

A grayscale microscopic image of concrete showing a network of fine cracks and larger voids, illustrating the effects of expansive phenomena.

Prevenção de Fenômenos Expansivos no Concreto: Formação da Etringita Tardia (DEF)

**Arnaldo Forti Battagin
Associação Brasileira de Cimento Portland**

Dezembro 2020

Prevenção de Fenômenos Expansivos no Concreto: (DEF)

- 1- Introdução
- 2- Mecanismo da DEF
- 3- Diferenciação entre RAA E DEF
- 4- Medidas preventivas para evitar DEF (e RAA)
- 5- Alguns cases
- 6- Ações futuras

Introdução

A DEF (Delayed Etringite Formation) é um fenômeno que pode afetar o concreto, geralmente causando expansão, fissuração e degradação das suas propriedades mecânicas. A vida útil e a durabilidade podem ser comprometidos.



dormente

Introdução

A DEF é uma reação química distinta da reação álcali-agregado, mas em condições de campo as feições de sua instauração no concreto são muitos similares e podem ocorrer simultaneamente.



RAA -Recife



DEF em dormente

A DEF e RAA num bloco de fundação no Mato Grosso



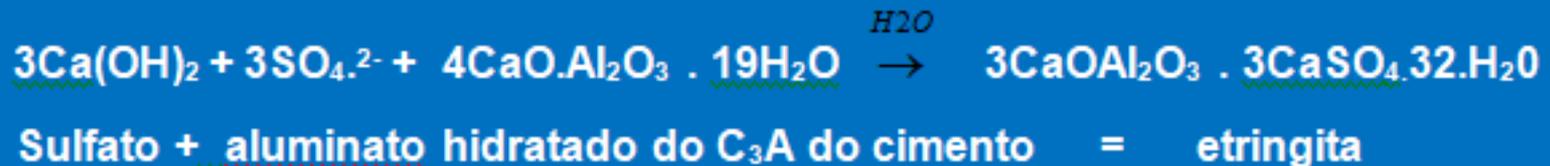
Mecanismos da DEF (ataque interno)

A DEF foi descoberta nos anos 80, descritas pela primeira vez na Alemanha mas somente teve grande repercussão em 1987 na Inglaterra em dormentes.

As pesquisas dos mecanismos básicos da reação são ainda controversas.

Mecanismos Propostos:

- Expansão da pasta
- Expansão da interface pasta-agregado
- Combinação de ambos



Fatores para ocorrência da DEF

- Retração por secagem

- Alta temperatura do concreto e da cura $> 65^{\circ}\text{C}$

- **Reação álcali-agregado**

- Excesso de carga em serviço

Microfissuração

DEF

ÁGUA

Liberação tardia
de sulfatos

- Agregados contaminados (sulfetos)

- Decomposição da etringita $> 65^{\circ}\text{C}$
(**excesso de álcalis**)

- Liberação de sulfatos
adsorvidos no C-S-H, provenientes
do cimento

- Umidade do ambiente

Fonte: Collepari, 2009

Diferenciação RAA e DEF: Fatores para ocorrência da RAA

- Rochas contendo opalas e calcedônia

- Rochas contendo quartzo deformado e microgranular

- Rochas contendo vidro vulcânico e devitrificado

- Rochas contendo clorofeita e zeólitas

Agregado reativo

RAA

ÁGUA

Fonte de álcalis

- Álcalis solúveis e solubilizáveis ao longo do tempo do cimento

- Álcalis da água de amassamento, adições, aditivos e agregados

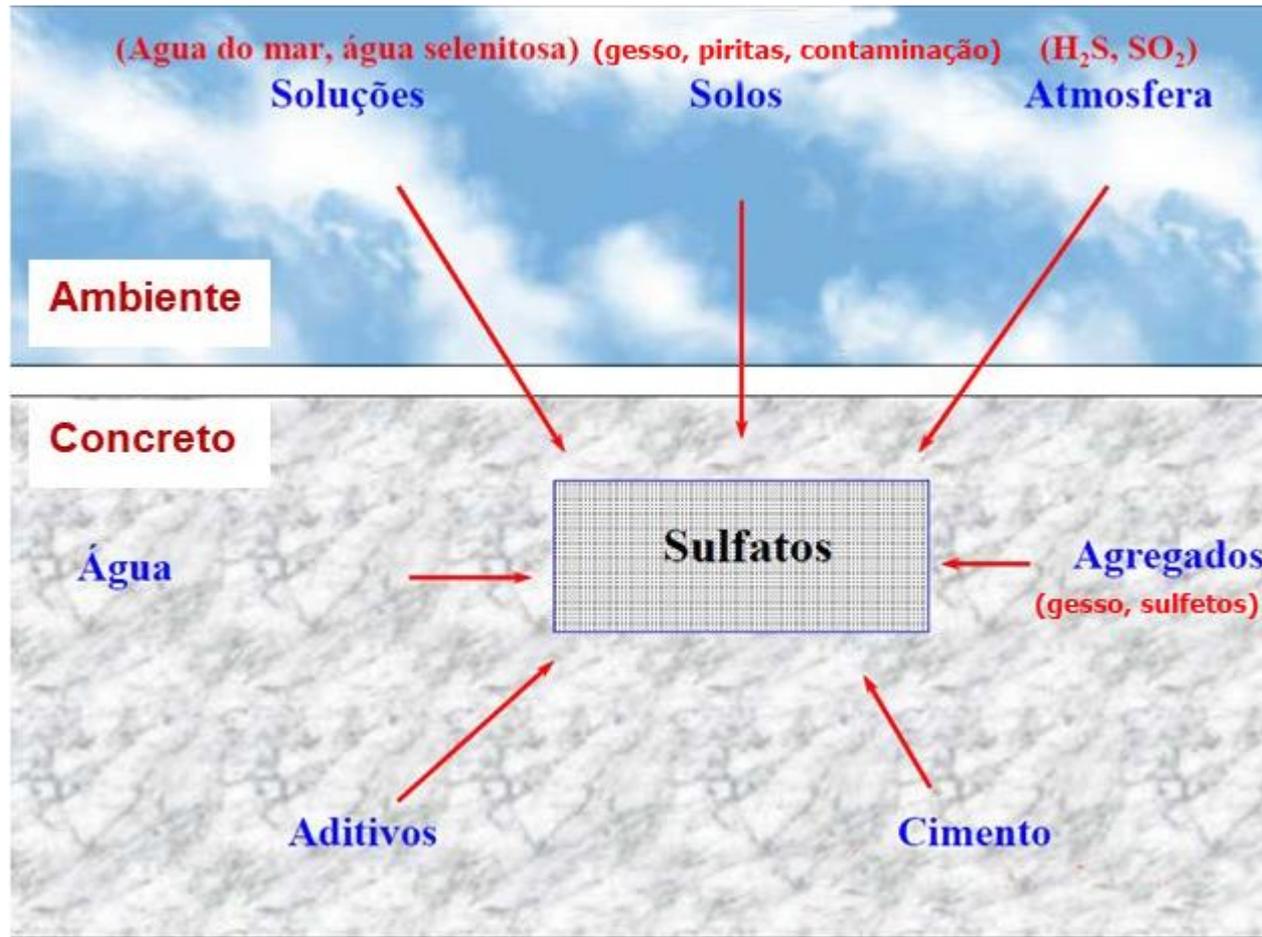
- Álcalis do meio

- Umidade do ambiente

Fonte: Battagin, 2008

Fatores para ocorrência da DEF(ataque interno)

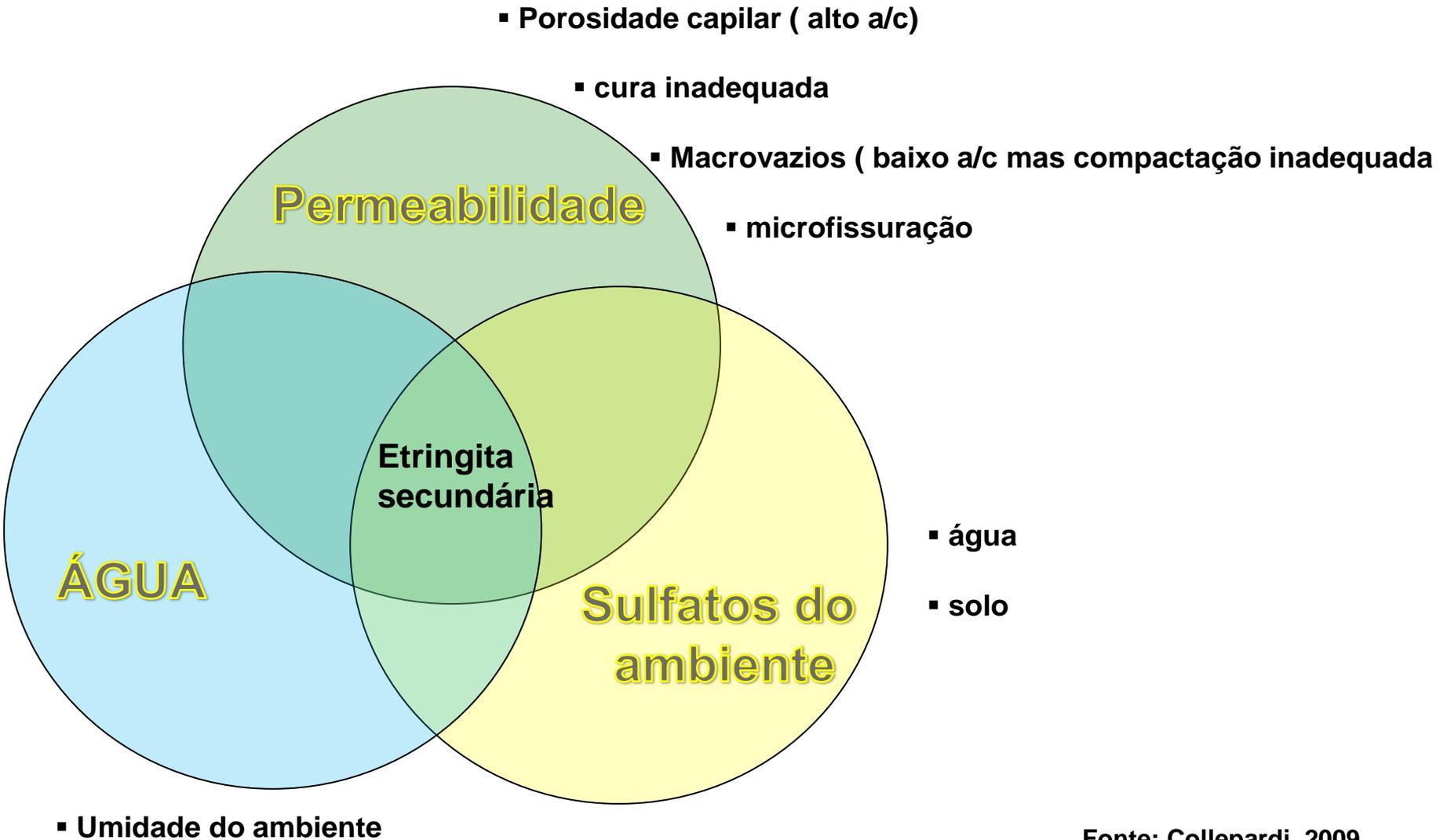
As distintas fontes de sulfatos no concreto



- Etringita primária
- Etringita secundária
- Etringita tardia

Fonte: SantosSilva, 2007

Diferenciação do ataque externo de sulfatos (etringita secundária)



Fonte: Collepari, 2009

Prevenção do ataque externo de sulfatos

Grau de agressividade do meio em função dos teores de sulfatos (ABNT NBR 12655)

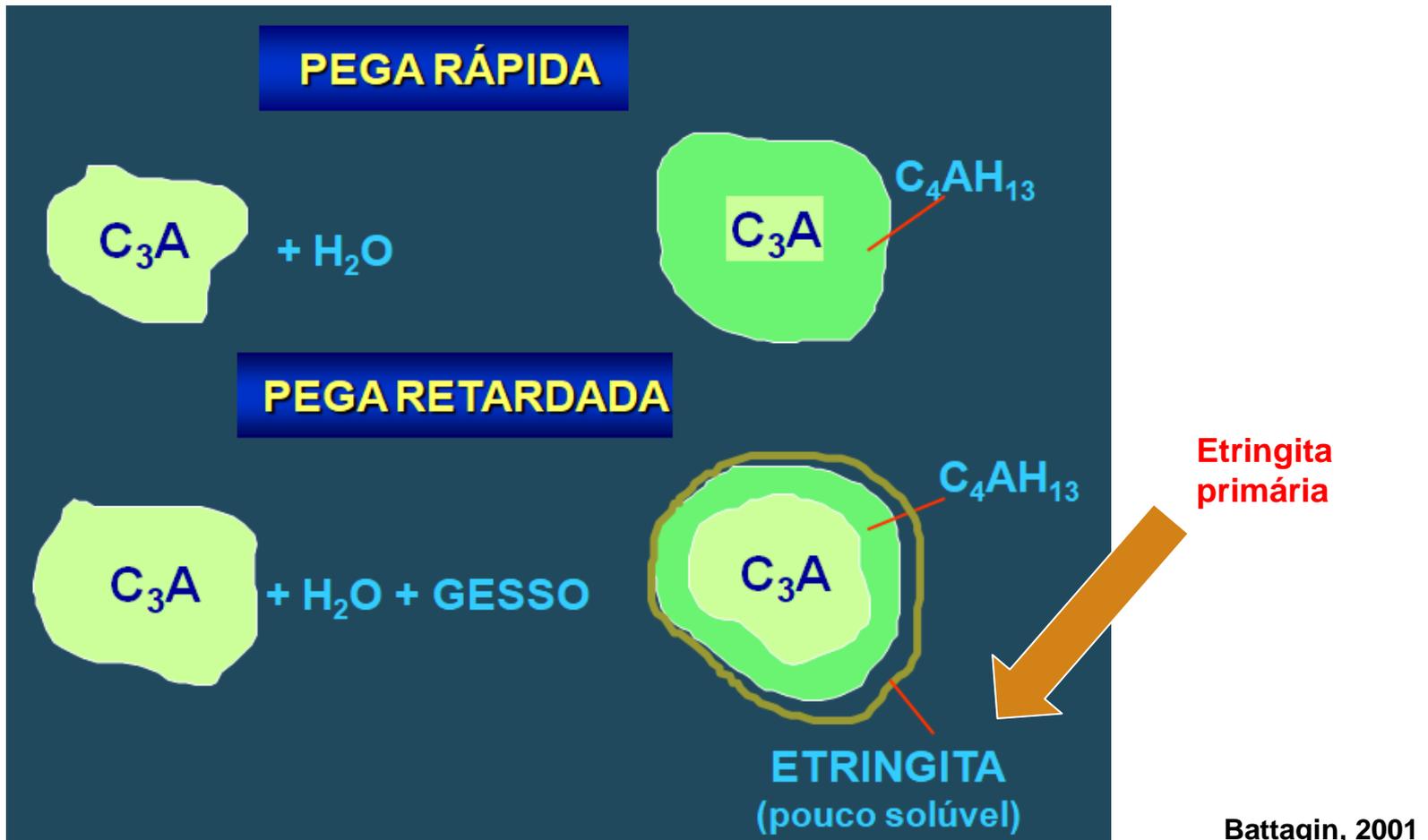
Condições de exposição em função da agressividade	água	solo
	Sulfato solúvel (SO ₄) mg/L	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo % em massa
Fraca	0 a 150	0,00 a 0,10
Moderada	150 a 1 500	0,10 a 0,20
Severa	Acima de 1 500	Acima de 0,20

Usar cimento resistente a sulfatos

Grau de agressividade	ABNT NBR 12655	
	Máx. relação água/cimento	Mínimo f _{ck} MPa
Fraca	0,65	20
Moderada	0,50	35
Severa	0,45	40

Por que se adiciona sulfatos ao cimento?

Reação da formação da etringita primária (fenômeno rápido)



Reação da formação da etringita tardia (fenômeno lento)

Elevação da temperatura
Presença de álcalis

H₂O

Dissolução da etringita : SO₄²⁻

SO₄²⁻ na solução
dos poros

SO₄²⁻ adsorvidos
no C-S-H

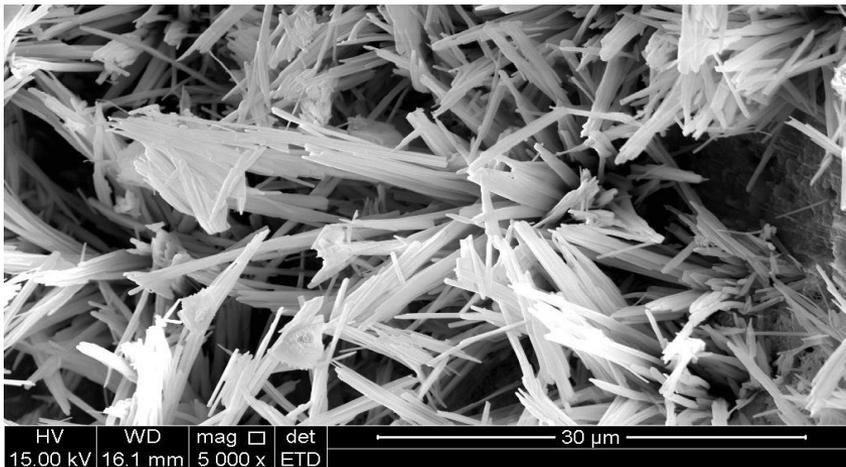
Liberação ao longo do tempo

Formação de etringita tardia:
sulfatos + aluminatos de cálcio hidratados

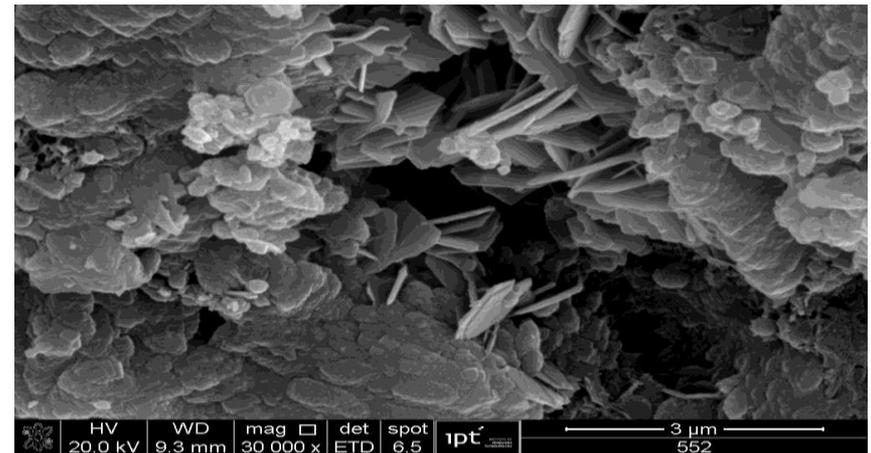
O papel dos álcalis na DEF

Álcalis e a DEF

- Geralmente vem do cimento.
- Grande influência, mas não fazem parte da reação
- Diminui a estabilidade da etringita primária : temperatura acima de 65°C na fase de cura
- >Álcalis < etringita primária : sulfatos na solução dos poros ou adsorvidos no C-S-H.



Etringita primária abundante –cura normal

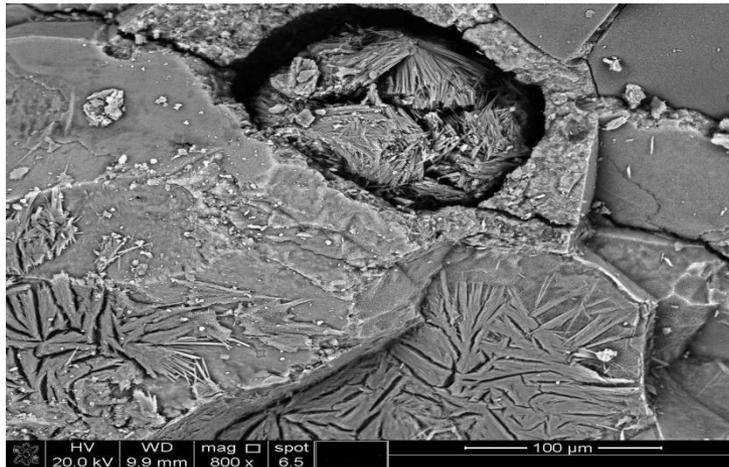


Menor etringita e abundância de portlandita

O papel da temperatura na DEF

Temperatura e a DEF

- Temperatura acima de 65°C na fase de cura diminui a estabilidade da etringita primária
- > Temperatura > cinética da reação: sulfatos na solução dos poros ou adsorvidos no C-S-H.
- Baixas temperaturas: DEF só se forma se houver álcalis expressivos no sistema



DEF- cura com pico de 80°C

Sulfatos e a DEF

- **Geralmente vem do cimento.**
- **Fazem parte da reação**
- **Prevenção da DEF : limitação do teor de SO_3 no cimento**

O papel dos agregados na DEF

Agregados e a DEF

- Não existe efeito péssimo como na RAA: $> SO_3 >$ expansão.
- Dimensão: efeito na expansão final
- Natureza mineralógica: agregados calcários diminuem a taxa de expansão (melhor aderência e menor dilatação térmica) que os silicosos.



Medidas preventivas da DEF

- Limitar temperatura máxima do concreto e da cura
- Evitar contato com água ou umidade
- Limitar teores de sulfatos e C_3A no cimento
- Limitar teor de álcalis no concreto
- Ensaaios de desempenho de traços (ciclos térmicos)
- Controlar o teor de hidróxido de cálcio (usar adições).

A prevenção da RAA se faz mediante uma análise de risco conforme ABNT NBR 15577-1

A RAA depende não somente dos materiais e traço do concreto, mas também das condições de exposição da estrutura, seu tipo e dimensões.

- Classificar as estruturas em função dos danos (Classes A, B, C, D)
- Determinar o grau de reatividade do agregado (R0, R1, R2 ou R3)
- Determinar o risco em função do grau de reatividade do agregado e das dimensões e condições de exposição das estruturas (Desprezível, mínimo, moderado, alto ou muito alto)
- Estabelecer a intensidade da ação preventiva em função da classe de estrutura (MP0, MP1, MP2, MP3 ou MP4) e do risco

RAA - Medidas preventivas

Classificação da Estrutura	Consequências da RAA
Classe A	Consequências pequenas ou insignificantes do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança.
Classe B	Consequências moderadas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança apenas se ocorrer deterioração generalizada.
Classe C	Consequências significativas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.
Classe D	Consequências sérias e de gravidade do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.



Classificação da reatividade potencial do agregado	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias (%)	Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias (%)
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19%	Menor que 0,04%
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19 e 0,40%	Entre 0,04 e 0,12%
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41 e 0,60%	Entre 0,13 e 0,24%
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60%	Maior que 0,24%



Grau de risco

Risco de ocorrência	Classe de estrutura			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Desprezível	MP 0	MP 0	MP 0	MP 0
Mínimo	MP 0	MP 0	MP 1	MP 2
Moderado	MP 0	MP 1	MP 2	MP 3
Alto	MP 0	MP 3	MP 4	MP 4
Muito alto	MP 0	MP 4	MP 4	MP 4

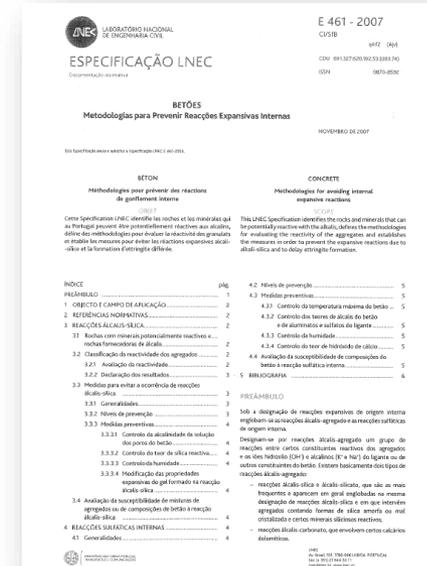
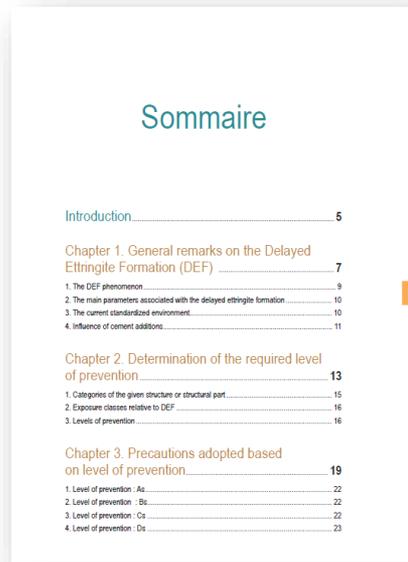
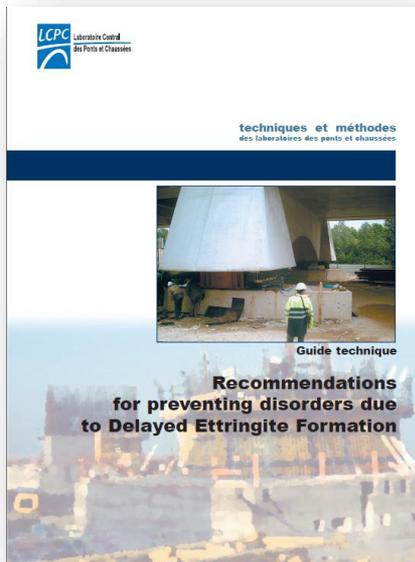


Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Maciço em ambiente seco	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas expostas a umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito Alto
Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço	Desprezível	Alto	Muito alto	Muito Alto

DEF- Medidas preventivas

Não existe uma norma brasileira para prevenção da DEF

A prática da ABCP tem se baseado nas recomendações do Guia do LCPC e do Guia LNEC E 461



As etapas para a prevenção da DEF

Guia LCPC

Categoria da estrutura : I, II ou III

Classe de exposição: XH1, XH2 ou XH3

Nível de prevenção requerido: 1, 2, 3 ou 4

Medidas preventivas

- a. Limitação da temperatura de cura
- b. Limitação do teor de sulfatos do cimento
- c. Limitação do teor de C_3A do cimento
- d. Limitação do teor de álcalis do concreto
- e. Ensaio de desempenho de traço (ciclos térmicos e molhagem/secagem)

Classificação da Estrutura ou Elemento Estrutural

■ TABLE I - EXAMPLES OF STRUCTURES OR STRUCTURAL ELEMENTS CLASSIFIED BY CATEGORY

Category	Examples of structures or structural elements
Category I (small or acceptable consequences)	Structures made of concrete rated in a strength class of less than C 16/20 Non load-bearing building components Easily-replaced elements Temporary structures The majority precast non-structural products
Category II (rather severe consequences)	The load-bearing components of most buildings and engineering structures (including standard bridges) The majority of prefabricated structural products (including pressurised pipes)
Category III (unacceptable or nearly unacceptable consequences)	Buildings housing nuclear power plant reactors and cooling towers Dams Tunnels Exceptional bridges and viaducts Monuments and landmark buildings Railroad ties

dormentes

Classes de Exposição

■ TABLE II - EXPOSURE CLASSES FOR A STRUCTURAL PART WITH RESPECT TO DEF

Exposure class designation	Environmental description	Informational examples to illustrate the choice of exposure class
XH1	Dry or moderate humidity	Part of a concrete structure located inside buildings where the ambient air humidity rate is either low or medium Part of a concrete structure located outside and protected from rain
XH2	Alternation of humidity and dryness, high rate of humidity	Part of a concrete structure located inside buildings where the ambient air humidity rate is high Part of a concrete structure unprotected by a coating and exposed to inclement weather, without any water stagnation at the surface Part of a concrete structure unprotected by a coating and frequently subjected to condensation
XH3	In long-lasting contact with water : state of permanent immersion, water stagnation at the surface, tidal zone	Part of a concrete structure permanently submerged in water Maritime structural elements A large number of foundations Part of a concrete structure regularly exposed to water projections

Níveis de Prevenção Necessários

■ TABLEAU III - CHOICE OF LEVEL OF PREVENTION

Exposure class of the structural part Structure category	XH1	XH2	XH3
Category I	1	1	1
Category II	1	2	3
Category III	1	3	4

Nível de prevenção 1

Temperatura do concreto deve ser mantida abaixo de 85 °C

Nível de prevenção 2

Temperatura do concreto deve ser mantida abaixo de 75 °C

OU

Se ultrapassar e chegar até 85°C, uma das condições pelo menos deve ser atendida:

- 1. A temperatura não pode ficar acima de 75°C por no máximo 4h e o teor de álcalis do concreto deve ser abaixo de 3kg/m³;**
- 2. Usar cimento composto com até 20% de adições e limitar o teor de álcalis no concreto em no máximo 3kg/m³**
- 3. Usar cimento com adições , com máx. de 3% de SO₃ e C₃A do clínquer < 8%;**
- 4. Usar CPI e adicionar no concreto pelo menos 20% de escória, cinza volante, argila calcinada . O CPI deve ter no máximo de 3% de SO₃ e C₃A < 8%;**
- 5. Fazer o ensaio de desempenho de traço , segundo LCPC 66 ou outro.**

Ações para atender o nível de prevenção requerido

Nível de prevenção 3

Temperatura do concreto deve ser mantida abaixo de 70 °C

OU

Se ultrapassar e chegar até 75°C, uma das condições pelo menos deve ser atendida:

- 1. A temperatura não pode ficar acima de 75°C por no máximo 4h e o teor de álcalis do concreto deve ser abaixo de 3kg/m³;**
- 2. Usar cimento composto com até 20% de adições e limitar o teor de álcalis no concreto em no máximo 3kg/m³**
- 3. Usar cimento com adições , com máx. de 3% de SO₃ e C₃A do clínquer < 8%;**
- 4. Usar CPI e adicionar no concreto pelo menos 20% de escoria, cinza volante, argila calcinada . O CPI deve ter no máximo de 3% de SO₃ e C₃A < 8%;**
- 5. Fazer o ensaio de desempenho de traço , segundo LCPC 66 ou outro.**

Ações para atender o nível de prevenção requerido

Nível de prevenção **4**

**Temperatura do concreto deve ser mantida abaixo de 65 °C
(prioritária)**

ou

**Se ultrapassar 65°C e chegar até 75°C, as duas condições
deve ser atendidas:**

- 1. teor de álcalis do concreto deve ser abaixo de 3kg/m³;**
- 2. Fazer o ensaio de desempenho de traço , segundo LCPC 66 ou outro.**

Medida de Prevenção em função do risco

Exemplo para dormentes

3

▪ NIVEL DE PREVENÇÃO

- Temperatura máxima $< 70^{\circ}\text{C}$
- Álcalis ativos no concreto $< 3\text{kg/m}^3$
- SO_3 do cimento $< 3\%$ e C_3A do clínquer $< 8\%$
- Uso de escória e pozolana
- Passar no ensaio de desempenho de traço (ciclos térmicos e molhagem/secagem – 1 ano de duração)



Recomendações do Guia LNEC E 461 para prevenção da DEF

Classificação das estruturas : R1,R2 ou R3

Categoria ambiental de exposição: A1,A2 ou A3

Nível de prevenção: P1, P2 ou P3

P1- ausência de prevenção

P2- nível de prevenção normal

P3- nível de prevenção especial

6. Cases RAA & DEF

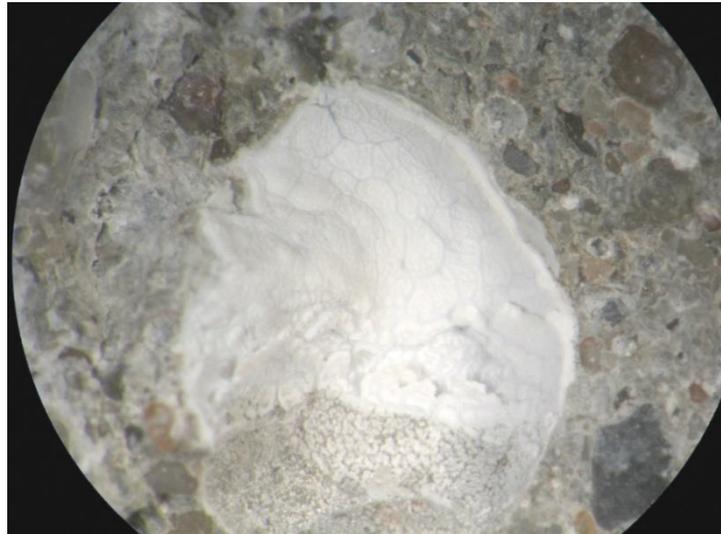
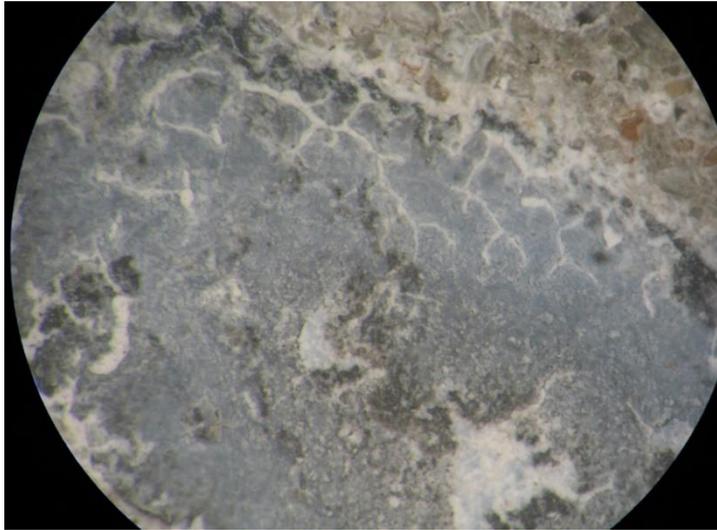


Fissuras salientadas por giz– crédito AFB



Gel exsudando– crédito AFB

6. Cases RAA & DEF



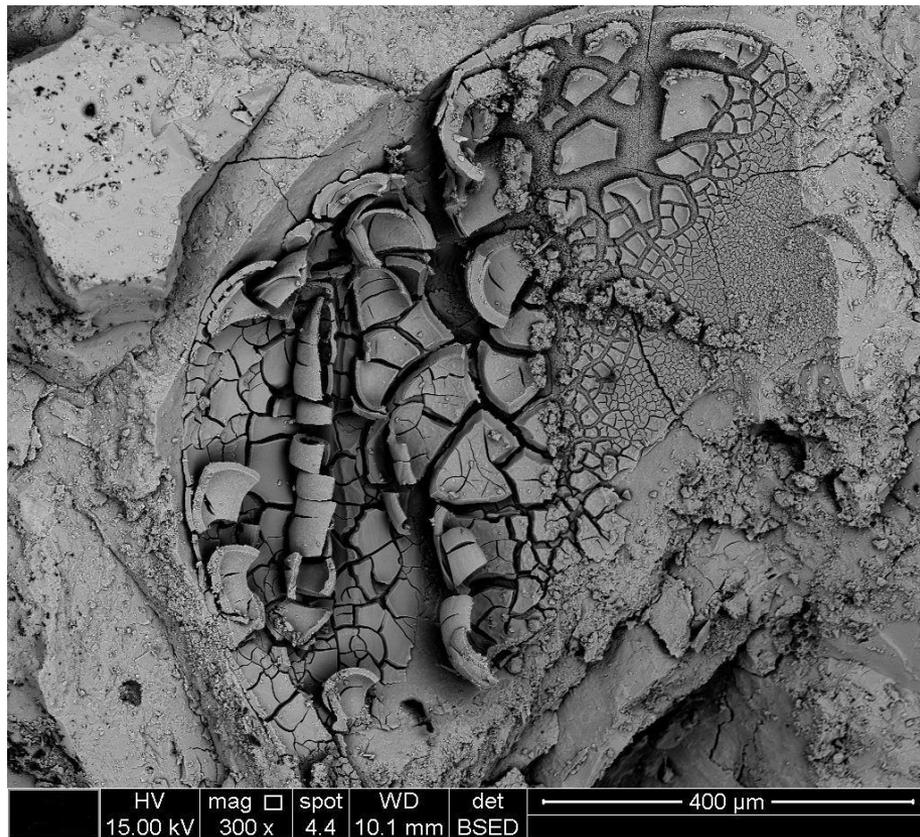
Gel da RAA no concreto – Imagem por lupa : 3X

6. Cases RAA & DEF

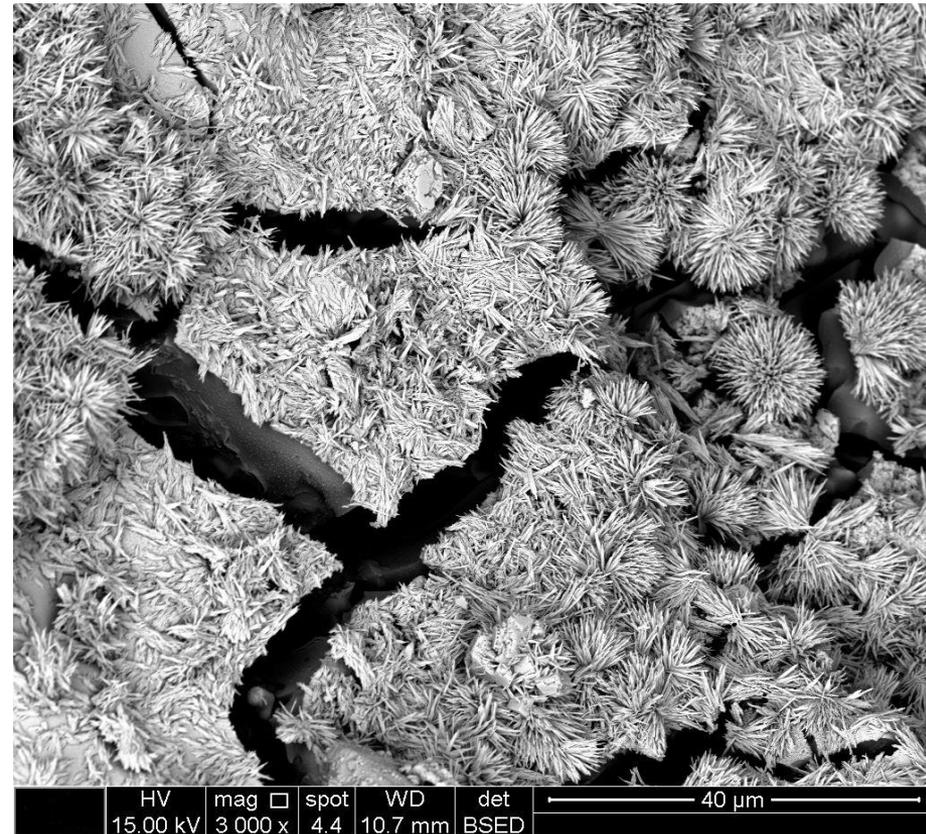


**Borda de reação ao redor do agregado graúdo (seta)
Microscópio estereoscópico. Ampliação 9x. Cred. Pecchio**

6. Cases RAA & DEF

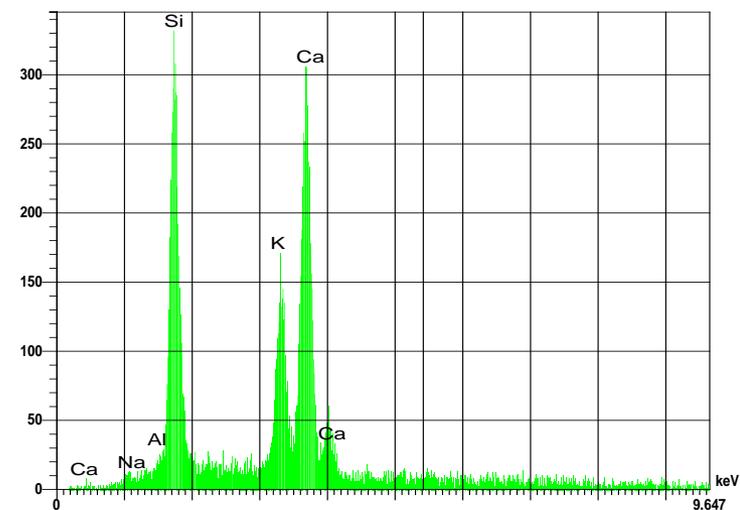
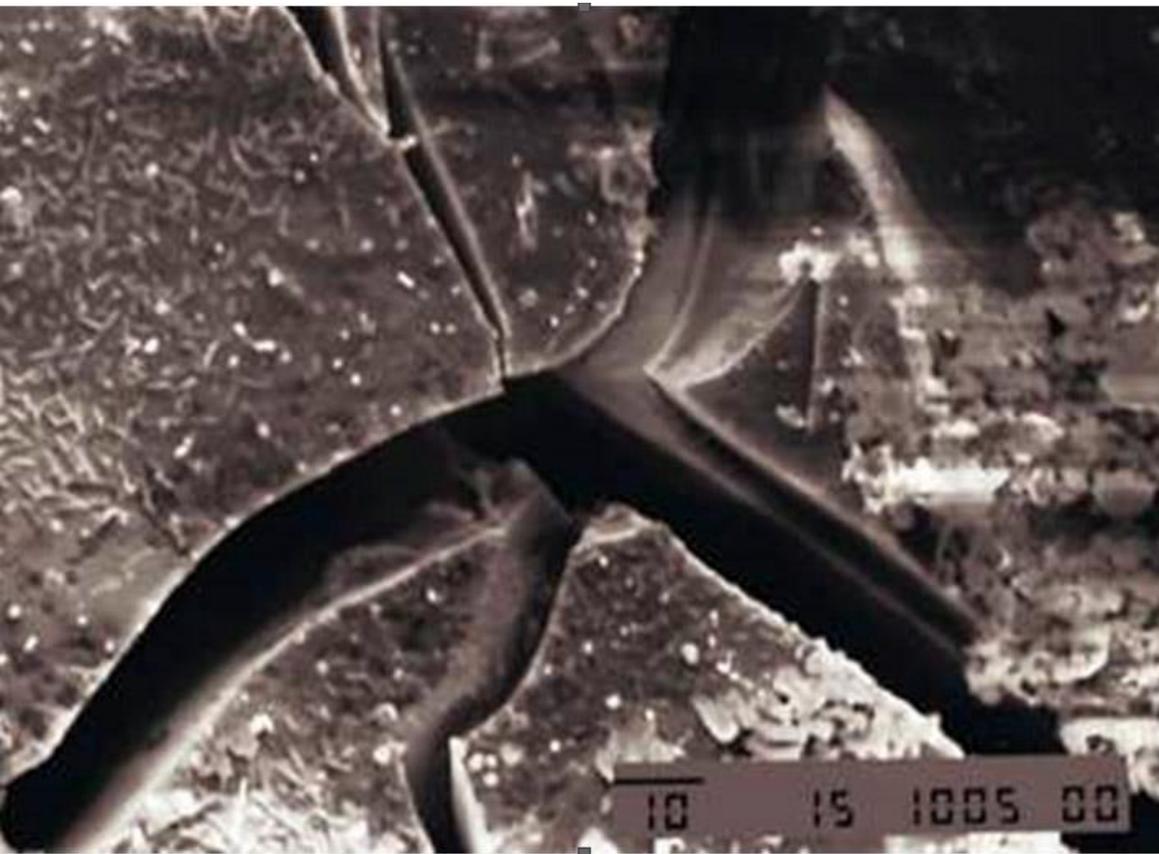


Aspecto ao microscópio eletrônico do Gel maciço gretado da RAA no poro – Ampliação 300x.



Aspecto ao microscópio eletrônico do Gel cristalinizado em forma de rosáceas da RAA na argamassa – Ampliação 3000x.

6. Cases RAA & DEF



Gel gretado) – Microscópio óptico. Ampliação 5000x.

6. Cases RAA & DEF



Vista geral de dormentes com DEF.



Padrão de fissuração em dormentes com DEF.

Crédito: Ana Livia

6. Cases RAA & DEF



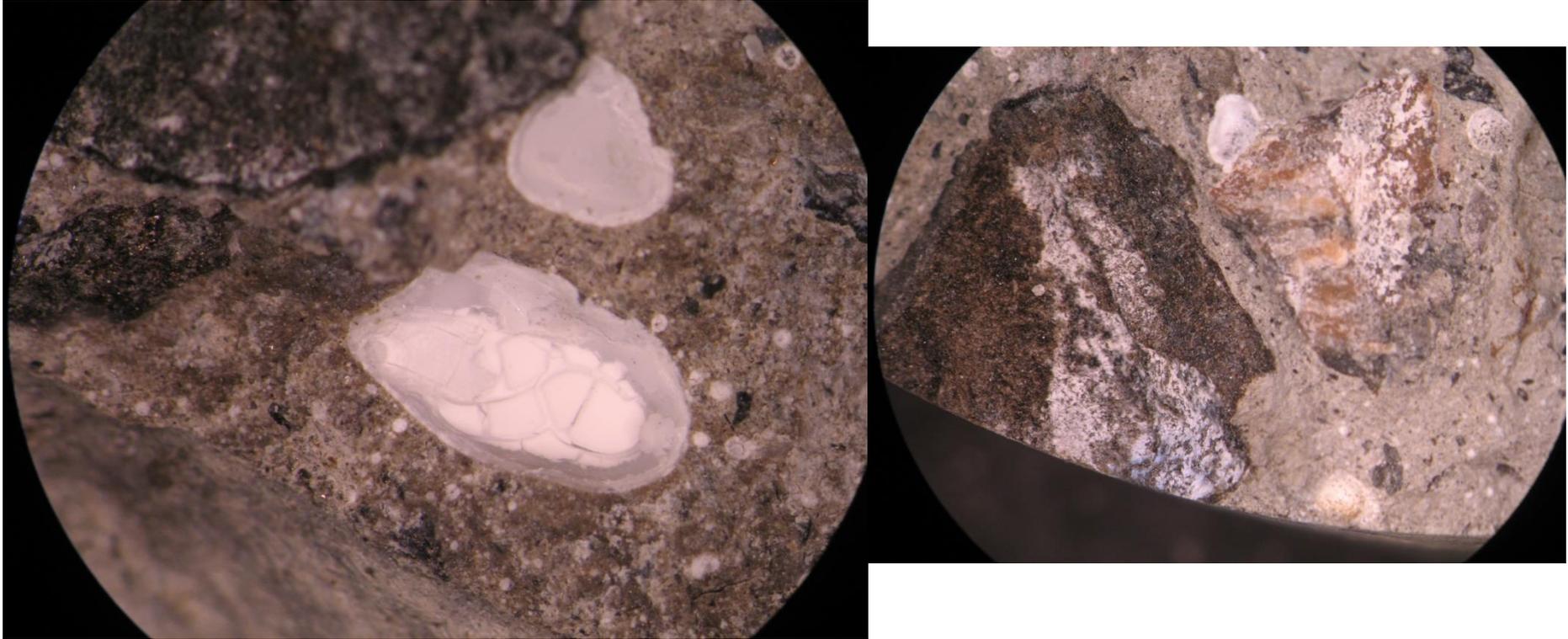
Dormentes com DEF.



Padrão de fissuração em dormentes com DEF.

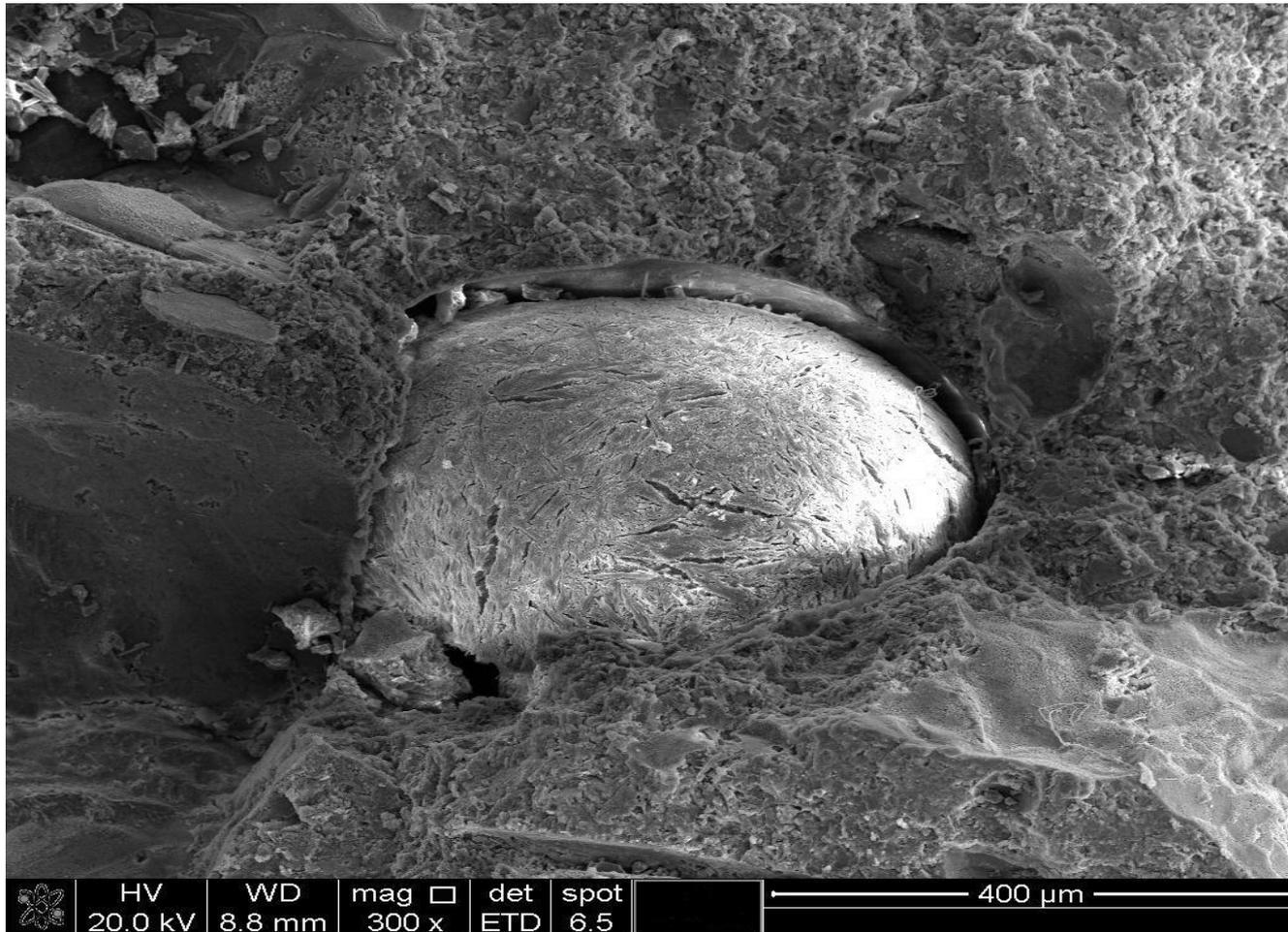
Crédito: Ana Livia

6. Cases RAA & DEF



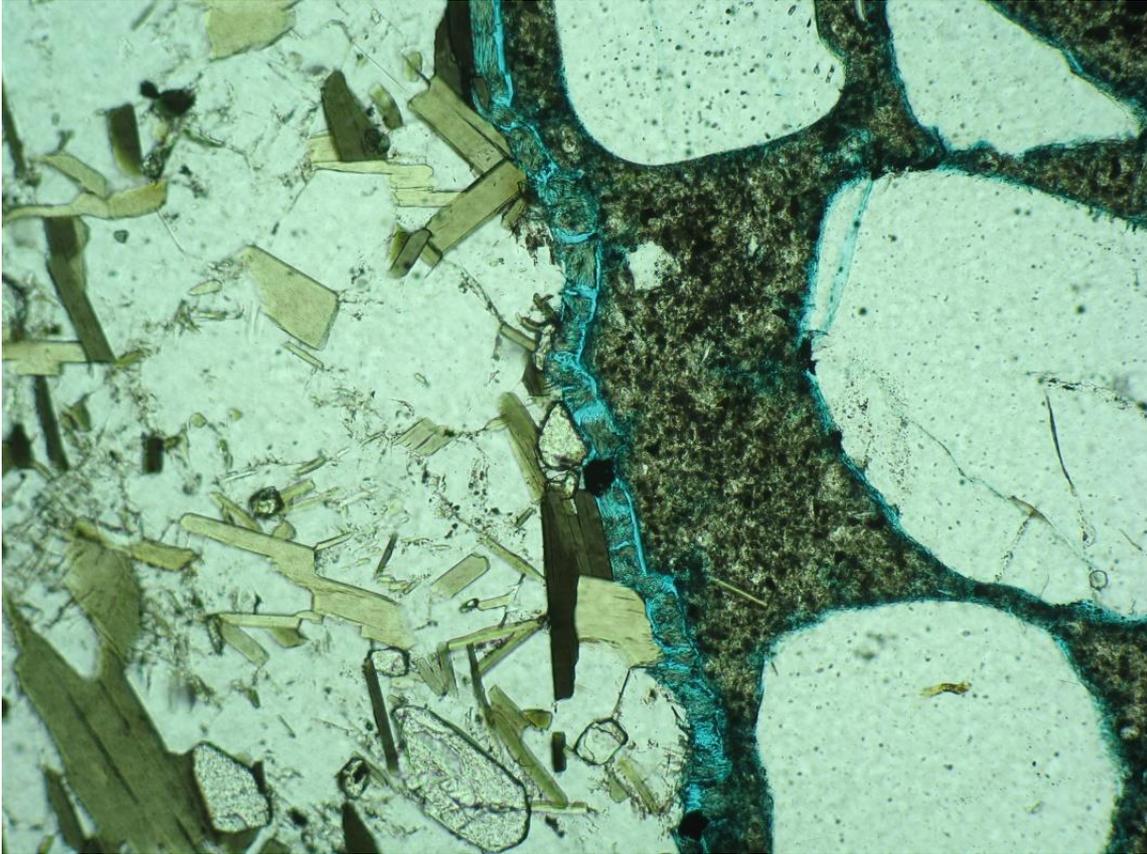
Poros preenchidos por DEF . Crédito: Ana Livia

6. Cases RAA & DEF



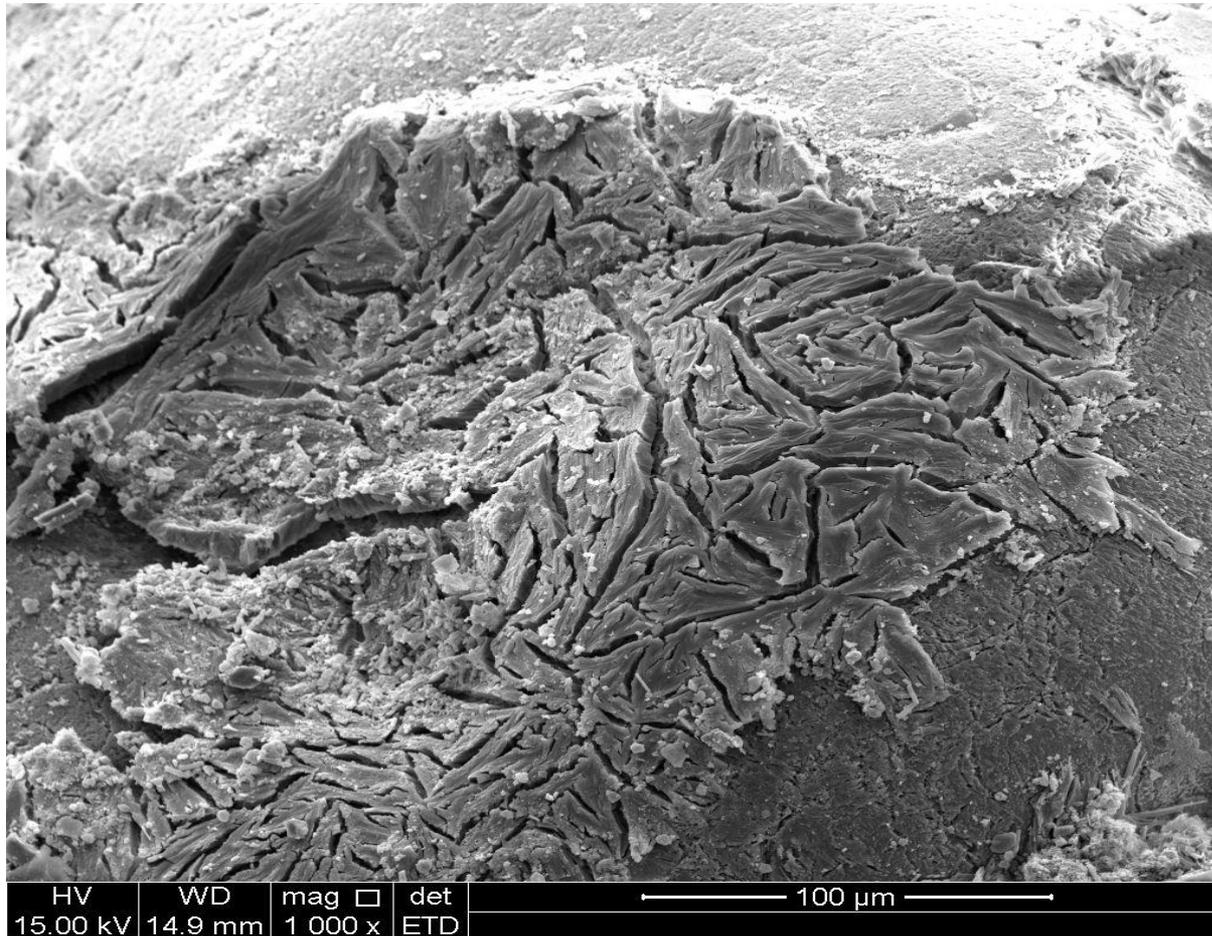
Poros preenchido por DEF . Crédito: Ana Livia

6. Cases RAA & DEF



**DEF na fissura – Imagem
Microscópio de luz transmitida.
Nicóis paralelos. Ampliação 40x.
Crédito: Ana Livia**

Cases RAA & DEF



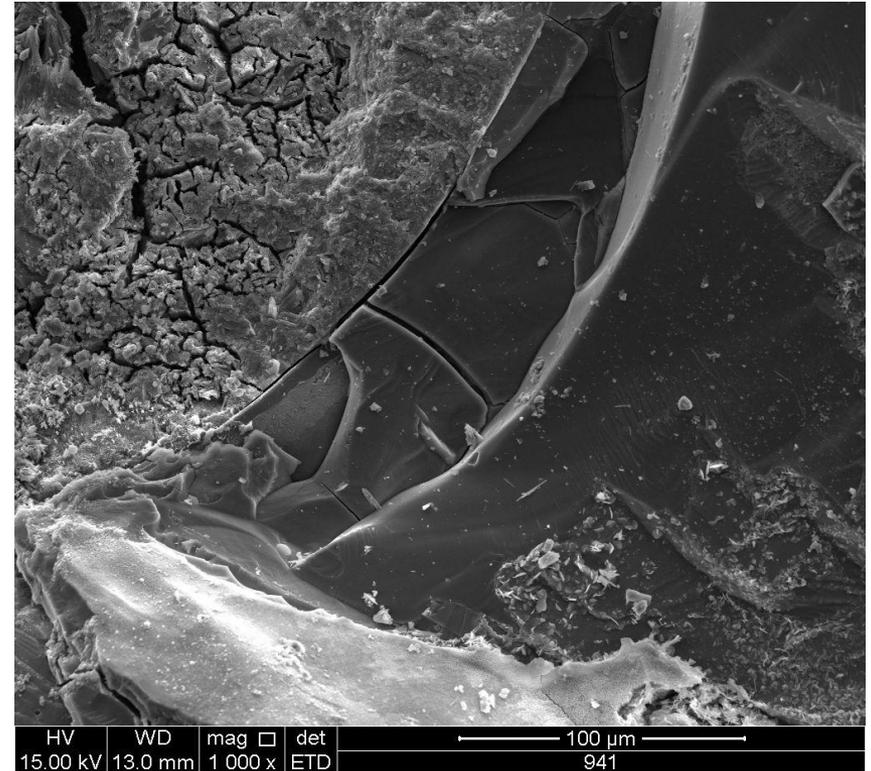
DEF sobre o agregado. Crédito: Ana Livia

6. Cases RAA & DEF



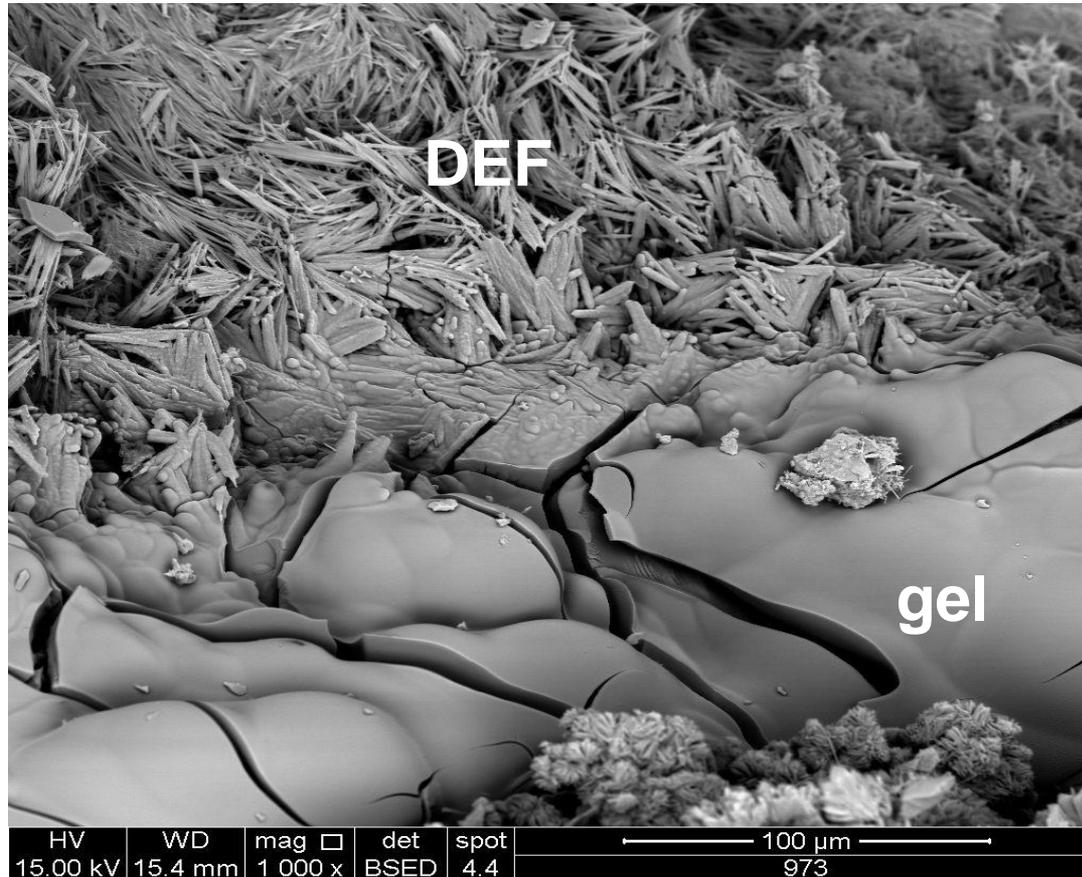
DEF e RAA – Mato Grosso

Crédito: Selmo K.



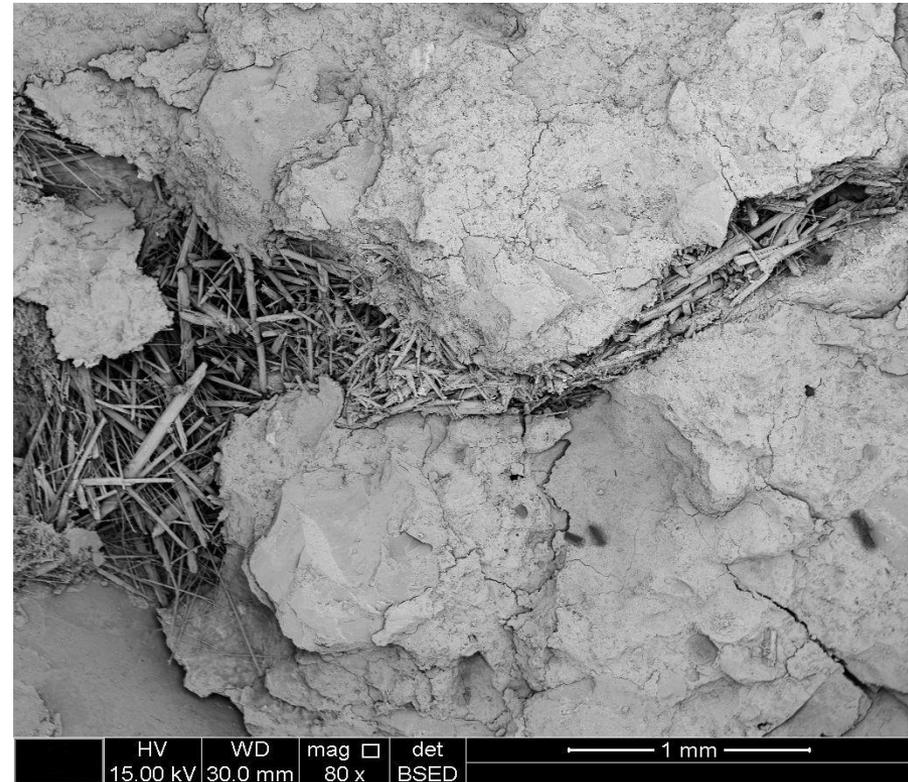
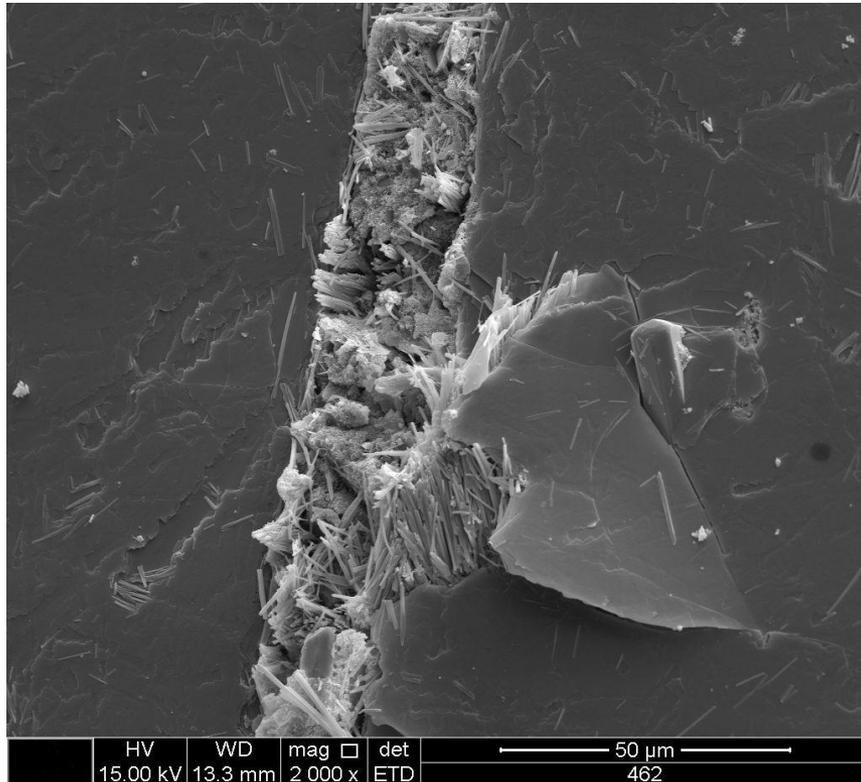
Gel de RAA e DEF . Crédito: Ana Livia

6. Cases RAA & DEF



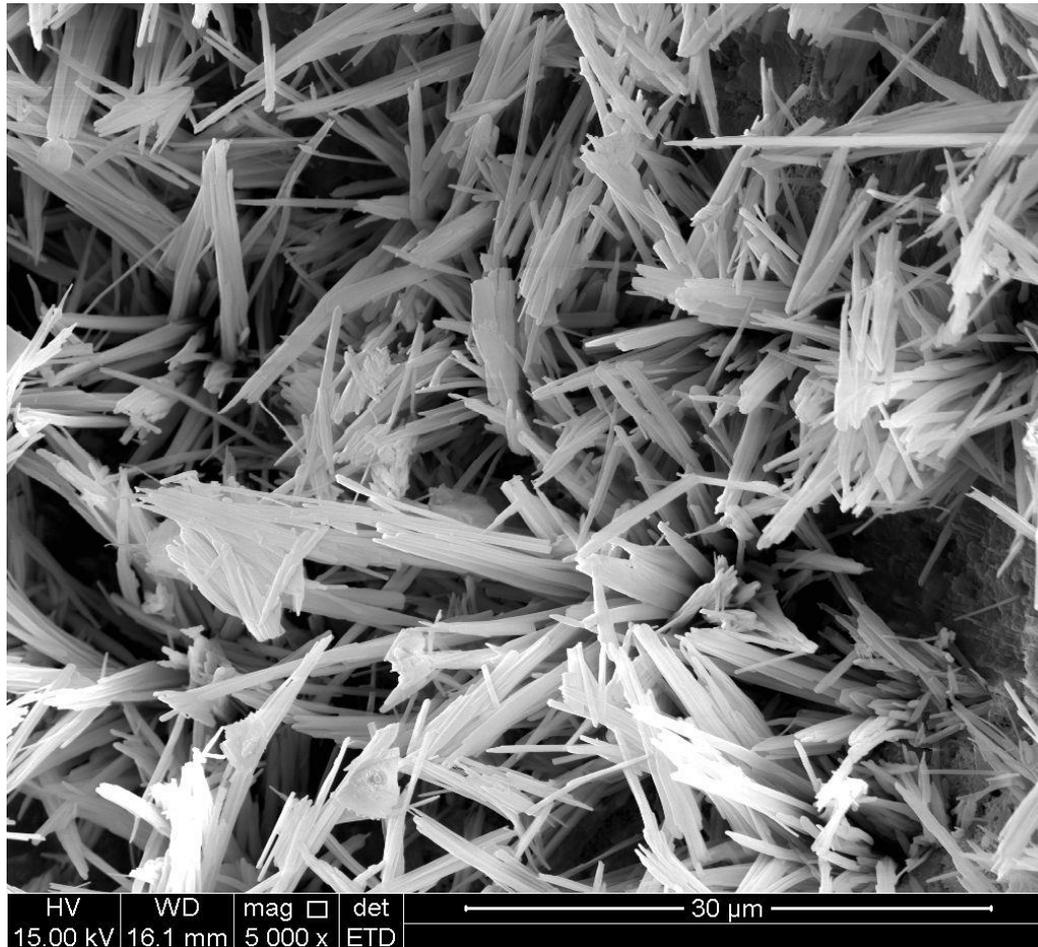
Gel de RAA e DEF . Crédito: Ana Livia

Cases –ataque externo de sulfato



etringita cristalizada- Crédito: Ana Livia

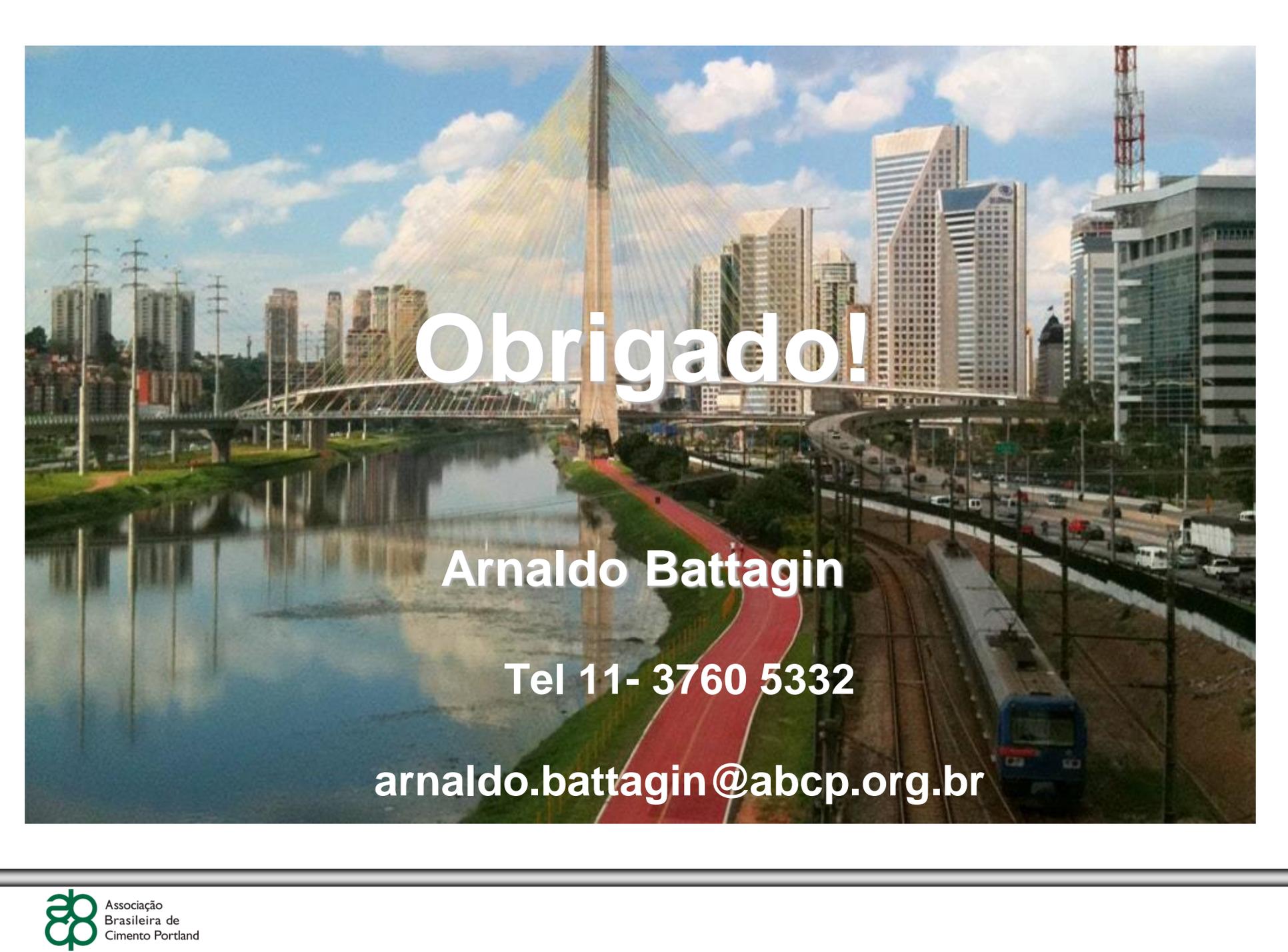
Cases - etringita primária



Etringita primária bem cristalizada -Crédito: Ana Livia

- **Guia de Prevenção da Formação de Etringita Tardia**
- **Produto: Prática Recomendada Ibracon**
- **Equipe de Trabalho: Comitê Técnico do Ibracon**

- **Guia de Prevenção da Formação de Etringita Tardia**
- **Produto: Norma da ABNT**
- **Equipe de Trabalho: Comissão de Estudo do ABNT CB-18**



Obrigado!

Arnaldo Battagin

Tel 11- 3760 5332

arnaldo.battagin@abcp.org.br

