

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

**Bruno Tasca de Linhares**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CIMENTOS CII E E  
CII F COM DIFERENTES TEORES DE POZOLANAS  
FRENTE AO ATAQUE DE ÍONS SULFATO**

Porto Alegre  
junho 2010

**BRUNO TASCA DE LINHARES**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CIMENTOS CPII E E  
CPII F COM DIFERENTES TEORES DE POZOLANAS  
FRENTE AO ATAQUE DE ÍONS SULFATO**

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 Engenheiro Civil

**Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
**Coorientadora: Lucília Bernardino da Silva**

Porto Alegre  
junho 2010

**BRUNO TASCA DE LINHARES**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CIMENTOS CII E E  
CII F COM DIFERENTES TEORES DE POZOLANAS  
FRENTE AO ATAQUE DE ÍONS SULFATO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelas Orientadoras e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 23 de junho de 2010

Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela EPUSP  
Orientadora

Lucília Bernardino da Silva  
Mestre pela UFRGS  
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Ana Paula Kirchheim (UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Francieli Tiecher Bonsembiante**  
Dra. Pela UFRGS

**Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)**  
Dra. pela EPUSP

Dedico este trabalho a meus pais, Antonio e Nilse, e a Pricila, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram comigo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Professora Denise Dal Molin, orientadora deste trabalho, pelos conselhos e dedicação.

Agradeço a Lucília Bernardino da Silva pelo apoio e incentivo durante toda a realização do trabalho.

Agradeço à Professora Carin Maria Schmitt pela atenção e orientações para a realização deste trabalho.

Existem duas maneiras de ver a vida. Uma é pensar que não existem milagres e a outra, é que tudo é um milagre.

*Albert Einstein*

## RESUMO

LINHARES, B. T. **Avaliação do Desempenho de Cimentos CII E e CII F com Diferentes Teores de Pozolanas frente ao Ataque de Íons Sulfato**. 2010. 70 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Os íons sulfato podem ser encontrados em solos, esgotos industriais e domésticos e água do mar. Esses íons, quando em contato com os compostos hidratados do cimento Portland, podem reagir e causar expansões que podem levar à fragilização da matriz, fissuração, lascamento das camadas exteriores e, até mesmo, ao colapso total do elemento de concreto. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de dois tipos de cimento, CII E e CII F, com adições pozolânicas frente à ação de sulfatos. Para isso, foram empregados dois tipos de pozolanas (metacaulim e sílica ativa) em 3 teores, 0, 5 e 10% em substituição ao cimento e relações água/aglomerante 0,35, 0,48 e 0,70. Para o estudo do desempenho dos cimentos, foi utilizada a norma americana ASTM C 1012-95a, que estabelece um método para a determinação da durabilidade de concretos e argamassas a estes íons. O método baseia-se no controle da expansão longitudinal de barras de argamassa, quando imersas em solução de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Ao final, procedeu-se a um tratamento estatístico dos resultados para conclusões sobre o desempenho dos materiais, com o objetivo de eliminar os valores espúrios. Os principais resultados obtidos mostraram que para as condições, tempo de ensaio e materiais empregados, as substituições de cimento por 5% de sílica ativa apresentaram os melhores resultados quanto à mitigação das reações expansivas, seguidas pelas substituições por 10% de sílica ativa, 10% de metacaulim e 5% de metacaulim. Com relação ao efeito sobre as misturas de referência, ou seja, sem adições pozolânicas, os resultados apontaram para um melhor desempenho para a relação água/aglomerante 0,35, seguindo-se as relações água/aglomerante 0,48 e 0,70 para os dois cimentos usados. De maneira clara o cimento CII E apresentou melhor desempenho que o cimento CII F para todos os traços de referência.

Palavras-chave: durabilidade de concretos; ataque por sulfatos; adições pozolânicas; cimento CII E, cimento CII F.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa .....	17
Figura 2: ataque por sulfatos na Barragem <i>Fort Peck</i> , Estados Unidos, 1971 .....	22
Figura 3: detalhe do ataque por íons sulfato em <i>Fort Peck</i> .....	22
Figura 4: cristais de etringita e monossulfato hidratado de cálcio .....	27
Figura 5: corrosão e lascamento devido à formação de etringita .....	29
Figura 6: deterioração de tubos de concreto por sulfatos .....	30
Figura 7: composição do clínquer de cimento Portland .....	32
Figura 8: cristal hexagonal de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .....	34
Figura 9: partículas esféricas de sílica ativa .....	39
Figura 10: quantidade de areia em função da relação água/aglomerante para misturas com cimento CII E .....	43
Figura 11: quantidade de areia em função da relação água/aglomerante para para misturas com cimento CII F .....	44
Figura 12: moldagem dos cubos de argamassa para cada traço .....	47
Figura 13: cura dos cubos em água com cal a $23 \pm 1,7^\circ\text{C}$ .....	47
Figura 14: ruptura à compressão dos cubos .....	48
Figura 15: fôrma de aço para moldagem das barras de argamassa .....	48
Figura 16: barra de argamassa para ensaio em solução de sulfatos .....	50
Figura 17: barras de argamassa em solução de sulfato de sódio .....	51
Figura 18: medidor de pH para controle da solução .....	51
Figura 19: leitura das barras com relógio comparador em base comparadora .....	52
Figura 20: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E de referência .....	55
Figura 21: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F de referência .....	56
Figura 22: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com 10% de substituição por sílica ativa .....	57
Figura 23: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com 10% de substituição por sílica ativa .....	57
Figura 24: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com 5% de substituição por sílica ativa .....	58
Figura 25: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com 5% de substituição por sílica ativa .....	58
Figura 26: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com 10% de substituição por metacaulim .....	59



Figura 27: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com 10% de substituição por metacaulim .....	59
Figura 28: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com 5% de substituição por metacaulim .....	60
Figura 29: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com 5% de substituição por metacaulim .....	60
Figura 30: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com relação água/aglomerante 0,35 .....	62
Figura 31: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com relação água/aglomerante 0,35 .....	62
Figura 32: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com relação água/aglomerante 0,48 .....	63
Figura 33: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com relação água/aglomerante 0,48 .....	64
Figura 34: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com relação água/aglomerante 0,70 .....	65
Figura 35: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com relação água/aglomerante 0,70 .....	65
Figura 36: perda de massa e fissuração nas barras de argamassa pelo ataque por sulfatos .....	67

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.....	34
Quadro 2: massa específica dos materiais utilizados na pesquisa.....	41
Quadro 3: distribuição granulométrica da areia.....	41
Quadro 4: determinação do traço rico para cimento CII E.....	42
Quadro 5: determinação do traço pobre para cimento CII E.....	43
Quadro 6: traços para cimento CII E para misturas de referência.....	44
Quadro 7: traços para cimento CII F para misturas de referência.....	45
Quadro 8: composição dos traços com pozolanas (sílica ativa e metacaulim).....	45
Quadro 9: quantidade de barras moldadas para cimento CII E.....	49
Quadro 10: planilha de cálculo de retirada de dados espúrios para o traço de referência moldado com cimento CII E e relação água/aglomerante 0,48.....	54

## LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS

$C_3A$ : Aluminato tricálcico

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 12H_2O$ : Aluminato tricálcico

CH: Hidróxido de cálcio

$Ca(OH)_2$ : Hidróxido de cálcio

$C_3A \cdot 3C\$ \cdot H_{32}$ : Trissulfoaluminato ou Sulfoaluminato hidratado de cálcio (etringita)

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$ : Trissulfoaluminato ou Sulfoaluminato hidratado de cálcio (etringita)

$C_3A \cdot CS \cdot H_{18}$ : Monosulfoaluminato

$\$$ :  $SO_3$  (trióxido de enxofre)

S:  $SiO_2$  (sílica)

H:  $H_2O$  (água)

C-S-H: Silicato hidratado de cálcio

$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ : Silicato hidratado de cálcio

$H_2S$ : Gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	15
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	15
<b>2.2.2 Objetivo secundário</b> .....	15
2.3 HIPÓTESE .....	16
2.4 PRESSUPOSTO .....	16
2.5 DELIMITAÇÕES .....	16
2.6 LIMITAÇÕES .....	16
2.7 DELINEAMENTO .....	17
<b>3 ÍONS SULFATO</b> .....	19
3.1 ORIGEM DOS ÍONS SULFATO .....	19
3.2 DEGRADAÇÃO E REAÇÕES .....	20
<b>3.2.1 Degradação</b> .....	20
<b>3.2.2 Reações com íons sulfato</b> .....	23
3.2.2.1 Fatores intervenientes .....	23
3.2.2.2 Mecanismo químico do processo .....	25
<b>4 MATERIAIS</b> .....	31
4.1 CIMENTO PORTLAND .....	31
<b>4.1.1 Cimentos e hidratação</b> .....	31
<b>4.1.2 Cimentos resistentes a sulfatos</b> .....	35
4.2 POZOLANAS E REAÇÕES POZOLÂNICAS .....	36
<b>4.2.1 Reação pozolânica</b> .....	36
<b>4.2.2 Materiais pozolânicos</b> .....	38
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	40
5.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	40
<b>5.1.1 Cimentos e adições</b> .....	41
<b>5.1.2 Composição granulométrica da areia</b> .....	41
5.2 PROPORCIONAMENTO E MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA .....	42
<b>5.2.1 Definições dos traços</b> .....	42
<b>5.2.2 Moldagem</b> .....	45
5.3 SOLUÇÃO DE SULFATOS .....	50

5.4 MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO DAS BARRAS .....	52
<b>6 RESULTADOS ALCANÇADOS .....</b>	<b>53</b>
6.1 TRATAMENTO DOS DADOS .....	53
6.2 VARIAÇÕES DE COMPRIMENTO DAS BARRAS .....	55
<b>6.2.1 Resultados em função da relação água/aglomerante .....</b>	<b>55</b>
<b>6.2.2 Resultados em função das adições pozolânicas .....</b>	<b>61</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>67</b>
7.1 CONCLUSÕES .....	67
7.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	68
REFERÊNCIAS .....	69



## 1 INTRODUÇÃO

O ataque por íons sulfato tem sido estudado por pesquisadores desde o início do século XX, devido à gravidade dos danos causados a concretos e argamassas, sendo de extrema importância a adoção de medidas preventivas para garantir a durabilidade das estruturas expostas. Concentrações deletérias de íons sulfato em ambientes naturais ou industriais são muito comuns. Esses compostos são provenientes de combustões, de esgotos domésticos e industriais, emissões de usinas termelétricas e refinarias de petróleo, decomposição de matéria orgânica, efluentes de fornos que usam combustíveis com alto grau de enxofre, chuvas ácidas ( $\text{SO}_2$ ), água do mar, entre outros.

Os íons sulfato podem penetrar através dos poros do concreto ou argamassa e reagir com os compostos hidratados do cimento, principalmente os aluminatos tricálcicos ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e o hidróxido de cálcio  $\{\text{Ca}(\text{OH})_2\}$ . A partir desta reação, formam-se compostos expansivos como a etringita e a gipsita, capazes de gerar o tensionamento da matriz, sua fragilização e fissuração, facilitando, assim, a entrada de novos agentes agressivos.

O ataque por sulfatos pode, também, manifestar-se através da perda progressiva de resistência e massa de concreto. É de fundamental importância para a prevenção do problema o conhecimento dos mecanismos de difusão desses íons e suas reações, além da adequada especificação dos materiais constituintes do concreto.

Determinados tipos de cimento são mais resistentes aos meios agressivos sulfatados. O cimento CII E, por conter adição de escória granulada de alto-forno em sua composição, é recomendado para estruturas que possam ser atacadas por sulfatos. Já o cimento CII F, que apresenta mais de 5% de filer calcário em sua constituição e não contém escória ou pozolana, somente pode ser considerado resistente a sulfatos se submetido a ensaios específicos. As adições minerais, como sílica ativa e metacaulim, também podem ser utilizadas para melhorar as propriedades de concretos e argamassas, conferindo maior durabilidade às estruturas devido às reações pozolânicas e ao efeito de refinamento dos poros.

Desta forma, o estudo em questão pretende avaliar o desempenho de cimentos CII E e CII F com variações de teores de pozolanas e relações água/aglomerante frente ao ataque de íons sulfato através do método proposto pela norma americana ASTM C 1012-95a.

O trabalho apresenta, inicialmente, no capítulo 2, o método de pesquisa. Em seguida, no capítulo 3, passa-se à caracterização dos fenômenos que cercam o ataque selenitoso. Serão abordadas a origem dos íons, degradação, reações e formação de compostos expansivos por ataque de sulfatos.

No capítulo 4 é feita uma revisão bibliográfica relativa aos materiais utilizados na pesquisa. O capítulo 5 é dedicado ao programa experimental, descrevendo o método empregado para a determinação do desempenho dos materiais, ou seja, os procedimentos da norma americana ASTM C1012-95a, ao mesmo tempo em que é apresentado o ensaio em si. Essa Norma baseia a avaliação da durabilidade de concretos e argamassas, no controle da expansão longitudinal de barras de argamassa imersas em solução de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

O capítulo 6 encarrega-se de apresentar os resultados do ensaio, ou seja, as leituras das variações de comprimento das barras. Os dados foram tratados estatisticamente para se eliminar os valores espúrios. Por fim, as considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros serão comentadas no capítulo 7.



## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: para misturas de cimentos Portland CII E e CII F com diferentes teores de pozolanas em substituição ao cimento (metacaulim e sílica ativa) e variações da relação água/aglomerante, qual o desempenho em ordem crescente dos traços frente ao ataque por íons sulfato?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é o estabelecimento de uma escala de desempenho para misturas de cimentos Portland CII E e CII F com diferentes teores de pozolanas (metacaulim e sílica ativa) e diferentes relações água/aglomerante frente ao ataque de íons sulfato de acordo com a norma americana ASTM C1012-95a.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário deste trabalho é a verificação do comportamento de concretos e argamassas de cimentos CII E e CII F com diferentes relações água/aglomerante frente ao ataque de íons sulfato sem a presença de pozolanas na sua composição.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que com os materiais empregados, a capacidade de mitigação da reação expansiva com sulfatos cresce na seguinte ordem: concretos com CII F, concretos com CII E, com adição de metacaulim e com adição de sílica ativa.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O pressuposto do trabalho é que o método descrito pela norma americana ASTM C 1012-95a é válido para a avaliação do desempenho de cimentos Portland e misturas de cimento Portland com pozolanas frente ao ataque de íons sulfato.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa delimita-se a estudar, através da prescrição da norma americana ASTM C1012-95a, o comportamento de barras de argamassa submetidas ao ataque por sulfato de sódio.

## 2.6 LIMITAÇÕES

A seguir estão relacionadas as limitações relativas ao estudo proposto:

- a) a leitura da variação do comprimento das barras de argamassa em relógio comparador não será efetuada por apenas um operador;
- b) a solução de sulfato de sódio não será trocada a cada leitura, sendo apenas seu pH corrigido e mantido na faixa 6-8, conforme a Norma;
- c) serão estudados apenas dois tipos de cimento: CII E e CII F;
- d) serão estudadas apenas duas pozolanas: sílica ativa e metacaulim;
- e) os teores de pozolanas em substituição ao cimento limitam-se aos valores de 0, 5 e 10%;
- f) as relações água/aglomerante ficarão restritas a 0,35, 0,48 e 0,70.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi desenvolvido através das seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição do programa experimental;
- c) moldagem das amostras;
- d) preparação da solução de sulfatos;
- e) leitura inicial e imersão das amostras em solução;
- f) leituras em datas estabelecidas pela Norma;
- g) análise estatística das leituras;
- h) considerações finais e conclusões.

A figura 1 ilustra a sequência das etapas de realização do trabalho. Cada etapa será detalhada a seguir.

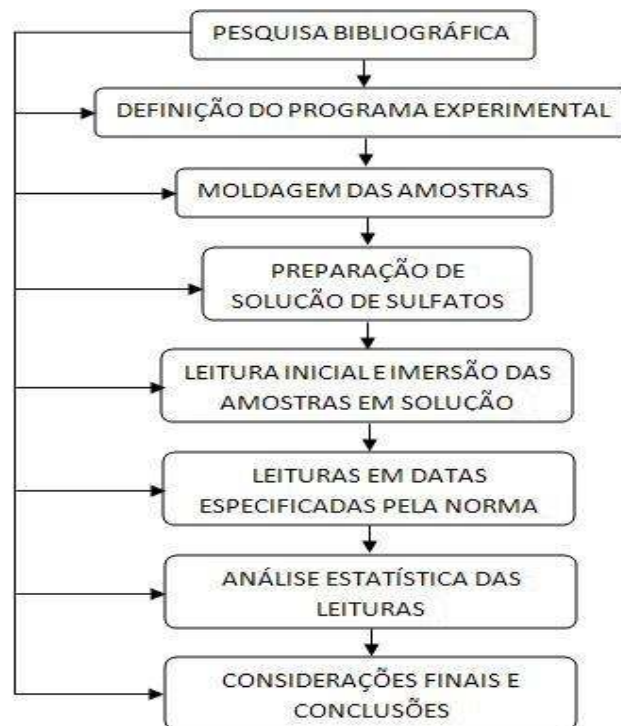


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

Depois de definido o tema do trabalho, iniciou-se a **pesquisa bibliográfica**, que, ao longo do estudo, forneceu as bases teóricas para o entendimento do mecanismo do ataque de íons sulfato a estruturas de concreto e argamassa. Além da literatura referente ao assunto, o estudo da norma ASTM C 1012-95a permitiu a compreensão do ensaio de durabilidade e suas etapas de execução.

Na sequência, com as prescrições da Norma, foi **definido o programa experimental**, ou seja, materiais e traços para a moldagem dos corpos-de-prova, no caso barras de argamassa, bem como a quantidade de corpos-de-prova. Em seguida, portanto, procedeu-se à **moldagem das amostras**, levando em conta um tempo de ensaio de aproximadamente 5 a 6 meses.

O próximo passo do trabalho foi a **preparação da solução de sulfato** de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), conforme a referida Norma, utilizada para a imersão das amostras e avaliação do desempenho. Após isto, foram feitas as **leituras iniciais** e, então, foram **imersas em solução**.

O passo seguinte da pesquisa consistiu no acompanhamento da variação do comprimento das barras através de relógio digital em base comparadora normalizado onde foram feitas **leituras em datas especificadas pela Norma**. A penúltima etapa do trabalho é um **tratamento estatístico** dos resultados obtidos com as leituras para eliminação dos dados espúrios. Finalmente, com a análise dos resultados, procede-se às **considerações finais e conclusões**.

### 3 ÍONS SULFATO

Pretende-se, neste capítulo, explicar a origem dos íons sulfato e o funcionamento de suas reações com os compostos hidratados do cimento Portland. É importante conhecer seus mecanismos, características de degradação e fatores que os potencializam.

#### 3.1 ORIGEM DOS ÍONS SULFATO

Os sais de sulfatos são comuns em todos os tipos de ambientes e solos, tanto industriais como domésticos. Neville (1997, p. 505) afirma que “São particularmente comuns os sulfatos de sódio, potássio, magnésio e cálcio, que se encontram em solos ou em águas freáticas.”. Mehta e Monteiro (2008, p. 161) confirmam a existência de íons sulfato nos solos, pois indicam que, “A maioria dos solos contém sulfato na forma de gipsita  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (normalmente de 0,01 a 0,05% expresso como  $\text{SO}_4$ ).”.

Os autores concordam na presença de sulfatos nos mais diversos ambientes. Para Biczók (1972, p. 242) os íons sulfato aparecem em maior ou menor quantidade em todas as águas livres ou subterrâneas e, especialmente, na água do mar. Quase todos os terrenos apresentam quantidades de íons sulfato, os quais constituem um dos mais importantes alimentos para os vegetais.

Seguindo esta linha de raciocínio, Silva Filho (1994, p. 62) cita que:

Os sulfatos são encontrados em larga escala em diversos países do mundo, sendo comuns na água do mar, nas águas subterrâneas e nos esgotos industriais. Geralmente os sulfatos estão presentes em áreas planas, onde os sais se acumularam ao longo do tempo sem serem carreados por fluxos de águas subterrâneas.

Sobre a água do mar o autor reforça o argumento e explica a severidade do ataque (SILVA FILHO, 1994, p. 62):

A água do mar também apresenta concentrações de sulfatos que podem desencadear o processo agressivo, degradando o concreto. O ataque é mais intenso nas zonas em que ocorrem oscilações de nível, com variações nas condições de saturação, pois esse fenômeno ocasiona a cristalização cíclica dos sais nos poros, incrementando a agressão.

Sobre a origem dos sulfatos a partir de reações com a água, Silva Filho (1994, p. 62) completa, “Na maior parte das vezes, os íons sulfato se originam da decomposição, por hidrólise, de sais presentes no solo ou na água, marinha ou subterrânea.”. Mehta e Monteiro (2008, p. 161) complementam de maneira a dar um panorama geral da origem desses sais:

O sulfato de amônia está frequentemente presente nas terras e águas agrícolas. Efluentes de fornos (que usam combustíveis com alto teor de enxofre) e da indústria química podem conter ácido sulfúrico. A decomposição da matéria orgânica em pântanos, lagos rasos, poços de mineração e tubulação de esgoto costuma levar à formação de gás  $H_2S$ , que se transforma em ácido sulfúrico pela ação bacteriana. A água usada em torres de resfriamento em concreto também pode conter alta concentração de sulfato devido à evaporação. Dessa maneira, não é raro encontrar concentrações de sulfato potencialmente deletérias em águas industriais e naturais.

Os íons sulfato são, conforme citam os autores, muito comuns em todos os ambientes, tanto industriais como naturais. Neste caso, tem destaque água do mar que pode ter efeitos mais agressivos às peças estruturais.

## 3.2 DEGRADAÇÃO E REAÇÕES

Nesta subdivisão pretende-se fazer primeiramente uma caracterização geral da degradação causada pelo ataque de íons sulfato a concretos e argamassas de cimento Portland e então apresentar as reações e fatores importantes, ou seja, o mecanismo químico clássico do ataque selenitoso.

### 3.2.1 Degradação

Os sais de sulfato, propriamente ditos, presentes nos solos não atacam o concreto, mas é preciso um meio para sua dissolução. Neville (1997, p. 505) afirma que “Os sais na forma de

sólidos não atacam o concreto, mas quando dissolvidos, podem reagir com a pasta de cimento hidratado.”.

O autor ainda explica as consequências e características do ataque de íons sulfato. Segundo ele (NEVILLE, 1997, p. 507):

As consequências do ataque por sulfatos não compreendem somente a desagregação por expansão e fissuração, mas também a perda de resistência do concreto devido à perda de coesão na pasta de cimento e a perda de aderência entre a pasta de cimento e as partículas de agregado. O concreto atacado por sulfatos tem uma aparência esbranquiçada característica. A deterioração geralmente começa nos cantos e arestas seguida de uma fissuração progressiva e lascamento que reduzem o concreto a uma condição friável ou mesmo mole.

Essa caracterização da degradação por íons sulfatos também é confirmada por Mehta e Monteiro (2008, p. 161, grifo do autor), quando afirmam que, “Sabe-se que a degradação do concreto como resultado das reações químicas entre o cimento Portland hidratado e os íons sulfato oriundos de uma fonte externa adquire **duas formas** que são distintas entre si.”. Seguindo em sua afirmação, os autores reiteram, “O ataque por sulfato pode se manifestar na forma de **expansão e fissuração** do concreto.”. E, complementando, “O ataque por sulfato também pode se manifestar na **diminuição progressiva de resistência e perda de massa** devido à perda da coesão dos produtos de hidratação do cimento.”.

Ainda na questão da característica da degradação, Biczók (1972, p. 251) afirma que a corrosão por sulfatos leva a pasta de cimento endurecida, devido a um aumento de volume, ao lascamento e expansão, formando-se fendas e o concreto amolece. O caso da barragem de *Fort Peck*, comentado a seguir é um exemplo desse tipo de degradação.

As figuras 2 e 3 ilustram o ataque por íons sulfato na barragem de *Fort Peck*, nos Estados Unidos, em 1971. O concreto, com resistência entre 49 e 60 MPa e relação água/cimento de 0,49, apresentava uma área deteriorada na parede de descarga com profundidade de cerca de 200 mm devido ao ataque por sulfato de sódio, com uma concentração em torno de 10.000 mg/L. A condição do concreto era friável (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 167).

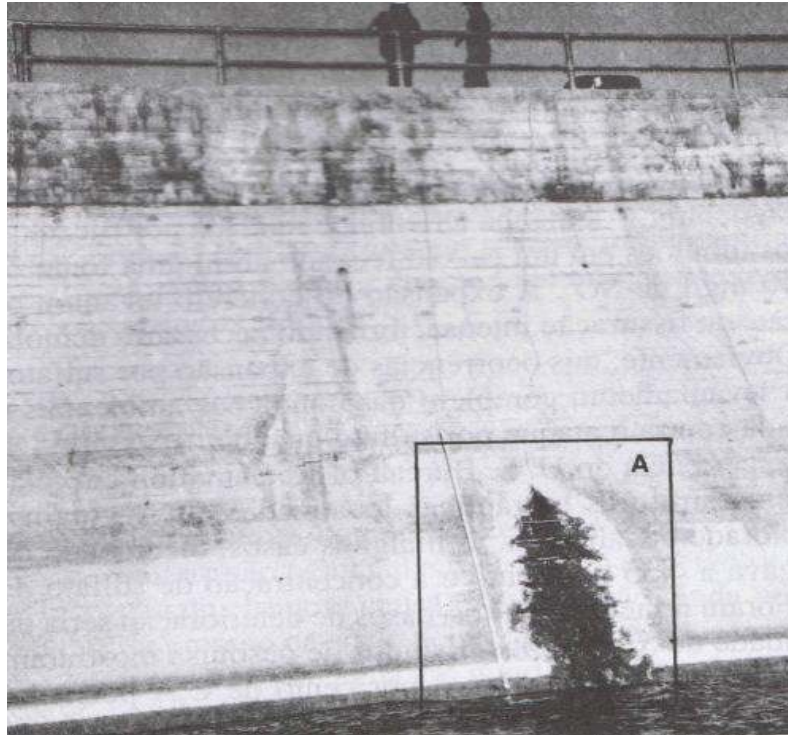


Figura 2: ataque por sulfatos na Barragem *Fort Peck*, Estados Unidos, 1971 (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 167)

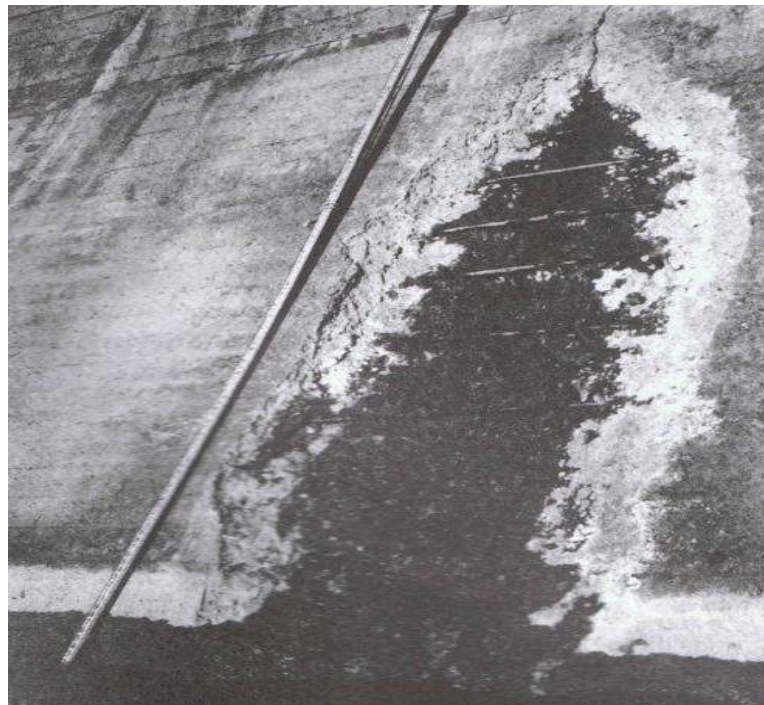


Figura 3: detalhe do ataque por íons sulfato em *Fort Peck* (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 167)



### 3.2.2 Reações com íons sulfato

Nesta seção faz-se uma nova divisão, destacando-se os fatores que contribuem para o ataque de íons sulfato e, em seguida, a química clássica do processo.

#### 3.2.2.1 Fatores intervenientes

Algumas condições favorecem a penetração de íons sulfato em solução em concretos e argamassas. A porosidade, a permeabilidade, sorção e difusão estão entre as principais contribuintes para a entrada e movimentação de fluidos no interior do elemento. Neville (1997, p. 483, grifo do autor) define e destaca a importância da porosidade para o deslocamento dos fluidos:

**Porosidade** é a medida da proporção do volume total do concreto ocupado pelos poros, geralmente expressa em porcentagem. Se a porosidade for grande e estiverem interligados, os poros contribuem para o deslocamento de fluidos através do concreto, de modo que a permeabilidade também passa a ser alta.

A permeabilidade é definida pelo autor, considerada de extrema importância para a durabilidade das estruturas de concreto e argamassa. De acordo com Neville (1997, p. 482), “[...] a durabilidade do concreto depende muito da facilidade com a qual os fluidos, tanto líquidos como gases, podem ingressar no concreto e se deslocar no seu interior; essa característica é, geralmente, mencionada como a permeabilidade do concreto.”

O autor também explica que a “**Permeabilidade** se refere a escoamento sob diferencial de pressão.” (NEVILLE, 1997, p. 483, grifo do autor). Destaca ainda sobre a complexidade da determinação da permeabilidade, pois ela é função da porosidade, das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros (NEVILLE, 1997, p. 488).

A permeabilidade é influenciada também pela presença dos agregados. Teoricamente um agregado com baixa permeabilidade produziria um concreto também com baixa permeabilidade. Porém, isso não é observado na prática. Mehta e Monteiro (2008, p. 129) explicam que o motivo pelo qual a permeabilidade do concreto é maior que a da pasta de

cimento correspondente é a existência de microfissuras existentes na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado.

Sobre a permeabilidade, Dal Molin (1988, p. 61) confirma a necessidade de seu controle ao afirmar que “Como o concreto somente é atacado após a penetração do sulfato em solução, a permeabilidade torna-se um fator importante. Concretos suficientemente impermeáveis podem ser considerados não suscetíveis ao ataque de sulfatos.”.

A sorção é outro meio de entrada de agentes agressivos nos elementos estruturais, através de fenômenos físicos naturais. Desta forma, Neville (1997, p. 483, grifo do autor) define: “**Sorção** é o resultado de movimentos capilares nos poros do concreto abertos ao meio ambiente. Portanto, somente pode ocorrer sucção capilar em concretos parcialmente secos; não existe adsorção de água em concretos completamente secos ou completamente saturados.”.

A difusão também contribui para a movimentação de fluidos no concreto, sendo que “[...] ocorre difusão quando o deslocamento de um gás ou vapor através do concreto se faz como resultado de um gradiente de concentração e não de um diferencial de pressão.” (NEVILLE, 1997, p. 484). Ainda sobre a difusão, Neville (1997, p. 485) completa sobre seu papel na penetração de agentes agressivos e movimentação dos íons na água dos poros:

Além da difusão dos gases, íons de caráter agressivo, particularmente cloretos e sulfatos, se deslocam por difusão na água dos poros. É nessa água que ocorrem as reações com a pasta de cimento hidratado de modo que a **difusão iônica** é importante com relação ao ataque por sulfatos ao concreto e ao ataque por cloretos à armadura.

Para o trânsito de agentes agressivos na matriz da pasta de cimento é necessário que os poros das estruturas tenham tamanho compatível com os íons invasores, ou então, formem uma malha contínua. Sobre esse aspecto Neville (1997, p. 483) ressalta que os poros considerados importantes para a permeabilidade têm de 120 a 160 nm e devem ser contínuos. Poros com água adsorvida e aqueles grandes, porém estreitos, não são efetivos para o escoamento, ou seja, a permeabilidade.

A permeabilidade do concreto é o fator mais significativo a ser controlado para o combate à entrada de agentes agressivos. Mehta e Monteiro (2008, p. 169) confirmam o que já foi explicitado acima afirmando que a baixa permeabilidade é a melhor proteção contra o sulfato.

Garantindo-se uma espessura adequada de concreto, um alto consumo de cimento, adensamento adequado e cura no estado fresco apropriada, tem-se a permeabilidade reduzida e, assim, uma maior proteção em relação à entrada de íons sulfato.

A permeabilidade também evolui com a idade do concreto. Segundo Neville (1997, p. 489), “A permeabilidade da pasta de cimento varia com a evolução da hidratação. Em uma pasta fresca, o escoamento da água é controlado pelo tamanho, forma e concentração das partículas de cimento. Com a evolução da hidratação, a permeabilidade decresce rapidamente.”.

Outro fator importante é a quantidade de sulfatos disponíveis. Uma grande quantidade de sulfatos provenientes do meio não significa que o ataque será mais severo, pois a reação com os compostos hidratados do cimento se dá conforme a disponibilidade dos mesmos. Segundo Silva Filho (1994, p. 73, grifo do autor):

Quanto à **agressividade da solução**, pode-se imaginar que, quanto maior for a quantidade de sulfatos dissolvidos potencialmente reativos, maior a agressão. Na realidade isto é parcialmente verdadeiro, pois a reação está limitada pela disponibilidade dos agentes oriundos dos compostos hidratados do concreto.

### 3.2.2.2 Mecanismo químico do processo

O processo de agressão desencadeado se dá pela reação dos compostos hidratados do cimento Portland com os íons sulfato de uma fonte externa. Os compostos hidratados mais vulneráveis ao ataque por íons sulfato são o  $C_3A$  (aluminato tricálcico) e o  $Ca(OH)_2$  (hidróxido de cálcio). Conforme Mehta e Monteiro (2008, p. 161), o hidróxido de cálcio e as fases presentes no cimento Portland hidratado que contêm alumina são mais vulneráveis ao ataque por íons sulfato. Na hidratação, cimentos Portland que contenham mais de 5% de  $C_3A$  potencialmente conterão a maior parte da alumina sob a forma de monossulfato hidratado,  $C_3A.C\$.H_{18}$

Os autores continuam a explicar a reação que pode ocorrer no caso de um teor ainda maior de aluminato tricálcico,  $C_3A$  (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 161):

Se o teor de  $C_3A$  do cimento for maior do que 8%, os produtos de hidratação também conterão  $C_3A.CH.H_{18}$ . Devido à presença de hidróxido de cálcio na pasta de cimento Portland hidratada, quando esta entra em contato com íons sulfato, ambos

os hidratos que contêm alumina se convertem à forma altamente sulfatada (etringita,  $C_3A \cdot 3C\$.H_{32}$ ) [...].

De acordo com os pesquisadores a combinação de  $Ca(OH)_2$  e  $C_3A$  em teores elevados potencializa o ataque. As reações 1 e 2 apresentam as combinações que resultam em **etringita tardia**, anteriormente descrita, a partir da reação dos monossulfatos hidratados com os íons sulfato (S) em presença de hidróxido de cálcio (CH) e água (H), conforme suas siglas (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 162):



O mecanismo de reação também é confirmado por Dal Molin (1988, p. 60):

Sob certas circunstâncias, o concreto pode sofrer o ataque por sulfatos, que reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio  $Ca(OH)_2$  livre proveniente da hidratação do cimento ou com o aluminato tricálcico  $C_3A$  hidratado, formando sulfato de cálcio ou sulfoaluminato de cálcio, respectivamente. Estas reações são normalmente acompanhadas por uma expansão do concreto.

Percebe-se que há um consenso entre os pesquisadores quanto ao mecanismo de expansão causado pelo ataque selenitoso, com formação de sulfoaluminato de cálcio ou **etringita**. Cánovas (1977, p. 61) ressalta que o aluminato tricálcico é o componente mais sensível e o que piores consequências pode ter nos concretos que se encontram sob a ação das águas sulfatadas. O sulfato de cálcio das águas selenitosas é o pior inimigo dos cimentos que contenham uma certa proporção de aluminato tricálcico devido à formação de sulfoaluminato de cálcio com 31 moléculas de água de cristalização, que é expansivo, com um aumento de volume de 2,5 vezes o inicial.

Entretanto, o processo de como se dá a expansão ainda é controverso. Mehta e Monteiro (2008, p. 162) destacam que “A pressão exercida pelo crescimento dos cristais de etringita e a expansão resultante da adsorção de água em meio alcalino por uma etringita pouco cristalina são duas das diversas hipóteses aceitas pela maioria dos pesquisadores.”. A figura 4 apresenta os cristais aciculares de etringita e hexagonais de monossulfato hidratado de cálcio.

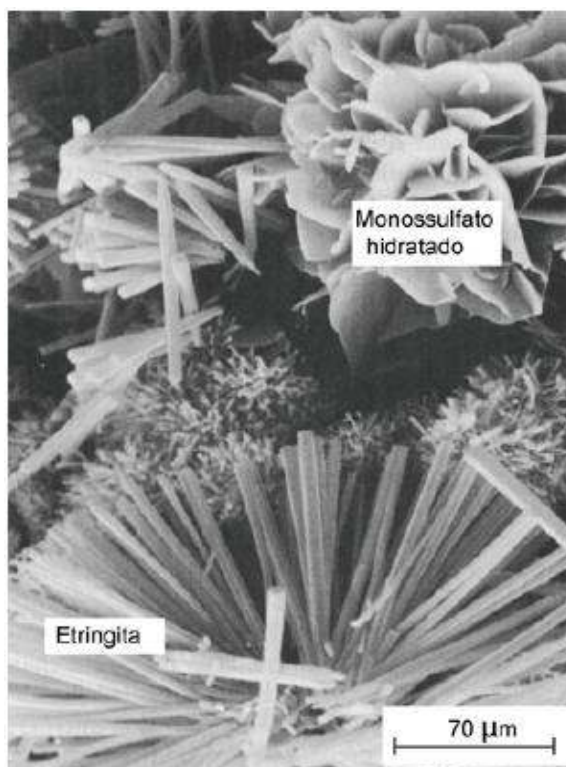


Figura 4: cristais de etringita e monossulfato hidratado de cálcio (METHA; MONTEIRO, 2008, p. 27)

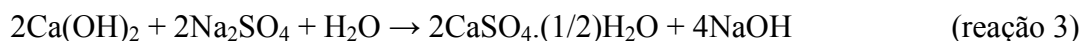
Os cátions associados à solução de sulfatos, por sua vez, são de extrema importância, determinando as características das reações. Silva Filho (1994, p. 63) comenta:

O tipo de cátion do sal é um fator de grande importância, pois sua presença determina a existência de certas reações, principalmente uma troca catiônica com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , que pode causar o aparecimento de hidróxidos com solubilidade variável. Os sulfatos de Sódio, Magnésio e Cálcio são os mais destacados, pela agressividade e abundância [...].

O autor apresenta as reações de cada tipo de sulfato com os compostos hidratados, chegando, também, à conclusão da formação de **etringita** expansiva. Sobre o **sulfato de sódio** ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), Silva Filho (1994, p. 64) afirma:

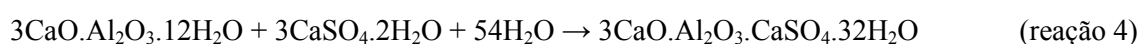
A conversão do hidróxido em gesso representa um aumento de volume de aproximadamente 100%, sendo, portanto, o volume de sólidos incrementado aproximadamente numa proporção de multiplicação por um fator dois. A partir de então o gesso formado pode, por sua vez, se combinar com o  $\text{C}_3\text{A}$  (Aluminato tricálcico) formando o trissulfoaluminato (etringita), reação que também apresenta caráter expansivo [...].

A reação 3 ilustra a combinação do hidróxido de cálcio com o sulfato de sódio de uma fonte externa para formação de sulfato de cálcio (gesso) e hidróxido de sódio (SILVA FILHO, 1994, p. 64):



A partir disso, conforme já explicado, o **sulfato de cálcio** ( $\text{CaSO}_4$ ) formado pode, então, reagir com o  $\text{C}_3\text{A}$ , sendo “[...] bastante agressivo, porque sua reação com os aluminatos hidratados causa um incremento de volume considerável, pois a etringita formada ocupa um volume 2,5 vezes maior que o aluminato tricálcico.” (SILVA FILHO, 1994, p. 64).

A reação do sulfato de cálcio com os aluminatos para formação de **etringita tardia** é expressa na reação 4 (SILVA FILHO, 1994, p. 64):



A reação por sulfato de sódio (reação 3) quanto à estabilidade do silicato hidratado de cálcio (C-S-H) é comentada por Mehta e Monteiro (2008, p. 162), “No caso do ataque por sulfato de sódio, a formação de hidróxido de sódio como subproduto da reação assegura a manutenção da alta alcalinidade do sistema, que é essencial para a estabilidade do produto da hidratação, C-S-H.”.

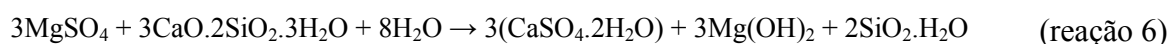
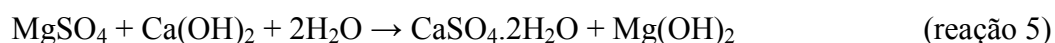
A importância do C-S-H, silicato hidratado de cálcio, conforme os próprios autores, é que “Os silicatos, que compõem cerca de 75% do cimento Portland comum, têm um papel dominante na determinação das **características de endurecimento** (taxa de desenvolvimento de resistência).” (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 217, grifo do autor).

Outro importante ataque e o mais severo, dá-se pelo **sulfato de magnésio** ( $\text{MgSO}_4$ ). Neville (1997, p. 506) comenta, “[...] o sulfato de magnésio ataca os silicatos de cálcio hidratados, formando sulfoaluminato de cálcio, bem como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e aluminato de cálcio hidratado.”.

Mehta e Monteiro (2008, p. 162) reforçam a idéia:

[...] no caso do ataque por sulfato de magnésio, a conversão do hidróxido de cálcio em gipsita é acompanhada pela formação simultânea de hidróxido de magnésio, que é insolúvel e reduz a alcalinidade do sistema. Na ausência de íons hidroxila na solução, o C-S-H deixa de ser estável e também é atacado pela solução de sulfato [...].

O mecanismo das reações do sulfato de magnésio com o hidróxido de cálcio (reação 5) e com o silicato hidratado de cálcio (reação 6) são apresentados (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 162):



Assim, o ataque por sulfato de magnésio se constitui no mais grave ao concreto de cimento Portland. Conforme Neville (1997, p. 506), “A consequência crítica do ataque por sulfato de magnésio é a destruição do C-S-H”.

Portanto, esse é o mecanismo clássico de agressão por íons sulfato a concretos e argamassas de cimento Portland com formação de etringita expansiva. As figuras 5 e 6 mostram exemplos do poder expansivo e degradante da **etringita tardia**.

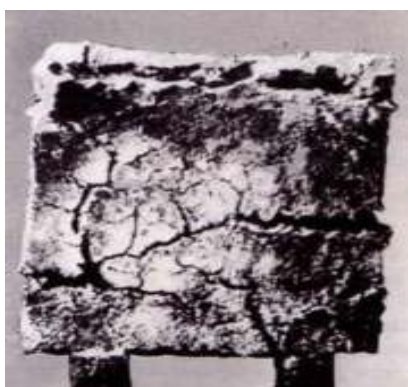


Figura 5: corrosão e lascamento devido à formação de etringita (BICZÓK, 1972, p. 251)

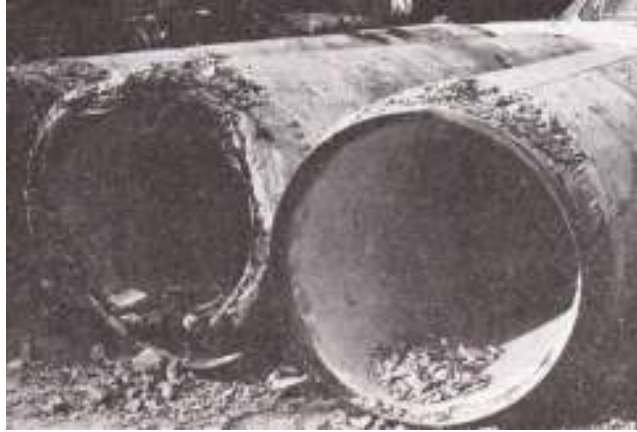


Figura 6: deterioração de tubos de concreto por sulfatos  
(CÁNOVAS, 1977, p. 62)

No capítulo seguinte será feita uma revisão bibliográfica relativa aos materiais utilizados na pesquisa. Conforme explicado anteriormente, os cimentos empregados serão o CII E e o CII F e as pozolanas, metacaulim e sílica ativa. Pretende-se, portanto, apresentá-los e caracterizá-los quanto às suas propriedades mais importantes frente a esse ataque químico.



## **4 INFLUÊNCIA DOS CONSTITUINTES DO CONCRETO NA REAÇÃO EXPANSIVA POR SULFATOS**

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os materiais que serão empregados na pesquisa. Sobre cimento Portland, será feita uma breve apresentação do cimento, sua composição hidratada e os seus vários tipos comercializados no País. Posteriormente, serão abordadas algumas pozolanas disponíveis para melhorar as propriedades do concreto e a reação pozolânica, ou seja, o mecanismo de atuação desses materiais com os compostos hidratados do cimento Portland.

### **4.1 CIMENTO PORTLAND**

Nesta subdivisão, pretende-se explicar primeiramente as generalidades do cimento Portland, seus constituintes e sua hidratação. Em uma segunda etapa, serão discutidos os requisitos dos cimentos resistentes a sulfatos.

#### **4.1.1 Cimento e Hidratação**

O cimento Portland tornou-se, ao longo do século XX, um dos principais materiais de construção do mundo. Segundo Biczók (1972, p. 25), o cimento é um material pulverulento de extrema finura que atua como aglomerante hidráulico, ou seja, que misturado com água adquire consistência pastosa endurecendo gradualmente até atingir consistência pétre.

O cimento é constituído basicamente por materiais calcários e argilosos. Sobre a composição do cimento Portland, Neville (1997, p. 24) explica que “[...] pode-se constatar que esse material é constituído principalmente de material calcário, como rocha calcária ou gesso, e alumina e sílica, encontrados como argilas ou xisto.”. A figura 7 mostra os minerais constituintes do clínquer de cimento Portland.

Esses materiais são misturados, conforme Biczók (1972, p. 25), em proporções adequadas, moídos e homogeneizados, introduzindo-se a mistura em fornos especiais, onde são sintetizados a temperaturas de 1000-1500°C. O produto intermediário obtido nesta calcinação, denominado clínquer, é moído conjuntamente com uma certa proporção de gesso e, algumas vezes, outros aditivos. O produto final que se obtém deste modo é denominado cimento Portland.

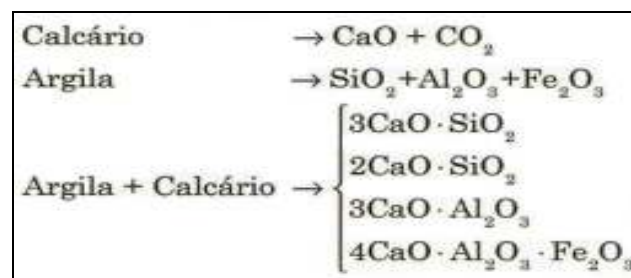


Figura 7: composição do clínquer de cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 208)

Os minerais de sílica e alumina combinam-se a altas temperaturas com o cálcio para formar os principais compostos do cimento Portland. Sobre este aspecto, Neville (1997, p. 29) destaca que quatro compostos são usualmente considerados como os principais constituintes do cimento, conforme visto na figura 7:

- a) C<sub>3</sub>S: silicato tricálcico;
- b) C<sub>2</sub>S: silicato dicálcico;
- c) C<sub>3</sub>A: aluminato tricálcico;
- d) C<sub>4</sub>AF: ferroaluminato tetracálcico.

Essa afirmação é confirmada também por Paulon (2005, p. 587-588) ao dizer que “O cimento Portland é constituído por quatro principais compostos: C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, os quais formam cerca de 90% em massa. Em contato com a água, os compostos anidros de cimento formam compostos hidratados.”.

O C<sub>3</sub>A possui uma hidratação muito rápida que, se não controlada, pode originar a chamada pega instantânea. Mehta e Monteiro (2008, p. 217, grifo do autor) já alertavam sobre a hidratação dos aluminatos:

Os aluminatos são conhecidos por se hidratarem a uma velocidade muito mais rápida do que os silicatos. Na verdade, as características de **enrijecimento** (perda de consistência) e **pega** (solidificação) de uma pasta de cimento Portland são amplamente determinadas por reações de hidratação envolvendo os aluminatos.

Confirmando o que foi acima mencionado a respeito da adição de gesso (gipsita) ao clínquer, Mehta e Monteiro (2008, p. 217) completam, “A menos que a rápida hidratação do C<sub>3</sub>A seja desacelerada de alguma forma, o cimento Portland não poderá ser usado para a maioria das aplicações de construção. A tarefa é geralmente cumprida com a adição de gipsita.”. Portanto, esta é a função da adição de gesso ao clínquer de cimento Portland.

De acordo com Kihara e Centurione (2005, p. 307), o processo de hidratação do cimento Portland pode ser entendido como uma estabilização dos minerais do clínquer pela água, gerando uma composição mineralógica constituída predominantemente por fases de baixa alcalinidade, como o silicato hidratado de cálcio, C-S-H (proporções variáveis de CaO, SiO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O), etringita (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>.3CaSO<sub>4</sub>.32H<sub>2</sub>O) e portlandita {Ca(OH)<sub>2</sub>}.

O modo como se processa a hidratação do cimento Portland, para a formação desses compostos, é resumido por Mehta e Monteiro (2008, p. 27) como segue:

Quando o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados a alta temperatura começam a entrar em solução, e a fase líquida se torna rapidamente saturada com várias espécies de íons. Como resultado da interação entre cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas, e dentro de poucos minutos da hidratação do cimento, começam a aparecer cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita. Poucas horas mais tarde, grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio e pequenos cristais fibrosos de silicato de cálcio hidratado começam a preencher os espaços vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução. Depois de alguns dias, dependendo da relação aluminato-sulfato do cimento Portland, a etringita pode se tornar instável e se decompor para formar o monossulfoaluminato hidratado, que tem a forma de placa hexagonal.

Conforme foi visto no capítulo anterior, o hidróxido de cálcio (figura 8) e o aluminato tricálcico hidratado estabilizado são os compostos hidratados mais sensíveis ao ataque por íons sulfato, com formação de etringita tardia.

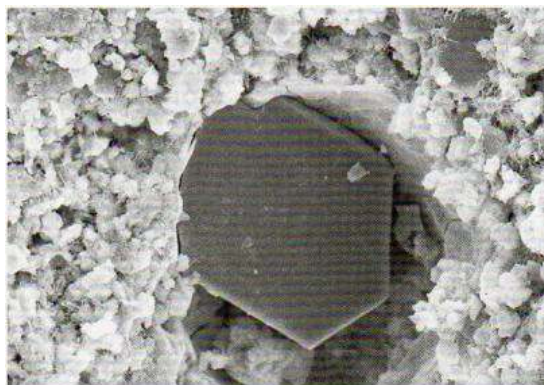


Figura 8: cristal hexagonal de hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$   
(PAULON, 2005, p.591)

Em vista disto, para melhorar as propriedades do cimento, ao clínquer moído se misturam substâncias adicionais, ou essas substâncias são moídas simultaneamente com o clínquer (BICZÓK, 1972, p. 58). Conforme Mehta e Monteiro (2008, p. 228):

Com o conhecimento das reatividades relativas dos produtos de hidratação dos compostos individuais, é possível especificar cimentos com características especiais, como: alta resistência inicial, baixo ou moderado calor de hidratação e alta ou moderada resistência ao sulfato.

O quadro 1 apresenta os tipos de cimento Portland comercializados no Brasil e os teores de adições com vistas à melhoria de suas propriedades.

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Filer Calcário
Comum	CPI	25,32,40	100		0	
Comum com adição	CPI-S	25,32,40	99-95		1-5	
Composto com Escória	CPII-E	25,32,40	94-56	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25,32,40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Filer	CPII-F	25,32,40	94-90	0	0	6-10
Alto Forno	CPIII	25,32,40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25,32	5-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25,32,40	-	-	-	-
Baixo Calor de Hidratação	BC	25,32,40	-	-	-	-
Branco Estrutural	CPB	25,32,40	-	-	-	-

Quadro 1: tipos de cimento Portland comercializados no Brasil  
(KIHARA; CENTURIONE, 2005, p. 316)

#### 4.1.2 Cimentos resistentes a sulfatos

De acordo com os mecanismos de reação por íons sulfato vistos anteriormente, as fases mais sensíveis a esse ataque são os aluminatos de cálcio hidratados,  $C_3A$ , e o hidróxido de cálcio,  $Ca(OH)_2$ . Segundo Neville (1997, p. 94), “A solução consiste em se usarem cimentos com baixo teor de  $C_3A$ , conhecidos como cimentos Portland resistentes aos sulfatos.”. O controle sobre o hidróxido de cálcio será abordado mais adiante em detalhes quando forem discutidas as reações pozolânicas.

Segundo Neville (1997, p. 95), uma redução do teor de  $C_3A$  diminuiria a susceptibilidade ao ataque por sulfatos, pois reduziria a disponibilidade de compostos alvos desses íons e como consequência haveria maior formação de silicato hidratado de cálcio (C-S-H). Em suas palavras:

O baixo teor de  $C_3A$  e o relativamente baixo teor de  $C_4AF$  dos cimentos resistentes aos sulfatos significam um alto teor de silicato, o que confere ao cimento uma elevada resistência, mas, como o  $C_2S$  representa uma grande parte dos silicatos, as resistências iniciais são baixas. O calor de hidratação desprendido pelos cimentos resistentes aos sulfatos não é muito maior do que o desprendido pelos cimentos de baixo calor de hidratação.

A adição de pozolanas também tem a capacidade de, além de reagir com o hidróxido de cálcio, diminuir o teor de  $C_3A$  devido à diminuição da quantidade de clínquer (SILVA FILHO, 1994, p. 79). A norma NBR 5737 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) afirma que cinco tipos de cimento, CPI, CPII, CPIII, CPIV e CP V-ARI, podem ser considerados resistentes a sulfatos desde que se enquadrem em pelo menos uma das seguintes condições:

- a) teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) do clínquer e teor de adições carbonáticas de no máximo 8% e 5% em massa, respectivamente;
- b) cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno em massa;
- c) cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- d) cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

## 4.2 POZOLANAS E REAÇÕES POZOLÂNICAS

Nesta seção será apresentada inicialmente a importância das adições pozolânicas na melhoria das propriedades de durabilidade dos concretos e argamassas. Em seguida, serão descritas alguns tipos de pozolanas, com ênfase nas utilizadas na pesquisa.

### 4.2.1 Reação pozolânica

Primeiramente, deve-se definir esses materiais chamados pozolanas, de grande importância para a durabilidade de concretos e argamassas de cimento Portland. De acordo com Mehta e Monteiro (2008, p. 234), uma pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só não tem propriedades pozolânicas, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes.

Em geral, os materiais pozolânicos podem ter origem natural ou artificial. Os materiais naturais mais comumente encontrados são: cinzas vulcânicas, pumicita, opalina, micas e calcedônias, terras diatomáceas calcinadas e argila calcinada. Algumas pozolanas naturais podem causar problemas devido às suas propriedades físicas, como, por exemplo, as terras diatomáceas que devido à sua porosidade e angulosidade, demandam alto teor de água. Outros materiais como metacaulim são obtidos por algum processamento, como a calcinação a partir de argilas (NEVILLE, 1997, p. 101-102).

Quanto aos materiais artificiais ou materiais de subprodutos, Mehta e Monteiro (2008, p. 311) explicam que as cinzas da combustão de carvão e resíduos agrícolas, como palha e casca de arroz, sílica ativa de certos processos metalúrgicos e escória granulada de metais industriais ferrosos e não-ferrosos fazem parte dos subprodutos que são adequados para uso como adições minerais no concreto de cimento Portland.

A importância do uso de pozolanas tem relação com as taxas de liberação de calor e o refinamento dos poros do concreto. Sobre esse aspecto Oliveira (1987, p. 59) explica que o uso de pozolanas adequadamente nos concretos melhora a trabalhabilidade, diminuindo o calor de hidratação, reduzindo a permeabilidade, assim como a resistência aos ataques por

águas sulfatadas. Assim, reações álcali-agregado e eflorescências por percolação de água também são mitigados.

Além do refinamento dos poros e diminuição da liberação de calor, a adição de pozolanas cumpre a função de consumir o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento. Este composto é muito vulnerável a ataques químicos como visto no capítulo sobre os mecanismos das reações por sulfatos. De acordo com Dal Molin (2005, p. 347-348), o efeito químico da adição de materiais pozolânicos é associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, que é o principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas.

Essa afirmação é confirmada por Mehta e Monteiro (2008, p. 236), quando apresentam a lenta combinação do material pozolânico com o hidróxido de cálcio (reação 7), para a formação de C-S-H:



Os autores resumem a importância da reação pozolânica, como é chamada a reação 7, em três aspectos:

- a) a reação é lenta, portanto, as taxas de liberação de calor também são lentas;
- b) a reação consome hidróxido de cálcio, em vez de produzi-lo, o que tem um importante papel na durabilidade da pasta hidratada frente a ambientes ácidos;
- c) os produtos da reação são muito eficientes em preencher espaços capilares, melhorando, assim, a resistência e a impermeabilidade do sistema.

Salienta-se que a reação é lenta para pozolanas convencionais como a cinza volante. Para a sílica ativa, cujos grãos são muito finos, a reação pozolânica é rápida.

Na seção seguinte serão apresentados, de maneira não exaustiva, alguns materiais pozolânicos artificiais, com atenção especial aos utilizados na pesquisa, ou seja, sílica ativa e metacaulim. Metacaulim, que no caso representa uma pozolana de origem natural.

#### 4.2.2 Materiais pozolânicos

Dentre os materiais artificiais que podem ser adicionados ao concreto para a melhoria de suas propriedades, pode-se destacar: a cinza volante, a escória de alto-forno e a sílica ativa (ou fumo de sílica). Com relação aos materiais naturais, limitar-se-á a conceituar e contextualizar o metacaulim, material usado nessa pesquisa.

A **cinza volante** é proveniente da combustão de carvão em usinas termoelétricas. Quando o carvão passa através da zona de alta temperatura do forno, a matéria volátil e o carbono são queimados, enquanto as impurezas minerais, como argilas, quartzo e feldspato fundem-se a alta temperatura. A matéria fundida vai para as zonas de baixa temperatura onde solidifica em forma de partículas esféricas de vidro (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 312).

De acordo com Dal Molin (2005, p. 354), “Cinzas volantes são as cinzas de textura mais fina arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e recolhidas por precipitadores eletrostáticos ou mecanicamente.”. As partículas de cinza volante são esféricas, o que é uma vantagem do ponto de vista da demanda de água e têm uma finura muito grande. A sua grande área específica significa que o material está prontamente disponível para a reação com o hidróxido de cálcio (NEVILLE, 1997, p. 102).

A **escória de alto-forno** é o resíduo não-metálico proveniente da produção de ferro-gusa, realizada em unidades industriais chamadas alto-fornos. As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com adição de calcário, dolomita e cinzas de coque. Se resfriadas ao ar, seus componentes formam distintas formas cristalinas e perdem parcialmente sua ação como material cimentante, mas se resfriadas bruscamente, por meio de jatos de água ou vapor de água, não há tempo para a formação desses cristais, resultando em um material predominantemente amorfo e potencialmente reativo (DAL MOLIN, 2005, p. 363-364). Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 314), a escória de alto-forno pode contribuir de maneira importante para a resistência dos produtos do cimento logo aos sete dias após a hidratação.

A **sílica ativa**, também conhecida como fumo de sílica condensado, é um subproduto das indústrias de silício-metálico e ligas ferro-silício. O quartzo se reduz a silício em temperaturas de até 2000°C e produz vapores de SiO, que se oxidam e condensam na zona de baixa temperatura do forno em partículas esféricas minúsculas. O material é altamente pozolânico,



mas aumenta consideravelmente a necessidade de água no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 315). Neville (1997, p. 104) confirma o que foi explicado acima e completa:

O SiO que se desprende na forma de gás, se oxida e se condensa na forma de partículas esféricas extremamente pequenas de sílica amorfa (SiO<sub>2</sub>); por essa razão o nome de fumo de sílica. A sílica, na forma de material vítreo é muitíssimo reativa, e o pequeno tamanho das partículas acelera as reações com o Ca(OH)<sub>2</sub> produzido na hidratação do cimento Portland. As pequeníssimas partículas de fumo de sílica entram no espaço entre as partículas de cimento melhorando assim uma pasta mais compacta.

Sobre o poder de reação da sílica ativa, Dal Molin (2005, p. 359) destaca, “Ao contrário das pozolanas naturais, escórias e cinzas volantes, a reação Ca(OH)<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> envolvendo a sílica ativa é rápida (e pouco variável), não sendo necessários longos períodos de cura para atingir as resistências ou baixas permeabilidades desejadas.”. A figura 9 mostra os grãos esféricos da sílica ativa.

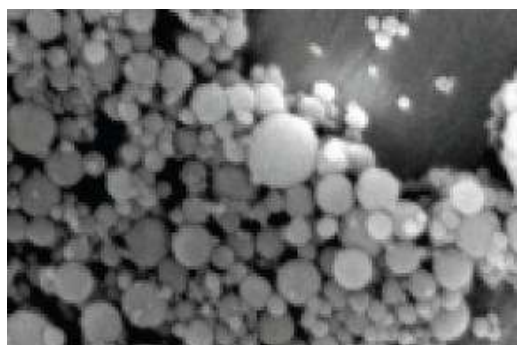


Figura 9: partículas esféricas de sílica ativa (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 316)

O **metacaulim** é uma adição mineral alumino-silicosa obtida da calcinação, entre 600°C a 900°C, de alguns tipos de argilas, como as cauliníticas e os caulins. As argilas por si só não são pozolânicas, a não ser que a estrutura cristalina dos materiais alumino-silicosos seja transformada em uma estrutura desordenada e amorfa através de tratamento térmico. Submetendo-se a caulinita às temperaturas citadas, ocorre remoção dos íons hidroxila de sua estrutura cristalina, havendo rearranjo atômico. O composto amorfo formado é de grande instabilidade química, denominado metacaulinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>), que é responsável pela atividade pozolânica, com formação predominante de C-S-H (DAL MOLIN, 2005, p. 359-360).

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se o programa experimental adotado. O objetivo é relatar os métodos e critérios utilizados para a moldagem e verificação do comportamento dos corpos-de-prova frente ao ataque de íons sulfato, conforme a norma ASTM C 1012-95a. Essa Norma faz referência a outras normas complementares, relacionadas aos materiais, equipamentos e métodos de quantificação dos resultados, as quais serão citadas ao longo do capítulo.

A referida Norma propõe a avaliação do desempenho de concretos de cimento Portland frente ao ataque de íons sulfato através do ensaio de barras de argamassa submetidas ao ataque deste íon. O método proposto determina os procedimentos para a moldagem de barras e cubos de argamassa, bem como do preparo da solução de sulfatos e medição da variação de comprimento das barras ao longo do ensaio. Os cubos têm a finalidade de fornecer a idade de imersão das barras em solução de sulfatos, em função da resistência à compressão mínima de 20 MPa atingida

Em um primeiro momento, indicam-se os materiais adotados para a realização do ensaio. A seguir, descrevem-se os procedimentos para a definição dos traços e moldagem dos corpos-de-prova. Posteriormente, aborda-se o preparo da solução de sulfatos e, finalmente, é relatado o acompanhamento das variações de comprimento das barras conforme a Norma.

### 5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Nesta seção apresentam-se os materiais utilizados para a moldagem dos corpos-de-prova a serem ensaiados. A começar pela definição dos cimentos e adições e a seguir pela composição granulométrica da areia.

### 5.1.1 Cimentos e adições

Conforme foi dito ao longo do trabalho, os cimentos utilizados na pesquisa são o CII E e o CII F, cujas proporções de componentes foram exibidos no quadro 1. As adições pozolânicas são a sílica ativa Silmix e Metacaulim do Brasil. O quadro 2 apresenta as massas específicas desses materiais.

<b>Cimento / Pozolana</b>	<b>Massa específica (g cm<sup>3</sup>)</b>
CII E	2,92
CII F	3,02
Sílica ativa Silmix	2,16
Metacaulim do Brasil	2,52

Quadro 2: massa específica dos materiais utilizados na pesquisa

### 5.1.2 Composição granulométrica da areia

De acordo com as especificações da ASTM C 109/C 109M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1998), a areia a ser utilizada deve ser de origem natural, de sílica, estando de acordo com o padrão de distribuição granulométrica apresentado no quadro 3.

<b># Peneiras</b>	<b>% Retida na Peneira</b>
600 µm	4%
425 µm	31%
300 µm	45%
150 µm	20%

Quadro 3: distribuição granulométrica da areia  
(AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1992)

Buscando-se atender às prescrições da Norma, utilizou-se areia proveniente da região metropolitana de Porto Alegre, que foi inicialmente lavada e seca em estufa. Após a etapa de peneiramento, as porções retidas foram pesadas, buscando-se obter a composição granulométrica indicada, conforme o quadro 3.

## 5.2 PROPORCIONAMENTO E MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

Nesta seção, são apresentados os procedimentos para a definição dos traços adotados para o ensaio, bem como a moldagem dos corpos-de-prova.

### 5.2.1 Definição dos traços

A ASTM C 1012-95a (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995) estabelece o traço 1:2,75 e relação água/aglomerante igual a 0,485 para moldagem das barras de argamassa a serem submetidas ao ataque de íons sulfato. Contudo, no sentido de possibilitar a avaliação de misturas com diferentes relações água/aglomerante, adotando-se uma faixa de 0,35 a 0,70, foi necessário definir os novos traços, ajustando-se a quantidade dos materiais utilizados.

O ajuste da quantidade de areia foi feito produzindo-se argamassas a partir de valores fixados de materiais, variando-se a quantidade de areia, através da adição de incrementos desse material. Para tal, manteve-se a consistência das argamassas em  $110 \pm 5$  mm, de acordo com a ASTM C 109/C 109M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1998.).

Para os traços ricos, ou seja, com relação água/aglomerante 0,35, partiu-se de um traço 1:1, utilizando-se 500g de cimento e 500g de areia. A partir disto, foram produzidas novas argamassas, mantendo-se fixa a quantidade de cimento e acrescentando 62,5 g à quantidade inicial de areia. O quadro 4, para o cimento CII E, ilustra o procedimento.

CII E					
Traço	a/ag	cimento (g)	areia (g)	$\Delta$ areia (g)	$\Delta$ areia (g)
1:1	0,35	500	500	0	$(750-500)/4 = 62,5$
1:1,125	0,35	500	562,5	62,5	4 incrementos de areia de 62,5 g
1:1,25	0,35	500	625	62,5	
1:1,375	0,35	500	687,5	62,5	
1:1,5	0,35	500	750	62,5	

Quadro 4: determinação do traço rico para cimento CII E

Para os traços pobres, ou seja, com relação água/aglomerante 0,70, o procedimento foi o mesmo, mas desta vez partindo-se do traço indicado na ASTM C 1012-95a (AMERICAN

SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995), isto é, 1:2,75, utilizando-se 500 g de cimento e 1375 g de areia. Foram, então, acrescidos incrementos de 218,75 g de areia, mantendo-se constante a quantidade de cimento. O quadro 5, para o cimento CII E, apresenta a determinação do traço.

CII E					
Traço	a/ ag	cimento (g)	areia (g)	$\Delta$ areia (g)	$\Delta$ areia (g)
1:2,75	0,70	500	1375	0	$(2250-1375)/4 = 218,75$
1:3,18	0,70	500	1593,75	218,75	4 incrementos de areia de 218,75 g
1:3,625	0,70	500	1812,5	218,75	
1:4,063	0,70	500	2031,25	218,75	
1:4,5	0,70	500	2250	218,75	

Quadro 5: determinação do traço pobre para cimento CII E

O procedimento utilizado para a definição dos traços ricos e pobres aplicado ao cimento CII E, descrito acima, foi o mesmo aplicado para o cimento CII F. Desta forma, nas figuras 10 e 11 são exibidos gráficos que interpolam os valores obtidos para a quantidade de areia em função da relação água/aglomerante. As curvas foram obtidas a partir dos dados resultantes dos ajustes da quantidade de areia para as relações água/aglomerante requeridas ao estudo, para ambos os cimentos.

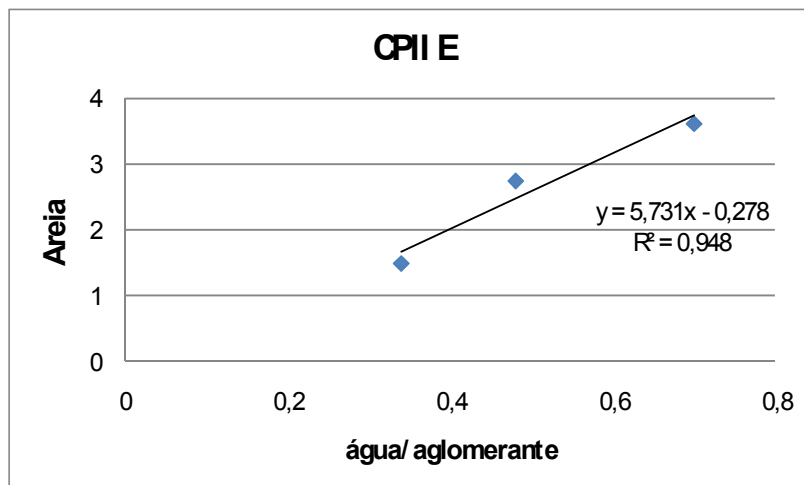


Figura 10: quantidade de areia em função da relação água/aglomerante para misturas com cimento CII E

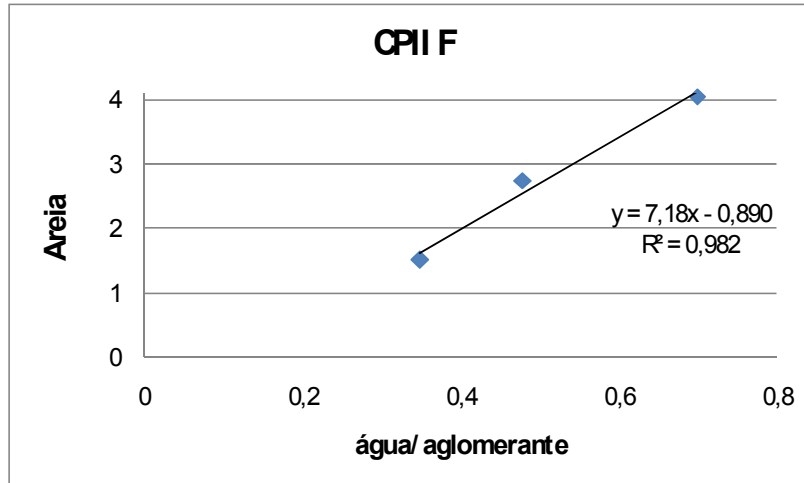


Figura 11: quantidade de areia em função da relação água/aglomerante para misturas com cimento CII F

Para a definição dos traços, a quantidade de areia foi obtida pela substituição da relação água/aglomerante nas equações de interpolação dos gráficos (figuras 10 e 11), onde a relação água/aglomerante corresponde à variável  $x$ .

Como exemplo, têm-se para o cimento CII E, o traço rico 1:1,67 e relação água/aglomerante 0,34 e, como traço pobre, 1:3,73 e relação água/aglomerante 0,70. Os quadros 6 e 7 apresentam os traços e respectivas quantidades de materiais que foram utilizadas nas moldagens, para as misturas de referência, tomando-se como base uma quantidade de cimento de 1000 g.

Cimento CII E						
Traço	a/ ag	Quantidade de materiais				
		Cimento (g)	Areia (g)			
			600 $\mu\text{m}$	425 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$
1:1,67	0,34	1000	66,8	517,7	751,5	334
1:2,47	0,48	1000	98,8	765,7	1111,5	494
1:3,73	0,70	1000	149,2	1156,3	1678,5	746

Quadro 6: traços para cimento CII E para as misturas de referência

Cimento CII F						
Traço	a/ ag	Quantidade de materiais				
		Cimento (g)	Areia (g)			
			600 µm	425 µm	300 µm	150 µm
1:1,62	0,35	1000	64,8	502,2	729	334
1:2,55	0,48	1000	102	790,5	1147,5	510
1:4,13	0,70	1000	165,2	1280,3	1858,5	826

Quadro 7: traços para cimento CII F para as misturas de referência

Observa-se que o traço intermediário utilizado na pesquisa corresponde aproximadamente ao traço padrão (1:2,75) da norma ASTM C 1012-95a (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995). Salienta-se, também, que as quantidades de areia levam em conta as considerações do quadro 3.

Buscando-se atingir os objetivos do trabalho, a partir das misturas de referência de cada cimento, foram definidas as quantidades de materiais para as misturas com a utilização das pozolanas, nos teores de 5% e 10% em substituição ao cimento, conforme quadro 8.

CII E com 5% Pozolana		CII E com 10% de pozolana	
Cimento (g)	Pozolana (g)	Cimento (g)	Pozolana (g)
950	50	900	100
CII F com 5% de Pozolana		CII F com 10% de Pozolana	
Cimento (g)	Pozolana (g)	Cimento (g)	Pozolana (g)
950	50	900	100

Quadro 8: composição dos traços com pozolanas (sílica ativa e metacaulim)

## 5.2.2 Moldagem

Segundo a ASTM C 1012-95a (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995), o ensaio para a avaliação do desempenho de concretos e argamassas de cimento Portland ou misturas de cimento Portland com adições pozolânicas frente ao ataque por íons sulfato seguiu as seguintes diretrizes, que serão detalhadas adiante:

- a) moldagem de 21 cubos (50 mm) para cada traço;

- b) moldagem de 6 barras (25x25x285 mm) para cada traço para imersão em solução de sulfatos;
- c) cura dos corpos-de-prova em câmara úmida, à temperatura de  $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ , por 24h;
- d) desmoldagem e cura em água com cal à temperatura de  $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ;
- e) ruptura dos cubos à compressão;
- f) imersão das barras em solução de sulfatos;
- g) leituras das variações de comprimento das barras em datas especificadas pela Norma.

O ensaio, portanto, consistiu em moldar 21 cubos de argamassa, de acordo com a ASTM C 109/C 109M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1998) e 6 barras de argamassa de acordo com a ASTM C 157 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1993) para cada traço definido no item 5.2.1. Todos esses corpos-de-prova foram moldados e permaneceram em cura em câmara úmida ( $\text{UR} > 90\%$  e temperatura de  $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ) por 24h. Após este período foram desmoldados das fôrmas e encaminhados para cura em água com cal à temperatura de  $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ .

Os cubos são moldados para a determinação da idade de leitura inicial ou de referência das barras que correspondem ao seu traço. Dois cubos de cada traço são rompidos à compressão conforme a ASTM C 109/C 109M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1998) nas idades de 24h, 3, 7 e 28 dias. Quando a média da resistência à compressão dos dois cubos atinge valor igual ou superior a 20MPa, as barras de mesmo traço são consideradas aptas a serem imersas em solução de sulfatos, iniciando-se, assim, o acompanhamento de sua variação de comprimento.

As figuras 12 a 14 mostram a aparência dos cubos nas etapas de moldagem, cura e ruptura à compressão.





Figura 12: moldagem dos cubos de argamassa para cada traço



Figura 13: cura dos cubos em água com cal a  $23 \pm 1,7^\circ\text{C}$



Figura 14: ruptura à compressão dos cubos

Com relação à moldagem das barras, o método aplicado segue as determinações estabelecidas pela ASTM C 157 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1993). As fôrmas devem ter 1 ou 2 compartimentos e proporcionar as dimensões de 25x25x285 mm às barras, além de conferir distância interna entre os pinos de leitura de 250 mm. As fôrmas também devem ser de aço ou outro metal rígido que não seja atacado pela pasta de cimento ou argamassa. Para o ensaio, foram seladas com filme plástico para facilitar a adequada desmoldagem, além de evitar a fuga da água de amassamento. A figura 15 apresenta um exemplo de fôrma usada na pesquisa.



Figura 15: fôrma de aço para moldagem das barras de argamassa

Nas extremidades das fôrmas foram inseridas porcas metálicas para fixação de pinos de aço inoxidável, com comprimento de 22,5 mm, os quais possibilitam o contato com o relógio digital, permitindo a medição da variação do comprimento das barras ao longo do ensaio. Os pinos devem ser inseridos nas porcas de modo a penetrar na barra até a distância de  $17 \pm 5$  mm pois, de acordo com a Norma, no interior da barra de argamassa, deve-se obter uma distância de 250 mm entre os pinos, aproximadamente.

O quadro 9 tem o objetivo de facilitar a compreensão da quantidade de barras moldadas para cada traço, para a imersão em solução de sulfatos. Neste resumo, enuncia-se apenas o cimento CII E, considerando que para o cimento CII F foram moldadas exatamente as mesmas quantidades de barras, totalizando, portanto, 180 barras de argamassa para imersão em solução de sulfatos.

<b>Cimento CII E</b>				
<b>Cimento</b>	<b>a/ ag</b>	<b>Pozolana</b>	<b>% Pozolana</b>	<b>N° de barras</b>
CII E- Ref	0,35	-	0	6
CII E- Ref	0,48	-	0	6
CII E- Ref	0,70	-	0	6
CII E- 5SA	0,35	Sílica ativa	5	6
CII E- 5SA	0,48	Sílica ativa	5	6
CII E- 5SA	0,70	Sílica ativa	5	6
CII E- 10SA	0,35	Sílica ativa	10	6
CII E- 10SA	0,48	Sílica ativa	10	6
CII E- 10SA	0,70	Sílica ativa	10	6
CII E- 5MC	0,35	Metacaulim	5	6
CII E- 5MC	0,48	Metacaulim	5	6
CII E- 5MC	0,70	Metacaulim	5	6
CII E- 10MC	0,35	Metacaulim	10	6
CII E- 10MC	0,48	Metacaulim	10	6
CII E- 10MC	0,70	Metacaulim	10	6
<b>Total</b>				<b>90</b>

Quadro 9: quantidade de barras moldadas para cimento CII E

A figura 16 exemplifica a aparência final de uma barra para imersão em sulfatos. As barras ficaram em cura em água com cal até atingirem a idade necessária para entrar em solução, conforme o resultado dos testes com os cubos.



Figura 16: barra de argamassa para ensaio em solução de sulfatos

### 5.3 SOLUÇÃO DE SULFATOS

Tendo os cubos atingido a resistência à compressão igual ou superior a 20MPa, as barras de seus respectivos traços estão aptas a entrar na solução de sulfatos.

Conforme especificado pela ASTM C 1012-95a (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995), o sal utilizado no ensaio é o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e o preparo da solução é feito dissolvendo-se para cada 900 mL de água deionizada, 50 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Adiciona-se, após a dissolução, mais água deionizada até completar 1 L de solução.

A Norma estabelece que o volume de solução deva ser de  $4 \pm 0,5$  vezes o volume das barras que nela estiverem imersas. Na pesquisa, adotou-se um volume de solução correspondente a 3,5 vezes o volume total das barras imersas. O volume considerado pela Norma, para cada barra, é igual 184 mL. Com esses valores, calculou-se um volume de solução de sulfato de sódio de aproximadamente 33,2 L para as 180 barras. A figura 17 ilustra o recipiente contendo a solução de sulfatos, utilizado para a imersão das barras durante o ensaio.



Figura 17: barras de argamassa em solução de sulfato de sódio

Preparada a solução, é necessário conferir o seu pH (potencial de hidrogênio), que deve ser mantido na faixa 6,0 a 8,0, segundo prescrição da Norma. Para atingir esses valores, nos casos em que a solução não esteja nessa faixa, foram adicionadas soluções mais concentradas, ácidas ou básicas, conforme o caso, para corrigir o pH.

Adicionaram-se solução de hidróxido de sódio (NaOH), no caso em que o pH estava ácido, ou seja, abaixo de 6 e solução de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), quando o pH encontrava-se básico, acima de 8. O controle do pH é feito usando um medidor de pH conforme figura 18.



Figura 18: medidor de pH para controle da solução



## 5.4 MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO DAS BARRAS

Nesta etapa da pesquisa, as barras já aptas a entrar em solução foram imersas para o início do ataque químico, realizando-se uma leitura inicial ou de referência. As leituras de variação de comprimento, conforme ASTM C 490 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1997), foram realizadas utilizando-se uma base comparadora, normalizada, munida de relógio digital, com precisão de milésimo de milímetros. A Norma determina que as leituras devam ser feitas nas seguintes idades: 1, 2, 3, 4, 8, 13 e 15 semanas após a imersão em solução.

À idade de 15 semanas, recomenda-se inspecionar os dados. Se a variação de comprimento for leve, gradual e uniforme, as próximas leituras devem ser feitas nas idades de 4, 6, 9 e 12 meses. A figura 19 exemplifica a leitura das barras em relógio comparador.

A norma ASTM C 1012-95a (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995) recomenda que a solução seja trocada após cada leitura por nova solução de pH na faixa 6,0 a 8,0. No trabalho, como já expresso nas limitações, a solução não foi trocada a cada leitura (por motivos de limitações financeiras e ambientais), mas sim a cada 2 semanas. Apesar disso seu pH foi mantido dentro da faixa requerida.



Figura 19: leitura das barras com relógio digital em base comparadora

## 6 RESULTADOS ALCANÇADOS

Neste capítulo de resultados, primeiramente apresentam-se o método de tratamento dos dados colhidos. A seguir, os resultados em forma de gráficos comparativos das variações de comprimento das barras para os traços estudados.

### 6.1 TRATAMENTO DOS DADOS

As leituras de variação do comprimento das barras foram realizadas, conforme explicado na seção 5.4. A norma ASTM C 1012-95a (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995) recomenda calcular a variação de comprimento de acordo com a equação 1:

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100 \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$\Delta L$  = variação percentual de comprimento na idade x;

$L_x$  = leitura do comprimento na idade x;

$L_i$  = leitura inicial ou de referência;

$L_g$  = comprimento nominal interno entre pinos (250 mm).

As leituras foram efetuadas até a idade de 15 semanas para todas as barras. Em alguns casos, algumas barras foram degradadas totalmente pela solução de sulfatos antes das 15 semanas.

Para cada traço, foi feita a média aritmética das variações percentuais de comprimento de suas correspondentes barras. As leituras apresentaram variabilidades devido às limitações já comentadas no trabalho. Para eliminar os dados considerados espúrios, foram considerados os dados que se encontravam dentro da faixa da média mais ou menos um desvio padrão.

A partir do desvio padrão, portanto, tem-se a fronteira que delimita os dados válidos para a composição dos resultados. De acordo com a ASTM C 1012-95a (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1995) deve-se ter ao menos 3 barras de cada traço com dados de leitura válidos para, assim, compor o comportamento médio do traço. O quadro 10 exemplifica, para o traço produzido com cimento CII E de referência e relação água/aglomerante 0,48, uma planilha de cálculo para a retirada de dados espúrios.

Nesse tratamento, 3 barras com dados válidos, as barras 1, 2 e 6, apresentam as leituras dentro da faixa da média  $\pm$  um desvio padrão. As barras 3, 4 e 5 têm resultados fora da faixa de valores, em negrito, e são, portanto, descartados para a média final do traço.

CII E 48 Ref										
Idade (semanas)	Expansão das barras (%)						Média	Desvio padrão	Exp. Máx.	Exp. Mín.
	1	2	3	4	5	6				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,007	-0,006	<b>-0,015</b>	0,013	0,001	0,012	0,002	0,011	0,013	-0,009
2	0,040	0,027	<b>-0,006</b>	<b>0,056</b>	0,029	0,007	0,026	0,022	0,048	0,003
3	-0,005	0,003	<b>-0,010</b>	<b>0,021</b>	-0,001	0,016	0,004	0,012	0,016	-0,008
4	0,006	0,003	<b>-0,012</b>	<b>0,013</b>	-0,002	0,009	0,003	0,009	0,012	-0,006
8	0,008	0,006	<b>-0,007</b>	<b>0,026</b>	0,007	0,019	0,010	0,012	0,021	-0,002
13	0,009	0,010	<b>-0,007</b>	<b>0,023</b>	0,003	0,017	0,009	0,010	0,019	-0,001
15	0,010	0,014	-0,001	<b>0,023</b>	<b>-0,004</b>	0,018	0,010	0,011	0,020	-0,001

Quadro 10: planilha de cálculo de retirada de dados espúrios para o traço de referência moldado com cimento CII E e relação água/aglomerante 0,48

Para as barras com resultados válidos foi calculada a nova média das expansões, que representou o comportamento do traço frente ao ataque da solução de sulfatos. Esse método de tratamento de dados foi aplicado para todos os outros traços utilizados na pesquisa. Na seção seguinte serão apresentados os gráficos finais resultantes desse tratamento.



## 6.2 VARIAÇÕES DE COMPRIMENTO DAS BARRAS

Nesta seção, serão apresentados os gráficos comparativos do comportamento das barras de argamassa frente ao ataque de íons sulfato, a fim de estabelecer os traços que melhor desempenho apresentaram no estudo. Inicialmente pretende-se comparar e comentar os resultados dos traços dos dois cimentos em função das relações água/aglomerante e em seguida, o inverso, ou seja, para as diferentes relações água/aglomerante, analisar o comportamento dos traços em função de suas adições.

### 6.2.1 Resultados em função da relação água/aglomerante

As figuras 20 e 21 apresentam os gráficos dos resultados para os cimentos CII E e CII F de referência, ou seja, sem adição de pozolanas. As curvas representam as variações de comprimento das barras, submetidas ao ataque químico com sulfatos, em função da relação água/aglomerante.

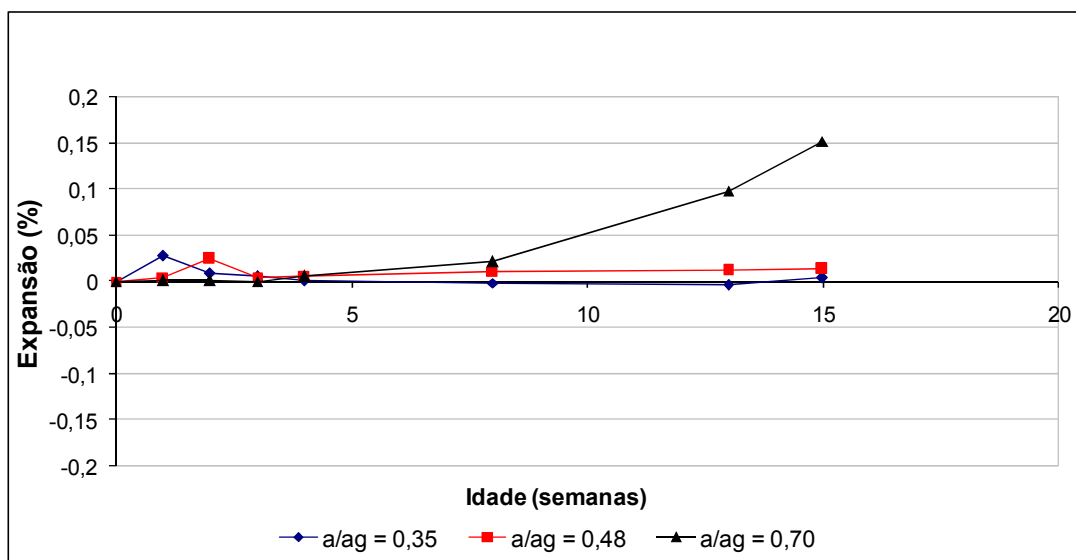


Figura 20: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E de referência

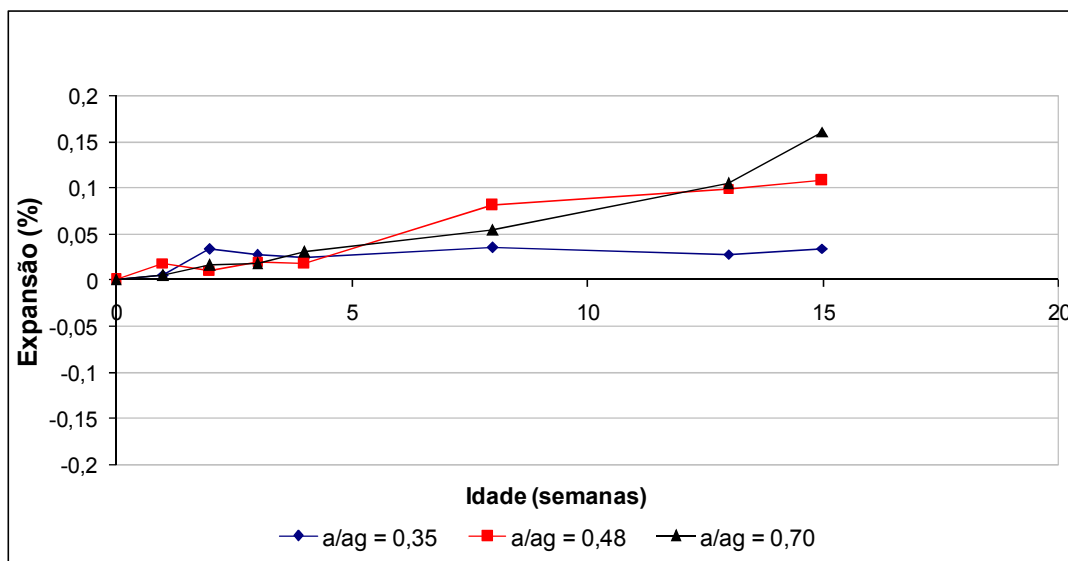


Figura 21: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F de referência

Conforme se observa nos gráficos, os traços de referência com relação água/aglomerante 0,70, tanto para cimento CII E (figura 20), quanto para o CII F (figura 21), apresentaram as maiores expansões em comparação com os traços mais ricos, confirmando o esperado. Em função da maior porosidade dos traços mais pobres, os íons sulfato têm maior liberdade para penetrar na barra e reagir com os compostos hidratados do cimento, hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  e aluminato tricálcico,  $\text{C}_3\text{A}$ , gerando produtos com maior volume do que os que lhes deram origem. Percebe-se, pela análise dos gráficos, que as expansões para os traços mais ricos, do ponto de vista prático, são insignificantes, principalmente para o cimento CII E. O efeito físico da menor porosidade concedida pela baixa relação água/aglomerante já foi suficiente para reduzir as expansões do ataque por sulfatos. A presença da escória de alto forno, produto com propriedades pozolânicas, no cimento CII E, parece influenciar na diminuição das reações expansivas com sulfatos, reduzindo o hidróxido de cálcio, em relação ao cimento CII F. O cimento CII F tem reduzida capacidade de refinamentos de poros e consumo de hidróxido de cálcio por não possuir adição pozolânica e devido ao fato de o filer presente em sua composição ter diâmetro médio próximo ao do cimento.

As figuras 22 e 23 mostram agora a influência da substituição de cimento por 10% de sílica ativa no desempenho frente a íons sulfatos.

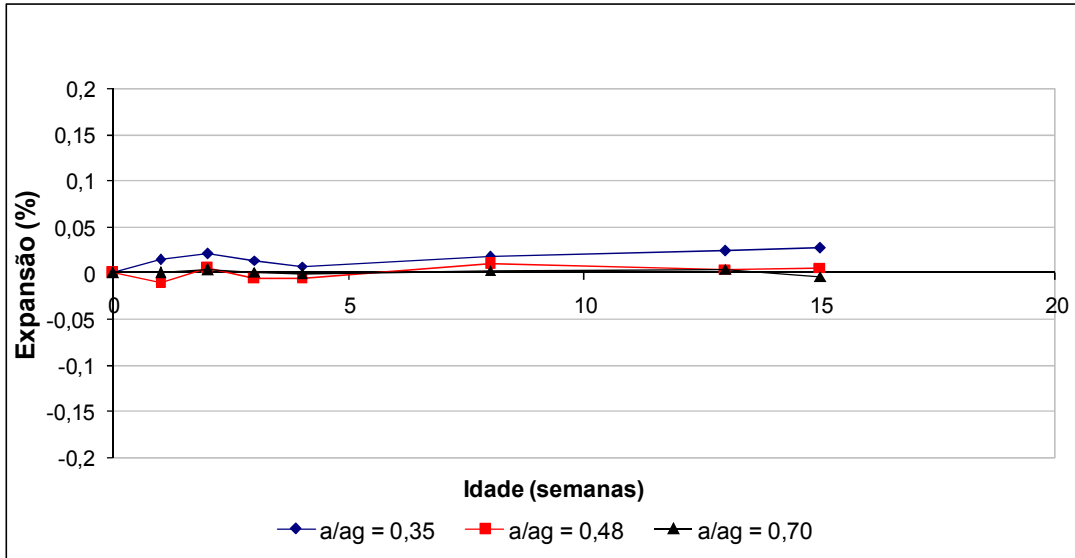


Figura 22: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com 10% de substituição por sílica ativa

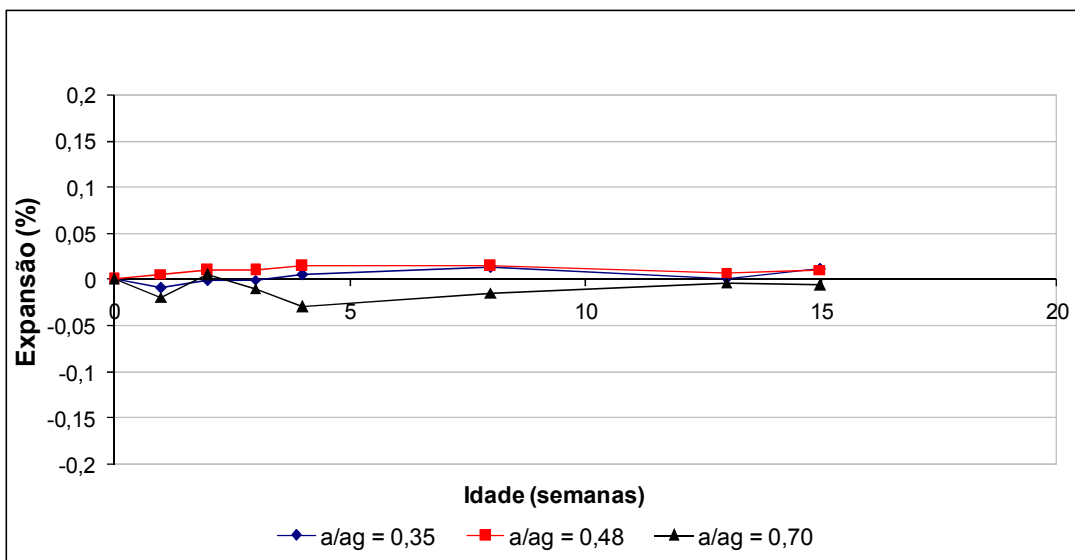


Figura 23: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com 10% de substituição por sílica ativa

Com a substituição de 10% de cimento por sílica ativa, percebe-se uma melhora significativa em relação aos traços de referência tanto para o cimento CII E (figura 22), como para o CII F (figura 23), com minimização da expansão também para a relação água/aglomerante crítica 0,70. O efeito pozolânico da sílica ativa reflete-se no fechamento da porosidade da matriz, resultando em dificuldade de acesso dos íons sulfato, além do consumo do hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pela reação pozolânica. Esse poder pozolânico da sílica ativa deve-se à sua

composição de mais de 95% de  $\text{SiO}_2$  (sílica) e um diâmetro de partícula muito pequeno, da ordem de 0,1 a 0,2  $\mu\text{m}$ .

Com a substituição de 5% de cimento por sílica ativa, as variações de comprimento das barras são mostradas nas figuras 24 e 25.

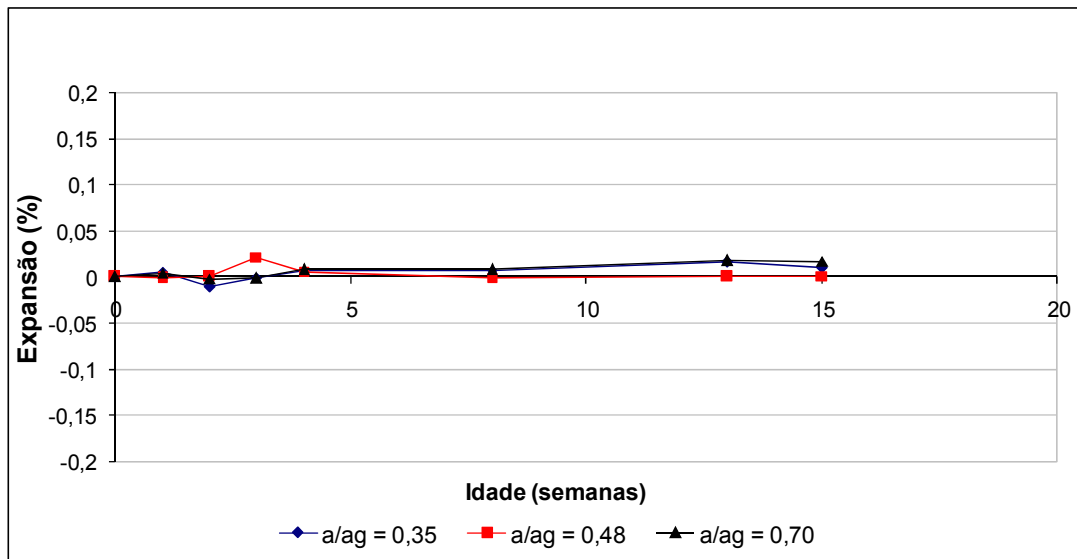


Figura 24: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com 5% de substituição por sílica ativa

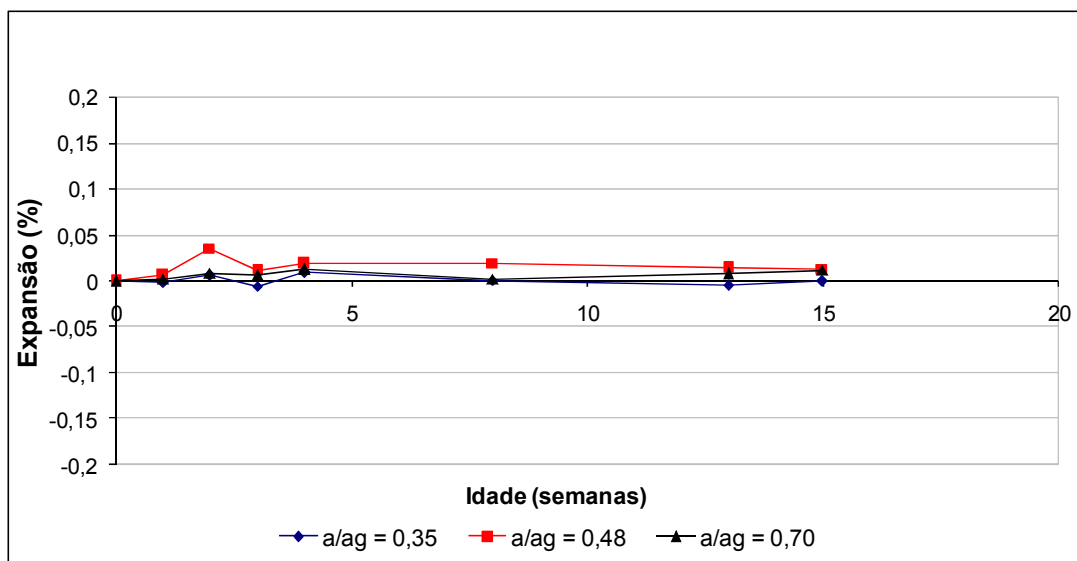


Figura 25: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com 5% de substituição por sílica ativa

Novamente a substituição de cimento por sílica ativa, nesse caso 5% (figuras 24 e 25), minimizou os efeitos expansivos em comparação com os traços de referência. Os resultados dessa substituição apresentaram uma expansão um pouco menor em relação à substituição de cimento por 10% de sílica ativa (figuras 22 e 23). Com a substituição de 10% do cimento por metacaulim, os resultados para os cimentos encontram-se nas figuras 26 e 27.

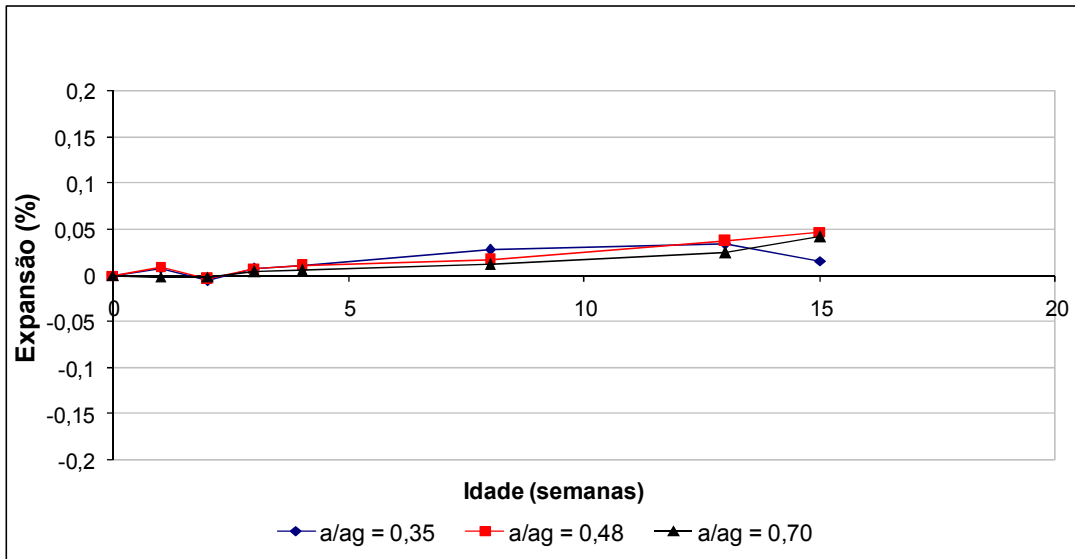


Figura 26: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com 10% de substituição por metacaulim

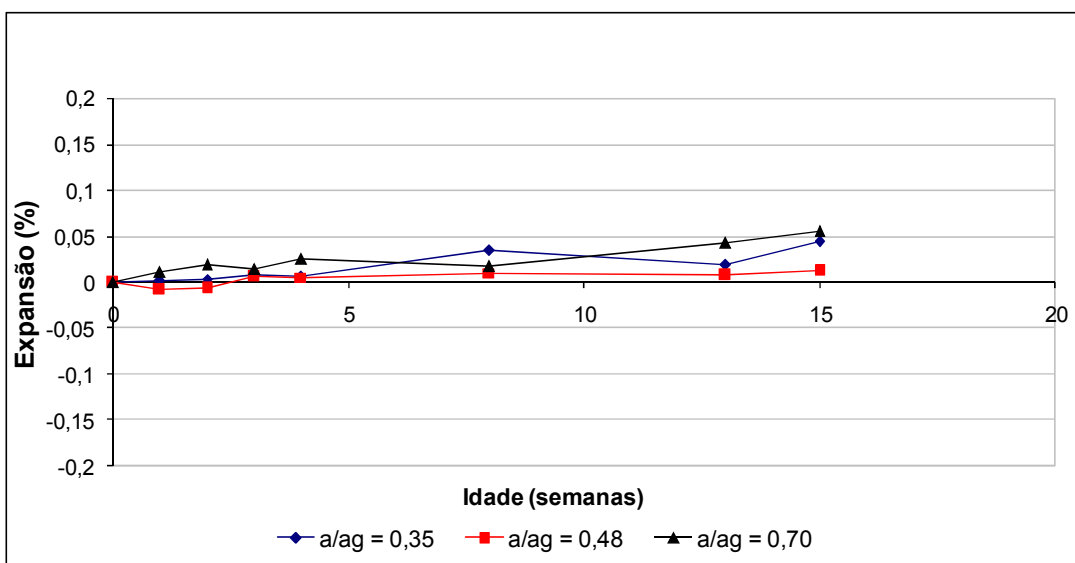


Figura 27: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com 10% de substituição por metacaulim

Pelos resultados das figuras 26 e 27, percebe-se que a substituição de cimento por 10% de metacaulim apresentou menor expansão em relação aos traços de referência, porém superior às substituições por sílica ativa. O metacaulim possui granulometria maior que a sílica ativa, o que reduz seu efeito físico de filler, a velocidade da reação pozolânica e a capacidade de fechamento dos poros. Para a substituição por 5% de metacaulim, têm-se os resultados nas figuras 28 e 29.

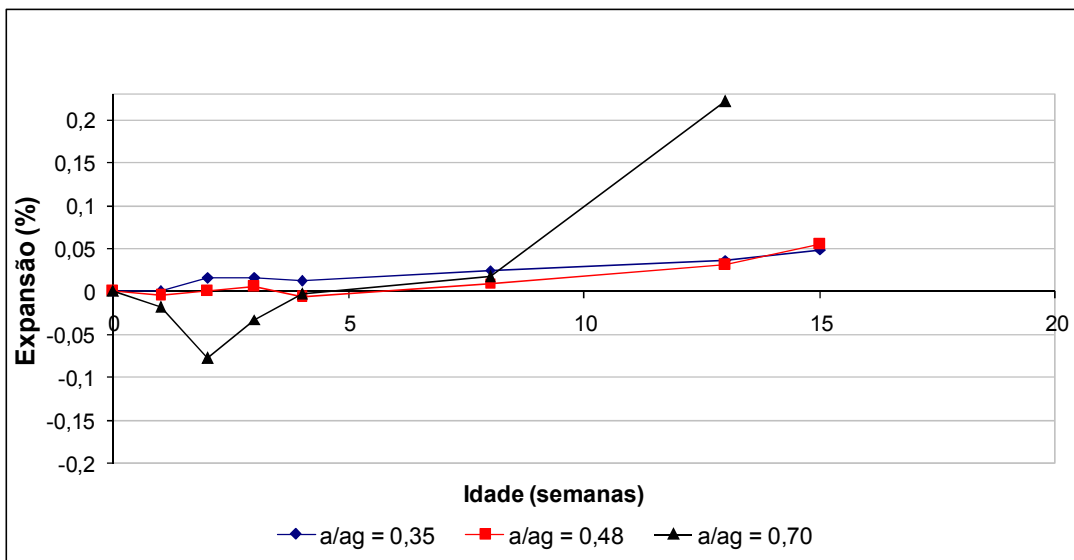


Figura 28: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com 5% de substituição por metacaulim

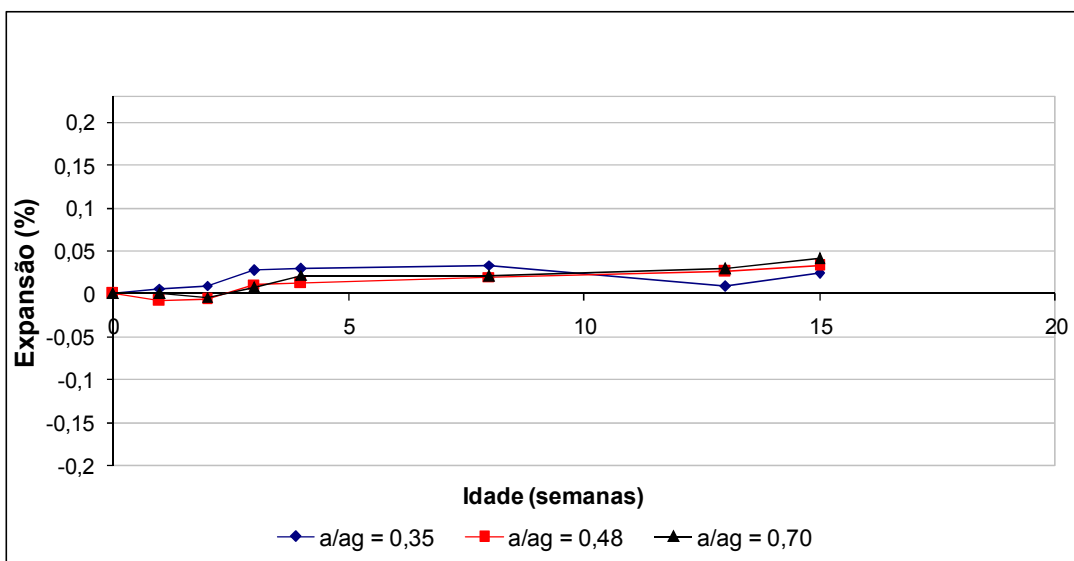


Figura 29: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com 5% de substituição por metacaulim

Com 5% de metacaulim, houve grande expansão para o cimento CII E com relação água/aglomerante 0,70 (figura 28), inclusive a degradação total das barras deste traço à idade de 15 semanas. Talvez os aluminatos presentes no metacaulim somados aos da escória do cimento tenham potencializado a reação, já que com 5% de substituição não houve redução importante na porosidade.

Em relação aos traços de referência, há melhor desempenho com a substituição de cimento por 5% de metacaulim somente para o cimento CII F. Para o cimento CII E, este fato não aconteceu, sendo que os traços de referência tiveram melhor desempenho. Para o cimento CII F, houve um desempenho uniforme para as três relações água/aglomerante (figura 29), melhorando o desempenho em relação aos traços de referência.

Em comparação com as substituições de cimento por sílica ativa, a presença de 5% de metacaulim (figuras 28 e 29) apresentou desempenho inferior quanto à redução das expansões. Em uma análise primária, observa-se que a substituição de cimento por sílica ativa, seja 5% ou 10%, mostrou-se mais eficiente que os traços de referência, ou seja, sem adições pozolânicas e também em comparação com as duas substituições por metacaulim.

Na próxima seção serão apresentados os mesmos resultados, porém os gráficos estarão em função das adições pozolânicas.

### **6.2.2 Resultados em função das adições pozolânicas**

Os resultados apresentados nesta seção compõem-se dos mesmos resultados da seção anterior, porém, pretende-se mostrar a influência das adições pozolânicas para uma mesma relação água/aglomerante. Essa nova configuração de apresentação dos resultados visa facilitar a compreensão do comportamento das adições de sílica ativa e metacaulim.

O primeiro par de gráficos corresponde à influência das adições pozolânicas para os cimentos CII E e CII F com relação água/aglomerante 0,35. As figuras 30 e 31 ilustram o exposto.

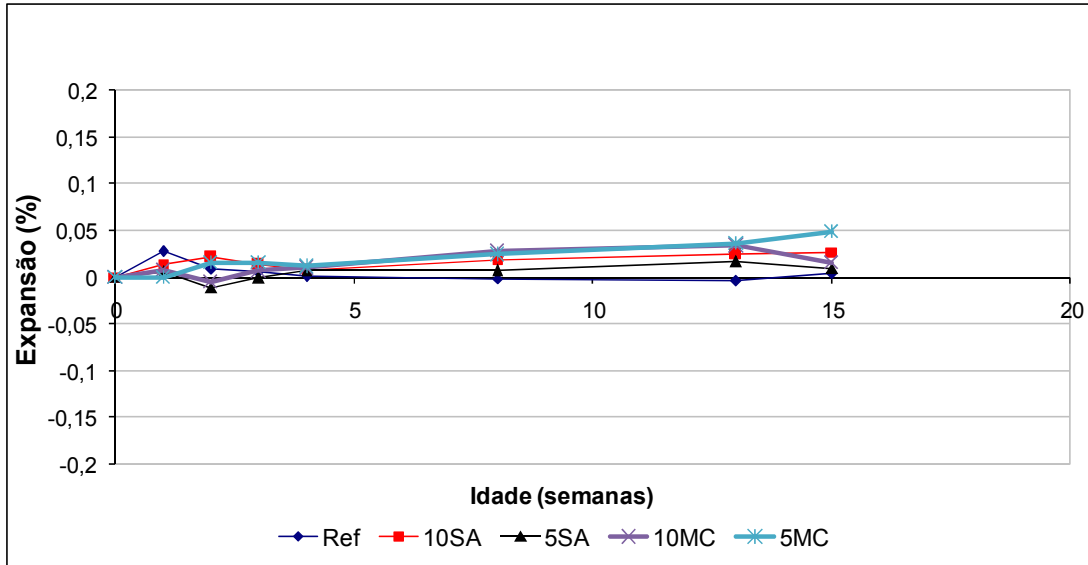


Figura 30: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com relação água/aglomerante 0,35

Observa-se que, para as misturas com cimento CII E (figura 30), o traço de referência teve a menor expansão em 15 semanas. Logo em seguida, as adições de 5 e 10% de sílica ativa tiveram os melhores desempenhos. A substituição por 5% de metacaulim apresentou o pior desempenho para as misturas com esse cimento. Salienta-se que essas diferenças, do ponto de vista prático, são insignificantes, mas o objetivo é avaliar quantitativamente as adições.

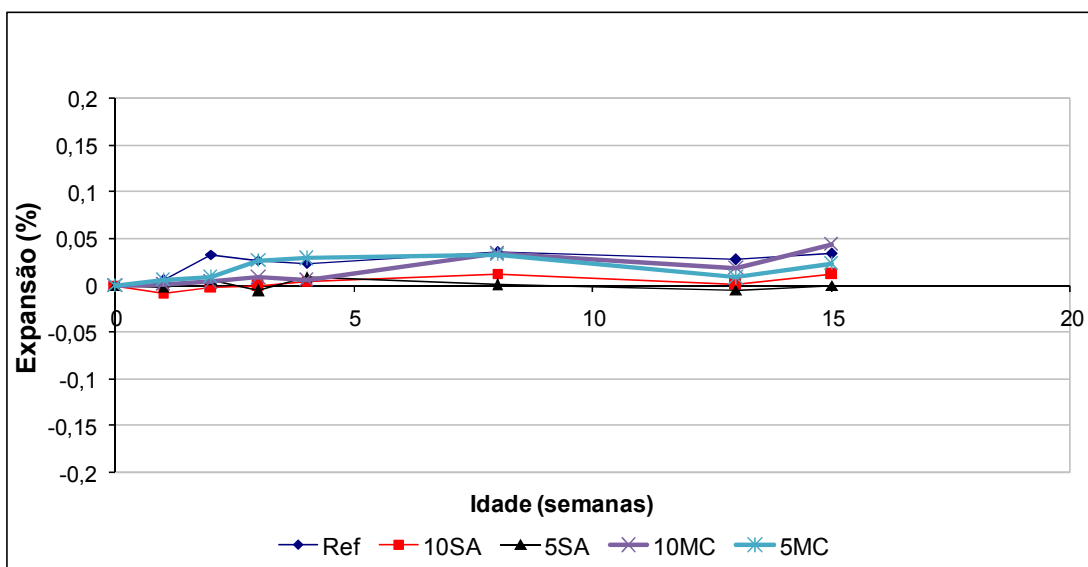


Figura 31: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com relação água/aglomerante 0,35



Para as misturas com cimento CII F (figura 31), as substituições por sílica ativa tiveram o melhor desempenho, sendo a de 5% a mais efetiva. A substituição de cimento por 10% de metacaulim apresentou desempenho inferior ao traço de referência.

Comparando-se os dois cimentos em relação às misturas de referência, ou seja, sem adições pozolânicas, constata-se uma menor expansão para as misturas com cimento CII E (figura 30). A presença da escória de alto forno na composição do cimento CII E parece garantir uma vantagem deste cimento em relação ao CII F. A reação pozolânica proporcionada pela escória pode consumir o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , e contribuir para o refinamento dos poros e produção de silicato hidratado de cálcio, C-S-H. A baixa relação água/aglomerante também contribui reduzindo a entrada de íons sulfato e, pela análise dos resultados, o efeito físico da baixa porosidade parece ser mais importante que o efeito químico das adições para uma relação água/aglomerante tão baixa como 0,35.

Analisando agora os traços para a relação água/aglomerante 0,48, as figuras 32 e 33 apresentam os resultados.

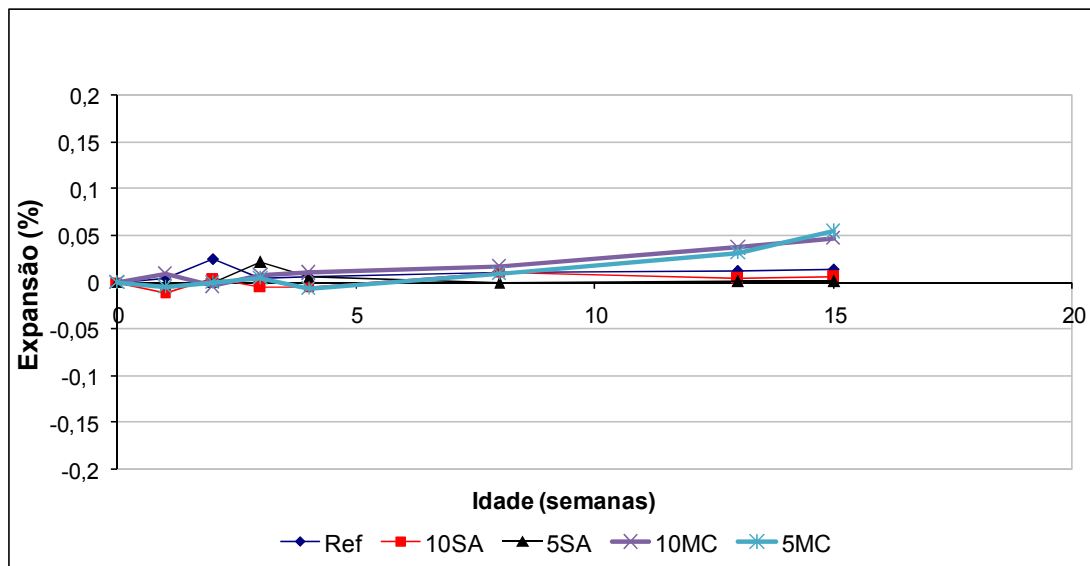


Figura 32: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com relação água/aglomerante 0,48

Neste ponto destaca-se que a partir de relações água/aglomerante 0,40/0,41, a água livre começa a ser responsável pela porosidade capilar.

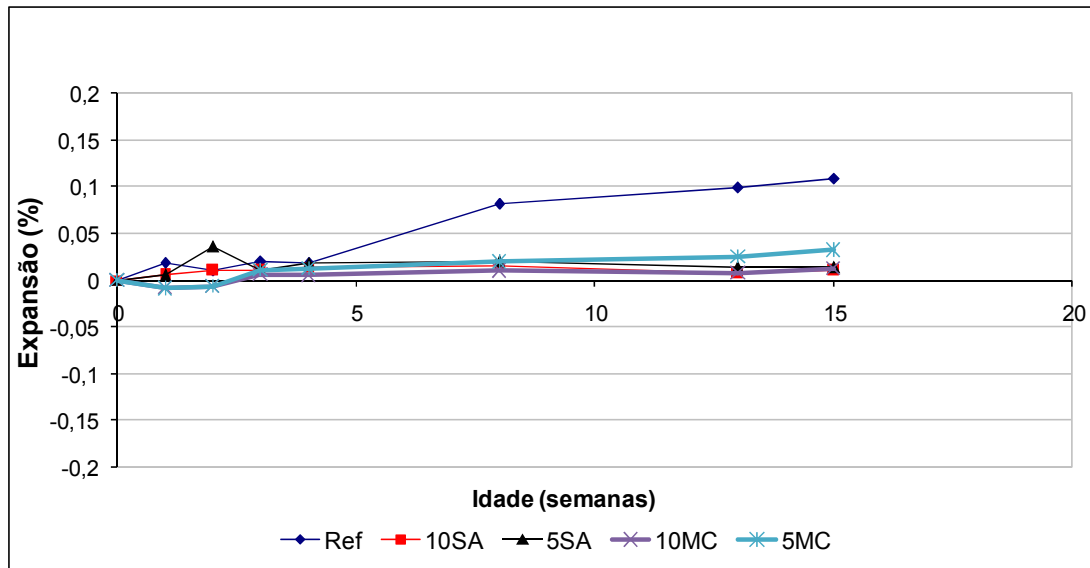


Figura 33: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com relação água/aglomerante 0,48

Novamente, aferindo os resultados, tanto para as misturas com cimento CII E (figura 32) como para CII F (figura 33), a maior capacidade de mitigação das reações expansivas com íons sulfato foi conseguida pela substituição de 5 e 10% de cimento por sílica ativa. Sendo que os resultados dessas duas substituições praticamente se equivalem para cada cimento. A sílica ativa, por sua maior eficiência, parece eliminar a porosidade capilar provocada pelo aumento da relação água/aglomerante.

As adições de metacaulim tiveram pior desempenho que o traço de referência para as misturas com cimento CII E. Para as misturas com cimento CII F, as adições de metacaulim apresentaram desempenho satisfatório em relação ao traço de referência, sendo que a substituição de cimento por 10% de metacaulim teve importante redução da expansão. Pela análise dos resultados, o metacaulim não é capaz de eliminar a porosidade capilar como a sílica ativa, além de possuir em sua composição aluminatos que podem propiciar um meio químico mais favorável à reação expansiva com sulfatos.

Considerando os traços de referência, ou seja, sem adições pozolânicas, o melhor desempenho novamente é do cimento CII E (figura 32). A presença de escória de alto-forno deve ser a responsável por tal comportamento. Mehta e Monteiro (2008, p. 314) já citavam que a presença de escória granulada de alto-forno pode ter uma contribuição importante à resistência e durabilidade logo aos sete dias após a hidratação.

Para as misturas com relação água/aglomerante 0,70, os resultados são apresentados pelas figuras 34 e 35.

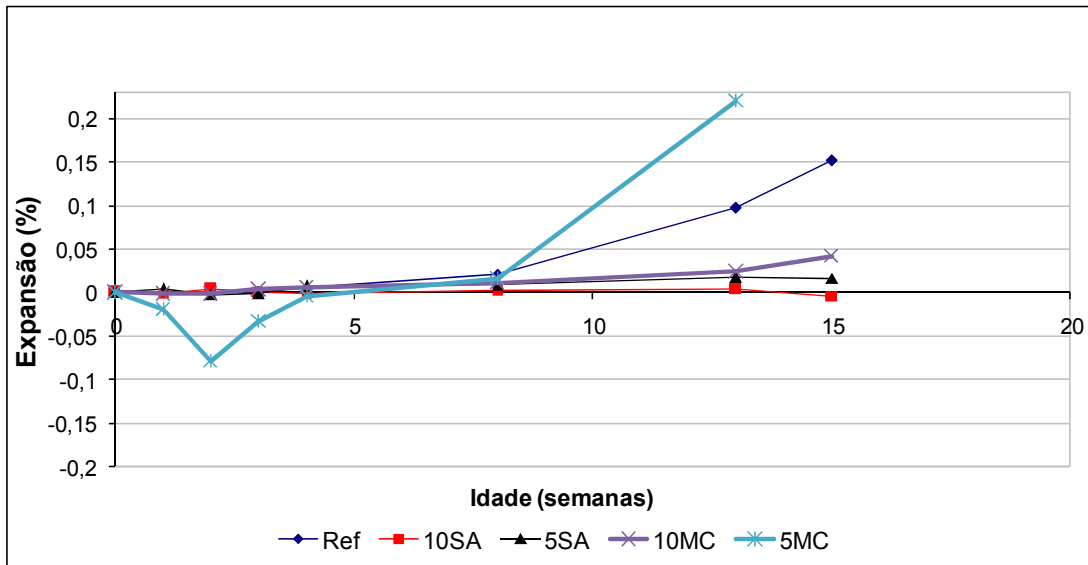


Figura 34: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII E com relação água/aglomerante 0,70

Neste ponto destaca-se que as barras correspondentes aos traços com substituição de cimento CII E por 5% de metacaulim (figura 34) degradaram-se antes da leitura de 15 semanas.

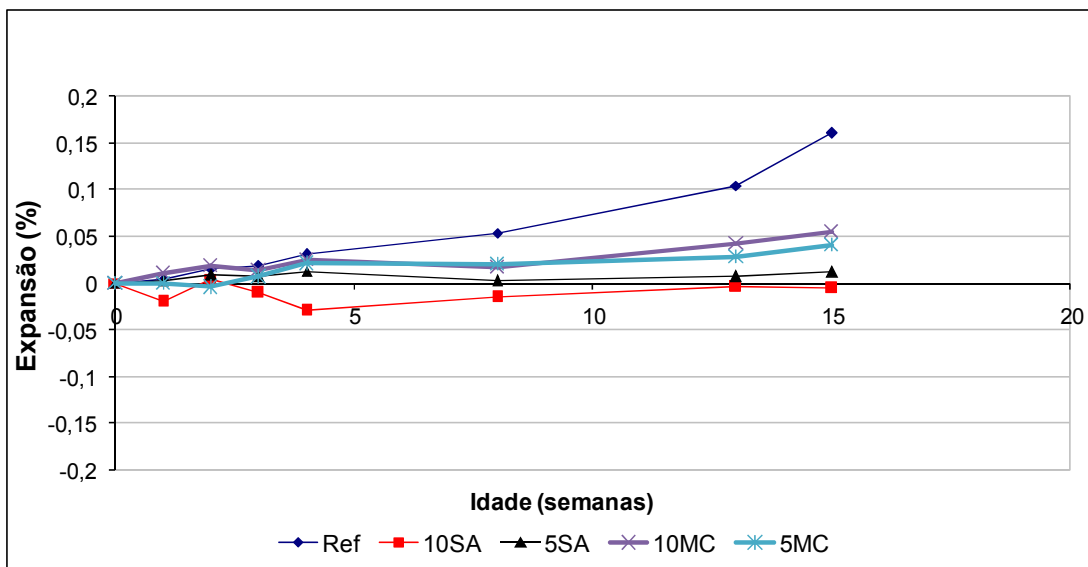


Figura 35: variação de comprimento das barras produzidas com cimento CII F com relação água/aglomerante 0,70

Ao analisarem-se os traços com relação água/aglomerante 0,70, novamente as adições de sílica ativa confirmam o seu desempenho mitigador das reações expansivas. A substituição de cimento por 10% de sílica ativa apresentou melhor desempenho para os dois cimentos, com resultados muito próximos à substituição por 5% de sílica ativa.

Para as misturas com cimento CII E, a substituição por 10% de metacaulim minimizou as expansões em relação ao traço de referência. A substituição por 5% de metacaulim apresentou grande expansão e houve degradação das barras antes da leitura de 15 semanas (figura 34).

Para as misturas com cimento CII F, as substituições tiveram desempenho superior ao traço de referência (figura 35). Para uma relação água/aglomerante alta como 0,70, qualquer teor de adição já é suficiente para reduzir a porosidade e impedir o acesso de íons sulfato. Também é mais evidente e fácil de visualizar o efeito da redução da reação expansiva pela adição das pozolanas. Percebe-se ao analisar os gráficos deste capítulo que a substituição de cimento por 10% de metacaulim foi mais eficiente que 5% do mesmo material.

Comparando-se os traços de referência, sem adições pozolânicas, o cimento CII E mais uma vez apresenta-se mais estável às expansões em comparação ao CII F. Ao longo do capítulo, nota-se que os traços de referência moldados com cimento CII E tiveram menores expansões que os moldados com cimento CII F para todas as relações água/aglomerante.

De maneira geral, constatou-se que para as condições e materiais utilizados na pesquisa, as substituições de cimento por 5% de sílica ativa apresentaram maior número de traços eficientes em relação aos traços de referência, seguidos por 10% de sílica ativa, 10% de metacaulim e 5% de metacaulim.

A degradação explicada teoricamente da revisão bibliográfica foi verificada ao longo do ensaio. As barras apresentaram perda de massa, principalmente na região próxima aos pinos de leitura, fissurações nas bordas, além de terem uma aparência esbranquiçada característica do ataque por sulfatos. A figura 36 ilustra a degradação causada nas barras ensaiadas.



Figura 36: perda de massa e fissuração nas barras de argamassa pelo ataque por sulfatos

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de dois tipos de cimento, CII E e CII F, com adições pozolânicas frente ao ataque de íons sulfato. Para isso, foram empregados dois tipos de pozolanas, metacaulim e sílica ativa, em 3 teores, 0, 5 e 10% em substituição ao cimento e relações água/aglomerante 0,35, 0,48 e 0,70. No estudo do desempenho dos cimentos, foi utilizada a norma americana ASTM C 1012-95a, que estabelece um método para a determinação da durabilidade de concretos e argamassas a estes íons. O método baseia-se no controle da expansão longitudinal de barras de argamassa, quando imersas em solução de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Baseado nos materiais e metodologia utilizados neste trabalho, bem como com a análise dos resultados obtidos, pode-se traçar as conclusões e sugestões de trabalhos futuros que seguem.

### 7.1 CONCLUSÕES

De acordo com a análise dos gráficos, pôde-se estabelecer uma escala de desempenho de acordo com os resultados obtidos. Levando-se em conta apenas os traços de referência, ou seja, sem adições pozolânicas, pode-se dizer que o cimento CII E apresentou melhor desempenho que o cimento CII F para todas as relações água/aglomerante estudadas, através do método da norma ASTM C 1012-95a. Possivelmente isso se deve à presença da escória de alto forno na composição do cimento CII E, o que pode, por efeito pozolânico, ter consumido o hidróxido de cálcio, composto hidratado mais sensível ao ataque selenitoso, produzindo silicato hidratado de cálcio, C-S-H, principal composto da resistência do concreto.

Analisando, puramente as relações água/aglomerante, confirmou-se a expectativa de que uma menor permeabilidade/porosidade reduziria a penetração dos íons sulfato. Tanto para o cimento CII E quanto para o CII F, observou-se pelos resultados, que o desempenho na minimização da reação expansiva cresce na seguinte ordem: relação água/aglomerante 0,70, seguida por 0,48 e o melhor desempenho para a relação 0,35. Isso se deve à menor

permeabilidade/porosidade conferida pela baixa quantidade de água, que dificulta a entrada dos íons sulfato e reações com os compostos hidratados do cimento.

Analisando as adições pozolânicas, os resultados indicaram a confirmação da hipótese do trabalho. As adições de 5% de sílica ativa apresentaram maior número de traços eficientes em relação aos traços de referência, seguidas pelas substituições por 10% de sílica ativa, 10% de metacaulim e 5% de metacaulim.

Com isso a capacidade de mitigação da reação expansiva com sulfatos cresce na seguinte escala de substituições de cimento: 5% de metacaulim, 10% de metacaulim, 10% de sílica ativa e 5% de sílica ativa. Pode haver, pelo que se observou com os resultados, um teor ótimo de substituição de cimento por sílica ativa entre 5 e 10% na redução dos efeitos expansivos com íons sulfatos.

## 7.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O método da norma ASTM C 1012-95a recomenda que se as variações de comprimento das barras forem graduais, suaves e uniformes, as leituras devem ser continuadas nas seguintes idades: 4, 6, 9 e 12 meses. Observou-se que os resultados se apresentaram com essas características, ou seja, não houve variação brusca nas leituras, com exceção do traço moldado com cimento CII E, relação água/aglomerante 0,70 e 5% de metacaulim (figura 34). Portanto, sugere-se a realização do ensaio até idades mais avançadas, para se ter uma idéia mais precisa do efeito das pozolanas na mitigação da reação expansiva com sulfatos em longo prazo.

Outra sugestão para trabalho futuro é a utilização de ferramentas estatísticas que possibilitem verificar a influência das variáveis relação água/aglomerante, teores de pozolanas e idade de leitura na expansão por sulfatos para esses materiais e métodos utilizados, através de análise de variância e comparação múltipla de médias.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C 778**: specification for standard sand. West Conshohocken, 1992.

\_\_\_\_\_. **C 157**: test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. West Conshohocken, 1993.

\_\_\_\_\_. **C 1012-95a**: standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. West Conshohocken, 1995.

\_\_\_\_\_. **C 490**: standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. West Conshohocken, 1997.

\_\_\_\_\_. **C 109/C 109M**: standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). West Conshohocken, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: cimento portland resistente a sulfatos – especificação. Rio de Janeiro, 1992.

BICZÓK, I. **La corrosión del hormigón y su protección**. 6. ed. Bilbao: Urmo, 1972.

CÁNOVAS, M. F. **Patología y terapéutica del hormigón armado**. Madrid: Dossat, 1977.

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado**: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. 1988. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

\_\_\_\_\_. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345-379.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. In: ISAIA, G. C. **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 295-322.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, H. M. Cimento Portland. In: BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 1**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1987. p. 35-62.

PAULON, V. A. A microestrutura do concreto convencional. In: ISAIA, G. C. **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 583-604.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos**: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica. 1994. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.