



Patologia e recuperação de obras

ENG 1690

2015/2

Prof. Marcelo Cândido

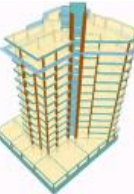
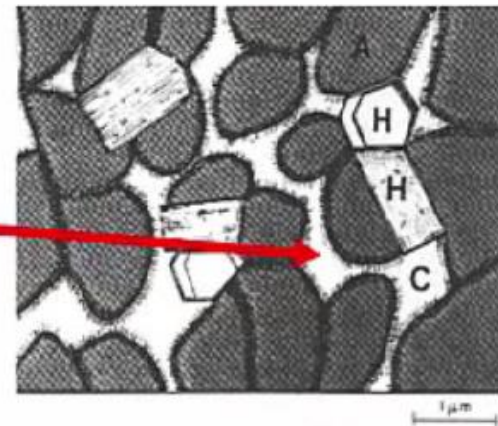
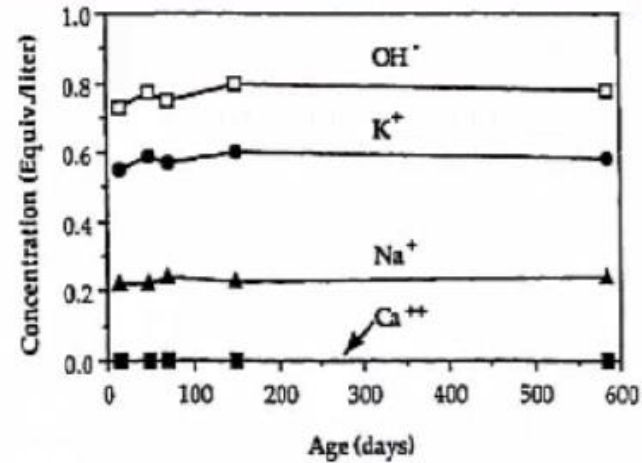
Fonte: CNPQ
PUC Goiás



Introdução

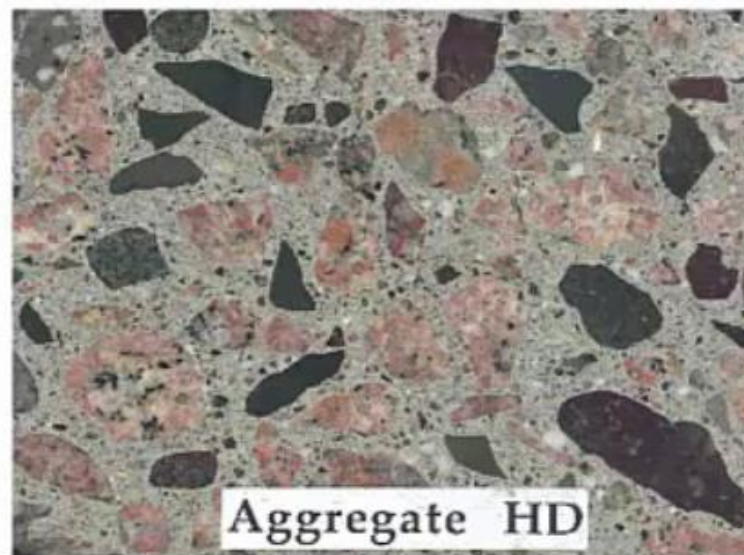
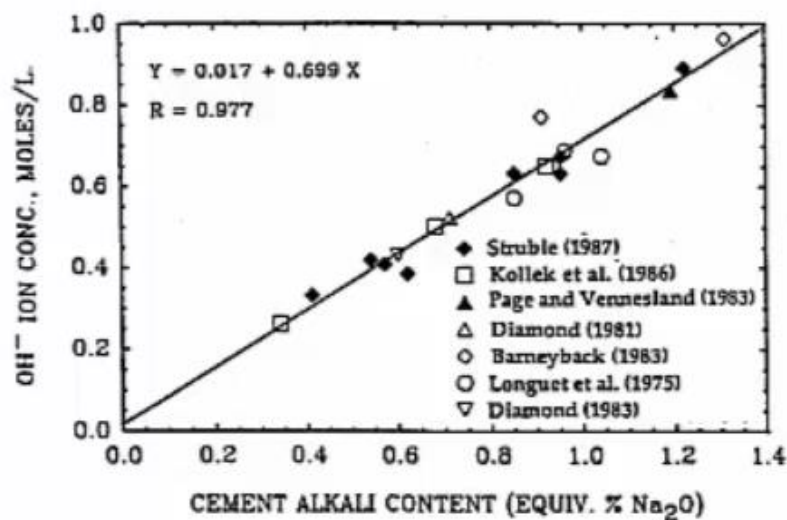
Introdução

RAA: reação química entre os **hidróxidos alcalinos** (Na^+ , K^+ , OH^-) provenientes da solução intersticial do concreto ($\text{pH} > 12.4$) e certas **fases minerais** presentes nos agregados.



Reação álcali-agregado (RAA)

- Os **íons alcalinos** são fornecidos à solução intersticial através de diversos meios como: **cimento** (principal), agregados (longo termo), adições minerais, aditivos, água do mar, etc.



Álcalis provenientes do cimento

- Alto teor de álcalis no concreto → $\uparrow$ pH na solução intersticial;

- Teor de álcalis do cimento:

$$\% \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \% \text{K}_2\text{O} = \% \text{Na}_2\text{O equiv.};$$

- Teor de álcalis do concreto

consumo de cimento x álcalis do cimento

$$\text{ex: } 400 \text{ kg/m}^3 \times 1.0\% \text{Na}_2\text{Oeq} = 4 \text{ kg/m}^3$$

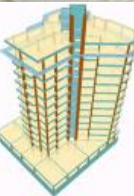
Óxidos	%
SiO ₂	20.55
Al ₂ O ₃	5.07
Fe ₂ O ₃	3.10
CaO	64.51
MgO	1.53
K₂O	0.73
Na₂O	0.15
SO ₃	2.53



Tipos de RAA

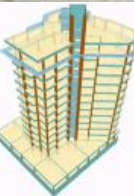
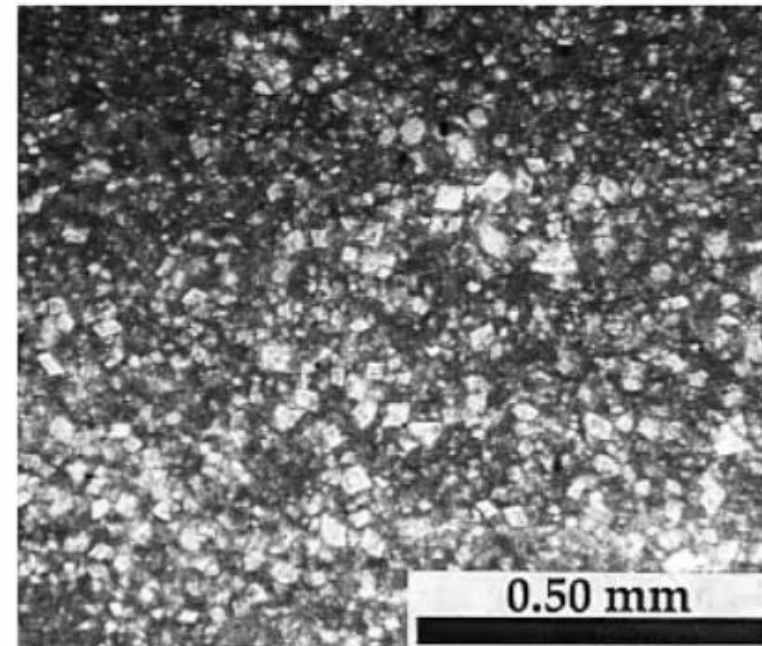
Reação álcali-carbonato (RAC)

- Casos limitados → essencialmente encontrados em Ontario (Cánadá) (regiões de Kingston, Cornwall, etc.)



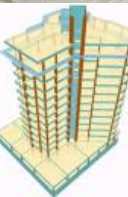
Reação álcali-carbonato (RAC)

- Rochas suscetíveis de RAC: calcários argilosos;
- Texture característica: pequenos cristais de *dolomita* (10-50 μm) disseminados em uma matriz de *calcita e minerais argilosos*.



Reação álcali-carbonato (RAC)

- Reação muito problemática – deterioração notável no campo (menos de 2 anos em serviço!).



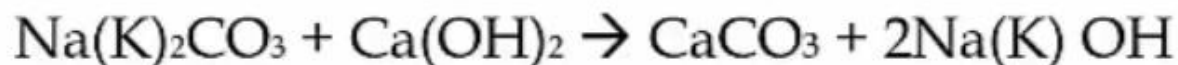
Reação álcali-carbonato (RAC)

Mecanismos ± entendidos!

- Hidróxidos alcalinos da solução intersticial do concreto atacam os cristais de dolomita;

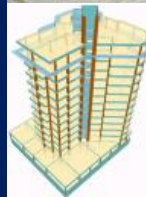
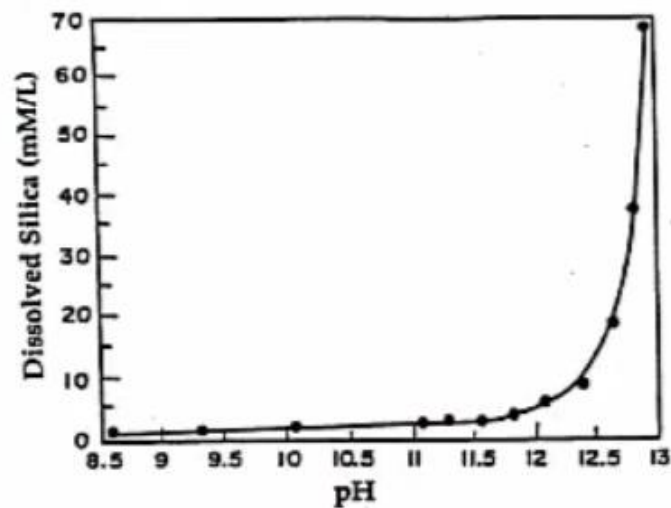


- Reciclagem de «álcalis»



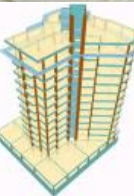
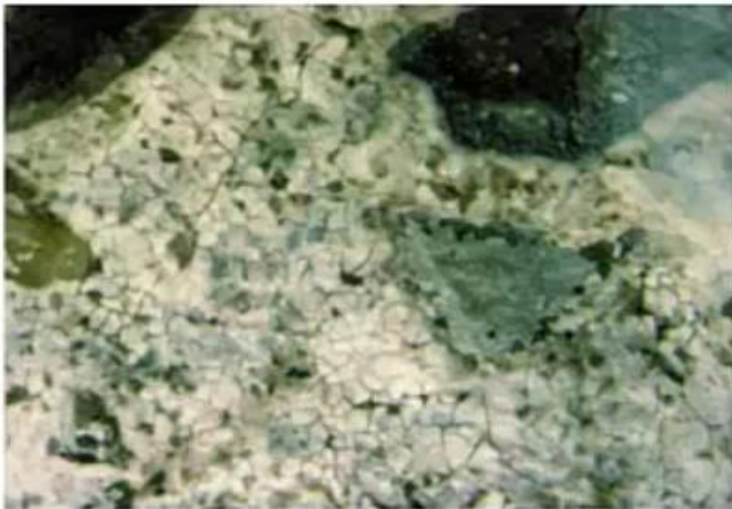
Tipos de RAA Reação álcali-sílica (RAS)

- Forma mais comum de RAA (Tabela B1, Anexo B, CSA A23.1-04);
- Dois grupos de acordo com a tipo de rocha:
 - Variedade de rochas incorporando materiais silicosos pouco cristalizados ou amorfos e vidros vulcânicos (Japão, USA);
 - Roches contendo quartzo (deformado);



Reação álcali-silica (RAS)

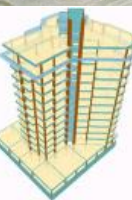
- RAS é uma reação química entre os íons Na^+ , K^+ et OH^- da solução intersticial do concreto e algumas fases minerais silicosas dos agregados $\rightarrow$ produto secundário, **gel sílico-alcálico**.

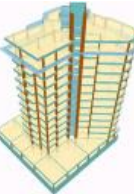


RAA

Reação álcali-silica (RAS)

- Reação → pressões internas (devido a expansão do gel), que induzem a fissuração e deterioração do concreto.



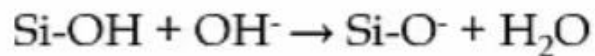


Reação álcali-silica (RAS)

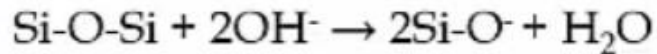
Mecanismo da RAS:

Dent- Glasser et Kataoka (Naar 2010) :

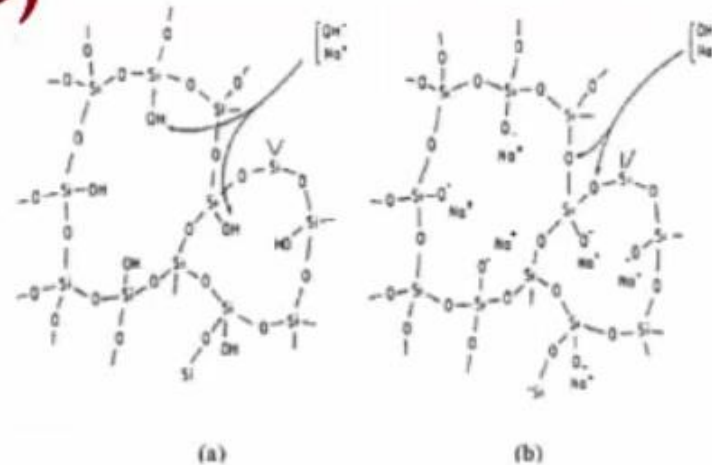
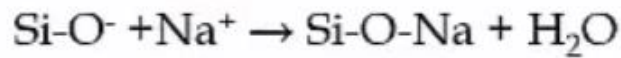
- 1) íons hidroxila ionizam os grupos silanol:



- 2) íons hidroxila quebram as ligações de siloxano:



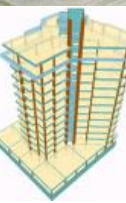
- 3) os álcalis (Na^+ ou K^+) neutralizam as ligações ionizadas :



RAA

Condições essenciais para a ocorrência da RAA

Tempo de manifestação
→ 5 a + de 25 anos!



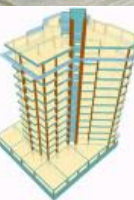
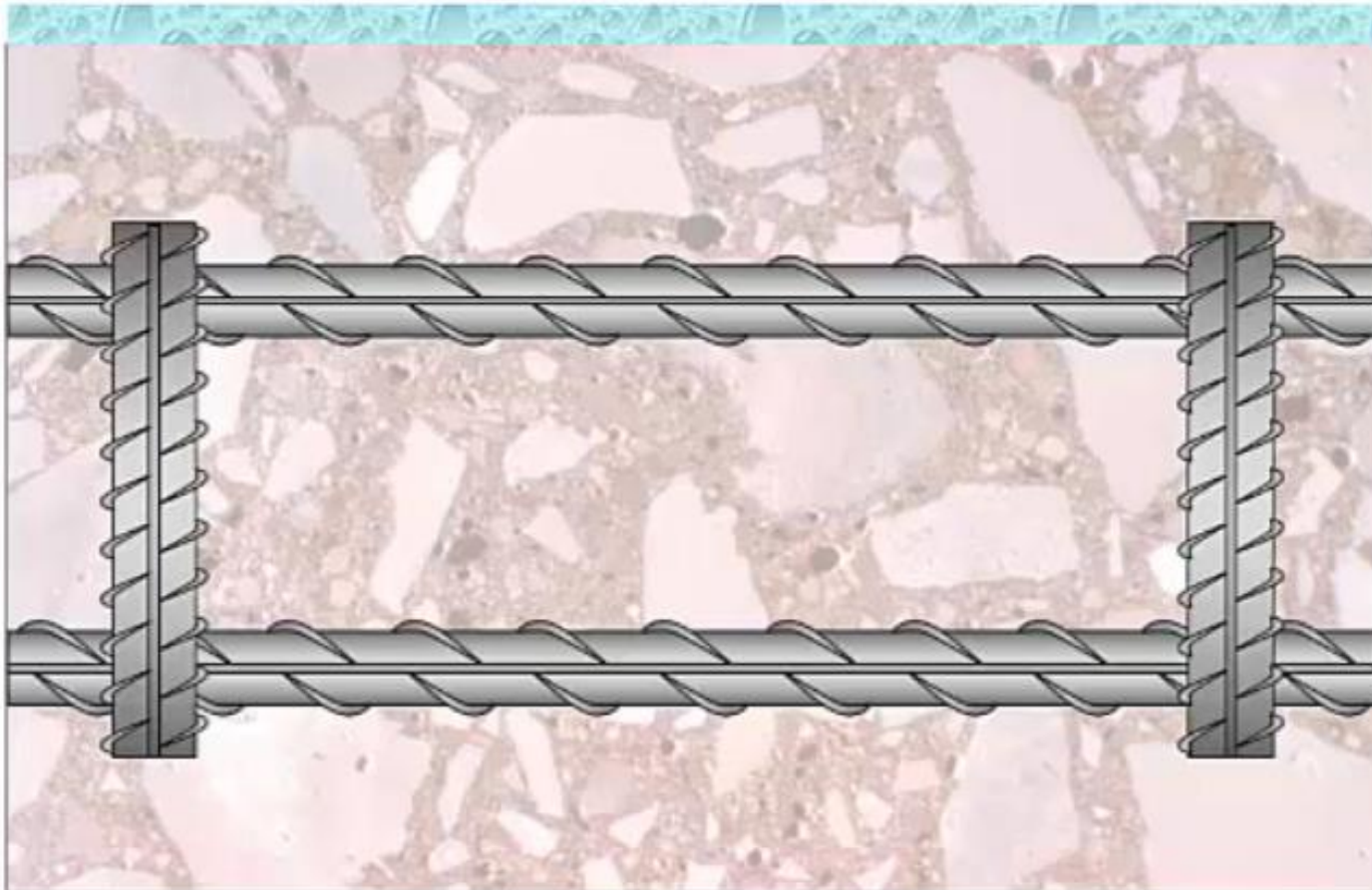
Sintomas comuns de deterioração pela RAA

- Expansão diferencial;
- Macrofissuração de superfície;
- Descoloração em torno das fissuras;
- Exsudação de gel;
- Desplacamento do concreto.



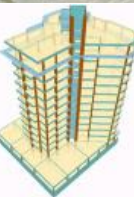
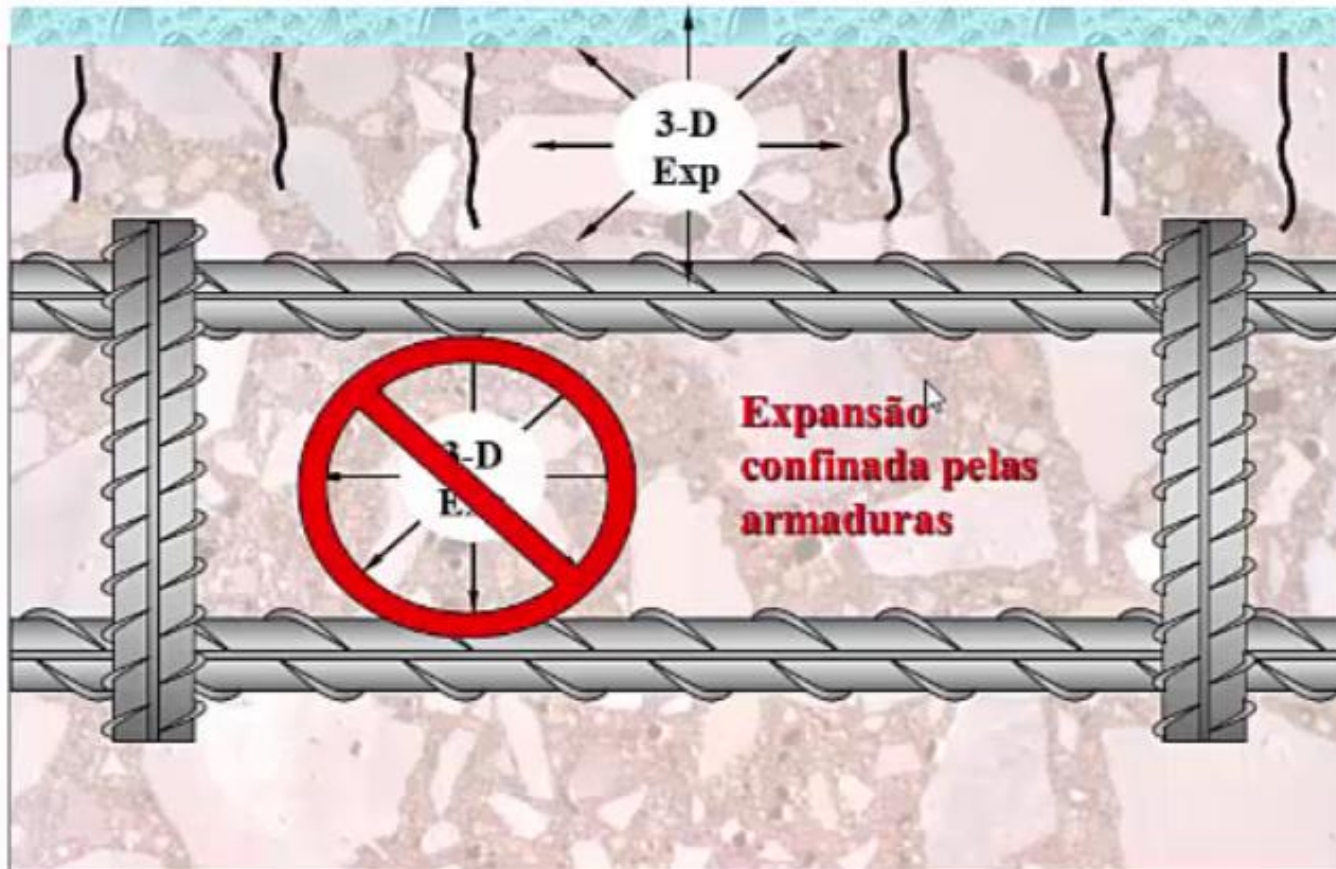
Fissuração associada a RAA

**Cobrimento: menor
confinamento!**

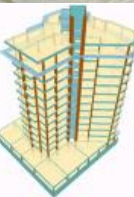
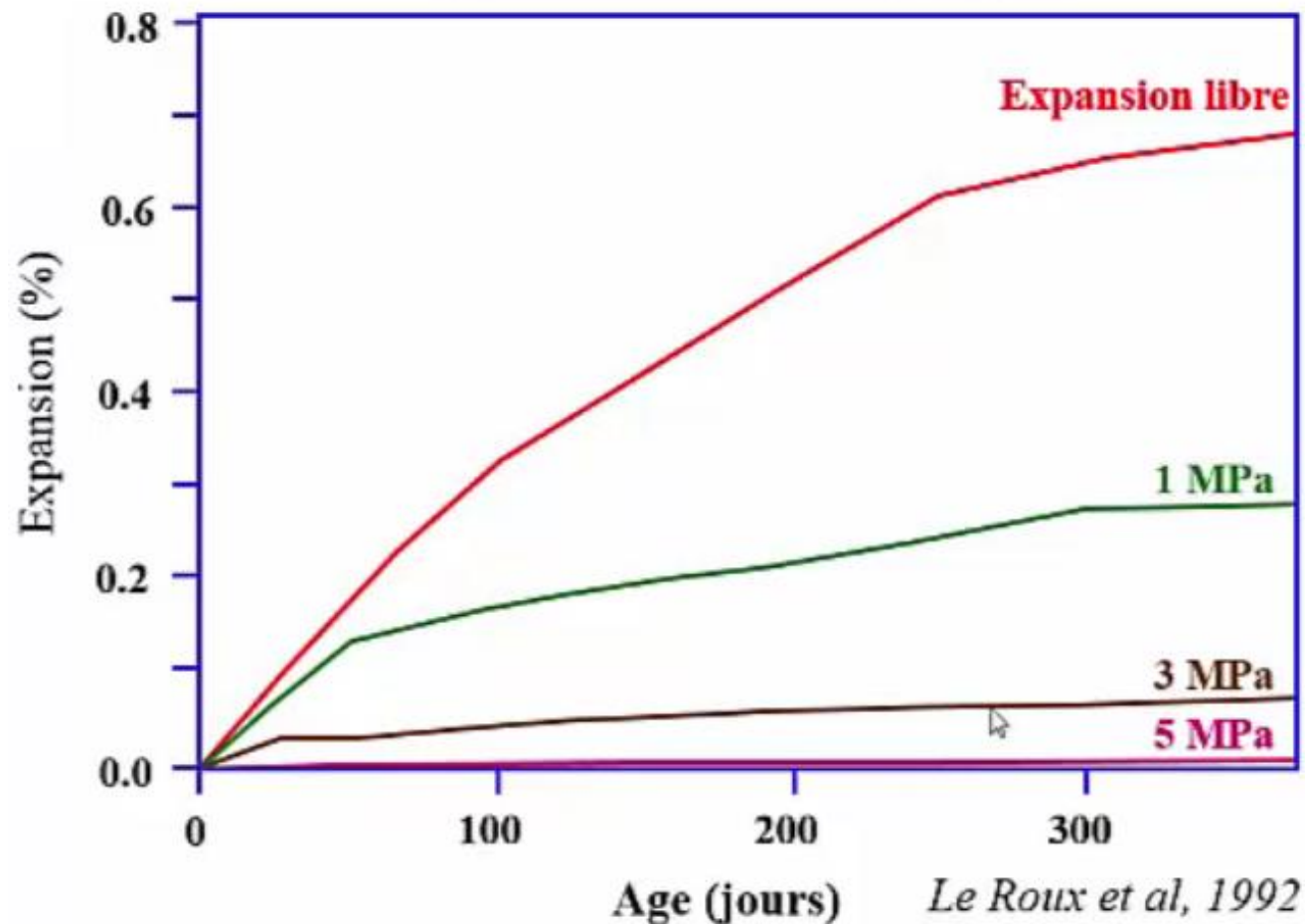


Fissuração associada a RAA

**Cobrimento: menor
confinamento!**



Efeito do confinamento



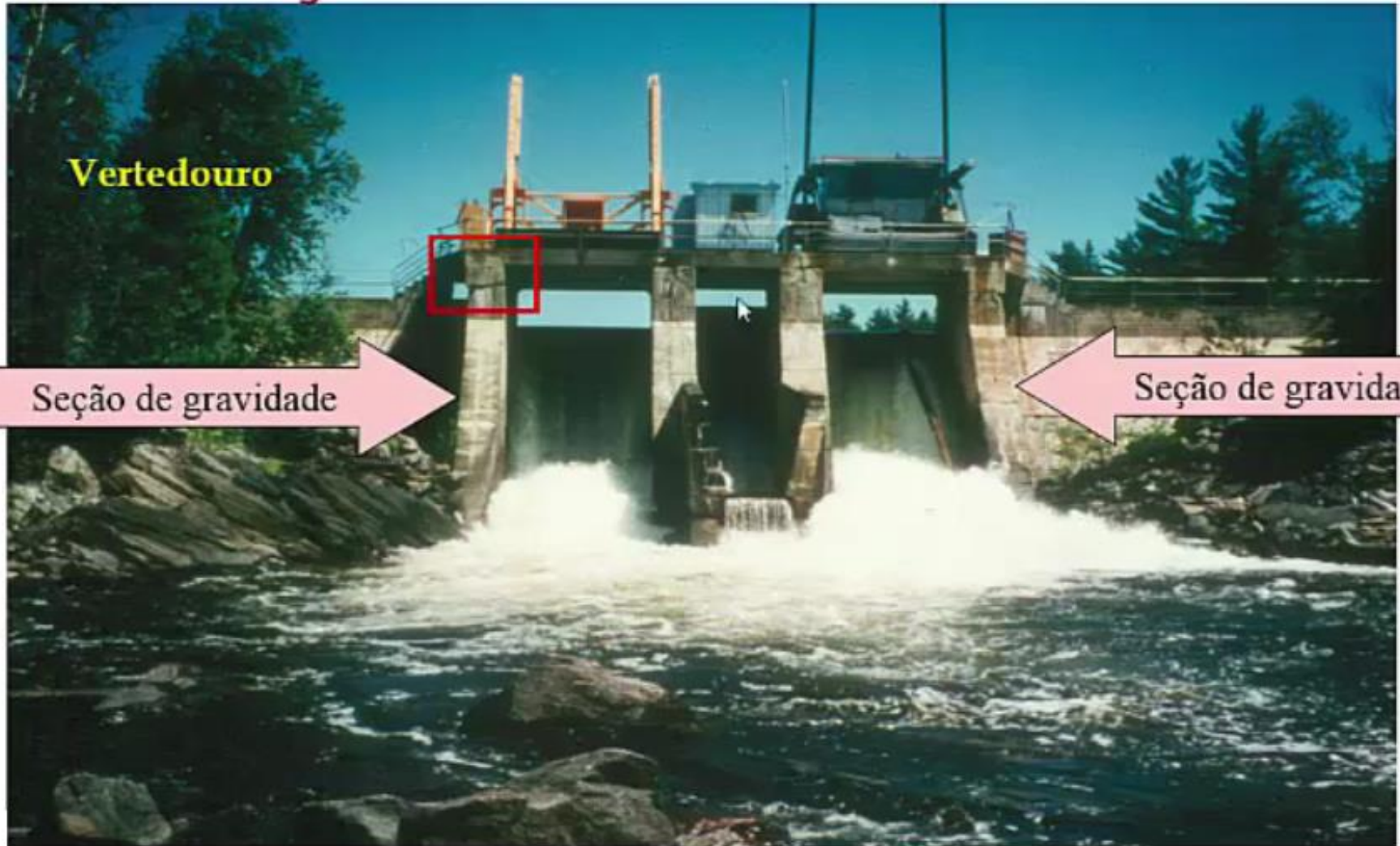
RAA



**Sintomas visuais da
RAA em estruturas de
concreto em serviço**



Deformação e desalinhamento



Deformação e desalinhamento



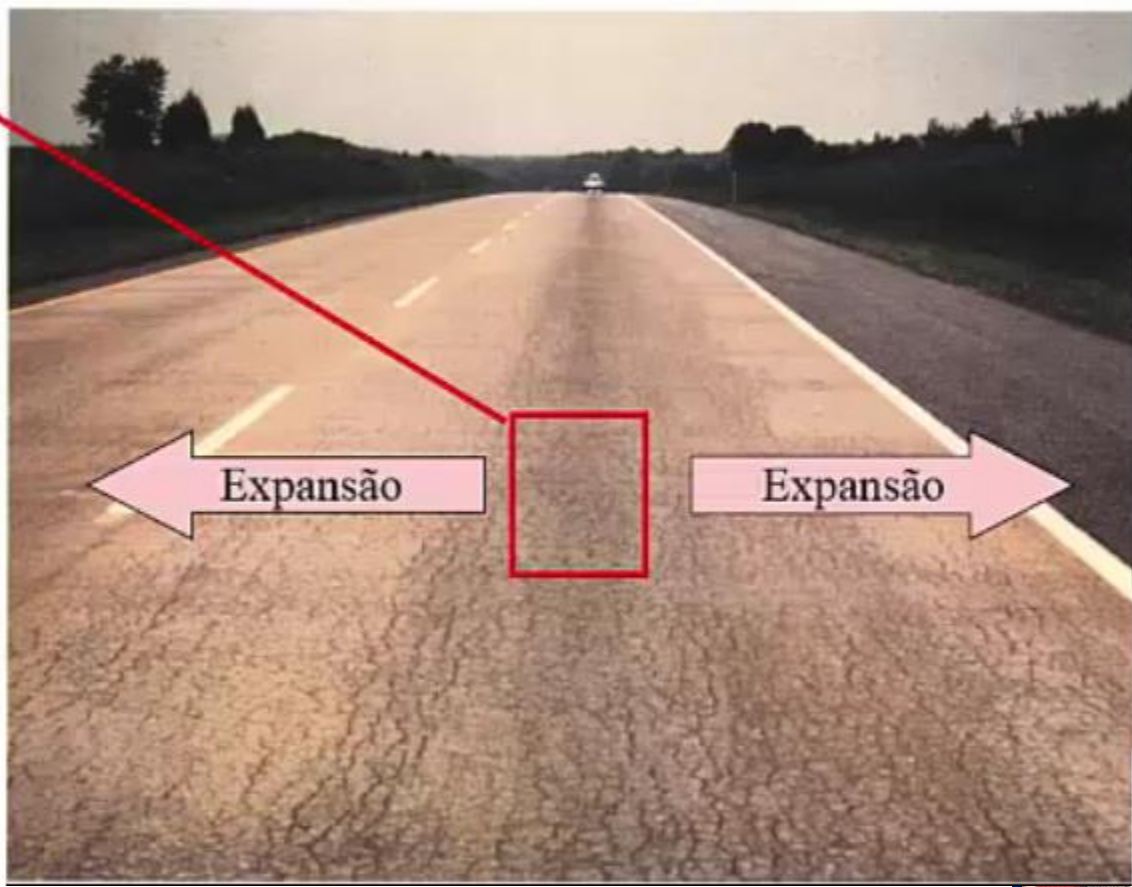
Sintomas visuais da RAA



Lixiviação de gel silico-alcalino



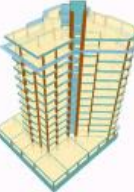
Sintomas visuais da RAA



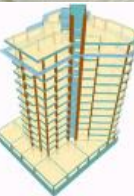
Sintomas visuais da RAA



Pavimento deteriorado
Québec, Canadá



Sintomas visuais da RAA



Sintomas visuais da RAA

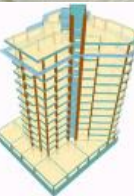


Fissuração provocada pela RAA:
Viga pré-fabricada.



Fissuração em sentido preferencial
provocada pela RAA em um pilar.

Sintomas visuais da RAA



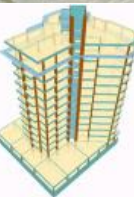
Sintomas visuais da RAA



Sintomas visuais da RAA



Sintomas visuais da RAA



RAA



Prevenção da RAA



Canadá: CSA A23.2-27A

- Coluna vertebral das normas CSA sobre RAA;
- Abordagem por etapas:
 - Determinação da **reatividade potencial de agregados**;
 - Seleção de **medidas preventivas** frente a RAA → abordagem descritiva.

Base para a NBR 15577-2008

© Canadian Standards Association

Test methods and standard practices for concrete

A23.2-27A

Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete

1 Scope

1.1

This Standard Practice provides requirements for the determination of the degree of alkali-silica reactivity of aggregates, the risk level associated with structure size and environment, the level of prevention related to service life requirements, and the determination of the appropriate preventive measures.

1.2

This Standard Practice describes the determination of the potential for deleterious alkali-carbonate reaction and provides advice on appropriate preventive measures.

1.3

This Standard Practice applies to virgin aggregates and does not apply to recycled concrete used as aggregate for new concrete (see Clause 8.6 of Annex B of CSA A23.1 for more information on the potential alkali-reactivity of reclaimed concrete aggregate (RCA)).

1.4

The levels of prevention determined following the procedure described in Clause 6 are applicable for concrete incorporating either portland cement or portland limestone cement.

2 Reference publications

CSA (Canadian Standards Association)

A23.1-09

Concrete materials and methods of concrete construction

A23.2-18A-09

Sampling aggregate for use in concrete

A23.2-18A-09

Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 °C)

A23.2-13A-09

Petrographic examination of aggregates

A23.2-25A-09

Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars

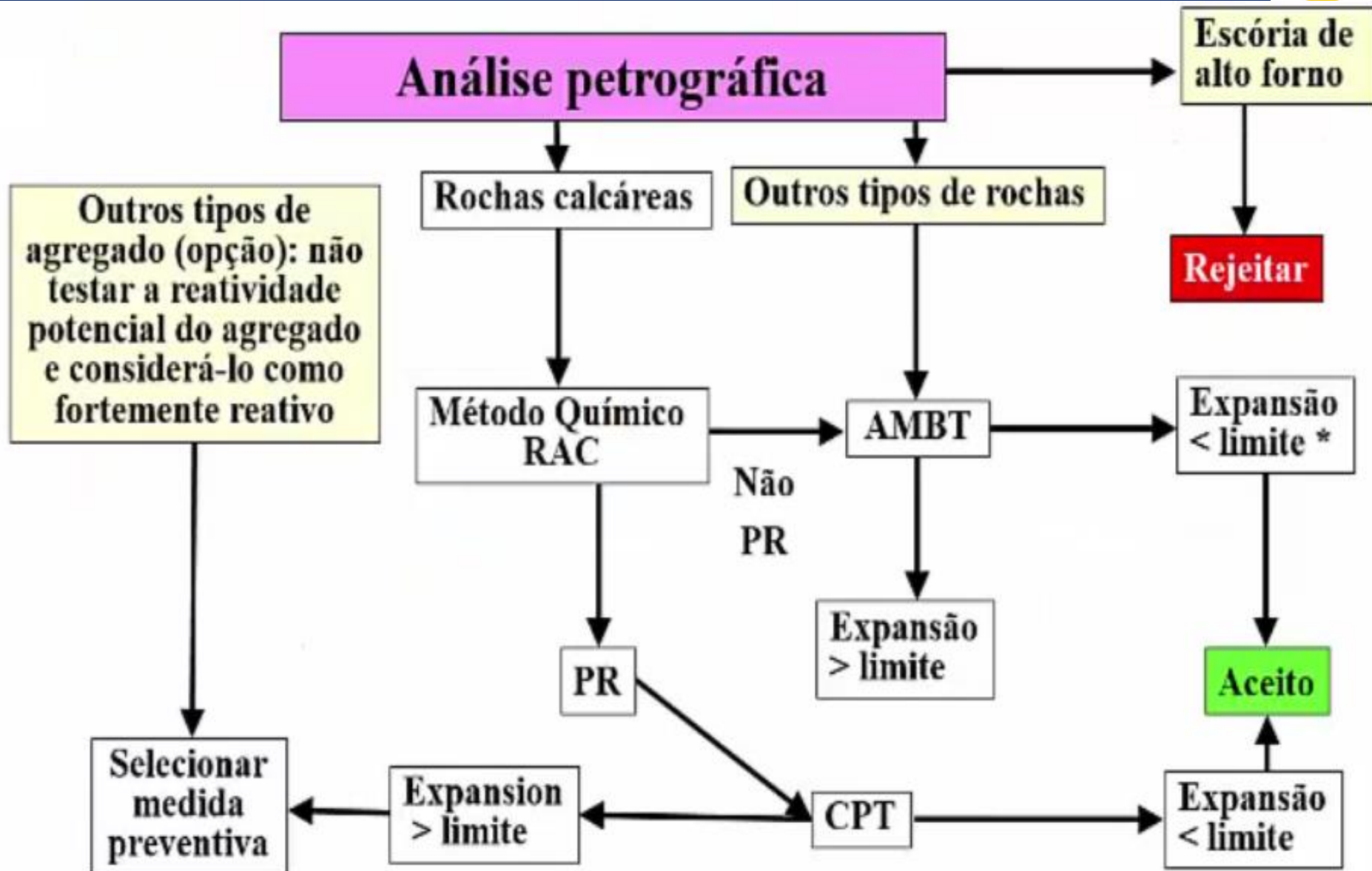
A23.2-25A-09

Determination of potential alkali-carbonate reactivity of quarried carbonate rocks by chemical composition

July 2009

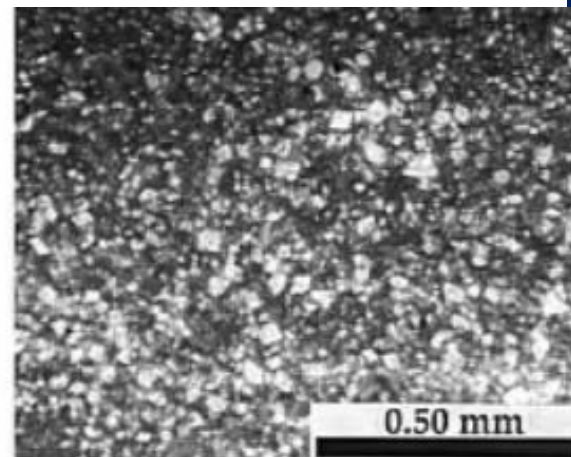
371

Committee Member's Only. Distribution Prohibited.

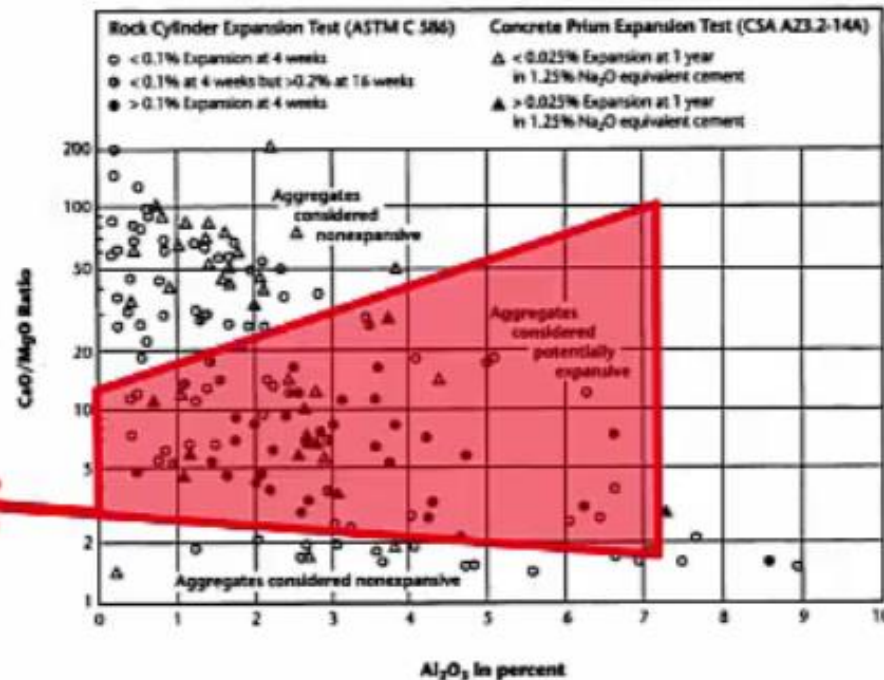


RAA

RAC método químico (CSA A23.2-26A)



- Ensaio rápido: rochas calcáreas;
- Análise química de Al_2O_3 , MgO et CaO ;
- Resultados colocados em um gráfico onde verificam-se zonas de potencial reatividade;
- Em caso positivo, resultado deve ser confirmado pelo CPT!



RAA

Ensaio Acelerado de Barras de Argamassa (AMBT)

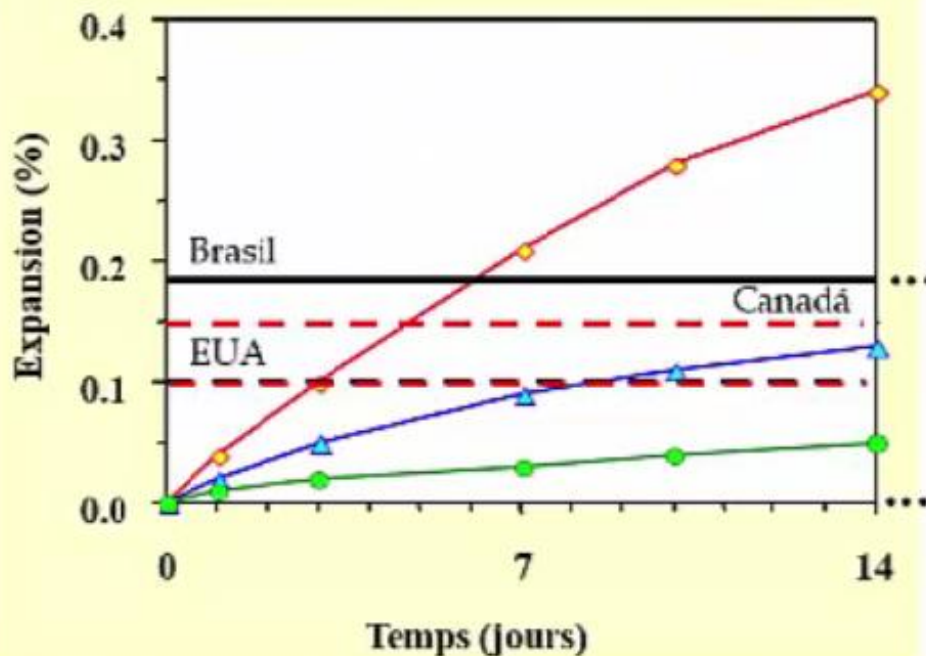
Condições **severas** (1N NaOH @ 80°C por "X" dias):

- Granulometria de areia (- 5mm + 160µm);
- Barras de argamassa: 25 x 25 x 285 mm.



Ensaio Acelerado de Barras de Argamassa (AMBT)

- Avaliação da reatividade potencial;
- Ensaio interessante (rápido), mas possui muitos problemas de falso-positivo e falso-negativo.



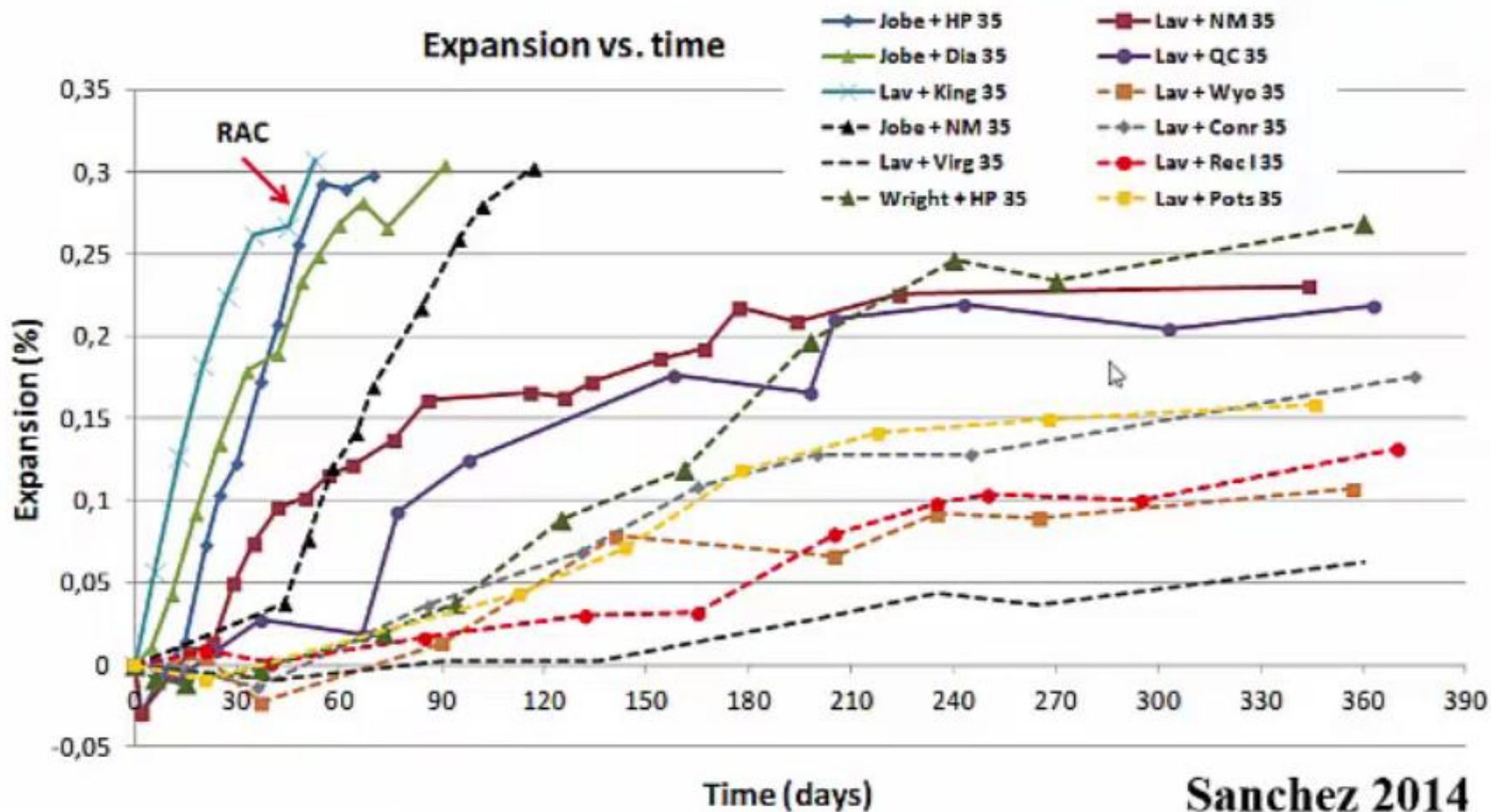
Classificação da expansão

Expansão $> 0,19\%$ aos 30 dias:
agregado potencialmente reativo;

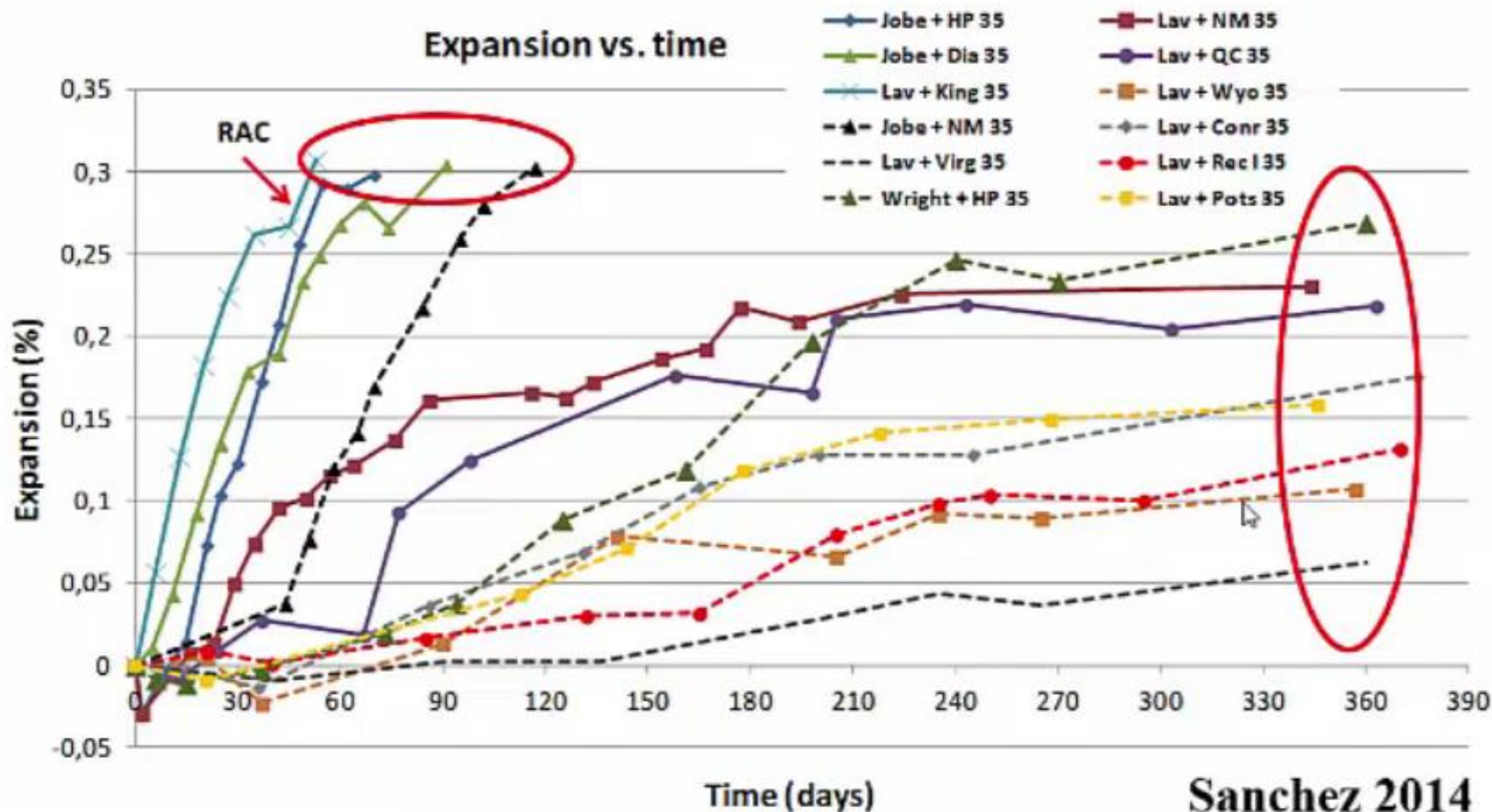
Expansão $< 0,19\%$ aos 30 dias:
agregado não reativo;

RAA

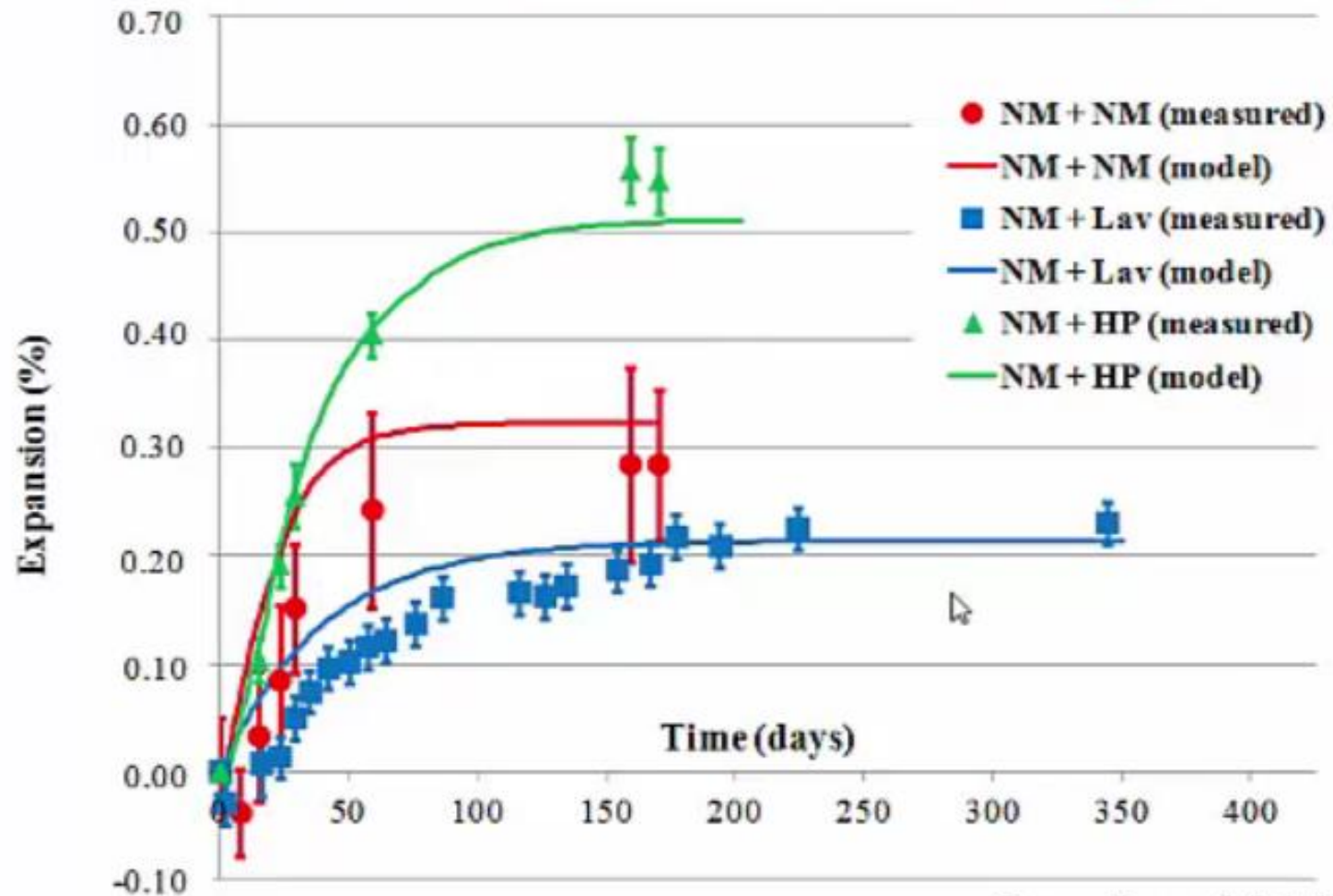
RAS e RAC: cinética da reação



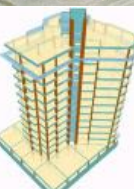
RAS e RAC: cinética da reação



RAS: cinética da reação



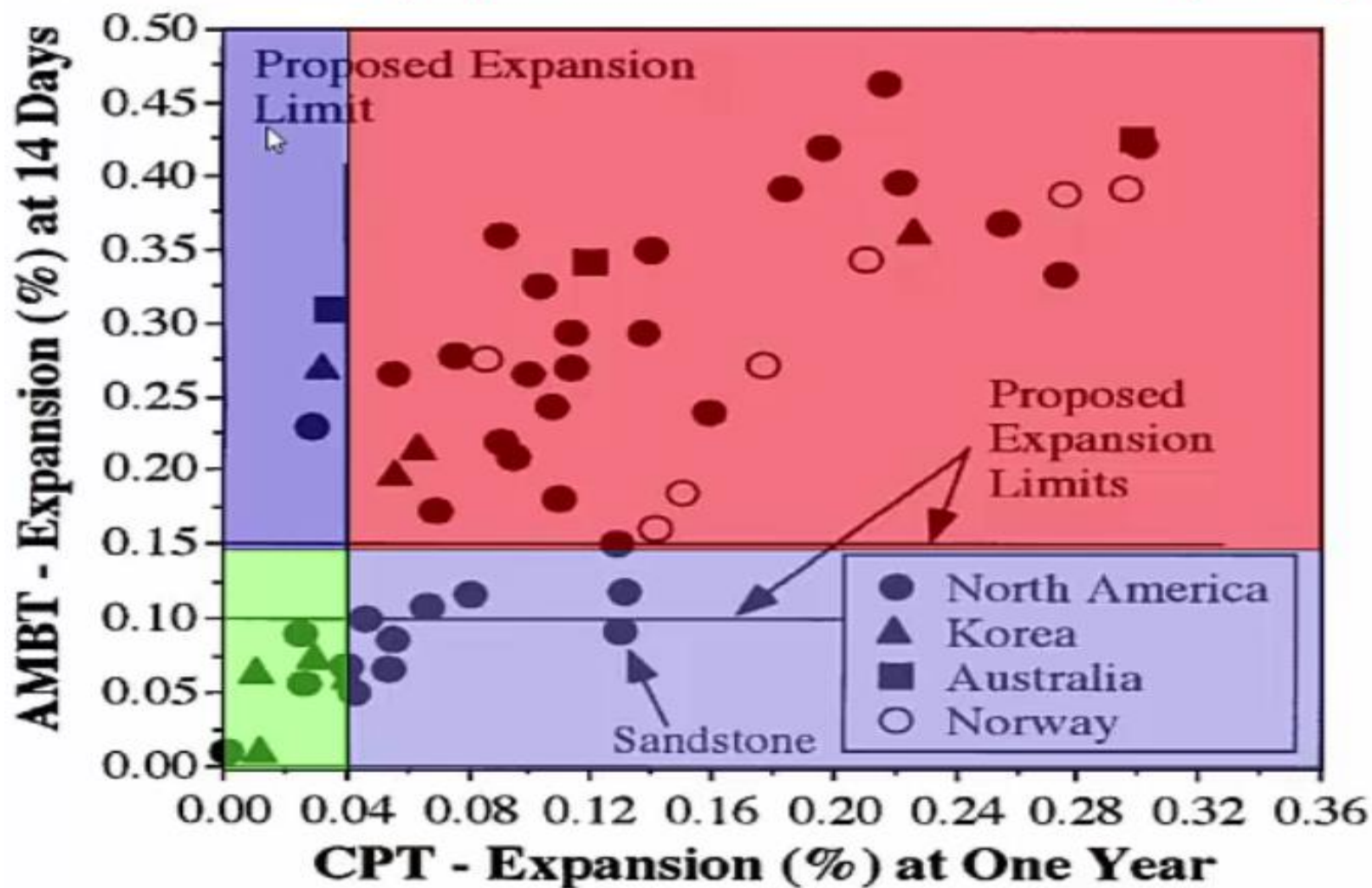
Sanchez 2014





RAA

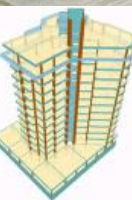
AMBT vs. CPT Reativo (R) vs. não-reactivo (NR)



RAA

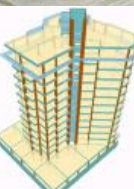
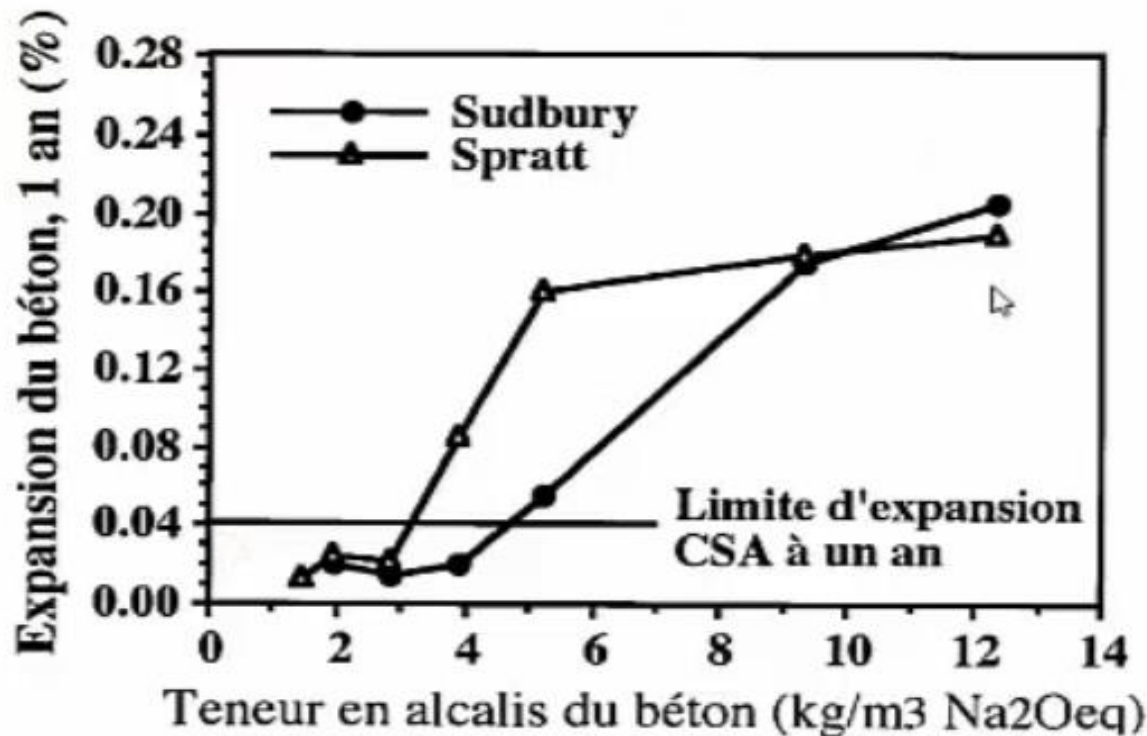
Medidas preventivas a RAA

- Utilizar um agregado não reativo;
- Exploração seletiva e avaliação contínua da reatividade potencial de agregados.



Medidas preventivas a RAA

- Limitar o teor de álcalis do concreto:
 - Cimento com baixo teor de álcalis;
 - Reduzir o consumo de cimento.



Medidas preventivas a RAA

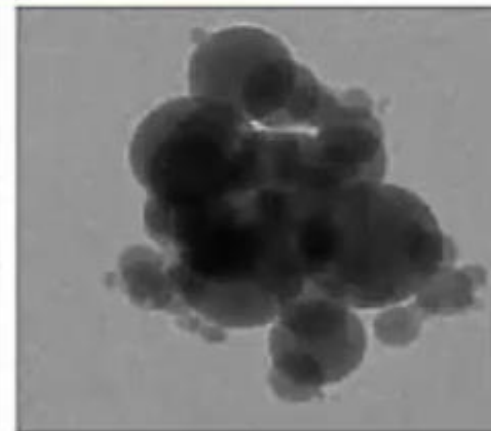
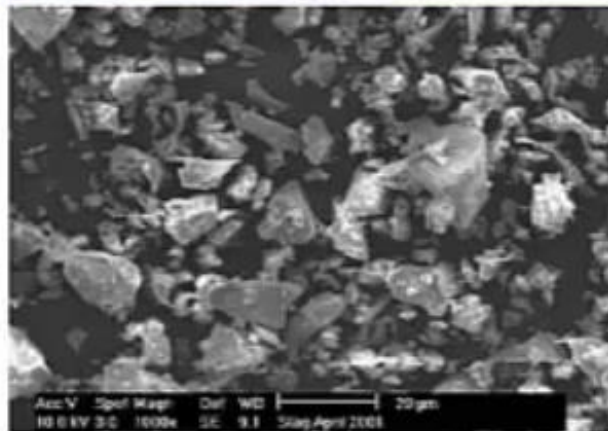
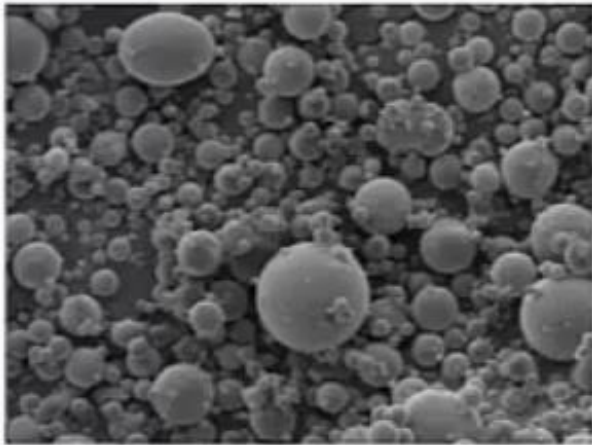
- Canadá: CSA A23.2-27A;
- RAC: melhor solução é a **não utilização de agregados suscetíveis de RAC**;
- RAS: método por etapas → método de análise de risco baseado em:
 - Grau de reatividade dos agregados;
 - Dimensão do elemento considerado e condições ambientais;
 - Vida útil antecipada da estrutura.



RAA

Medidas preventivas a RAA

- Utilizar uma quantidade adequada de adições minerais (cinzas volantes, escória de alto forno, silica ativa, metacaulim, etc.).



RAA

Medidas preventivas a RAA

- Utilizar uma proporção adequada de aditivos com base de lítio.



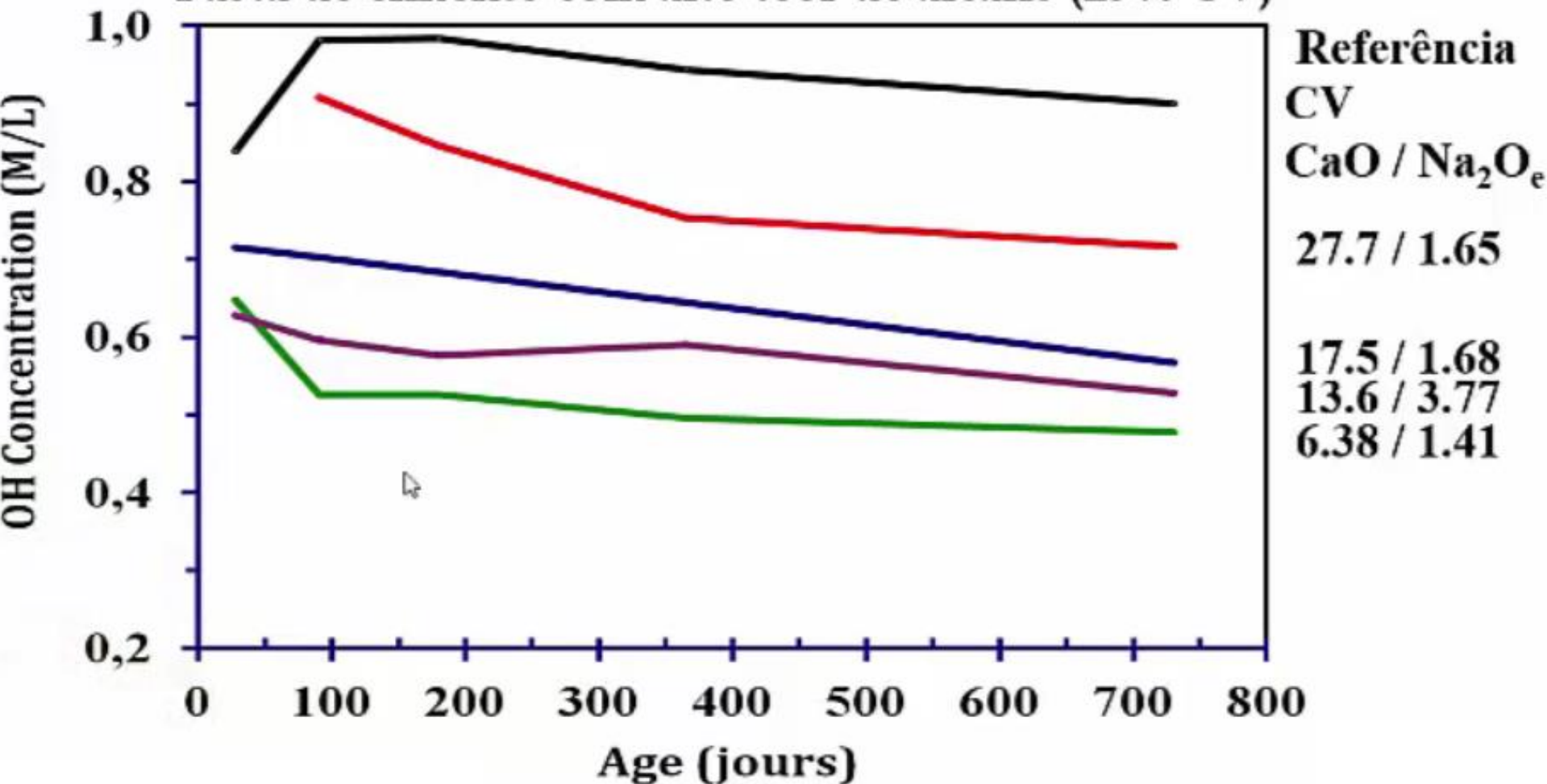
Adições minerais - Mecanismos

- Capacidade da adição mineral (ou da combinação de adições minerais) de reduzir o pH da solução intersticial sob o valor mínimo necessário para o desenvolvimento da RAA;
- Consumo da portlandita (Ca(OH)_2) $\rightarrow$ fonte de íons OH^- da solução intersticial;
- Redução da permeabilidade do sistema $\rightarrow$ reduz o ingresso de umidade necessário para a RAA.



Efeito da utilização de CV

Pasta de cimento com alto teor de álcalis (25% CV)



Performance em serviço da CV



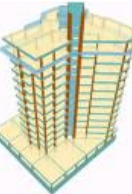
30% CV (Classe F)

Barragem Lower Notch

RAA



Pavimento (New Mexico, USA)
www.google.maps.com



Performance em serviço da CV

Pavimento
(New Mexico, USA)



CV classe C - $\geq 20\%$ CaO;
CV classe F - $< 20\%$ CaO.

CV Classe F



CSA A23.2-28A

- Ensaios de laboratório: demonstrar a eficiência das adições minerais e dos aditivos a base de lítio para a prevenção da RAA.



© Canadian Standards Association

Test methods and standard practices for concrete

A23.2-28A

Standard practice for laboratory testing to demonstrate the effectiveness of supplementary cementing materials and lithium-based admixtures to prevent alkali-silica reaction in concrete

1 Scope

This Standard Practice describes the procedures to be followed to demonstrate the effectiveness of supplementary cementing materials and lithium-based admixtures or combination thereof, in preventing excessive expansion caused by alkali-silica reaction. The supplementary cementing materials are as defined in CSA A1001.

2 Reference publications

CSA (Canadian Standards Association)

A23.1-08

Concrete materials and methods of concrete construction

A23.2-78A-09

Sampling aggregate for use in concrete

A23.2-14A-09

Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38°C)

A23.2-25A-09

Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars

A23.2-27A-09

Standard practice to identify degree of alkali reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete

A1001-08

Cementitious materials for use in concrete

A1004-08

Test methods for cementitious materials for use in concrete and masonry

ASTM International (American Society for Testing and Materials)

C 454/C 454M-04

Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete

3 Definitions

In addition to the definitions in Clause 3 of CSA A23.1, the definitions of CSA A1001 apply in this Standard Practice.

July 2009

185

Committee Member's Copy

CEA

Distribution Prohibited

Ensaio de prismas de concreto (CPT)

- Consumo de materiais cimentícios 420 kg/m^3 ;
- Diferentes % de substituição (massa) do cimento por AM;
- Teor de álcalis : $\uparrow 1.25\% \text{ Na}_2\text{Oeq}$;

Agregado miúdo: reativo ou não;



60% AG : 40% AM

Agregado graúdo: reativo ou não
(distribuição equivalente em massa entre as frações: -20+14, -14+10, -10+5 mm).

A/C: 0.35 – 0.42

(Possibilidade de utilização de superplastificante)



AM $\rightarrow$ cinza volante, escória, sílica ativa, etc.



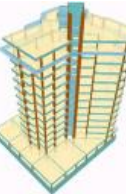
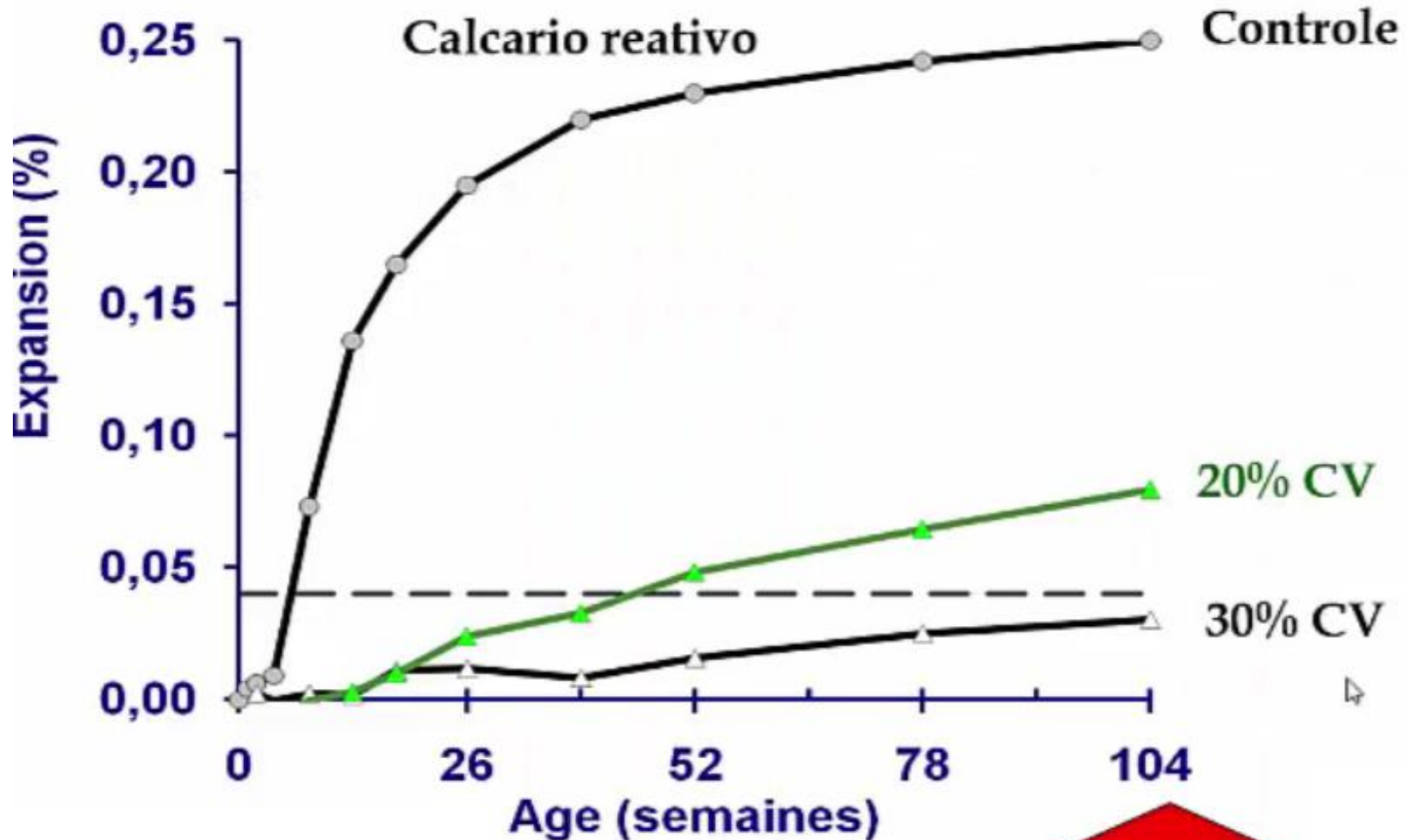
Ensaio de prismas de concreto (CPT)

- Concreto: 0.04% à 2 anos;
- 3 prismas (75 x 75 x 300 - 400 mm).

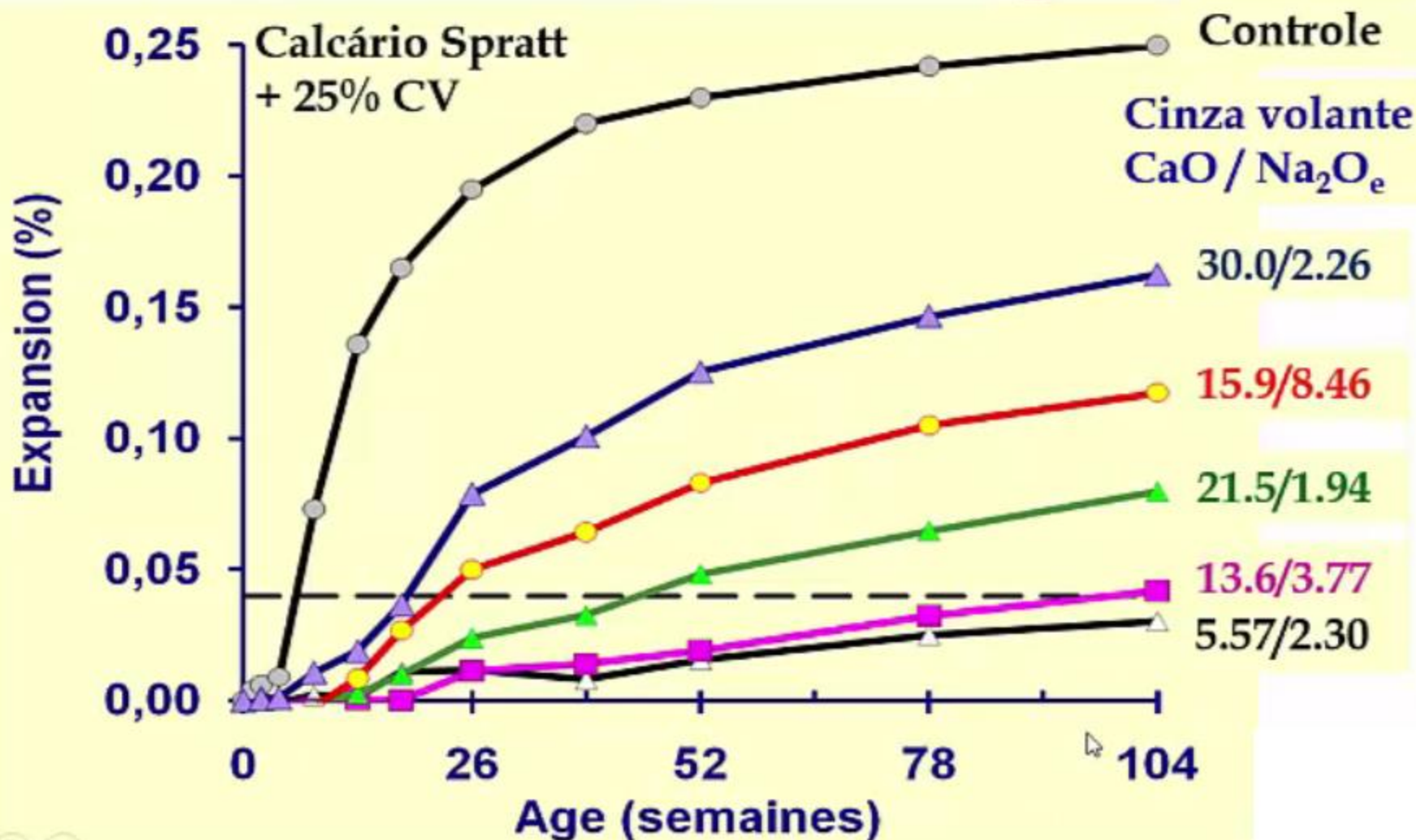


RAA

Efeito da CV na expansão



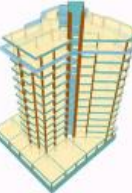
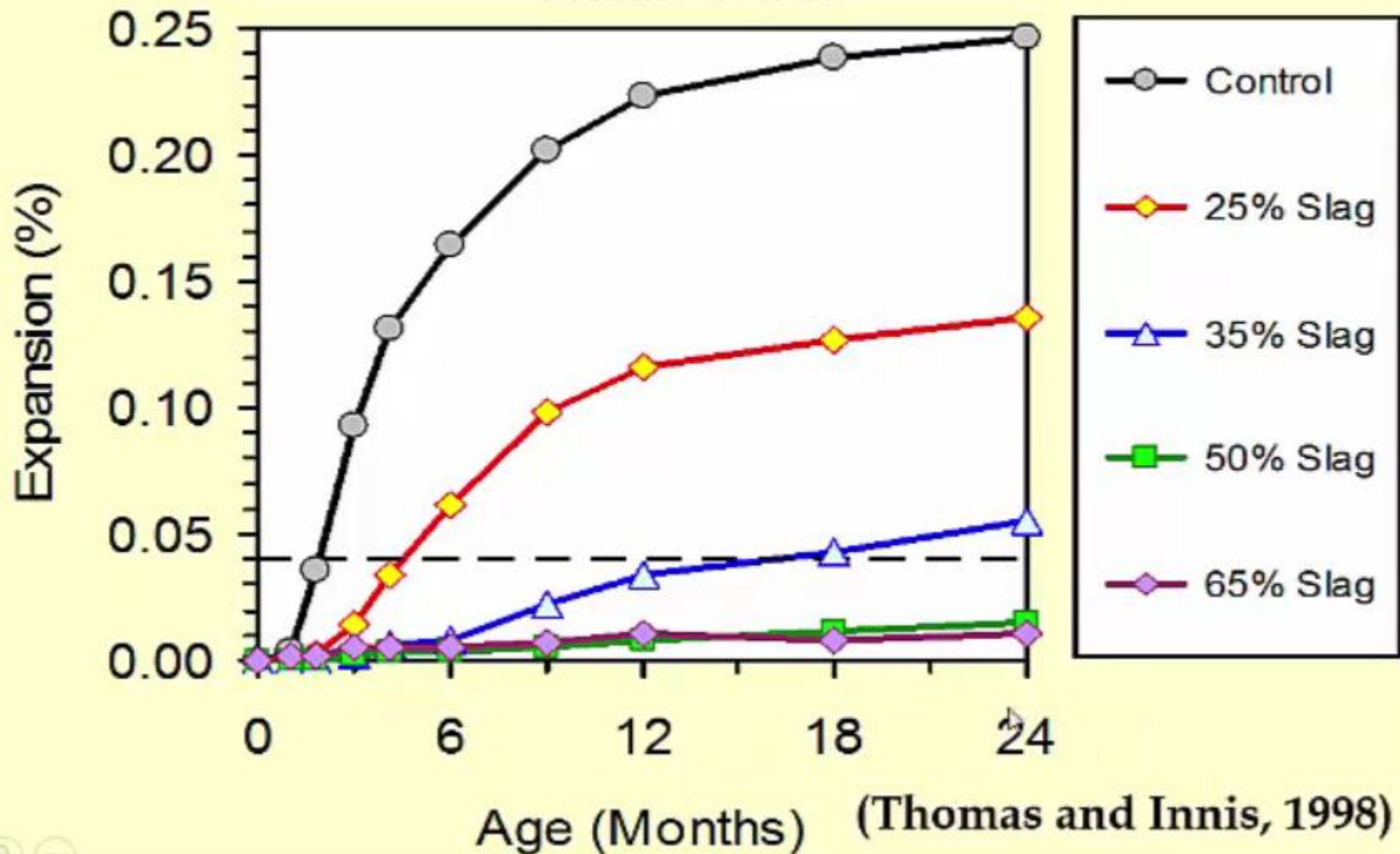
Efeito da cinza volante na expansão



RAA

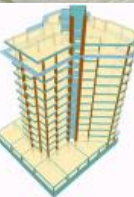
Escória de alto forno e RAA

CSA A23.2-14A



Prevenção química da RAA

- Primeiros estudos sobre a utilização de produtos químicos para combater a RAA → efetuadas no início dos anos 50.

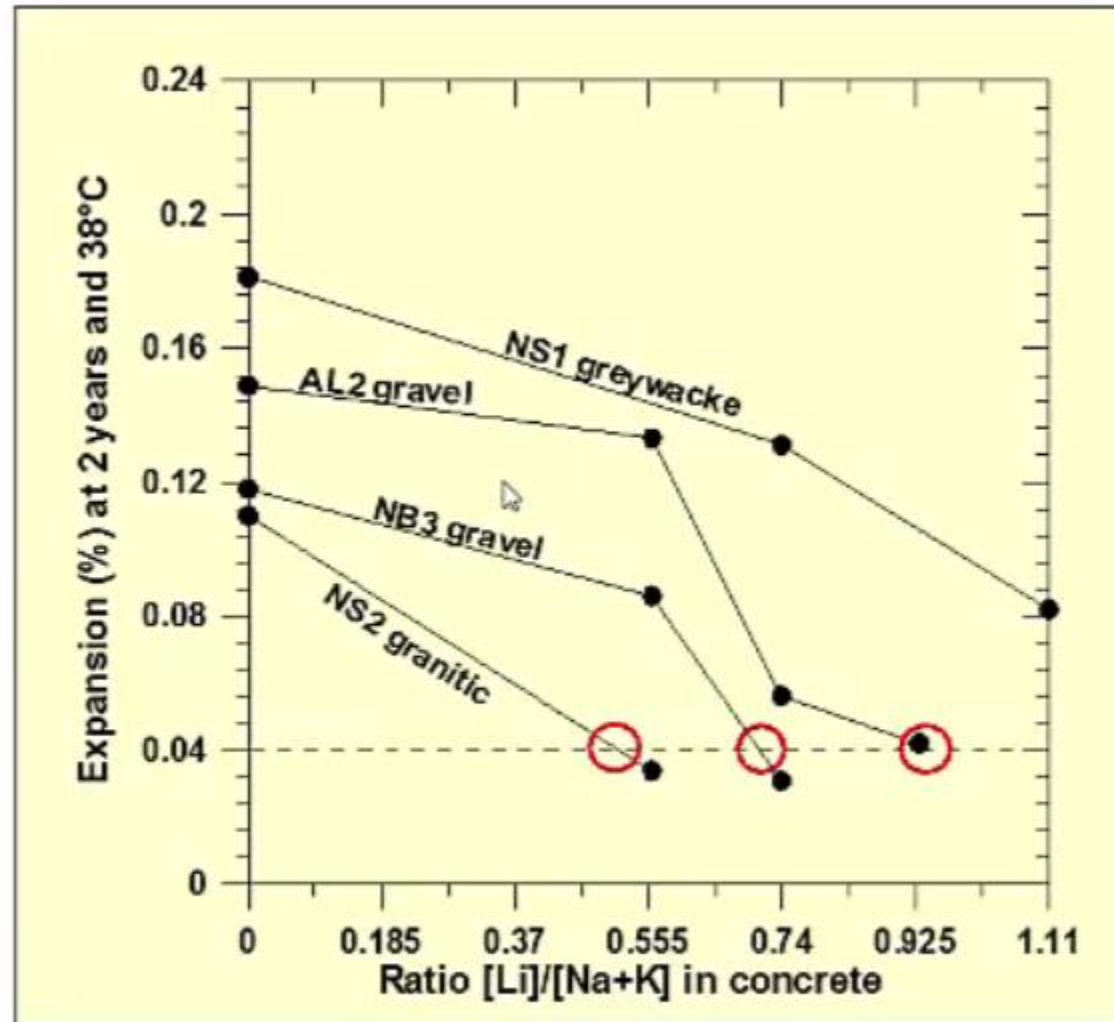


Prevenção química da RAA

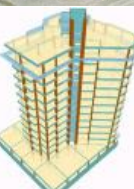
- McCoy et Caldwell (1951) avaliaram mais de 100 produtos para determinar a eficiência da mitigação da RAA: os produtos a base de lítio, especialmente o LiF , Li_2CO_3 , LiCl et LiNO_3 , se mostraram muito eficientes;
- Dosagem recomendada: 4.6 litros de LiNO_3 líquido (30% LiNO_3) para cada kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ em uma mistura de concreto; isso corresponde a uma razão molar $[\text{Li}] / [\text{Na}+\text{K}]$ de 0.74;
- Dosagem necessária depende da reatividade do agregado.



Ensaio de CPT (38°C)



(Tremblay et al. 2004)



RAA



Reparo e gestão de
estruturas afetadas
pela RAA



Como conviver com o problema?

Barragens



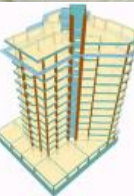
Como conviver com o problema?

Hidrofugantes

A



B



Como conviver com o problema?

Compósito: fibras de carbono

Coatings



RAA



Outras REI importantes



Etringita tardia (DEF)

- Etringita se forma nas primeiras idades da hidratação do cimento (pega);

Condições necessárias para provocar a DEF:

Tratamento térmico ($> 65-70^{\circ}\text{C}$) + $\uparrow$ umidade relativa + $\downarrow$ presença de álcalis

- Substituída por monosulfoaluminato (Afm);
- Expansão do material $\rightarrow$ re-aparição de etringita;
- Diminuição do teor de Afm (DRX).



Etringita tardia (DEF)

Histórico :

- França → fim dos anos 80;
- Fim dos anos 90 – início dos anos 2000: constatação da real possibilidade de DEF em estruturas pré-fabricadas e massivas (barragens, blocos de fundação, pontes, viadutos, etc.)
- Como evitar a DEF?
- Como fazer a gestão do problema?



Etringita tardia (DEF)

Efeitos na escala do material :

- Expansão;
- Fissuração;
- Perdas de propriedades mecânicas.

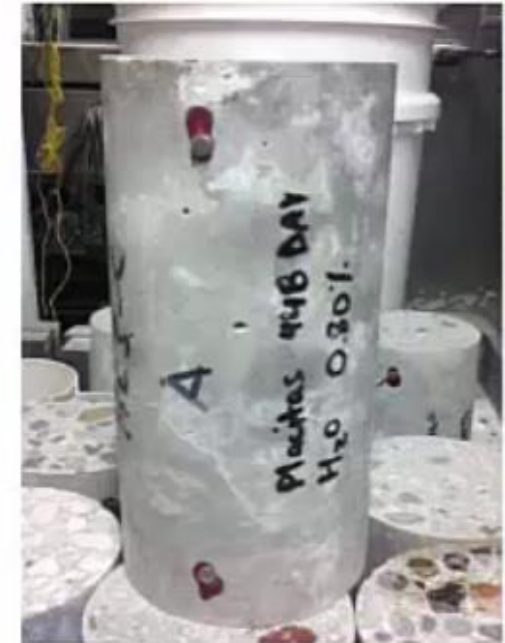
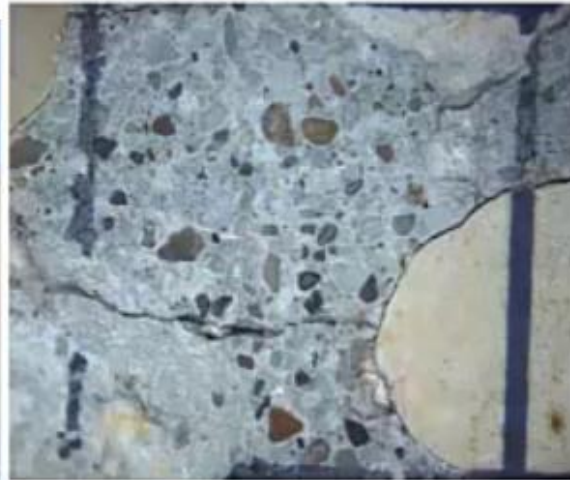
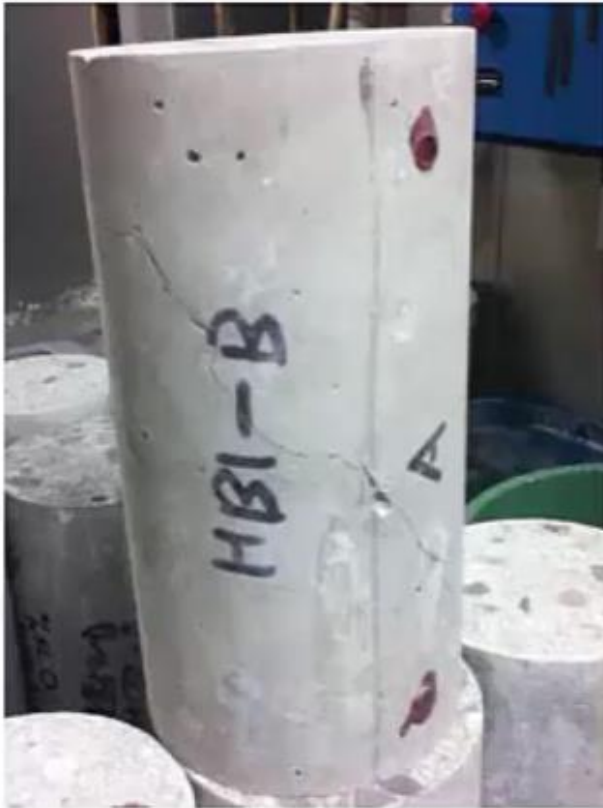


Efeitos estruturais :

- Deterioração da performance em serviço;
- Possíveis riscos de integridade estrutural;
- Agravamento de problemas de durabilidade interligados (fissuração, RAA, penetração de agentes agressivos, etc.)



Etringita tardia (DEF)



Agregados contendo óxido de ferro

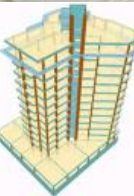


Trois Rivières - Québec, Canadá





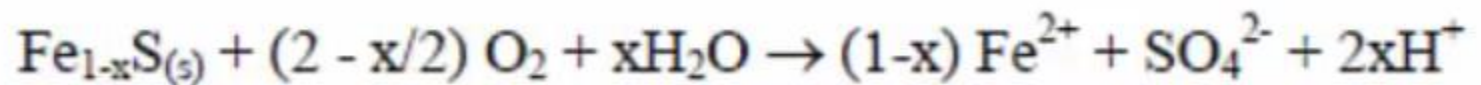
Trois Rivières - Québec, Canadá



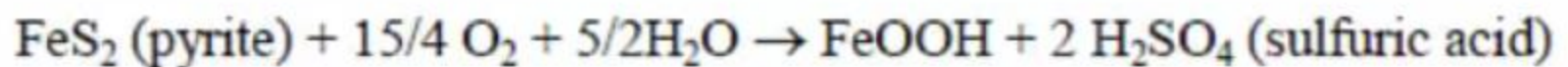
Trois Rivières – Québec, Canadá



Pirrotita



Pirita

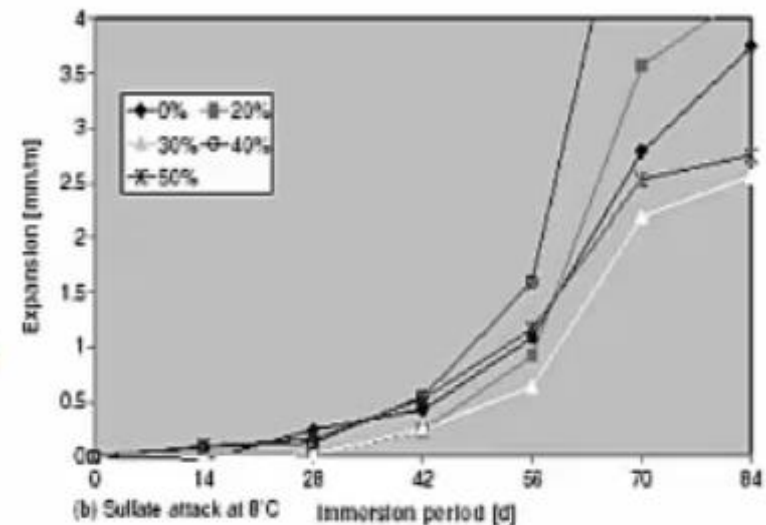
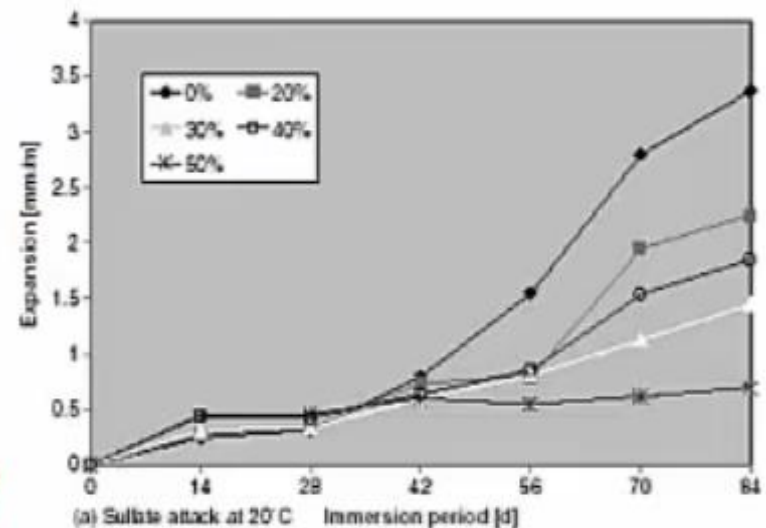


Agregados contendo óxido de ferro

Formação de taumasita

- Ataque por sulfatos em presença de SiO_2 e CO_2 ;
- Baixa temperatura ($\approx 50^\circ\text{C}$);
- Fonte de sulfatos externas ou internas;
- Fonte de SiO_2 : C-S-H;
- Precedido e ou acompanhado de formação de etringita;
- Dissolução de C-S-H.





- 20°C : formação de Aft et gipsita
- 8°C : formação de taumasita

RAA



**Avaliação da
deterioração
proveniente da RAA**



Diagnóstico da RAA - Quantificação da deterioração

- Desafio → correlacionar « deterioração » da RAA:
 - Expansão obtida pelos elementos de concreto;
 - Perdas de propriedade mecânicas/durabilidade de elementos afetados;
 - Potencial de deterioração futuro.

Expansão ou
deterioração ?

Perda de propriedades
mecânicas e
durabilidade ?

Potencial de
deterioração futuro ?



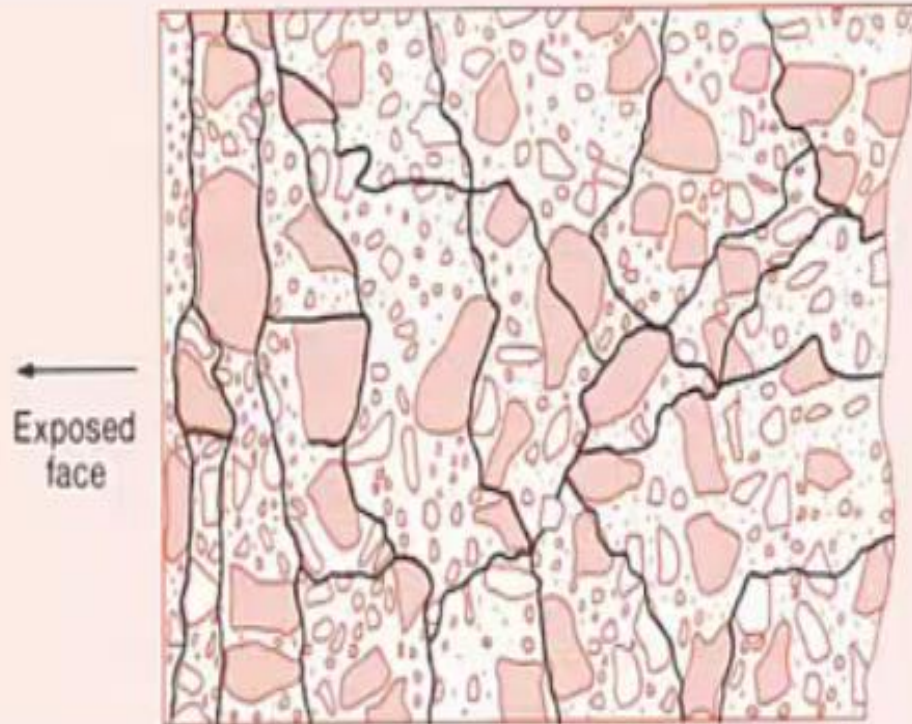
ASR "signatures"



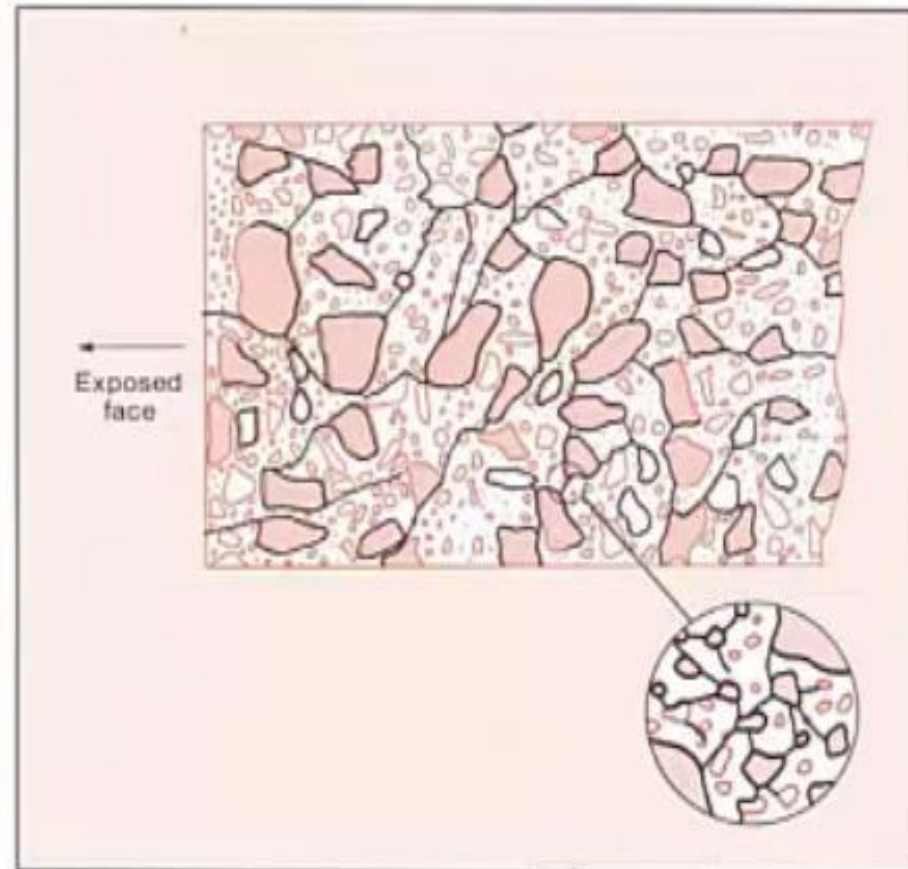
(Échangeur Robert-Bourassa - Charest, Québec, Canada)

Padrão de fissuração

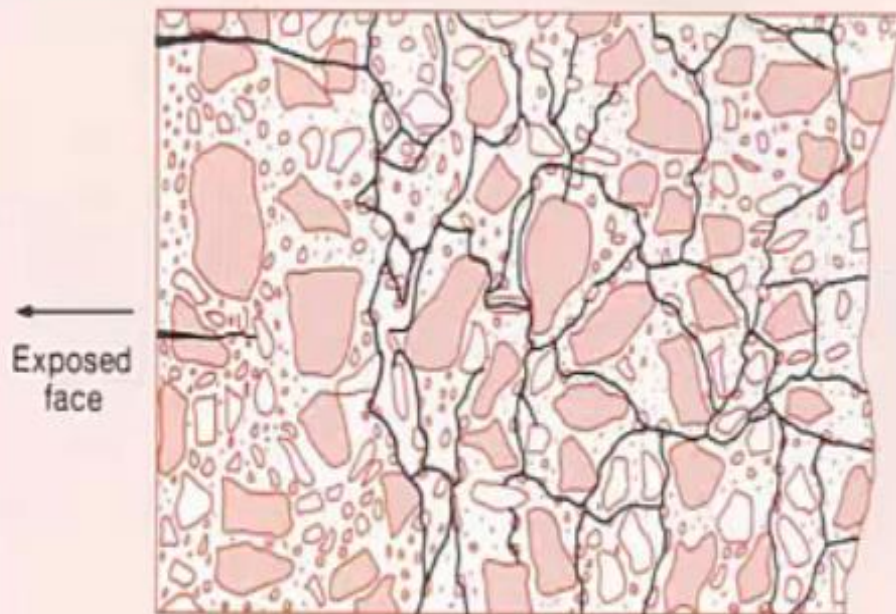
DEF



Gelo-degelo

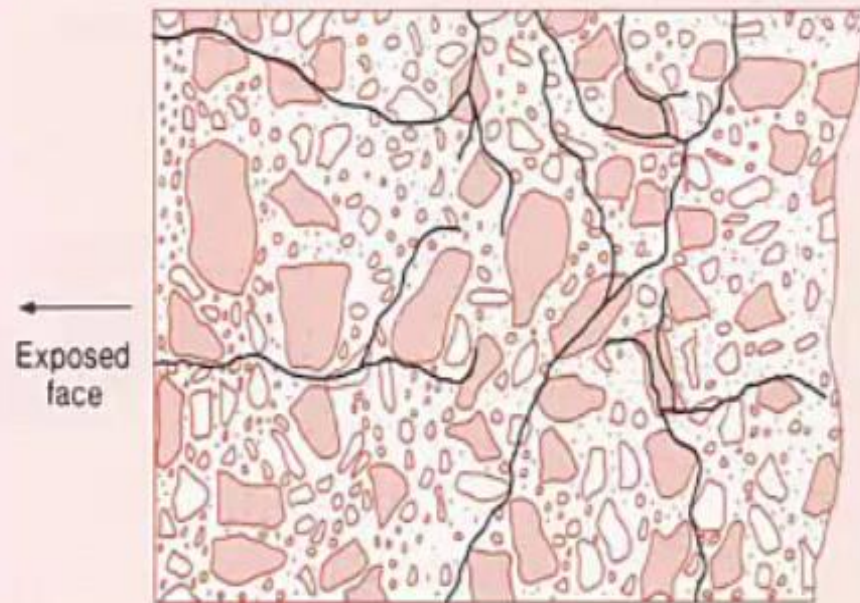


Padrão de fissuração



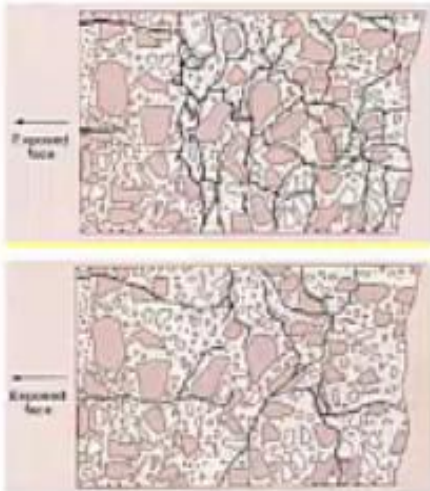
AAR: areia

AAR: agregado graúdo

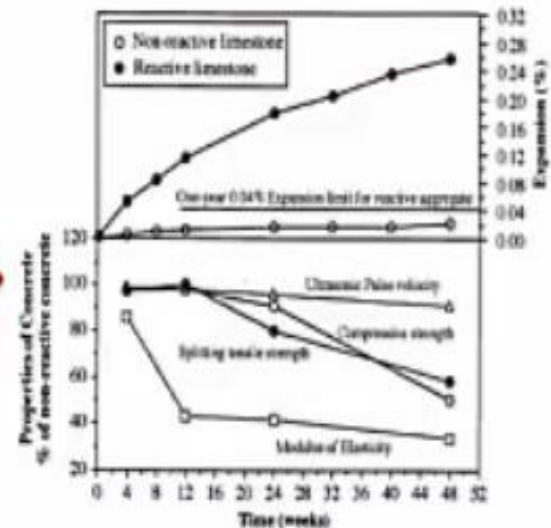


Diagnóstico da RAA - Quantificação da deterioração

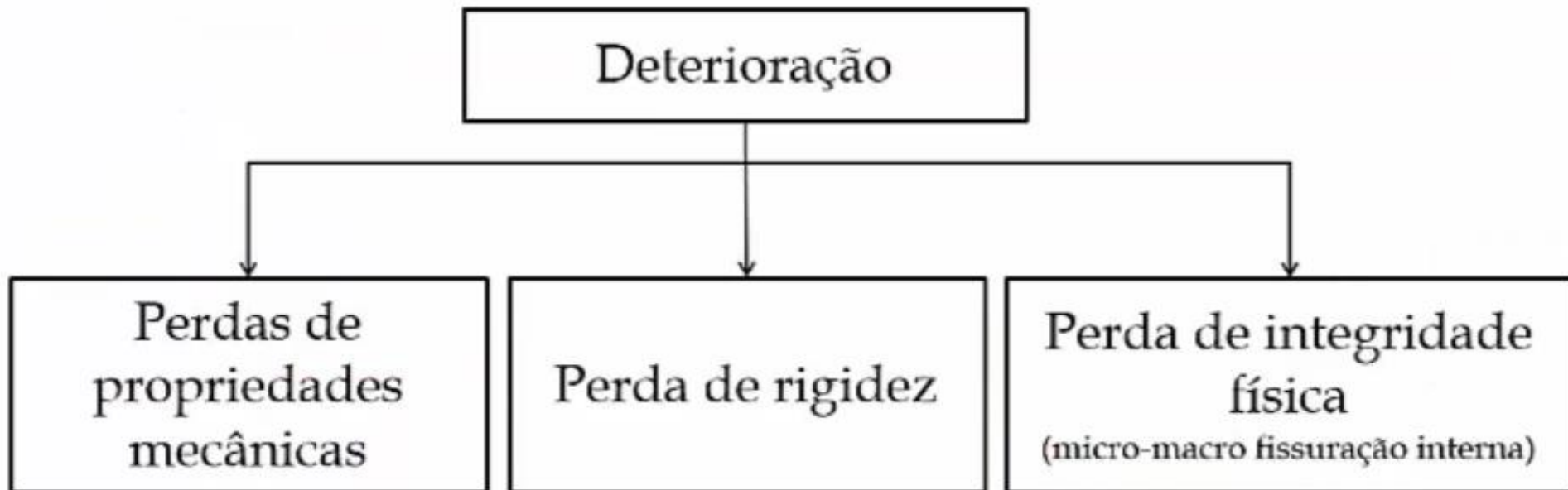
- Compreensão da influência do padrão de fissuração da RAA → perdas de propriedades mecânicas/integridade física do material considerado.



Os dois ?

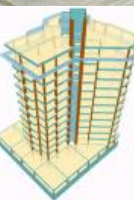
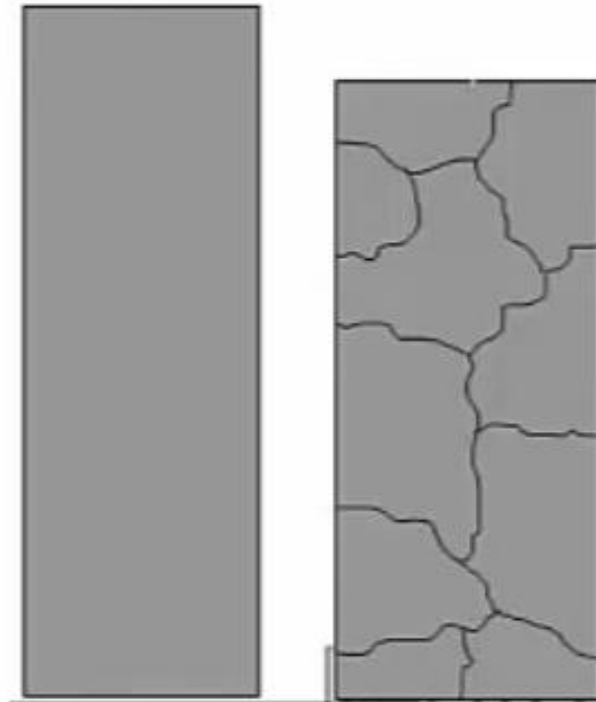


Deterioração

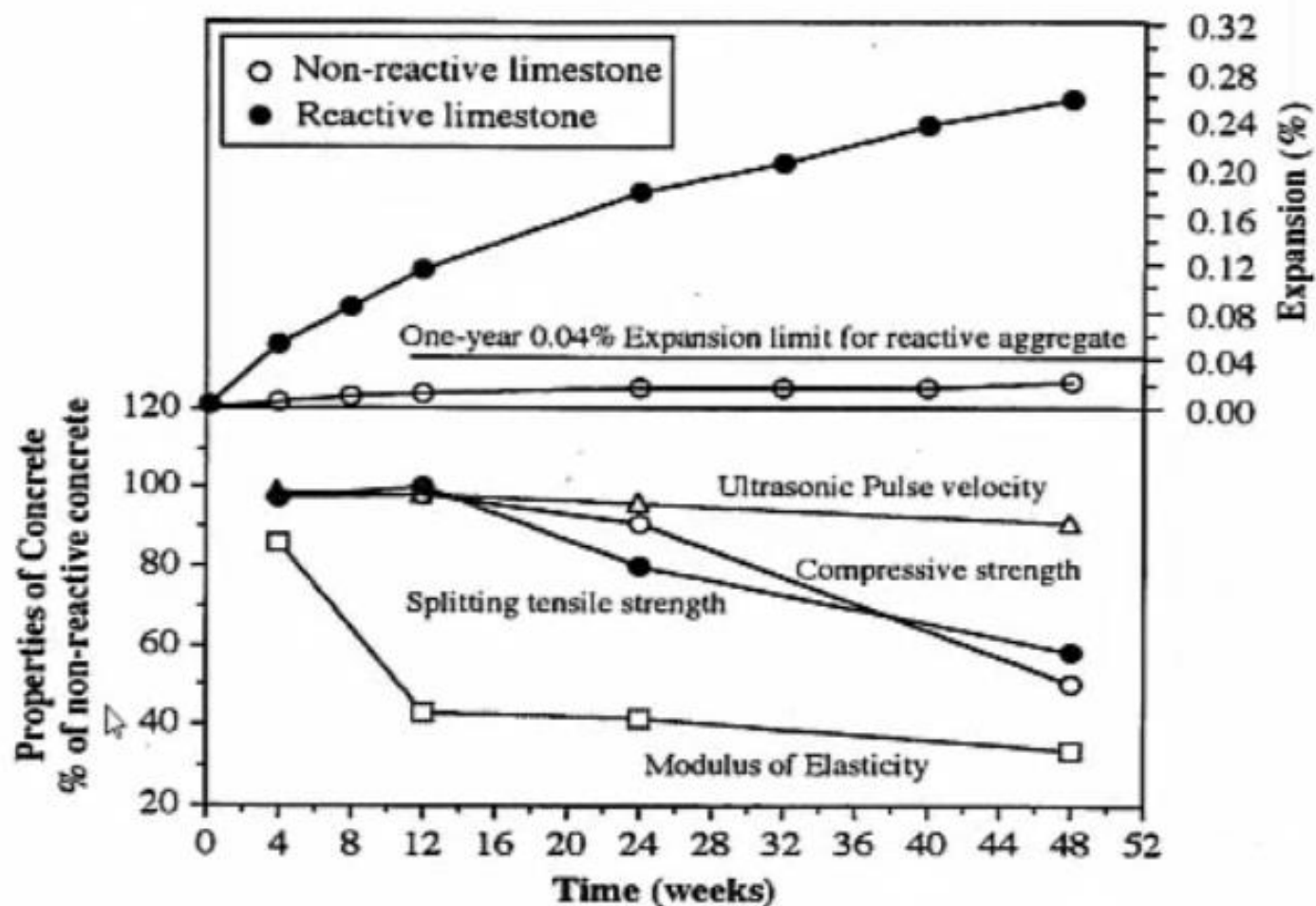


Efeito da RAA nas propriedades do concreto

- Redução da resistência (sobretudo em tração);
- Módulo de elasticidade mais baixo;
- Fluência elevada!

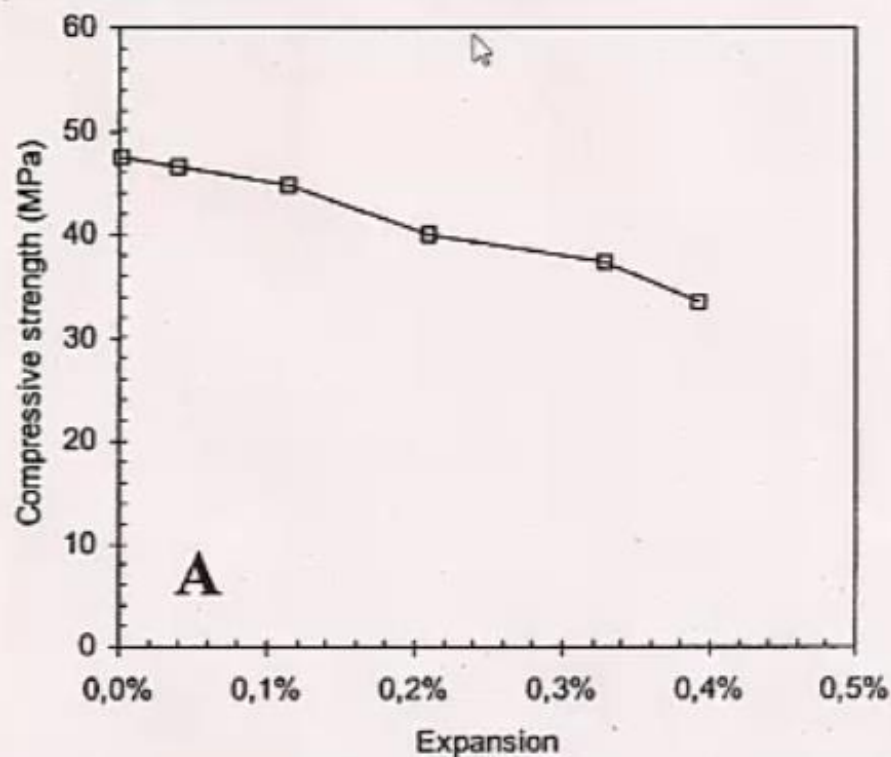


Efeito da RAA nas propriedades do concreto

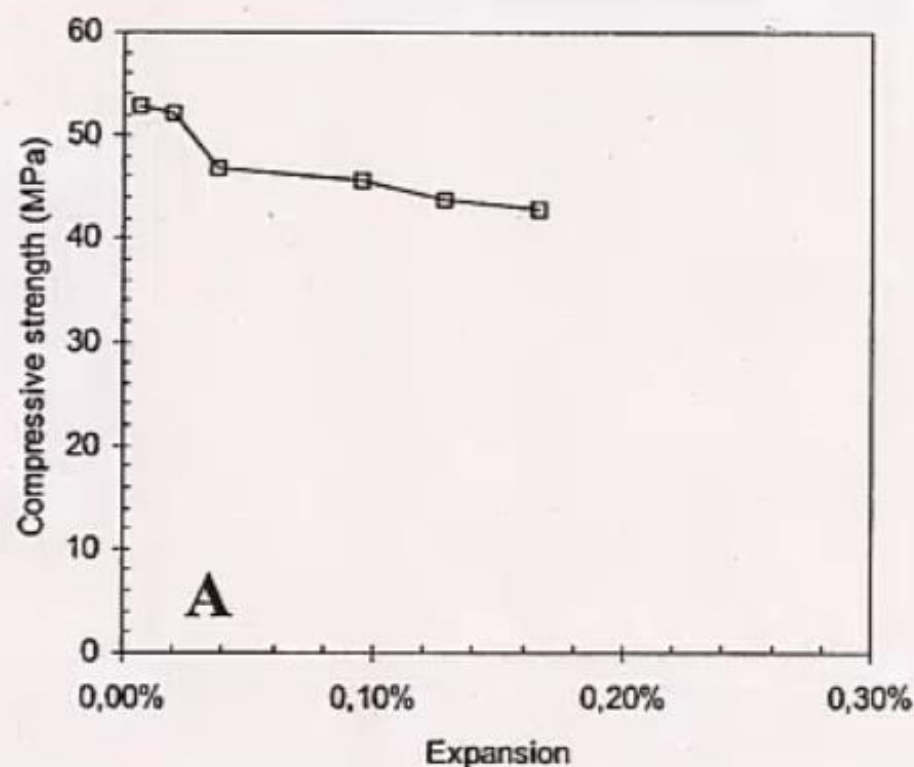


RAA

RAA: resistência à compressão

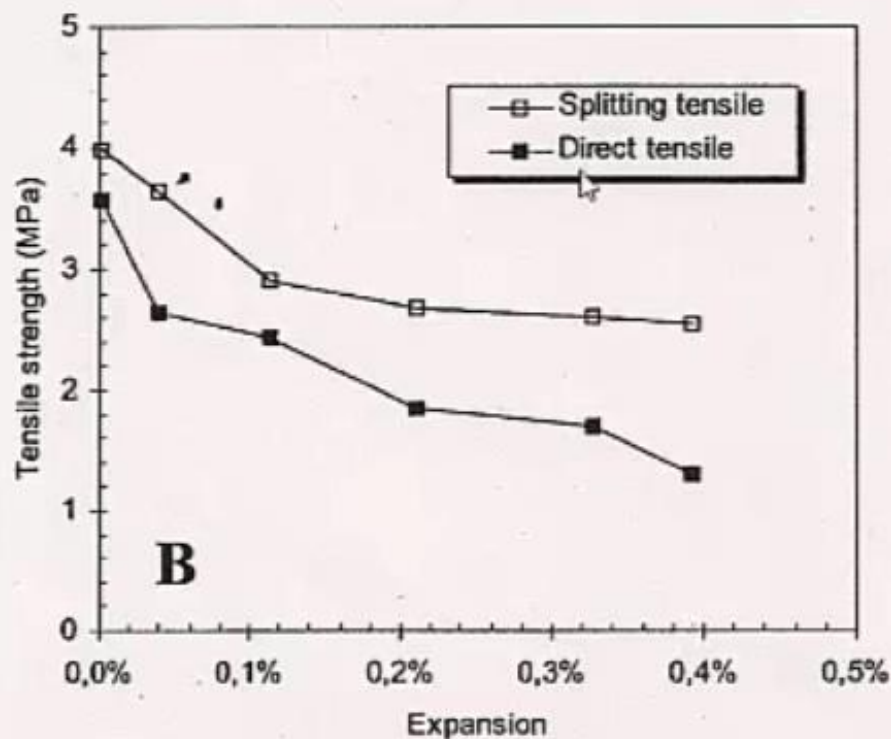


Areia reativa do Texas

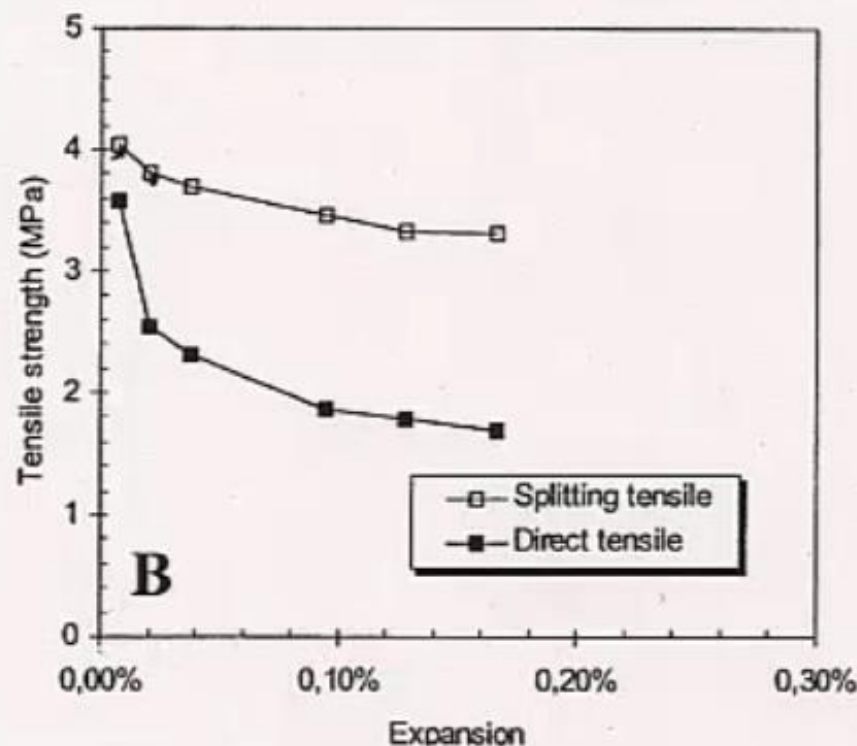


Calcário reativo do Québec

Resistência à tração



Areia reativa do Texas

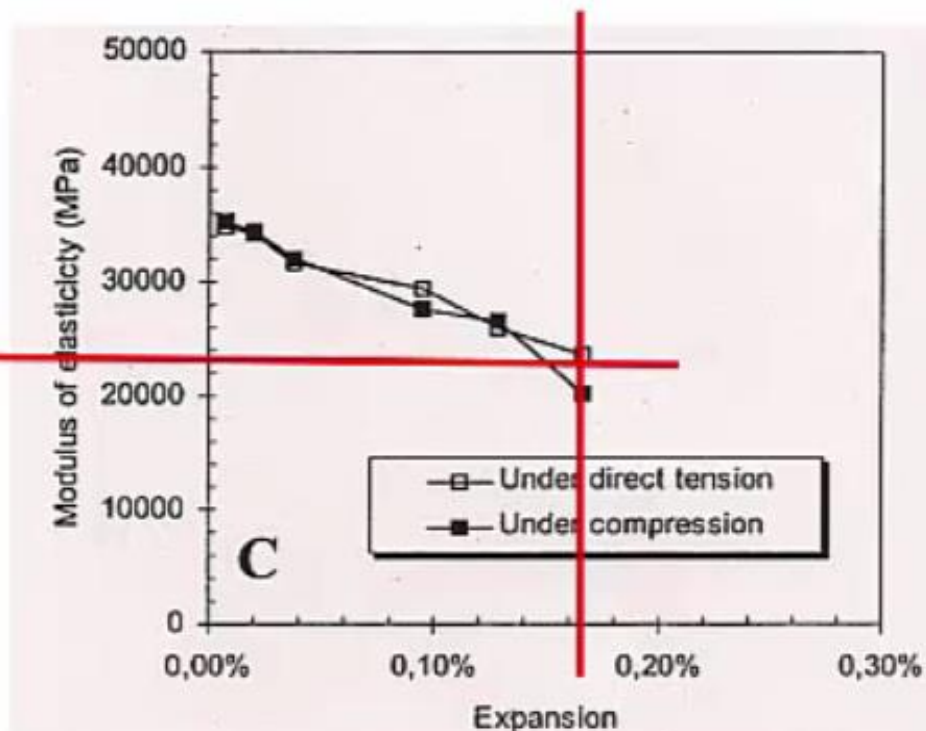
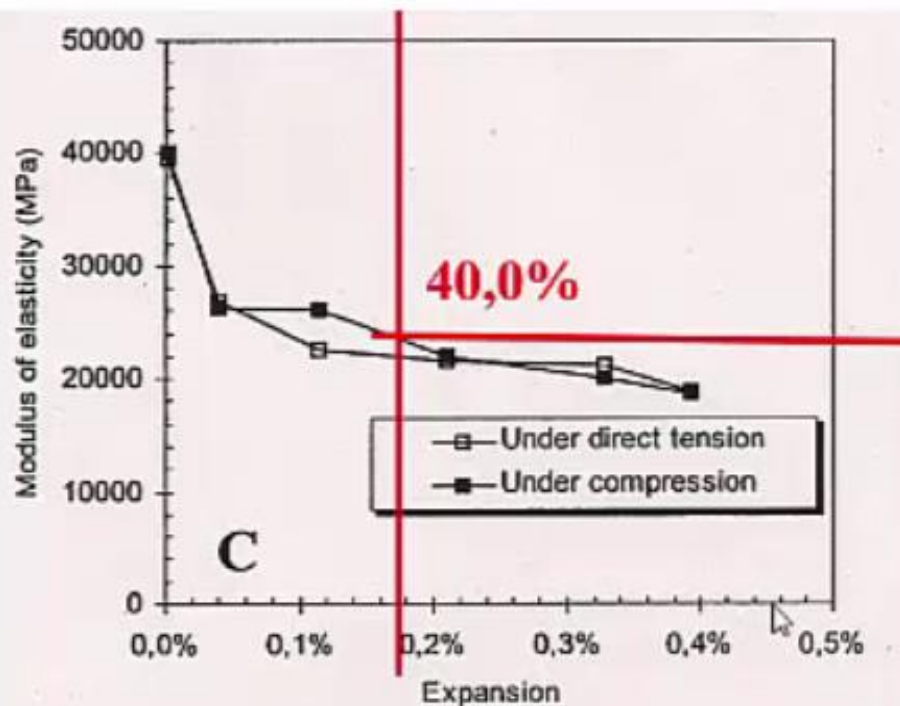


Calcário reativo do Québec

Travaux PhD Nizar Smaoui – Université Laval (1999-2003)



Módulo de elasticidade



Areia reativa do Texas

Calcário reativo do Québec

Resultados variáveis na literatura!

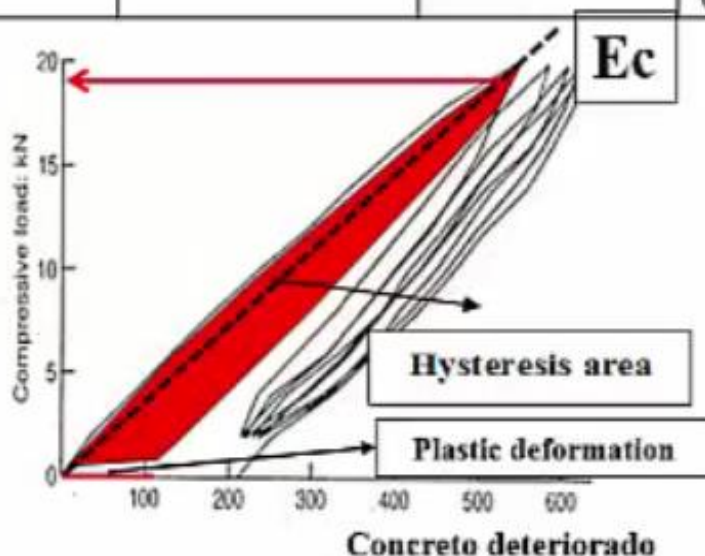
Stiffness Damage Test (SDT)

- Método cíclico em compressão → deterioração proveniente da RAA;

SDT	N. de ciclos	Carga	Fatores			Materiais
			Área de histerese	Deformação plástica	Módulo de elasticidade	
Crisp et coll.	5	5.5 MPa	Ciclos 2-5	-	Ciclos 2-5	Concretos em serviço
Smaoui et coll.	5	10 MPa	Ciclo 1	Ciclos 1-5	-	Concreto CPT (420 kg/m ³ ; 0.42)



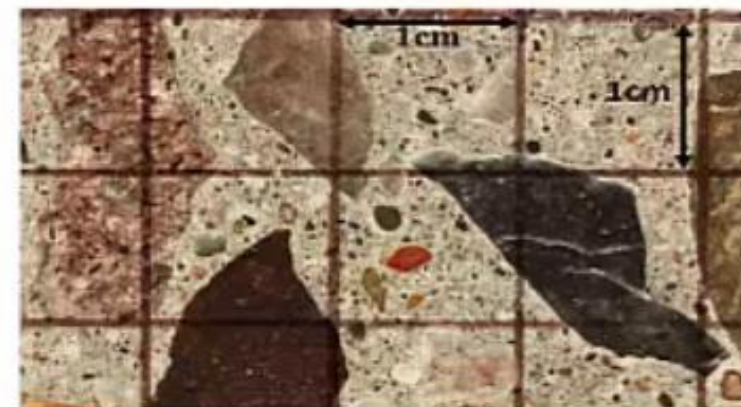
Stiffness Damage Test (SDT)



(Crisp et coll., 1989, 1993).

Damage Rating Index (DRI)

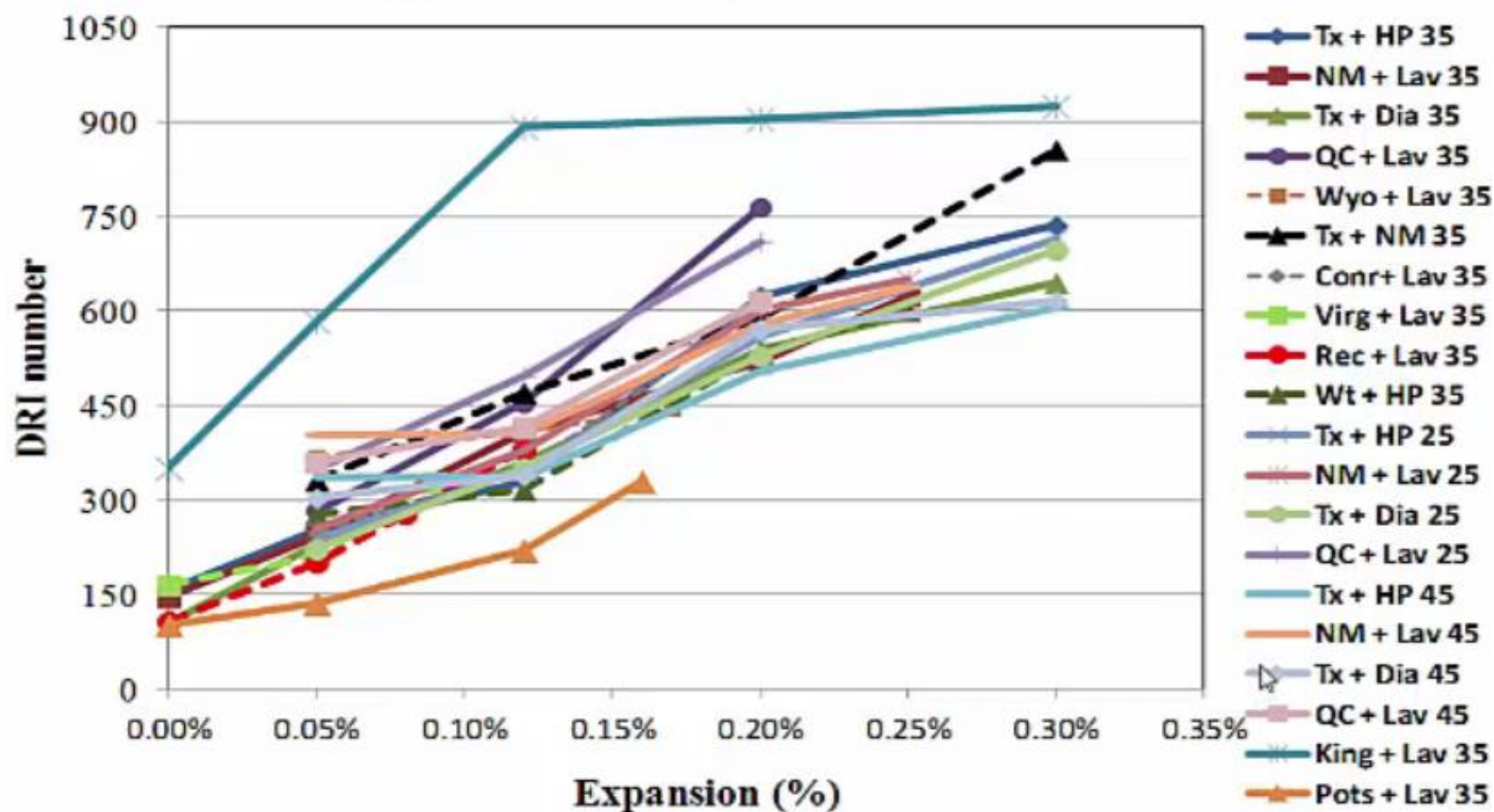
- Método semi-quantitativo – deterioração do material;
- Lupa binocular ($\approx 16\times$) diferentes indícios de deterioração (malhas de 1cm^2);
- Número de defeitos associado a um peso (arbitrário) $\rightarrow$ Número DRI (100 cm^2).



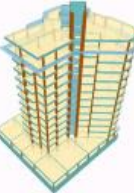
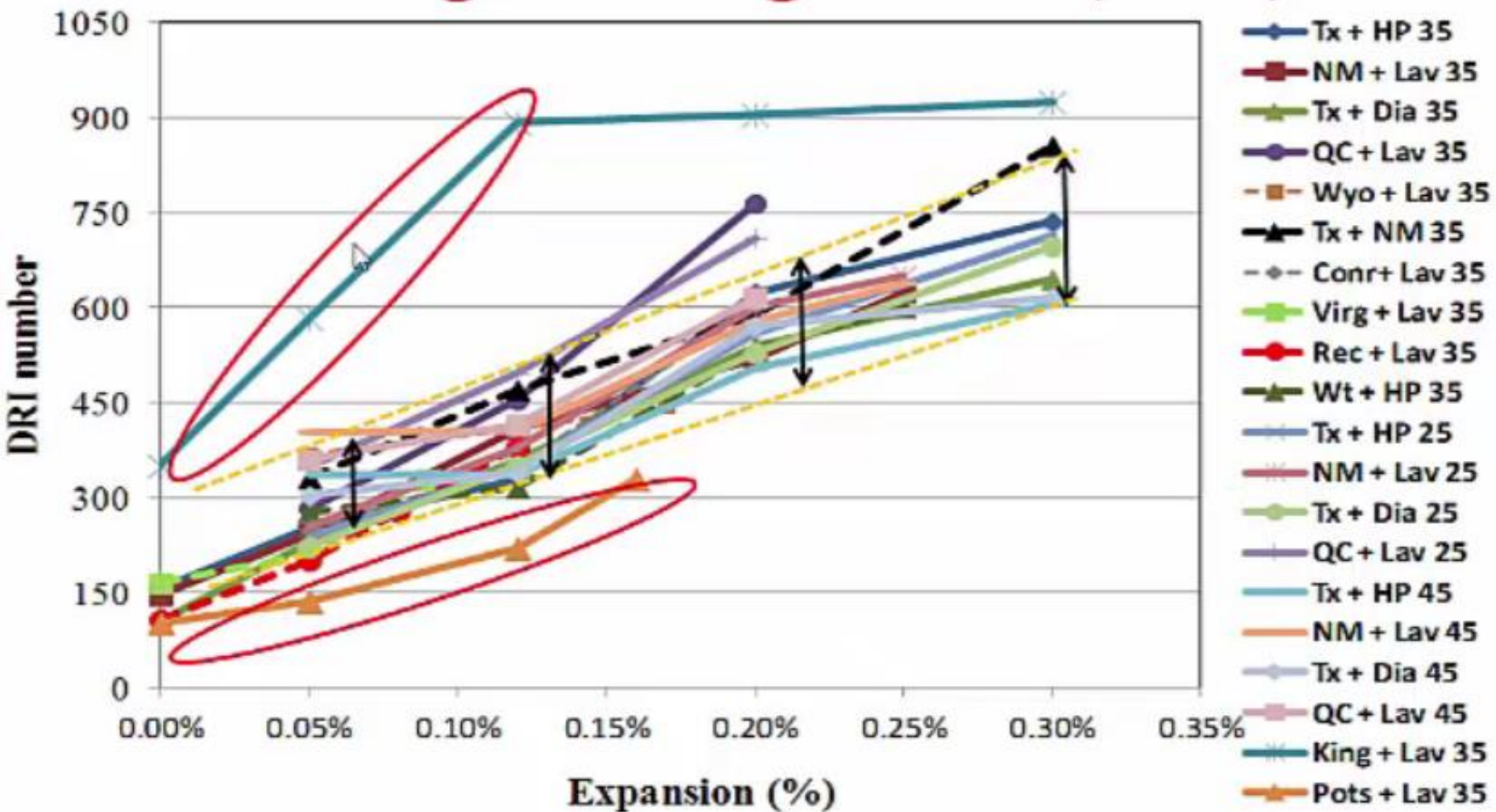
(Villeneuve et coll. 2012)



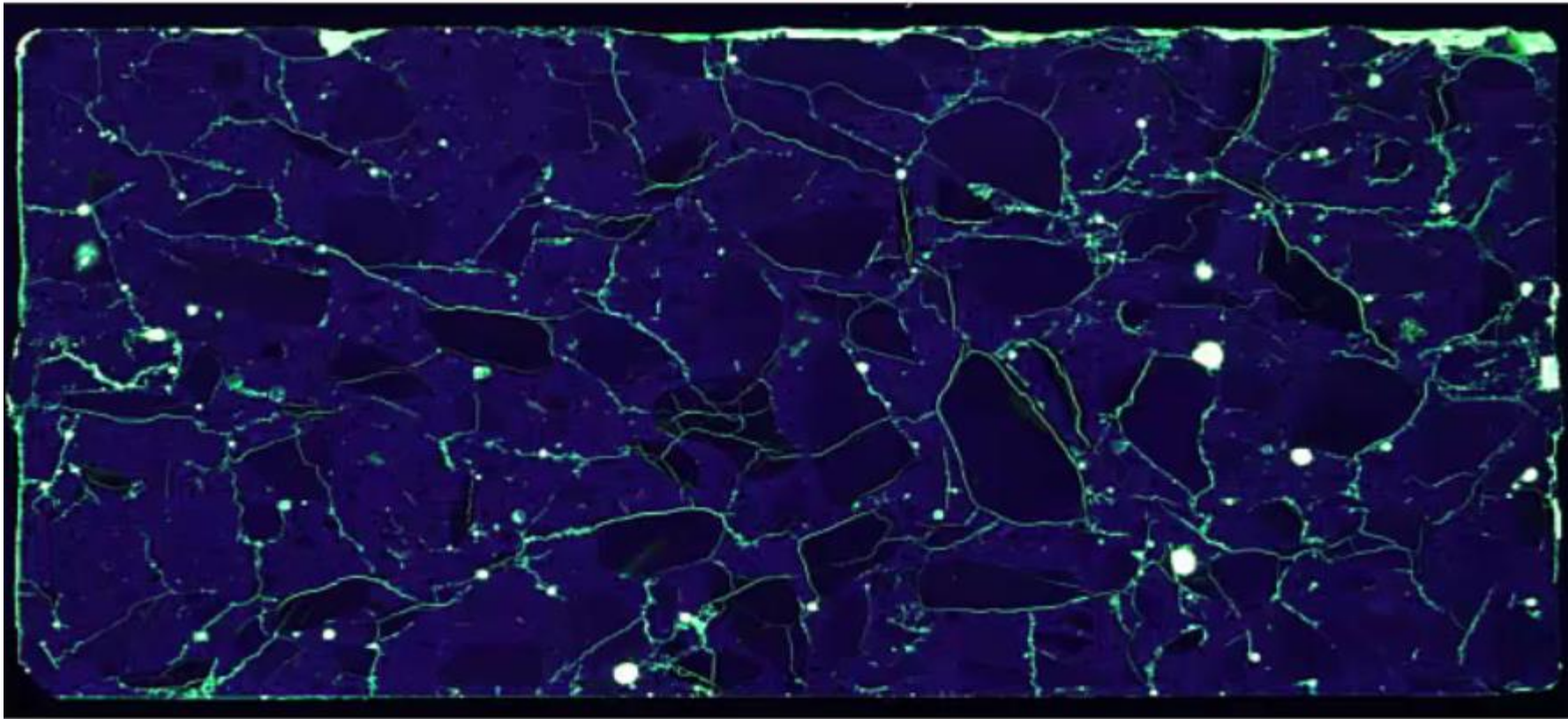
Damage Rating Index (DRI)



Damage Rating Index (DRI)



Damage Rating Index (DRI)

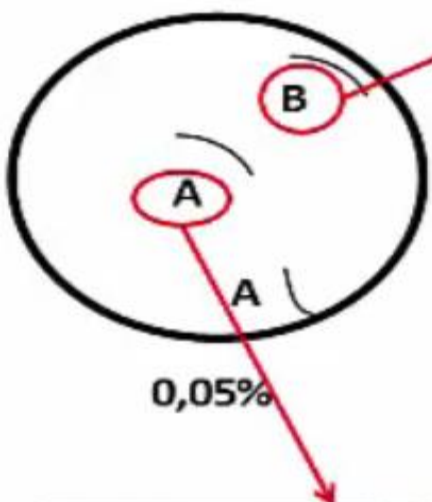


CQ + Lav 35 - 0.20%



RAA

Damage Rating Index (DRI)



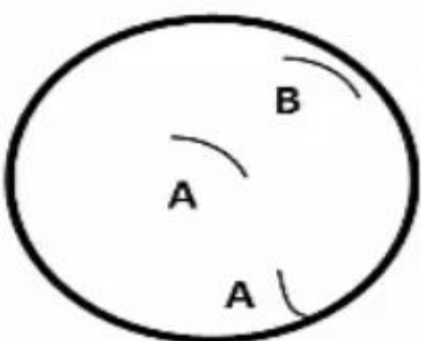
Modelo de deterioração
qualitativo



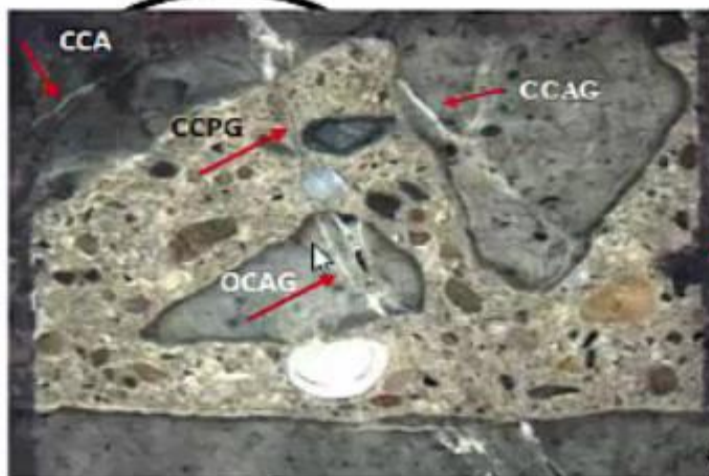
RAA

Damage Rating Index (DRI)

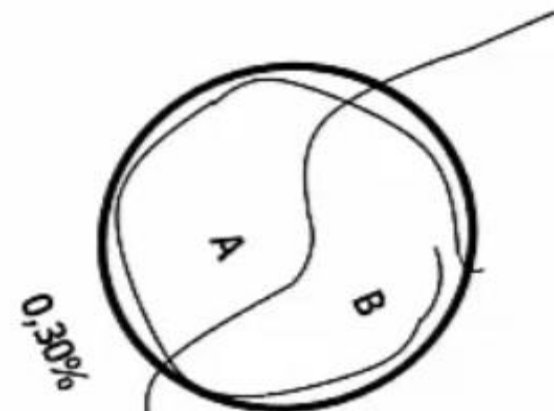
Modelo de deterioração qualitativo



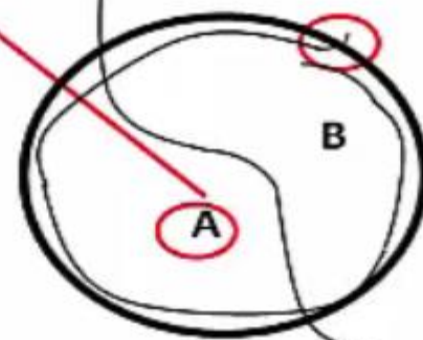
0,05%



0,20%



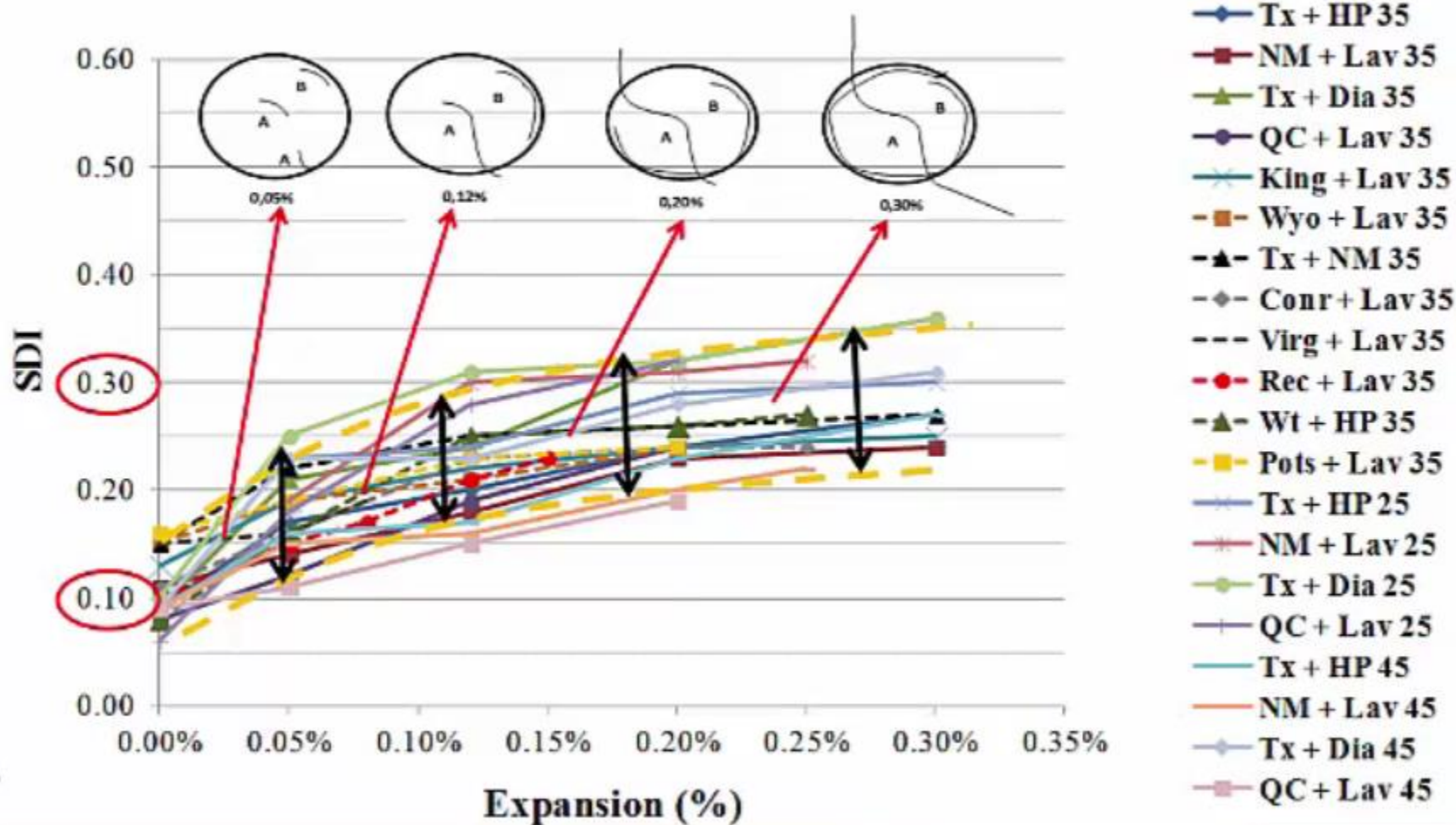
0,30%



0,30%

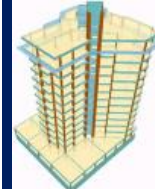
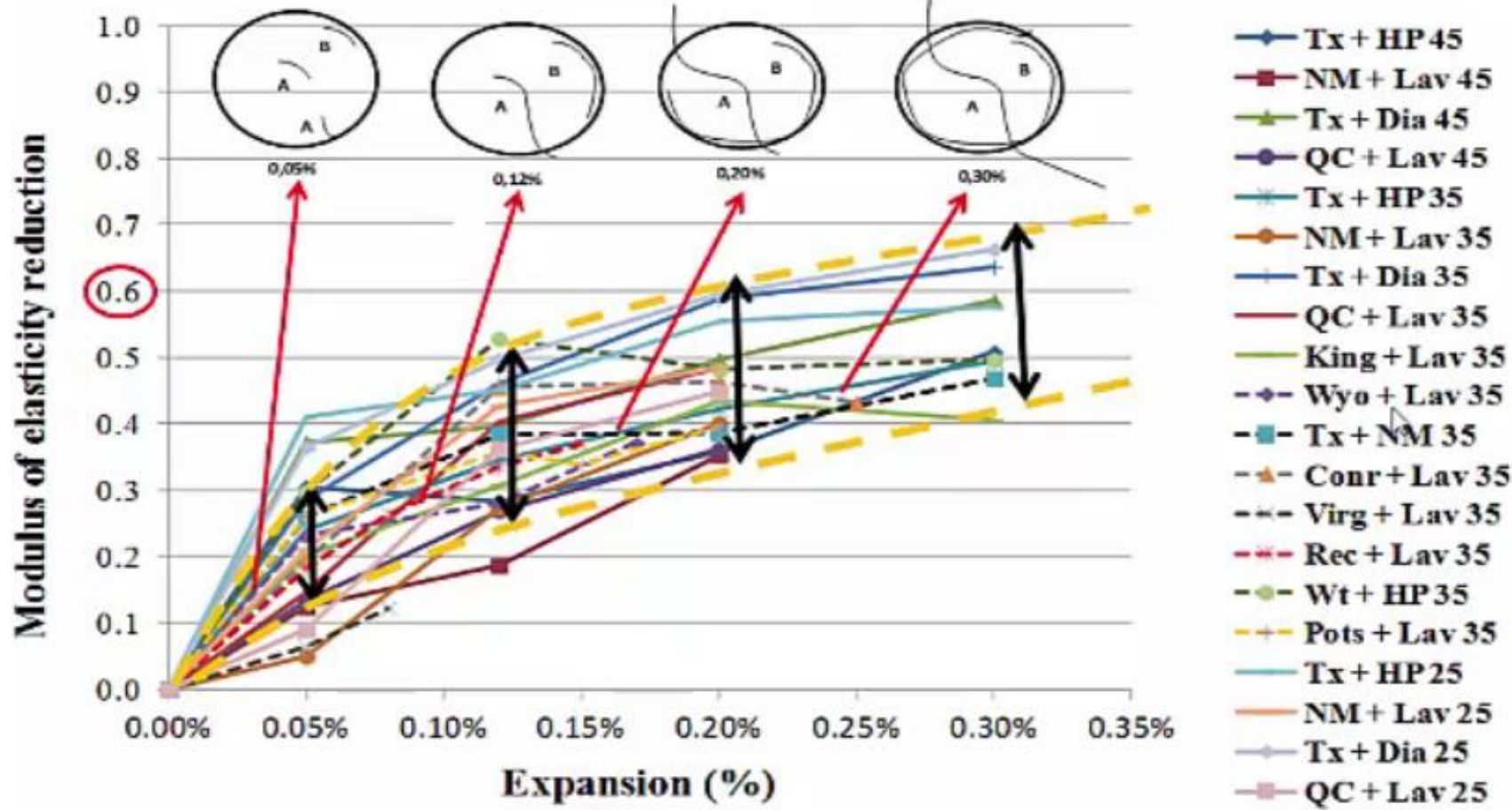


AAR → integridade física (SDT) !

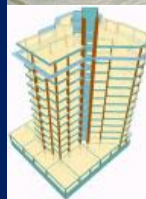
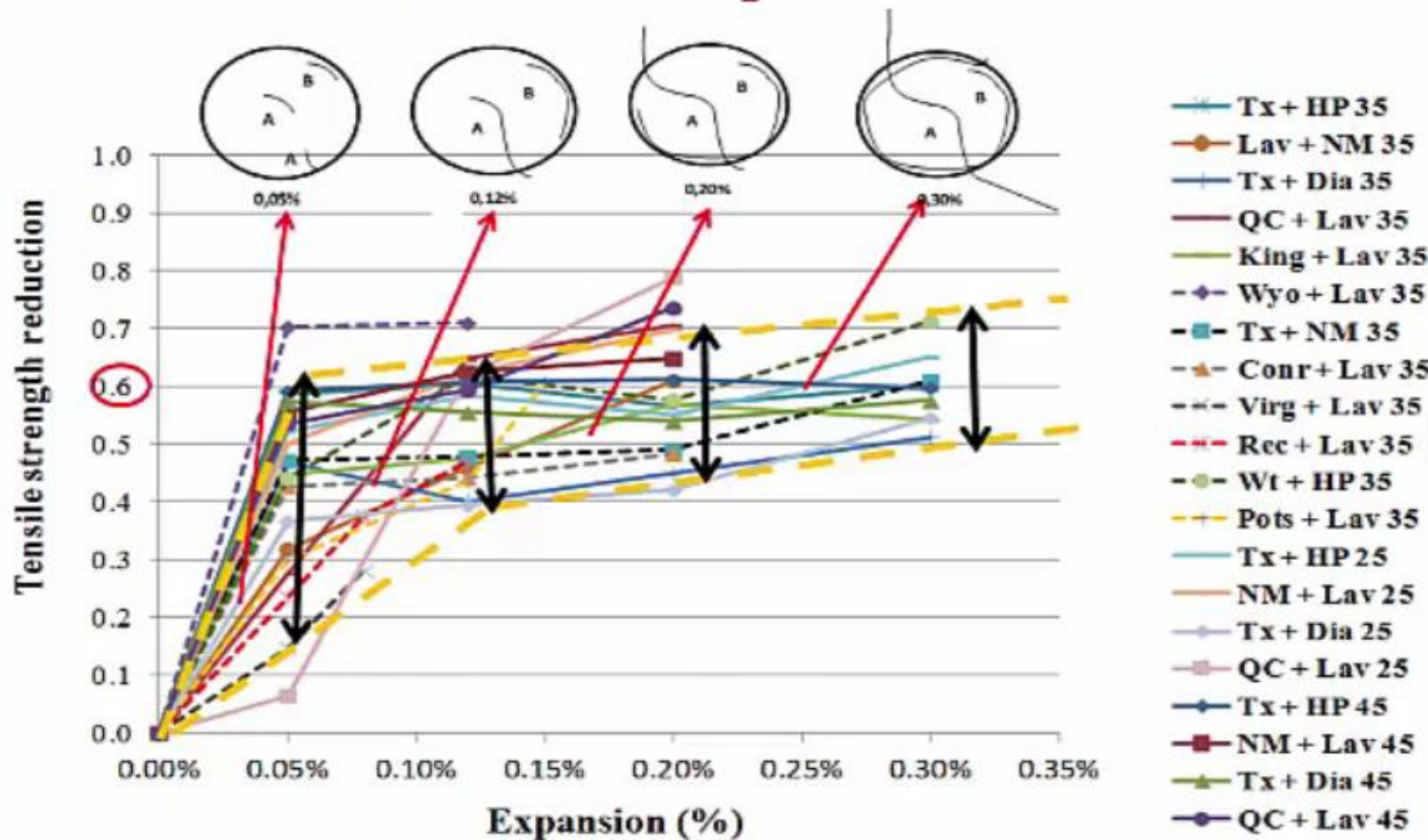


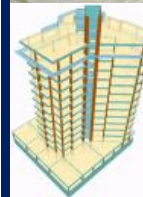
RAA

AAR → rigidez



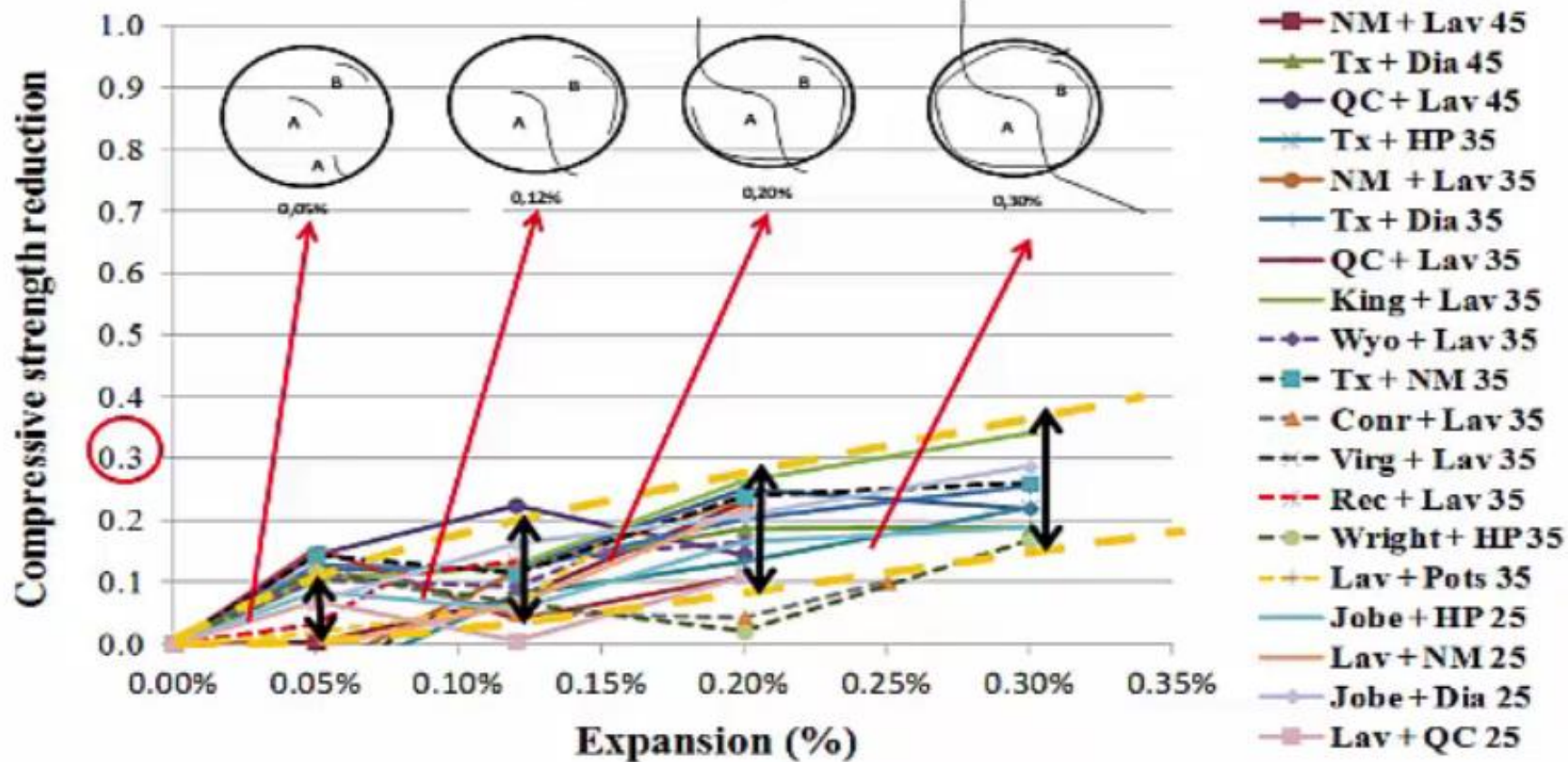
AAR - tração!





RAA

AAR → compressão



RAA

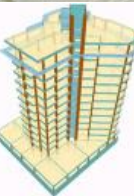
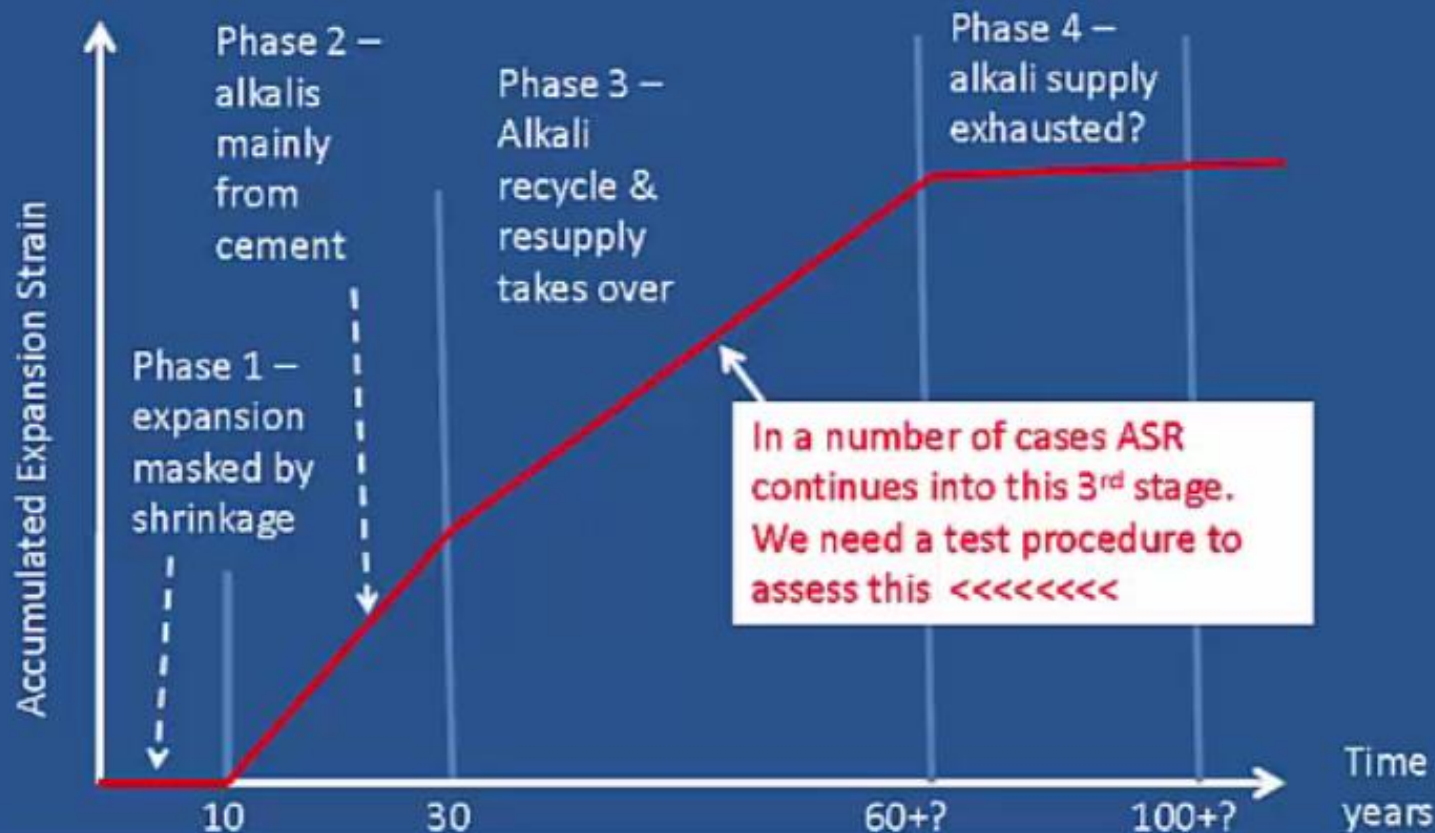


Prognóstico da RAA ?



Por quanto tempo?

“PHASES” OF ASR EXPANSION....VERY CONCEPTUALLY

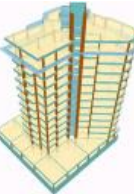


Expansão residual (ER)



Expansão residual

Confiável?



Métodos químicos, físicos e modelos matemáticos

- Álcalis solúveis → medida do potencial de expansão futuro;
- Teor de sílica → medida do potencial de expansão futuro;
- Modelos de FEM macro/micro → simular o comportamento de obras reais.

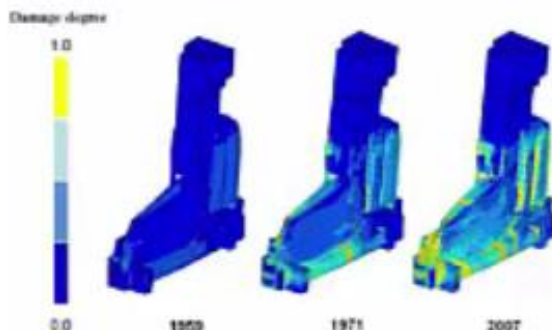
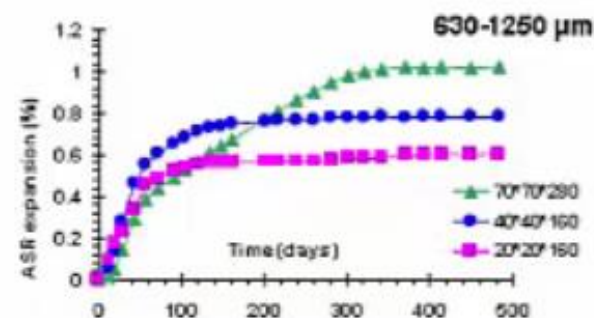


Figure 2-14 The damage degree of the structures attacked by ASR [Grimal 2007]

Grimal et al. 2007



Gao 2010

A ciência está atualmente aqui!!

