

Durabilidade do Concreto Projetado



Antonio D. de Figueiredo

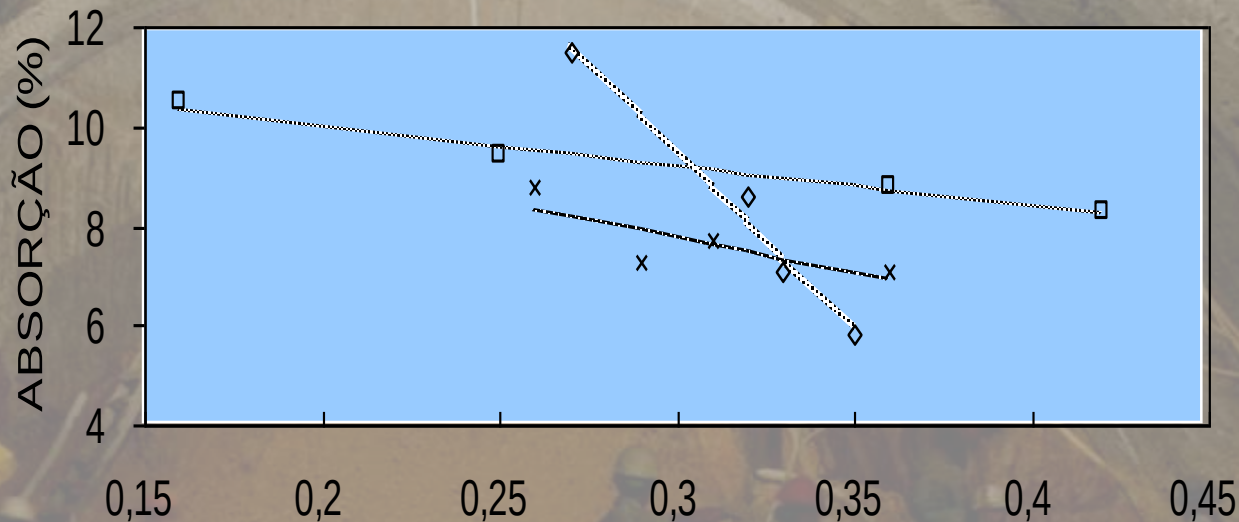
Durabilidade do concreto projetado

- A durabilidade do túnel é definida pela 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

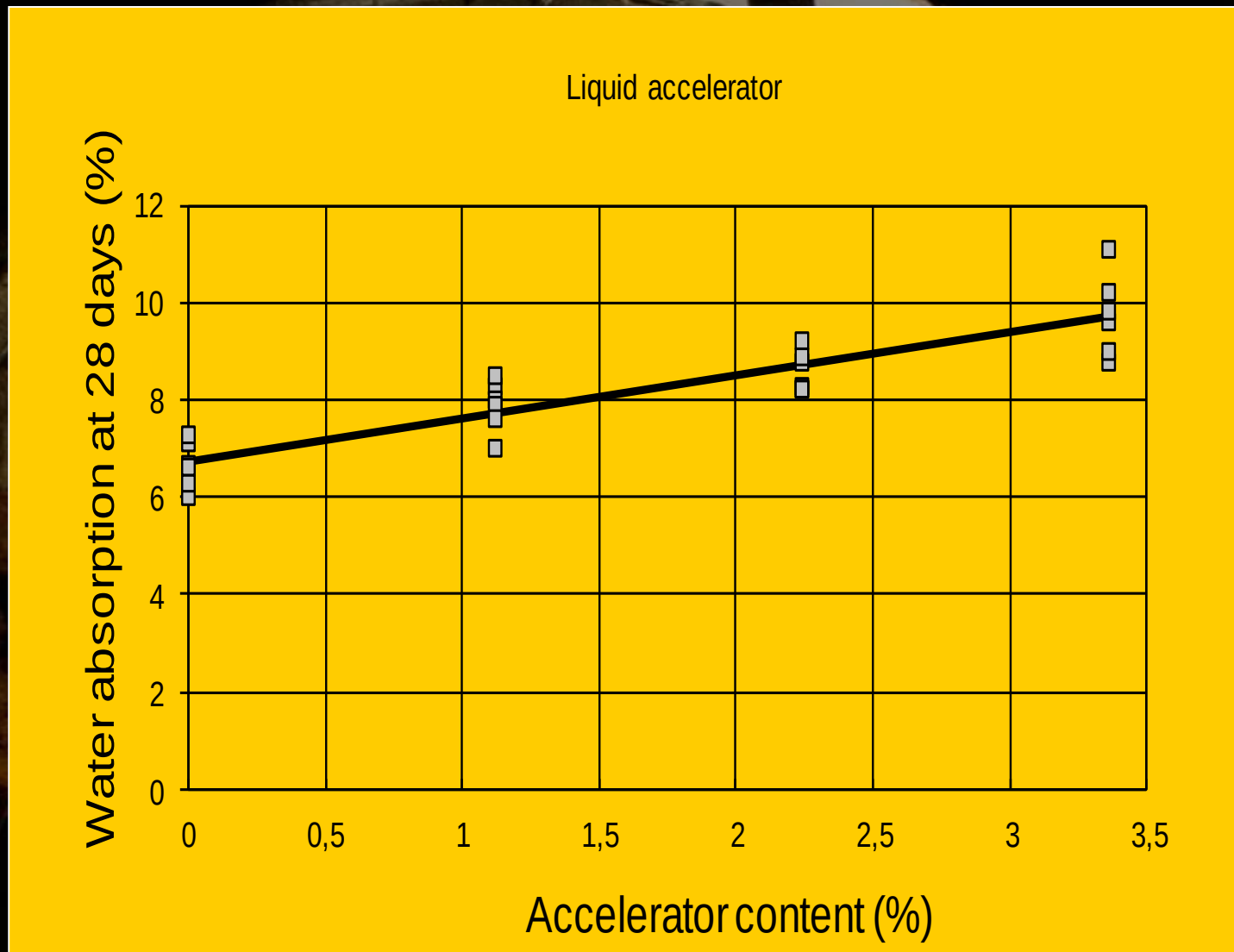
Correlação entre relação água/cimento e absorção (não convencional)



Não faz sentido especificar relação água/cimento máxima para concreto projetado via seca.

(FIGUEIREDO, 1997)

Absorção de água

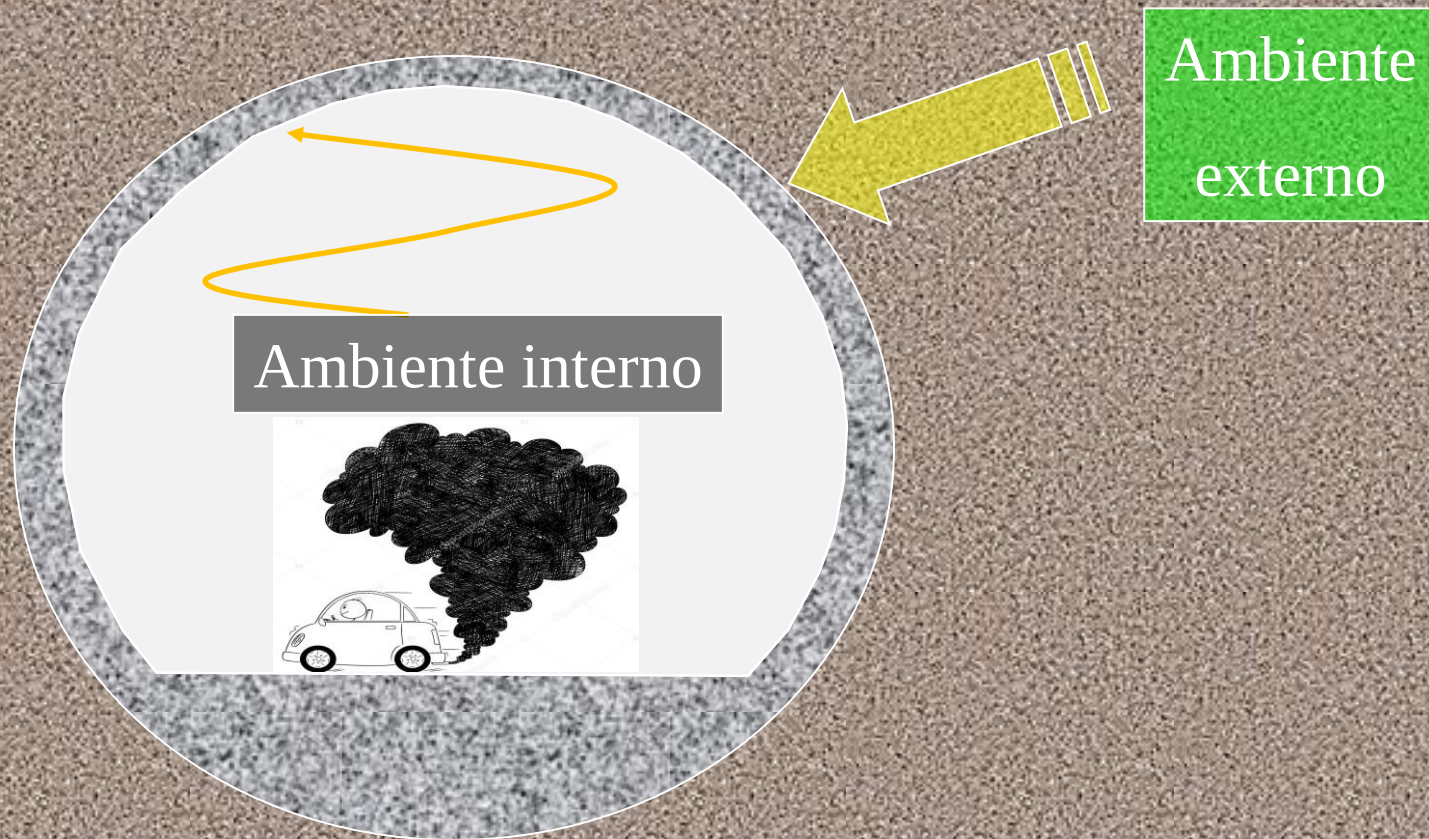


□ Results — Regression

Relação entre relação água/cimento e absorção (não convencional)

- Pode-se definir relação água/cimento máxima para concreto projetado?
- Quando?
- Os parâmetros são os mesmos do concreto convencional?
- E a absorção?
- Aditivos químicos podem alterar a susceptibilidade do concreto projetado?

Condições de exposição

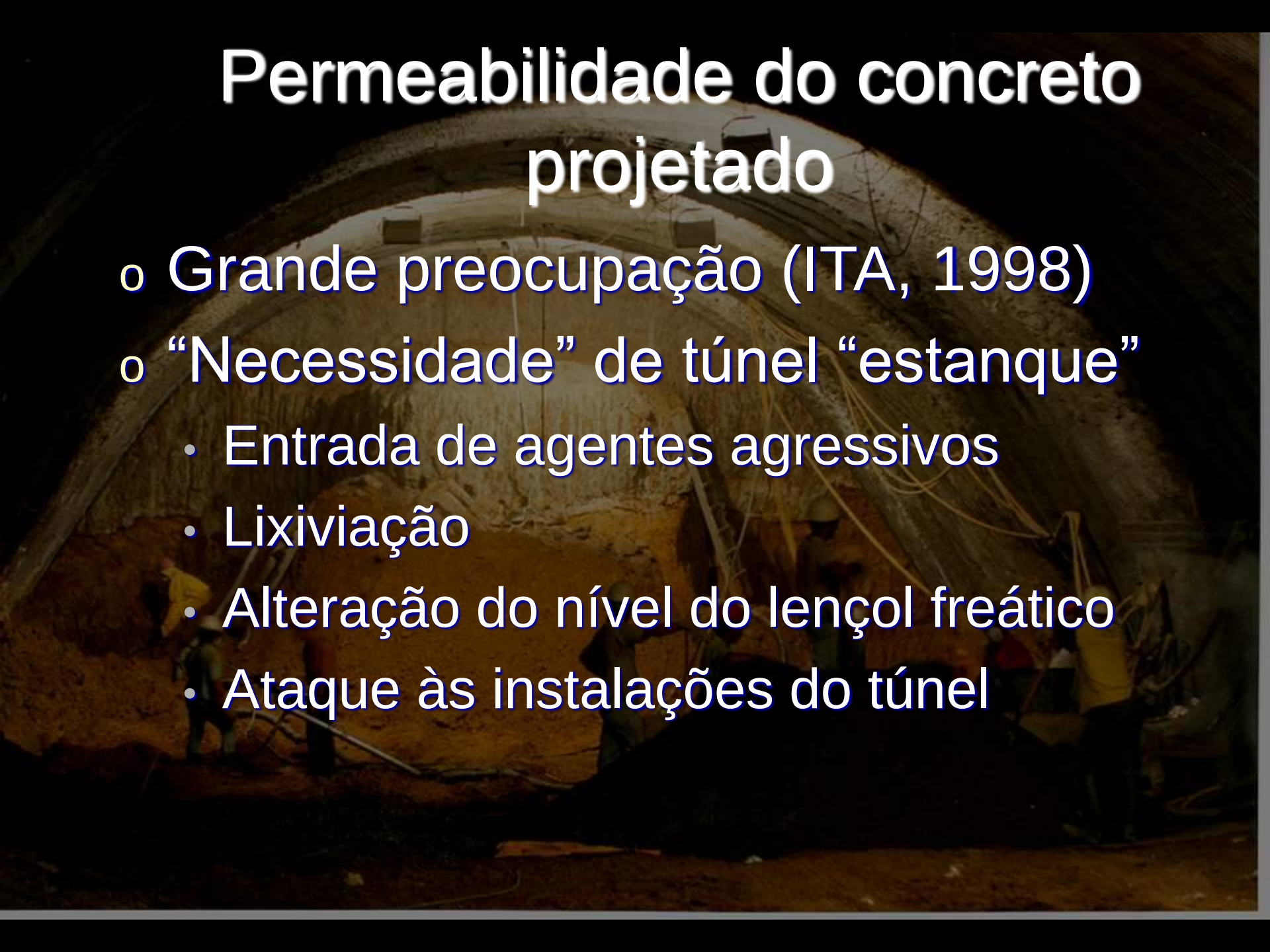


Histórico de pesquisas

- o Avaliação de obras acabadas (READING, 1965; SIMONDI, NEGRO, KUPERMAN, 1982)
- o Permeabilidade à água (DANTAS e TANGO, 1990 e ARMELIN Et. Al. 1994)
- o Difusão iônica (Cloretos e Sulfatos) associada à perda de desempenho (PRUDÊNCIO, 1993)
- o 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.

Permeabilidade do concreto projetado

- o Grande preocupação (ITA, 1998)
- o “Necessidade” de túnel “estanque”
 - Entrada de agentes agressivos
 - Lixiviação
 - Alteração do nível do lençol freático
 - Ataque às instalações do túnel



Resultados de permeabilidade do concreto projetado

Traços:

Concreto projetado = 1:1,92:2,08

Concreto convencional = 1:1,93:2,36

Cimento: CP 32

Areia: MF = 2,67

$\Phi_{\max.} = 2,4\text{mm}$

Pedrisco: MF = 5,25

$\Phi_{\max.} = 12,5\text{mm}$

Brita 1: MF = 6,95

$\Phi_{\max.} = 19,0\text{mm}$

Pressão de água (deionizada) = 210mca

DANTAS e TANGO, 1990

ARMELIN et al., 1994

Resultados de permeabilidade do concreto projetado

Concreto	Posição	K (cm/s)	Absorção(%)	VVP (%)
Tradicional	Teto	8,4x10 ⁻⁹ 4,8x10 ⁻⁹ 12,6x10 ⁻⁹	5,6 5,7	12,7 12,8
	Parede	8,4x10 ⁻⁹ 4,8x10 ⁻⁹ 12,6x10 ⁻⁹	5,9 5,5	13,3 12,4
Projetado	Teto	- <10 ⁻¹¹ <10 ⁻¹¹	8,3 8,3	17,8 17,7
	Parede	<10 ⁻¹¹ <10 ⁻¹¹ <10 ⁻¹¹	7,0 6,9	15,2 15,0

DANTAS e TANGO, 1990

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)

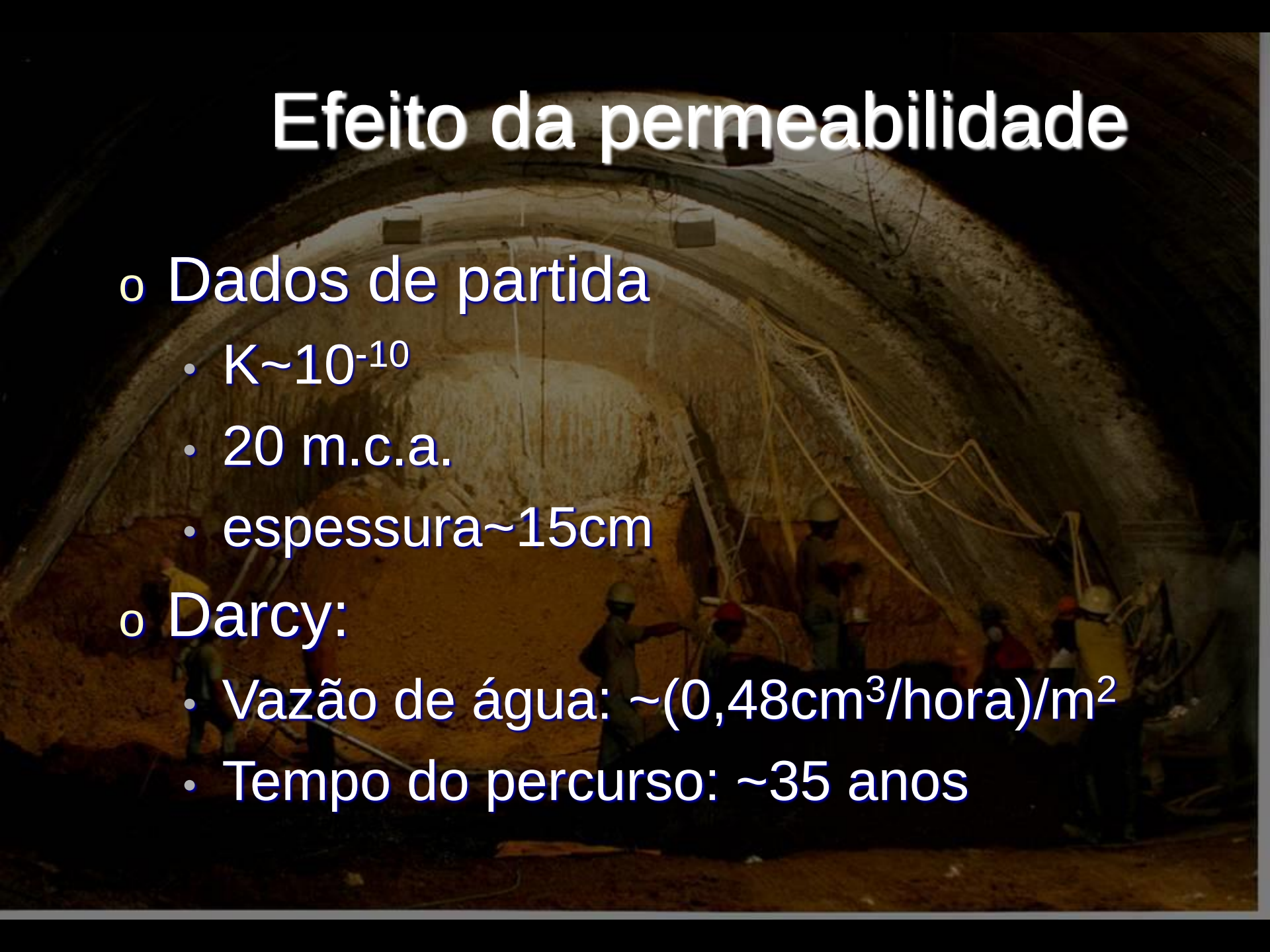
Efeito da permeabilidade

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



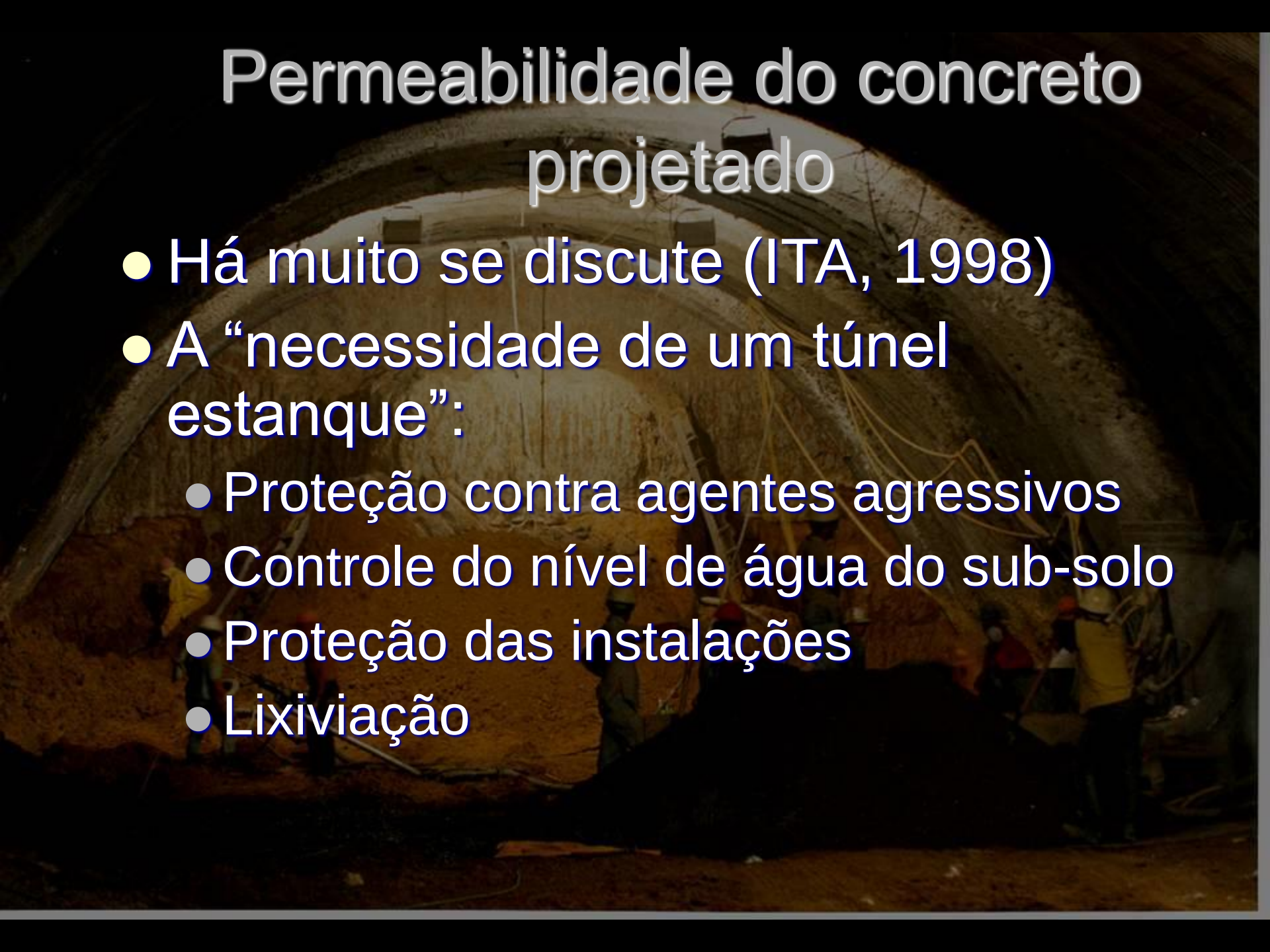


Papel do concreto projetado na impermeabilização

- 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.

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



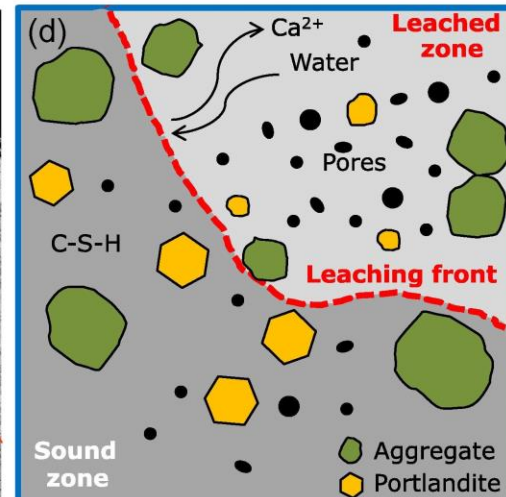
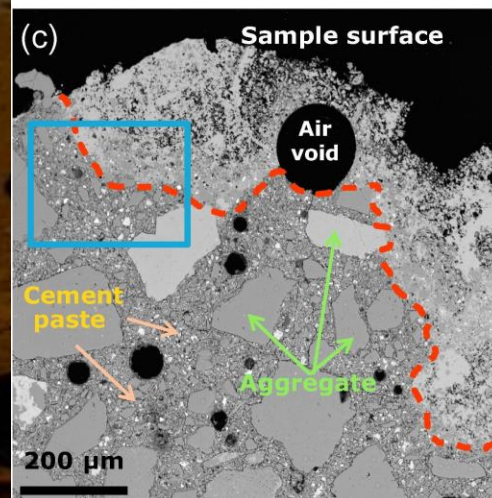
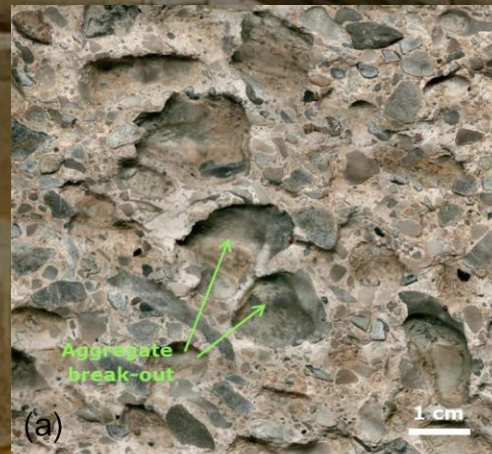
Lixiviação

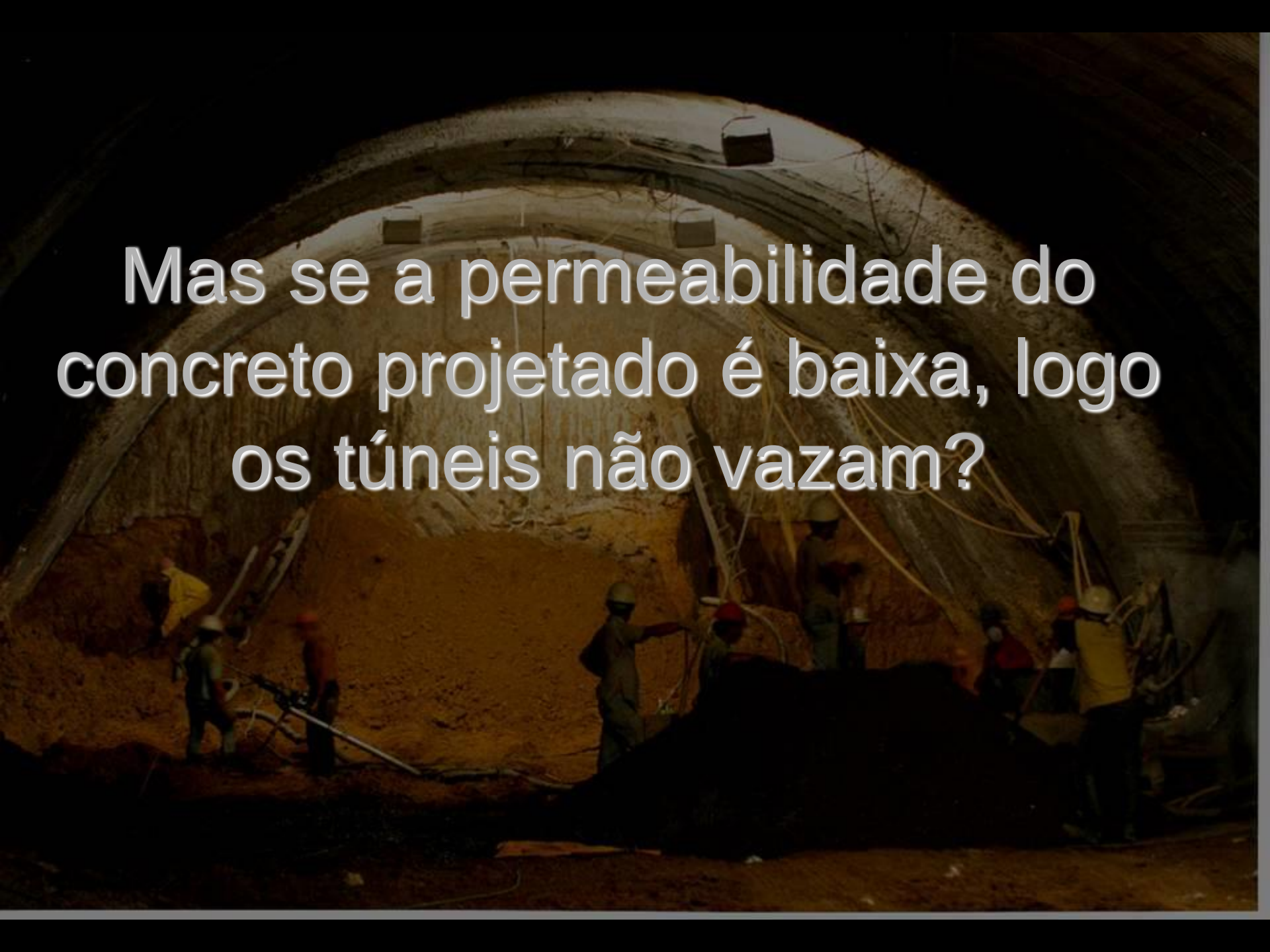
(a) lixiviação da pasta liberando agregados

(b) Cps expostos a ataque ácido brando

(c) Microestrutura de superfície lixiviada

(d) Esquema de regiões lixiviadas e sãs.

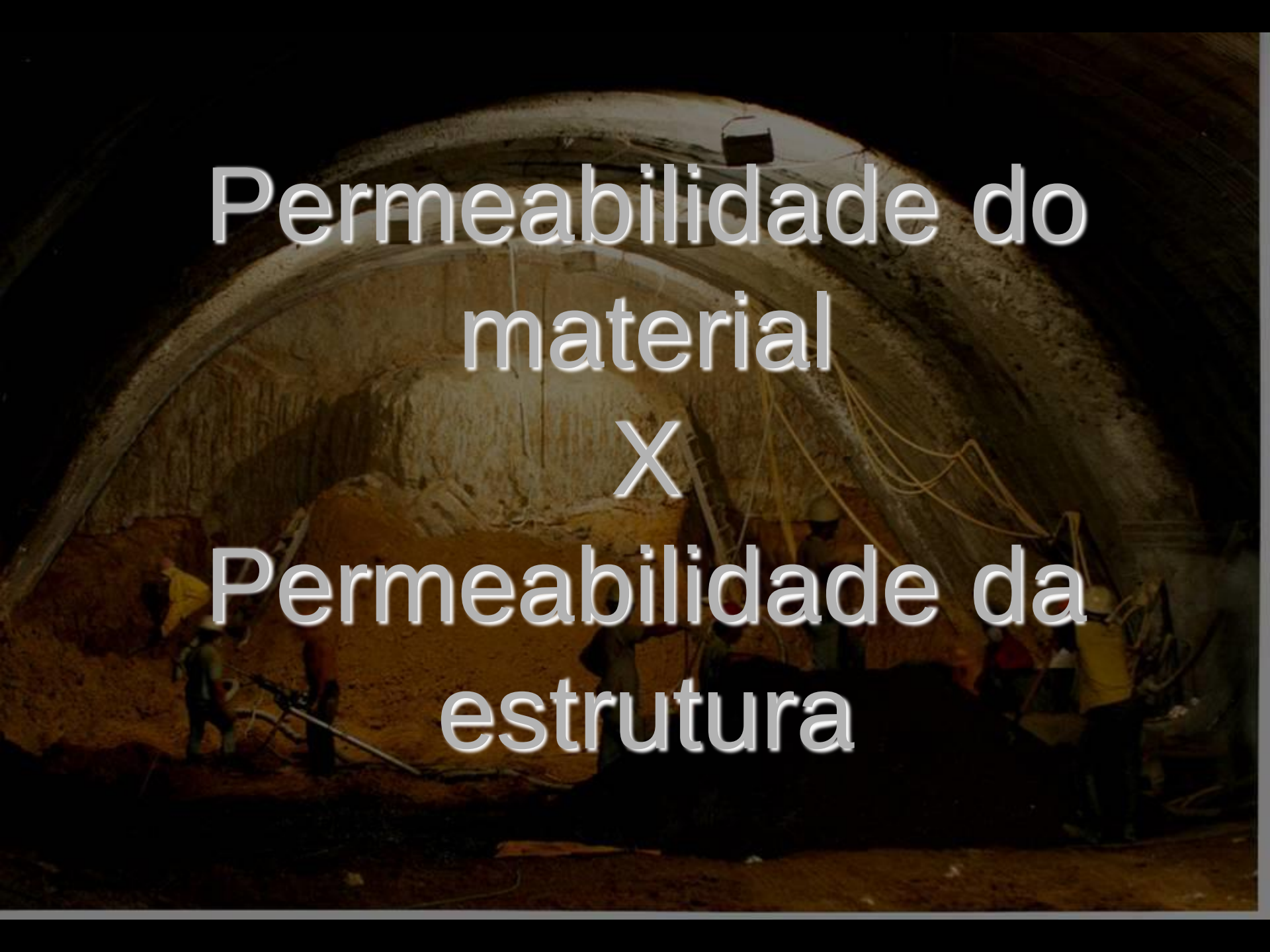


A photograph of a tunnel under construction. The tunnel's interior is dimly lit, with a large, curved concrete structure forming the upper part of the wall. Several workers wearing hard hats and safety gear are visible, some standing and others working with equipment. The ground is uneven and appears to be a mix of dirt and concrete. The overall scene suggests a large-scale engineering project in progress.

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



pelas fissuras mais que pelo concreto

A photograph of a large, arched tunnel under construction. The interior of the tunnel is visible, showing the curved concrete structure. Several workers are standing at the base of the tunnel, and some equipment is visible. The lighting is dim, with a bright light source illuminating the center of the tunnel.

Permeabilidade do
material

X

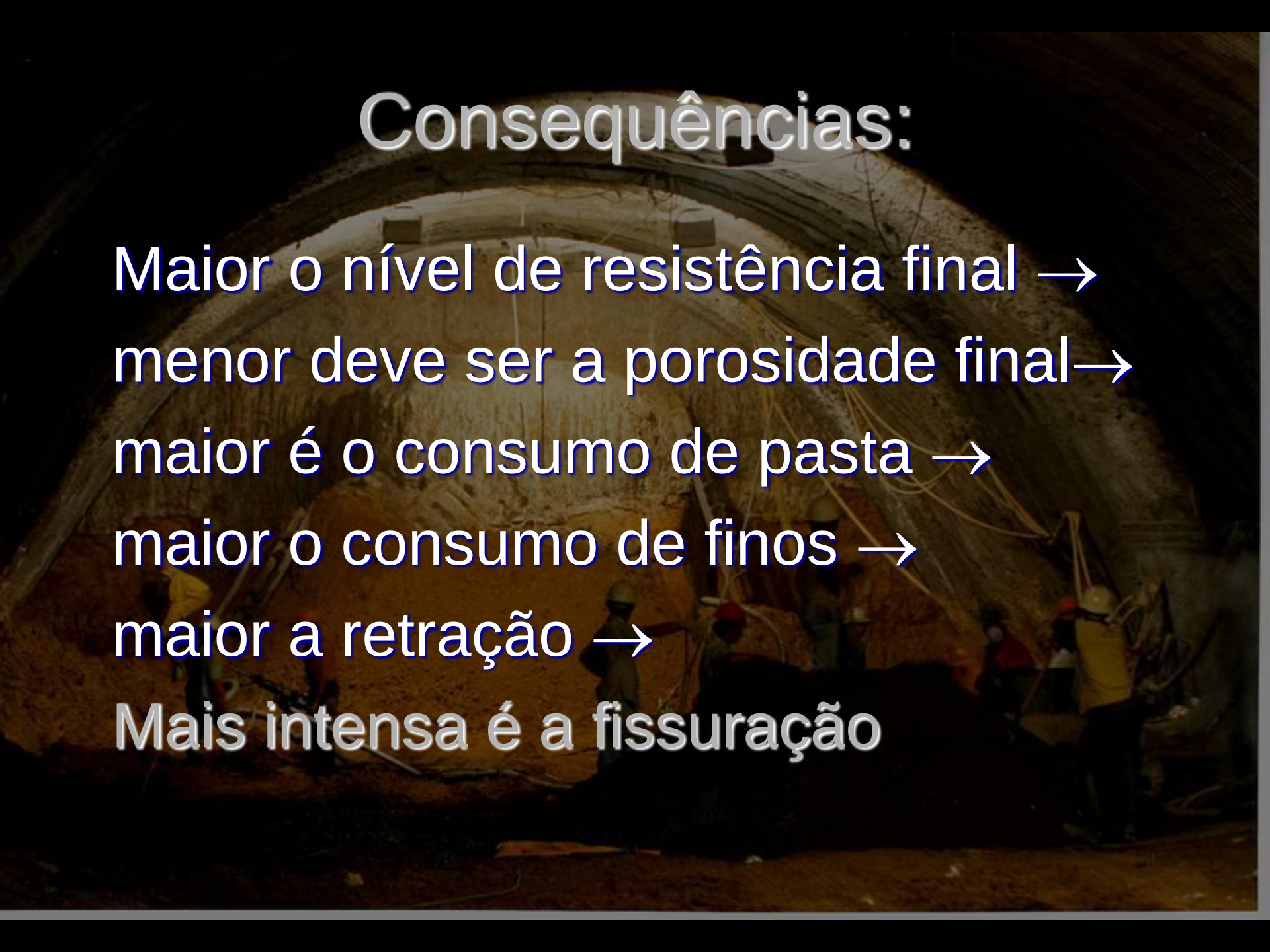
Permeabilidade da
estrutura

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

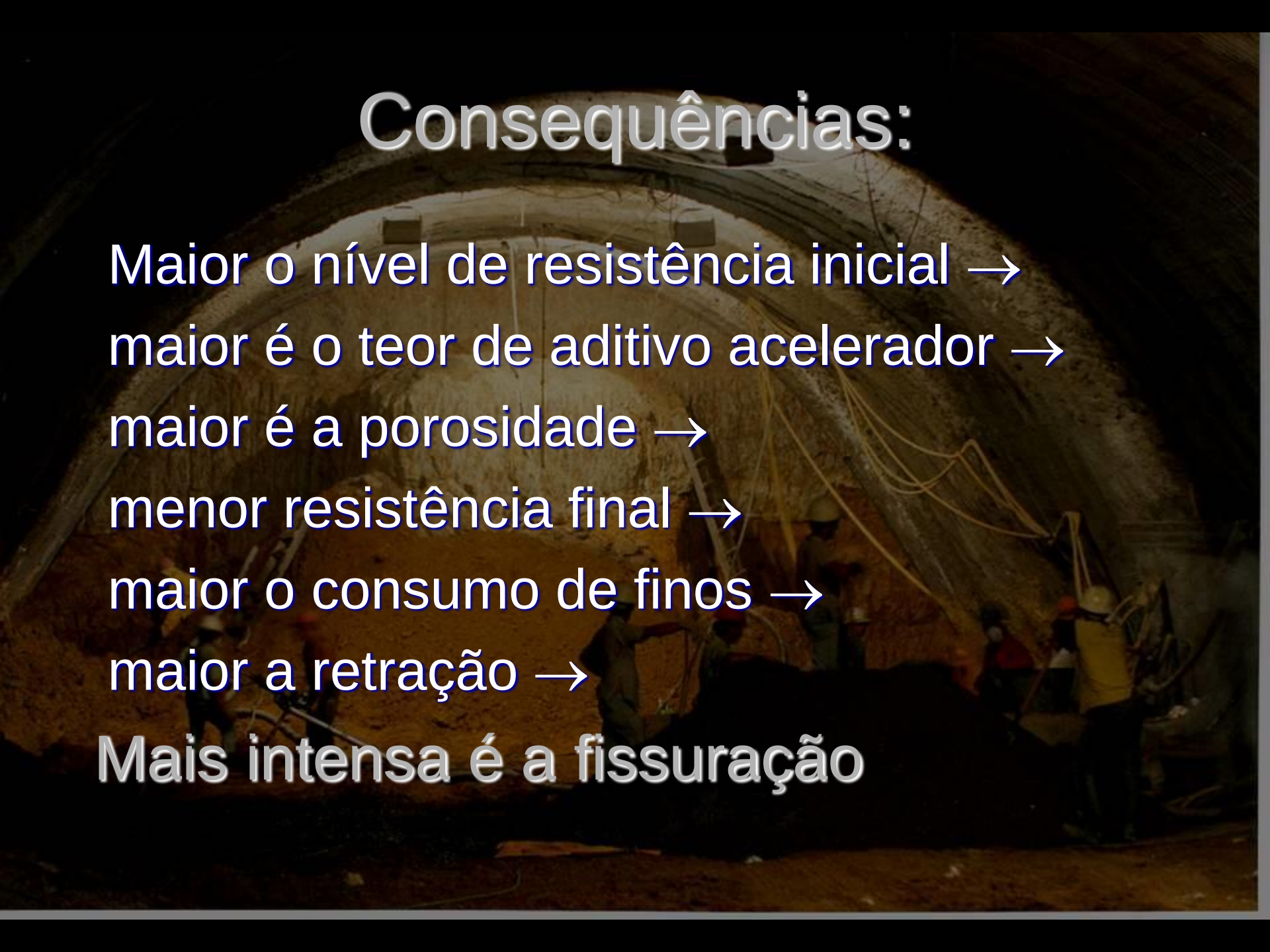
Consequências:

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



Consequências:

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

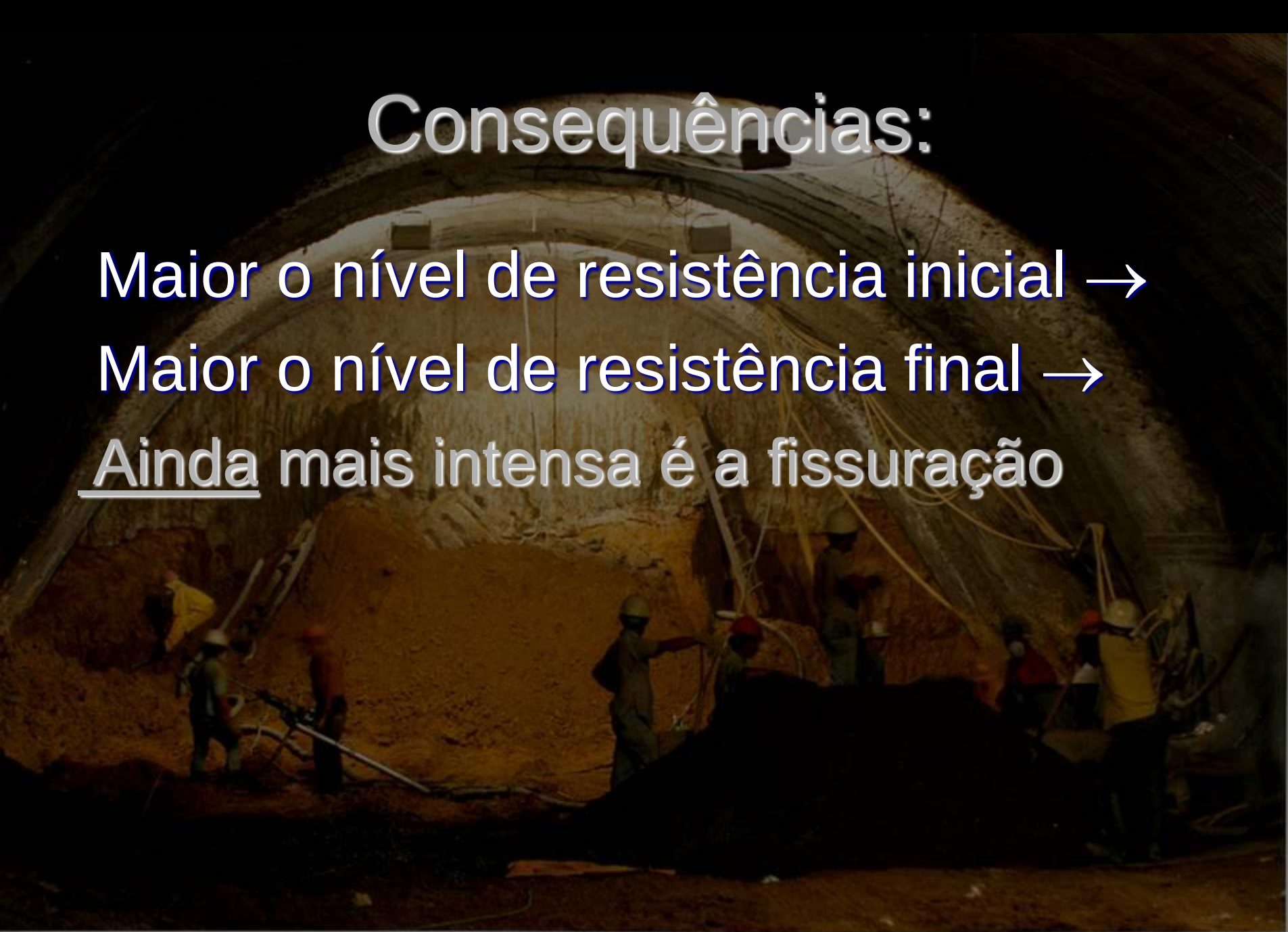


Consequências:

Maior o nível de resistência inicial →

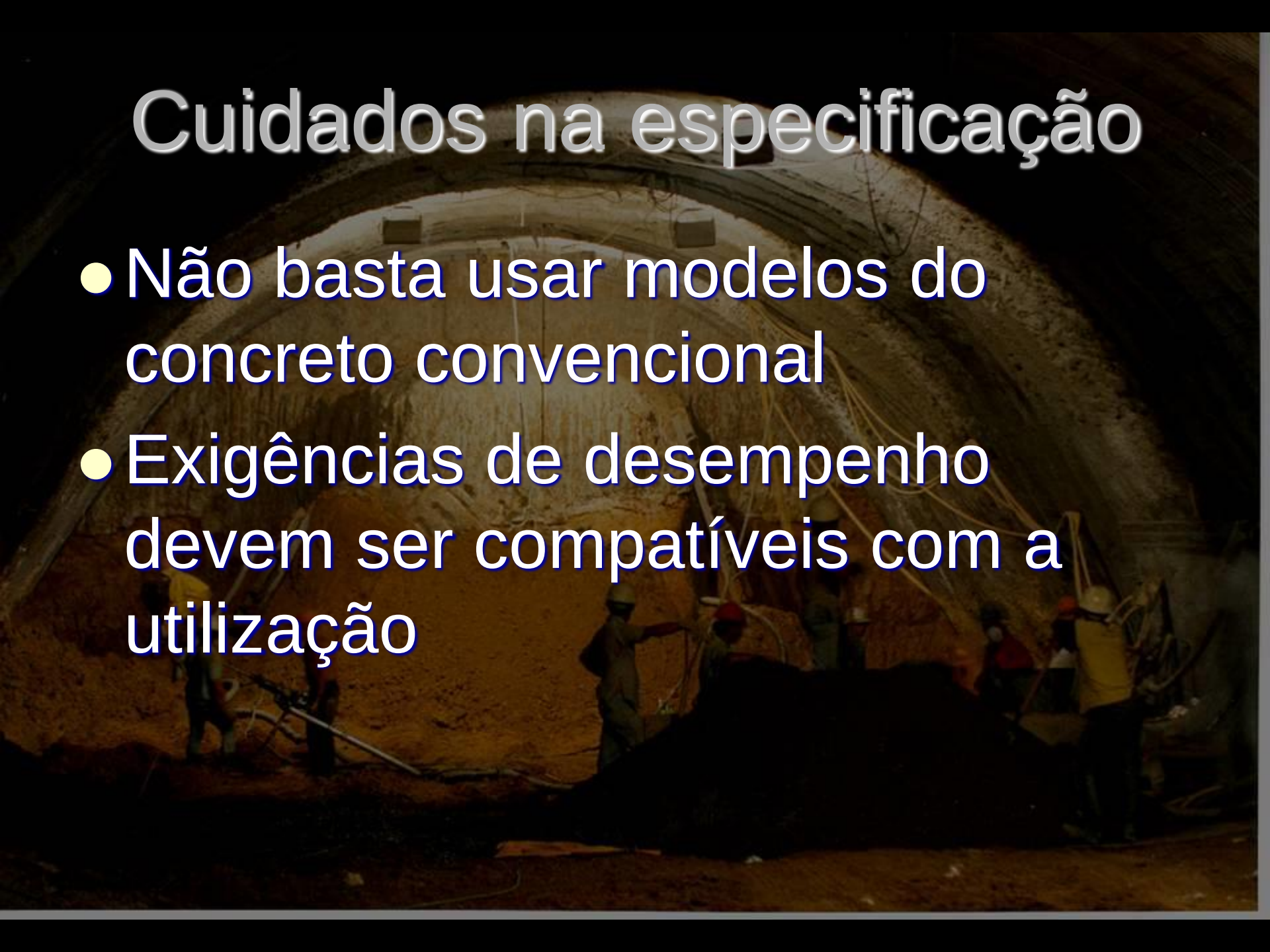
Maior o nível de resistência final →

Ainda mais intensa é a fissuração



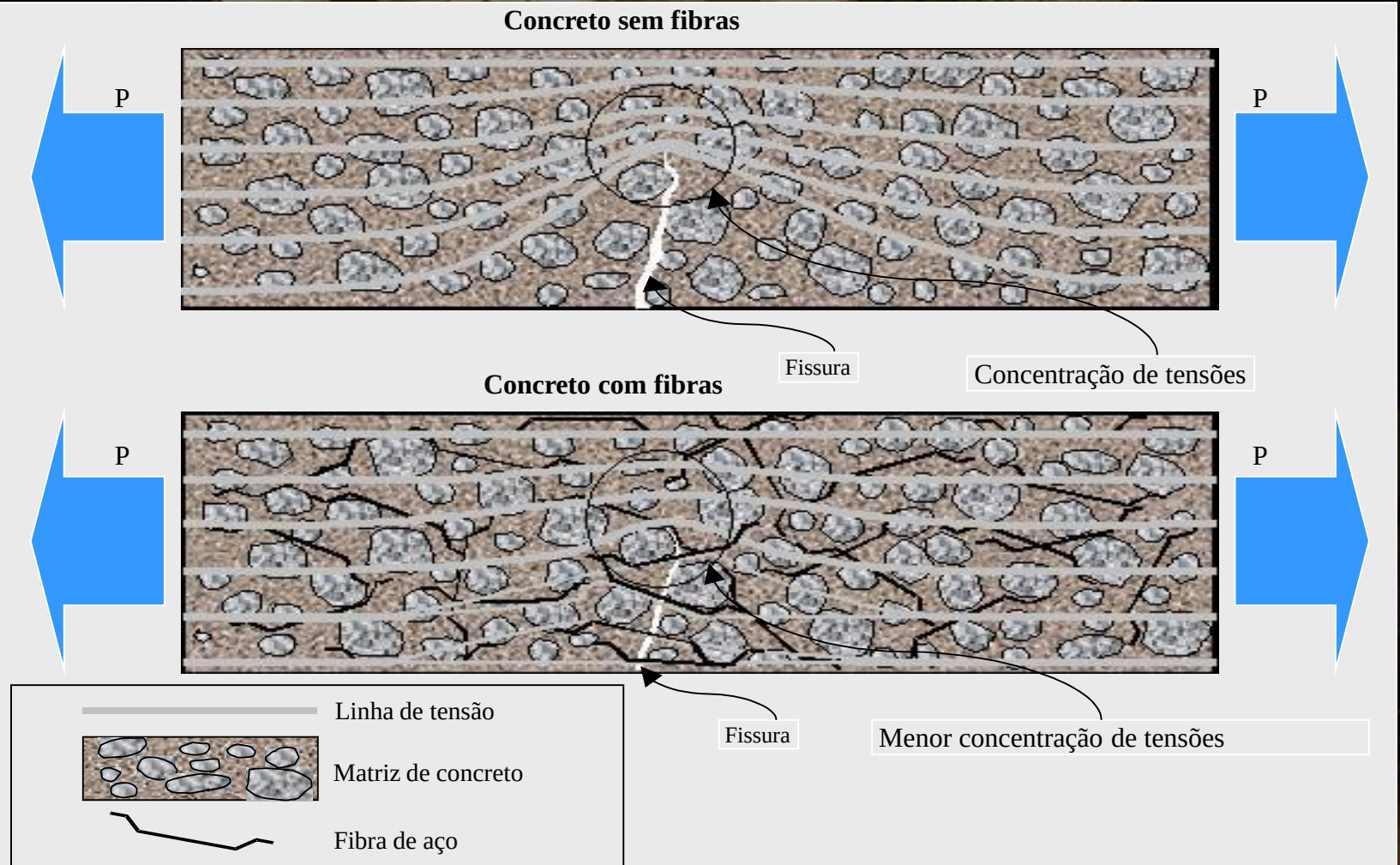
Cuidados na especificação

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



Possível solução para controlar fissuras

- Uso de fibras

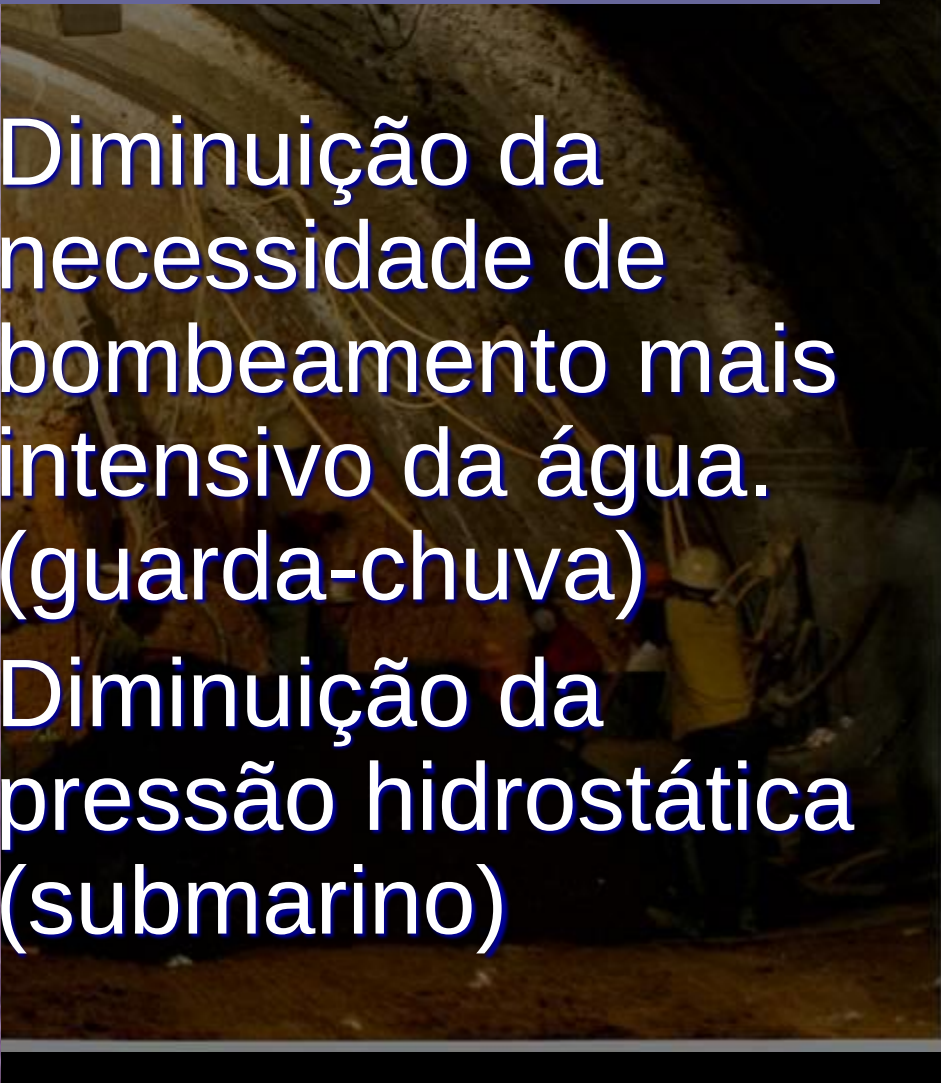


Por que controlar a permeabilidade do revestimento primário?

- No caso de manta de impermeabilização, isto irá minimizar a incidência de água que irá escorrer entre o contato manta/concreto projetado.

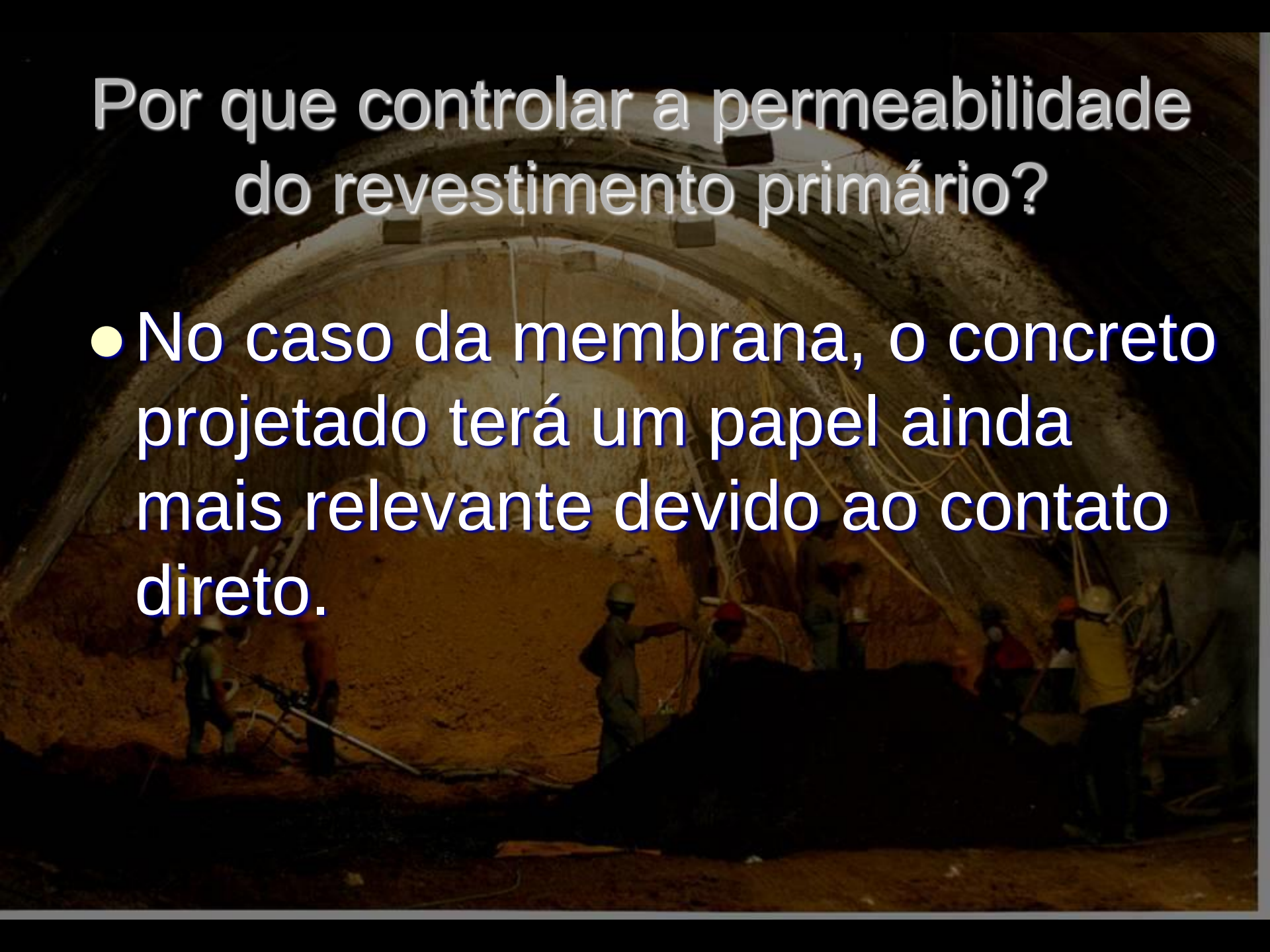
Por que controlar a permeabilidade do revestimento primário?

- 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.

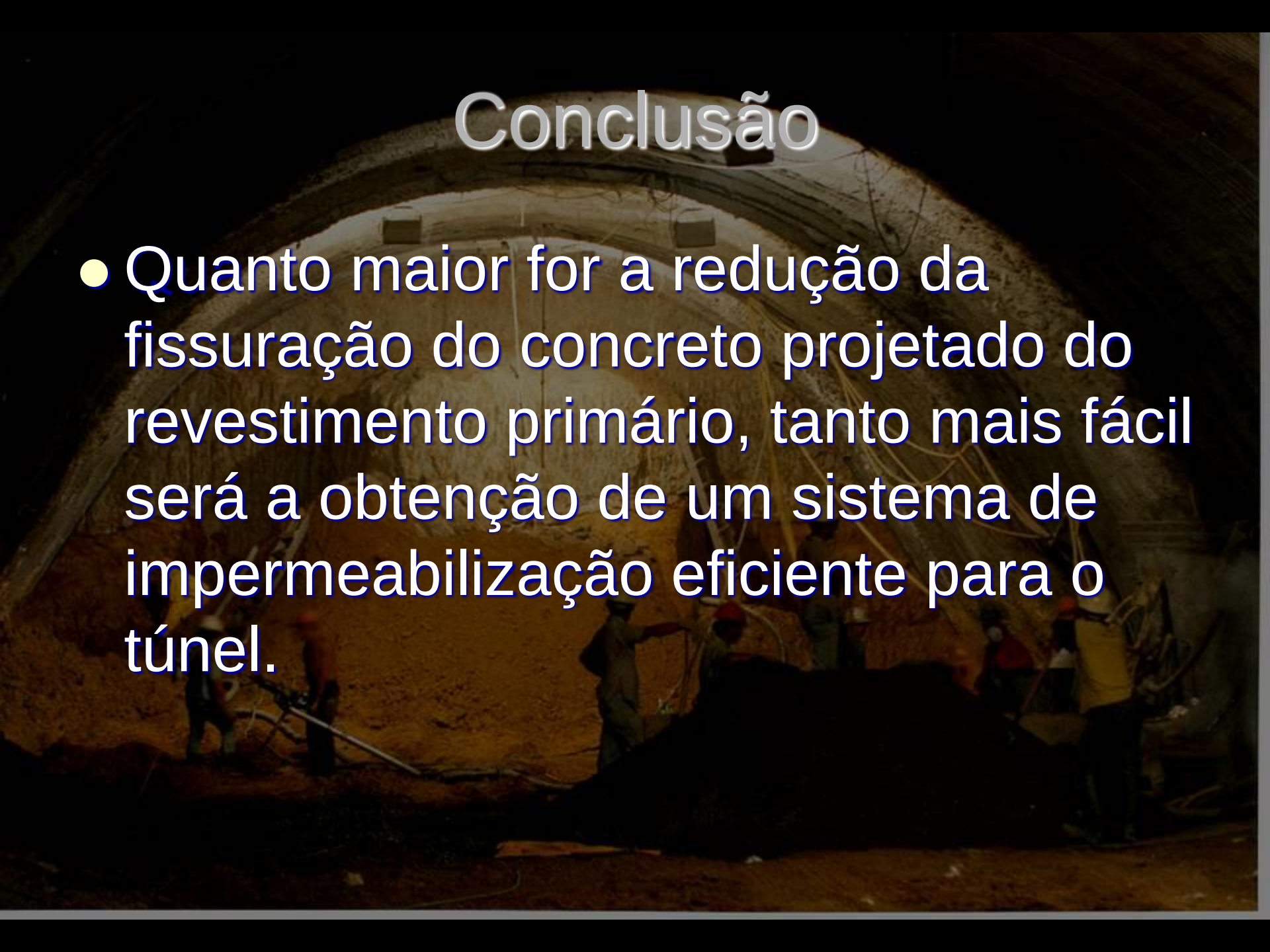


Por que controlar a permeabilidade do revestimento primário?

- 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.

Conclusão

- 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.

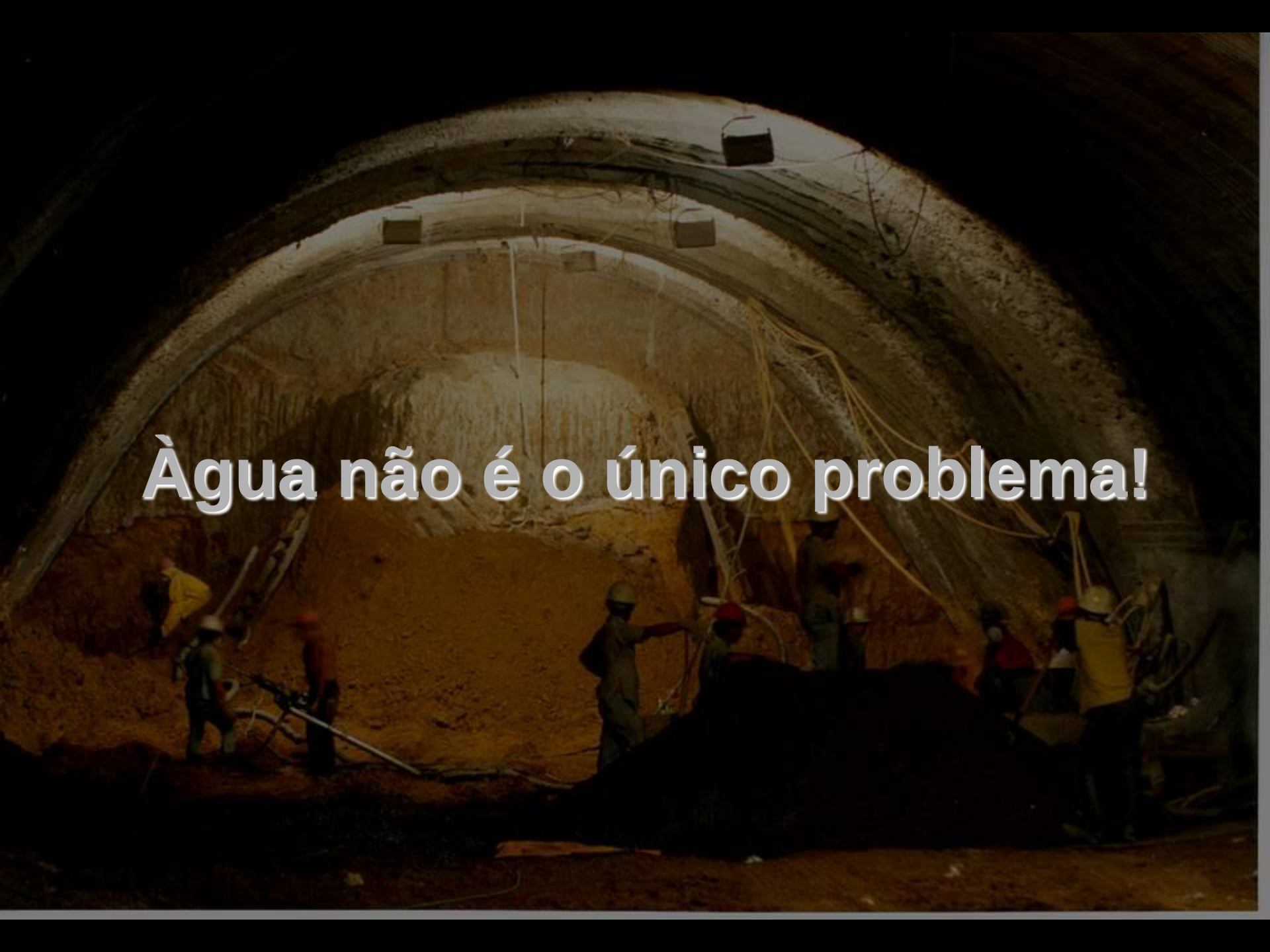


Comentários finais

- 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.

Comentários finais

- 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.



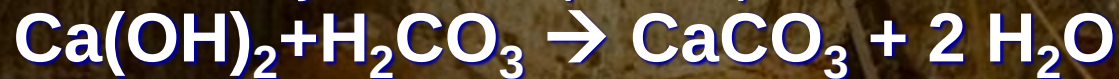
Água não é o único problema!

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



pH >12

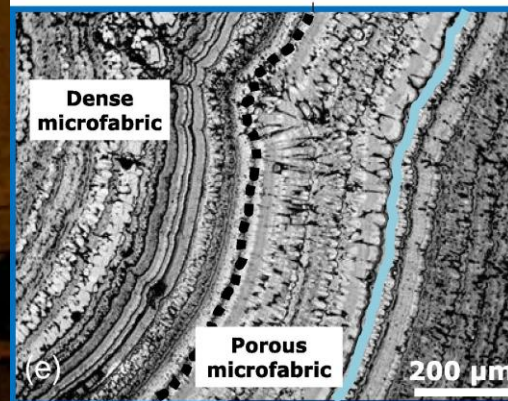
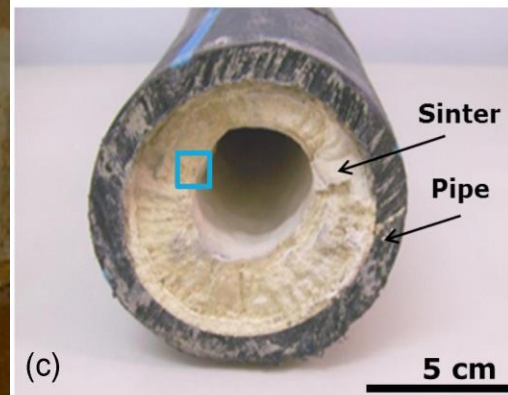
pH < 9,4

Corrosão das armaduras e desestabilização do concreto

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



Ataque por sulfato

- Expansão por ação dos sulfatos, no concreto endurecido:
 - ✱ $C_3A + 3C\check{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\check{S}_3H_{32}$ (*etringita*)
 - ✱ $C_6A\check{S}_3H_{32} + 2C_3A + 22H \rightarrow 3C_4A\check{S}H_{18}$ (*monosulfato*)
 - ✱ $C_4A\check{S}H_{18} + 2C\check{S} + 14H \rightarrow C_6A\check{S}_3H_{32}$ (*etringita*)

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.

Sulfatos:

<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:

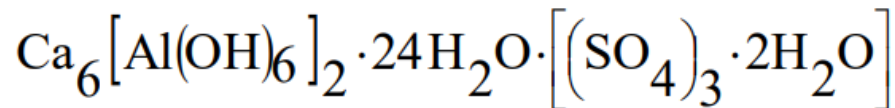
Amostra 2 com 0% de superplastificante

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

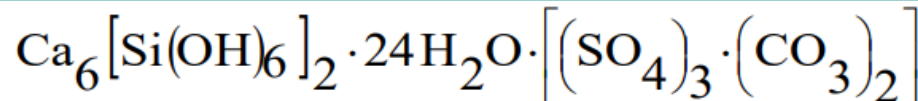
Ataque por sulfato

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

Etringita



Taumasita



Ataque por sulfato

- Formação de taumasita 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...

ATAQUE DE CLORETOS E SULFATOS (PRUDÊNCIO, 1993)

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

Cloretos:

<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.

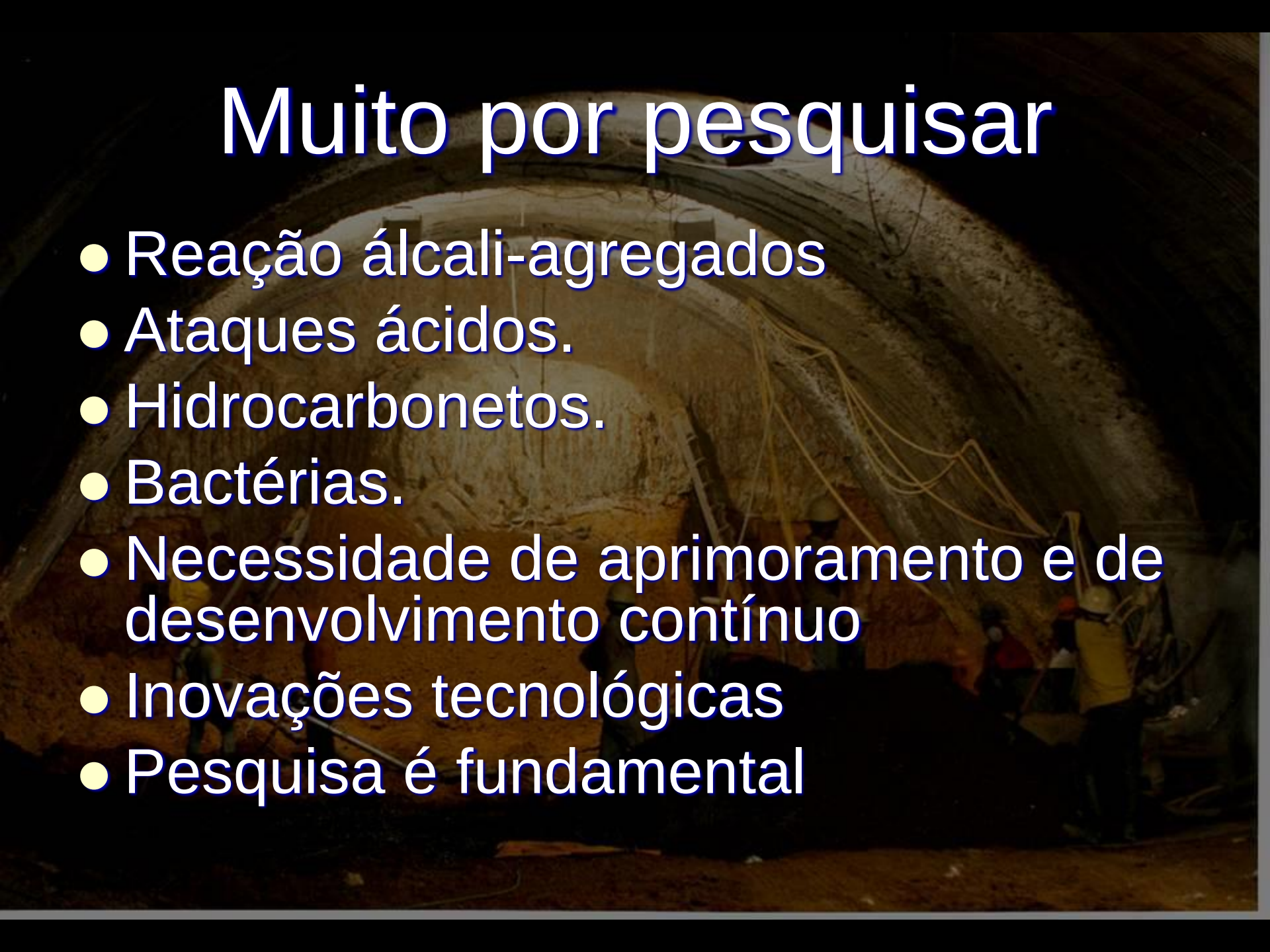
Exceções:

Amostra 2 com 0% de superplastificante

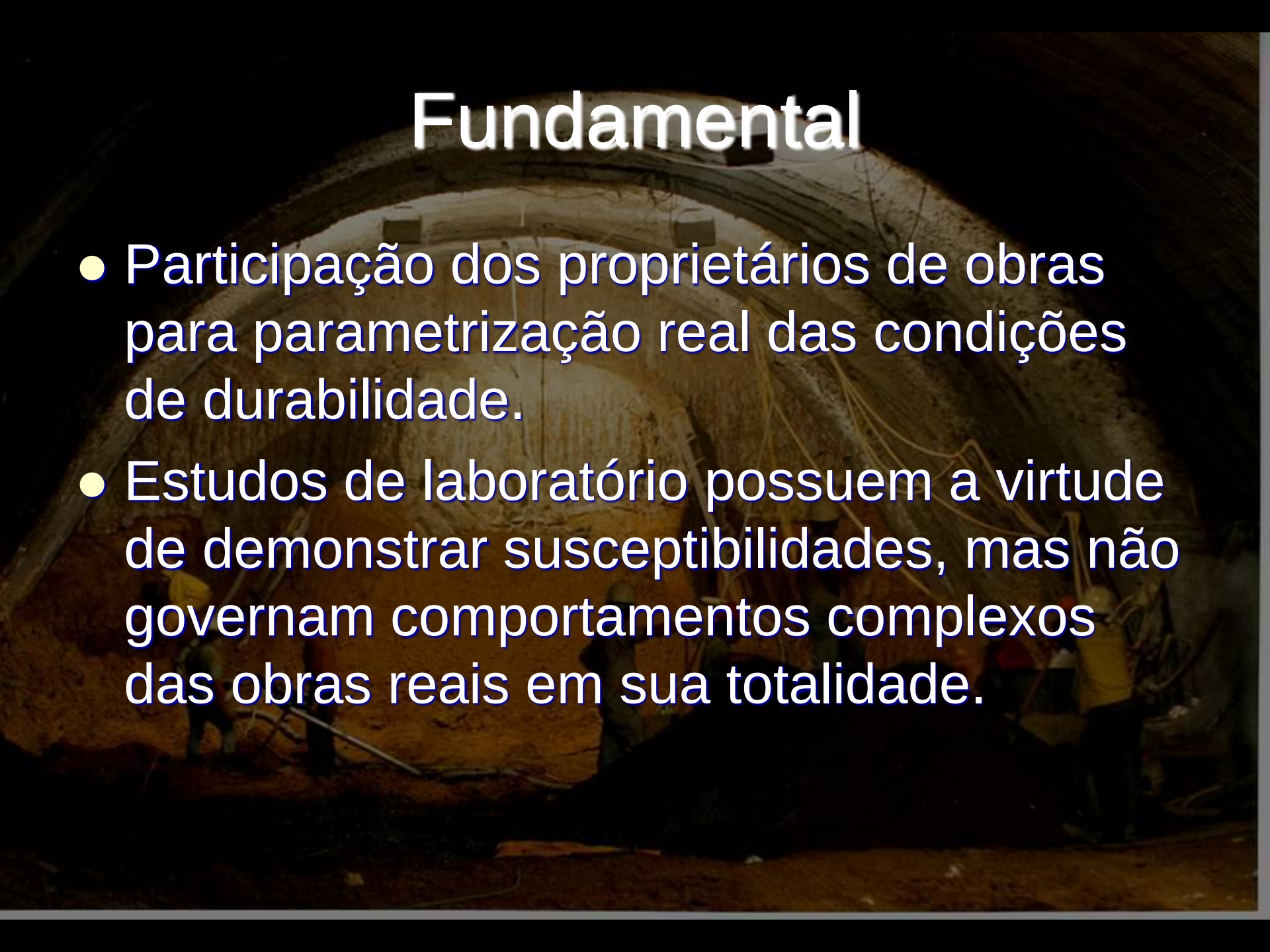
Amostra 6 com $a/c = 0,54$

Muito por pesquisar

- Reação álcali-agregados
- Ataques ácidos.
- Hidrocarbonetos.
- Bactérias.
- Necessidade de aprimoramento e de desenvolvimento contínuo
- Inovações tecnológicas
- Pesquisa é fundamental



Fundamental

The background image shows a large, circular tunnel under construction. The interior walls are rough and uneven, with visible construction equipment and workers. The lighting is dim, with some bright spots from work lights. The overall scene conveys a sense of a complex, large-scale engineering project.

- 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.