CAPÍTULO 5 · Parte I · Deterioração e ensaios
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/ew7h2214
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/h006bz19

EFEITOS DA CARBONATAÇÃO ACELERADA NO CIMENTO SUPERSULFATADO FORMULADO COM GIPSITA CALCINADA

Isabel Crisitna Magro[1]*, Fernanda Frason Moreira[2]; Caroline Angulski da Luz[3]
*Autor de contato: isabelmagro@alunos.utfpr.edu.br

[1] PPGEC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil

RESUMO

O cimento supersulfatado (CSS) é um material hidráulico produzido a partir da escória de alto forno, sulfato de cálcio e ativador alcalino. As matérias primas podem ser oriundas de resíduos de outras indústrias o que o caracteriza como um material de baixo impacto ambiental. A durabilidade é uma característica necessária para qualquer matriz cimentícia, para garantir que as propriedades físicas e químicas se mantenham por mais tempo. A ocorrência da carbonatação em concretos reduz a durabilidade do material, pois causa despassivação das armaduras e perda de resistência da matriz cimentícia. Este estudo comparou o comportamento à carbonatação acelerada de formulações de CSS produzidos com escória de alto forno e gipsita calcinada em relação ao Cimento Portland (CP). Foram realizados ensaios de resistência à compressão, profundidade de carbonatação e análises de microestrutura. Os resultados mostram que o CSS sofre uma frente de carbonatação 5 vezes maior que no CP. Ensaios mecânicos comprovam a perda de resistência com o passar do tempo e as análises de microestrutura apresentam a decomposição de produtos de etringita e CSH da matriz em precipitação de carbonatos de cálcio. Concluindo assim que o CSS apresenta alta suscetibilidade ao processo de carbonatação perdendo significativamente suas propriedades físico-químicas.
Palavras-chave: cimento supersulfatado; carbonatação acelerada; durabilidade.

ABSTRACT

Supersulfated cement (SSC) is a hydraulic binder produced from blast furnace slag, calcium sulfate, and an alkaline activator. These raw materials can originate from industrial by-products, characterizing SSC as a low environmental impact material. Durability is an essential property of any cementitious matrix, ensuring the long-term preservation of its physical and chemical characteristics. Carbonation in concrete reduces material durability, as it leads to depassivation of reinforcing steel and loss of strength of the cementitious matrix. This study compared the behavior under accelerated carbonation of SSC formulations produced with blast furnace slag and calcined gypsum to that of Portland cement (PC). Compressive strength tests, carbonation depth measurements, and microstructural analyses were performed. The results showed that SSC exhibited a carbonation front approximately five times deeper than that observed in PC. Mechanical tests confirmed a progressive loss of strength over time, while microstructural analyses indicated decomposition of ettringite and C–S–H accompanied by precipitation of calcium carbonates. It can

therefore be concluded that SSC presents high susceptibility to carbonation, with significant degradation of its physicochemical properties.
Keywords: Supersulfated cement; accelerated carbonation; durability.

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 Cimento Portland (CP), 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 CO_2 da indústria cimenteira para a atmosfera e diminuir a quantidade de energia necessária para produzir um material aglomerante. (GRUSKOVNJAK et al. 2008).

A durabilidade do concreto e dos compósitos de cimentos é uma propriedade essencial. 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, GARRIDO e PAULO; 2013). Portanto os estudos de durabilidade nesses novos materiais são extremamente relevantes para seu desenvolvimento.

A carbonatação é uma reação química que acontece entre o CO_2, 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, 2004). A intensificação da frente de carbonatação do concreto se correlaciona com a capacidade que o CO_2 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).

Desse modo, a questão norteadora desse trabalho é avaliar a durabilidade da matriz cimentícia do CSS sob a ação da carbonatação, comparando seus resultados em relação a cimento Portland tipo IV, e como os teores de sulfato de cálcio nas formulações de CSS influenciam na matriz cimentícia sob essas condições.

2.METODOLOGIA

2.1 Materiais

2.1.1 Escória de alto forno

Foi utilizado a escória de alto forno já moída com uma massa específica de 2,83g/cm³ e superfície específica de 4460 cm²/g. Atende as especificações da EN 15743: 2010, como a soma CaO+MgO+SiO2 é maior do que 66,7 e a relação CaO+MgO/SiO2 é maior do que 1, podendo ser utilizada para o CSS. A porcentagem de 13,3 % de Al2O3 favorecendo uma maior formação de

etringita na matriz do cimento nas primeiras idades. Na Quadro 1 está presente a composição do material.

2.1.2 Sulfato de cálcio

A origem da fonte de sulfato de cálcio utilizada é produto do processo da calcinação da gipsita moída de fórmula química $CaSO_4.2H_2O$. 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. Após a calcinação a gipsita para a sua forma de sulfato de cálcio, sem a presença de água. A composição química desse material é apresentada Quadro 1.

2.1.3 Ativador alcalino

O ativador utilizado para fazer parte das formulações de CSS é o CP V ARI da marca Itambé. As características físicas como massa específica, superfície específica e a composição química desse material são informados no Quadro 1.

2.1.4 Cimento Portland – IV 32 RS

O cimento CP IV 32 RS da marca Itambé, foi utilizado para ser a formulação de referência para comparação com as formulações de cimento supersulfatado. A composição dele é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição química dos materiais em teor %

Elementos	Escória	Sulfato de Calcio	Ativador alcalino (CPV)	CP IV – 32 RS
SiO_2	31,3	0,2	19,32	23,39
Fe_2O_3	0,7	0,1	3,07	4,18
Al_2O_3	13,3	0,2	4,58	9,89
CaO	42,8	28,7	61,86	44,91
SO_3	2,6	59,4	3,05	2,12
MgO	4,8	0,5	1,97	2,1
CaO livre			0,82	0,68
K_2O	0,4	0,1		
Na_2O	0,6	1,0		
Perda ao fogo	2,6	9,9		4,77
Resíduo insolúvel			0,93	25,51
Adições inorgânicas do processo	6			
Equivalente alcalino			0,69	1,2
Massa Específica	2,83 g/cm³		3,09 g/cm³	2,84 g/cm³
Superfície específica (Blaine)	4460 cm²/g		4405 cm²/g	4259 cm²/g

Fonte: os autores.

2.1.5 Agregados miúdo e graúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural e submetido ao ensaio de granulometria de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O módulo de finura é igual a 1,61, diâmetro máximo de 1,2 mm e massa específica igual a 2,51g/cm³.

O agregado graúdo utilizado foi a brita basáltica nº 0 e submetido ao ensaio de granulometria de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Ela possui módulo de finura igual a 5,59, diâmetro máximo de 9,5 mm e massa específica igual a 2,95g/cm³.

2.2 Pasta e Concretos

Para comparação com a referência de CP IV RS, foram definidas duas formulações de CSS: 80.20 G (80% de escória e 20% de gipsita) e 90.10 G (90% de escória e 10 % de gipsita), ambos com teores de 5% de ativador alcalino. As pastas dos aglomerantes em estudo foram formuladas com traço igual a 1:0,45 (aglomerante:água), mesmas proporções utilizadas por Trentin (2020), seguindo as quantidades do quadro 2.

Quadro 2 – Quantidade de materiais para pasta em 100g de cimento

Cimento		Escória (g)	Gipsita (g)	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: os autores.

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

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 5 cm x 10cm.

A condição inicial de cura das amostras após a moldagem, foi de cura úmida em água com cal com concentração de 3g/L até 28 dias de idade das amostras.

2.3. Ensaios

O método utilizado para avaliação da resistência a carbonatação das formulações foi o modelo acelerado de carbonatação. Ensaios realizados em: 2, 4, 8 e 12 semanas de carbonatação acelerada. As idades de carbonatação acelerada 4, 8 e 12 semanas foram as mesmas utilizadas por Pinto (2019) que estudou carbonatação natural no CSS. Para avaliar a influência da carbonatação acelerada nas propriedades das pastas e concretos, as amostras foram submetidas a ensaio de resistência a compressão, profundidade de carbonatação e análise da microestrutura pré e pós carbonatação para determinação de suas características.

2.3.1 Carbonatação acelerada

Para iniciar o método de carbonatação acelerado, após a etapa de cura úmida de 28 dias, as amostras foram submetidas ao pré-condicionamento com duração de 29 dias, com as mesmas etapas seguidas por Cadore (2018) e for fim então encaminhadas para o ensaio em câmara de carbonatação.

O pré-condicionamento consiste em retirar as amostras da câmara úmida, manter em câmara climatizada a na temperatura de 23±2ºC e com umidade relativa de 60%, por um período de 15 dias até que a massas não sofra mais variações, após isso envolver as amostras em plástico filme a fim de homogeneizar a umidade no interior da amostra por um período de 14 dias.

Depois do pré-condicionamento inicia-se a carbonatação acelerada nas seguintes condições: temperatura a 30±2ºC; concentração de CO2 de ±3% e umidade relativa de 65±2%. As amostras ficaram até 12 semanas nessas condições em câmara de carbonatação.

2.3.2 Resistência à compressão

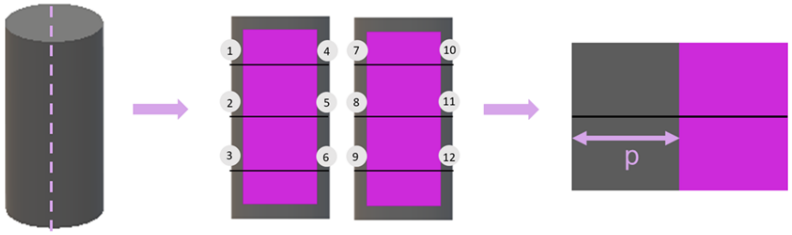
As pastas e os concretos passaram por ensaio de resistência, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019), antes do processo de carbonatação, aos 28 dias e durante o período de carbonatação acelerada em 2, 4, 8 e 12 semanas. Dessa maneira, para cada umas das formulações, foram moldadas 3 amostras de pastas e 3 amostras de concreto para esse ensaio para cada idade de ensaio. O ensaio de resistência à compressão foi realizado no Laboratório de Materiais da UTFPR – Pato Branco com a prensa hidráulica EMIC.

2.3.3 Profundidade de carbonatação

Para a realização das medidas de profundidade de carbonatação, os corpos de prova de concreto precisam ser rompidos diametralmente após serem retirados da câmara de carbonatação. O procedimento adotado é descrito por RILEM CPC 18 (56-MHM, 1988), que consiste em aspergir com um borrifador um indicador ácido-base, sobre a superfície da amostra recém fraturada e com isso ser possível visualizar regiões com cores distintas, percebendo a diferença de pH da região mais externa da amostra com a parte mais interna. Para isso foi usada uma solução de fenolftaleína 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 devem ser realizadas as medidas com o auxílio de um paquímetro, da região em que o não ficou roxa, indicando a espessura que foi carbonatada.
Será escolhido 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 1, totalizando doze medidas por amostra.

Figura 1 - Ilustração da medida de profundidade de carbonatação



Fonte: os autores.

2.3.4 Microestrutura

Para a realização das análises de microestrutura DRX e TG/DTG as amostras de pasta foram fragmentadas e em seguida submetidas ao processo de parada de hidratação sendo submersas em acetona por 2 horas, em seguida filtradas no filtro de Büchner acoplado a uma bomba de vácuo. Na sequência foram colocadas na estufa com temperatura de 40±2ºC por 24 horas, para completar a secagem. Após a secagem foram moídas manualmente até atingirem granulometria passante na peneira 150 µm. Foram realizadas amostras para DRX para as 4 idades de carbonatação propostas no estudo (2, 4, 8, 12 semanas) e TG/DTG em 2 idades de carbonatação (2 e 4 semanas). As análises foram realizadas na Central de Análises da UTFPR – Câmpus Pato Branco.

Para o ensaio de DRX, as principais fases identificadas são: gipsita (29,1°), calcita (29,5°), portlandita (18º) e vaterita (27°). E para realização do ensaio foram utilizados os seguintes parâmetros: comprimento de onda igual a 1,54 Ă; leitura dos dados no intervalo de 5º a 60° (2Θ); velocidade de varredura de 3°/min; 0,5°/s; radiação de Cu Kα e passo de medidas a cada 0,02º.

Para o ensaio de TG/DTG, as principais fases identificadas são: etringita (90-110ºC), gipsita (120-130ºC), CSH, carbonato-metaestável. (450ºC) e calcita (660 – 950º).). E para realização do ensaio foram utilizados os seguintes parâmetros: massa da amostra em pó de10 mg; intervalo de temperatura de 30 a 1000°C; atmosfera de gás nitrogênio (N2); fluxo do gás de 100 mL/min e taxa de aquecimento de 10°C/min

3. RESULTADOS

3.1 Profundidade de Carbonatação

Com a aspersão 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 2) foram os mais significativos para as formulações de CSS, visto que foi a única idade em que foi possível verificar essa diferença de cor e mensurar a profundidade. Já nas semanas seguintes de ensaio (Figura 3), CSS sob aspersão de fenolftaleína não houve indicação de cor, considerado então totalmente carbonatado até o final do estudo em 12 semanas.

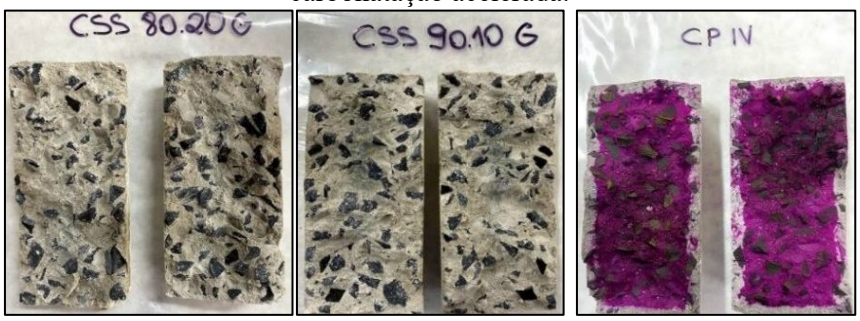
Em média os resultados de profundidade em 2 semanas foram: CSS 80.20 G atingiu 16,88 mm, CSS 90.0 G atingiu 18,29 mm e o CP IV atingiu 3,38 mm.

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



Fonte: os autores.

Figura 3 - Amostras de concreto com aplicação de fenolftaleína após 4 semanas de exposição à carbonatação acelerada.



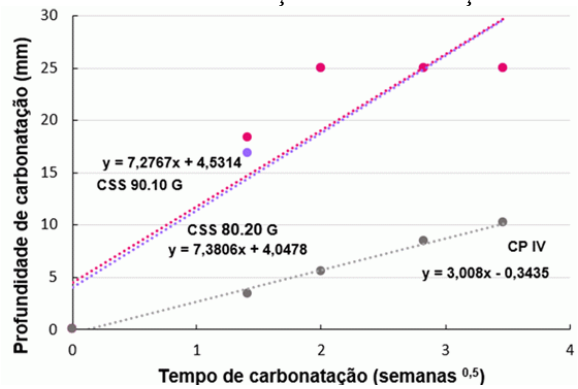
Fonte: os autores.

O CP IV, por sua vez, teve uma frente de carbontação gradativa, sendo possível mensurá-las em todas as semanas chegando a um valor máximo de 10,2 mm em 12 semanas.

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, única diferença é que foram aos 56 dias (referentes a 8 semanas). Essa diferença pode ter se dado pela diferença entre os tempos de cura estabelecidos para o desenvolvimento das amostras. Pinto (2019) realizou um tempo de cura de 91 dias, neste estudo foi desenvolvido com tempo de cura de 28 dias.

Na linearização desses pontos de profundidade (Figura 4) foi possível obter, a taxa de carbonatação acelerada das formulações em estudo. Considerando 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 respetivas de 7,38 e 7,24 são menos resistentes à carbonatação que o CPIV que apresentou uma taxa de 3,01.

Figura 4 - Linearização das profundidades de carbonatação acelerada em função do tempo para obtenção dos coeficientes de carbonatação das formulações em estudo.



Fonte: os autores.

3.2 Resistência à compressão

No Quadro 3 estão apresentados os valores dos resultados médios de resistência à compressão obtidos das amostras de pasta e concreto sob carbonatação acelerada das formulações.

Quadro 3 – Quantidade de materiais para pasta em 100g de cimento

Resistencia à compressão média ± desvio padrão (MPa)					
PASTA	**28 dias**	**2 semanas**	**4 semanas**	**8 semanas**	**12 semanas**

CSS 80.20 G	24,46 ± 1,95	24,80 ± 1,20	23,82 ± 1,96	26,09 ±0,86	27,12 ± 0,31
CSS 90.10 G	25,92 ± 0,06	21,12 ± 1,17	21,37 ± 1,14	22,59 ± 3,65	20,48 ± 1,78
CP IV	33,44 ± 3,31	40,32 ± 3,64	39,45 ± 0,96	46,67 ± 4,14	47,39 ± 4,63

CONCRETO	28 dias	2 semanas	4 semanas	8 semanas	12 semanas
CSS 80.20 G	23,87±0,77	17,55 ± 0,90	17,16 ± 1,39	17,48 ± 0,98	18,32 ± 0,66
CSS 90.10 G	21,53±0,96	15,14 ± 0,60	14,44 ± 0,80	15,08 ± 0,27	14,60 ± 0,35
CP IV	35,08±0,87	51,64 ± 4,16	46,87 ± 6,94	55,30 ± 2,37	55,69 ± 1,71

Fonte: os autores.

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. 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 respetivamente, 20,48 MPa; 27,12 MPa e 47,39 MPa. Esses valores equivalem a uma diferença de 57% e 43%, a mais 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 acima, foram respetivamente 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% a mais que as formulações de CSS.

Seguindo a análise de acordo com a NBR 6118 (2014) 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, que é requisito para ser utilizado.

A grande diferença entre o comportamento do CSS e do CPIV frente a carbonatação é justamente que o CSS demonstra a queda de resistência já em 2 semanas de ensaio e a mantém constante no passar do tempo, o CPIV por sua vez continua por ganhar resistência. 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 não acarreta na 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 por causa do ativador alcalino utilizado que é o próprio cimento Portland, mas, não é significativa para impedir a carbonatação da etringita e CSH, fornecedores resistência mecânica a matriz o que justifica a queda de resistência já em 2 semanas de ensaio.

3.3 DRX

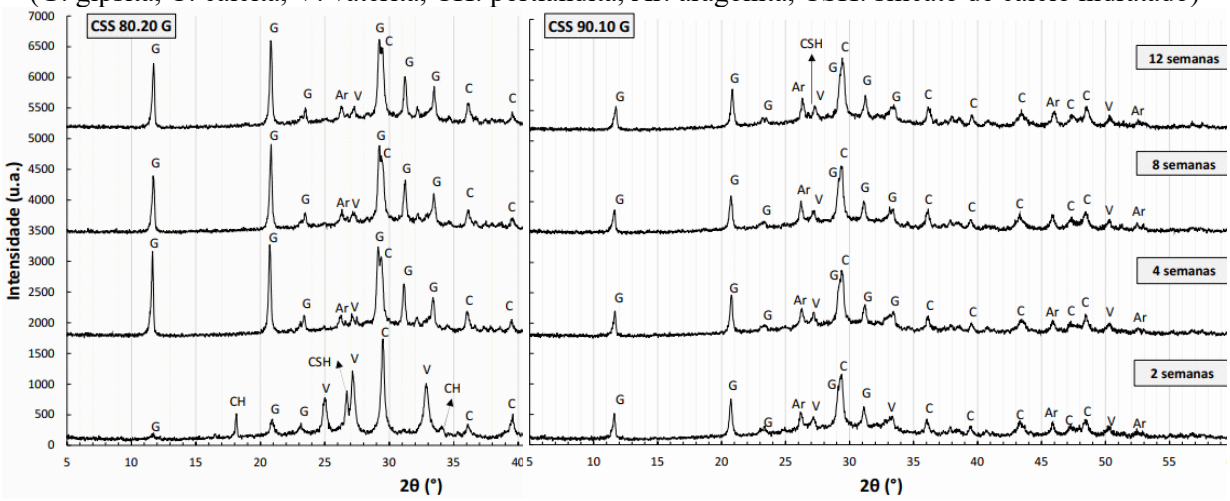
Os difratogramas do processo de carbonatação acelerada são apresentados a seguir nas Figura 5, Figura 6. Nesse estudo, os principais polimorfos de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) identificados nessas análises foram: calcita, vaterita e aragonita.

Para o CSS 80.20 G (Figura 5) foi possível identificar que, em 2 semanas de ensaio, as pastas já apresentaram picos intensos de calcita e vaterita na matriz. Ainda foi identificado pico de portlandita e CSH, mas sem a presença de picos de etringita. A ausência de picos de etringita significa que não há mais a presença desse tipo de produto hidratado na matriz, ou seja, etringita sofreu a descalcificação na carbonatação acelerada para a formação de carbonatos. Depois das 4

semanas é possível perceber que todos os elementos se mantêm com intensidade constante até ao final do ensaio. 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.

Para o CSS 90.10 G (Figura 5), desde as 2 semanas de carbonatação 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. A intensidade de calcita foi maior que gipsita, diferenciando-se do CSS 80.20 G na carbonatação quanto a intensidade dos compostos formados.

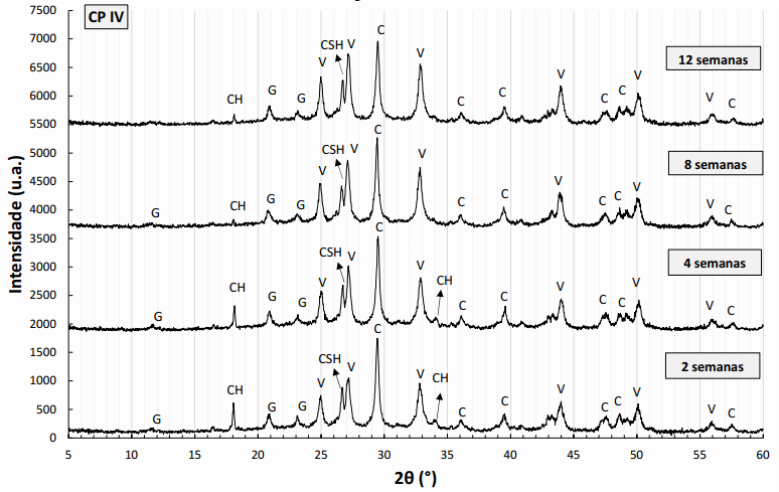
Figura 5 - Difratograma das pastas de CSS 80.20 G e CSS 90.10 G carbonatado em 2, 4, 8 e 12 semanas
(G: gipsita, C: calcita, V: vaterita, CH: portlandita, Ar: aragonita, CSH: silicato de cálcio hidratado)



Fonte: os autores.

No difratograma de CPIV (Figura 6) é apresentado elevados picos de calcita desde as 2 semanas de carbonatação. O pico identificado de CSH demonstrou constância de intensidade em todos os ensaios. O pico de portlandita, reduz de intensidade com o passar do tempo confirmando sua descalcificação por primeiro nesse processo de carbonatação do CP.

Figura 6 - Difratograma 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

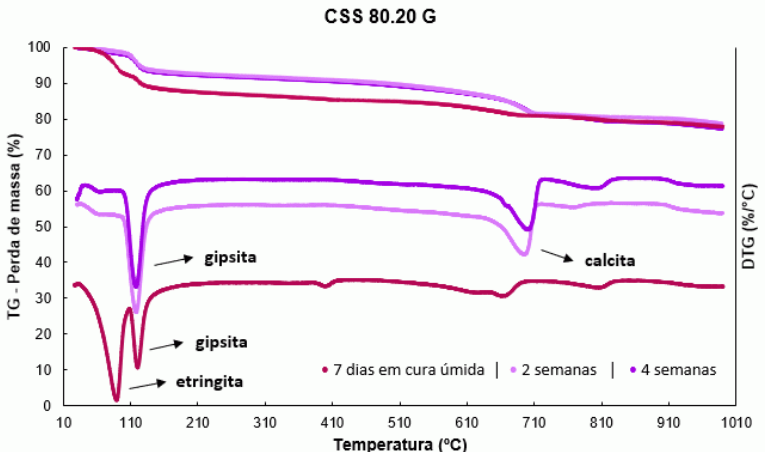


Fonte: os autores.

3.4 TG / DTG

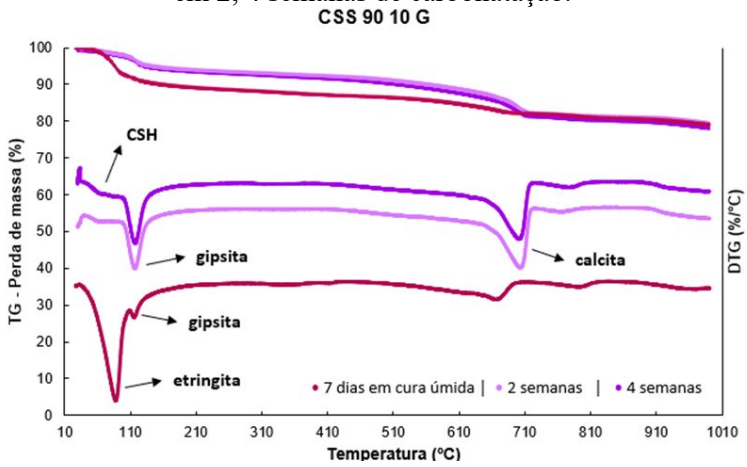
Nas Figura 7 e Figura 8, são apresentadas as curvas de análise térmica das formulações de CSS em 2 e 4 semanas de carbonatação. Para complementar o gráfico foram incluídos as curvas das mesmas formulações com idade de 7 dias em cura úmida realizados por Trentin (2020).

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



Fonte: os autores.

Figura 8 - Análise Termogravimétrica (TG/DTG) das pastas de CSS 90.10 G: em 7 dias de cura úmida e em 2, 4 semanas de carbonatação.



Fonte: os autores.

Nas análises térmicas de CSS 80.20 G foi possível perceber que do pico de gipsta 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, demostram, assim como com os resultados de difratograma de Pinto (2019) que, a carbontação dessas formulações de CSS acontecem majoritariamente pela descalcificação de etringita e CSH. 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.

Essas elevadas taxas de carbonatação dos cimentos supersulfatados, estão extremamente ligadas com o tipo de produto que é atacado na carbonatação: a etringita e o CSH são os principais produtos descalcificados. Como sugere Castellote et al (2008), percebe-se que a taxa de consumo desses elementos nessa reação de carbonatação também é elevada.

4. CONCLUSÕES

As formulações de CSS comparadas com a referência de CPIV, atingiram grandes taxas de carbonatação apresentando uma profundidade de carbonatação elevada 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.

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.

Quanto aos diferentes teores de sulfato de cálcio nas formulações de CSS, 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.

Este trabalho foi de extrema importância para compreender como o cimento supersulfatado se comporta sob a ação da carbonatação acelerada, complementando estudos anteriores com os quais foram comparados resultados e abre novas oportunidades para trabalhos futuros com o intuito de estudar outras condições de carbonatação e novas formulações de CSS a fim de melhorar o comportamento frente a essa condição que se apresentou agressiva ao cimento supersulfatado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Estruturas de concreto armado – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

BRANCO, F. A.; PAULO, P.; GARRIDO, M. **Vida útil na construção civil**. Mérida, México: Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción (ALCONPAT Internacional), 2013. Boletim Técnico, n. 4

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. Chemical changes and phase analysis of opc pastes carbonated at different CO_2 concentrations**. Materials and Structures**, Springer, v. 42, n. 4, p. 515–525, 2009.

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

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

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. Carbontação Acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v 7, n 4, p 7-20, 2007.

PINTO, Sabrina 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.

RILEM. CPC 18 (56-MHM): **Measurement of hardened mortar water absorption**. Paris: RILEM, 1988.

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

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.