

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Caroline Vieira Alves**

**CLORETO DE SÓDIO COMO ACELERADOR EM  
CIMENTOS COM FOSFOGESSOS: ANÁLISE DE  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POTENCIAL DE  
CORROSÃO**

Porto Alegre  
Novembro de 2021

**CAROLINE VIEIRA ALVES**

**CLORETO DE SÓDIO COMO ACELERADOR EM  
CIMENTOS COM FOSFOGESSOS: ANÁLISE DE  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POTENCIAL DE  
CORROSÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil

**Orientadora: Ana Paula Kirchheim**  
**Coorientador: Matheus Henrique Gomes de Medeiros**

Porto Alegre  
Novembro de 2021

**CAROLINE VIEIRA ALVES**

**CLORETO DE SÓDIO COMO ACELERADOR EM  
CIMENTOS COM FOSFOGESSOS: ANÁLISE DE  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POTENCIAL DE  
CORROSÃO**

Este Trabalho de Conclusão foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, novembro de 2021

Prof<sup>ª</sup>. Ana Paula Kirchheim  
Dra. pela UFRGS  
Orientadora

Eng. Matheus Henrique Gomes de Medeiros  
Eng. pela UFPA  
Coorientador

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof<sup>ª</sup>. Ana Paula Kirchheim**  
**(UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Matheus Henrique Gomes de Medeiros**  
**(UFRGS)**  
Eng. pela UFPA

**Márlon Longhi**  
**(Vale S.A.)**  
Dr. pela UFRGS

**José da Silva Andrade Neto**  
**(UFRGS)**  
Me. pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais, por terem me ensinado a sonhar, acreditar e voar.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais. À minha mãe, Josecler, por ser a minha força, exemplo, maior incentivadora e por não medir esforços para me ver feliz e realizada. Ao meu pai, Vandr e, por ser leveza, parceria, carinho e me ensinar que saber nunca   demais. Voc es acreditaram mais do que eu mesma e fizeram dos meus sonhos os seus. Obrigada por serem apoio e amor incondicional.

Ao meu irmão, Luca, por ser o meu maior presente, me fazer rir durante toda a vida e ser demonstra o de carinho e amor sempre.

  minha orientadora, prof. Ana Paula Kirchheim, por ter me acolhido desde o segundo semestre e acompanhado toda minha gradua o, com carinho, aten o e apoio incomparável. Foste exemplo e inspira o. Muito obrigada!

Ao NORIE, ao LAMTAC e ao LINCE, pela disponibilidade de suas infraestruturas, e por terem me ensinado tanto através das pessoas que ali conheci: Ao M rton, pela aten o, dedica o e paciência neste trabalho e no meu desenvolvimento desde bolsista. Ao Matheus, pelo apoio, auxílio e total disponibilidade para ajudar. Ao Rafael Mascolo, pela disponibilidade, aten o e auxílio para a realiza o deste trabalho.   Muriel e ao Erich, por terem sido minhas primeiras inspira es de pesquisadores. Aos laboratoristas Airton e Ari, pelo auxílio durante o TCC e, também ao Gilmar, pelo apoio enquanto bolsista. E a todos os amigos e professores que encontrei nesses espaços, todos agregaram muito aprendizado.

Agradeço ao apoio e a confiança da Intercement Participa es S.A pela doa o dos materiais testados.

Aos meus amigos, por terem sido ouvidos, apoio, compreensão e os melhores companheiros que eu poderia ter tido nessa jornada. Aos que conheci aqui em Porto Alegre, agradeço por terem construído as minhas melhores memórias.

Por fim, agradeço   UFRGS, pelo ensino de excelência oferecido e por ter sido casa nos últimos sete anos.

## RESUMO

Resíduo proveniente do processo de produção de ácido fosfórico da indústria de fertilizantes, o fosfogesso é uma fonte de sulfato de cálcio ambientalmente amigável para controle de pega em cimentos, em substituição à gipsita. Entretanto, por se tratar de um resíduo, a possibilidade de presença de impurezas (como  $F^-$  e  $P_2O_5$ ) pode ocasionar prolongamento do tempo de pega acima do desejado, bem como diminuição da resistência mecânica inicial. Uma alternativa para mitigar esse problema é a utilização de aceleradores de hidratação/resistência, existindo vários tipos disponíveis. Considerando o custo, o cloreto de sódio pode se mostrar uma opção atrativa. Todavia, sabe-se que os cloretos são causadores de corrosão em armaduras. Assim, a incorporação destes materiais como aceleradores de pega em concretos, induz a cuidados frente a durabilidade das estruturas. Desta forma, este trabalho busca analisar a influência da utilização de fosfogesso em cimentos Portland e o impacto do uso do cloreto de sódio como acelerador. Foi realizada a verificação do comportamento das misturas em primeiras idades, através de calorimetria isotérmica em pastas, resistência à compressão e potencial de corrosão em concretos. Os resultados confirmam que a presença de fosfogesso retarda o processo de pega, porém, não possui grande influência nas resistências finais. Ainda, a presença de cloretos nos teores testados não causou potenciais que indicassem alta probabilidade de corrosão de armaduras.

Palavras-chave: Fosfogesso. Cloreto de Sódio. Tempo de Pega. Resistência Mecânica. Corrosão.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Programa Experimental .....	13
Figura 2 - Areia .....	16
Figura 3 - Croqui de Corpo de Prova Prismático .....	18
Figura 4 - Preparação das Barras: (a) Corte e Furação (b) Imersão em Ácido Clorídrico (c) Barras Secas .....	18
Figura 5 - Barra Pronta .....	19
Figura 6 - Corpos de Prova Cilíndricos (a) e Prismáticos (b): Acondicionados em Câmara Úmida .....	20
Figura 7 - Fluxo e Calor Acumulado: Cimento 100% Gipsita.....	21
Figura 8 - Fluxo e Calor Acumulado: Cimento 50% Gipsita e 50% Fosfogesso.....	22
Figura 9 - Fluxo e Calor Acumulado: Cimento 100% Fosfogesso .....	22
Figura 10 – Resistências Médias à Compressão [Mpa] .....	24
Figura 11 – Potencial de Corrosão em Traços 0% Cloretos.....	25
Figura 12 – Potencial de Corrosão em Traços 0,15% Cloretos.....	26
Figura 13 – Potencial de Corrosão em Traços 0,30% Cloretos.....	26

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores Máximos de Íons Cloreto .....	13
Tabela 2 - Traço em Massa .....	14
Tabela 3 – Caracterização dos cimentos .....	14
Tabela 4 – Composição química dos cimentos .....	15
Tabela 5 - Caracterização Agregado Miúdo.....	15
Tabela 6 - Caracterização Agregado Graúdo .....	16
Tabela 7 – Tempo de Início de Pega - Calculado pelo Gráfico de Calorimetria .....	23
Tabela 8 - Resultados de Abatimento.....	23

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
2.1 Matriz Experimental .....	13
2.2 Materiais .....	14
2.2.1 Cimentos .....	14
2.2.2 Agregados .....	15
2.2.3 Cloreto de sódio .....	16
2.2.4 Aço .....	17
2.2.5 Água .....	17
2.3 Métodos .....	17
2.3.1 Calorimetria de Condução Isotérmica.....	17
2.3.2 Preparação das Barras e Formas .....	18
2.3.3 Concretagem .....	19
2.3.4 Resistência Mecânica à Compressão .....	20
2.3.5 Potencial de Corrosão .....	20
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
3.1 Calorimetria .....	21
3.2 Abatimento do Concreto.....	23
3.3 Resistência à Compressão .....	24
3.4 Potencial de Corrosão .....	25
<b>4 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>27</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>27</b>

# **CLORETO DE SÓDIO COMO ACELERADOR EM CIMENTOS COM FOSFOGESSOS: ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E POTENCIAL DE CORROSÃO**

## **SODIUM CHLORIDE AS AN ACCELERATING ADMIXTURE IN CEMENTS WITH PHOSPHOGYPSUM: COMPRESSIVE STRENGTH AND CORROSION POTENTIAL ANALYSIS**

Caroline Vieira Alves

### **RESUMO**

Resíduo proveniente do processo de produção de ácido fosfórico da indústria de fertilizantes, o fosfogesso é uma fonte de sulfato de cálcio ambientalmente amigável para controle de pega em cimentos, em substituição à gipsita. Entretanto, por se tratar de resíduo, a possibilidade de presença de impurezas (como  $F^-$  e  $P_2O_5$ ) pode ocasionar prolongamento do tempo de pega acima do desejado, bem como diminuição da resistência mecânica inicial. Uma alternativa para mitigar esse problema é a utilização de aceleradores de hidratação/resistência, existindo vários tipos disponíveis. Considerando o custo, o cloreto de sódio pode se mostrar uma opção atrativa. Todavia, sabe-se que os cloretos são causadores de corrosão em armaduras. Assim, a incorporação destes materiais como aceleradores de pega em concretos, induz a cuidados frente a durabilidade das estruturas. Desta forma, este trabalho busca analisar a influência da utilização de fosfogesso em cimentos Portland e o impacto do uso do cloreto de sódio como acelerador. Foi realizada a verificação do comportamento das misturas em primeiras idades, através de calorimetria isotérmica em pastas, resistência à compressão e potencial de corrosão em concretos. Os resultados confirmam que a presença de fosfogesso retarda o processo de pega, porém, não possui grande influência nas resistências finais. Ainda, a presença de cloretos nos teores testados não causou potenciais que indicassem alta probabilidade de corrosão de armaduras.

Palavras-Chave: Fosfogesso. Cloreto de Sódio. Tempo de Pega. Resistência Mecânica. Corrosão.

### **ABSTRACT**

A residue from the industry of fertilizers, phosphogypsum is an environmentally friendly source of calcium sulphate to control the setting of cements, replacing gypsum. However, the possibility of the presence of impurities (like  $F^-$  e  $P_2O_5$ ) can delay the setting time longer than desired and reduce the initial mechanical strength. An alternative to mitigate this problem is using setting/hardening accelerators. There are several types available. Among them, considering the cost, sodium chloride can be considered an attractive suggestion. Although, it is known that chlorides cause corrosion in reinforcement concrete. So, incorporating these materials as setting accelerators in concrete induces care towards the durability of the structures. Thus, this study seeks to analyze the influence of the use of phosphogypsum in Portland cements and the impact of the use sodium chloride as an accelerating admixture. Isothermal calorimetry in pastes, compressive strength and corrosion potential in concrete were used to measure to analyze the mixtures. The results indicate that the presence of phosphogypsum delays the setting process. However, significant influence on the final strengths were not verified. The presence of chlorides did not impact on the potential of corrosion tests.

Keywords: Phosphogypsum. Sodium Chloride. Setting Time. Mechanical Strength. Corrosion.

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é apontado como o segundo material mais consumido do mundo, com produção anual estimada em cerca de 30 bilhões de toneladas, ficando atrás apenas da água (MONTEIRO *et al.*, 2017). Considerando-se os materiais de construção, estima-se que a quantidade de concreto utilizada seja duas vezes maior do que a soma dos demais materiais, incluindo madeira, aço, alumínio e plástico (WBCSD, 2009). Sua versatilidade, resistência e durabilidade fazem com que este material esteja fortemente presente em nosso ambiente, na construção de edifícios, estradas, pontes, sistemas de água, esgoto e drenagem.

A produção de concreto se dá tradicionalmente pela mistura de cimento Portland (aglomerante), areia (agregado miúdo), brita (agregado graúdo) e água. Tal cimento parte do processo de moagem, homogeneização e calcinação à 1450 °C da mistura de dois componentes principais: calcário e argila, acrescidos de eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera (BATTAGIN, 2011). Ao material resultante deste processo, dá-se o nome de clínquer.

Normalmente a gipsita é adicionada para a produção do cimento Portland como fonte de SO<sub>3</sub>, a fim de controlar o tempo de pega, retardando o endurecimento inicial do clínquer em contato com a água (BALTAR; LUZ; BASTOS, 2004). A NBR 16697 (ABNT, 2018) determina como 4,5% o teor máximo de SO<sub>3</sub> em relação a massa de cimento. Os maiores produtores mundiais de gipsita são Estados Unidos, Irã e Canadá. No Brasil, o estado de Pernambuco é responsável por 95% da produção, e as jazidas da região do Araripe possuem o minério considerado de melhor qualidade do mundo (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005). No entanto, considerando que o Brasil é um país de grande extensão, suprir com este material cimenteiras dos estados da região centro-oeste, sudeste e sul, se torna cara e ambientalmente desfavorável, visto a grande distância.

Assim, uma fonte possível de sulfato de cálcio que tem sido empregada pela indústria cimenteira atualmente é o fosfogesso. Este material é um resíduo gerado a partir da produção de ácido fosfórico na indústria de fertilizantes agrícolas. Para cada tonelada de ácido fosfórico produzida, são geradas de quatro a seis toneladas de fosfogesso (RASHAD, 2017).

Devido à elevada produção de ácido fosfórico, a qual é atrelada à elevada demanda por alimentos (MAZZILI, 2016), estima-se que são gerados 170 milhões de toneladas de fosfogesso por ano em ordem mundial e até 5,6 milhões de toneladas no Brasil (SILVA; GIULIETTI, 2010). Esta produção está aumentando e pode chegar até 200 a 250 milhões de toneladas nas próximas duas décadas (IAEA, 2013).

No entanto, uma das preocupações acerca deste material é o seu descarte. Kuzmanović (2020), apresenta que apenas 15% da produção mundial é reciclada para a produção de materiais de construção, enquanto 85% do fosfogesso é deixado ao ar livre sem nenhum tratamento. As grandes áreas de aterro em céu aberto podem criar sérios problemas de poluição de águas, solo e ar, causando danos à saúde humana (CANUT *et al.*, 2008).

Tais fatos corroboram a necessidade de ampliar a utilização do fosfogesso, sendo a construção civil, um mercado promissor. Como já citado, a presença de sulfato de cálcio, viabiliza a utilização deste material como substituto à gipsita, principalmente em plantas industriais a maiores distâncias do polo produtor de gipsita no país. Entretanto, a presença de impurezas pode provocar efeitos indesejados no concreto, como o retardo excessivo do tempo de pega (SHEN, 2012). Porém, são inúmeros os fatores dependentes do teor e natureza das impurezas, bem como são diversos os tratamentos para purificação do fosfogesso, fazendo com que as condições de utilização e seus efeitos, adversos ou não, sejam bastante variáveis (COSTA, 2020).

Estudos sobre a utilização de fosfogesso em cimentos apresentam diversos resultados. Islam (2017), avaliou cimentos com adição de fosfogesso de duas categorias (bruto e lavado). Seus resultados apresentam um aumento considerável no tempo de pega para adições maiores que 2% de fosfogesso bruto. Já para os traços com fosfogesso tratado, o tempo de pega diminuiu com o aumento da proporção de adição, evidenciando a influência das impurezas no comportamento. De maneira análoga, estudos realizados por Andrade Neto *et al.* (2021), apresentam retardos na hidratação e redução de resistência mecânica em argamassas produzidas com adição de fosfogesso não tratado, em comparação a traços com gipsita ou fosfogesso tratado a partir da adição de cal hidratada. Ainda, podem ser observadas menores tensões de escoamento e viscosidade nas argamassas contaminadas. Além destes, Shen *et al.* (2012) também retrata o retardo expressivo no tempo de pega causado pelo fosfogesso, e atribui tal resultado à presença de fósforo nas amostras do resíduo. Em contraponto, Sert e Altun (2004), avaliaram adições de diferentes teores de fosfogesso sem tratamentos em comparação ao cimento com gipsita e os tempos de pega se mostraram semelhantes na maioria dos teores. Esta discrepância entre os resultados é característica da alta variabilidade entre os teores de impurezas presentes nos fosfogessos.

Desta forma, visto que podem ocorrer retardos exagerados no tempo de pega com a utilização de fosfogesso não tratados, uma alternativa para mitigar tais efeitos é a utilização de aditivos aceleradores de reação, que proporcionam o adiantamento da pega e/ou um aumento no desenvolvimento inicial de resistência à compressão (MYRDAL, 2007). Para Lee e Kim (2020), tais aceleradores para concreto podem ser divididos em dois grupos principais: aceleradores de pega e de resistência, determinados pelas características de liberação de calor da reação entre o cimento e a água. Existem dois tipos de agentes de aceleradores de resistência: sais inorgânicos e produtos químicos orgânicos (REN *et al.*, 2021). Dentre os vários aceleradores relatados até o momento, os sais inorgânicos solúveis em água fornecem ao concreto um melhor desempenho de resistência inicial (LEE, 2020). Para Aitcin e Flatt (2016), o cloreto de cálcio foi o aditivo acelerador mais eficiente e utilizado, sendo sua ação amplamente estudada. Já o cloreto de sódio (NaCl), também é apresentado por Bauer (2000) como uma substância que possui efeitos de aceleração de pega em cimentos. Por se tratar de um material barato e de fácil acesso, esta alternativa pode se apresentar como um bom custo-benefício, incentivando o seu estudo como acelerador. Entretanto, ao propor a utilização de aceleradores de base cloreto, evidencia-se a preocupação com relação à corrosão das armaduras, logo, ao se pensar em usar o cloreto de sódio como alternativa para mitigar os efeitos do uso do fosfogesso em cimentos, estudos avaliativos devem ser empregados. Nesta linha, Ribeiro e Cunha (2014) apresentam o ensaio de potencial eletroquímico como medida para a probabilidade de reação de um metal com o meio que o rodeia. Em concreto armado, trata-se da reação da armadura com o eletrólito concreto. Neste método, busca-se a delimitação de zonas de potenciais diferentes que indicam áreas de comportamentos diferentes do aço. Monitorando-se o potencial ao longo do tempo, podem ser observadas as mudanças no processo de corrosão de estruturas. Vieira (2003), Cabral (2000) e Mota (2016) utilizaram tal método através de medições com o uso de potenciostatos e eletrodos de referência. Através de faixas de valores de potencial, a ASTM C876 determina a probabilidade de corrosão de armaduras (ASTM, 2015).

Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal a identificação da influência da adição de cloretos como acelerados de reação em cimentos com fosfogessos, buscando viabilizar a substituição total ou parcial da gipsita por fosfogesso, como fonte de sulfato de cálcio na produção do cimento Portland. Os cimentos propostos foram analisados por meio da avaliação do seu processo de hidratação em pastas, quanto a resistência à compressão e o potencial de corrosão em corpos de prova de concreto armado.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Matriz Experimental

Definiu-se um programa experimental a partir de três cimentos produzidos industrialmente, combinados com três teores de cloreto de sódio. A escolha dos teores de cloretos foi baseada na NBR 12655 (ABNT, 2015), que apresenta os teores máximos de íons  $Cl^-$  para as diferentes classes ambientais, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Teores Máximos de Íons Cloreto

Classe de Agressividade	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto ( $Cl^-$ ) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto Protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,3
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,4

Fonte: NBR 12655 (2015).

As classes II, III e IV, tratam de ambientes urbanos, marinhos e industriais (ABNT, 2015). Assim, utilizou-se esses limites como parâmetros para a definição dos teores: 0% (referência), 0,15% e 0,30% de íons  $Cl^-$  sobre a massa de cimento.

O fluxograma experimental da pesquisa está apresentado na Figura 1. Os ensaios citados serão apresentados e discutidos no item 2.3.

Figura 1 - Programa Experimental



O traço para concretagem foi estabelecido a partir de proporções padrão realizada em estudos preliminares, com consumo de cimento fixo em  $330\text{kg/m}^3$ . Devido à não utilização de aditivos superplastificantes, a relação água/cimento foi fixada em 0,6 (sendo 0,53 o valor comumente praticado, em traço com aditivo). Esta relação foi averiguada em estudo anterior, mostrando-se adequada para a produção de um concreto coeso e com abatimento de 120mm, para o traço

referência – cimento 100% gipsita e sem adição do acelerador (100GIP\_0Cl). As proporções em massa estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Traço em Massa

Cimento	Areia	Brita	a/c	NaCl (0,15% Cl)	NaCl (0,30% Cl)
1,000	2,306	3,329	0,600	0,00247	0,00494

## 2.2 Materiais

### 2.2.1 Cimentos

Três cimentos do tipo “CP V-ARI RS”, produzidos para fins de pesquisa, a partir de dosagem diferenciada do mesmo clínquer e de três fontes de sulfato de cálcio: 100% gipsita; 50% gipsita e 50% fosfogesso; 100% fosfogesso foram utilizados. Os dados referentes aos ensaios de caracterização em pastas realizados pelo fornecedor estão apresentados na Tabela 3, sendo: IP (min) – Tempo de Início de Pega em minutos; FP (min) – Tempo de Fim de Pega em minutos; A (%) – Água necessária para pasta de consistência normal; Perda ao Fogo (%); #200 - percentual retido na peneira 75  $\mu$ m; Blaine – Determinação da finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar; R1, R2 e R3 (MPa) – Resistência à Compressão em idade 01, 07 e 28 dias.

Tabela 3 – Caracterização dos cimentos

100% Gipsita		100% Fosfogesso		50% Gipsita / 50% Fosfogesso	
IP (min)	170	IP (min)	250	IP (min)	220
FP (min)	230	FP (min)	335	FP (min)	305
A (%)	34,1%	A (%)	33,1%	A (%)	33,0%
Perda ao fogo (%)	4,26	Perda ao fogo (%)	4,12	Perda ao fogo (%)	3,59
#200	0,21	#200	0,21	#200	0,22
Blaine	4715	Blaine	4980	Blaine	4740
R1 (MPa)	21,70	R1 (MPa)	20,60	R1 (MPa)	22,30
R2 (MPa)	37,20	R2 (MPa)	38,50	R2 (MPa)	39,00
R3 (MPa)	48,10	R3 (MPa)	46,10	R3 (MPa)	45,60

Fonte: Indústria cimenteira parceira, 2019.

A composição química de cada cimento supracitado é apresentada na Tabela 4:

Tabela 4 – Composição química dos cimentos

100% Gipsita		100% Fosfogesso		50% Gipsita / 50% Fosfogesso	
Comp. Química	%	Comp. Química	%	Comp. Química	%
SiO <sub>2</sub>	19,44	SiO <sub>2</sub>	19,92	SiO <sub>2</sub>	20,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,46	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,28	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,64	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,74	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,71
CaO	59,12	CaO	58,37	CaO	58,16
MgO	2,99	MgO	3,56	MgO	3,49
SO <sub>3</sub>	4,15	SO <sub>3</sub>	4,11	SO <sub>3</sub>	3,98
Na <sub>2</sub> O	0,28	Na <sub>2</sub> O	0,29	Na <sub>2</sub> O	0,31
K <sub>2</sub> O	0,84	K <sub>2</sub> O	0,8	K <sub>2</sub> O	0,84

Fonte: Indústria cimenteira parceira, 2019.

### 2.2.2 Agregados

Como agregado miúdo, utilizou-se areia quartzosa regular seca, proveniente do Rio Jacuí (RS). A composição granulométrica do material foi determinada através da NBR 248 (ABNT, 2003). Ainda, foram determinadas as massas específicas e unitárias, de acordo com a NBR 52 (ABNT, 2009) e a NBR 45 (ABNT, 2006), respectivamente. Os resultados dos ensaios de caracterização da areia estão apresentados na tabela na Tabela 5. A distribuição granulométrica desse agregado também pode ser observada pela Figura 2.

Tabela 5 - Caracterização Agregado Miúdo

Peneira	% Retido Médio	% Acumulado Médio
#6,3	0%	0%
#4,8	2%	2%
#2,4	4%	6%
#1,2	9%	15%
#0,6	17%	32%
#0,3	53%	85%
#0,15	14%	99%
Fundo	1%	100%
Módulo de Finura		2,38
Dimensão Máx.		4,8mm
Massa Unitária pap [kg/m <sup>3</sup> ].		1520
Massa Específica d3 [kg/m <sup>3</sup> ].		2470

Figura 2 - Areia



O agregado graúdo utilizado para a composição dos concretos é de brita basáltica 1, proveniente de Montenegro (RS), com dimensão máxima de 19mm, cujos dados característicos encontram-se na Tabela 6. Determinou-se: composição granulométrica, por meio da NBR 248 (ABNT, 2003); massa unitária, a partir da NBR 45 (ABNT, 2006); e índice de forma, a partir da NBR 7809 (ABNT, 2019). Os agregados foram utilizados secos.

Tabela 6 - Caracterização Agregado Graúdo

Peneira	% Retido Médio	% Acumulado Médio
#25	0%	0%
#19	3%	3%
#12,5	75%	78%
#9,5	21%	99%
Fundo	1%	100%
Módulo de Finura		0,01
Dimensão Máx.		19mm
Massa Unitária pap [kg/m <sup>3</sup> ].		1620
Comprimento médio C [mm]		21,77
Espessura Média E [mm]		11,35
Índice de Forma		1,92

### 2.2.3 Cloreto de sódio

A fim de acelerar as reações de início e fim de pega, bem como analisar o comportamento das primeiras idades em concretos, através da resistência mecânica, foi adicionado às misturas três teores de Cl<sup>-</sup>, obtidos através da utilização de cloreto de sódio P.A. (NaCl). A partir da massa atômica, calculou-se a quantidade de NaCl necessária para atendimento dos teores de íons desejados, a partir da Equação 1:

$$0,33\%NaCl = 0,20Cl^-$$

Eq. 1

#### 2.2.4 Aço

Com intuito de verificar a possibilidade de corrosão, foram utilizadas duas barras de aço CA50 Ø5mm como armadura de cada corpo de prova de potencial de corrosão. Na extremidade das barras foi fixado um fio de cobre rígido, de diâmetro 2,5mm, a fim de promover adequado contato elétrico. O método de preparação das barras será descrito em 2.3.2.

#### 2.2.5 Água

Para a realização de todas as pastas e concretos produzidos neste trabalho, utilizou-se água deionizada, a fim de inibir qualquer possibilidade de influência no teor total de íons cloreto. Tal alteração poderia ocorrer pela presença de químicos utilizados no tratamento da água potável, como o cloro.

### 2.3 Métodos

#### 2.3.1 Calorimetria de Condução Isotérmica

Com o objetivo de avaliar a influência da substituição parcial ou total de gipsita por fosfogesso em cimentos, bem como analisar o comportamento de cloretos como aceleradores de reação, foram moldadas pastas para execução de ensaio de calorimetria de condução isotérmica. Esta análise, fornece as taxas de energia liberadas ao longo do processo de hidratação do cimento.

O equipamento utilizado para ensaio foi o calorímetro de modelo TAMAir, da TA Instruments, disponível no Laboratório de Inovação em Cimentos Ecoeficientes (LINCE), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tanto o preparo das amostras quanto o ensaio foram realizados à temperatura constante de 25°C.

Foram avaliados os nove traços propostos, a partir das proporções apresentadas na Tabela 2. Utilizou-se 50g de cimento para cada amostra, a fim de possibilitar uma mistura adequada em misturador mecânico. Preparou-se uma amostra por traço, cujo procedimento está descrito a seguir:

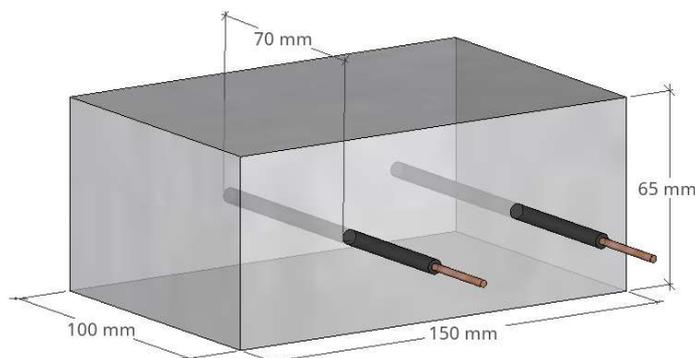
- I- Pesagem dos materiais em balança analítica de precisão, sendo utilizada seringa para auxílio na pesagem exata da quantidade de água;
- II- Diluição do cloreto de sódio na água, por cinco minutos em agitador magnético (velocidade média);
- III- Mistura manual do cimento com a solução salina por 30 segundos;
- IV- 20 segundos para encaixe do copo no equipamento;
- V- Mistura elétrica da pasta no misturador por 70 segundos, totalizando 2 minutos desde o início da reação;
- VI- Colocação de 6g de pasta na ampola de ensaio, através de pesagem em balança de precisão;
- VII- Inclusão da ampola no equipamento.

Após o início do ensaio, a partir da colocação das amostras no equipamento, foram registrados os dados de desenvolvimento das curvas de calor pelo período de 72 horas.

### 2.3.2 Preparação das Barras e Formas

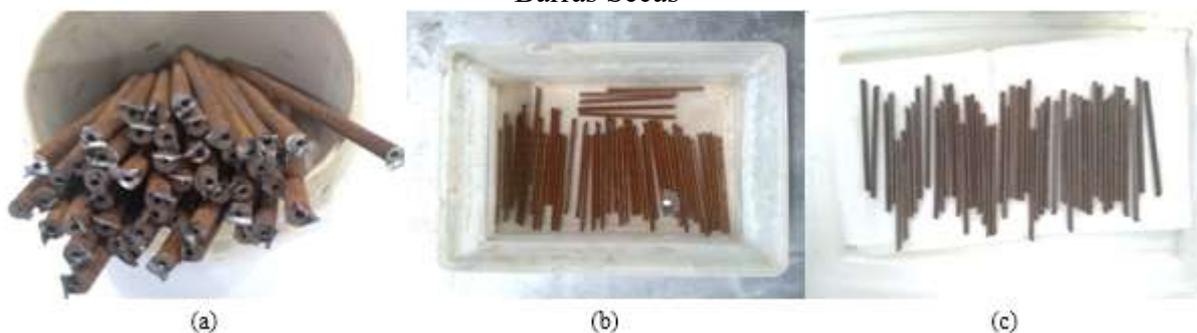
Os corpos de prova prismáticos escolhidos para a realização dos ensaios de corrosão, foram baseados nos modelos apresentados por Cabral (2000), Vieira (2003) e Mota (2016), com dimensões de 65x100x150mm. Utilizou-se formas de compensado e duas barras foram posicionadas dividindo a altura ao meio. Desta forma, o cobrimento superior foi inferior a 30mm. Para igualar as condições de influência externas, as barras foram posicionadas há 30mm de distância do fundo da forma. O croqui representativo está disposto na Figura 3.

Figura 3 - Croqui de Corpo de Prova Prismático



As barras de aço foram cortadas com 120mm de comprimento, sendo que 50mm foi mantido na parte externa do corpo de prova. Com auxílio de furadeira de bancada, foi realizado um furo de 2,5mm de espessura e 10mm de comprimento, na ponta de cada barra (Figura 4a), onde posteriormente, foram encaixados os fios de cobre. Foi realizada a limpeza das barras, a fim de impedir qualquer influência nos resultados devido à processos de oxidação iniciais provenientes da própria barra. Para tanto, utilizou-se o método de imersão em solução de ácido clorídrico e água deionizada em teores de 1:1, executado por Vieira (2003), com posterior escovação com cerdas de aço e lavagem em água corrente. As barras ficaram em banho pelo período de 10 minutos (Figura 4b). Este procedimento, segundo GODINHO (2018) é mais indicado que o de imersão em ácido ou escovação como processos individuais. Na sequência, as barras foram banhadas com álcool isopropílico, a fim de acelerar a secagem e colocadas sobre papel toalha, onde utilizou-se jato de ar quente até a secagem e finalização do processo de limpeza (Figura 4c).

Figura 4 - Preparação das Barras: (a) Corte e Furação (b) Imersão em Ácido Clorídrico (c) Barras Secas



Após a limpeza, as barras foram embaladas individualmente com filme plástico até a concretagem dos corpos de prova. Cada barra foi pesada individualmente, em balança de

precisão e identificadas, com o número do traço de concreto que iriam compor, seguido das letras A ou B (posição na forma).

Então, foram inseridos e soldados os pedaços de fio de cobre rígido, de 2,5mm, desencapados, para propiciar adequado contato elétrico entre o conector do ensaio e a armadura. Os pedaços foram cortados com 40mm de comprimento, a fim de expor 30mm para fora das barras, sendo estas protegidas com fita isolante líquida, cobrindo o aço e a solda, a fim de deixar exposto o fio de cobre. A barra pronta, identificada e protegida pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5 - Barra Pronta



Com o propósito de possibilitar a concretagem sem movimentação das barras durante o processo de adensamento, utilizou-se silicone do tipo PU, para fixar as barras na posição correta dentro das formas, com auxílio de isopor para manter a posição até secagem do silicone. No processo de desmoldagem, as formas foram desmontadas, e o silicone foi retirado com cuidado, desgrudando a barra da forma. Todo o resíduo de silicone foi retirado com o auxílio de uma espátula e, novamente, cobriu-se as partes expostas das barras com fita isolante líquida.

### 2.3.3 Concretagem

Para os estudos de resistência à compressão e potencial de corrosão, realizou-se a concretagem dos nove traços, sendo moldados os corpos de prova para ambos os ensaios. Foram separados e pesados os materiais conforme traço em massa e quantitativo já citados no item 2.1, na Tabela 2.

O NaCl foi adicionado à água do traço anteriormente, a fim de formar uma solução salina. Para a dissolução do cloreto, utilizou-se o agitador mecânico por cinco minutos de maneira análoga às pastas.

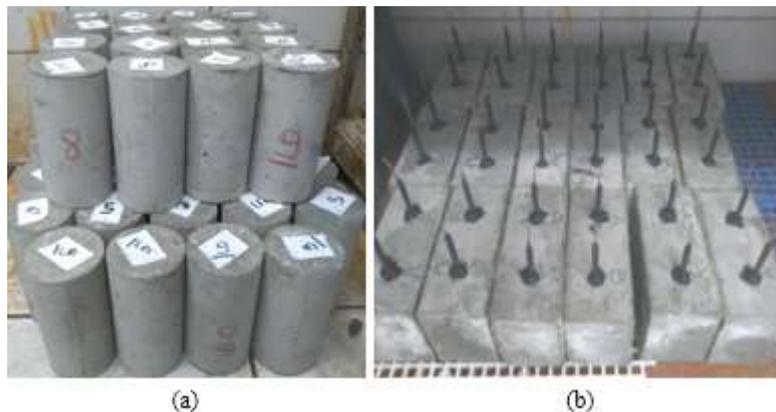
A concretagem foi realizada em betoneira de eixo central, iniciando-se pela colocação do agregado graúdo, posterior inclusão de parte da água, seguida pelo cimento e, finalmente, restante da água seguido pelo agregado miúdo. O processo total de mistura em betoneira, para cada traço, teve duração de 5 a 6 minutos.

No instante seguinte à mistura, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone, *Slump Test*, a fim de verificar a consistência e coesão do concreto. Este procedimento foi executado de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020), cujos resultados serão apresentados em 3.2.

Após, seguiu-se para a moldagem dos corpos de prova. As formas, tanto cilíndricas quanto prismáticas, foram preenchidas em duas camadas, sendo que cada uma foi adensada em mesa vibratória por 10 segundos.

Todas as formas foram cobertas por lona plástica, a fim de evitar a perda de água no processo de cura inicial. Após 24 horas, efetuou-se a desforma. Neste momento os corpos de prova foram novamente identificados e acondicionados em câmara úmida (mantida em condições de temperatura de  $22 \pm 2$  °C e umidade de  $95 \pm 2\%$  constantes), onde permaneceram por todo o processo restante de cura, até a realização de cada ensaio, tanto para os corpos de prova cilíndricos quanto para os prismáticos (Figura 6).

Figura 6 - Corpos de Prova Cilíndricos (a) e Prismáticos (b): Acondicionados em Câmara Úmida



A concretagem, acondicionamento e cura dos corpos de prova, bem como realização dos ensaios em concretos foram realizados no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC), na UFRGS.

#### 2.3.4 Resistência Mecânica à Compressão

Com base no procedimento descrito pela NBR 5739 (ABNT, 2018), os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados quanto a resistência à compressão, em prensa hidráulica EMIC DL 20000, com célula de carga de 200kN e velocidade de 0,45Mpa/s. As amostras de cada traço foram rompidas de acordo com a seguinte disposição: 03 corpos de prova para idade de 01 dia; 03 corpos de prova para a idade de 07 dias; e 02 corpos de prova para a idade de 28 dias.

#### 2.3.5 Potencial de Corrosão

Para análise da possibilidade de corrosão de armaduras nos concretos estudados, por conta da adição de íons  $\text{Cl}^-$  nas misturas, empregou-se a técnica eletroquímica de resistência de polarização, proposta pela ASTM C876 (ASTM, 2015). Para tanto, utilizou-se um potenciostato modelo GiII-AC, da ACM Instruments, bem como software Sequencer, para leitura e verificação dos dados, compatível com o equipamento citado. Tal equipamento necessita da presença de um eletrodo de referência, sendo o de  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ , modelo 3A11, da Analyser, utilizado neste trabalho. Como contra eletrodo, utiliza-se uma placa de aço inoxidável, posicionada abaixo do corpo de prova. A fim de possibilitar adequado contato elétrico, conforme apresentado por Vieira (2003), foram colocadas esponjas umedecidas com água e sabão, entre o eletrodo e corpo de prova, bem como entre o corpo de prova e contra eletrodo.

A resistência de polarização é obtida através da aplicação, na armadura, de uma variação de potencial ( $\Delta E$ ) de -10mV a +10mV, com taxa de 10mV/min. A partir desta polarização, são calculados, através do software, os valores de potencial de corrosão (relativo ao eletrodo utilizado como referência).

Devido à utilização de cloretos como adição aos concretos, não foram executados ciclos de ataque às armaduras por banho em solução salina, como apresentam Vieira (2003), Cabral (2000) e Mota (2016). Este trabalho buscou analisar o efeito de potencial de corrosão apenas devido aos agentes internos, não sendo avaliados ataques externos.

Os corpos de prova concretados para as análises de potencial de corrosão (Ecorr) foram ensaiados pela primeira vez aos 28 dias, seguidos de medições semanais de potencial, ao longo de dois meses de ensaios. As duas barras de cada corpo de prova foram ensaiadas

separadamente, gerando quatro resultados por traço. Após, calculou-se a média dentre esses. A ASTM C 876/15 (2015), estabelece faixas de valores de  $E_{corr}$  para determinação da probabilidade de corrosão. Define-se que valores maiores que  $-0,85\text{mV}$  demonstram baixa probabilidade de corrosão ( $<10\%$ ), enquanto a faixa de  $-0,85$  a  $-0,235\text{mV}$  indica probabilidade incerta de corrosão e, finalmente, valores abaixo de  $-0,235\text{mV}$  indicam probabilidade de corrosão alta ( $>90\%$ ), correspondentes ao eletrodo utilizado no estudo.

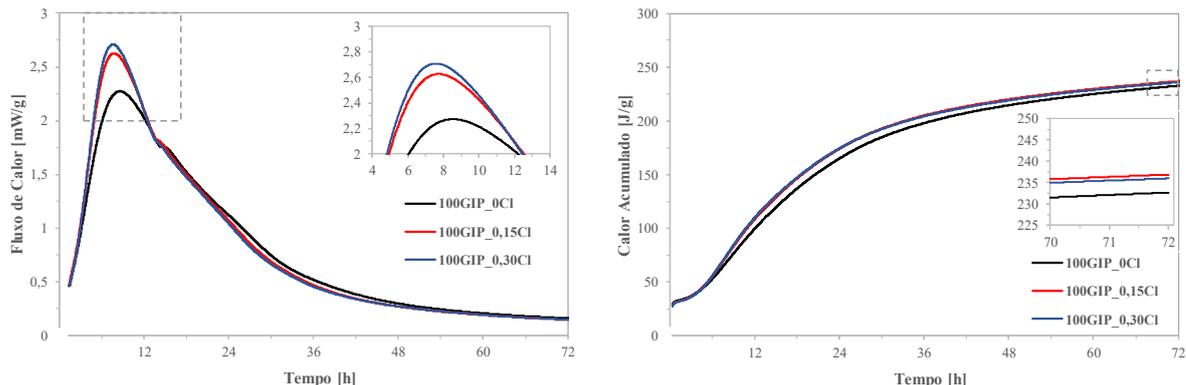
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Calorimetria

Os gráficos de fluxo de calor liberado e de calor acumulado das amostras 100GIP com os três teores de adição de cloretos estão apresentados na Figura 7. De acordo com a análise, a presença de cloretos apresentou maior liberação de calor, bem como a antecipação do pico principal, referente aos silicatos, dos traços 100GIP\_0,15Cl e 100GIP\_0,30Cl, em comparação ao 100GIP\_0Cl, evidenciando a aceleração na reação. Observa-se que as pastas 100GIP\_0,15Cl e 100GIP\_0,30Cl atingiram os picos de 2,71 e 2,63 mW/g de cimento após 7,6 e 7,7 horas do início da reação, respectivamente. Já o traço sem a presença de cloretos, atingiu seu pico cerca de 48 minutos após o 100GIP\_0,15Cl, apresentando também redução aproximada de 14% no calor liberado (2,27 mW/g).

Analisando-se as primeiras idades, pode-se destacar os valores de calor acumulado encontrados em 24 horas de ensaio: 165,03J/g para o traço 100GIP\_0Cl; 174,13J/g para 100GIP\_0,15Cl e 174,41J/g para 100GIP\_0,30Cl. Pode-se observar que a presença de cloretos acelerou a reação, mas não há diferença dos resultados entre os teores. Na Figura 7, percebe-se que no calor acumulado total, após 72 horas, não ocorreram variações significativas entre os teores de cloretos, indicando, inclusive, a maior taxa de calor acumulado para o 100GIP\_0,15Cl: aproximadamente 236,88 J/g de cimento, enquanto o traço 100GIP\_0Cl atingiu em torno de 232,68 J/g.

Figura 7 - Fluxo e Calor Acumulado: Cimento 100% Gipsita

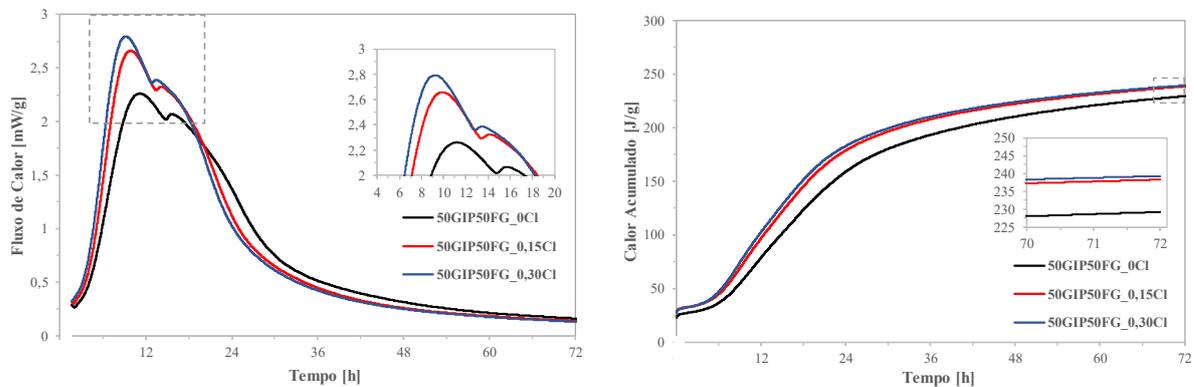


Para os cimentos compostos 50GIP50FG, podemos observar na Figura 8 a presença de dois picos no gráfico de fluxo de calor. O primeiro, é denominado pico de hidratação principal e está associado as reações de hidratação que contribuem para o estabelecimento e crescimento da resistência inicial e, o segundo, ligado a aceleração da atividade do aluminato tricálcico (ASTM, 2017). A partir dos gráficos foi possível notar que cimentos contendo fosfogesso apresentaram tendência a antecipação do pico referente ao esgotamento da fonte de sulfato de cálcio. Ainda na Figura 8, percebe-se que para as pastas 50GIP50FG, a diferença entre os picos com e sem cloretos aumenta. O primeiro pico pode ser observado após 9,20 horas, com 2,79 mW/g para

50GIP50FG\_0,30Cl e 9,86 horas com 2,66 mW/g para 50GIP50FG\_0,15Cl. Entretanto, para a amostra 50GIP50FG\_0Cl, o primeiro pico ocorreu somente após 11,16 horas do início das reações (2,64 horas após o pico obtido pelo traço 100% gipsita já apresentado, também sem cloretos), com fluxo de calor de 2,26 mW/g. Este resultado demonstra o retardo de pega gerado pela utilização de fosfogesso, como já citado, mesmo que sendo substituído ainda em parte. Já o fluxo de calor liberado se manteve semelhante quando comparados os traços sem adições de cloretos.

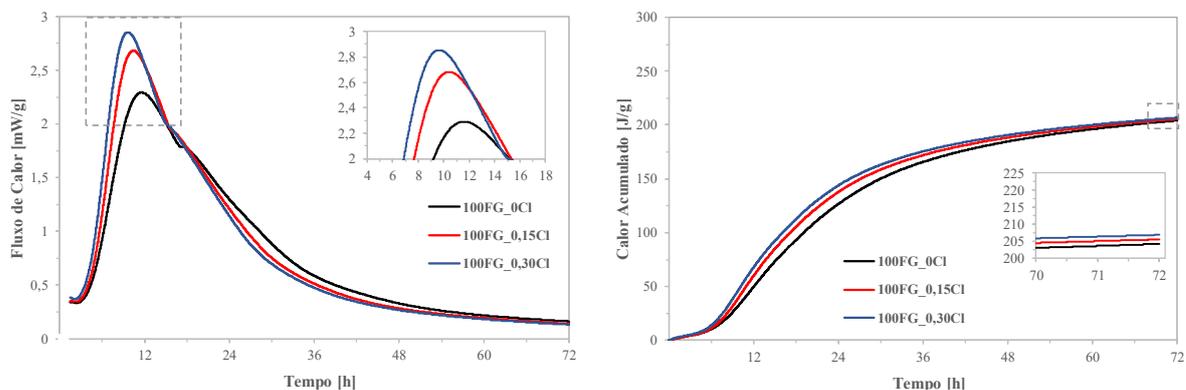
Além disso, o gráfico de calor acumulado apresenta uma maior influência dos cloretos para o caso de cimentos mistos. Na análise de calor acumulado em 24 horas de reação, os valores acumulados obtidos foram de 157,15 J/g para a pasta 50GIP50FG\_0Cl; 177,39 J/g para 50GIP50FG\_0,15Cl e 181,58 J/g para 50GIP50FG\_0,30Cl, sendo estes dados semelhantes ao cimento com gipsita. Para 72 horas, os valores se mantiveram semelhantes aos cimentos apenas com gipsita, apenas o traço de cimento misto sem a utilização de cloretos apresentou resultado inferior, de 229,24 J/g (Figura 8).

Figura 8 - Fluxo e Calor Acumulado: Cimento 50% Gipsita e 50% Fosfogesso



Ao analisarmos os cimentos 100FG, apresentados na Figura 9, verificam-se os picos em 9,64 horas com 2,85 mW/g (para 100FG\_0,30Cl); 10,44 horas com 2,68 mW/g (para 100FG\_0,15Cl) e 11,60 horas com 2,29 mW/g (para 100FG\_0Cl). Esses resultados apresentam retardo na pega com relação aos traços 100GIP. Todavia, em 24 horas, os resultados de calor acumulado para este cimento são significativamente menores, com 126,69 J/g para 100FG\_0Cl, 137,79 J/g para 100FG\_0,15Cl e 143,87 J/g para 100FG\_0,30Cl, ou seja, reduções entre 17 e 23% quando comparados às pastas referência, 100GIP. Após 72 horas verifica-se grande redução nestes cimentos, quando comparados aos referência (GIP), mesmo que com a presença de cloretos: de 204,29 a 206,92 J/g.

Figura 9 - Fluxo e Calor Acumulado: Cimento 100% Fosfogesso



A ASTM C1679-17 (2017) define o tempo de início de pega como o momento em que se atinge 50% do fluxo de calor do primeiro pico. Dessa forma, foram determinados também os tempos de pega de cada traço, demonstrados na Tabela 7. Através desta análise, pode-se verificar que, apesar dos picos de fluxo de calor não variarem tanto com a substituição de fosfogesso, fica claro que os tempos iniciais de pega são bastante afetados, mesmo com a utilização de cloretos ou se compararmos os traços mistos e puros de fosfogesso. Estes resultados corroboram as pesquisas já apresentadas, que designam à presença de impurezas no fosfogesso o retardo demasiado da pega.

Tabela 7 – Tempo de Início de Pega - Calculado pelo Gráfico de Calorimetria

Traço	Início de Pega [h]
100GIP_0Cl	3,47
100GIP_0,15Cl	3,56
100GIP_0,30Cl	3,65
50GIP50FG_0Cl	6,24
50GIP50FG_0,15Cl	5,81
50GIP50FG_0,30Cl	5,41
100FG_0Cl	6,62
100FG_0,15Cl	6,38
100FG_0,30Cl	5,90

### 3.2 Abatimento do Concreto

Os abatimentos obtidos através do ensaio de tronco de cone, realizados imediatamente após as misturas, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de Abatimento

Traço	Abatimento [mm]
100GIP_0Cl	120
100GIP_0,15Cl	110
100GIP_0,30Cl	120
50GIP50FG_0Cl	125
50GIP50FG_0,15Cl	130
50GIP50FG_0,30Cl	125
100FG_0Cl	140
100FG_0,15Cl	130
100FG_0,30Cl	140

Verifica-se que os traços referentes aos concretos com cimentos convencionais (100GIP) possuem abatimento médio de 116,6 mm. Já os traços com cimentos mistos (50GIP50FG) apresentam média de 126,6 mm. Por fim, os traços que se referem aos cimentos com

substituição total da gipsita por fosfogesso (100FG), têm média de 136,6 mm. Pode-se observar que a adição de cloreto de sódio não provocou alterações que pudessem indicar uma tendência de comportamento. Tais resultados demonstram que a alteração da fonte de sulfato de cálcio no cimento ocasionou incremento linear do abatimento, ou seja, provocaram ao concreto maior fluidez.

### 3.3 Resistência à Compressão

Os corpos de prova dos nove traços de concretos foram rompidos nas idades de 1, 7 e 28 dias, a fim de analisar a evolução das resistências à compressão. Os resultados estão apresentados na Figura 10.

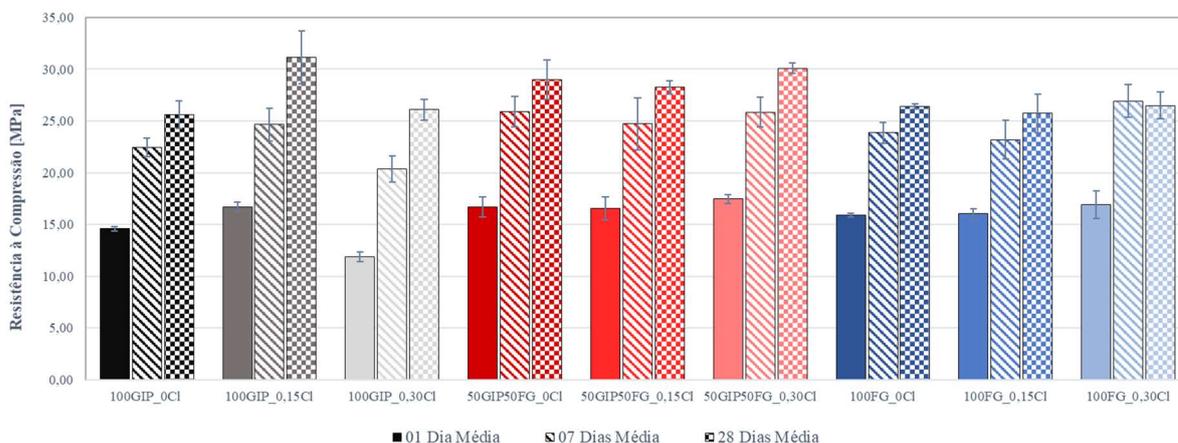
Analisando-se os cimentos sem adição de cloretos, a Figura 10 mostra que os melhores resultados são atribuídos ao cimento 50GIP50FG, atingindo 16,69, 25,87 e 28,97 MPa (em 1, 7 e 28 dias, respectivamente). O cimento 100GIP\_0Cl, apresenta os menores resultados em todas as idades, quando comparado aos demais traços sem cloretos. Tal fato se mostra interessante e demonstra que o fosfogesso utilizado neste trabalho é de elevada qualidade, com baixo teor de impurezas. Por outro lado, a presença de 0,15% de cloretos demonstra a alteração nesta tendência, onde o cimento puro (100GIP) assume destaque. Já para os traços com adição de 0,30%, os comportamentos diferem entre as idades, porém, o cimento misto (50GIP50FG) chama atenção, atingindo 30,09 MPa aos 28 dias.

Na análise por idades, pode-se observar na Figura 10 que, em 1 dia, o traço que obteve melhor resultado foi o 50GIP50FG\_0,30Cl. Em relação aos cloretos, há variação nos comportamentos para cada cimento: para 100GIP, os cloretos apresentaram benefício apenas no teor de 0,15%; para os demais cimentos, esse comportamento se inverte, visto as maiores resistências são verificadas nos concretos com 0,30% de cloretos.

Para as rupturas aos 7 dias, apresentadas na Figura 10, as tendências se mantêm com relação ao cimento 100GIP. Para os demais, nota-se um leve aumento das resistências médias dos traços sem cloretos, em comparação aos teores de 0,15%. Já os traços com 0,30% permanecem com os melhores resultados.

Já aos 28 dias, a Figura 10 mostra que o cimento com gipsita segue sendo o mais afetado com a utilização de cloretos. Verifica-se novamente a maior resistência para este cimento no traço 100GIP\_0,15Cl. Este traço, inclusive, surge como o melhor resultado, com resistência média de 31,17 MPa. Nos cimentos com fosfogesso, repete-se o comportamento: traços mistos apresentam os melhores resultados.

Figura 10 – Resistência à Compressão dos cimentos [Mpa]

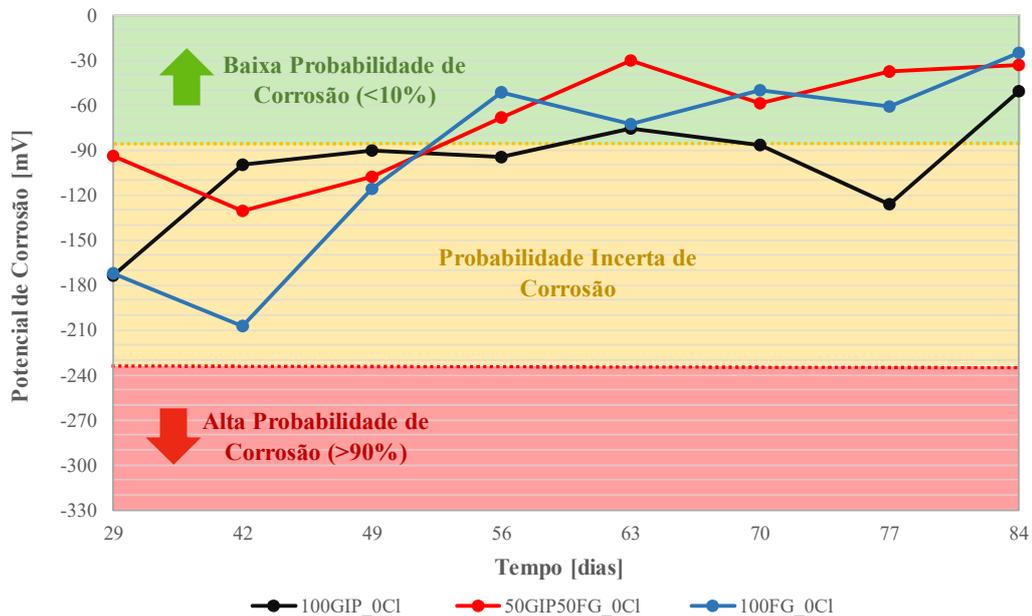


De maneira geral, pode-se observar que a presença de cloretos não afetou consideravelmente as resistências médias à compressão. Por outro lado, os cimentos com substituição parcial da gipsita por fosfogesso (50GIP50FG) apresentaram resultados melhores do que o cimento 100GIP, até mesmo nas idades iniciais. Este resultado condiz com os valores de calor acumulado apresentados nas análises de calorimetria, quando verificamos os dados após 24 horas de hidratação. Já os corpos de prova do traço 100GIP\_0,30Cl apresentaram comportamento inusitado, com resistências à compressão inferiores em todas as idades. Sugere-se a repetição deste ensaio para obtenção de resultados mais conclusivos, visto que pode ter ocorrido alguma falha de concretagem. Desta forma, em relação à resistência à compressão, mostra-se viável o uso de fosfogesso como fonte de sulfato de cálcio na produção do cimento, porém o uso de cloretos não apresenta benefícios significativos nas resistências estudadas em concreto (a partir de 01 dia).

### 3.4 Potencial de Corrosão

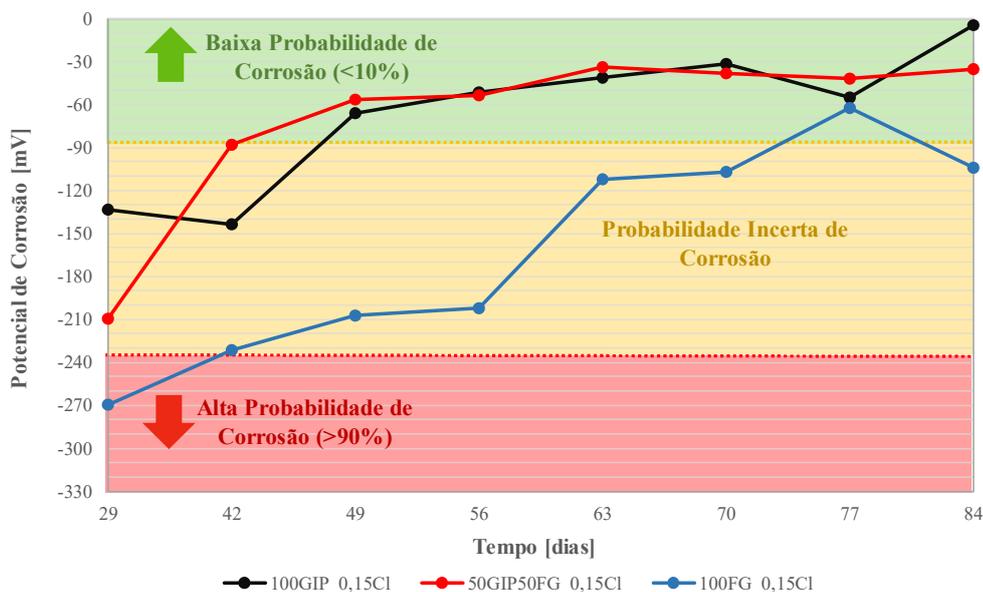
A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para os traços sem a utilização de cloretos, dos três diferentes cimentos. Verifica-se que nas primeiras três semanas os valores oscilam dentro da faixa de probabilidade incerta de corrosão. Entretanto, da quarta à oitava semana, os valores se estabilizam na faixa de probabilidade baixa de corrosão, com resultados superiores a -85mV. Assim, os resultados indicam que todos os cimentos sem a utilização de cloretos possuem baixa probabilidade de corrosão, considerando-se essa faixa de tempo.

Figura 11 – Potencial de Corrosão em Traços 0% Cloretos



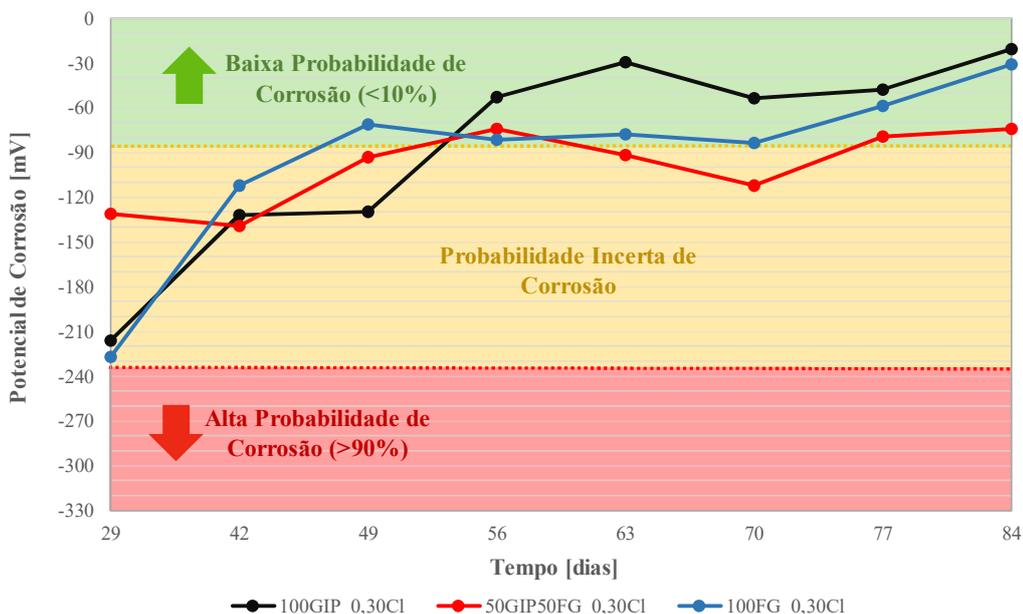
Para os traços com utilização de teores de 0,15% de cloretos, a Figura 12 demonstra que os cimentos 100GIP\_0,15Cl e 50GIP50FG\_0,15Cl se estabilizam na faixa de baixa probabilidade de corrosão a partir da terceira semana de ensaio. Todavia, o traço com utilização de 100FG\_0,15Cl, apresenta resultados na faixa de probabilidade incerta de corrosão ao longo de seis das oito semanas de ensaio, demonstrando um ponto de atenção, visto que a faixa é inconclusiva.

Figura 12 – Potencial de Corrosão em Traços 0,15% Cloretos



Já para os traços onde utilizou-se 0,30% de teor de cloretos, a partir da terceira semana, há uma tendência de estabilização das curvas dos traços de cimento 50GIP50FG\_0,30Cl e 100FG\_0,30Cl. Porém, observa-se que os resultados se mantêm próximos a faixa de -85mV, no limite entre a probabilidade incerta e baixa. Ao compararmos resultados de outros estudos, Theiss (2019) identificou também, para 12 semanas, resultados na faixa limite entre probabilidade baixa e incerta de corrosão, ao estudar cimentos do tipo CP II F 40 em corpos de prova com cobrimento de 25mm. Em contraponto, Cabral (2000) obteve resultados na faixa de alta probabilidade de corrosão, para traços produzidos com CP II F 32 e cobrimento de 10mm, na mesma idade. Cabe ressaltar que as pesquisas comparadas utilizaram o método de aceleração de ensaio através de ciclos de ataque por cloretos, o que não foi empregado neste estudo, devido à inclusão de cloretos na própria composição dos traços. Ainda, considerando-se a alta variabilidade dos dados obtidos neste ensaio, os resultados devem ser avaliados com atenção.

Figura 13 – Potencial de Corrosão em Traços 0,30% Cloretos



#### 4 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou analisar os efeitos da substituição, parcial ou total, da gipsita por fosfogesso como regulador de pega na indústria cimenteira. Todavia, sabe-se que a utilização de resíduos pode provocar alterações exageradas no retardo da pega. Assim, propôs-se a avaliação de pastas e concretos com a utilização de 100GIP, 50GIP50FG E 100FG, combinados com três teores de cloretos de sódio (0, 0,15 e 0,30%), utilizados como aceleradores de reação. Os traços foram avaliados perante ensaios de calorimetria, resistência à compressão e potencial de corrosão.

Os resultados demonstram que a presença de fosfogesso provoca alterações mais significativas em pastas, na reação de hidratação dos cimentos, como o aumento do tempo de pega e o retardo nos picos silicatos, que podem ser verificadas através dos resultados de calorimetria. Além disso, os cimentos contendo fosfogesso tiveram uma antecipação no pico referente a depleção dos sulfatos. Já em concretos, a utilização deste resíduo não apresentou prejuízos com relação à resistência à compressão, encontrando-se, inclusive, valores superiores em cimentos com fosfogesso quando comparados aos que utilizaram a gipsita na composição, mesmo que nas primeiras idades.

Todavia, o trabalho corrobora com resultados obtidos em pesquisas anteriores com relação ao retardo exagerado de pega provocado pela utilização de fosfogesso, como pode-se observar nos tempos de início de pega. Por outro lado, a utilização de cloretos de demonstrou-se eficiente para mitigar a influência do fosfogesso, antecipando os picos de hidratação. Porém, os resultados de início de pega ainda demonstram diferença de 2,43 horas quando comparados os traços de gipsita sem cloretos e fosfogesso (100%) com o maior teor de NaCl.

Apesar da utilização de cloreto de sódio como acelerador de reação, os concretos estudados não apresentaram elevada probabilidade de corrosão, demonstrando sua possível utilização. Entretanto, sugere-se a realização de ensaios por maior tempo, para avaliar se esta tendência se mantém para idades superiores aos 2 meses analisados. Ainda, sugere-se a utilização de algum método de aceleração do processo corrosivo, a fim de simular um maior envelhecimento dos corpos de prova em tempo reduzido, como o banho por imersão em cloretos, apresentado na literatura.

Desta forma, conclui-se que a substituição da gipsita pelo fosfogesso se mostra como uma alternativa viável nos parâmetros estudados, principalmente, para soluções construtivas livre de armadura. Tal troca possibilita a reutilização deste resíduo industrial, colaborando com a diminuição dos impactos gerados ao meio ambiente pela indústria do cimento. A presença de cloretos apresentou aceleração na reação em pastas, como mostram os resultados de calorimetria. Entretanto, para os concretos, tais resultados não foram evidentes. Sugere-se a avaliação de teores de cloretos superiores e de idades inferiores a um dia, que poderiam ser analisadas, como sugestão, através de ensaios com argamassas.

#### REFERÊNCIAS

AÏTCIN, Pierre-Claude; FLATT, Robert J. (Ed.). **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Woodhead Publishing, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C876-15: **Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação.** Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 67: Concreto – Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.
- BALTAR, C. A. M.; LUZ, A. B. D.; BASTOS, F. D. F. **Diagnóstico do Pólo Gesseiro de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de Gipsita para fabricação de Cimento.** Tegucigalpa, Honduras, 2004.
- BALTAR, C. A. M.; LUZ, A. B. D.; BASTOS, F. D. F. Gipsita. In: BALTAR, C. A. M.; LUZ, A. B. D.; BASTOS, F. D. F. **Rochas e Minerais Industriais.** CETEM, 2005, p. 449-470.
- BATTAGIN, Arnaldo Forti. Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella (org.). **Concreto: Ciência E Tecnologia.** 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v. I.
- BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção.** 5ª ed. Revisada, Rio de Janeiro, 2000. **Brasil.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap. 7, p. 125–144.
- CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2000.
- CANUT, M.M.C.; JACOMINO, V.M.F.; BRÁTVEIT, K.; GOMES, A. M.; YOSHIDA, M.I. **Microstructural analyses of phosphogypsum generated by Brazilian fertilizer industries.** Materials Characterization, 2008.
- COSTA, Rayara Pinto. **Hidratação e reologia de clínquer Portland com diferentes fontes brasileiras de sulfato de cálcio (gipsita e fosfogesso).** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020.
- GODINHO, J. P.; OLIVEIRA, R. L. N.; CAPRARO, A. P. B.; RÉUS G. C.; MEDEIROS, M. H. F. **Influência das condições de limpeza de barras de aço carbono do concreto armado nas leituras eletroquímicas de densidade de corrente de corrosão e potencial de corrosão.** In: ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE DEGRADAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO, 3., São Carlos, 2018.

IAEA. **Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry**. Vienna, 2013.

IEA. **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry**, 2018.

ISLAM, G M Sadiqul et. al. Effect of Phosphogypsum on the Properties of Portland Cement. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 744–751, 2017.

KUZMANOVIĆ, P.; TODOROVIĆ, N.; FORKAPIĆA, S.; PETROVIĆ, L. F.; KNEŽEVIĆ, J.; NIKOLOV, J.; MILJEVIĆ, B. **Radiological characterization of phosphogypsum produced in Serbia**. Radiation Physics and Chemistry, 2020.

LEE, Taegyu; LEE, Jaehyun; KIM, Yongro. **Effects of admixtures and accelerators on the development of concrete strength for horizontal form removal upon curing at 10°C**. Construction and Building Materials, v. 237, 2020.

MAZZILI, Barbara Paci. Mineração de Fosfato e Produção de Ácido Fosfórico. In: REIS, Róssio Glória dos. **NORM: Guia Prático**. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2016. 5ª-4, p. 89-98.

MONTEIRO, Paulo J. M., MILLER, Sabbie A., HORVATH, Arpad. **Towards sustainable concrete**. Nature Materials, v. 16, p. 698–699, 2017.

MOTA, Daniel Andrade. **Influência da adição de materiais pozolânicos na corrosibilidade do concreto armado, analisada por meio do potencial de corrosão e resistividade elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, UFBA, Salvador, 2016.

MYRDAL, Roar. **Accelerating admixtures for concrete**. SINTEF Building and Infrastructure, 2007.

NETO, José S. Andrade et. al. **Influence of phosphogypsum purification with lime on the properties of cementitious matrices with and without plasticizer**. Construction and Building Materials, v. 299, 2021.

RASHAD, Alaa M. **Phosphogypsum as a construction material**. Journal of Cleaner Production, v. 166, p. 732-743, 2017.

REN, Guosheng; TIAN, Zhijie; WU, Jingjiang; GAO, Xiaojian. **Effects of combined accelerating admixtures on mechanical strength and microstructure of cement mortar**. Construction and Building Materials, v. 304, 2021.

RIBEIRO, Daniel Vêras; CUNHA, Manuel Paulo Teixeira. Técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, Daniel Vêras (org.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014, p. 296 - 397.

SAUEIA, Cátia Heloisa Rosignoli. **Caracterização radioquímica do fosfogesso e implicações radiológicas de sua utilização como material de construção**. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – IPEN, São Paulo, 1998.

SERT, Y.; ALTUN, I. A. **Utilization of Weathered Phosphogypsum as set Retarder in Portland Cement**. Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 34, p. 677–680, 2004.

SHEN, W. *et al.* **Utilization of solidified phosphogypsum as Portland cement retarder**. Journal of Material Cycles and Waste Management, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 228–233, 2012.

SILVA, R. M.; GIULIETTI, M. Fosfogesso: geração, destino e desafios. In: **Agrominerais no TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. London: Thomas Telford Publishing, 1997.**

**THEISS, Ana Flávia. Avaliação da corrosão do aço em concreto com adição de inibidor migratório de corrosão frente à ação de íons cloreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, UESC, Joinville, 2019.

**VIEIRA, G.L. Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

**WBCSD. The Cement Sustainability Initiative. Recycling concrete.** [s.l: s.n.].

**WWF. Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas,** 2020. Disponível em: [wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas](http://wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas) Acesso em: 01/11/2021