

Método de avaliação do risco de lascamento em concreto projetado para revestimento de túneis

ALUNO: ENG. MARCOS VINICIUS MARTINEZ SYLVERIO

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO

Introdução

- Aumento na demanda global por túneis
- A segurança estrutural é primordial
- Uma possível ocorrência de incêndio deve ser considerada durante o projeto do revestimento
- Altas temperaturas reduzem as propriedades mecânicas do concreto e podem causar o **lascamento** (MEMON et al, 2019; SERAFINI, DE LA FUENTE, FIGUEIREDO, 2021)
 - Perda de camadas na forma de deslocamentos
 - Redução na seção resistente do revestimento
 - Exposição das camadas internas à ação do fogo que acentua as reduções nas propriedades mecânicas



Eurotúnel após incêndio de 1996
(TunnelTalk, 2010)

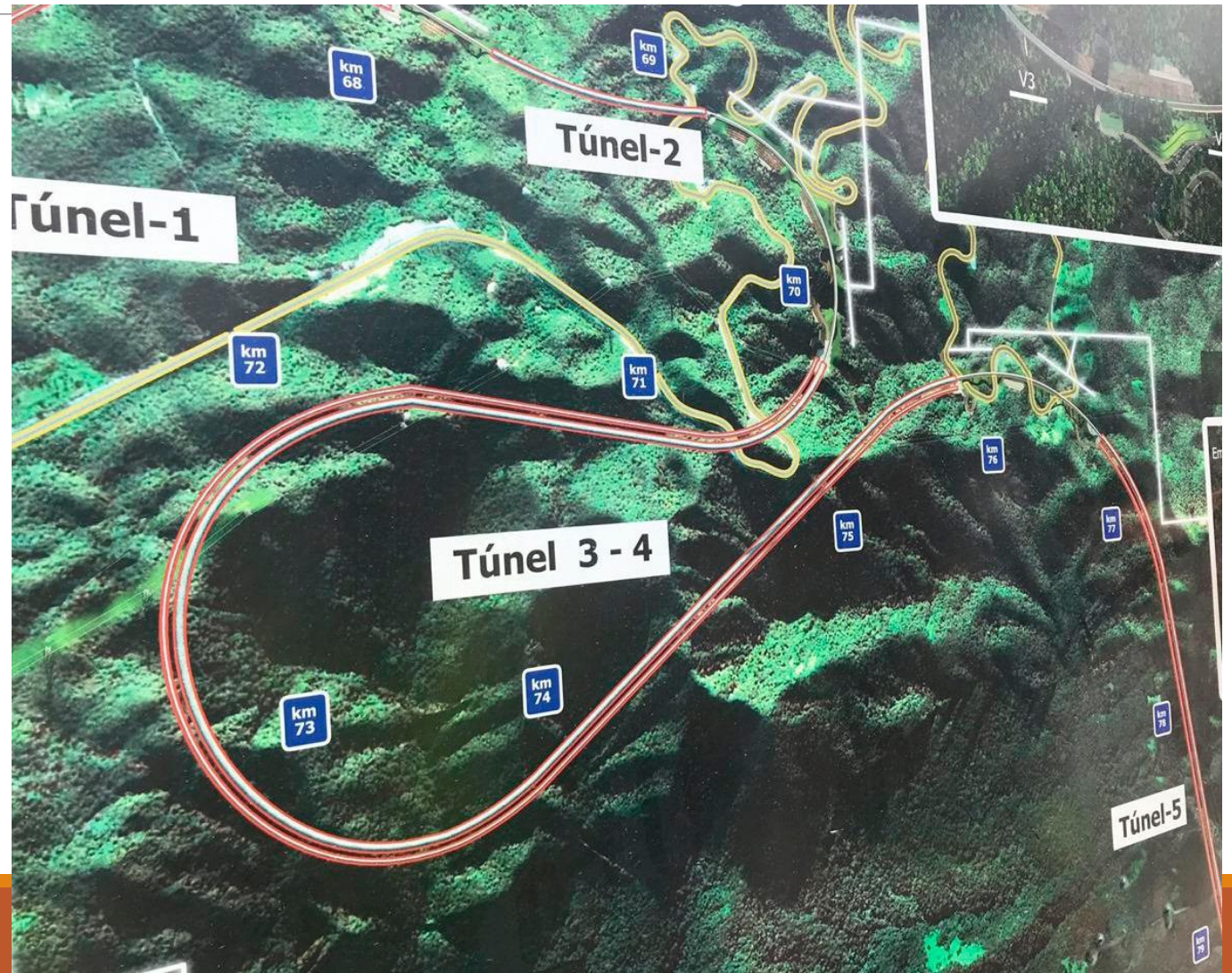
O risco do incêndio Rodovia Tamoios 18/06/19



O risco do incêndio: Rodovia Tamoios 18/11/19



Construção dos túneis mais longos do Brasil



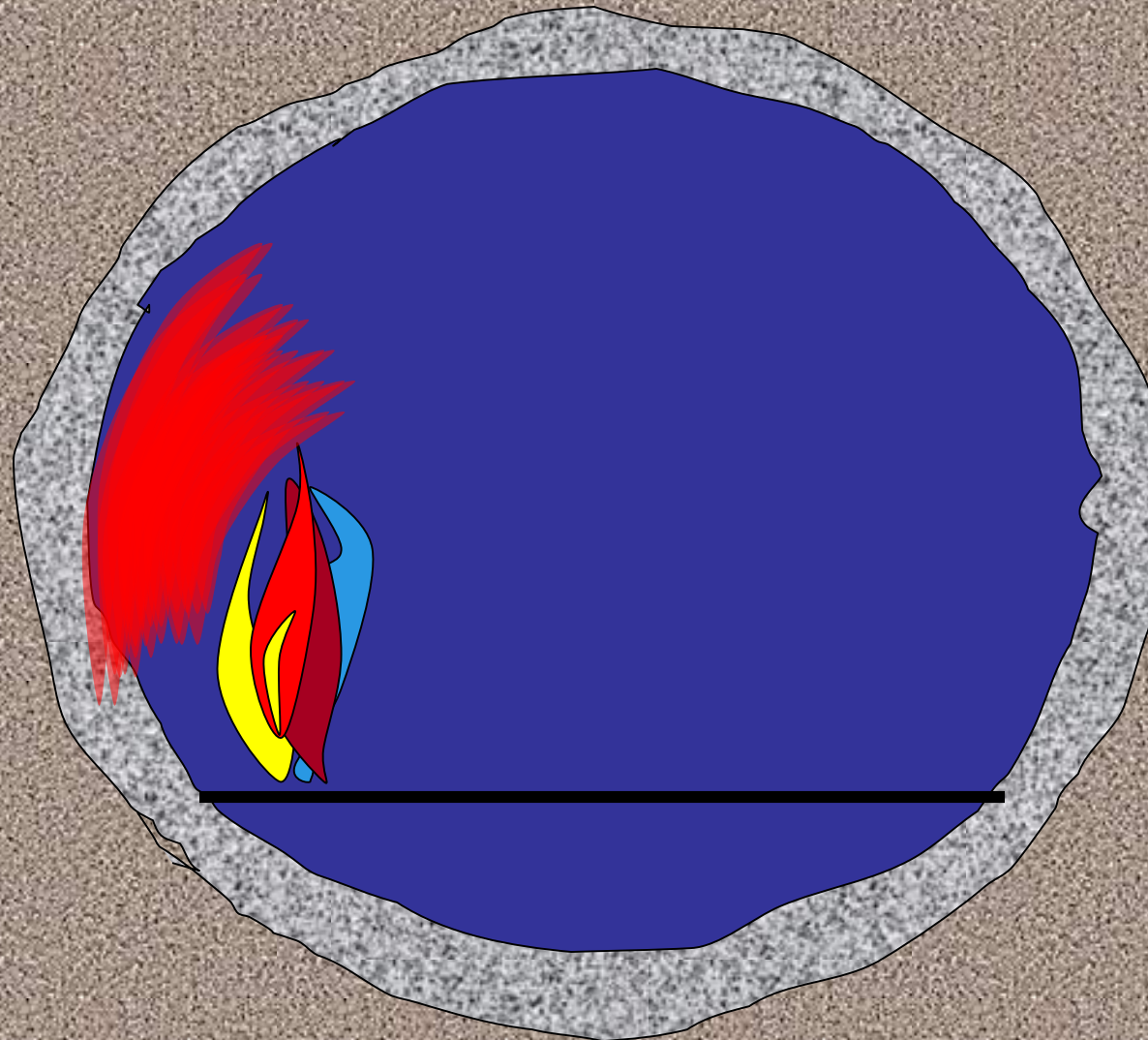
Construção dos túneis mais longos do Brasil

Túneis de serviço com acesso a cada 250 m

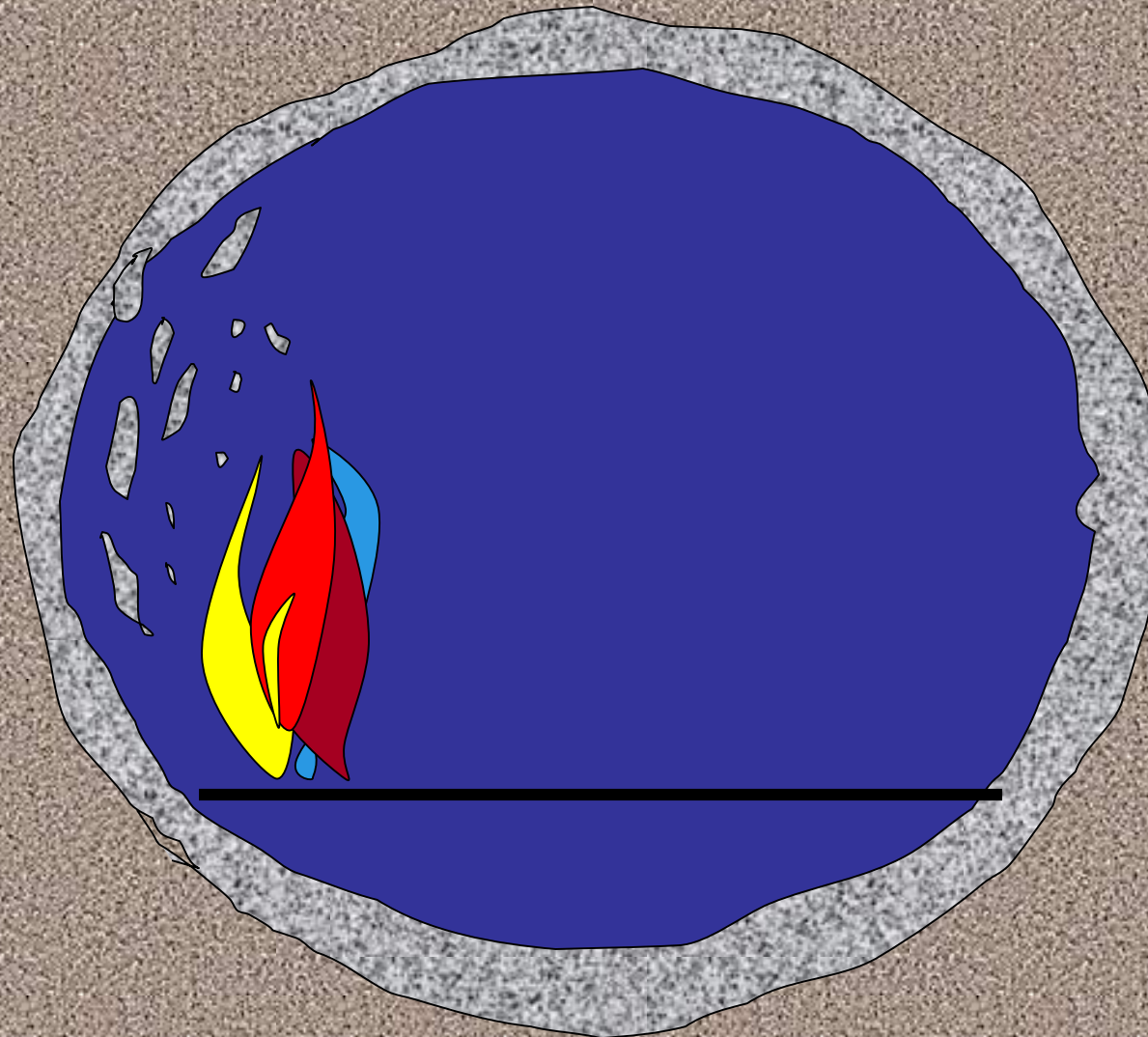
Potencial utilização para duplicação



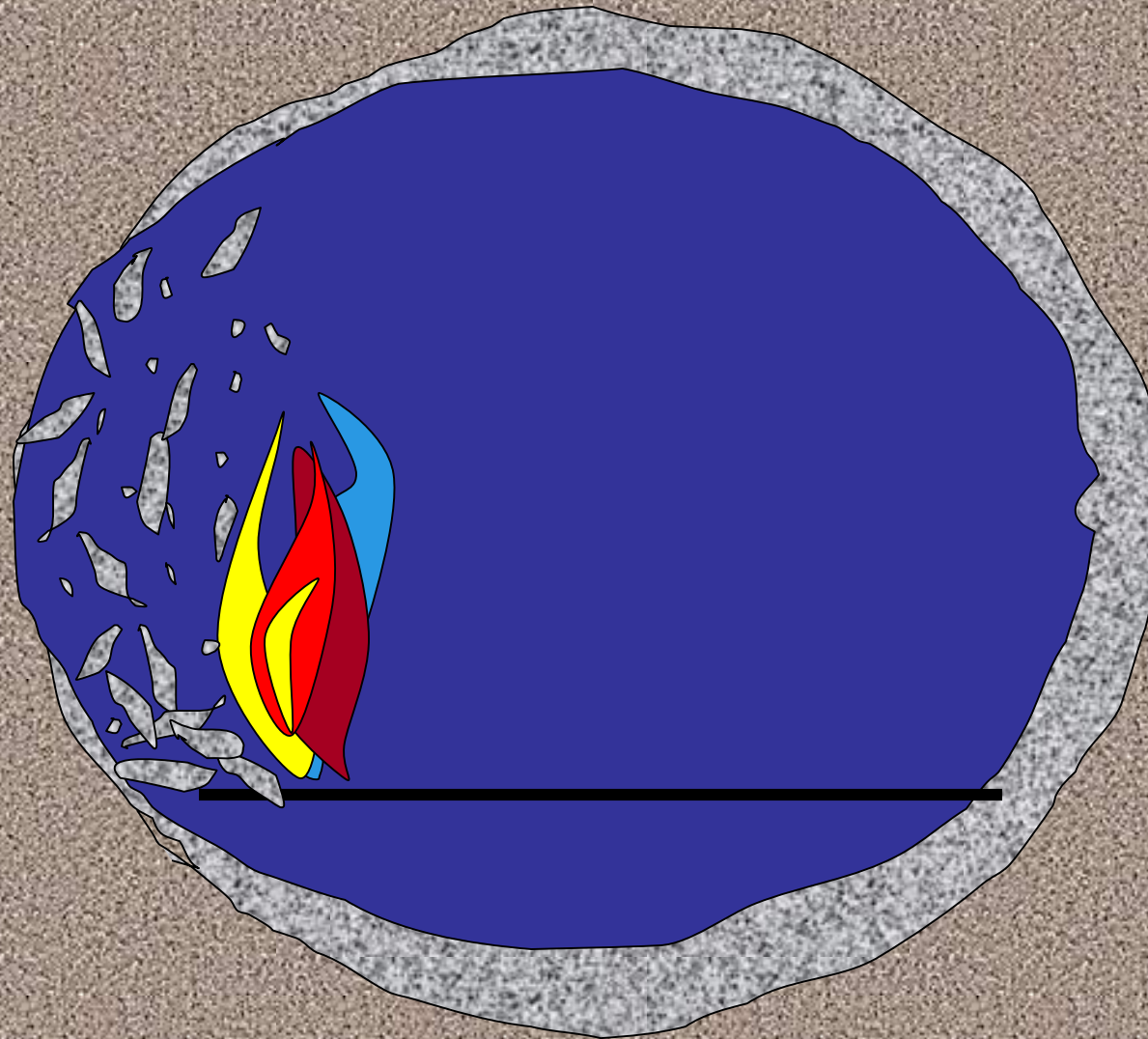
Incêndio no túnel



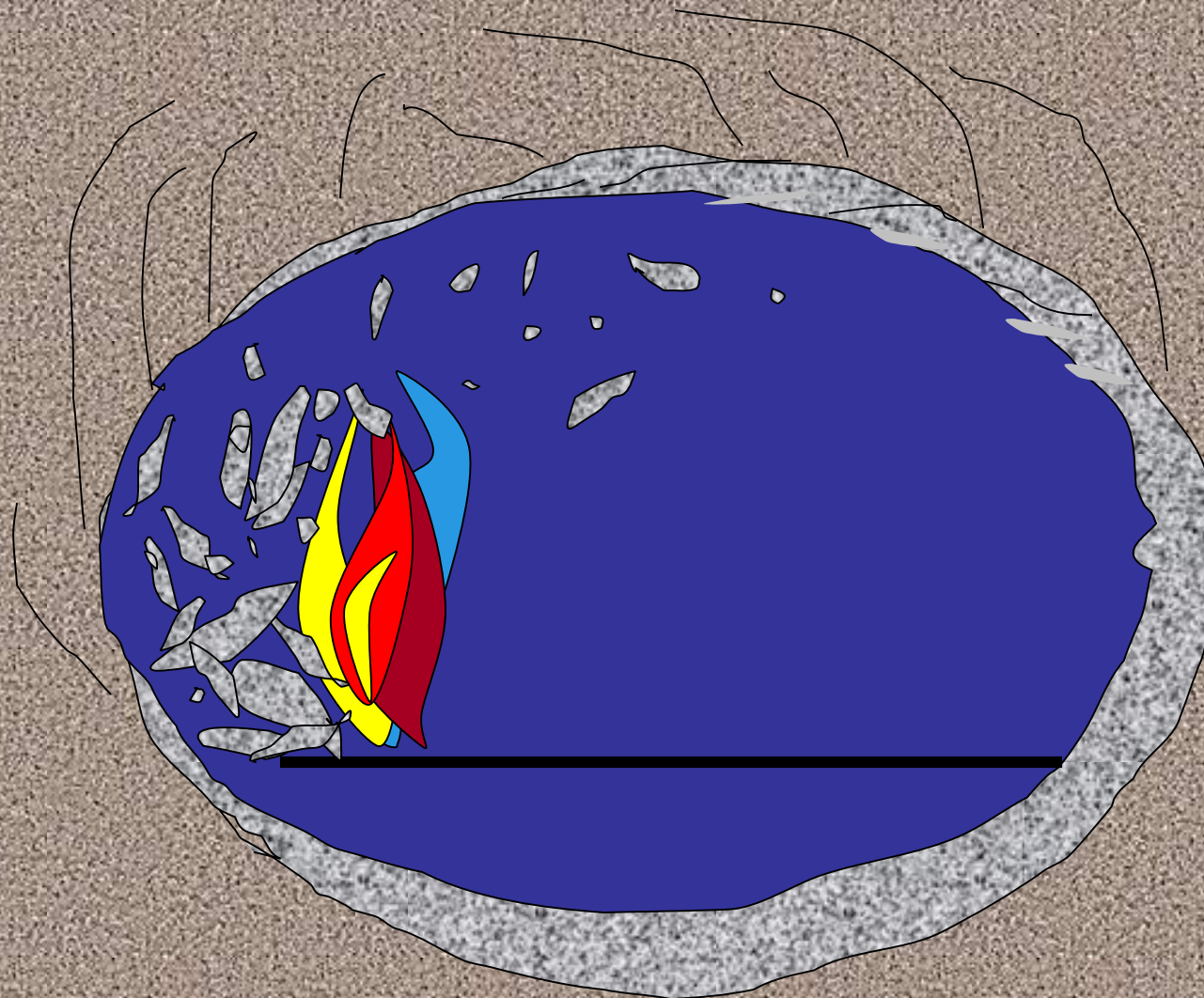
Incêndio no túnel



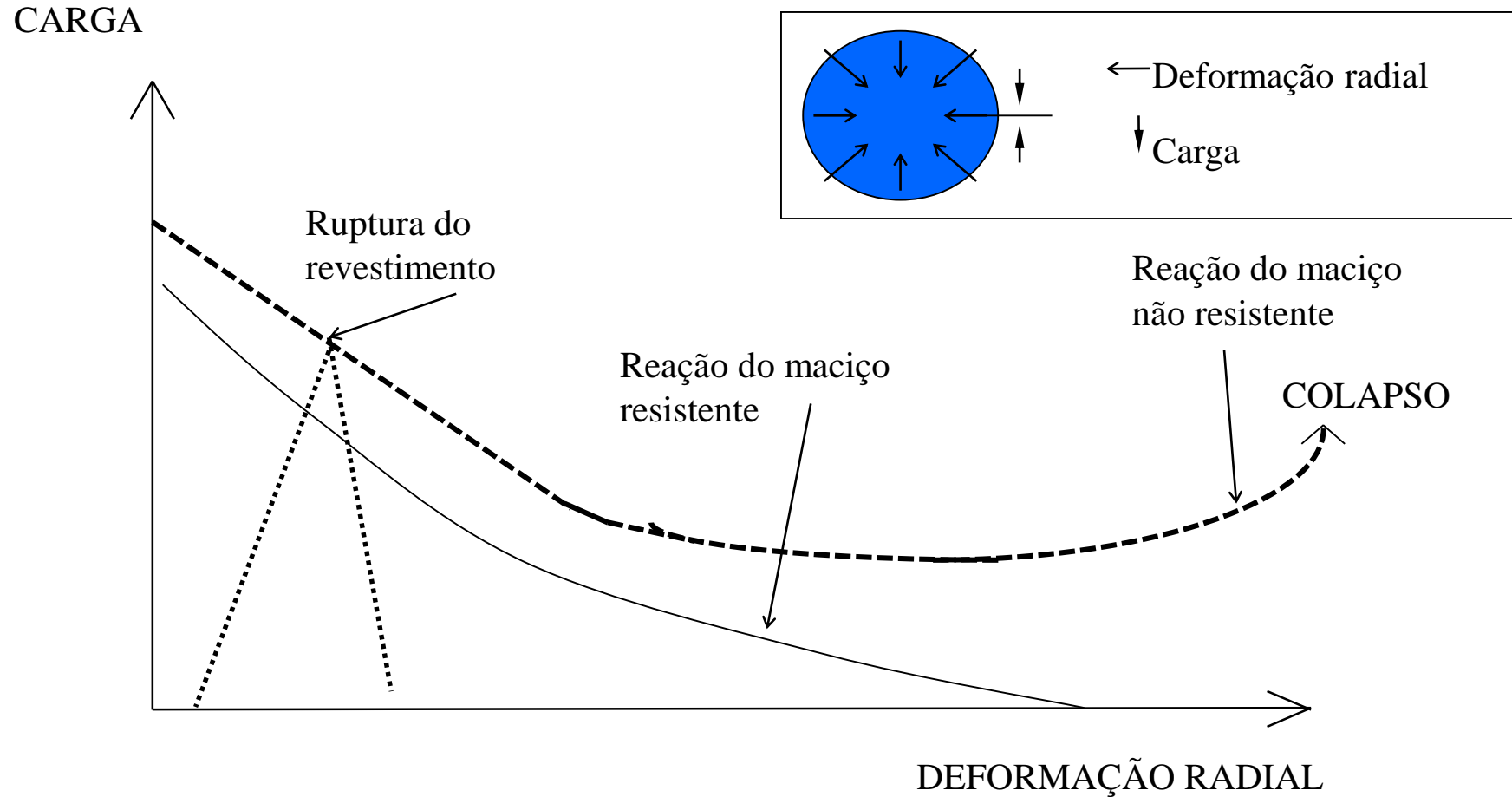
Incêndio no túnel



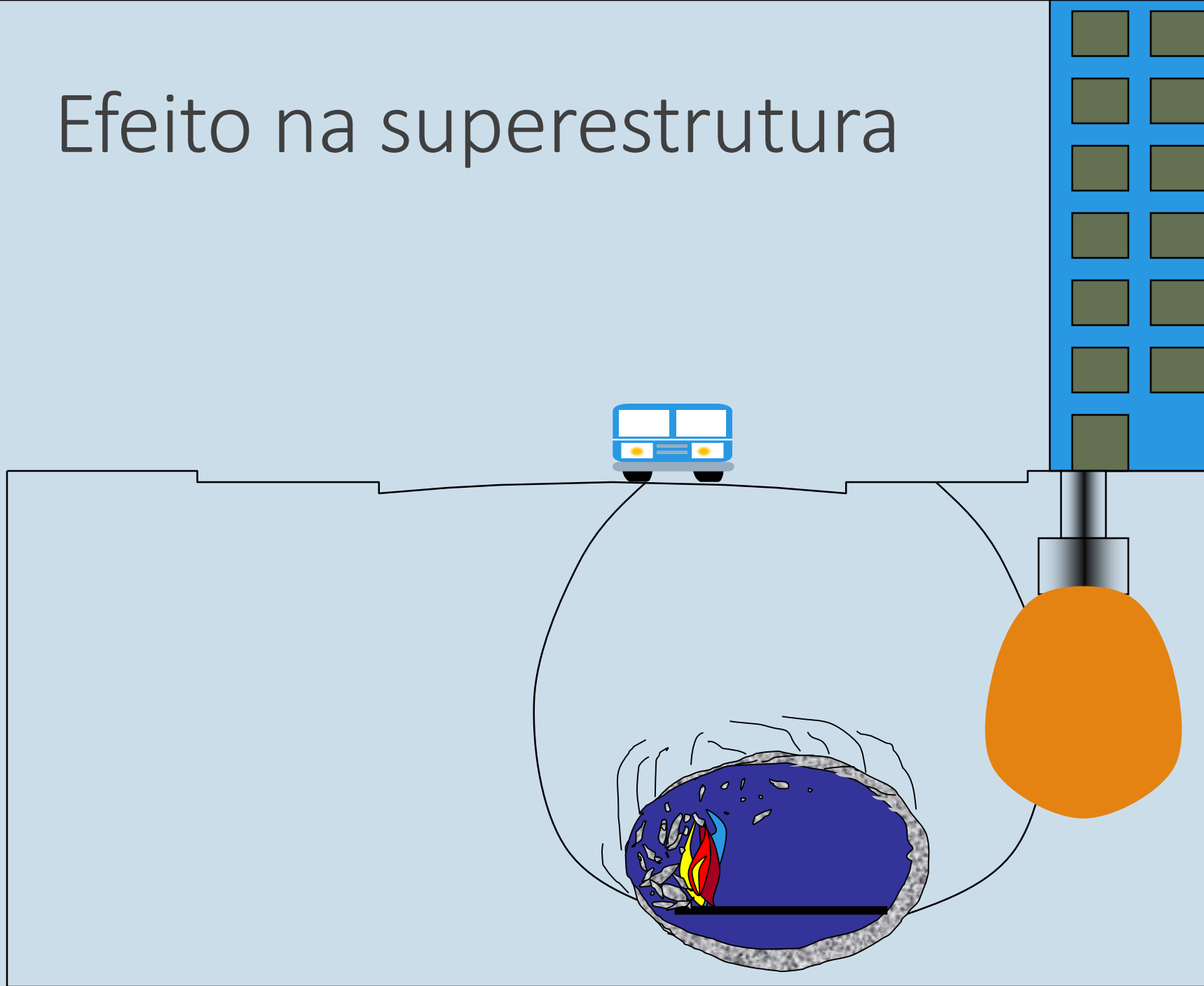
Incêndio no túnel



Modelo de RABCEWICZ



Efeito na superestrutura



Introdução

- Prevenção ao lascamento: adição de microfibras poliméricas ao concreto (ZHANG et al., 2021)
 - Teor adequado depende de diversas variáveis
- Cultura enraizada de adicionar o teor de 2 kg/m³ para qualquer concreto
 - Teor empírico, mas recomendado pelo Eurocode
- É possível otimizar o teor tendo em vista as características e propriedades das fibras e do concreto, trazendo vantagens significativas:
 - Redução de gastos com material
 - Melhora da trabalhabilidade do concreto

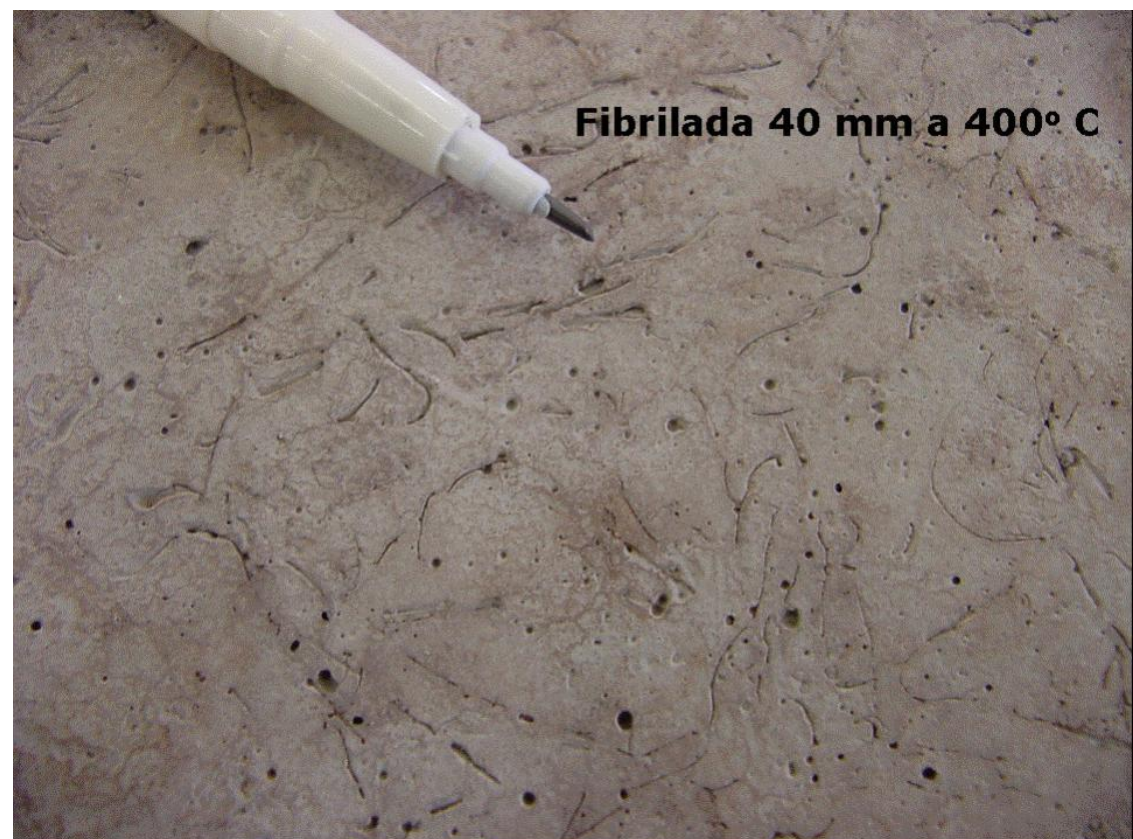


Foto: Andréia Nince. Lascamento do concreto exposto a altas temperaturas. Tese. Escola Politécnica da USP. 2007.

Introdução

- Uso de corpos de prova de grandes dimensões
 - Mais custosos e complexos
 - Um corpo de prova por ensaio
- Uso de corpos de prova de médias dimensões
 - Múltiplos corpos de prova por ensaio, menor custo por solução com ensaio
 - Facilita a otimização do teor de microfibras
- Em nenhuma das situações é possível reproduzir perfeitamente o revestimento
- Gerar base de dados para parametrização (ITA COSUF, 2014)
 - Importante para os projetos e desenvolvimento de modelos computacionais

Objetivo: Analisar a aplicabilidade da metodologia da EFNARC:
“Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete tunnels linings” para homologação do concreto projetado para revestimentos de túneis em situação de incêndio.

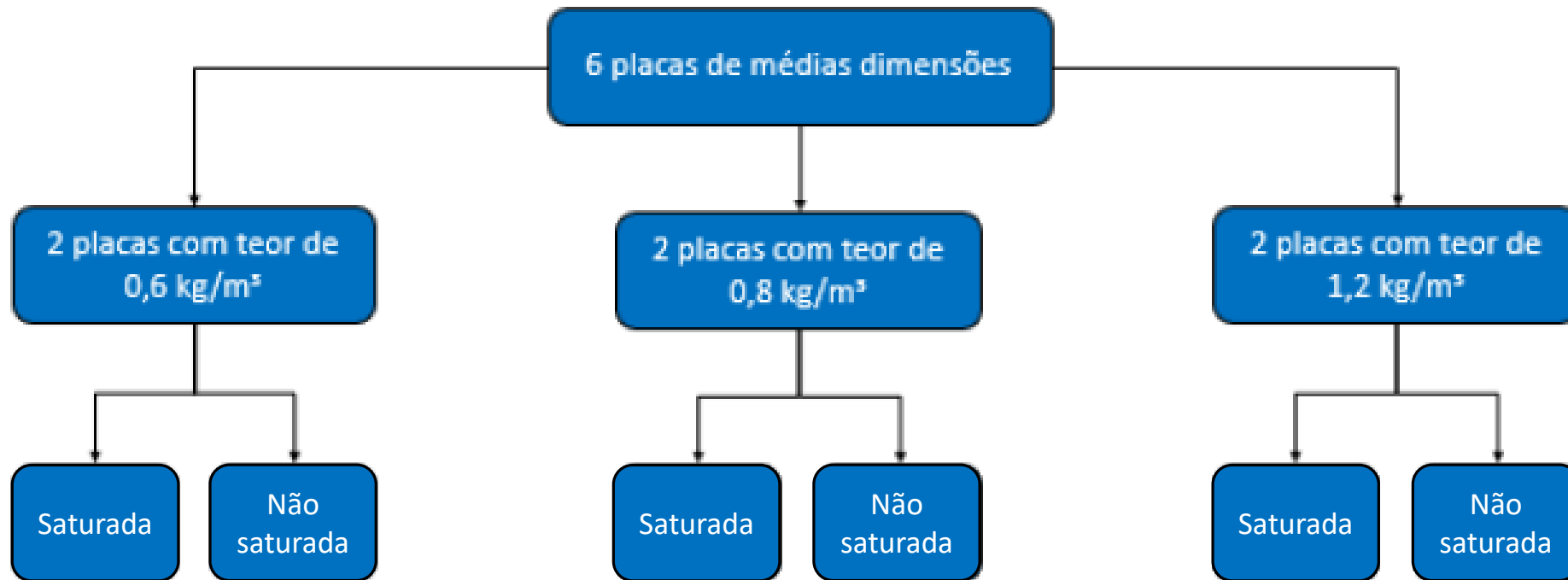
Desenvolvimento do plano experimental

- Túneis da duplicação da Rodovia dos Tamoios
 - Um deles o maior túnel do Brasil, com 5,5 km de extensão
- Túneis executados por NATM
- Estudo do concreto do revestimento secundário dos túneis
- Produção com os mesmos materiais e equipamentos utilizados na obra



Foto tirada durante visita à obra de um dos túneis em 20/11/2019

Materiais e variáveis utilizadas



➤ Variação do teor de microfibras poliméricas e condição de saturação das placas somente

Materiais e variáveis utilizadas

➤ Nomenclatura adotada

Teor de microfibras	Tipo de condicionamento	Nomenclatura
0,6 kg/m ³	Não saturada	PN-0.6
	Saturada	PS-0.6
0,8 kg/m ³	Não saturada	PN-0.8
	Saturada	PS-0.8
1,2 kg/m ³	Não saturada	PN-1.2
	Saturada	PS-1.2

- Com relação ao condicionamento unicamente
 - Placas condicionadas ao ar livre-> Placas não saturadas
 - Placas condicionadas submersas em água -> Placas saturadas

Caracterização do concreto projetado utilizado

Resistência à compressão

Corpos de prova	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias
PN/PS-0.6	38,1	48,5
PN/PS-0.8	25,4	36,0
PN/PS-1.2	25,3	31,7

Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Propriedade	Resultado
Absorção de água	8,5 %
Índice de vazios	17,9 %
Massa específica da amostra seca	2100 kg/m ³
Massa específica da amostra saturada	2280 kg/m ³
Massa específica real	2560 kg/m ³

Moldagem e preparação dos corpos de prova

- Corpos de prova produzidos pelo processo de projeção
 - Um concreto de mesma composição apresentará propriedades diferentes caso seja moldado ao invés de projetado (BANTHIA; TROTTIER; BEAUPRÉ, 1994)



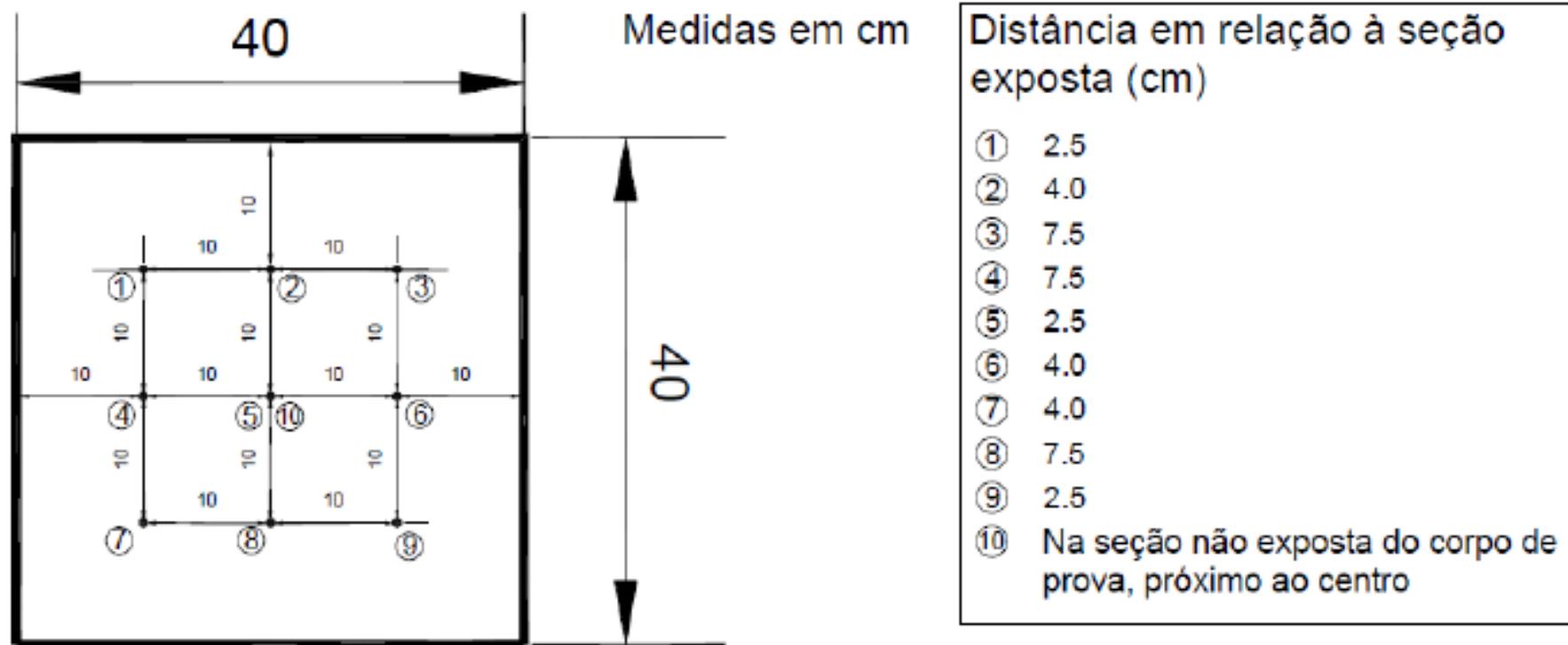
Projeção das placas



Placa em estado bruto

Moldagem e preparação dos corpos de prova

➤ Pontos de tomada de temperatura



Moldagem e preparação dos corpos de prova

Colocação dos termopares nos respectivos furos com uma nata de cimento para fixação



Termopares inseridos em placa

Moldagem e preparação dos corpos de prova

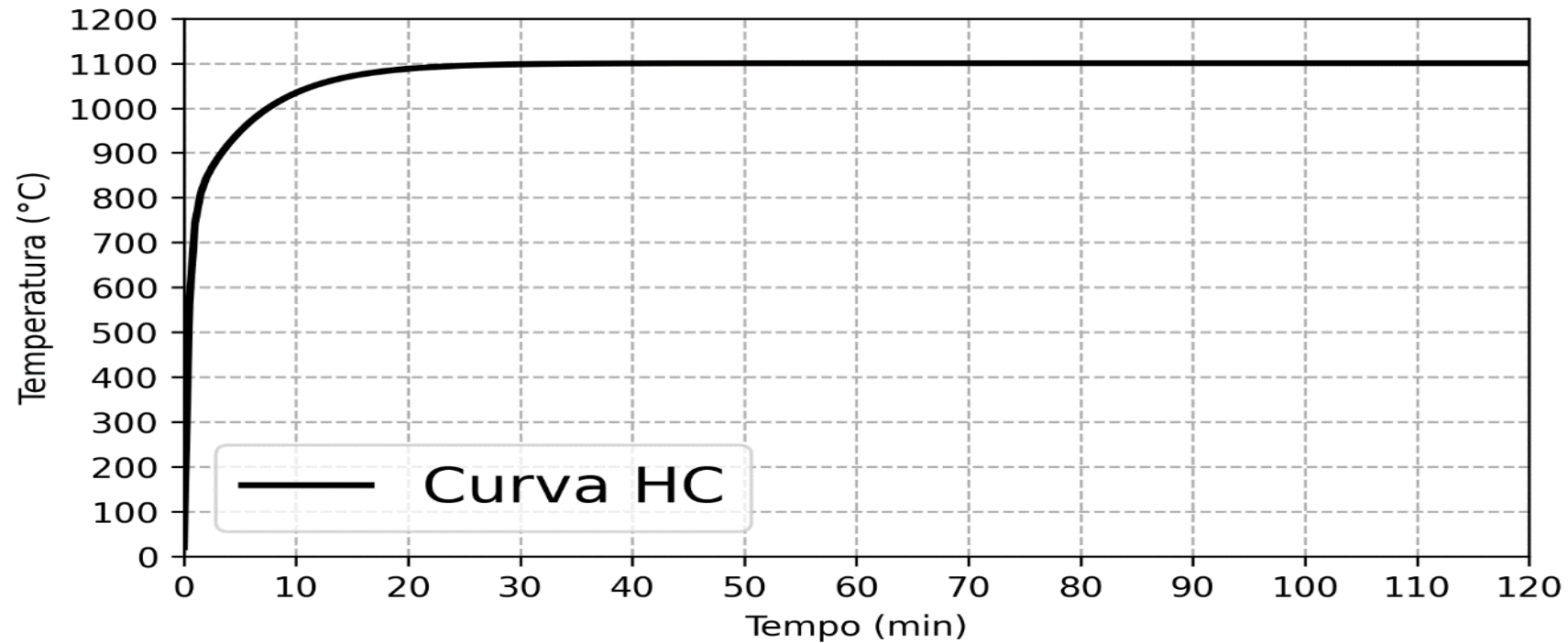
- Corpos de prova não saturados:
 - Expostos ao ar livre por 3 meses
- Corpos de prova saturados:
 - Submersos em água por 3 meses



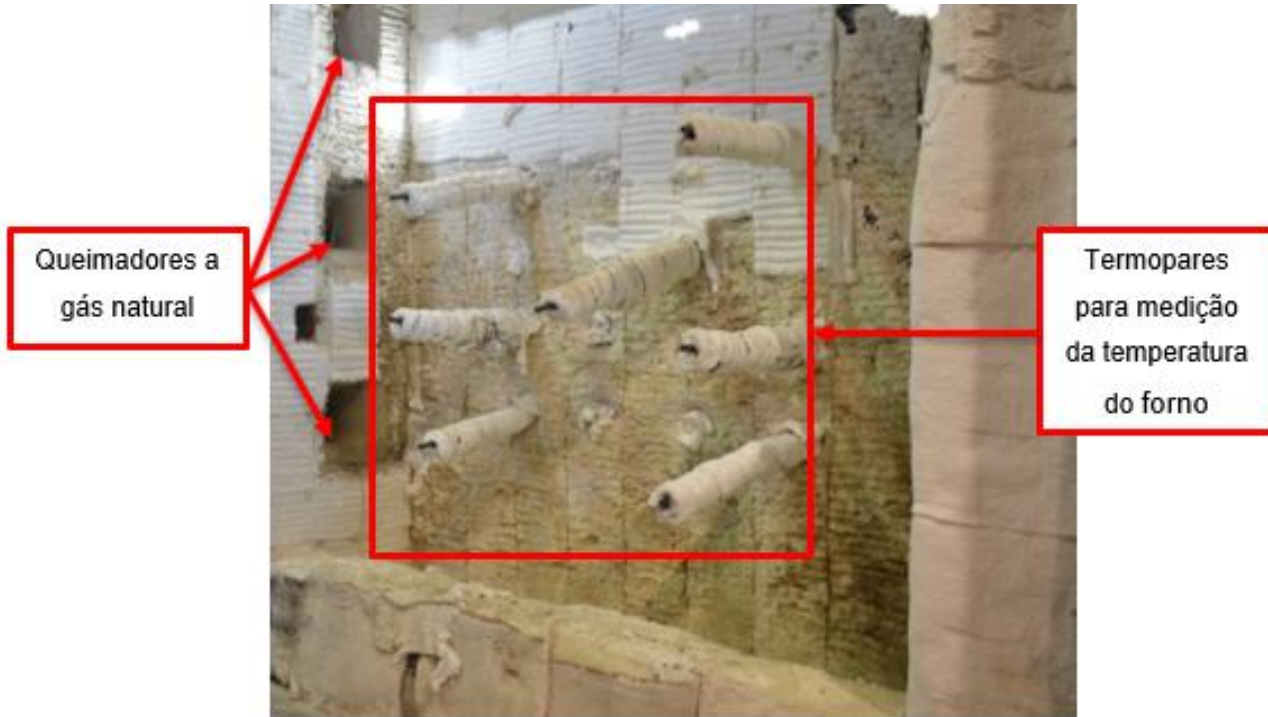
Placas submersas em água

Ensaio de exposição ao fogo

➤ Relação temperatura-tempo utilizada

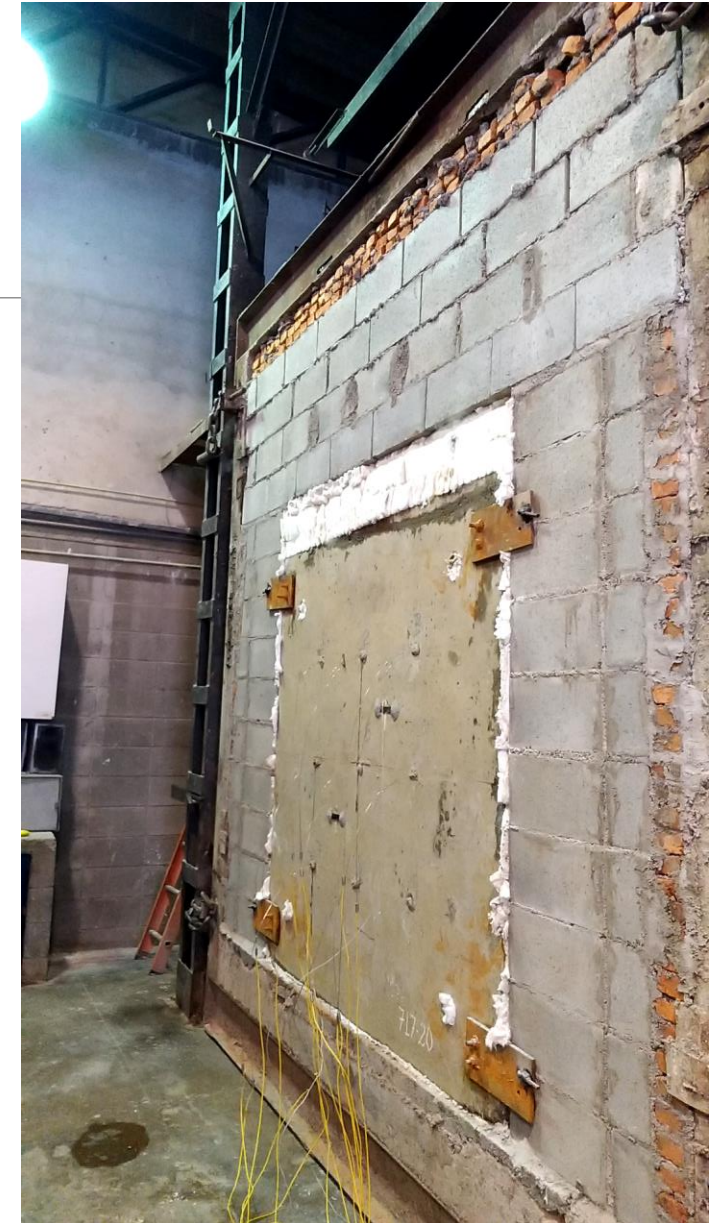


Ensaaios de exposição ao fogo



Forno do Laboratório de Segurança ao fogo e a Explosões (LSFEx) do IPT onde foram realizados os ensaios

Forno aberto



Análise dos resultados

- **Taxas internas de elevação de temperatura no concreto**
- Regressão linear das curvas médias de elevação de temperatura
 - Pontos que não sofreram lascamentos e que estão dentro do intervalo de confiança
- Determinada para diferentes profundidades e cada condição de saturação

- **Comparação do comportamento térmico do concreto projetado e concreto convencional**
- Baseada as taxas internas de elevação de temperatura
- Comparação com o trabalho de Serafini et al. (2019)
 - Metodologia semelhante: variação mais significativa foi o tipo de concreto

Resultados

- Ausência de lascamento: PN-0.8, PN-1.2 e PS-1.2



Antes da exposição ao fogo



Após exposição ao fogo

Resultados

➤ Lascamento superficial: PN-0.6 e PS-0.8



Antes da exposição ao fogo



Após exposição ao fogo

Resultados

➤ Lascamento explosivo: PS-0.6



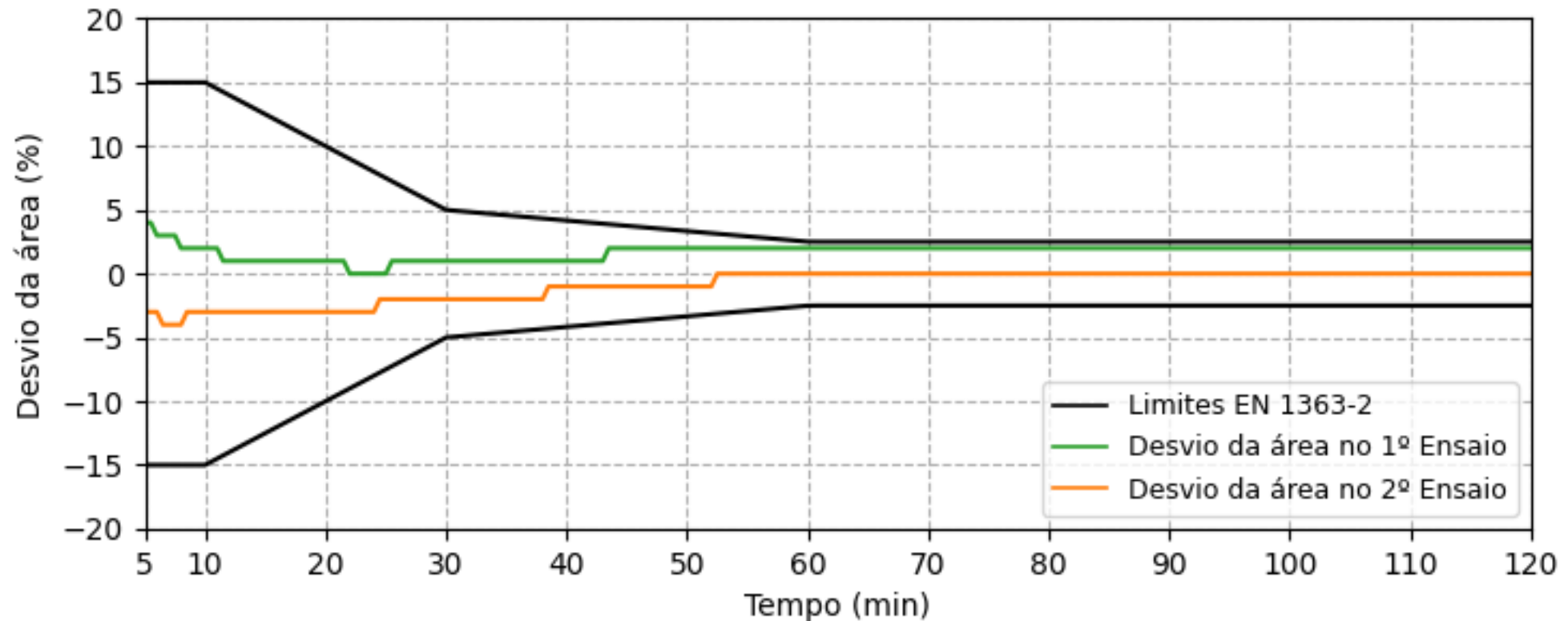
Antes da exposição ao fogo



Após exposição ao fogo

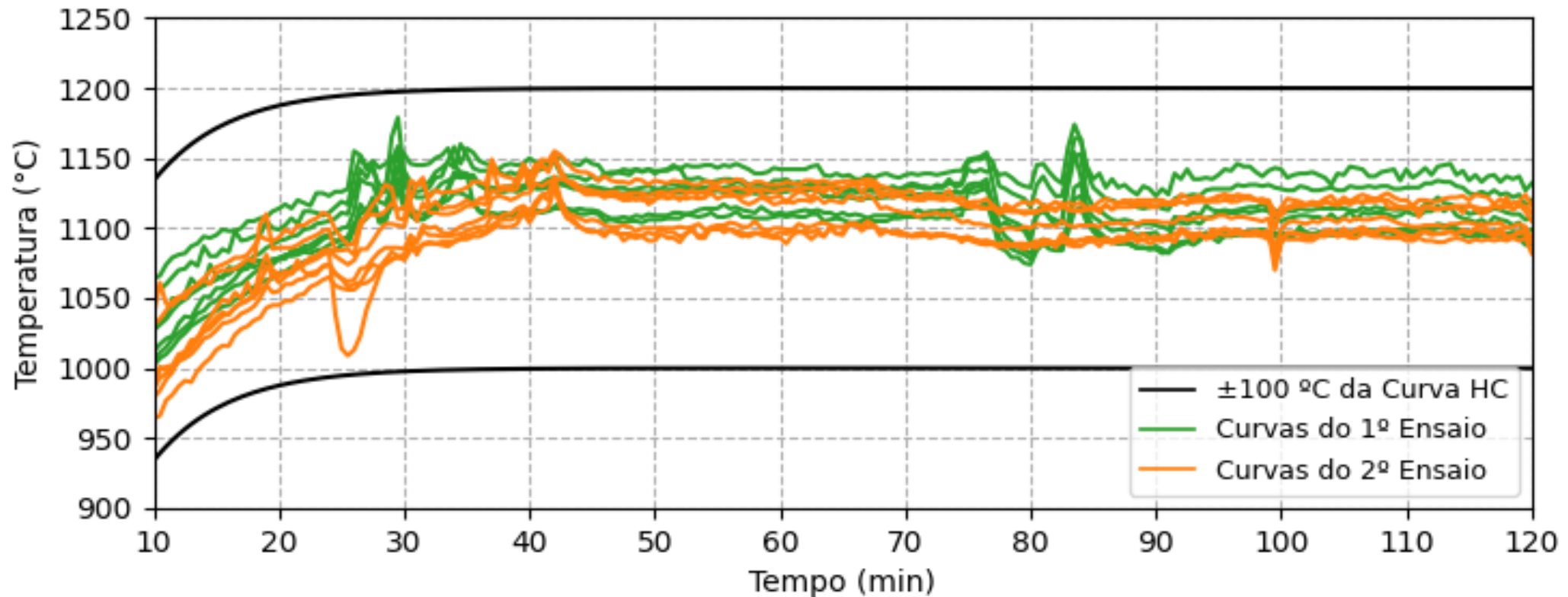
Verificação das tolerâncias dos ensaios

➤ Desvio da área sob a curva média



Verificação das tolerâncias dos ensaios

- Curva de cada termopar do forno em relação aos limites para Curva HC

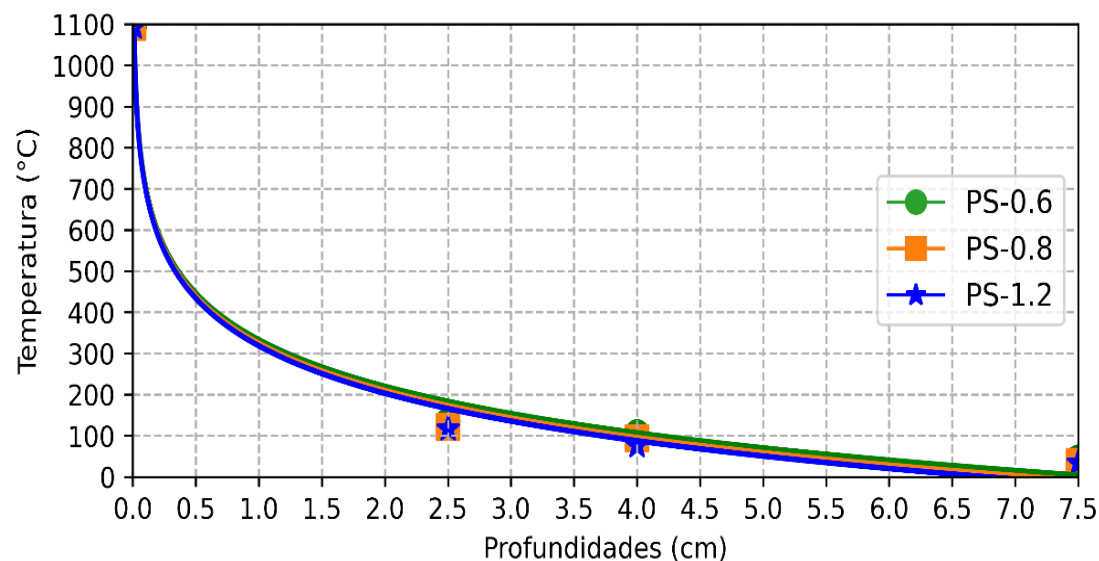


Influência do teor de microfibras poliméricas no desenvolvimento das temperaturas internas

- Não houve correlação entre teor de microfibras e temperaturas finais nas placas

Coeficientes de correlação de Pearson	2,5 cm	4,0 cm	7,5 cm
	0,10	0,04	-0,24

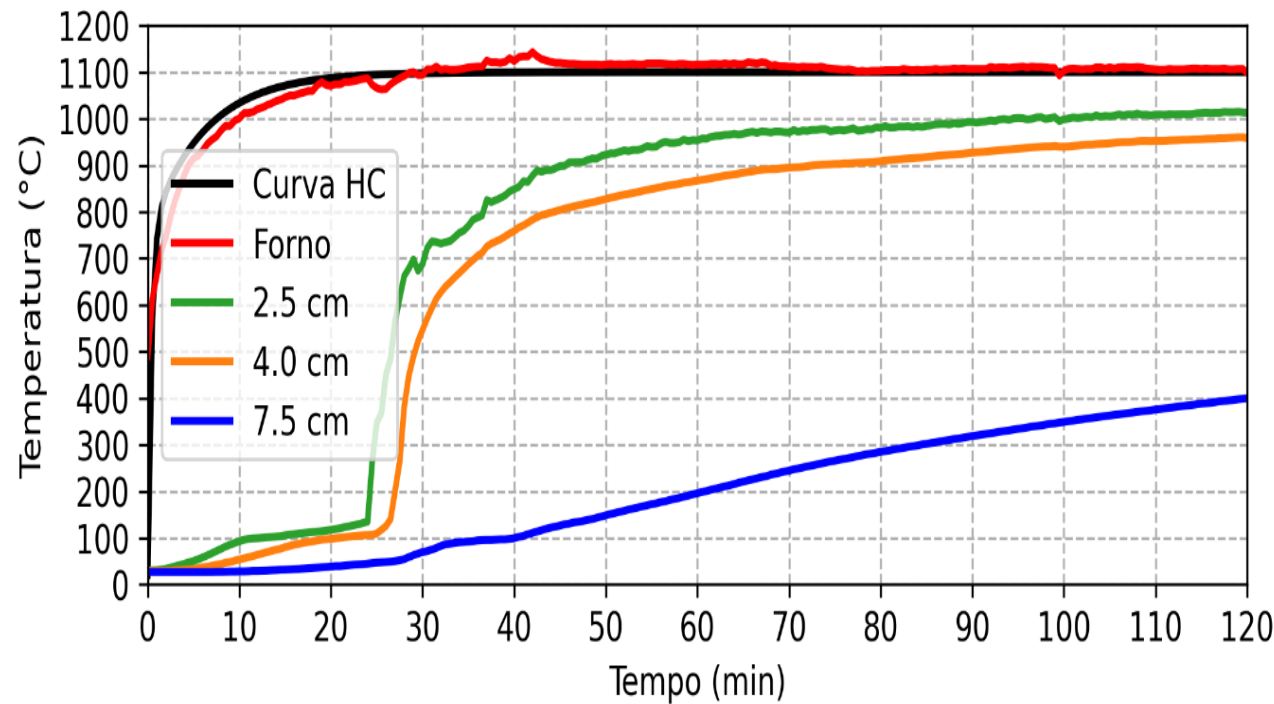
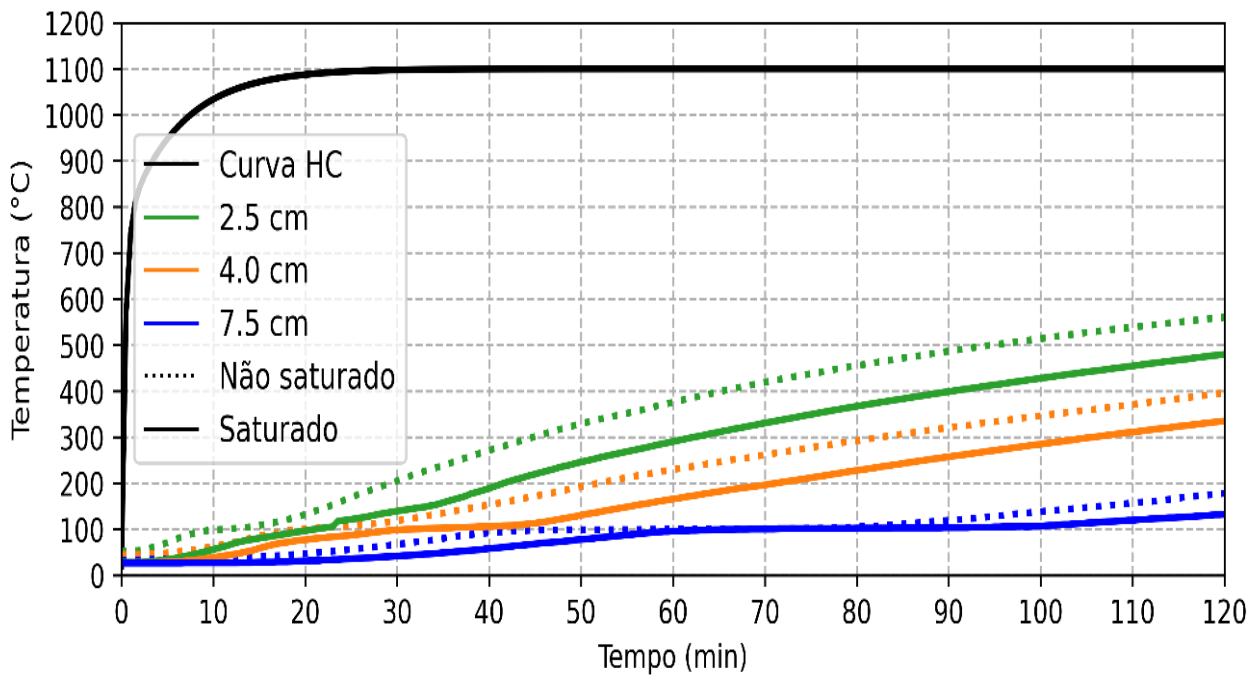
- Perfis de temperatura muito próximos



- Variações nos teores de microfibras só interferem nas temperaturas prevenindo o lascamento

Curvas médias de temperatura

- Aumento progressivo da temperatura na ausência de lascamento e súbito com lascamento
- Condição não saturada apresentou aumentos de temperatura maiores



Comparação entre a condição saturada e não saturada

Menores taxas de elevação de temperatura



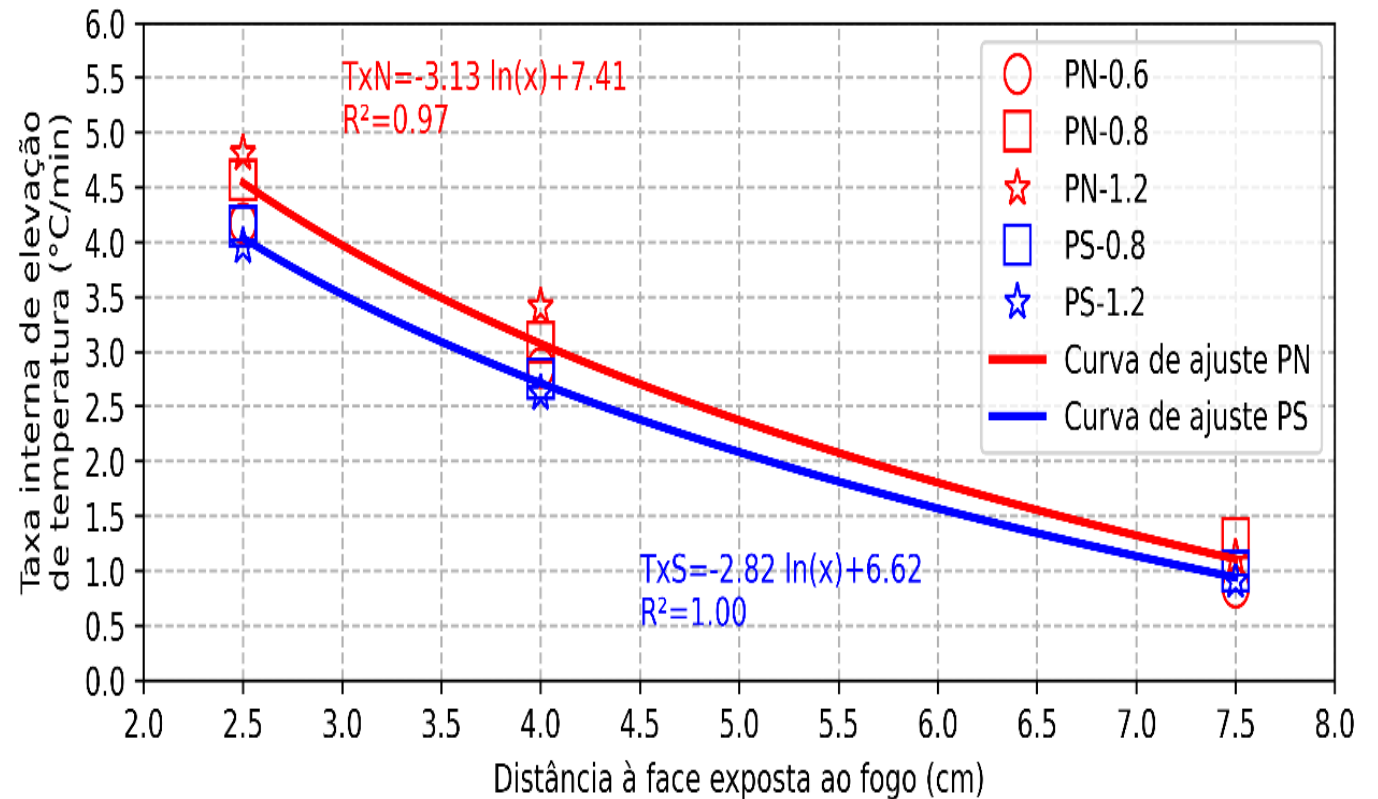
Maiores gradientes térmicos (Carpio, 2019)



Maiores tensões geradas no material por incompatibilidade das deformações



Maior probabilidade de ocorrência de lascamento (Felicetti, 2013)

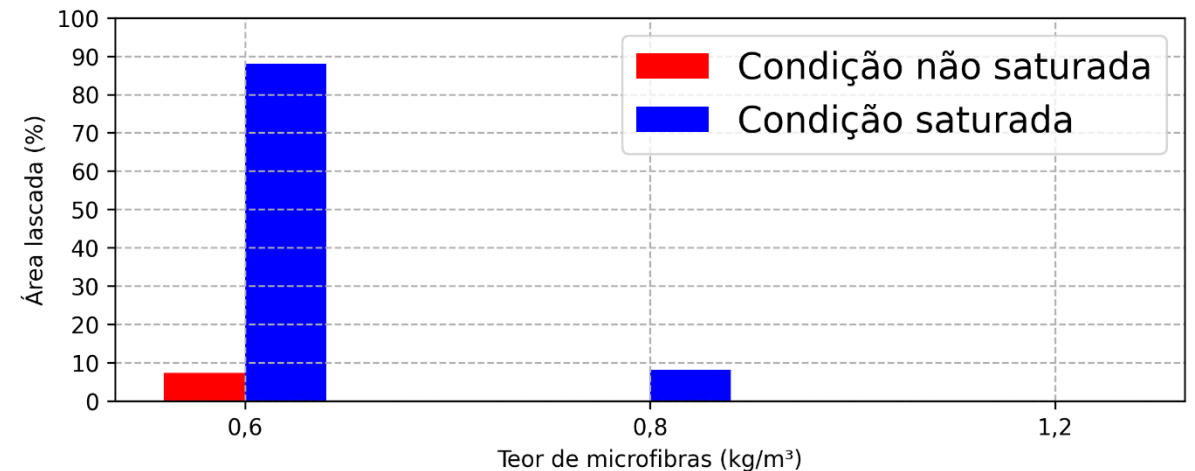


Comparação entre a condição saturada e não saturada

- Condição saturada é crítica para o surgimento de tensões que promovem o lascamento
- Condição saturada é crítica para o surgimento de pressões nos poros (LIU et al., 2018)
- Revestimentos podem estar úmidos (ZHANG et al., 2017)
- Condição saturada é crítica para a ocorrência de lascamento: ensaiar somente essa condição
- Simplificação do processo, redução de custos e maior reprodutibilidade do método pela uniformização do condicionamento

Análise de parâmetros para caracterização do lascamento

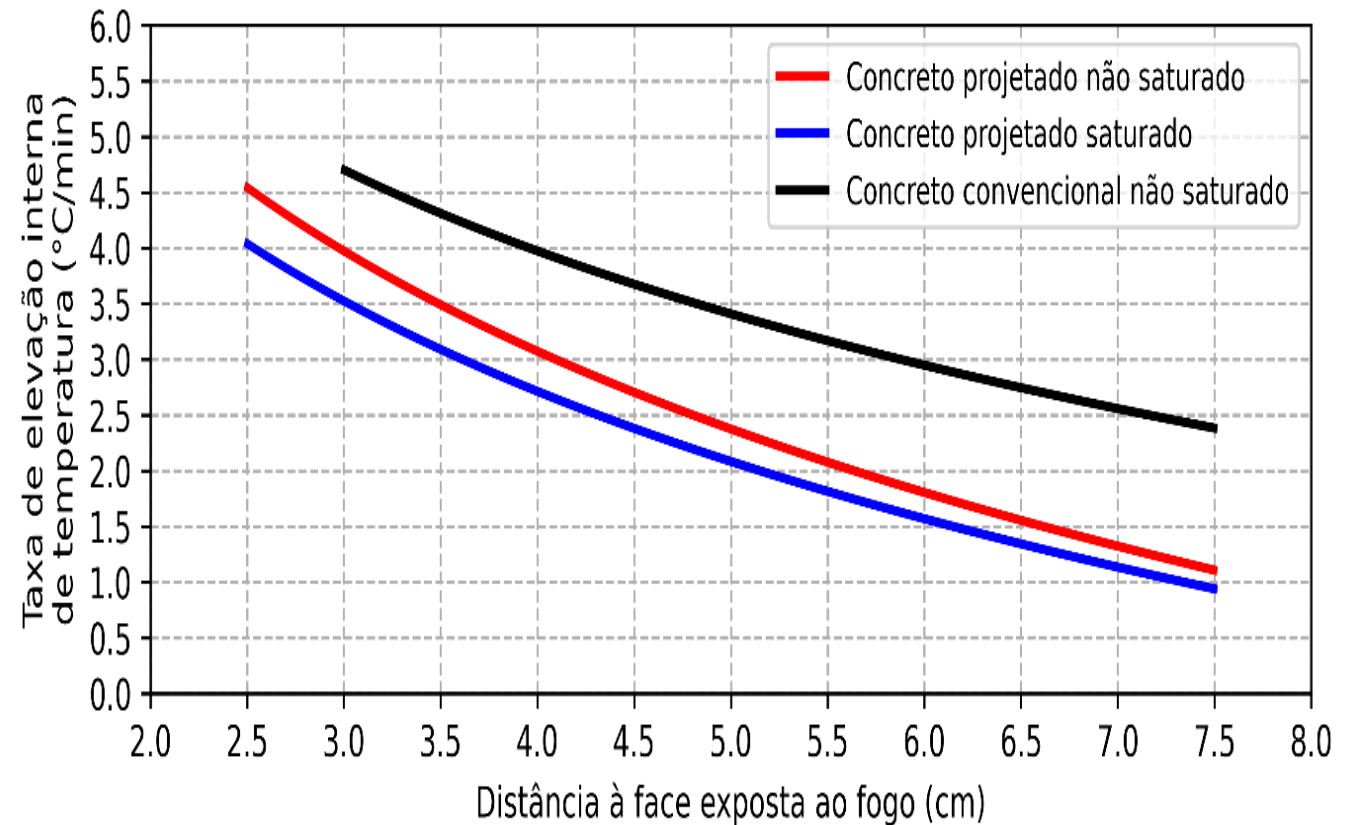
- Comportamento semelhante em ambos os parâmetros
- Difícil avaliar o nível de significância de danos na área sem uma verificação das condições de projeto (SERAFINI; DE LA FUENTE; FIGUEIREDO, 2021)
- Mais apropriado avaliar com base nas curvas de temperatura e profundidades, por estarem associadas



Corpo de prova	Faixa de profundidade lascada (cm)
PN-0.6	1,0 a 1,5
PS-0.6	3,5 a 8,0
PN-0.8	0
PS-0.8	0,5 a 1,0
PN-1.2	0
PS-1.2	0

Comparação entre concreto projetado e concreto convencional

- Concreto projetado é menos condutivo: maiores gradientes térmicos
- Causa: maior porosidade do concreto projetado (Bamonte, Gambarova, Nafarieh, 2016)
- Maiores gradientes térmicos favorecem o lascamento no concreto projetado
- Maior porosidade facilita a dissipação de vapores no concreto projetado: menor consumo de microfibras PP



Conclusões

- A metodologia se mostrou confiável e foi possível evidenciar a suscetibilidade do concreto projetado ao lascamento explosivo somente pela variação do teor de microfibras poliméricas e condição de saturação
 - Isso permite sua utilização para otimização do teor de microfibras poliméricas
- **Há possibilidade de melhorias no método**
- Método de ensaio estudado como padrão internacional para criação de uma base de dados
 - Parametrização futura de projetos de túneis e futuras modelagens
- Condição saturada é crítica para o lascamento
 - Ensaio somente nessa condição já é suficiente para a avaliação, garantindo maior uniformidade do condicionamento e padronização do método
- Concreto projetado apresenta taxas de elevação de temperatura interna significativamente inferiores ao convencional
 - Maiores tensões no revestimento, mas maior porosidade, favorecendo a dissipação de vapores
 - Necessário ensaiar cada condição

Agradecimentos

A todos que estiveram comigo nesse processo



Obrigado pela atenção!

