

Durabilidade do Concreto Projetado

Antonio D. de Figueiredo

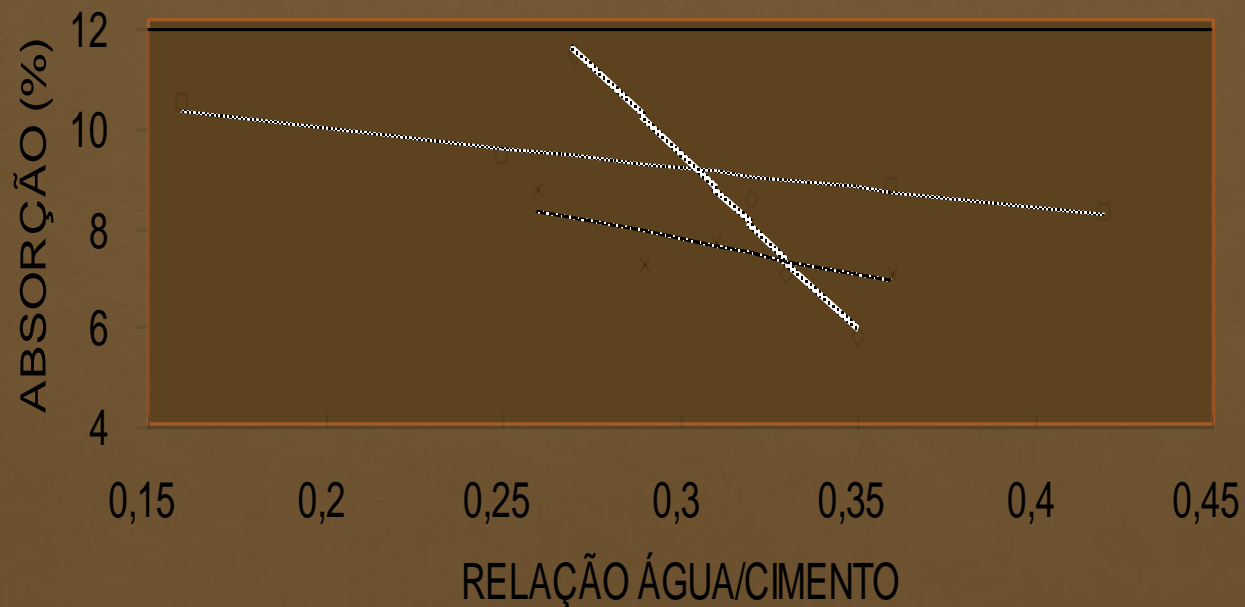
Durabilidade do concreto projetado

- ◇ Para situações convencionais, o concreto projetado não difere muito do convencional.
- ◇ O caso dos túneis é especial em termos de durabilidade.
 - ◇ A durabilidade do túnel se confunde com a durabilidade do concreto projetado.
 - ◇ Ele não é o único responsável.

IMPORTÂNCIA DO TEMA

- Utilização em obras de porte (túneis, contenções, etc.) com grande vida útil esperada: 100 anos (PAULON, 1986)
- O concreto projetado tem suas diferenciações com relação ao convencional (Características e condições de exposição)
- O processo de projeção também influencia

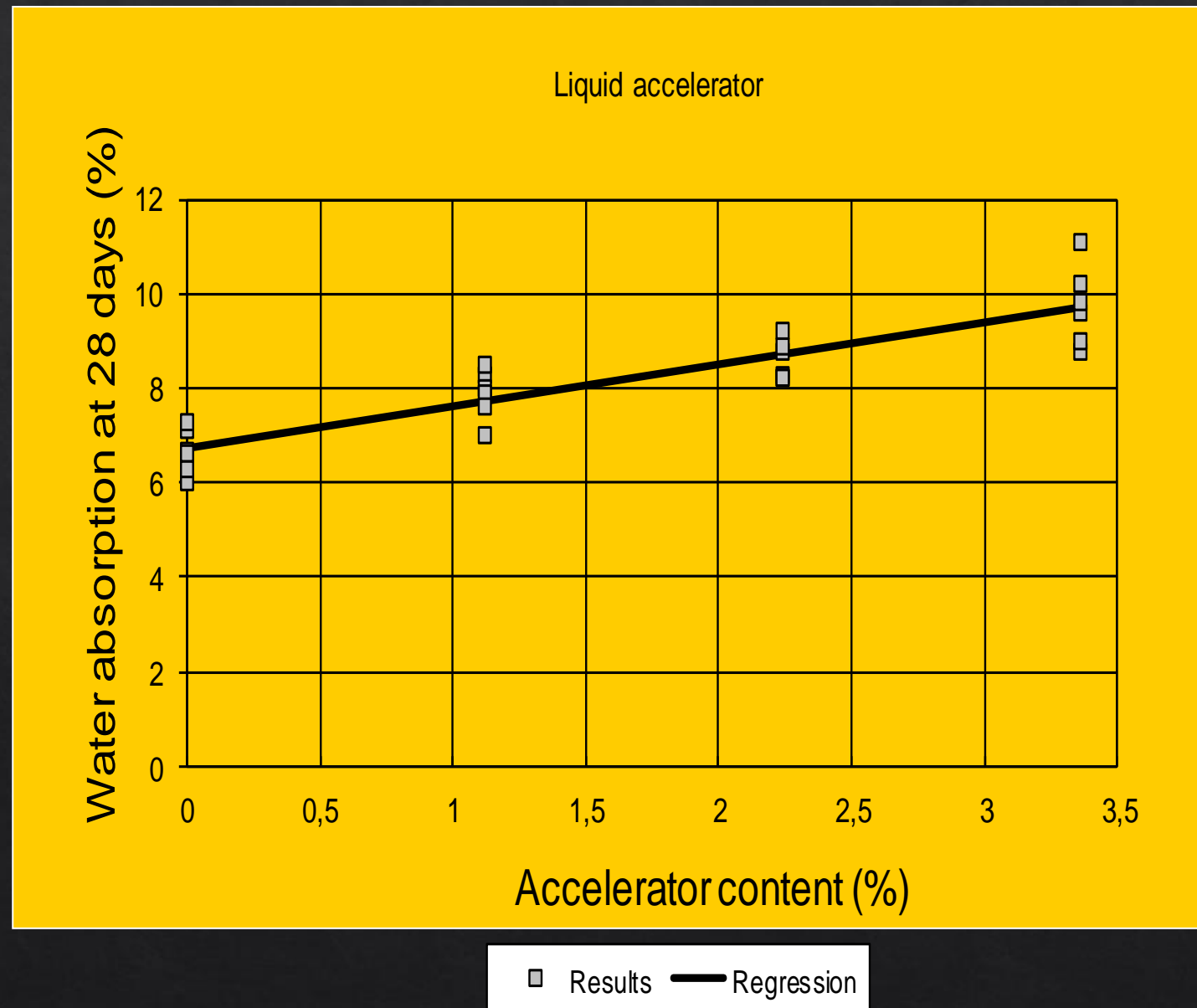
Correlação entre relação a/c e absorção (não convencional)



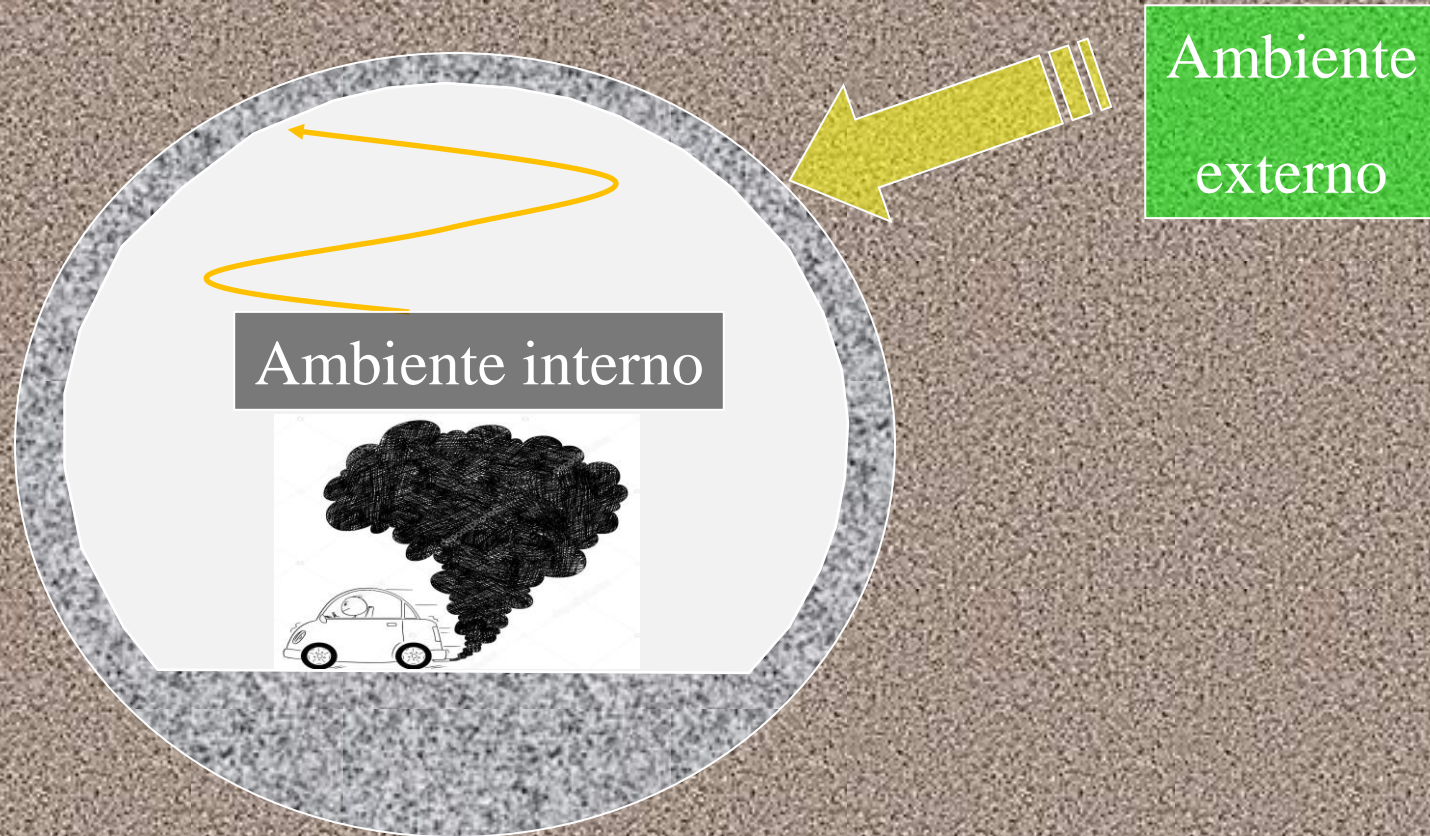
Não faz sentido especificar relação a/c máxima para concreto projetado via seca.

(FIGUEIREDO, 1997)

Absorção de água



Condições de exposição



Histórico de pesquisas

- Avaliação de obras acabadas (READING, 1965; SIMONDI, NEGRO, KUPERMAN, 1982)
- Permeabilidade à água (DANTAS e TANGO, 1990 e ARMELIN Et. Al. 1994)
- Difusão iônica (Cloretos e Sulfatos) associada à perda de desempenho (PRUDÊNCIO, 1993)
- Galan, I.; Baldermann, A.; Kusterle, W.; Dietzel, M.; Mittermayr, F. **Durability of shotcrete for underground support – Review and upadate.** Construction and Building Materials. 202 (2019) 465-93.
- Renan → próxima aula.

Permeabilidade do concreto projetado

- ◆ Há muito se discute (ITA, 1998)
- ◆ A “necessidade de um túnel estanque”:
 - ◆ Proteção contra agentes agressivos
 - ◆ Controle do nível de água do sub-solo
 - ◆ Proteção das instalações
 - ◆ Lixiviação

Papel do concreto projetado na impermeabilização

- ◆ O próprio concreto projetado proporciona por si só uma certa impermeabilização.
- ◆ Em muitos túneis, ele é o único responsável por isso.
- ◆ O revestimento de concreto projetado é a base para qualquer sistema de impermeabilização que venha a ser instalado.
- ◆ Quanto menos água passa pelo concreto projetado, menos se exige do sistema de impermeabilização.

Comparando concreto projetado com o convencional

Material	K (cm/s)	Vazios permeáveis (%)
Concreto convencional	$3,41 \times 10^{-9}$	12,9
Concreto projetado	$< 10^{-11}$	15,1
Concreto projetado do revestimento do túnel		
Via seca	10^{-8} a 10^{-10}	12,4
Via úmida	$\sim 10^{-11}$	14,4

DANTAS & TANGO (1990) e ARMELIN et alii (1994)

Efeito da permeabilidade

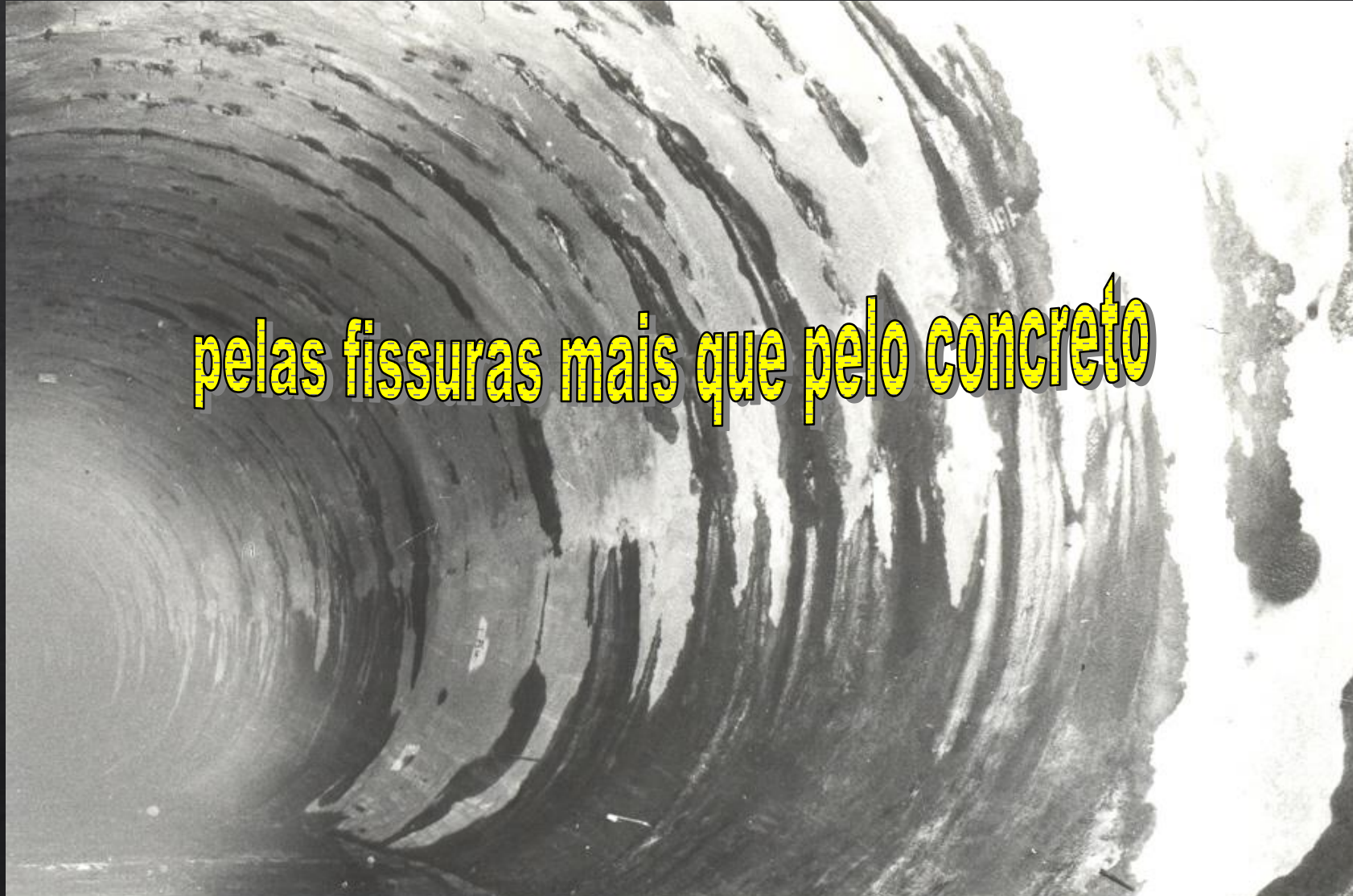
- o Dados de partida

- $K \sim 10^{-10}$
- 20 m.c.a.
- espessura $\sim 15\text{cm}$


- o Darcy:

- Vazão de água: $\sim (0,48\text{cm}^3/\text{hora})/\text{m}^2$
- Tempo do percurso: ~ 35 anos

Mas se a permeabilidade do concreto projetado é baixa, logo os túneis não vazam?



pelas fissuras mais que pelo concreto

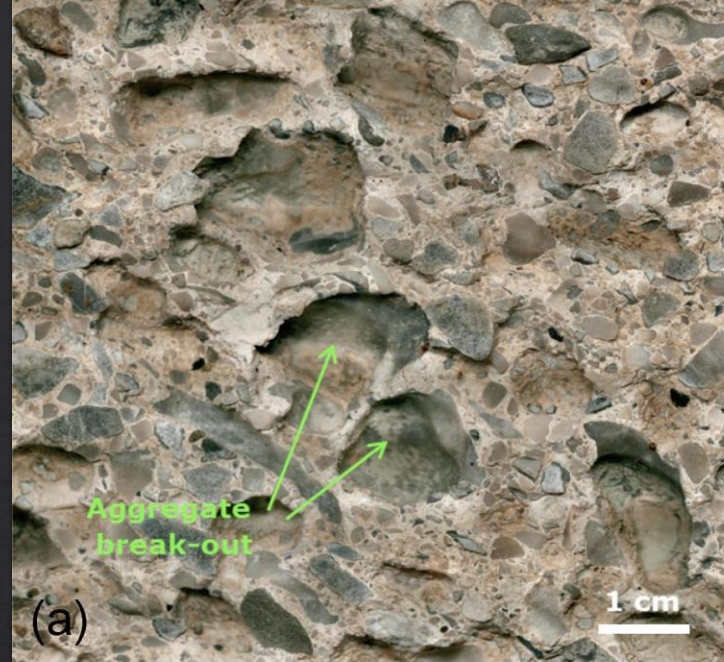


Permeabilidade do
material
X
Permeabilidade da
estrutura

A água sempre encontra o
caminho mais fácil

Lixiviação

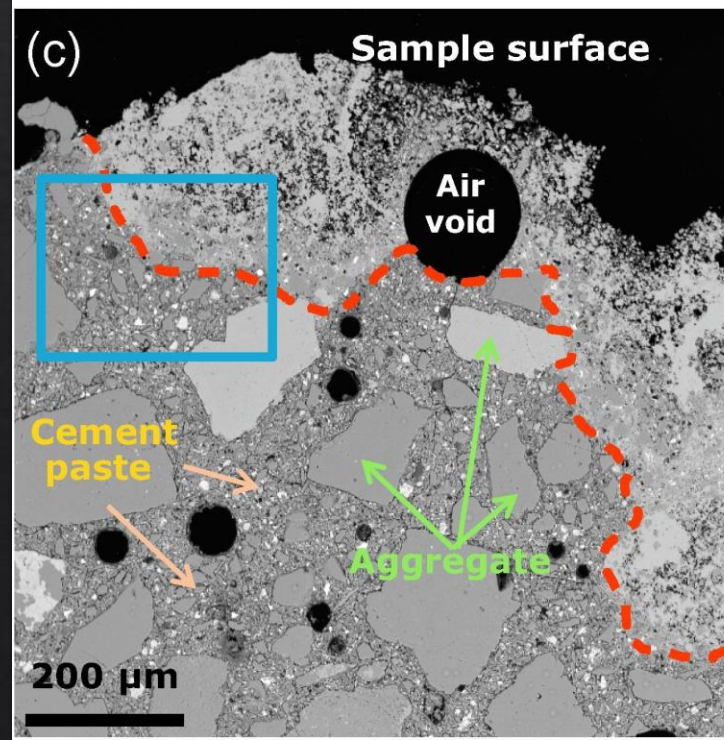
(a) lixiviação da pasta liberando agregados



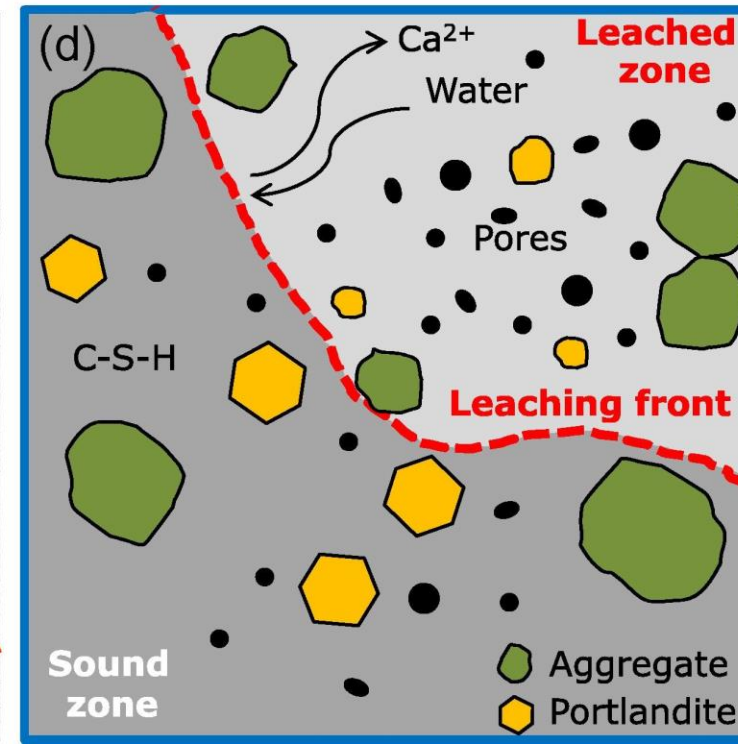
(b) Cps expostos a ataque ácido brando



(c) Microestrutura de superfície lixiviada



(d) Esquema de regiões lixiviadas e sãs.



O que ter em mente?

- ◆ Não basta controlar a compacidade/resistência do concreto projetado: deve-se controlar fissuração.
- ◆ Quanto mais exigência de resistência final, maior é o consumo de finos e, conseqüentemente, maior o nível de retração/fissuração

Consequências:

Maior o nível de resistência final →
menor deve ser a porosidade final →
maior é o consumo de pasta →
maior o consumo de finos →
maior a retração →

Mais intensa é a fissuração

Maior o nível de resistência inicial →
maior é o teor de aditivo acelerador
→
maior é a porosidade →
menor resistência final →
maior o consumo de finos →
maior a retração →

Mais intensa é a fissuração

Consequências:

Maior o nível de resistência inicial →

Maior o nível de resistência final →

Ainda mais intensa é a fissuração

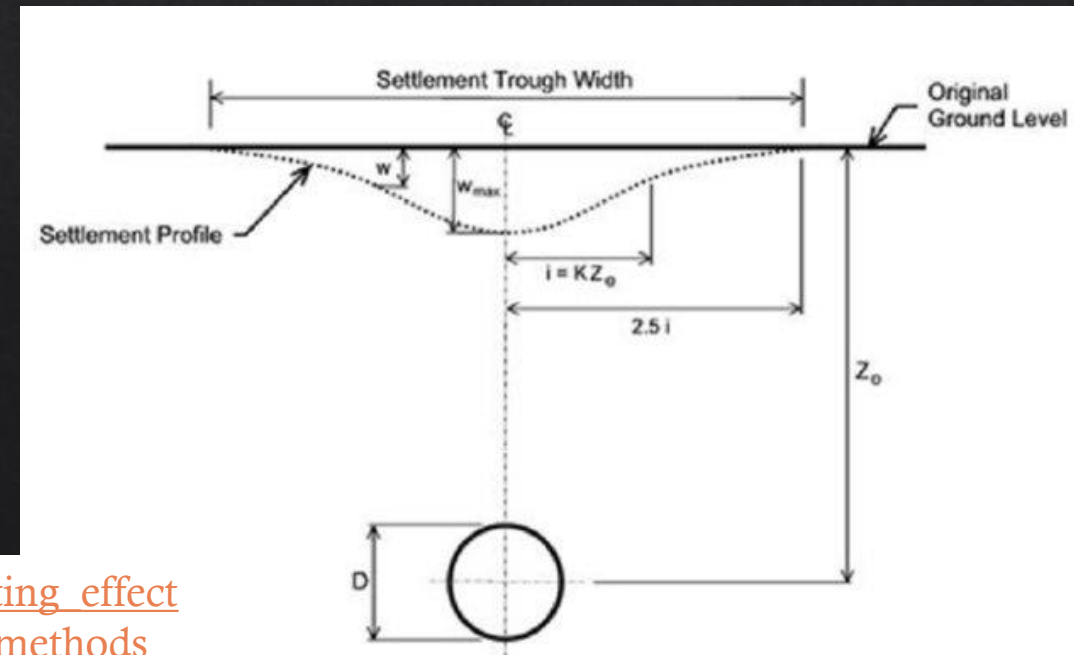
Cuidados na especificação:

- ◆ Não basta simplesmente copiar modelos do concreto convencional
- ◆ Exigências de desempenho devem ser compatíveis com a utilização

Possíveis estratégias para controlar fissuras

- ◇ Uso de fibras pode colaborar:
 - ◇ Controle de fissuração no ELS
- ◇ Há outras possibilidades como o uso de agentes compensadores de retração, mas há riscos de desenvolvimento de tensões elevadas pelo confinamento.

- ◇ É importante controlar a permeabilidade da estrutura?
- ◇ Por que?



Por que controlar a permeabilidade do revestimento primário?



- ◆ No caso de manta de impermeabilização:
 - ◆ Diminuição da necessidade de bombeamento mais intensivo da água. (guarda-chuva)
 - ◆ Diminuição da pressão hidrostática (submarino)

Por que controlar a permeabilidade do revestimento primário?

- ◆ No caso da membrana, o concreto projetado terá um papel ainda mais relevante devido ao contato direto (Túnel Fernando Vieira de Mello – sob a Av. Faria Lima)



Por que controlar a permeabilidade do revestimento primário?

- ◆ Garante melhores condições de aplicação da membrana:
 - ◆ Diminuirá a umidade da superfície de aplicação.
 - ◆ Facilita a obtenção de espessura mínima.
 - ◆ Diminuindo a fissuração do revestimento primário diminui a probabilidade de espelhamento das fissuras para a camada de impermeabilização.

Comentários finais

- ◆ Quanto maior for a redução da fissuração do concreto projetado do revestimento primário, tanto mais fácil será a obtenção de um sistema de impermeabilização eficiente para o túnel.
- ◆ Deve-se especificar o concreto projetado de maneira adequada, evitando-se exigir relações água/cimento máximas, por exemplo.
- ◆ A estanqueidade da estrutura não depende unicamente da baixa permeabilidade do material, mas também pelo controle do seu nível de fissuração.
- ◆ Qualquer que seja a situação para a qual se concebeu a estrutura de um túnel NATM, é fundamental se garantir a correta especificação de requisitos de desempenho e um baixo nível de fissuração do concreto projetado do revestimento primário de modo a aumentar a eficiência do sistema de impermeabilização.

Àgua não é o único problema!

Carbonatação e calcificação

1. CO₂ atmosférico ou do meio aquoso penetra nos **poros do concreto** por difusão
2. Dissolução do CO₂ na água dos poros
$$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$$
3. Carbonatação reduz pH da pasta
$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$$

pH >12 pH < 9,4

Corrosão das armaduras e desestabilização do concreto

Em ambientes secos (HR < 65%) e subaquático corrosão não é problema. Túnel é potencial problema.

Carbonatação e calcificação

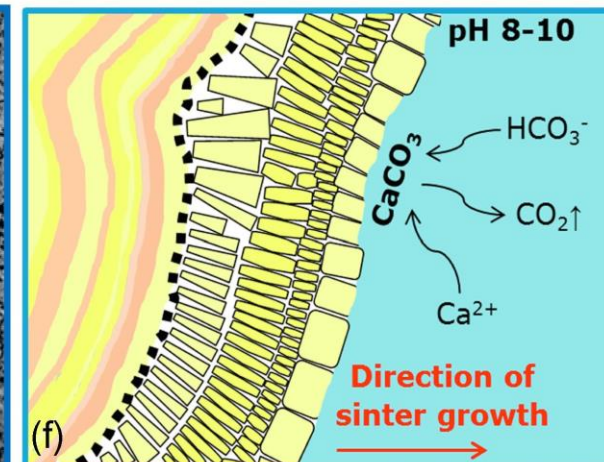
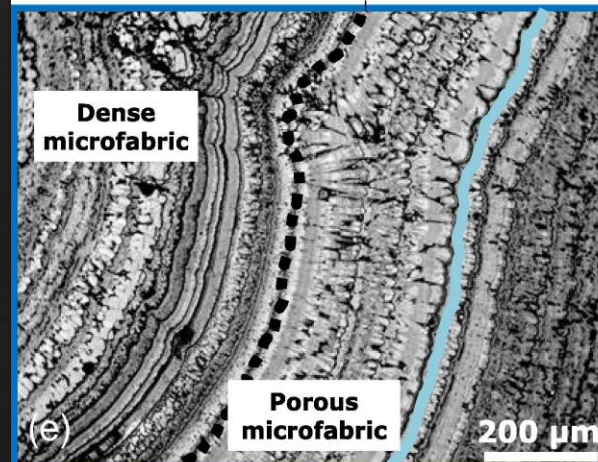
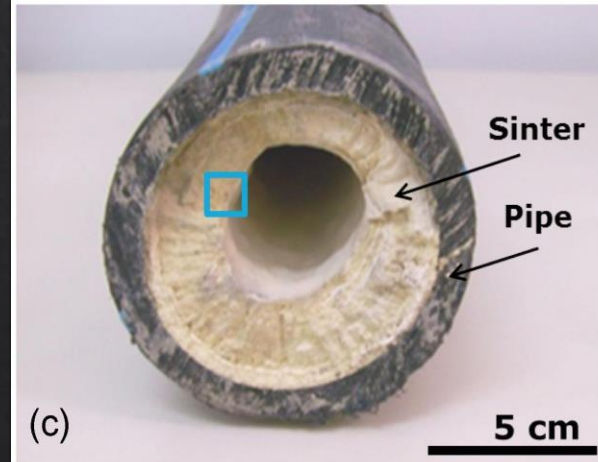
(a) e (b) lixiviação do material carbonatado

(c) Colmatação por carbonato lixiviado

(d) Deposição de carbonato em calha

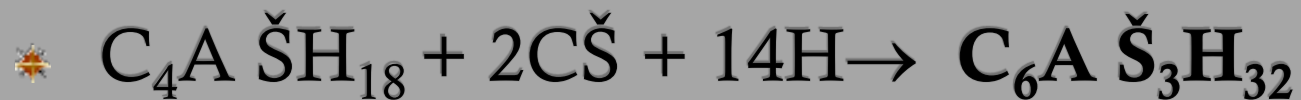
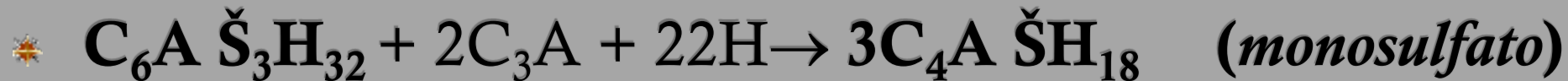
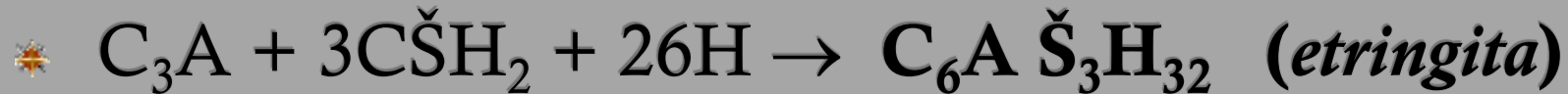
(e) Esquemas do crescimento do carbonato depositado

Galan, I.; Baldermann, A.; Kusterle, W.; Dietzel, M.; Mittermayr, F. **Durability of shotcrete for underground support – Review and update**. Construction and Building Materials. 202 (2019) 465-93.



Ataque por sulfato

◇ Expansão por ação dos sulfatos, no concreto endurecido:



Servando Chinchón-Payá; Izelman Oliveira;
Antonio Aguado; Antonio Aguado; Servando
Chinchón. The Sulfate Attack in Concrete by
Degradation of Iron Sulfides and the Effect of the
Host Rock. Conference: XII DBMC.
International Conference on Durability of
Building Materials and Components. April 2011.



ATAQUE DE SULFATOS (PRUDÊNCIO, 1993)

Tempos necessários em anos para a frente de íons atingir uma profundidade de 40mm.

<i>Tempo estimado</i>	<i>Amostra 1</i> <i>0% de aditivo</i>	<i>Amostra 2</i> <i>3,5% de aditivo</i>	<i>Amostra 3</i> <i>2,5% de aditivo</i>	<i>Amostra 4</i> <i>4,5% de aditivo</i>	<i>Amostra 5</i> <i>6,5% de aditivo</i>	<i>Amostra 6</i> <i>3% de aditivo</i>
Médio	809	629	534	428	364	337
95% de confiança	554	287	232	97	150	235

Traço 1:4,5:0,44 com 0,5% de superplastificante e 7% de microssílica.

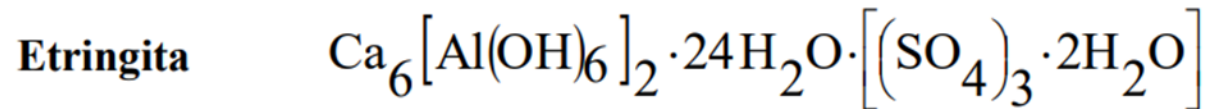
Exceções:

Amostra 2 com 0% de superplastificante

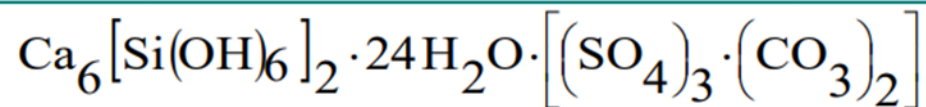
Amostra 6 com $a/c = 0,54$

Ataque por sulfato

- ◆ Pode haver formação de thaumasita, também expansiva e comprometedor do C-S-H.



Taumasita



Prof.. Eduardo C. S. Thomaz Notas de aula

Galan, I.; Baldermann, A.; Kusterle, W.; Dietzel, M.; Mittermayr, F. **Durability of shotcrete for underground support – Review and update**. Construction and Building Materials. 202 (2019) 465-93.



Formação de thaumasita e degradação do concreto em túnel austríaco.

Papel dos aditivos no ataque por sulfato

- ◇ Não basta controlar apenas a “oferta” de aluminato do cimento
- ◇ Os aditivos alcalinos podem contribuir para o aumento da susceptibilidade ao ataque de sulfatos, especialmente aqueles a base de aluminatos de sódio e potássio.
- ◇ Aditivos não alcalinos podem fornecer sulfatos e aluminatos ao mesmo tempo...
- ◇ Aula da próxima semana

ATAQUE DE CLORETOS (PRUDÊNCIO, 1993)

Tempos necessários em anos para a frente de íons atingir uma profundidade de 40mm.

<i>Tempo estimado</i>	<i>Amostra 1</i> <i>0% de aditivo</i>	<i>Amostra 2</i> <i>3,5% de aditivo</i>	<i>Amostra 3</i> <i>2,5% de aditivo</i>	<i>Amostra 4</i> <i>4,5% de aditivo</i>	<i>Amostra 5</i> <i>6,5% de aditivo</i>	<i>Amostra 6</i> <i>3% de aditivo</i>
Médio	2,9	2,1	2,0	1,8	2,0	1,5
95% de confiança	2,0	1,8	1,5	1,4	1,5	1,3

Traço 1:4,5:0,44 com 0,5% de superplastificante e 7% de microssílica.

Exceções:

Amostra 2 com 0% de superplastificante

Amostra 6 com $a/c = 0,54$

Muito por pesquisar

- ◆ Reação álcali-agregados
- ◆ Ataques ácidos.
- ◆ Hidrocarbonetos/Bactérias.
- ◆ Necessidade de aprimoramento e de desenvolvimento contínuo
- ◆ Inovações tecnológicas
- ◆ Pesquisa é fundamental
- ◆ Participação dos proprietários de obras para parametrização real das condições de durabilidade.
- ◆ Estudos de laboratório possuem a virtude de demonstrar susceptibilidades, mas não governam comportamentos complexos das obras reais em sua totalidade.