

programa
MASTER P=C
IBRACON

VALE

Home
Quem somos

Inspetor I Patologia
Reações Expansivas
Sulfatos e DEF

Paulo Helene
Diretor PhD Engenharia
Prof. Titular Universidade de São Paulo
Gestor e Ex-Presidente ALCONPAT Internacional
Ex-Presidente e Conselheiro Permanente IBRACON
Member firm (CEB-FIP) Model Code for Service Life Design
Conselheiro da CNTU, SEESP, PMSP e ABNT

Carajás, 5 de maio de 2025

1

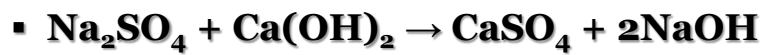
Reações expansivas

- ✓ **Álcali agregado: sílica reativa**
- ✓ **CaO e MgO cristalinos**
- ✓ **Sulfatos: gesso e “ettringita”**

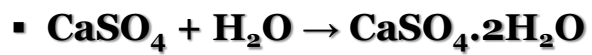
obs: esta apresentação está protegida pelas leis nacionais e internacionais de direitos autorais e de imagem. É proibida a gravação, reprodução, distribuição, prints e fotografia da tela de apresentação, sem permissão do autor. O objetivo é estritamente educacional.

2

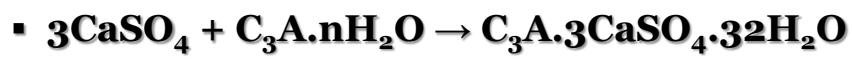
Ação de Sulfatos



Lixiviação



Expansão



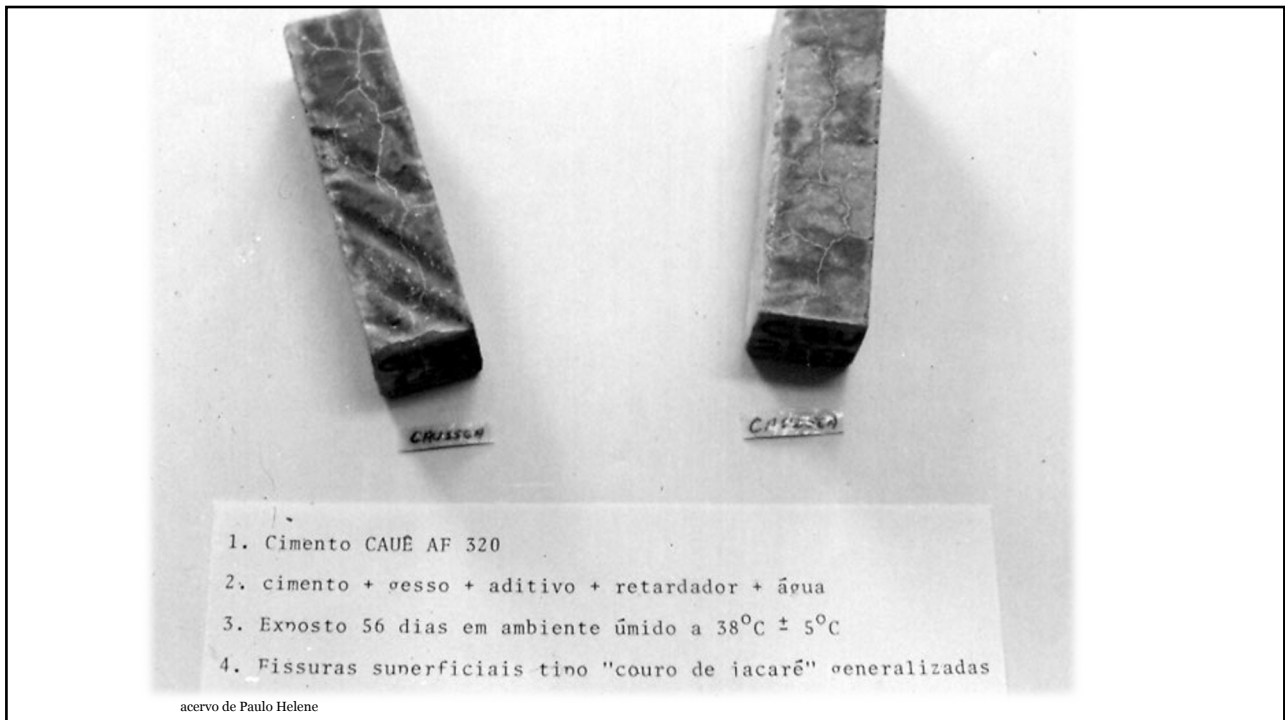
Expansão

3



acervo de Paulo Helene

4



5



6

Processo Construtivo Cimento + Gesso → 1981



acervo de Paulo Helene

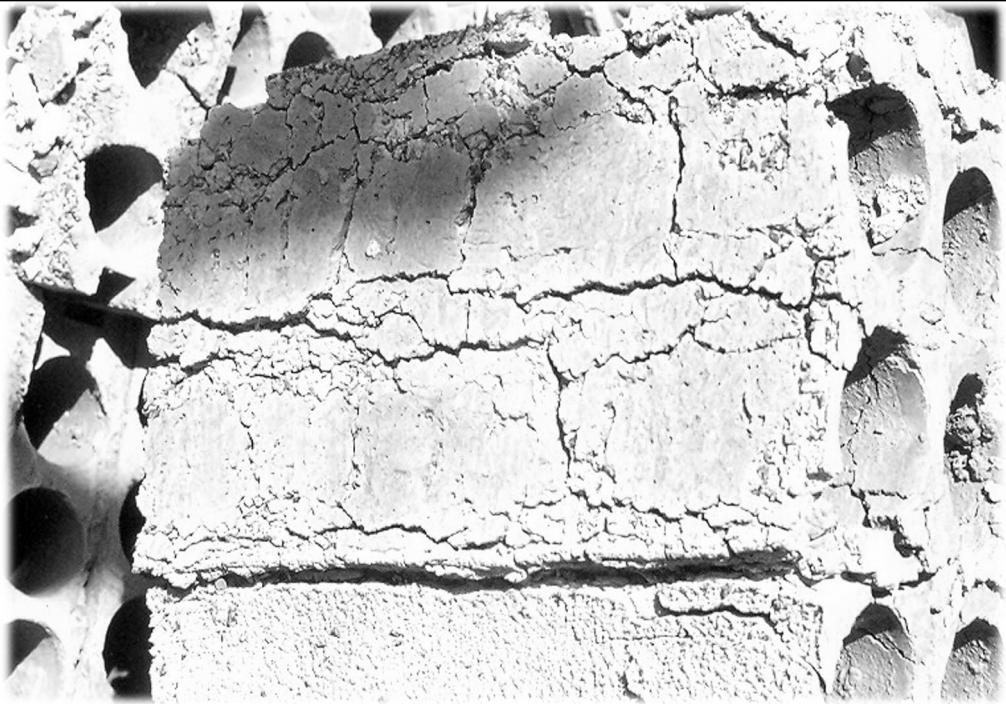
7

5.000 unidades (edifícios “térreo+4” e casas)



acervo de Paulo Helene

8



acervo de Paulo Helene

9



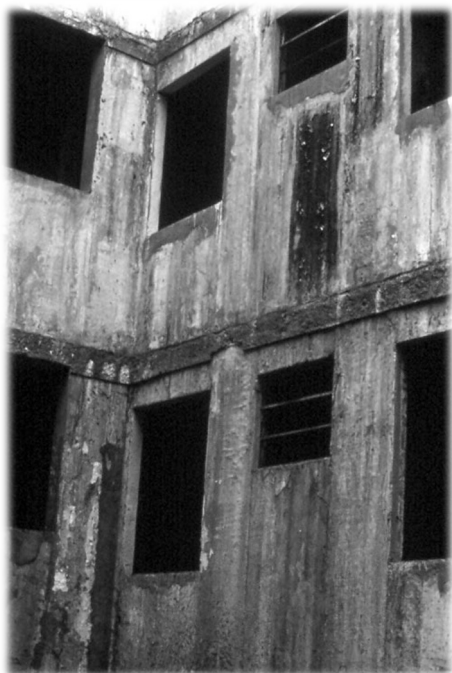
acervo de Paulo Helene

10



acervo de Paulo Helene

11



acervo de Paulo Helene

12



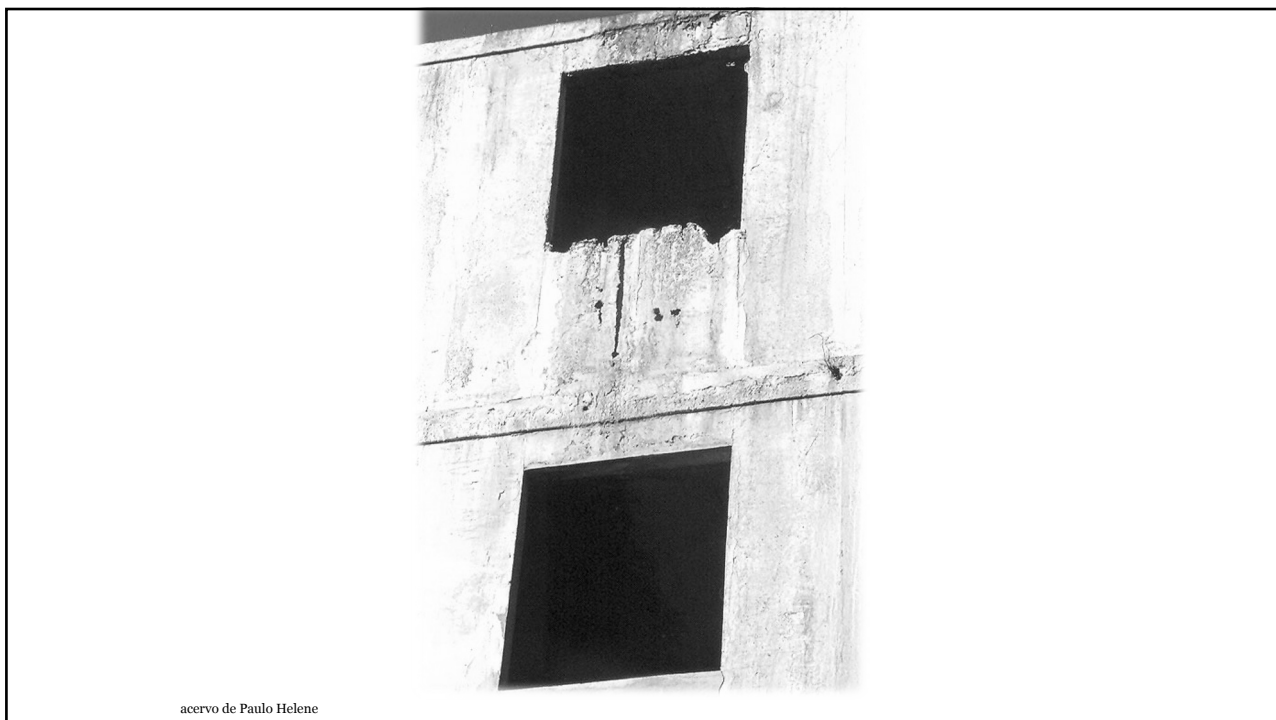
acervo de Paulo Helene

13



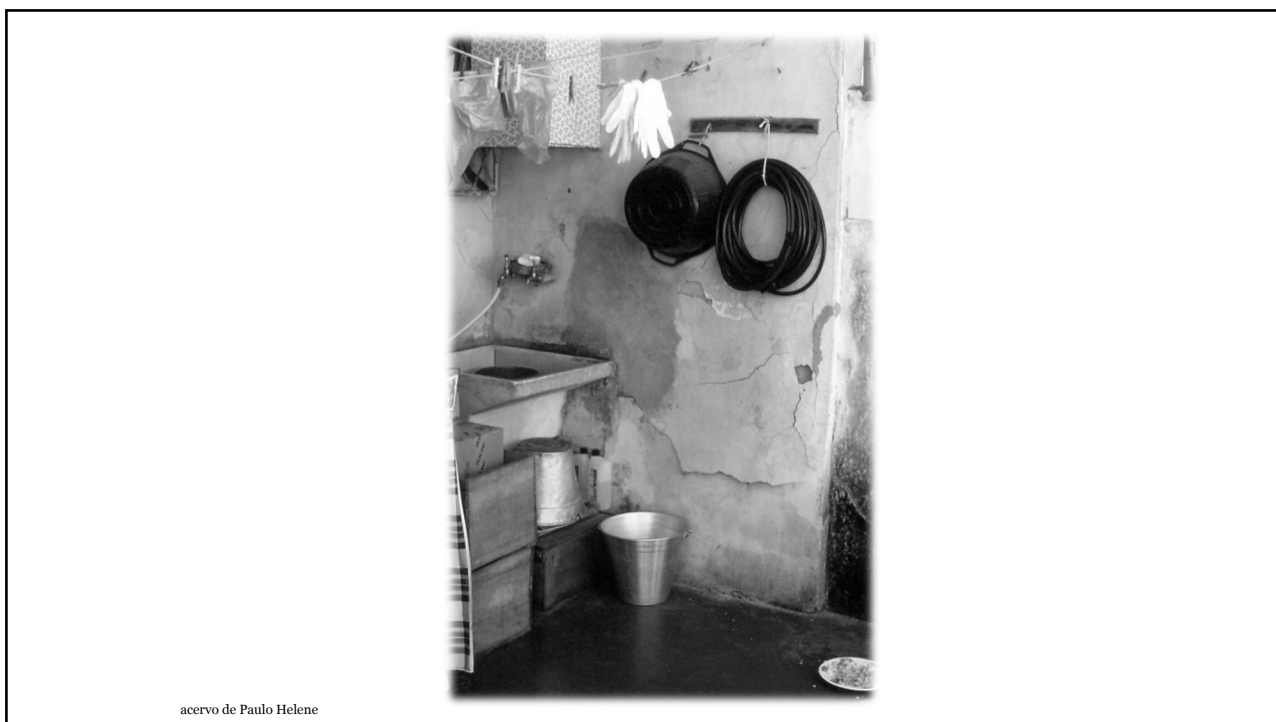
acervo de Paulo Helene

14



acervo de Paulo Helene

15



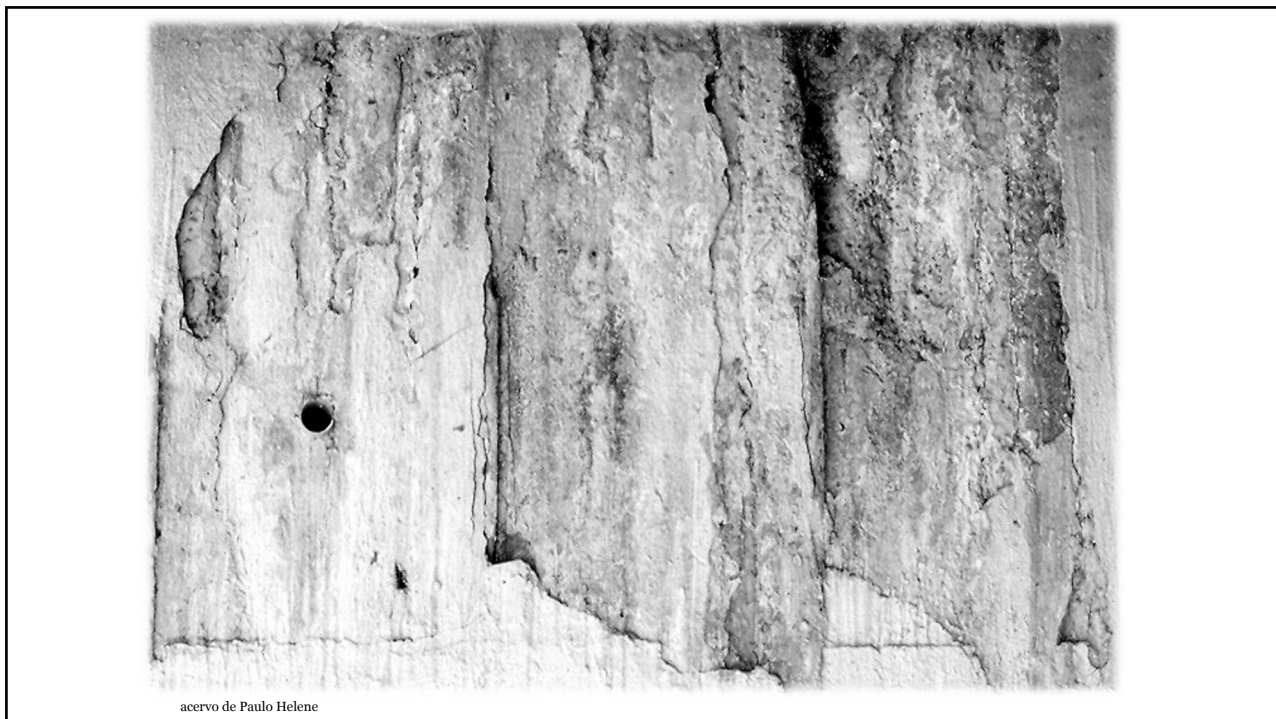
acervo de Paulo Helene

16



acervo de Paulo Helene

17



acervo de Paulo Helene

18

Video



19

Histórico

A ação de sulfatos foi objeto de estudos de diversos pesquisadores:

Le Chatelier - *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*, Thèse, Paris, 1887;

Candlot - *Ciments et chaux hydrauliques*, Baudry édit., Paris, 1898;

Lafuma – *Théorie de l'expansion des liants hydrauliques*, Paris. *Mat. Constr.*, dec. 1929 et janv. 1930;

Thorvaldson - *Resistance of concrete to sulphate and other environmental conditions*. Univerdity of Toronto Press. 1968

20

Histórico de casos

- Ponte sobre rio Elba em Magdeburg, Alemanha:
Água com 1700mg/l de SO_4 ;
A expansão do concreto implicou em fissuração e posterior demolição.
- Barragem de Ft. Peck em Montana, EUA
Construída entre 1933 e 1940;
Água com 10.000 mg/l de SO_4
- Candlestick Park em São Francisco, EUA:
Inaugurado em 1956;
Graute localizado entre as vigas pré-moldadas e moldadas in loco da arquibancada do estádio

21

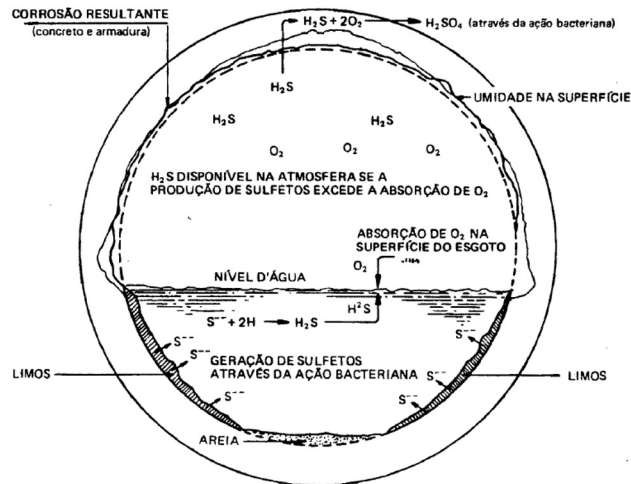
Ataque por Sulfatos externos

- Reação químicas na qual íons sulfato (SO_4) **oriundos do ambiente circundante** reagem com aluminatos do cimento, formando compostos expansivos (etringita+gesso) que absorvem água, gerando tensões internas que fissuram o concreto.
- O ataque desagrega a superfície do concreto, tornando-a friável;
- A velocidade de ataque é normalmente lenta (pode necessitar 5 a 20 anos para que o ataque se manifeste de forma severa);
- Pode gerar movimentações globais da estrutura.



22

Galerias de Esgoto Sulfatos externos



acervo de Paulo Helene

23

Ataque por Sulfatos internos

- Em alguns casos pode ocorrer uma reação deletéria entre os aluminatos do cimento com os **sulfatos internos provenientes de agregados, adições, ou mesmo reguladores de pega à base de sulfatos de cálcio (gipsita)**;
- Essa reação pode ser desencadeada pela temperatura, sempre que esta ultrapasse os 65°C , e neste caso chama-se DEF (delayed ettringite formation) ou formação de ettringita tardia;
- O ataque, em geral se manifesta no primeiro ano e pode gerar fissuras de grande abertura a ponto de confundir-se com AAR



acervo de Paulo Helene

25

DEF

Trata-se de uma reação por ataque de sulfatos que resulta na formação de etringita tardia (delayed etringita formation, DEF) $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$

Etringita formada no concreto fresco, pode ser considerado um problema comum. Entretanto, a formação de etringita no concreto endurecido é prejudicial.

Caso a temperatura no interior do concreto atinja temperaturas de mais de 65°C , devido ao calor aplicado (cura térmica) ou a geração de calor durante a hidratação do cimento, principalmente nos casos do lançamento de concreto em grande volume, há risco da formação de etringita tardia, DEF, que pode levar à expansão e à fissuração do elemento estrutural.

Para que os efeitos nocivos ocorram, é necessário que o concreto esteja molhado ou umedecido permanente ou intermitentemente. Os efeitos nocivos são a redução da resistência, a diminuição do módulo de elasticidade e, em algumas situações, a intensa fissuração.

26

DEF

- Retração térmica e por secagem restringida
- Cura a vapor por alta temperatura
- Carregamento severo durante o uso
- Distribuição de tensão excessiva e não-uniforme no concreto protendido



Agregado contaminado por gipsita, ou liberação de sulfato pelo C-S-H

DEF - formação de etringita tardia

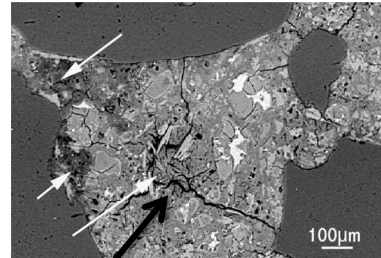
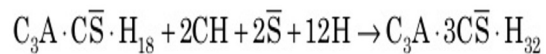
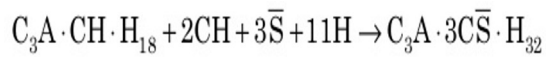
P. Kumar Mehta & Paulo J. M. Monteiro. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais, IBRACON, 2014

27

Fundamentos

- $C_3A \rightarrow 8\%$ aluminatos de cálcio

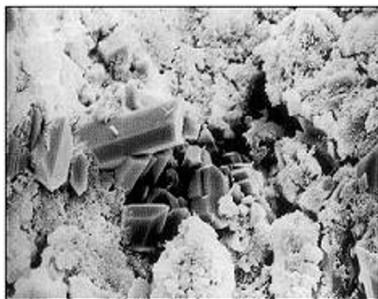
Quando em contato com íons sulfato após endurecimento



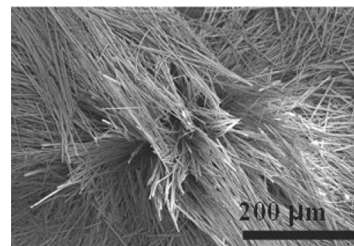
Etringita

28

Ataque por sulfatos – Formação Cristais Expansivos



Etringita
(tri sulfoaluminato de cálcio
com 32 moléculas de água)



29

Efeitos em edificações

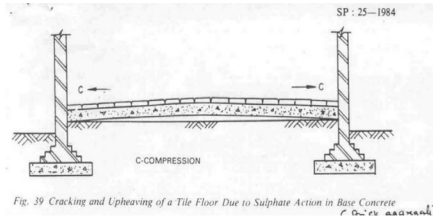


Fig. 39 Cracking and Upheaving of a Tile Floor Due to Sulphate Action in Base Concrete



Esgotos
Solos
Contaminados
Fábricas de Adubo
Processos
Industriais



acervo de Paulo Helene

30

Ataque Sulfatos -Prevenção

- ✓ Evitar teor de sulfato no solo ou na água de contato superior a 0,2% ou mais de 500 ppm
- ✓ Evitar cimentos com teores elevados de aluminatos tri cálcicos (C_3A)
- ✓ Evitar contato com águas que contenham sulfatos de magnésio
- ✓ Evitar que o concreto fresco ultrapasse 65° C

31

ABNT NBR 6118:2023 & ABNT NBR 12655:2022 “qualidade do cobrimento”

Tabela 4 Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo % em massa	Sulfato solúvel (SO ₄) presente na água ppm	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal ^a	Mínimo f_{ck} (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	Conforme Tabela 2	Conforme Tabela 2
Moderada ^b	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa ^c	> 0,20	> 1500	0,45	40

- (a) Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa difusibilidade do concreto ou proteção contra corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.
- (b) A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO₄ seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.
- (c) Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

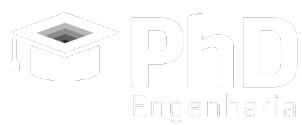
35







OBRIGADO!



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

www.concretophd.com.br
www.phd.eng.br

11.2501.4822 / 23

11.9.5045.4940

36