado

Os estudos realizados por Pauletti (2004 e 2009) são extremamente relevantes por fazer um levantamento de diversos estudos sobre carbonatação que

existem no Brasil e quais condições cada um dos autores utilizam para realização da carbonatação acelerada. Desde então, é possível perceber a falta de um procedimento padronizado no Brasil para esse ensaio e com limites que poderiam ser considerados para definição de durabilidade do material.

Em suas conclusões de pesquisa, Pauletti (2004), afirma que os principais e mais significativos pontos de influência nos resultados, de forma geral, está a concentração de CO₂ da câmara de carbonatação, a relação água/cimento e o tipo de cimento a ser utilizado. O tipo de pré-condicionamento das amostras, para equilibrar a umidade dentro da amostra, teve grande influência também na profundidade de carbonatação.

A profundidade de carbonatação é um dos dados que podem ser obtidos nesse tipo de estudo. Um dos métodos mais utilizados para a determinação dessa medida é o método de diferenciação de pH da superfície utilizando a fenolftaleína como indicador ácido-base que tem viragem de cor incolor para roxo na condição de pH acima de 9,0 (ASHRAF, 2016).

Segundo Tuutti (1982), pode-se relacionar a profundidade da frente de carbonatação com o tempo de exposição, da seguinte maneira:

$$d_c = K\sqrt{t} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

d_c – profundidade carbonatada

K – coeficiente de carbonatação

t – tempo de exposição

O valor do coeficiente de carbonatação, refere-se diretamente à capacidade de resistência à carbonatação do concreto, de maneira que quanto maior esse valor de K, maior é a taxa de carbonatação, portanto menor a sua resistência desse processo.

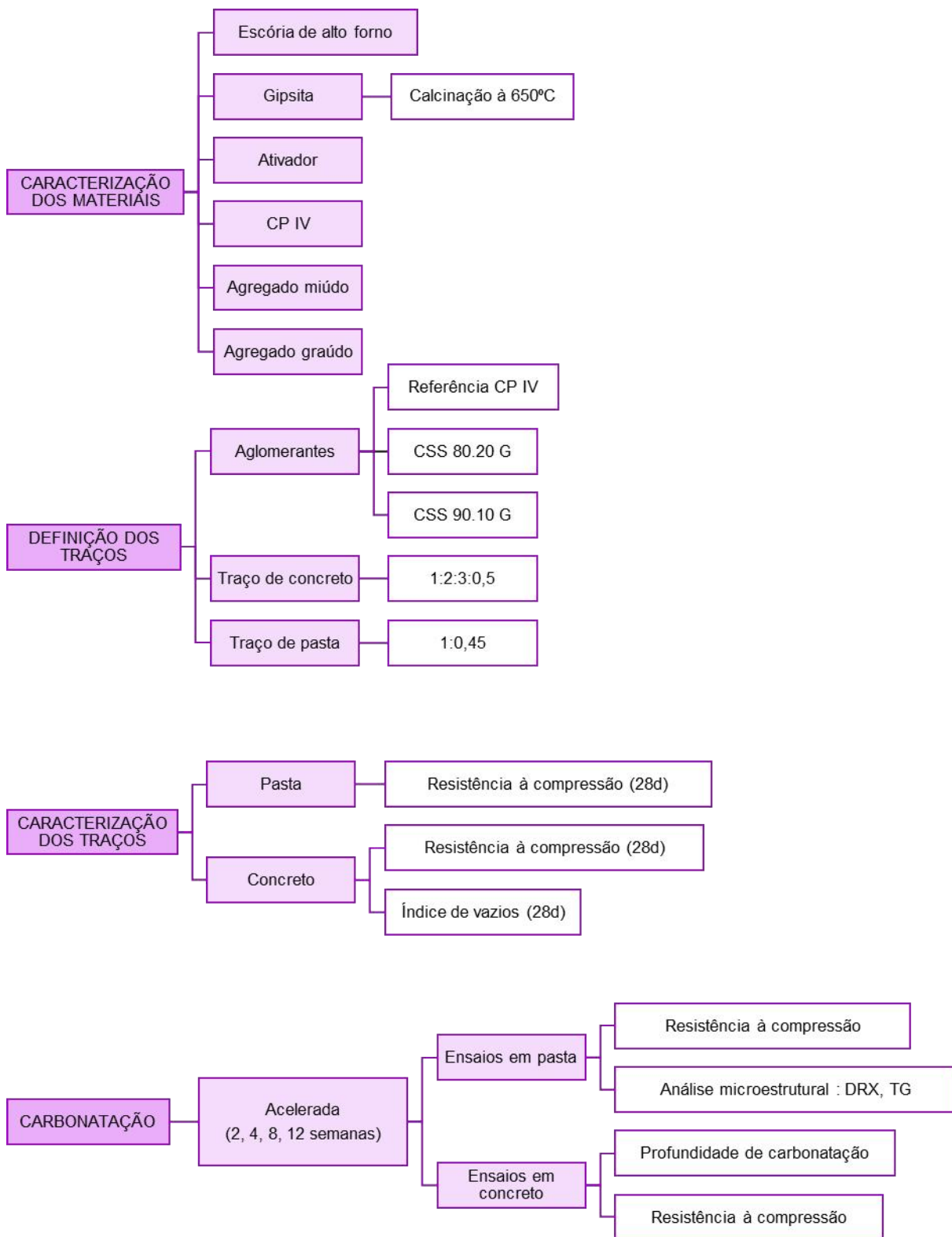
Outros estudos como de Vesikari (1988), Bob e Affana (1993) e Possan (2010), propõe também modelos de predição da evolução e profundidade da carbonatação. Ambos têm como base o modelo de Tutti (1992), entretanto, para a definição do coeficiente de carbonatação são adicionadas algumas variáveis difíceis

de serem dimensionadas, de forma que são consideradas inviáveis para a realização de estudos recorrentes como esse.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho teve como objetivo analisar a durabilidade da matriz cimentícia de cimento supersulfatado quando à resistência a carbonatação, e comparar como teores de sulfato de cálcio das formulações de CSS influenciam na ação da carbonatação. Seguindo o mesmo raciocínio dos estudos desenvolvidos por Trentin (2020), as formulações de CSS escolhidas para a realização desse estudo serão duas: CSS com 10% de sulfato de cálcio e CSS com 20% de sulfato de cálcio.

O programa experimental da pesquisa está apresentado no diagrama a seguir.



3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Supersulfatado (CSS)

3.1.1.1 Escória de alto forno

Esse material, ao ser adquirido, já havia passado pelo processo de moagem (Figura 17) tendo como características físicas uma massa específica de $2,83\text{g/cm}^3$ e superfície específica de $4460\text{ cm}^2/\text{g}$.

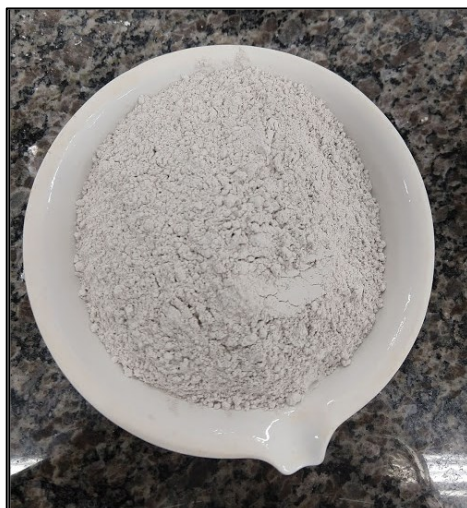


Figura 17 - Escória de alto forno já moída.

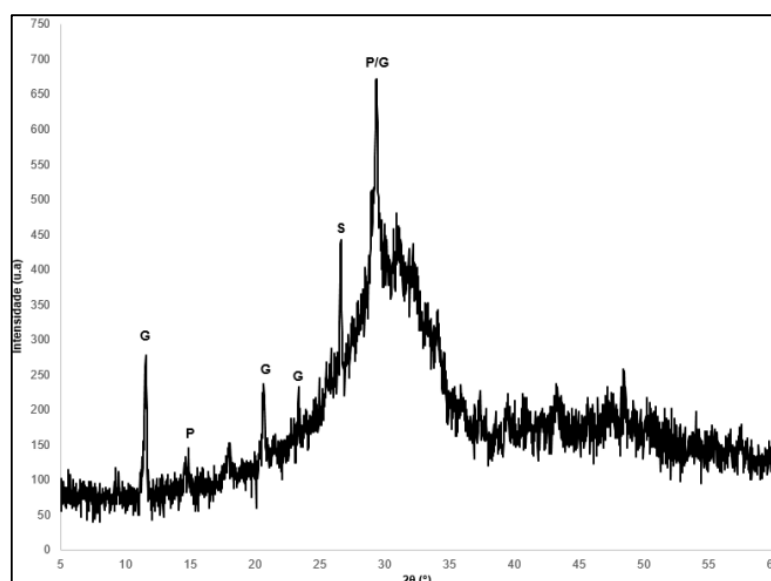


Figura 18 - DRX da escória granulada de alto forno (G: gipsita, P: gesso e S: dióxido de silício).
Fonte: Autor.

A análise de difração de raio-X dessa escória para identificação das fases cristalinas está apresentada na Figura 18. A composição química do material foi especificada pelo fornecedor estão apresentados na Tabela 3

De acordo com a classificação da norma EN 15743: 2010, como a soma $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{SiO}_2$ é maior do que 66,7 e a relação $\text{CaO}+\text{MgO}/\text{SiO}_2$ é maior do que 1, essa escória pode ser utilizada na produção de CSS. Além disso, outro ponto importante dessa composição é a porcentagem de 13,3 % de Al_2O_3 que para o processo de hidratação das primeiras idades influencia grandemente na formação de etringita na matriz do cimento.

Tabela 3 – Composição química e caracterização da escória de alto forno

Elementos	Varição percentual	EN 15473:2010
SiO_2	31,3	-
Fe_2O_3	0,7	-
Al_2O_3	13,3	-
CaO	42,8	-
SO_3	2,6	-
MgO	4,8	-
K_2O	0,4	-
TiO_2	0,6	-
Perda ao fogo	2,6	-
Adições inorgânicas do processo	6	-
$\text{CaO}+\text{MgO}+\text{SiO}_2$	78,9	$\geq 66,7$
$\text{CaO}+\text{MgO}/\text{SiO}_2$	1,52	≥ 1
Massa específica = 2,83 g/cm ³		
Superfície específica (método de Blaine) = 4460 cm ² /g		

Fonte: Fornecedor.

3.1.1.2 Sulfato de cálcio – Gipsita

A origem da fonte de sulfato de cálcio utilizada é produto do processo da calcinação da gipsita moída de fórmula química $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Foi necessário ainda peneirar o material em peneira com malha de 150 μm e realizar o processo de calcinação em temperatura de 650°C por 60 minutos e taxa de aquecimento de 50°C/min.

No difratograma do material (Figura 19), é possível perceber que após o processo de calcinação ele passa de gipsita para a sua forma anidra (Figura 20) de sulfato de cálcio, sem a presença de água.

A composição química desse material é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química da fonte de sulfato de cálcio.

Elementos	Varição percentual
SiO ₂	0,2
Fe ₂ O ₃	0,1
Al ₂ O ₃	0,2
CaO	28,7
SO ₃	59,4
MgO	0,5
K ₂ O	0,1
Na ₂ O	1,0
Perda ao fogo	9,9

Fonte: Autor.

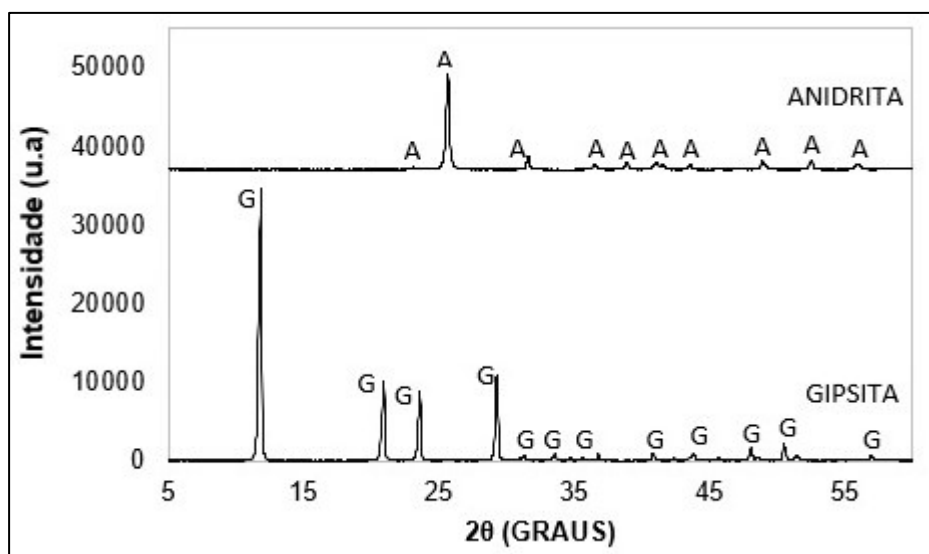


Figura 19 -- DRX do sulfato de cálcio in natura e calcinado a 650C.

Fonte: Autor.

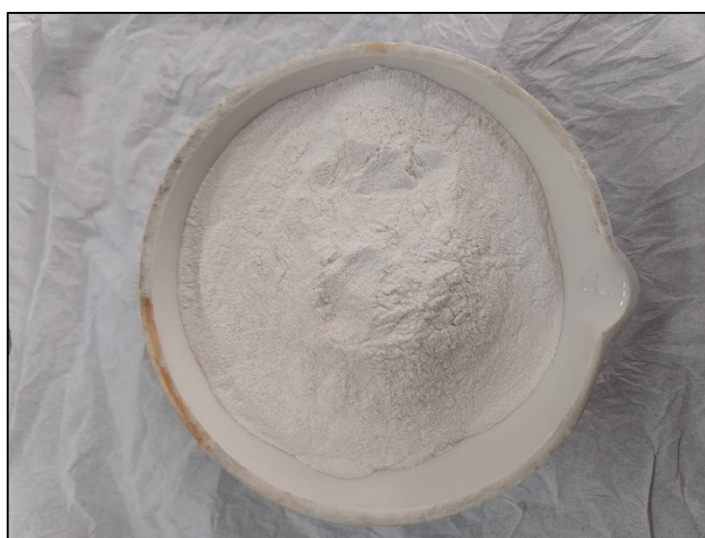


Figura 20 - Gipsita em sua forma anidra (Anidrita) depois do processo de calcinação.

Fonte: Autoria própria.

3.1.1.3 Ativador alcalino

O ativador utilizado para fazer parte das formulações de CSS é o CP V ARI (Figura 21) da marca Itambé disponível no laboratório de materiais.



Figura 21 - Porção de CP V utilizada como ativador alcalino para as misturas
Fonte: A autoria própria.

As características físicas como massa específica, superfície específica e a composição química desse material são informados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Composição química do CP V ARI

Elementos	Teores (%)
SiO ₂	19,32
Fe ₂ O ₃	3,07
Al ₂ O ₃	4,58
CaO	61,86
SO ₃	3,05
MgO	1,97
CaO livre	0,82
Resíduo insolúvel	0,93
Perda ao fogo	3,65
Equivalente alcalino	0,69
Massa específica = 3,09 g/cm ³	
Superfície específica (método de Blaine) = 4405 cm ² /g	

Fonte: Fornecedor.

3.1.2 Cimento Portland – IV 32 RS

Esse tipo de cimento foi utilizado para ser a composição de comparação com o cimento supersulfatado. Da mesma forma que o ativador alcalino, o CP IV 32 RS

(cimento Portland, tipo IV, com resistência característica aos 28 dias de 32 MPa e resistente a sulfatos) utilizado nesse trabalho era o que estava disponível no laboratório de materiais (Figura 22).



Figura 22 - CP IV separado em porção para a mistura e moldagem das pastas
Fonte: Autoria Própria

O fornecedor desse material é a marca Itambé e a composição dele é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química do CP IV 32 RS

Elementos	Teores (%)
SiO ₂	23,39
Fe ₂ O ₃	4,18
Al ₂ O ₃	9,89
CaO	44,91
SO ₃	2,12
MgO	2,1
CaO livre	0,68
Resíduo insolúvel	25,51
Perda ao fogo	4,77
Equivalente alcalino	1,2
Massa específica = 2,84 g/cm ³	
Superfície específica (método de Blaine) = 4259 cm ² /g	

Fonte: Fornecedor.

O CP IV 32 RS é um cimento com adições de pozzolana na composição, capaz de reduzir o calor de hidratação e tornar argamassas e concretos mais impermeáveis, como comentado no item 2.1.2, e, além disso, por ser resistente a sulfatos, possui resistência a meios agressivos.

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado nessa pesquisa é a areia natural. Ela possui módulo de finura igual a 1,61, diâmetro máximo de 1,2 mm e massa específica igual a 2,51g/cm³. A distribuição granulométrica desse material está apresentada na Figura 23.

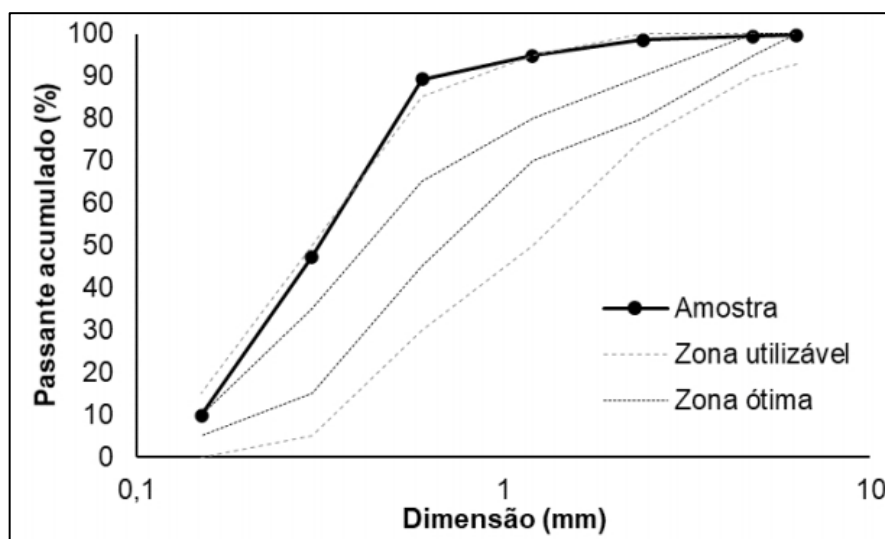


Figura 23 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo de acordo com os limites da NBR 7211.

Fonte: Autoria Própria

3.1.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nessa pesquisa é a brita basáltica 0. Ela possui módulo de finura igual a 5,59, diâmetro máximo de 9,5 mm e massa específica igual a 2,95g/cm³. A distribuição granulométrica desse material está apresentada na Figura 24.

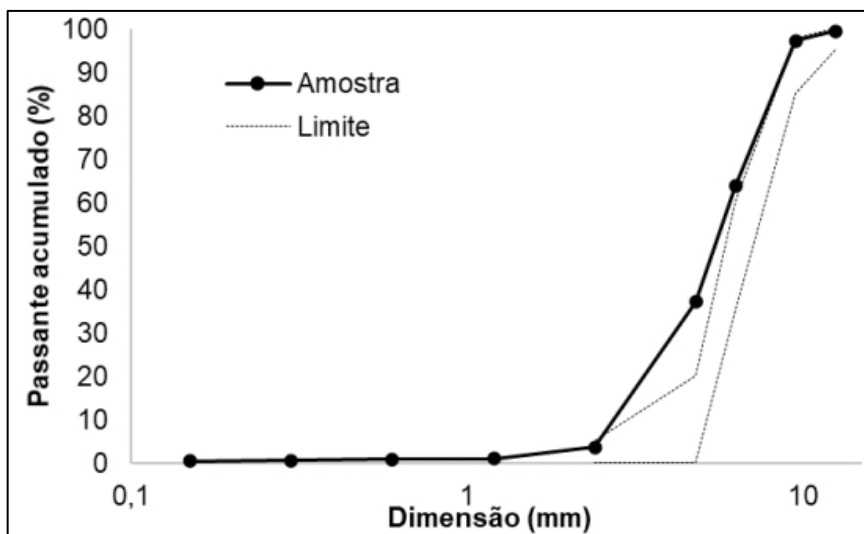


Figura 24 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo de acordo com os limites na NBR 7211.

Fonte: Autoria Própria

3.2 MÉTODOS

Esse item inclui a metodologia utilizada para avaliar o CSS quanto à sua resistência a carbonatação, comparando-o com as amostras de CPIV e quanto aos teores diferentes de sulfato para as formulações de CSS, de maneira que seja uma pesquisa com dados de carbonatação no modelo acelerado de carbonatação.

3.2.1 Definição das formulações e confecções das amostras

Visando comparar de maneira geral o comportamento do CSS com um tipo de CP, foram definidos como aglomerantes principais dessa pesquisa: O Cimento Portland – Tipo IV e o CSS com duas formulações diferentes: CSS 80.20 G (80% de escória e 20% de gipsita) e CSS 90.10 G (90% de escória e 10 % de gipsita), ambos com teores de 5% de ativador alcalino.

3.2.1.1 Pastas

As pastas dos aglomerantes em estudo foram formuladas com traço igual a 1:0,45 (aglomerante:água), mesmas proporções utilizadas por Trentin (2020). A Tabela 7 apresenta as quantidades de materiais necessários para preparar a pasta, levando em consideração 100g de cimento. Como é possível notar, dos 100 gramas

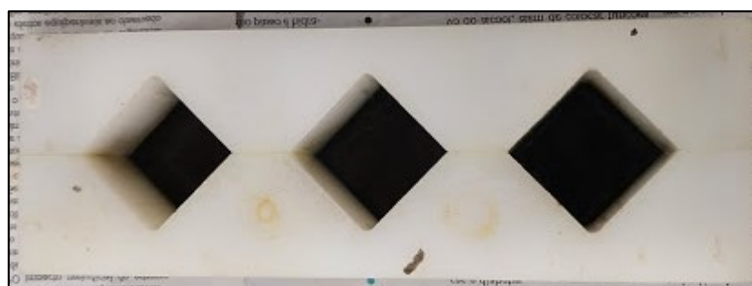
de cimento no CSS, 5% é de ativador, então restam 95 g para calcular as proporções de escória e sulfato de cálcio.

Tabela 7 – Quantidade de materiais para pasta em 100g de cimento

Cimento	Escória (g)	Gipsita (g)	CPV-ARI (ativador alcalino)(g)	CP IV (g)	Água (g)	
CSS	80.20 G	76	19	5	-	45
	90.10 G	85,5	9,5	5	-	45
CP IV	-	-	-	100	45	

Fonte: Autor

Para a preparação das pastas, inicialmente foi realizada a mistura de todo o material seco e então adicionada a quantidade de água em 30 segundos, em seguida homogeneizada por mais 30 segundos, esperados mais 2 minutos e 30 segundos, a pasta é misturada pela última vez por mais 30 segundos. Na sequência, foram moldadas as amostras em moldes cúbicos de 3x3x3cm, previamente preparados com desmoldante, apresentados na Figura 25.



**Figura 25 - Moldes cúbicos de 3x3x3 cm.
Fonte: Autoria Própria**

Concluída a moldagem, a forma foi coberta com um plástico filme e armazenada em um recipiente com taMPa e uma lâmina de água ao fundo, a fim de manter a umidade relativa a cima de 95%. Após 24 horas de moldagem, foram retirados da fôrma e armazenados em cura úmida a temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ até 28 dias.

3.2.1.2 Concreto

Os concretos produzidos seguem o traço base de 1:2:3:0,5 (aglomerante: agregado miúdo: agregado graúdo: água), sendo o mesmo utilizado por Pinto (2019).

O procedimento de mistura e adensamento para o concreto seguiu as etapas especificadas na NBR 7215 (ABNT, 2019), incluindo mais um ciclo para adição do agregado graúdo. Dessa maneira, o processo de mistura na argamassadeira mecânica se inicia em velocidade baixa com a mistura do cimento com água por 30 segundos; por mais 30 segundos adiciona-se gradualmente o agregado miúdo; em velocidade alta mistura por mais 30 segundos; retornando à velocidade baixa adiciona-se gradualmente o agregado graúdo por 30 segundos; retornando a velocidade alta mistura por mais 30 segundos; por 90 segundos é deixado a mistura descansar coberta com um pano úmido e para finalizar é realizado a última mistura em velocidade alta por 60 segundos.

Após a mistura mecânica, a moldagem foi realizada em moldes cilíndricos com dimensões de 5x10cm (Figura 26)Figura 28 inicialmente preparados com desmoldante a fim de garantir a retirada das amostras dos moldes.



**Figura 26 - Moldes metálicos nos formatos de 5x10 cm.
Fonte: Aatoria Própria.**

As etapas de desmoldagem seguiu as mesmas utilizada para as pastas, detalhada no item 3.2.1.1.

3.2.2 Caracterização dos cimentos

Para melhor compreensão da influência desses cimentos nas propriedades das pastas e concretos, amostras foram submetidas a processos de ensaio para

determinação de suas características, antes de serem submetidos à carbonatação acelerada

Na Tabela 8 são apresentados os ensaios realizados para pastas e concretos das formulações de CSS 80.20 G, CSS 90.10 G e CPIV que estão em análise nesse trabalho.

Tabela 8 - Tabelas de ensaios realizados e respectivas quantidades de amostras.

		Pastas	Concretos
Antes da carbonatação	Resistência à compressão	Amostras 3	Amostras 3
		Idade 28 dias	Idade 28 dias
	Índice de Vazios	Amostras 2	Amostras 2
		Idade 28 dias	Idade 28 dias

Fonte: Autor

3.2.2.1 Resistência à compressão

Para os ensaios de resistência à compressão, foram necessárias três amostras para cada dia de ensaio, em cada uma das formulações. As pastas e os concretos passaram por ensaio de resistência antes do processo de carbonatação, aos 28 dias. Dessa maneira, para cada uma das formulações, foram moldadas 3 amostras de pastas e 3 amostras de concreto para esse ensaio.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no Laboratório de Materiais da UTFPR – Pato Branco com a prensa hidráulica EMIC (Figura 27).

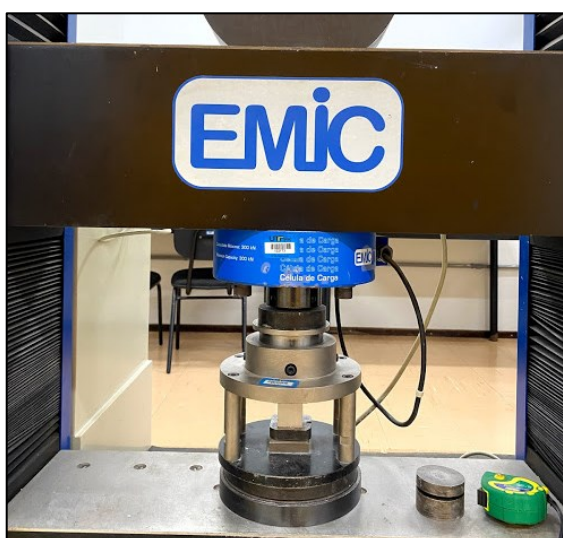


Figura 27 - Equipamento de ensaios para obtenção da resistência a compressão – EMIC
Fonte: Autoria Própria.

3.2.2.2 Índice de vazios

O índice de vazios no concreto foi determinado aos 28 dias de acordo com o procedimento que consta na NBR 9778 (ABNT 2005), sendo um processo anterior à etapa de exposição ao CO₂. Foram necessárias 2 amostras para cada uma das formulações em estudo para a realização desse ensaio (Figura 28).



**Figura 28 - Amostras no processo de ensaio de índice de vazios.
Fonte: Autoria Própria**

3.2.3 Análise da carbonatação

Para a carbonatação acelerada em estudo nesse trabalho, optou-se por definir ensaios a estimar resultados em: 2, 4, 8 e 12 semanas de carbonatação. As idades de carbonatação acelerada 4, 8 e 12 semanas foram as mesmas utilizadas por Pinto (2019) que também estudou carbonatação no CSS. Optou-se por incluir uma idade mais nova de forma a garantir que pudessem ser obtidos mais dados de profundidade de carbonatação, melhorar a estimativa a taxa de carbonatação das amostras, e ter verificação de carbonatação em idades antes de 4 semanas, como fizeram diversos autores, incluindo Perin (2013); Kulacolski, Pereira e Dal Molin (2009); Ahmed e Benharzallah (2017).

A Tabela 9, apresenta os ensaios a serem realizados na etapa de carbonatação acelerada para pastas e concretos e respectivas quantidade de amostras e tempo de ensaio.

Tabela 9 - Ensaio realizados e respectivas quantidades de amostras para caracterização dos cimentos submetidos à carbonatação acelerada.

		Pastas		Concretos
Durante a carbonatação	Profundidade de carbonatação	Amostras		1
		Idade		2, 4, 8 e 12 semanas
	Resistência à compressão DRX TG/DTG	Amostras	3	3
		Idade	2, 4, 8 e 12 semanas	2, 4, 8 e 12 semanas

Fonte: Autor

3.2.3.1 Procedimento para submissão à carbonatação acelerada

Para realização dos ensaios para avaliação da frente de carbonatação no método acelerado para ambas amostras de pasta e concreto, após a etapa de cura úmida de 28 dias descrita no item 3.2.1, elas foram submetidas ao procedimento de pré-condicionamento com duração de 29 dias, com as mesmas etapas seguidas por Cadore (2018) e, por fim, encaminhadas para o ensaio em câmara de carbonatação. As etapas do pré-condicionamento são as seguintes:

- Depois do período de cura úmida, as amostras foram retiradas do recipiente úmido, mas mantidas na câmara climatizada (Figura 29) na temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e com umidade relativa de 60%, por um período de 15 dias, até que a massas não sofra mais variações e permaneça constante. Estipulou-se que tal requisito era atendido quando a diferença entre duas medições de massa, com intervalo de 24 horas, não excedesse 0,5%.
- Na sequência, as amostras foram envoltas por um plástico filme (Figura 30) a fim de homogeneizar a umidade no interior da amostra por um período de 14 dias.



Figura 29 - Amostras de CSS na câmara climatizada após o período de cura úmida.
Fonte: Autoria Própria



Figura 30 – Amostras de concreto e pasta envoltas em plástico filme na etapa de pré-condicionamento.
Fonte: Autoria Própria

Ao ser concluída a etapa de pré-condicionamento as amostras foram submetidas à carbonatação acelerada em câmara de carbonatação (Figura 31) que controla temperatura e concentração de CO₂ para mantê-las constantes.

Para este trabalho, definiu-se como condições de exposição os seguintes valores:

- Temperatura: 30±2°C
- Concentração de CO₂: ±3%
- Umidade relativa: 65±2%

Os valores de temperatura e umidade relativa são os mesmos utilizados por Pinto (2019). Quanto aos valores de concentração de CO₂, Perardt (2021) realizou ensaios no mesmo equipamento com concentração de CO₂ a 5% e obteve resultados com alta carbonatação em 4 semanas, em cimentos formulados apenas com escória. Dessa maneira, optou-se por utilizar concentração menor de CO₂.



Figura 31 - Equipamento utilizado para carbonatação acelerada.
Fonte: Autor.

3.2.3.2 Quantidade de amostras necessárias

No caso de amostras de concreto, para cada semana de ensaio são necessários 3 corpos de prova para determinação da resistência à compressão e 1 corpo de prova para determinação da profundidade de carbonatação.

Como foram quatro semanas em estudo de carbonatação acelerada (2, 4, 8, e 12 semanas) totaliza-se assim, 16 corpos de prova de concreto e 12 corpos de prova de pastas para cada formulação.

No caso de amostras de pasta, para cada semana em estudo são necessários 3 corpos de prova para determinação da resistência à compressão e os mesmos após ensaio foram utilizados para amostras de DRX e TG, como descritos no item 3.2.4. deste trabalho.

Sendo assim, como são três formulações em estudo (CSS 8020G, CSS 9010G e CPIV), para os concretos totalizou 54 amostras moldadas e para as pastas 36 amostras moldadas.

3.2.3.3 Ensaios de resistência mecânica

As pastas e concretos foram caracterizados quanto à resistência à compressão durante o período de carbonatação acelerada em 2, 4, 8 e 12 semanas de ensaio e aconteceram da mesma forma como descritos para as caracterizações dos cimentos.

3.2.3.4 Profundidade de carbonatação

Para a realização das medidas de profundidade de carbonatação, os corpos de prova de concreto foram rompidos diametralmente após serem retirados da câmara de carbonatação.

O procedimento adotado para obtenção dos resultados é descrito por RILEM CPC 18 (56-MHM, 1988), que consiste em aspergir com um borrifador um indicador ácido-base, nesse caso uma solução de fenolftaleína, sobre a superfície da amostra recém fraturada e, com isso, é possível visualizar regiões com cores distintas, percebendo a diferença de pH da região mais externa da amostra com a parte mais interna da mesma. A solução de fenolftaleína que foi utilizada, consiste na diluição de 10g de fenolftaleína, com 700ml de álcool etílico e posterior adição de 300ml de água destilada.

Após a solução do indicador ter se estabilizado na superfície, foram realizadas as medidas, com o auxílio de um paquímetro, da região em que não ficou roxa, indicando que foi carbonatada.

Foi definido efetuar medidas igualmente espaçadas na direção da altura do corpo de prova e diametralmente opostas e nas duas partes da amostra, como exemplo na Figura 32, totalizando doze medidas por amostra.

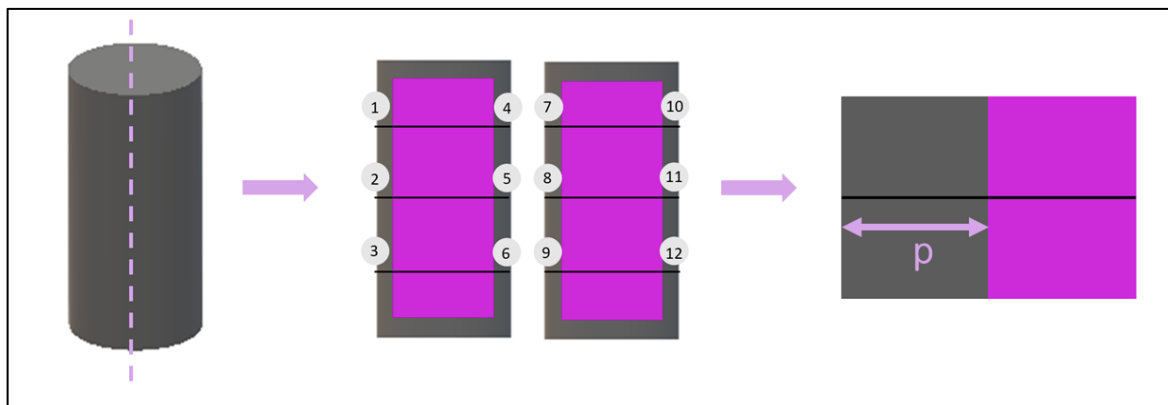


Figura 32 – Ilustração da medida de profundidade de carbonatação
Fonte: Autor.

3.2.4 Análises de microestrutura das pastas de cimento

3.2.4.1 Preparação das amostras

Para a realização das análises de microestrutura DRX e TG/DTG é necessário antes passar pelo processo de interrupção da hidratação dos compósitos.

Ao serem fragmentadas as amostras das pastas no ensaio de resistência à compressão, os fragmentos foram submersos em acetona por 2 horas, em seguida filtradas no filtro de Büchner acoplado a uma bomba de vácuo. Na sequência foram colocados em estufa com temperatura de $40 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas, para completar a secagem. Assim, após período de secagem, as amostras fragmentadas foram moídas manualmente até atingirem granulometria passante na peneira 150 μm foram submetidas as análises de DRX e TG.

Foram realizadas amostras para DRX e TG/DTG nas 4 idades de carbonatação em estudo, ou seja, 2, 4, 8, e 12 semanas.

3.2.4.2 Difractometria de raios X (DRX)

A difratometria de raio X é uma análise que possibilita a identificação de picos de materiais cristalinos presentes na amostra. Dessa forma é possível utilizá-la para caracterização de possíveis fases reagentes e produtos formados durante o processo a que foram submetidas as amostras, que no caso desse trabalho, foi o processo de carbonatação acelerada.

As principais fases identificadas são: gipsita ($29,1^\circ$), calcita ($29,5^\circ$), portlandita (18°) e vaterita (27°).

As análises foram realizadas na Central de Análises da UTFPR – Câmpus Pato Branco utilizando os seguintes parâmetros:

- Comprimento de onda igual a 1,54 Å;
- Leitura dos dados no intervalo de 5° a 60° (2 θ);
- Velocidade de varredura de 3°/min; 0,5°/s;
- Radiação de Cu K α ;
- Passo de medidas a cada 0,02°.

3.2.4.3 Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada (TG e DTG)

A TG/DTG é uma análise térmica utilizada para identificar por meio de picos de perda de massa, quais compostos foram formados ou se decompuseram no processo a que foram submetidas as amostras.

As principais fases identificadas são: etringita (90-110°C), gipsita (120-130°C), CSH, carbonato-metaestável. (450°C) e calcita (660 – 950°).

As análises foram realizadas na Central de Análises da UTFPR – Câmpus Pato Branco utilizando os seguintes parâmetros:

- Massa da amostra em pó de 10 mg;
- Intervalo de temperatura de 30 a 1000°C;
- Atmosfera de gás nitrogênio (N₂);
- Fluxo do gás de 100 mL/min;
- Taxa de aquecimento de 10°C/min

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados e as análises feitas desse estudo de carbonatação.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CIMENTOS

4.1.1 Índice de Vazios

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, estão apresentados os resultados quanto ao índice de vazios dos concretos realizados com as formulações em estudo neste trabalho. Esse valor representa a porcentagem do volume total da amostra.

	Índice de Vazios (%)	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	18,18%	18,42	0,24	1,29
	18,66%			
CSS 90.10 G	18,74%	18,42	0,32	1,73
	18,10%			
CP IV	16,35%	16,24	0,11	0,68
	16,13%			

Fonte: Autor.

O valor de índice de vazios de ambas as formulações de CSS foram 18,42%, que é um valor 13,5% maior que o índice de vazios do CPIV. Dessa maneira, o CSS 80.20 G e o CSS 90.10 G, tem mais quantidade de poros e vazios no concreto que podem influenciar na propagação da carbonatação, visto que, esses vazios é por onde acontece a difusão do CO₂ para dentro do concreto.

4.1.2 Resistência mecânica de concretos das formulações não carbonatadas

Na Tabela 10 são apresentadas as médias de resistência à compressão aos 28 dias de cura úmida obtidos para as pastas e os concretos das três formulações em

estudo neste trabalho. Na Tabela 12 do apêndice A são apresentados os valores obtidos de resistência para cada amostra das formulações, detalhes de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 10 – Resistência à compressão média de pastas e concretos aos 28 dias de cura em água com cal.

Formulação	Resistência à compressão em 28 dias (MPa)	
	Pastas	Concretos
CSS 80.20 G	24,46	23,87
CSS 90.10 G	25,92	21,53
CP IV	33,44	35,08

Fonte: Autor.

De acordo com a NBR 6118 (2014) a classe de concreto mínima para garantir durabilidade é C20 (20 MPa de resistência em 28 dias) em ambientes com fraca agressividade e C25 (25 MPa de resistência em 28 dias) em ambientes com agressividade moderada. Tendo como base a norma, é possível dizer que os concretos com formulações de CSS apresentaram resistência entre 20 e 25 MPa e são aptos para utilização em lugares com pouca agressividade, já o CP IV, por ter em média 35 MPa pode ser utilizado em locais com agressividade considerada forte.

Os valores de resistência à compressão nas pastas de CSS 80.20 G e CSS 90.10 G obtidos nesse trabalho foram em média de 25 MPa e se apresentam inferiores aos resultados obtidos por Trentin (2020) para as mesmas formulações e em mesmas condições de cura.

4.2 PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Por meio da aspersion de fenolftaleína sob as amostras de concreto rompidas diametralmente foi possível verificar a frente de carbonatação das amostras devido a diferença de pH que a fenolftaleína indica (pH acima de 9,5 tem coloração arroxeada). Os resultados de profundidade de carbonatação acelerada em 2 semanas (Figura 33) foram os mais significativos para as formulações de CSS, visto que foi a única idade em que foi possível verificar essa diferença de coloração e mensurar a profundidade. Em média, os resultados de profundidade em 2 semanas foram: CSS 80.20 G atingiu 16,88 mm, CSS 90.0 G atingiu 18,29 mm e o CP IV atingiu 3,38 mm.



Figura 33 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 2 semanas de exposição à carbonatação acelerada.
Fonte: Autor.

Para as amostras de pasta nessa mesma idade (Figura 34), foi verificado pH básico apenas no interior da amostra de CPIV. As amostras de CSS em pasta já atingiram carbonatação total, sem diferença de pH indicada pela fenolftaleína. Considerando que para cada face até o centro da amostra de pasta possui 15 mm para essa frente de carbonatação e comparado com os resultados de 16,88 mm e 18,29 mm de carbonatação medidos nas amostras de concreto, era esperado que as pastas de CSS se apresentassem totalmente carbonatadas em 2 semanas.



Figura 34 - Amostras de pasta com aplicação de fenolftaleína após 2 semanas de exposição à carbonatação acelerada.
Fonte: Autor.

Já nas semanas seguintes de ensaio, CSS sob aspensão de fenolftaleína não houve indicação de cor, considerado então totalmente carbonatado até o final do estudo em 12 semanas.

O CP IV, por sua vez, teve uma frente de carbonatação gradativa, sendo possível mensurá-las em todas as semanas chegando a um valor máximo de 10,2 mm em 12 semanas. As pastas de CP IV apresentaram-se totalmente carbonatada apenas na última semana de ensaio. A seguir as Figura 35 aFigura 40 apresentam a visualização das amostras carbonatadas respectivamente em 4, 8 e 12 semanas com aplicação de fenolftaleína.

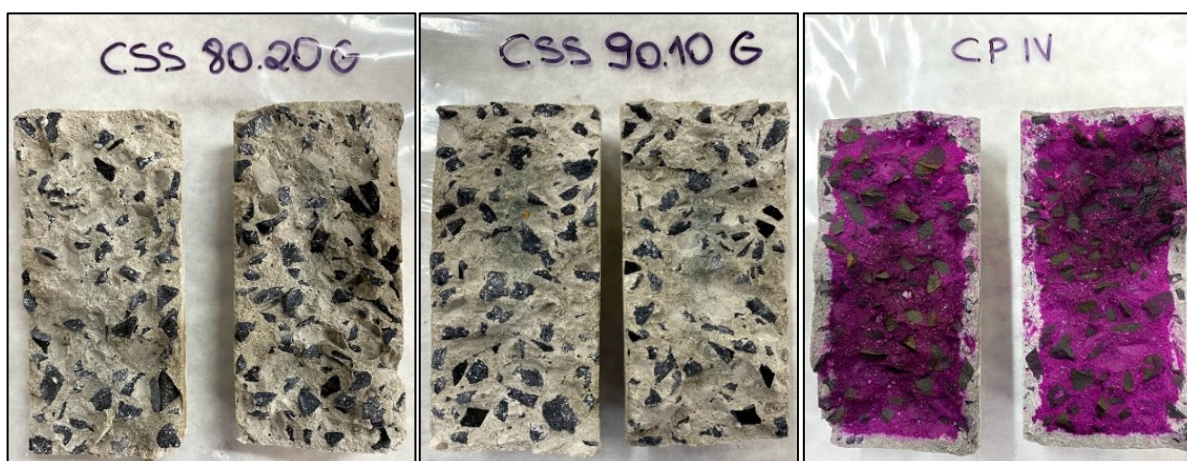


Figura 35 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 4 semanas de exposição à carbonatação acelerada.

Fonte: Autor.



Figura 36 - Amostras de pasta com aplicação de fenolftaleína após 4 semanas de exposição à carbonatação acelerada.

Fonte: Autor.

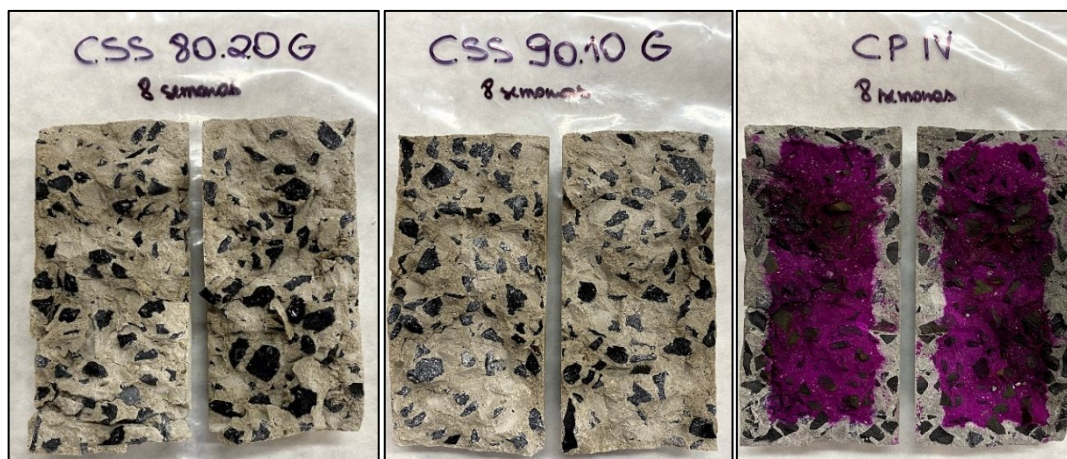


Figura 37 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 8 semanas de exposição à carbonatação acelerada.

Fonte: Autor.



Figura 38 - Amostras de pasta com aplicação de fenolftaleína após 8 semanas de exposição à carbonatação acelerada.

Fonte: Autor.

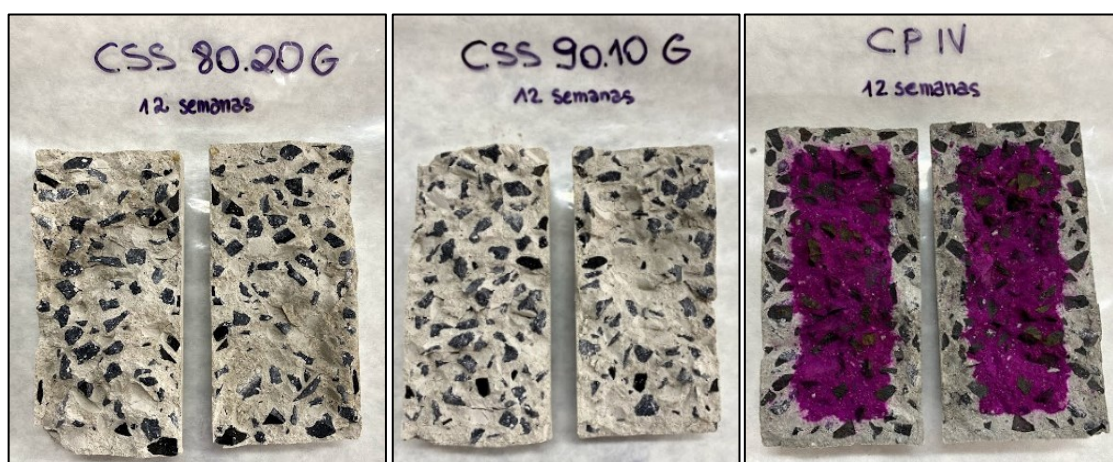


Figura 39 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 12 semanas de exposição à carbonatação acelerada.

Fonte: Autor.



Figura 40 - Amostras de pasta com aplicação de fenolftaleína após 12 semanas de exposição à carbonatação acelerada.

Fonte: Autor.

Os valores de profundidade de carbonatação obtidos durante esse estudo, são apresentados nas tabelas do Apêndice B. Com o tratamento desses dados, foi possível gerar os gráficos apresentados na Figura 41. Como nas amostras de concreto o CSS se apresentou totalmente carbonatado já em 4 semanas de ensaio, considerou-se como a medida da profundidade a medida do raio da amostra que é 25 mm.

Os resultados obtidos corroboram com os resultados alcançados por Pinto (2019), que também realizou carbonatação acelerada em amostras de CSS com o fator água/cimento próximo, e também alcançaram valores próximos a 25 mm, a única diferença é que foram aos 56 dias (referentes a 8 semanas). Essa diferença pode ter ocorrido pela diferença entre os tempos de cura estabelecidos para o desenvolvimento das amostras. Quanto maior o tempo de cura maiores as chances de preenchimento da microestrutura das amostras, dificultando a difusão de CO_2 nos poros no processo de carbonatação. Pinto (2019) realizou um tempo de cura de 91 dias, enquanto o presente trabalho foi desenvolvido com um tempo de cura de 28 dias.

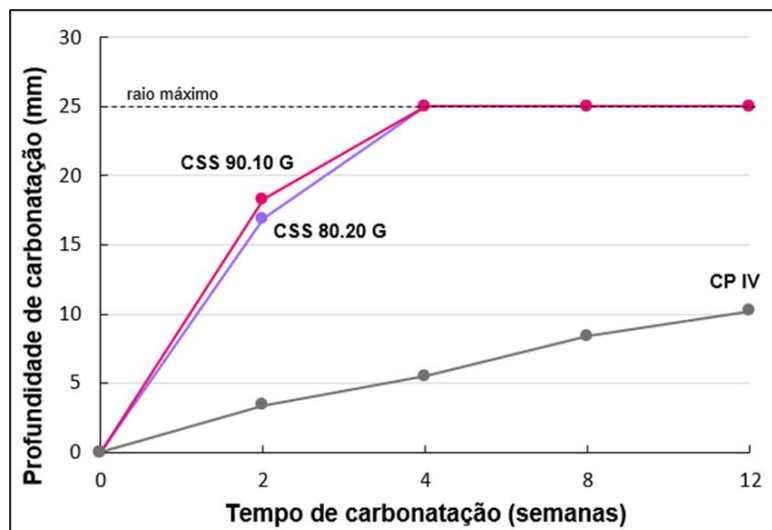


Figura 41 - Profundidade de carbonatação dos concretos. Em 0 indicando a idade não carbonatada e as demais idades em carbonatação acelerada em semanas.
Fonte: Autor.

Na Equação proposta por Tutti (1992) apresentada no item 2.3.2 para determinação da profundidade de carbonatação em função do tempo, o coeficiente K, também chamado de taxa de carbonatação, é o principal parâmetro a ser analisado.

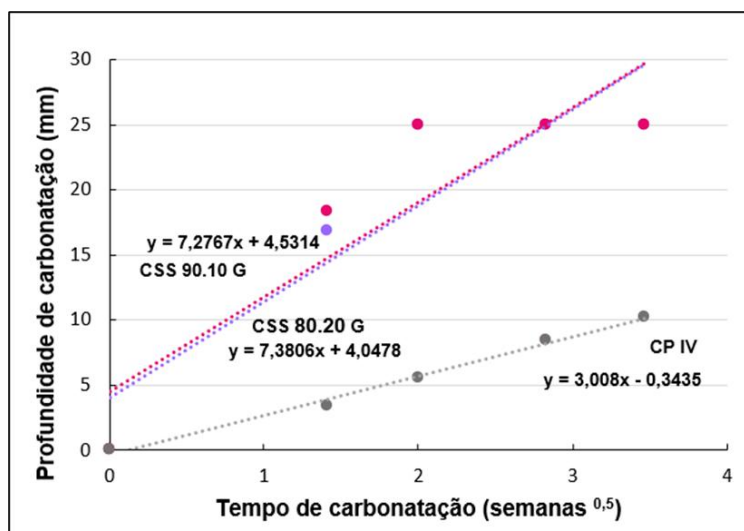


Figura 42 - Linearização das profundidades de carbonatação acelerada em função do tempo para obtenção dos coeficientes de carbonatação das formulações em estudo.

Na linearização desses pontos de profundidade (Figura 42) foi possível obter, por meio do coeficiente angular das Equações geradas, a taxa de carbonatação acelerada das formulações em estudo. Dessa forma, é possível perceber que as duas formulações de CSS apresentaram taxas muito parecidas, podendo ser consideradas com o mesmo comportamento de resistência à carbonatação.

Comparando as formulações de CSS com a referência de CP IV, e levando em consideração que quanto maior a taxa de carbonatação, menos resistente a essa condição ele é, então o CSS 80.20 G e CSS 90.10 G com taxas respectivas de 7,38 e 7,24, são menos resistentes à carbonatação que o CPIV, que apresentou uma taxa de 3,01.

4.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS MISTURAS CARBONATADAS

Na Figura 43 e Figura 44 estão apresentados os gráficos dos resultados médios de resistência à compressão obtidos das amostras de pasta e concreto sob carbonatação acelerada. No Apêndice A estão presentes as tabelas dos valores obtidos de resistência mecânica para cada amostra das formulações, detalhes de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Como pode ser observado, ao final do ensaio, a formulação de CPIV foi a que apresentou os valores mais elevados de resistência, tanto para pasta como para concreto.

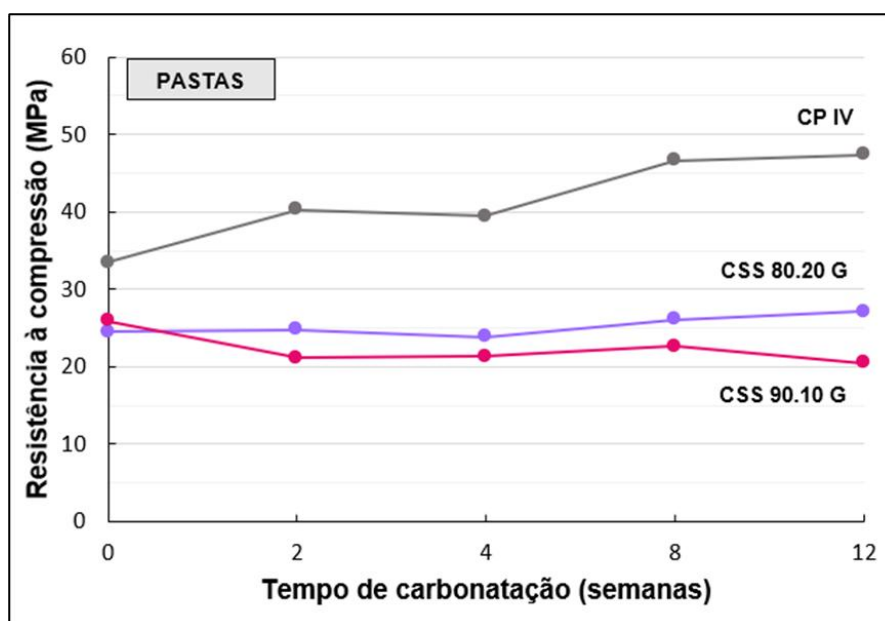


Figura 43 - Resistência à compressão de pastas de CSS e CPIV sob ação da carbonatação acelerada em 2, 4, 8 e 12 semanas de análise.

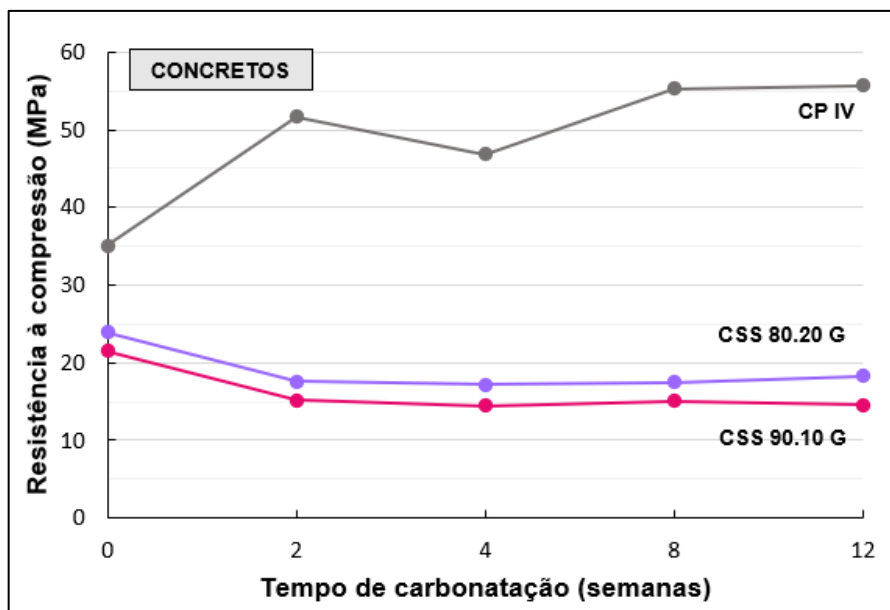


Figura 44 - Resistência à compressão de concretos de CSS e CPIV sob ação da carbonatação acelerada em 2, 4, 8 e 12 semanas de análise.

No período de 12 semanas de carbonatação acelerada, os resultados para as amostras de pastas das formulações de CSS 90.10 G, CSS 80.20 G e CP IV foram, respectivamente, 20,48 MPa, 27,12 MPa e 47,39 MPa. Esses valores equivalem a uma diferença de 57% e 43% maiores na resistência do CPIV em comparação com as formulações de CSS. Já para os resultados das amostras de concretos das mesmas formulações, na mesma ordem citada a cima, foram, respectivamente, 14,60 MPa, 18,32 MPa e 55,69 MPa. Utilizando a mesma comparação feita para as pastas, o concreto de CP IV obteve uma resistência de 74% e 67% superior as formulações de CSS.

Dessa maneira, é possível perceber que, para a análise de resistência a carbonatação, para ambas as formulações de CSS os maiores valores foram nas amostras de pasta, o que para a formulações de CP IV aconteceu o inverso, o maior valor de resistência foi obtido nas amostras de concreto.

Seguindo a análise de acordo com a NBR 6118 (2014), como feita com resultados de amostras não carbonatadas, as duas formulações de CSS não estão de acordo com o grau mínimo de durabilidade a ser atingindo, em ambientes com pouca agressividade ambiental, pois o maior valor entre eles é inferior a 20 MPa.

Nota-se também que, para a as amostras de CSS, essa queda de resistência ocorrida antes e depois de serem carbonatadas de forma acelerada, já acontece a

partir da semana 2 de ensaio e se mantém praticamente constante até ao final do estudo com 12 semanas.

A grande diferença entre o comportamento do CSS e do CPIV frente a carbonatação é justamente que, enquanto o CSS já demonstra a queda de resistência em 2 semanas de ensaio e a mantém constante no passar do tempo, o CPIV, por sua vez, continua ganhando resistência ao longo do tempo. Isso se deve justamente, como também concluído por Cadore (2018), pelo fato de que, na carbonatação do cimento Portland o principal produto atacado é a portlandita (CH), que não é um produto fornecedor de resistência para a matriz do cimento, então a portlandita sendo descalcificada para a formação do carbonato de cálcio não acarreta em redução de resistência e ainda auxilia a proporcionar a densificação dos poros da matriz. Isso pode ser confirmado pelos resultados de difração de raios X.

O CSS pode possuir uma quantidade de portlandita nos produtos hidratação, formada pelo ativador alcalino utilizado, que é o próprio cimento Portland, mas, essa quantidade não é significativa para impedir a carbonatação dos compostos hidratados fornecedores de resistência mecânica à matriz cimentícia, como a etringita e o CSH. Portanto, isso pode justificar a queda de resistência já em 2 semanas de ensaio. Corroborando assim com Pinto (2019), que comparou o CPIII (um cimento Portland também com adição de escória) com o CSS, o CP III, apresentou maiores resistências a compressão na carbonatação. Mesmo que o CP III e CP IV, possuem grandes quantidades de adições para substituição, o clínquer ainda presente na composição é capaz de formar quantidades maiores de portlandita na hidratação do que o CSS, sendo assim, quando CPIII e CPIV são submetidos a carbonatação, o principal produto descalcificado para originar o carbonato vai ser a portlandita e não etringita e CSH.

Na Tabela 11 é possível analisar a porcentagem de resistência residual das amostras carbonatadas. Essa resistência residual é obtida através da razão percentual entre a resistência da formulação na idade de carbonatação e a resistência da formulação antes de carbonatação.

Tabela 11 - Resistência à carbonatação residual das pastas e concretos em função do tempo de exposição à carbonatação acelerada.

Tempo de exposição (semanas)	Resistência Residual (%)					
	Pastas			Concretos		
	CSS 80.20 G	CSS 90.10 G	CP IV	CSS 80.20 G	CSS 90.10 G	CP IV
2	101	82	121	73	70	147
4	97	83	118	72	67	134
8	107	87	140	73	70	158
12	111	79	142	77	68	159

Fonte: Autor

Na formulação de CSS 80.20 G, o concreto apresentou apenas 77% da resistência antes de ser submetido a carbonatação, já as pastas ainda assim apresentaram acréscimo de resistência em 11%. A formulação de CSS 90.10 G reduziu a resistência em ambas as amostras, de pasta e concreto. O CPIV adquiriu resistência em pastas a nível de 42% e em concreto um acréscimo de aproximadamente 60%.

4.4 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Quanto as análises de microestrutura, foram realizadas amostras para as 4 idades de carbonatação em estudo neste trabalho. Entretanto, a grande demanda e necessidade de manutenção de equipamentos da Central de Análises acarretou em demora de entrega de análises, com isso, os resultados presentes neste trabalho serão apenas de 2 semanas e 4 semanas de carbonatação.

4.4.1 Difração de Raio-X (DRX)

Os difratogramas da análise de DRX das pastas para identificação dos produtos formados no processo de carbonatação acelerada são apresentados a seguir nas Figura 45, Figura 48 e Figura 51.

Nesse estudo, os principais polimorfos de carbonato de cálcio (CaCO_3) identificados nessas análises foram: calcita, vaterita e aragonita.

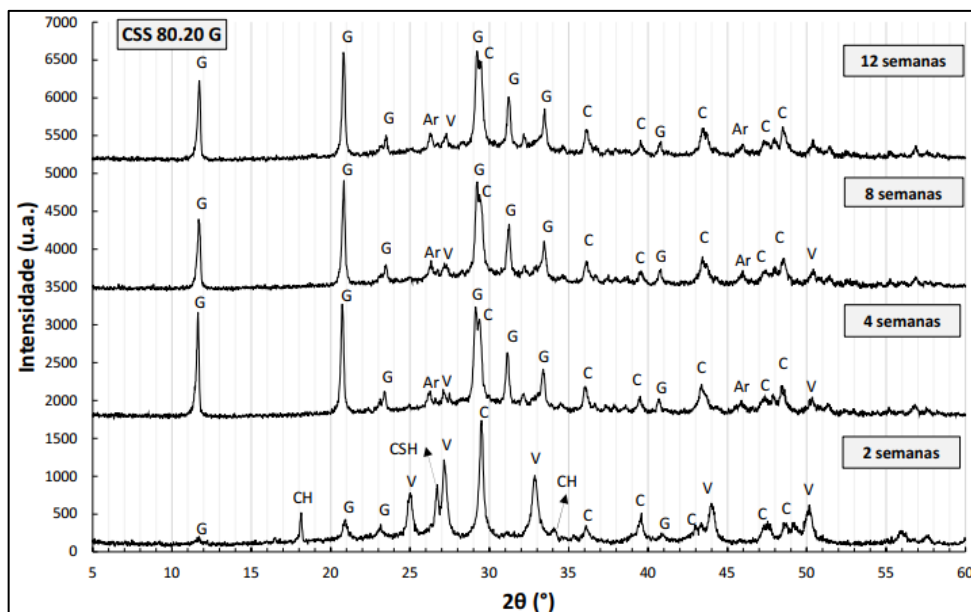


Figura 45 - Difratoograma das pastas de CSS 80.20 G carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas (G: gipsita, C: calcita, V: vaterita, CH: portlandita, Ar: aragonita, CSH: silicato de cálcio hidratado).

Fonte: Autor

Para o CSS 80.20 G, com difratograma presente na Figura 45, foi possível identificar que, em 2 semanas de ensaio, as pastas já apresentaram picos intensos de calcita e vaterita na matriz cimentícia. Ainda foi identificado pico principal de portlandita e CSH, mas sem a presença de picos de etringita. A ausência de picos de etringita na análise, indica que não há mais a presença desse tipo de produto hidratado na matriz, ou seja, foi ela quem sofreu a descalcificação na carbonatação acelerada para a formação de carbonatos.

Em 4 semanas, a formulação de CSS 80.20 G carbonatado, já não apresentou mais a portlandita e o CSH, e elevou os teores de gipsita em mais de 1000 u.a. O que pode ser percebido na Figura 46 em relação ao principal pico de calcita, que no momento que a gipsita aumenta a sua intensidade diminui. Depois das 4 semanas é possível perceber que todos os elementos se mantêm com intensidade constante até ao final do ensaio.

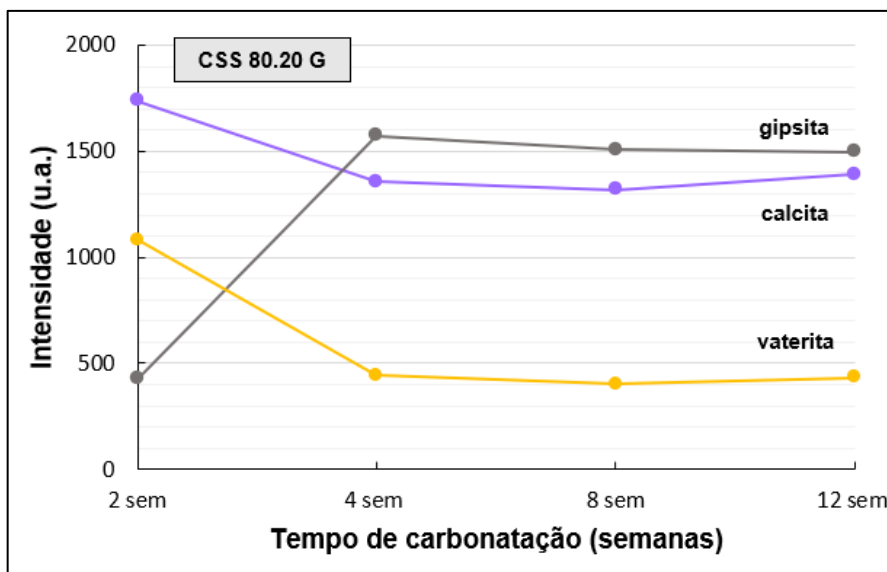


Figura 46 - Intensidade de gipsita, calcita e vaterita no CSS 80.20 C em relação ao tempo de carbonatação.

Fonte: Autor.

No detalhe feito da análise de DRX (Figura 47) dentro do pico de 29° , onde calcita e gipsita aparecem lado a lado, é possível ver essa diferença de intensidades em 4 semanas. Essa alta intensidade de gipsita apresentado na carbonatação deve estar relacionado ao grande teor de sulfato (20%) presente na formulação desse cimento.

Na hidratação do CSS 80.20 G, esse elevado teor de sulfato na composição garante que maior quantidade de etringita seja formada, sendo assim, se descalcificada, há a formação de calcita e gipsita como produto da carbonatação.

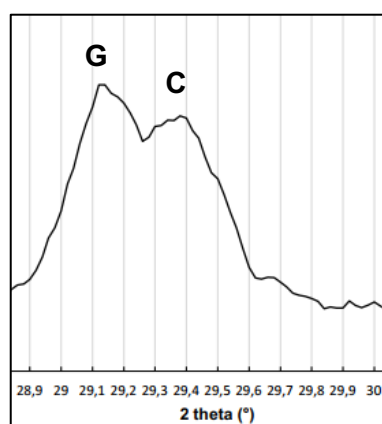
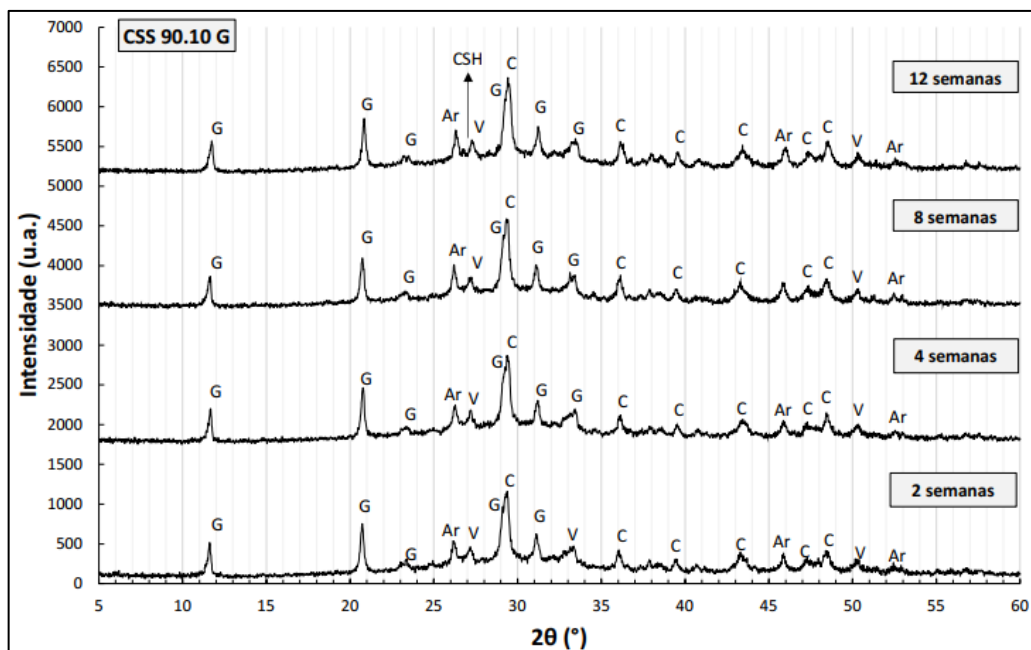


Figura 47 - Difratograma detalhado do pico de 29° de CSS 80.20 G em 4 semanas de carbonatação (G: gipsita em $29,1^\circ$ e C: calcita em $29,4^\circ$).

Fonte: Autor.



**Figura 48 - Difratoograma das pastas de CSS 90.10 G carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas (G: gipsita, C: calcita, V: vaterita, CSH: silicato de cálcio hidratado).
Fonte: Autor**

Na análise de difratograma do CSS 90.10 G apresentado na Figura 48, é possível perceber que desde as 2 semanas de carbonatação até o final do ensaio não houve nenhuma diferença brusca na intensidade dos elementos identificados. E ainda em 12 semanas de carbonatação, foi possível identificar um pico de baixíssima intensidade de CSH ainda presente.

Quanto aos níveis de teores de calcita e gipsita nessa formulação carbonatada, na Figura 49, percebe-se que a intensidade de ambos os compostos se manteve constante em todos os tempos de carbonatação ensaiados. E sempre a intensidade de calcita sempre foi maior do que a gipsita, sendo assim, difere-se o CSS 90.10 G do CSS 80.20 G na carbonatação quanto a intensidade dos compostos formados.

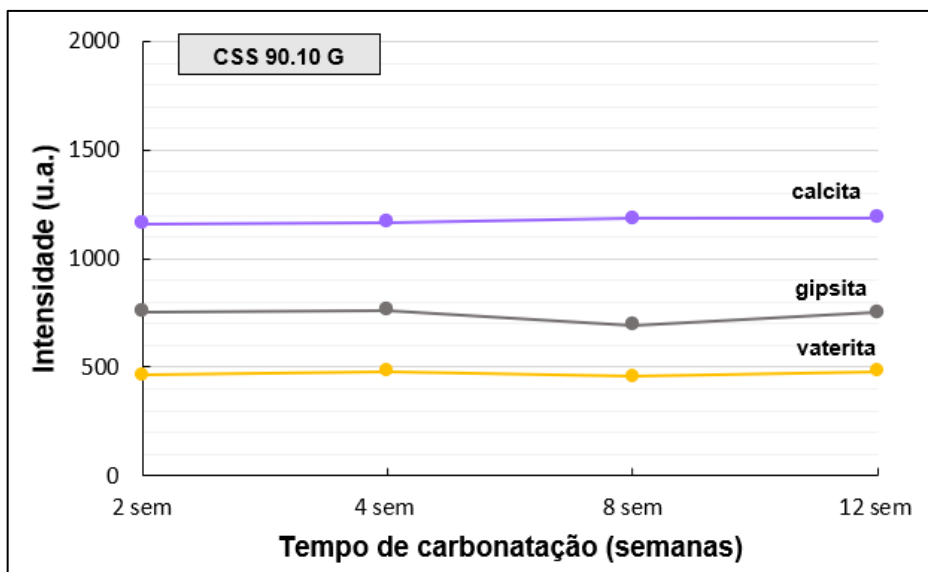


Figura 49 - Intensidade de calcita, gipsita e vaterita na formulação de CSS 90.10 G em relação ao tempo de carbonatação.

Fonte: Autor.

A diferença de intensidade de gipsita e calcita nas formulações de CSS 90.10 G também é possível perceber no detalhamento de difratograma do pico de 29° (Figura 50).

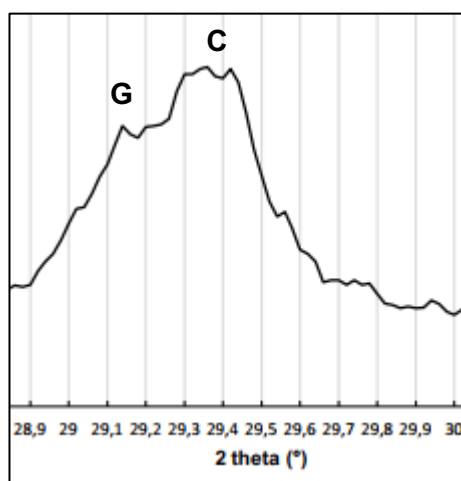
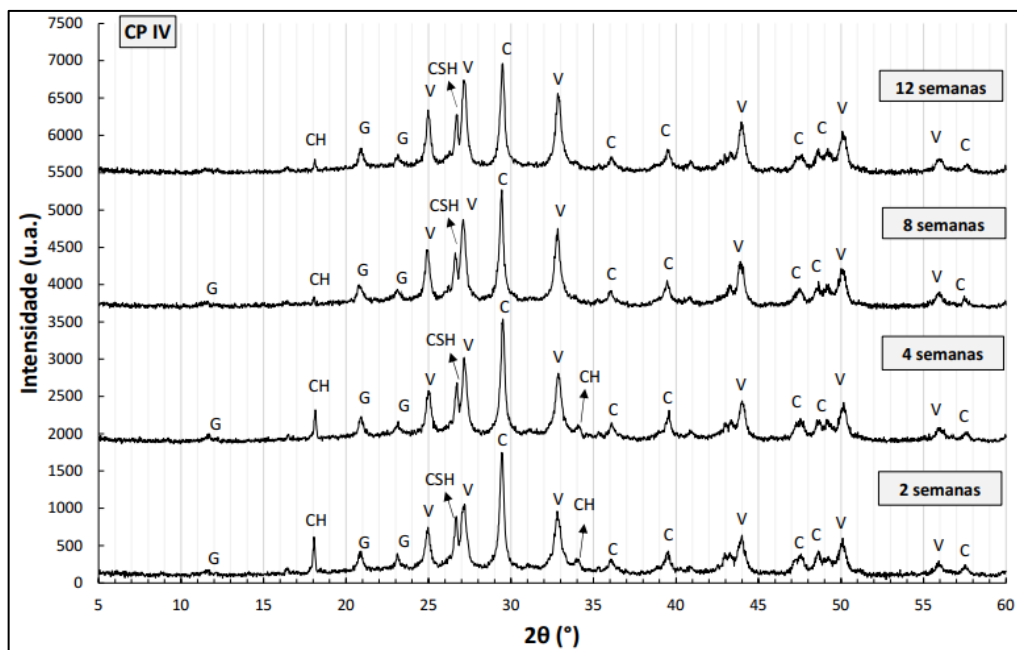
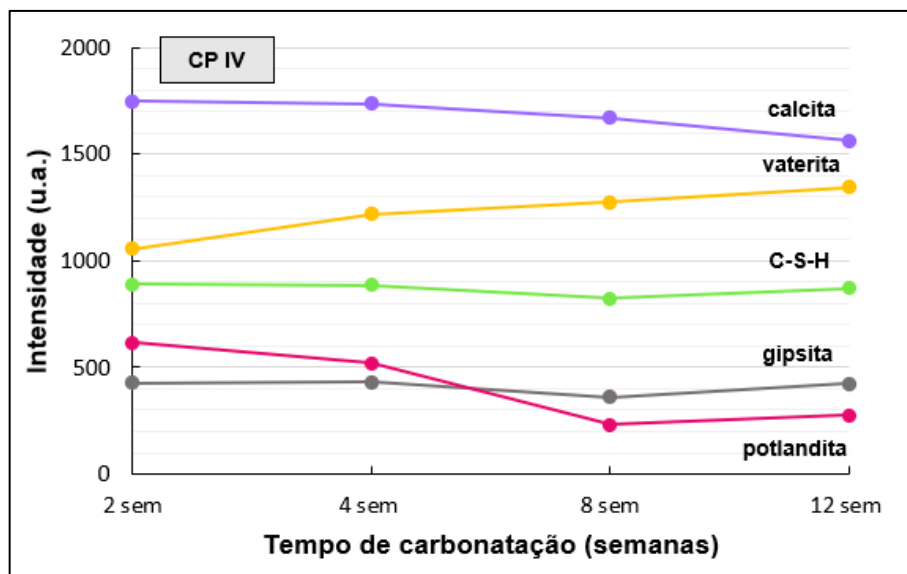


Figura 50 - Difratograma detalhado do pico de 29° de CSS 90.10 G em 8 semanas de carbonatação (G: gipsita em 29,1° e C: calcita em 29,4°).



**Figura 51 - Difratoograma das pastas de CPIV carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas (G: gipsita, C: calcita, V: vaterita, CH: portlandita, CSH: silicato de cálcio hidratado).
Fonte: Autor**

No difratograma das pastas de CPIV (Figura 51) são identificados elevados picos de calcita desde as 2 primeiras semanas de carbonatação. O pico identificado de CSH demonstrou constância de intensidade em todos os ensaios. O pico de portlandita, por sua vez, demonstra sua redução de intensidade com o passar do tempo de carbonatação, confirmando assim que esse é o composto de hidratação que é descalcificado por primeiro nesse processo de carbonatação.



**Figura 52 – Intensidade dos picos de calcita, vaterita, gipsita, CSH e portlandita das pastas de CPIV carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas (G: gipsita, C: calcita, V: vaterita, CH: portlandita, CSH: silicato de cálcio hidratado).
Fonte: Autor.**

A presença de carbonatos de cálcio no CPIV carbonatado é de alta intensidade. Como pode ser visualizado na Figura 52, os níveis de calcita são acima de 1500 u.a. e os níveis de vaterita chegam próximo a 1500 ui em 12 semanas de carbonatação acelerada.

De maneira geral, para as pastas carbonatadas de CSS 90.10 G e de CPIV, a calcita foi o produto com maior intensidade. Já para o CSS 80.20 G, a intensidade de calcita foi superada pela gipsita.

4.4.2 Análise Térmica (TG/DTG)

Nas análises térmicas foi possível identificar os compostos de forma a correlacionar com os resultados de resistência a compressão e os picos obtidos na análise de difração de raios-X.

Nas Figura 53 a Figura 55, são apresentadas as curvas de análise térmica das formulações em estudo nesse trabalho em 2 e 4 semanas de carbonatação.

Para as formulações de CSS também foram adicionadas as análises de TG/DTG de 7 dias em cura úmida dos resultados de Trentin (2020), visto que são as mesmas formulações neste trabalho. Dessa maneira, foi possível comparar os resultados de carbonatação com uma idade antes de ser carbonatada.

De acordo com Scrivener, Snellings e Lothenbach (2016) os picos de perda de massa característicos para cada um dos produtos hidratados são: gipsita em torno de 100 e 140°C, portlandita em 460°C, calcita entre 600 e 800°C, carbonatos metaestáveis (vaterita e aragonita) em torno de 450°C.

Nas análises térmicas de CSS 80.20 G foi possível perceber que do pico de gipsita mostrou-se bem mais intenso nas idades de carbonatação comparado com os 7 dias em cura úmida, corroborando com os resultados de DRX que demonstram esse crescimento de gipsita. O pico de calcita apareceu para as idades de carbonatação e se manteve constante.

A presença de pico de etringita na idade de cura úmida, e a ausência nas idades de carbonatação, demonstram, assim como com os resultados de difratograma de Pinto (2019), que a carbonatação dessas formulações de CSS acontecem majoritariamente pela descalcificação de etringita e C-S-H.

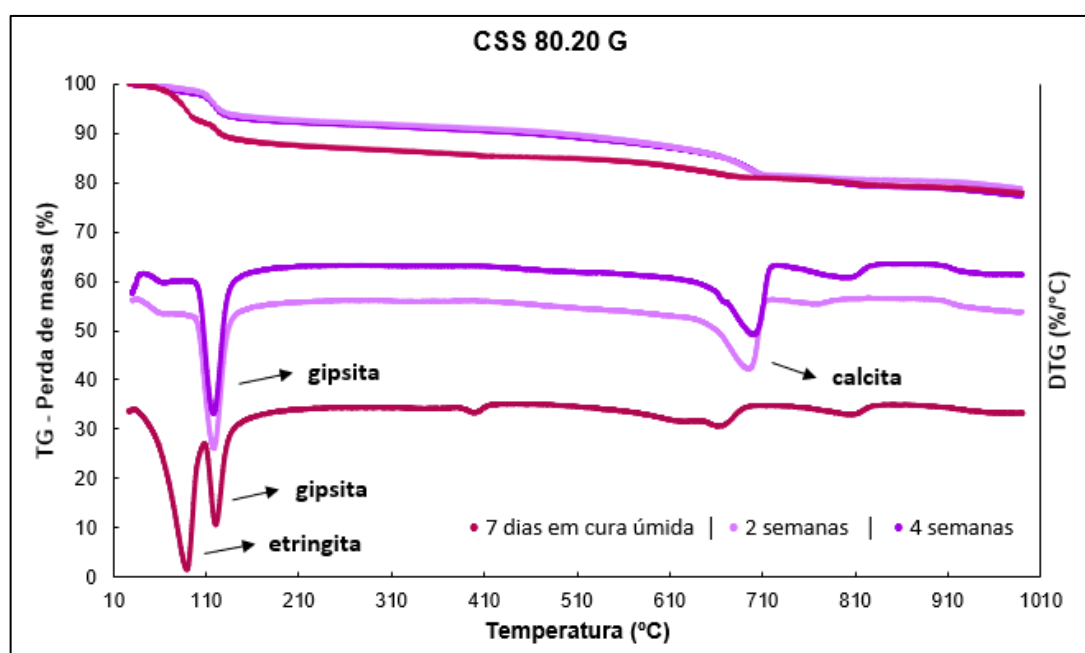


Figura 53 - Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas de CSS 80.20 G: em 7 dias de cura úmida (Trentin, 2020) e em 2, 4 semanas de carbonatação.
Fonte: Autor.

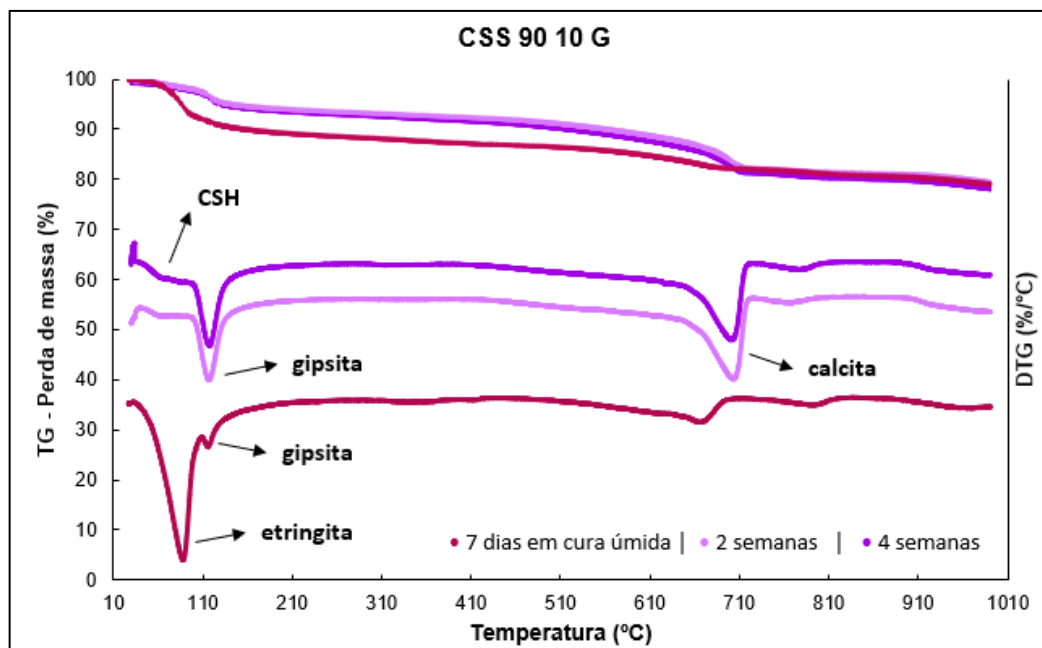


Figura 54 - Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas de CSS 90.10 G em: 7 dias de cura úmida (Trentin, 2020) e em 2, 4 semanas de carbonatação.
Fonte: Autor.

Assim, como para as pastas de CSS 80.20 G, o CSS 90.10 G, também apresenta a ausência de picos de etringita nas análises térmicas das idades carbonatadas. O pico de gipsita das pastas carbonatadas também é mais alto que na fase de hidratação, e ainda apresentam a presença de C-S-H, mesmo que de maneira menos intensa.

De maneira geral, ambas as formulações de CSS apresentaram como produto da carbonatação a formação de calcita e gipsita, apenas o que os diferencia é a intensidade. O CSS com mais teor de sulfato de cálcio, 20% de gipsita, apresenta os picos desses compostos com maior intensidade, sendo capaz de a formação de gipsita superar a calcita.

Essas elevadas taxas de carbonatação dos cimentos supersulfatados, estão extremamente ligadas com o tipo de produto que é atacado na carbonatação. Como é possível verificar nos itens 4.4.1 e 4.4.2, a etringita e o C-S-H são os principais produtos descalcificados sob ação da carbonatação. Como sugere Castellote *et al.* (2008), percebe-se que a taxa de consumo desses elementos nessa reação de carbonatação também é elevada.

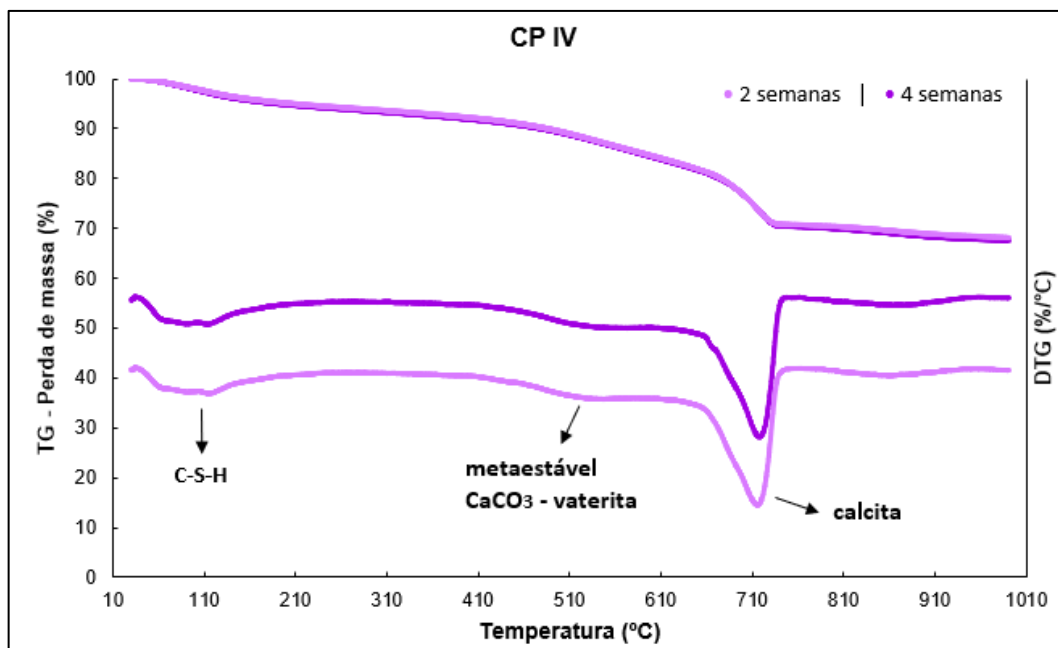


Figura 55 - Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas de CSS 90.10 G em 2 e 4 semanas de carbonatação.

Fonte: Autor.

Quanto à formulação de CPIV, corroborando com as análises de DRX, os produtos de carbonatação nesse cimento são, a calcita e os polimorfos de carbonato de cálcio, como a vaterita, também identificada na Figura 55.

Assim como obtido por Cadore (2019), era esperado que se apresentassem os picos de portlandita também nas análises térmicas. Supõe-se então que essa ausência nesses resultados, seja porque, na região retirada da amostra, a portlandita foi consumida totalmente, restando apenas o C-S-H.

5 CONCLUSÕES

Comparados os resultados das formulações de CSS com a referência de CPIV, atingiram grandes taxas de carbonatação de acordo com a profundidade atingida e perderam entre 25 e 35% de resistência mecânica, atingindo valores menores que 20MPa. Para ambas as formulações de CSS estudadas, se pode concluir que a resistência à carbonatação do CSS é baixa.

De acordo com as taxas de carbonatação obtidas por linearização, é possível concluir que a frente de carbonatação atinge maiores profundidades no CSS ao longo do tempo.

Quanto aos diferentes teores de sulfato de cálcio nas formulações de CSS sob ação de carbonatação, eles influenciam de maneira que, quanto maior a quantidade de sulfato de cálcio, maior a intensidade de carbonatos formados e de gipsita precipitada na matriz.

As análises microestruturais realizadas comprovam que o CSS tem os principais produtos fornecedores de resistência atacados pela carbonatação, o que traz um grande prejuízo na capacidade de resistência a compressão com o passar do tempo, sob ação dessa reação.

E, sendo assim, a etringita e o C-S-H que são descalcificados dessas formulações, passam por esse processo de forma rápida. Assim, o CPIV, que tem como principal produto descalcificado a portlandita, possui taxa de carbonatação bem inferior, porque a portlandita passa por esse processo de carbonatação de maneira mais lenta.

De maneira a complementar estudos anteriores que foram tidos como base de comparação de resultados, este trabalho foi de extrema importância para compreender como o cimento supersulfatado se comporta sob a ação da carbonatação acelerada.

REFERÊNCIAS

- ASHRAF, W. Carbonation of cement-based materials: challenges and opportunities. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 120, p. 558–570, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Estruturas de concreto armado – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 9778**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de CIMENTO PORTLAND - ABCP. Guia básico de utilização do Cimento Portland. **Boletim técnico** 106, São Paulo, 2002.
- ANGULSKI DA LUZ, C.; HOOTON, R. D. Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 69-75, 2015
- ARCELORMITTAL TUBARÃO. Escória de Alto-Forno. 2015. Disponível em:<http://tubarao.arcelormittal.com/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/introducao.asp>. Acesso em: 2 set. 2020.
- BERNAL, S. The resistance of alkali-activated cement-based binders to carbonation. **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 319–332.
- BERNAL, S. A. *et al.*,. Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 42, n. 10, p. 1317–1326, 2012.
- BIJEN, J. NIËL, E. Supersulphated cement from blastfurnace slag and chemical gypsum available in the netherlands and neighbouring countries. **Cement and Concrete Research**, v. 11, p. 307–322, 1981.
- BOB, C., AFANA, E., On-site assessment of concrete carbonation, **Proceedings of the International Conference Failure of Concrete Carbonation**, RILEM, Bratislava, 1993. pp. 84–87.
- BRANCO, F.; PAULO, P.; GARRIDO, M. Vida útil na construção civil. **Boletim Técnico ALCONPAT International**. Mérida, n. 4, p. 22, 2013.

CADORE, D. É. **Durabilidade de concretos à base de cimento álcali ativado: aspectos relacionados à carbonatação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

CASTELLOTE, M. *et al.* Accelerated carbonation of cement pastes in situ monitored by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**; n.38, p.1365–1373, 2008

CASTELLOTE, M. *et al.* Chemical changes and phase analysis of opc pastes carbonated at different CO₂ concentrations. **Materials and Structures**, Springer, v. 42, n. 4, p. 515–525, 2009.

CEBDS, **Redução na emissão de CO₂ é sinônimo de competitividade na indústria global do cimento**. Ago. 2019. Disponível em: <https://cebds.org/reducao-de-co2-sinonimo-de-competitividade/#:~:text=A%20emiss%C3%A3o%20de%20gases%20do,dos%20%C3%BAltimos%20anos%20pela%20Ind%C3%BAstria>. Acesso em: 2 set. 2020

DUTTA, D.K.; BORTHAKUR, P.C. Activation of low lime high alumina granulated blast furnace slag by anhydrite. **Cement and Concrete Research** 711- 722. 1990.

EN 15743, Supersulfated cement - Composition, specifications and conformity criteria. **European Committee for Standardization**, 2010.

ERDEN, E.; OLMEZ, H. The Mechanical properties of supersulphated cement containing phosphogypsum. **Cement and Concrete Research**. Vol. 23, pp. 115-121, 1993.

FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília – Avaliação de pilares**. 2004. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004)

GONÇALVES, Robson; CASTELO, Ana Maria. **O investimento e o papel da construção**. Mar. 2012. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/cc/article/view/22803/21582>. Acesso em: 2 set. 2020

GRUNDS, T. NOWELL, D. V. WILBURN, F. W. Resistance of supersulfated cement to strong sulfate solutions, **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Vol. 72 p.181–190. 2003

GRUSKOVNJAK, A. *et al.*,. **Hydration mechanisms of super sulphated slag cement**. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 7, p. 983-992, 2008.

GRUSKOVNJAK, A. *et al.*,. Quantification of hydration phases in supersulfated cements: review and new approaches. **Advances in Cement Research**, v. 23, p. 265 - 275, 2011.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal: Mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 12, p. 1923 – 1930, 2002.

ISENMANN, A. F. **O processo do alto forno e a produção do aço**. CEFET -MG. 17 pg. 2013. Disponível em: http://sistemas.timoteo.cefetmg.br/nos/_media/bd:artigotecnico:quimica:alto_forno_e_aciaria_08_2018.pdf. Acesso em 24 set. 2020.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. **Advances in alternative cementitious binders**. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 1232-1243, 2011.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and Building Material**. v 23, p. 1189 – 1195, 2009.

LIMA, J. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**,: Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo. 2010.

LIU, S.; WANG, L.; GAO, Y.; YU, B.; TANG, W. Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement. **Thermochemica Acta**, v. 605, p. 37-42, 2015.

MAJUMDAR, A. J; SINGH, B.; EVANS, T. **Glass fibre-reinforced supersulphated cement**. *Composites*. p. 177- 183 Jul. 1981.

MAJUMDAR, A. J; STUCKE, M. S. Microstructure of glass fibre reinforced supersulphated cement. **Cement and Concrete Research**. v. 11, p. 781 – 788, 1981.

MASOUDI, R.; HOOTON, R. D. Examining the hydration mechanism of supersulfated cements made with high and low-alumina slags. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, p. 193-203, 2019.

MATSCHEI, T.; BELLMANN, F.; STARK, J. Hydration behaviour of sulphate-activated slag cements. **Advances in Cement Research**, v. 17, n. 4, p. 167-178, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2014.

NEDELIJKOVIC, M.; SAVIJA, B.; ZUO, Y.; LUKOVIC, M.; GUANG, Y. Effect of natural carbonation on the pore structure and elastic modulus of the alkaliactivated fly ash and slag pastes. **Construction and Building Materials**, v. 161, 687- 704 p., 2018

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. ed. 2. Bookman. São Paulo, 2013

NISHIKAWA, T.; SUZUKI, K; ITO, S. Decomposition of synthesized ettringite by carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 22, n. 1, p. 6-14, 1992

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. **Material and Structures**. v. 25. p. 293-304. 1992

PAULETTI, C. **Análise coMParativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C.C. Carbonatação Acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v 7, n 4, p 7-20, 2007.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

PERIN, J. R. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de maercado sujeitos à carbonatação acelerada**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós -Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás, 2013.

PINTO, S Requião. **Durabilidade de matrizes cimentícias de cimento supersulfatado e de cimentos portland: ataque por sulfatos, carbonatação e penetração de cloretos**. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, 2019.

PINTO, S. R. *et al.* Resistance of phosphogypsum-based supersulfated cement to carbonation and chloride ingress. **Construction and Building Materials**. v. 263, p. 17, 2020.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 256 pg. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2010.

RUBERT, Sílvia. **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: formulação e mecanismos de hidratação**. 2015. 114 pg. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015

RUBERT, S. *et al.* Hydration mechanisms of supersulfated cement. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v 134, p 971–980, 2018.

SCRIVENER, K; SNELLINGS, R; LOTHENBACH, B. **A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials**. Boca Ranton: CRC Press. 2016.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório anual**, Rio de Janeiro, 2013.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: Academic Press, 1990.

TRENTIN, Priscila Ongaratto. **Comportamento do cimento supersulfatado (CSS) exposto ao ataque por sulfatos de origem externa**. 2020.162 pg. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Pato Branco, PR, 2020.

THOMAZ, E. C. S. **Escória de alto forno: notas de aula**. 51 pg. 2012. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/escoria_fabricacao.pdf . Acesso em: 25 set. 2020.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. [S.l.]: Cement-och betonginst., 1982.

VESIKARI, E. Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement. **Technical Research Center of Finland**. Report n 553. (Espoo). Finland, 53 p.

WOLTRON, G. The utilisation of GGBFS for advanced supersulfated cements. **World Cement**, 2009.

APENDICE A

A seguir são apresentados os resultados da resistência mecânica obtidos neste estudo.

Tabela 12 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo em 28 dias de cura úmida.

Pastas				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	25,55	24,46	1,95	7,99
	26,12			
	21,72			
CSS 90.10 G	25,95	25,92	0,06	0,25
	25,83			
	25,98			
CP IV	30,37	33,44	3,31	9,91
	38,04			
	31,91			
Concretos				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	24,86	23,87	0,77	3,23
	23,78			
	22,98			
CSS 90.10 G	22,6	21,53	0,96	4,46
	21,71			
	20,27			
CP IV	33,99	35,08	0,87	2,49
	35,13			
	36,13			

Fonte: Autor

Tabela 13 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo em 2 semanas de carbonatação acelerada.

Pastas				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	24,32	24,80	1,20	4,82
	23,63			
	26,44			
CSS 90.10 G	21,88	21,12	1,17	5,54
	22,02			
	19,47			
CP IV	43,8	40,32	3,64	9,03
	41,86			
	35,29			
Concretos				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	16,32	17,55	0,90	5,12
	17,87			
	18,45			
CSS 90.10 G	15,87	15,14	0,60	3,94
	14,41			
	15,14			
CP IV	52,97	51,64	4,16	8,06
	55,94			
	46,01			

Fonte: Autor

Tabela 14 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo 4 semanas de carbonatação acelerada.

Pastas				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	26,54	23,82	1,96	8,25
	21,96			
	22,97			
CSS 90.10 G	22,24	21,37	1,14	5,34
	19,76			
	22,12			
CP IV	38,57	39,45	0,96	2,44
	39,00			
	40,79			
Concretos				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	16,78	17,16	1,39	8,10
	19,02			
	15,68			
CSS 90.10 G	13,45	14,44	0,80	5,54
	14,47			
	15,41			
CP IV	37,36	46,87	6,94	14,82
	53,75			
	49,49			

Fonte: Autor.

Tabela 15 -Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo 8 semanas de carbonatação acelerada.

Pastas				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	24,91	26,09	0,86	3,28
	26,45			
	26,91			
CSS 90.10 G	17,9	22,59	3,65	16,15
	23,06			
	26,8			
CP IV	46,26	46,67	4,14	8,87
	51,93			
	41,82			
Concretos				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	18,8	17,48	0,98	5,63
	17,19			
	16,44			
CSS 90.10 G	15,23	15,08	0,27	1,79
	14,7			
	15,31			
CP IV	55,67	55,30	2,37	4,29
	52,23			
	58			

Fonte: Autor.

Tabela 16 - Resistência à compressão das amostras das formulações em estudo 12 semanas de carbonatação acelerada

x				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	27,29	27,12	0,31	1,14
	27,39			
	26,69			
CSS 90.10 G	22,12	20,48	1,78	8,71
	18,00			
	21,32			
CP IV	43,09	47,39	4,63	9,78
	53,82			
	45,25			
Concretos				
	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	19,18	18,32	0,66	3,58
	18,19			
	17,59			
CSS 90.10 G	14,1	14,60	0,35	2,41
	14,81			
	14,88			
CP IV	57,09	55,69	1,71	3,07
	56,7			
	53,28			

Fonte: Autor

APENDICE B

A seguir são apresentados os resultados de profundidade de carbonatação obtidos neste estudo.

Tabela 17 - Resultados de profundidade de carbonatação para os concretos 2 semanas de carbonatação acelerada.

	Profundidade (mm)		Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	17	18	16,88	0,84	5,01
	15,5	16,5			
	16,5	16,5			
	18,5	18			
	16,5	16			
	16,5	17			
CSS 90.10 G	15,5	16	18,29	2,37	12,94
	17,5	18			
	22	21			
	21	21,5			
	18,5	17			
	16	15,5			
CP IV	3,5	3,5	3,38	0,51	14,97
	3,5	2,5			
	4	3			
	3	3,5			
	3	3,5			
	3	4,5			

Fonte: Autor

Tabela 18 - Resultados de profundidade de carbonatação para os concretos 4 semanas de carbonatação acelerada.

	Profundidade (mm)		Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	25	25	25,00	0,00	0,00
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
CSS 90.10 G	25	25	25,00	0,00	0,00
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
CP IV	5,0	6,0	5,50	0,68	12,31
	5,0	6,0			
	4,5	5,5			
	6,5	5,5			
	6,0	4,5			
	6,5	5,0			

Fonte: Autor

Tabela 19 - Resultados de profundidade de carbonatação para os concretos 8 semanas de carbonatação acelerada.

	Profundidade (mm)		Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	25	25	25,00	0,00	0,00
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
CSS 90.10 G	25	25	25,00	0,00	0,00
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
CP IV	8,5	8,0	8,38	0,82	9,79
	7,5	9,5			
	8,5	7,0			
	9,5	8,0			
	9,5	9,0			
	7,5	8,0			

Fonte: Autor

Tabela 20 - Resultados de profundidade de carbonatação para os concretos 12 semanas de carbonatação acelerada.

	Profundidade (mm)		Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
CSS 80.20G	25	25	25,00	0,00	0,00
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
CSS 90.10 G	25	25	25,00	0,00	0,00
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
	25	25			
CP IV	10	9,5	10,21	0,83	8,11
	10	9,5			
	9	12			
	10	11			
	10	10			
	11,5	10			

Fonte: Autor