



# Concreto autorregenerante

Mecanismos de recuperação de estruturas de  
concreto armado

# Durabilidade do concreto

A durabilidade do concreto armado é um parâmetro extremamente relevante, pois acarreta na necessidade de reparos, reabilitação, ou em casos mais extremos, a substituição dos componentes estruturais.

---

# Impactos da perda de vida útil precoce

No ano de 2012, passou-se a se perceber, em países como Estados Unidos, Coreia do Sul e Alemanha, **maiores gastos envolvendo recuperação e reabilitação das estruturas, superando os investimentos com novas construções.**

# Impactos da perda de vida útil precoce



# Durabilidade x normas técnicas

# Durabilidade x normas técnicas

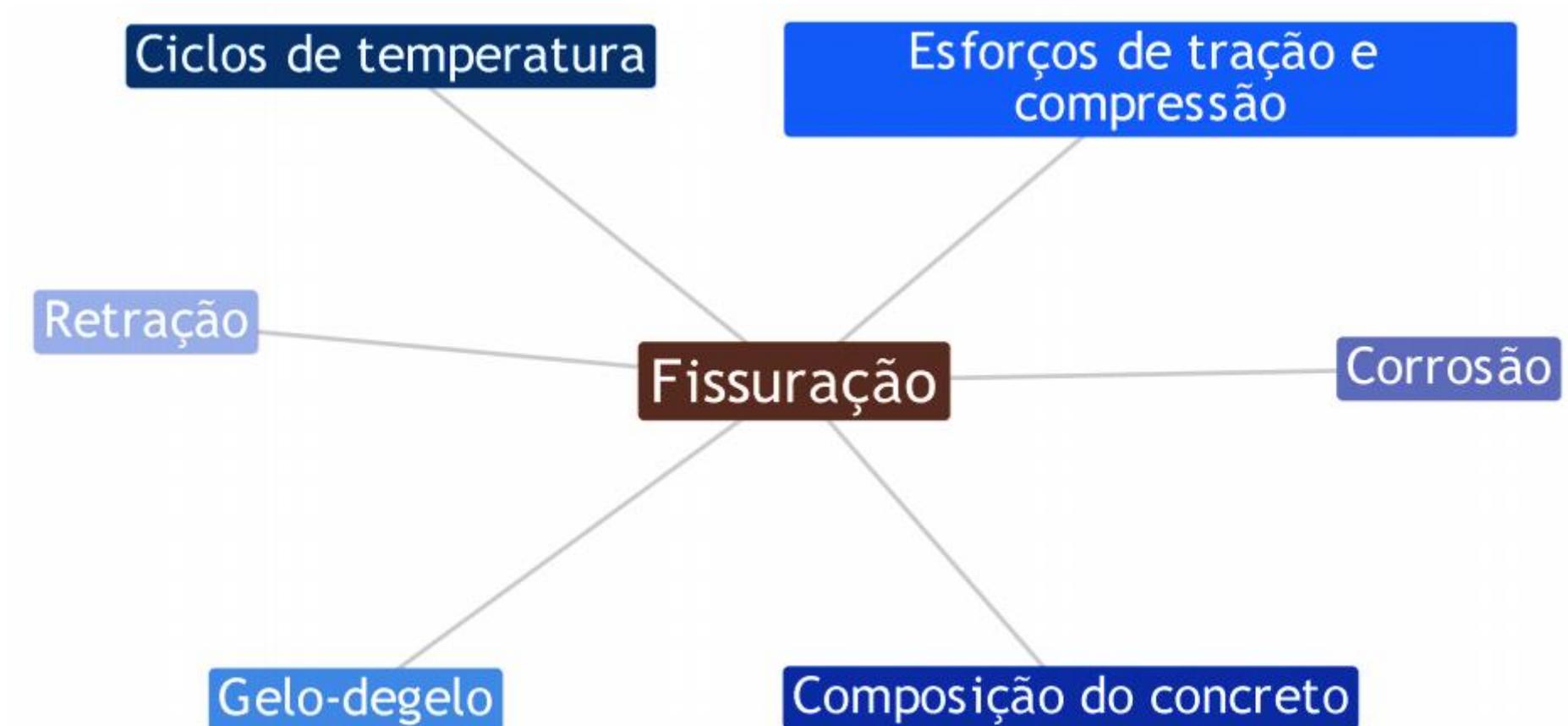
Parte da edificação	Exemplos	Vida útil de projeto (VUP) (anos)		
		Mínimo	Intermediário	Superior
Estrutura principal	Fundações, elementos estruturais (pilares, vigas, lajes e outros), paredes estruturais, estruturas periféricas, contenções e arrimos	≥50	≥63	≥75
Estruturas auxiliares	Muros divisórios, estruturas de escadas externas	≥20	≥25	≥30
Vedação externa	Paredes de vedação externas, painéis de fachada, fachadas-cortina	≥40	≥50	≥60
Vedação interna	Paredes e divisórias leves internas, escadas internas, guarda-corpos	≥20	≥25	≥30

Fragmento de tabela da ABNT NBR 15575:2013

# Formação de fissuras

# Formação de fissuras

## Causas



# Fissuras

Podem ocorrer no concreto ainda em estado frágil ou fresco, podendo **se propagar facilmente**, diminuindo sua resistência e consequente segurança da estrutura.

(ZAI e MURTHY, 2015).



# Fissuras

Além do dano superficial podem culminar no ingresso facilitado de agentes de deterioração, permitindo a ação em profundidade  $\text{CO}_2$  e  $\text{Cl}^-$ .

Deterioração mais intensa, podendo acarretar na intensidade da corrosão, na perda de seção do aço, e conseqüente redução da capacidade portante do elemento estrutural.

# Fissuração Limites estabelecidos em norma

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAAI a CAIV	Não há	-
Concreto armado	CAA I	ELS- W- wk $\leq$ 0,4mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS- W- wk $\leq$ 0,3mm	
	CAA IV	ELS- W- wk $\leq$ 0,2mm	
A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com ap= 50mm			

**ABNT NBR 6118**

# Concreto autorregenerante ou autocicatrizante

*“Qualquer processo realizado pelo próprio material que envolva a recuperação e a melhoria na performance de um material que tenha sido danificado por algum processo anteriormente”.*

# Concreto autorregenerante ou autocicatrizante

Nova tecnologia??



*Fotografia do preenchimento da fissura com o adesivo de reparo incorporado no concreto do pavimento de ponte (DRY, 2000, p. 1975)*

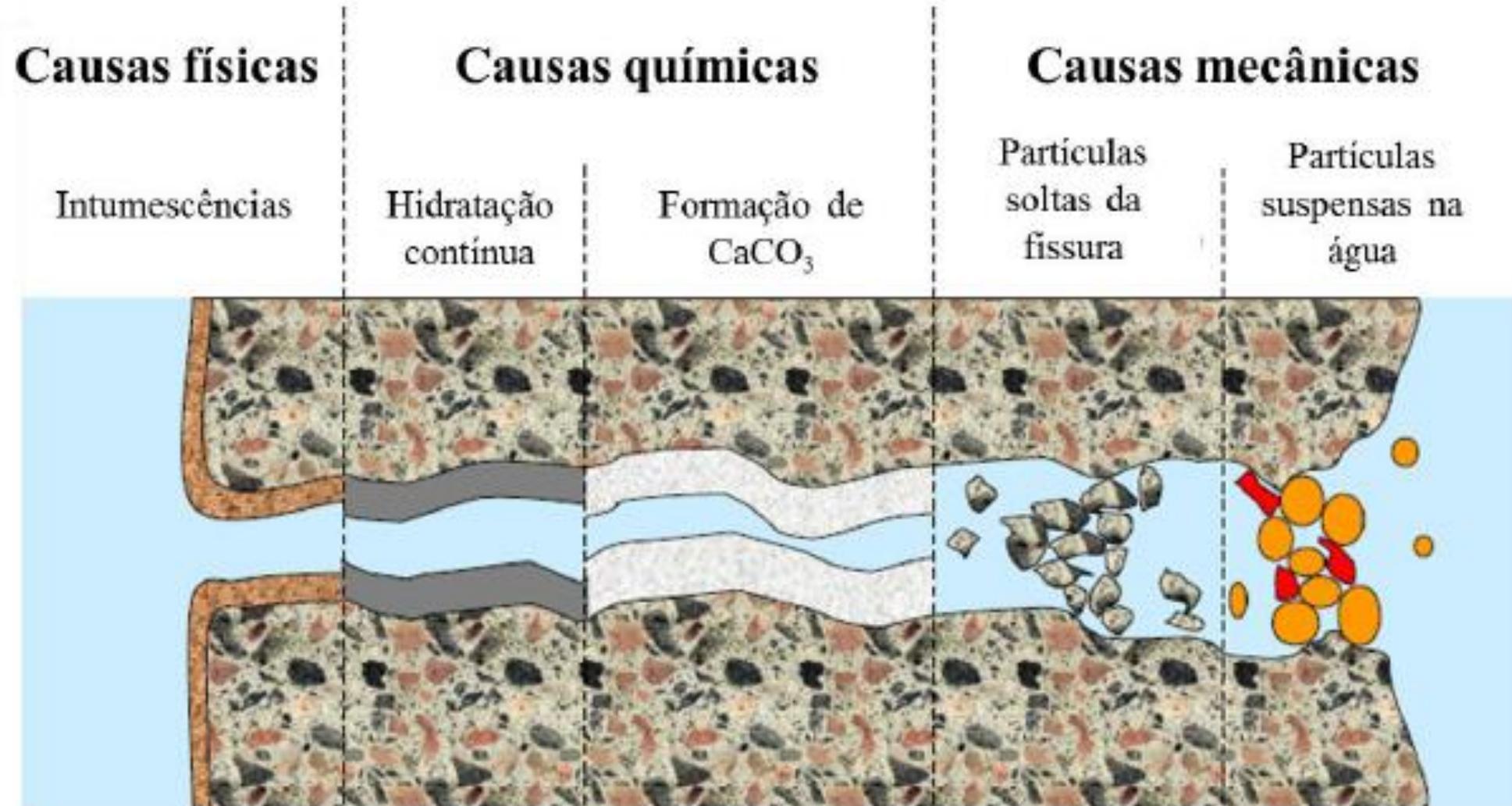
Concretos autocicatrizantes foram utilizados recentemente na laje de subpressão do Museu da Imagem e do Som (M.I.S.), em Copacabana, e também na Cobertura Fluida do Museu de Arte do Rio (M.A.R.), no centro da cidade do Rio de Janeiro.



Nos traços dos concretos, conta-se com reduzida a/c, consumo de cimento de pelo menos  $391\text{kg}/\text{m}^3$ , sílica ativa e aditivo cristalizante.

**Quais são os mecanismos naturais que fazem com que ocorra a colmatação natural de uma fissura?**

# Causas que conduzem à colmatação natural de uma fissura



# Mecanismos de autorregeneração

- a) **Autogênico:** Utilização dos componentes que já são utilizados pelo concreto, como o cimento não hidratado e as adições pozolânicas (cinzas, sílica, escória);
- b) **Autônomo:** Uso de materiais não convencionais para ampliar sua capacidade autocicatrizante, como o uso de silicato de cálcio, agentes expansivos e bactérias.



# Autogênico pelo consumo de cimento

As próprias partículas de cimento que ainda não foram totalmente hidratadas podem se hidratar quando surgem fissuras e há incidência de água.

Este procedimento possui desvantagens, como o fato da reação ser única e as partículas anidras se consumirem ao longo do processo, sem estimativas precisas de sua confiabilidade.

# Autogênico pelo uso de pozolanas

A cicatrização de fissuras devido às adições minerais na dosagem do concreto tem como agentes predominantes as escórias de alto forno, as cinzas volantes, as microssílicas e os metacaulins.

De modo complementar, pode-se adotar soluções que atuem também na redução da propagação de fissuras, como o uso de microfibras.

# Autogênico pelo uso de outros químicos

Existem químicos não convencionais que possuem maior capacidade de cicatrização, tais como: catalisador cristalino, aditivos expansores a base de sulfoaluminato de cálcio, fibras de PVA, fibra superelásticas de ligas metálicas e de carbono, assim como hidrogéis de polímeros superabsorventes.

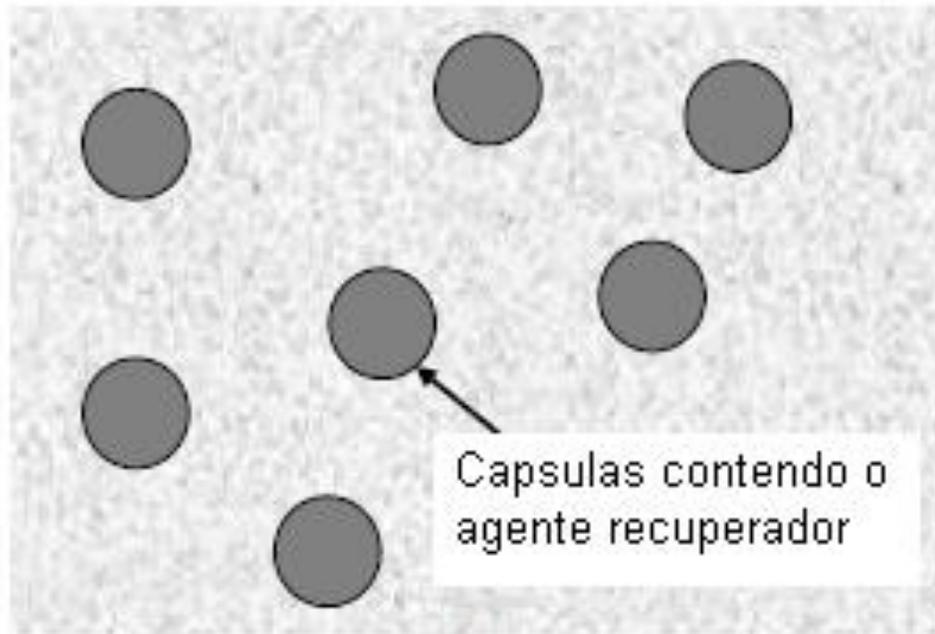
Estudos do impacto do uso de tais produtos.

# Autônomo por encapsulamento

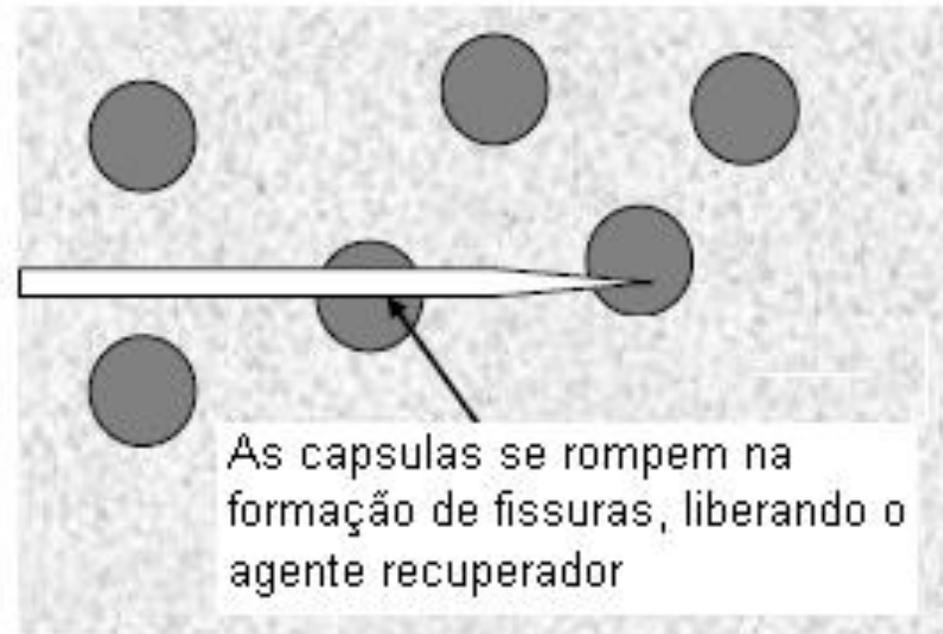
Ocorre com a incorporação de um agente cicatrizante microencapsulado que é liberado após a fissura.

A polimerização do agente cicatrizante é desencadeada pelo contato com um catalisador incorporado, aderindo as faces internas da fissura e recuperando fortemente a resistência do material.

# Autônomo por encapsulamento



(a)



(b)

Impregnação, por exemplo, de argilas expandidas com **silicato de sódio**. Barreira na resistência mecânica à compressão pelo uso dos agregados leves.

Agente cicatrizante	Número de componentes		Viscosidade (mPa.s)	Agente de cura	Tempo de cura	Expansivo		Resistência (MPa)
	1	> 2				Sim	Não	
Catalisador cristalino	√		-	Umidade + CO <sub>2</sub>	21 dias	√		-
Cianoacrilato	√		< 10	Umidade	segundos		√	20
Epóxi	√		250-500	umidade e ar	< 100 min.		√	25
Epóxi		√	80-360	Contato	30 min-1 h		√	45
Metil Metacrilato	√		-	Calor	-		√	-
Metil Metacrilato		√	1-34	Contato	30 min-1 h		√	50-75
Silicone	√		-	Ar	-		√	-
Poliuretano	√		7200	Umidade	40-80 min	√	-	-
Poliuretano		√	600	Contato	50-300 s	√		-
Poliacrilato		√	7	Contato	40 s		√	-
Óleo de tungue	√		-	Ar	-		√	-
Solução alcalina de sílica	√		-	Ar	-		√	-
Solução de Ca(OH) <sub>2</sub>	√		-	CO <sub>2</sub> do ar	-		√	-
Solução de NaSiO <sub>3</sub>	√		-	Ca(OH) <sub>2</sub>	-		√	-
Solução de NaFPO <sub>3</sub>	√		-	Hidratação	28 dias		√	-
Solução de Ca(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	√		-	Matriz	-		√	-
Poliuretano + bactérias		√	600	Contato	-	√		-
Solução bacteriana	√		-	água + O <sub>2</sub>	100 dias		√	-
Solução bacteriana		√	-	Água			√	-

**DIVERSAS OPÇÕES DE AGENTES CICATRIZANTES QUE VARIAM EM TERMOS DA CONDIÇÃO DE CURA NECESSÁRIA E SEU TEMPO DE CURA.**

# Autônomo por soluções bacterianas

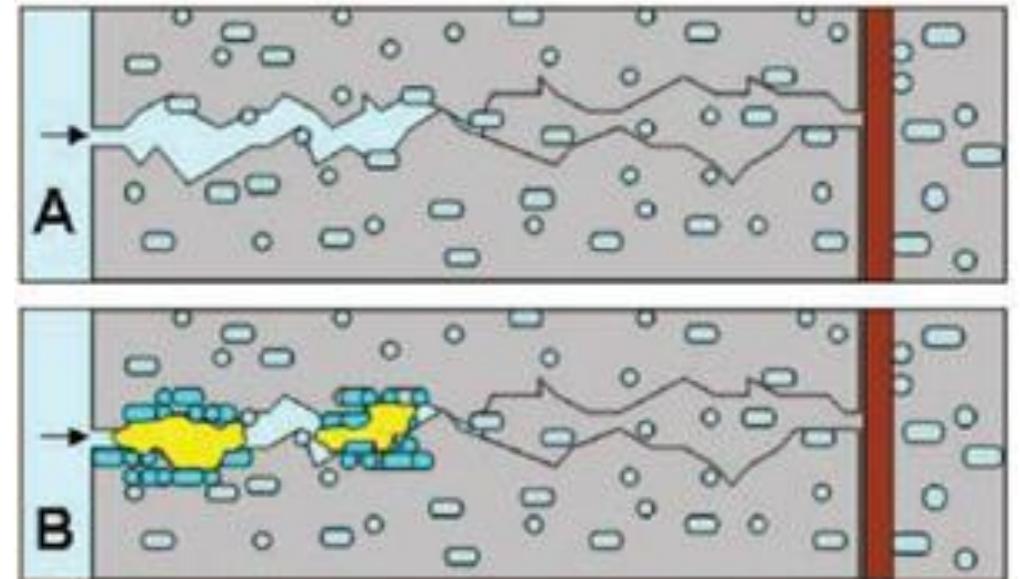
O método de remediação por bactéria é **menos nocivo ao meio, de custos mais reduzidos e vasto potencial durável.**

Pode-se optar pela inserção das bactérias envoltas em entorno de proteção, como nos agregados graúdos de argila expandida, saturada à vácuo, primeiramente em solução de lactato de cálcio, sendo na sequência realizada a suspensão de poros bacterianos.

# Autônomo por soluções bacterianas

A precipitação mineral através das bactérias é um fenômeno em que biominerais são formados através da interação entre produtos metabólicos gerados pelos próprios organismos e seu ambiente de inserção.

Deve haver presença de água ou de umidade. Inicialmente (a) ocorre o ingresso de água no interior das microfissuras do concreto. Na sequência, bactérias selam as fissuras através da produção de calcário, garantindo a proteção as armaduras em seu interior.



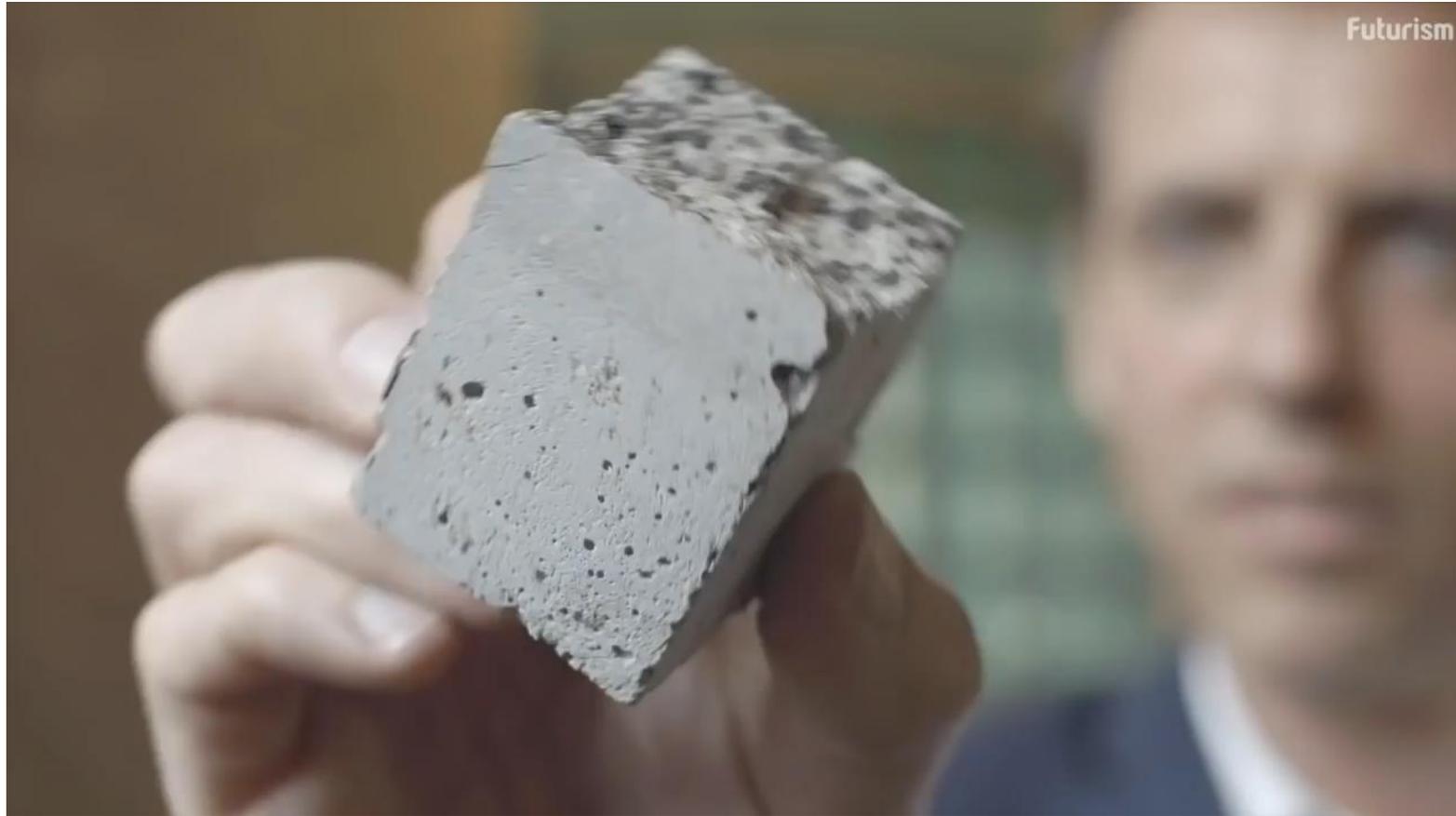
# Autônomo por soluções bacterianas

- 1) A entrada de água através das microfissuras do concreto torna ativa a bactéria dormente;
- 2) Camadas densas de carbonato de cálcio são produzidas por conversão bacteriana e um composto mineral precursor incorporado na matriz do concreto, sendo este o responsável pela selagem das fissuras.

A utilização de bactérias além de ser favorável a durabilidade dos materiais gerados, constituem de uma tecnologia para acréscimo da resistência à compressão dos concretos sem que seja necessária uma maior adição de cimento, ou sua substituição por materiais pozolânicos.

Há ainda, constatações de que a utilização de tais materiais possa influenciar na absorção de água dos concretos, influenciando assim, seu comportamento durável mediante agentes de deterioração (ALSHALIF et al, 2016).

# Autônomo por soluções bacterianas



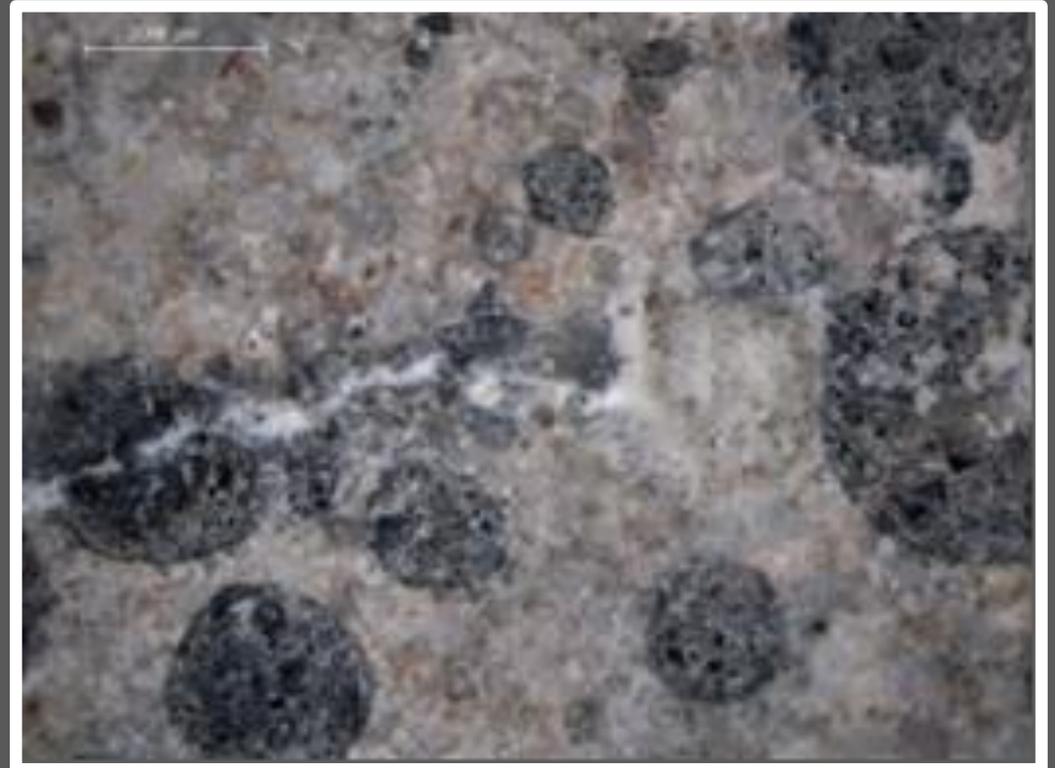
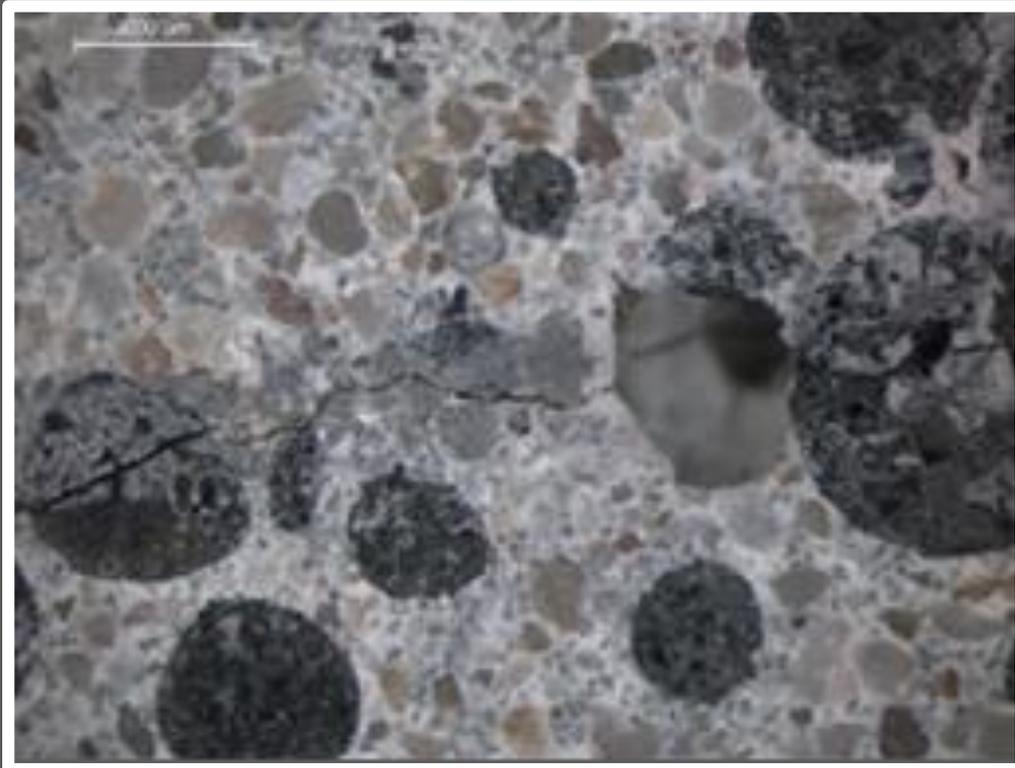
# Autogênico

- **Gastos e agressão ao meio pelo elevado consumo de cimento;**
- **Disponibilidade das adições pozolânicas;**

# Autônomo

- **Desvantagem residente no encapsulamento;**
- **Disponibilidade produto;**
- **Utilização das bactérias;**

# Verificação da eficácia- CICATRIZAÇÃO



# Verificação da eficácia- CICATRIZAÇÃO

A verificação da eficácia pode ocorrer por tipos diferentes de testes:

- Diagnóstico por imagem;
- Testes de estanqueidade;
  - Testes mecânicos.

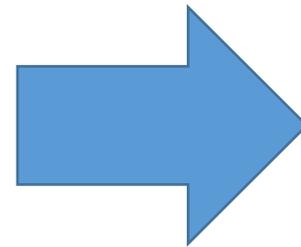
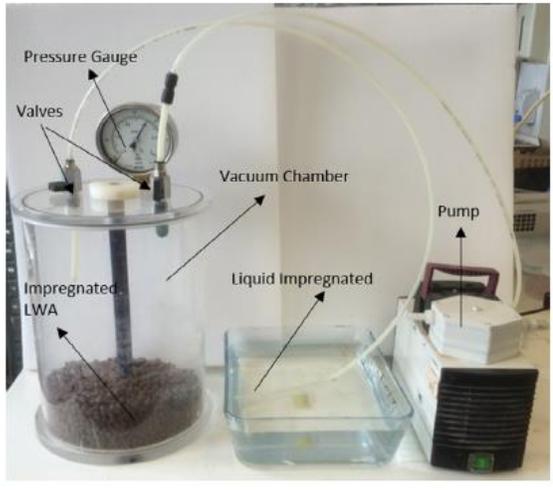
# Estudos de caso

## A) Impregnação de argila expandida com silicato de sódio



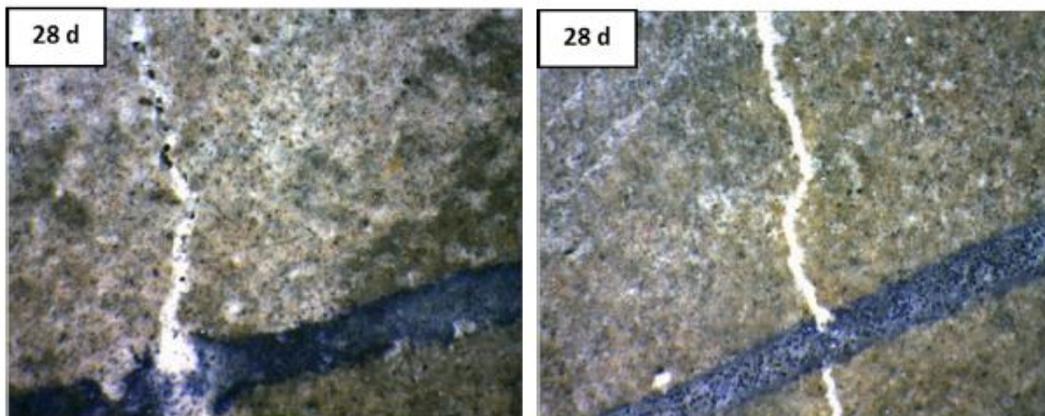
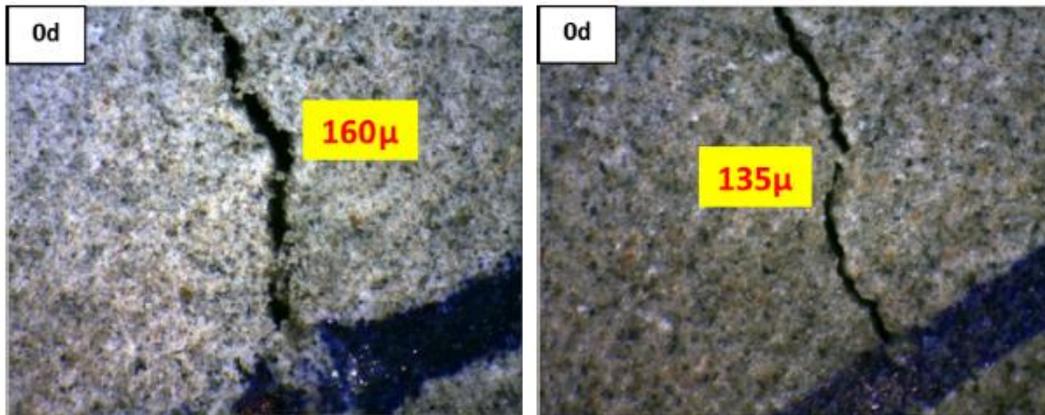
# Estudos de caso

## A) Impregnação de argila expandida com silicato de sódio



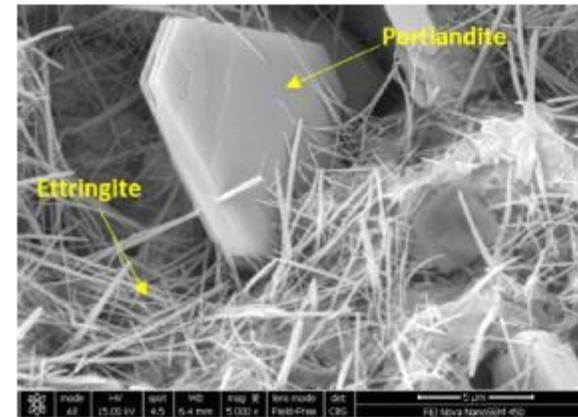
# Estudos de caso

## A) Impregnação de argila expandida com silicato de sódio

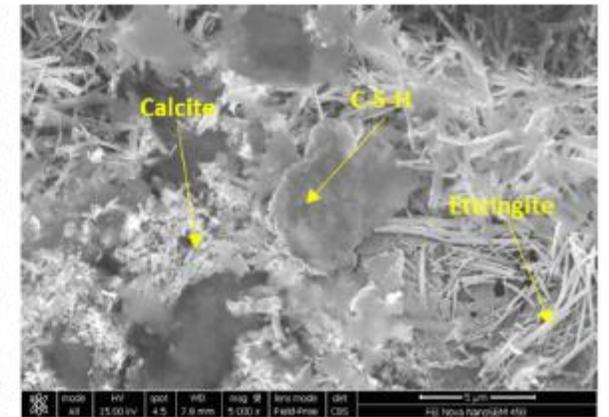


(a) CN

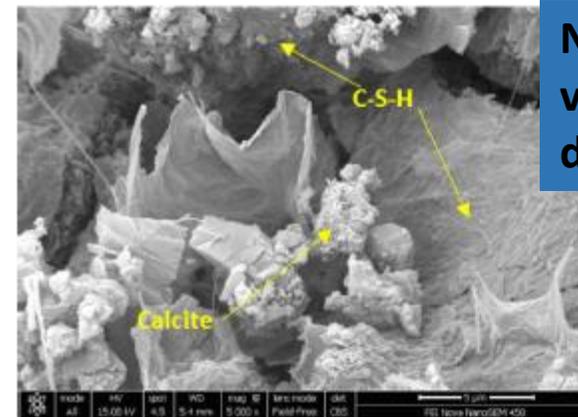
(b) SHM



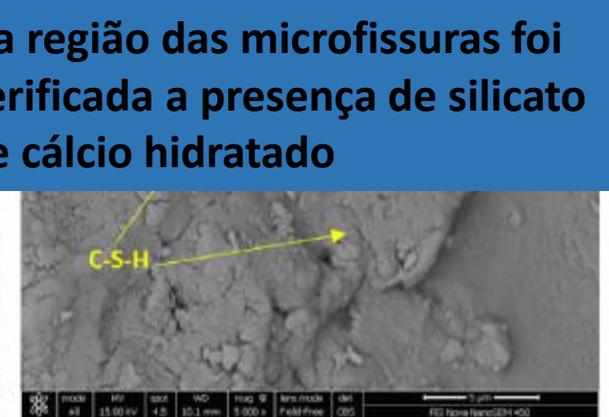
CN-2<sup>nd</sup> R (28 days)



CN-3<sup>rd</sup> R (56 days)



SHM-2<sup>nd</sup> R (28 days)



SHM-3<sup>rd</sup> R (56 days)

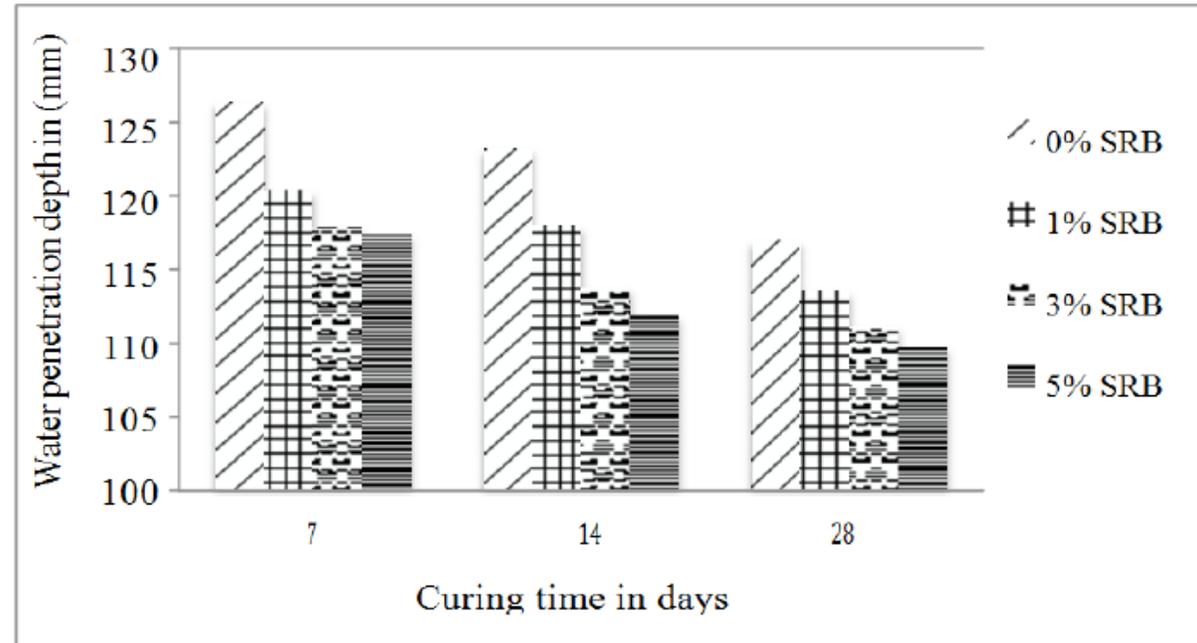
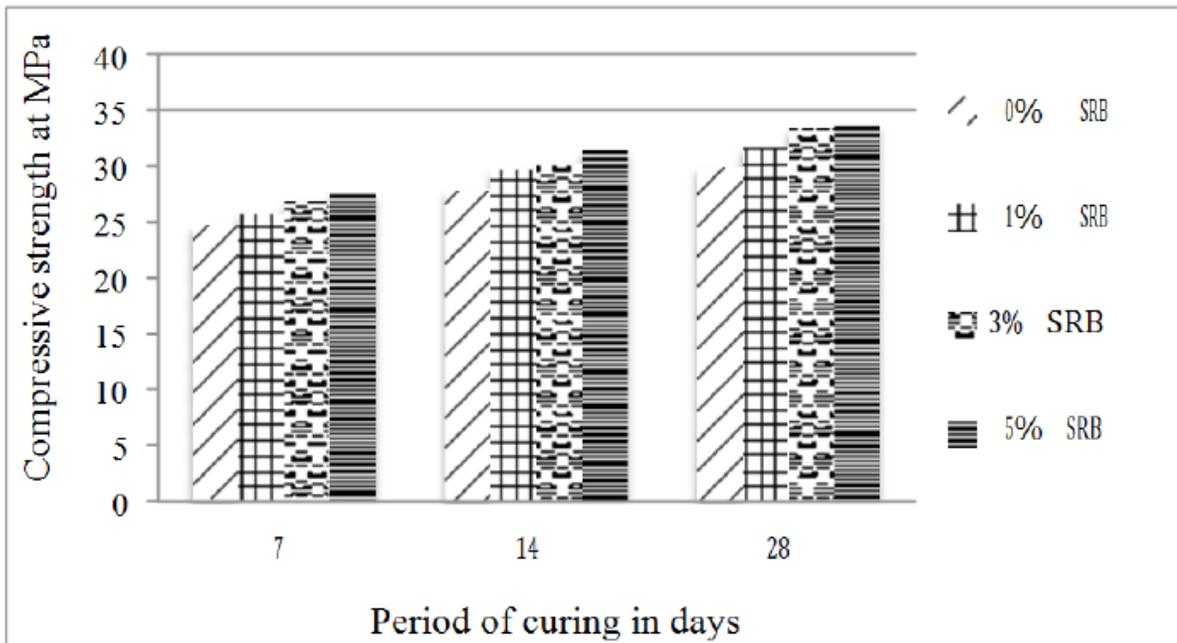
Na região das microfissuras foi verificada a presença de silicato de cálcio hidratado

# Estudos de caso

## B) Bactérias isoladas em solução alcalina

Diferentes percentuais de inserção da solução bacteriana

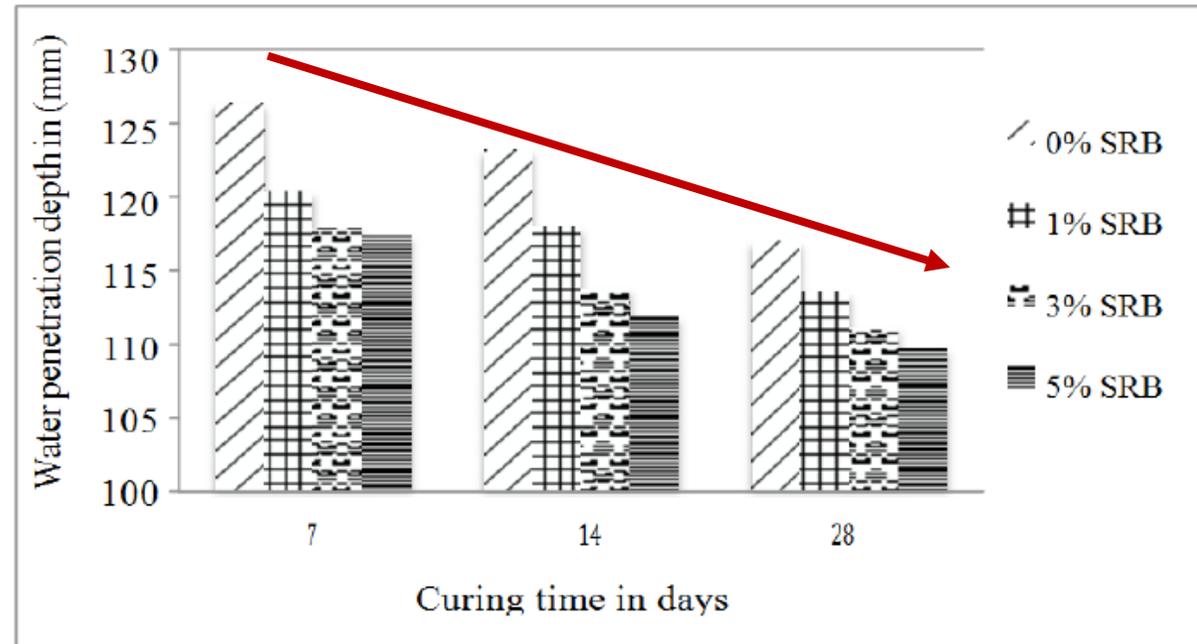
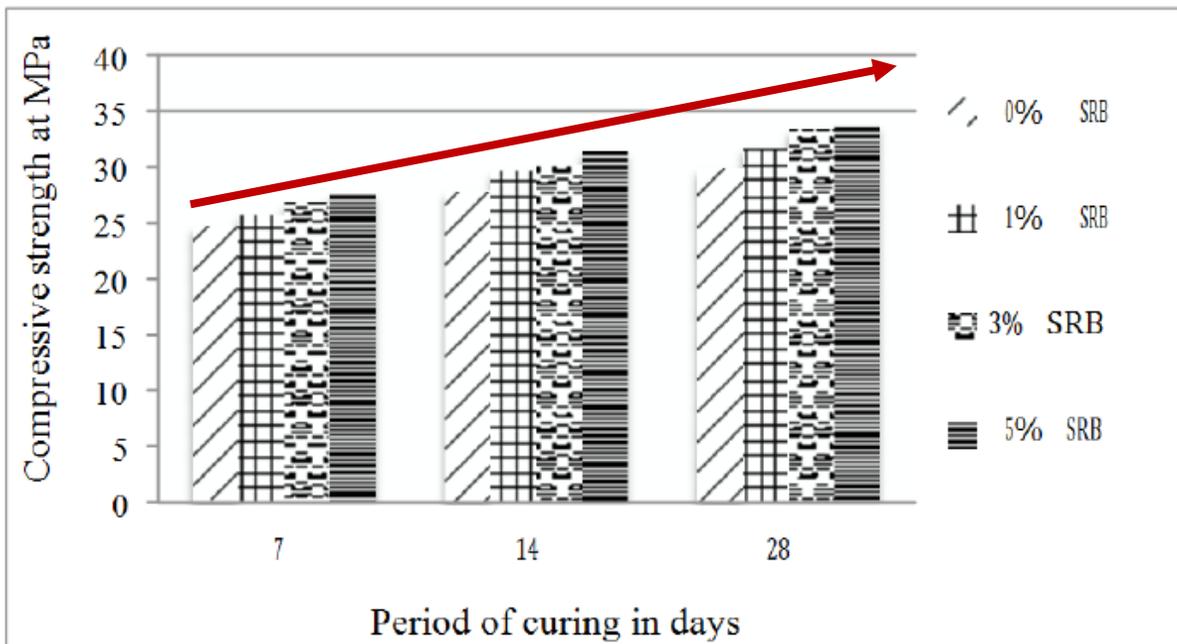
Percentage (%) of bacteria in batch	Cement (kg)	Water (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)	Bacteria growth medium (1kg = 1L)
0 %	420	210	685	1115	0
1 %	420	207.9	685	1115	2.1
3 %	420	203.7	685	1115	6.3
5 %	420	199.5	685	1115	10.5



# Estudos de caso

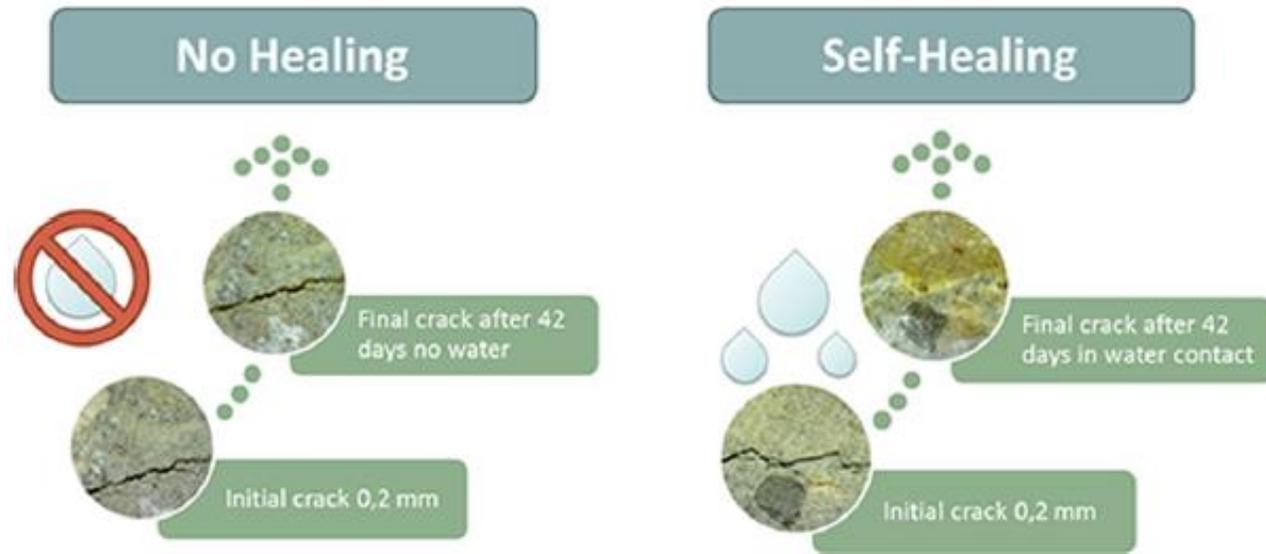
## B) Bactérias isoladas em solução alcalina

Percentage (%) of bacteria in batch	Cement (kg)	Water (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)	Bacteria growth medium (1kg = 1L)
0 %	420	210	685	1115	0
1 %	420	207.9	685	1115	2.1
3 %	420	203.7	685	1115	6.3
5 %	420	199.5	685	1115	10.5

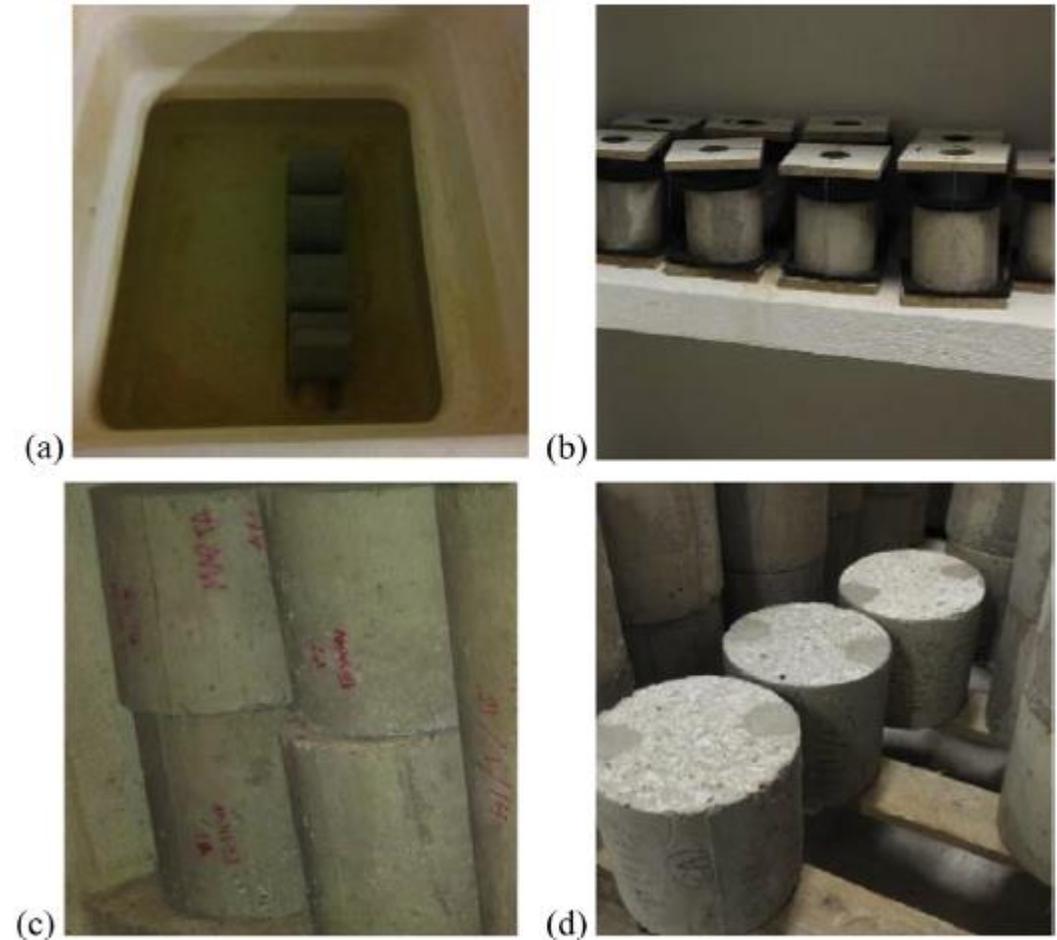


# Estudos de caso

## c) Verificação da condição de cura



Uso de aditivos cristalizantes e verificação da sua eficácia em diferentes condições de cura

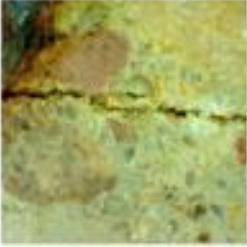
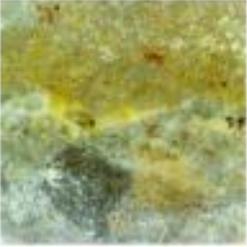
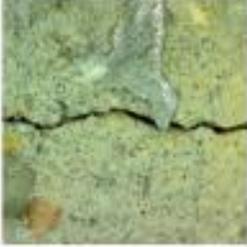
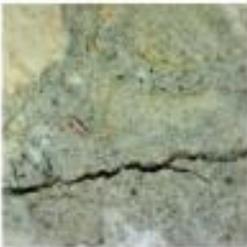
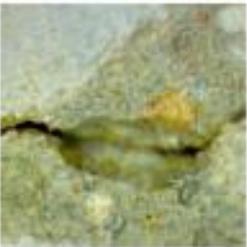


# Estudos de caso

## c) Verificação da condição de cura

Condições de cura:

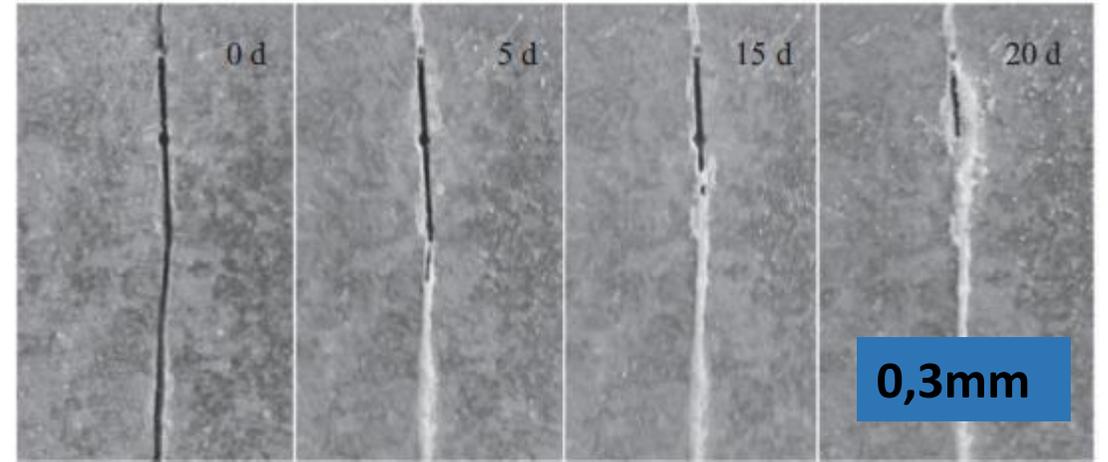
- IMERSA EM ÁGUA;
- EM CONTATO COM A ÁGUA;
- EXPOSTA A UMIDADE;
- CURADA AO AR;

		Control concrete		Concrete with Crystalline Admixtures	
		Before healing	After healing	Before healing	After healing
EXPOSURE	Water Immersion				
		Crack closure ~ 75%		Crack closure ~ 100%	
	Water Contact				
		Crack closure ~ 60%		Crack closure ~ 100%	
Humidity Chamber					
	Crack closure ~ 0 %		Crack closure ~ 0 %		
Air Exposure					
	Crack closure ~ 0%		Crack closure ~ 0 %		

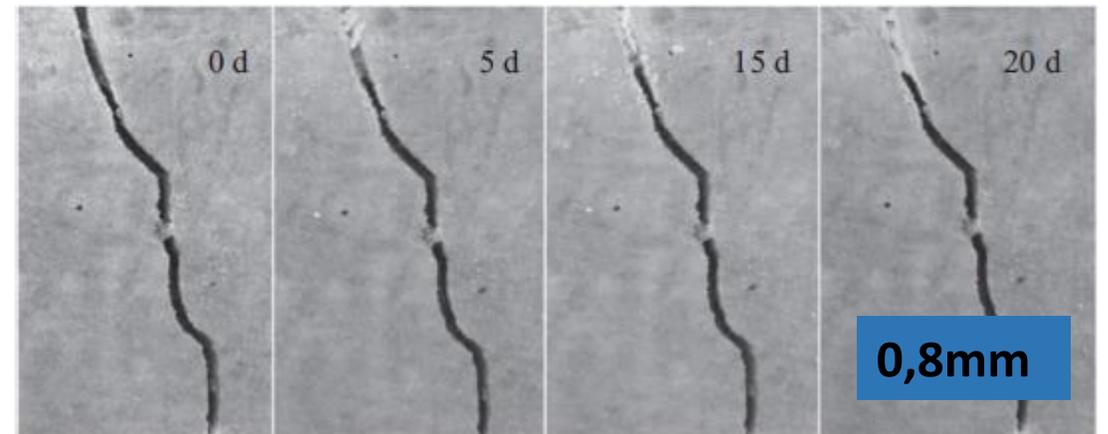
# Estudos de caso

## d) Análise de diferentes dimensões de fissuras

Utilização de solução bacteriana na mistura



(a)



(b)

# Em termos de custos



Maio de 2010, Pesquisadores da *University of Rhode Island*, Estados Unidos, avaliaram como financeiramente viável um concreto autoregenerante com a utilização de silicato de sódio encapsulado na matriz de concreto.

Segundo os pesquisadores, o material possui custo acessível e pode proporcionar recuperação de até 26% da resistência inicial da área danificada.

Valor silicato de sódio: R\$ 50,00 (5L do produto, solução não pura)

# Lacunas no estudo da técnica

- Quantificação da redução de custo e estimativa da vida do concreto com a utilização de técnicas de auto regeneração;
- Verificação da vida inativa da bactéria em estruturas expostas ao tempo e agressões das estruturas de concreto armado;
- Verificar o cumprimento da vida útil das estruturas de concreto armado, e a viabilidade de ocorrência de múltiplos eventos de cicatrização.

# Lacunas no estudo da técnica

- A selagem máxima é de fissuras de até 0.5 mm;
- Análise da confiabilidade da autocicatrização ao longo do tempo;
- Aderência do produto de autocicatrização com o concreto existente;
- Eficiência de diferentes mecanismos de autocicatrização nos ambientes comuns de exposição dos concretos (a maior parte dos mecanismos somente é ativado com a presença de água);



# Obrigada pela atenção

Prof Msc Eng Civil- Fernanda Pacheco  
fernandapache@unisinos.br

---