



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP.  
Programa de Educação Continuada – PECE.  
Curso de Especialização em Gestão de Projetos de Sistemas Estruturais – Edificações.  
**GES-017 – Patologia, Recuperação e Reparo de Estruturas de Concreto.**

## CONCRETO & INCÊNDIO CONCEITOS E ESTUDOS DE CASOS



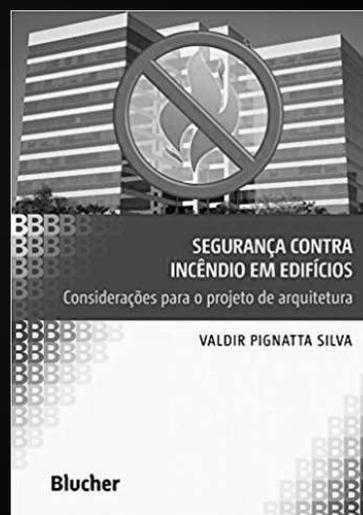
**Paulo Helene**  
Diretor PhD Engenharia  
Prof. Titular Universidade de São Paulo

**Carlos Brites**  
Parceiro PhD Engenharia  
Pós-Doutorando pela POLI-USP

Escola Politécnica

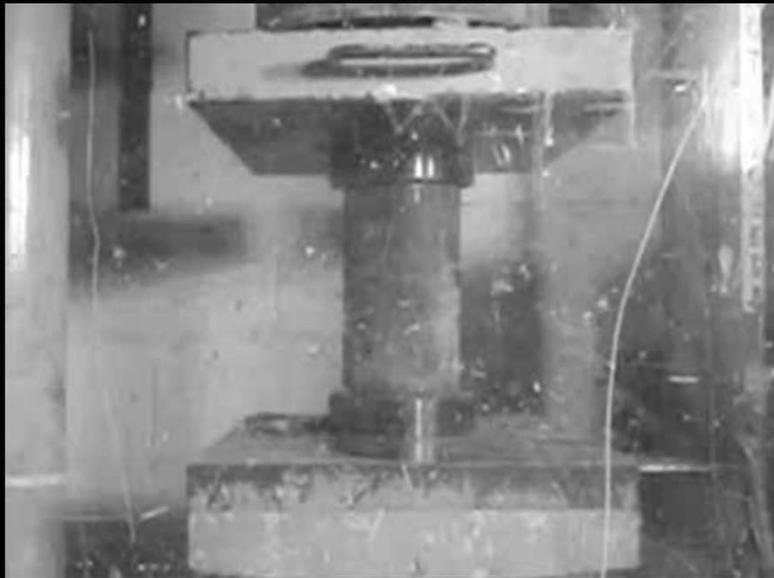
21/03/2018

São Paulo SP



Mito ou verdade?

**O concreto de alta  
resistência explode em  
condições de ruptura?  
E em situação de  
incêndio? 🔥🔥🔥**

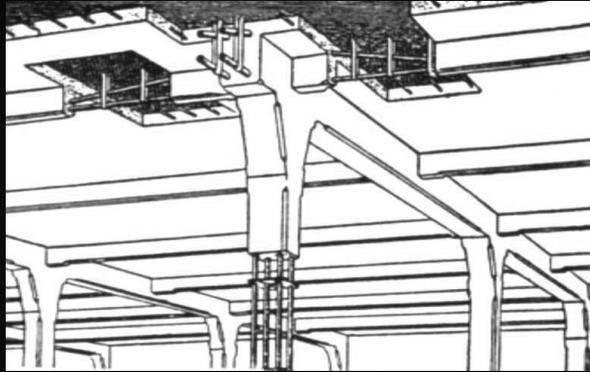


# Surgimento do concreto armado

1875 Desenvolvimento do concreto armado por *Gustav Adolf Wayss* (compra da patente de *Monier*);

1878 *Thaddeus Haytt* patenteou o concreto armado nos Estados Unidos e em 1893 construiu o primeiro edifício na Califórnia;

1892 *François Hennebique* patenteou o sistema construtivo "béton armé" (ISAIA, 2005)



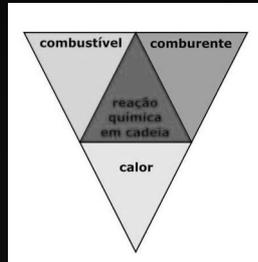
*Prospecto original do sistema construtivo de Hennebique com o slogan: "...nunca mais risco de incêndio..."*

# Materiais de construção civil

Materiais de construção (desprotegidos)	Resistência ao fogo	Facilidade de combustão	Contribuição nas cargas de incêndio	Taxa de elevação de temperatura na seção transversal	Proteção ao fogo (intrínseca do material)	Facilidade de reabilitação (pós incêndio)	Proteção para evacuação e bombeiros
MADEIRA	BAIXA	ALTA	ALTA	MUITO BAIXA	MUITO BAIXA	NULA	BAIXA
AÇO	MUITO BAIXA	NULA	NULA	MUITO ALTA	BAIXA	BAIXA	BAIXA
CONCRETO	ALTA	NULA	NULA	BAIXA	ALTA	ALTA	ALTA

Desempenho dos materiais sob ação do fogo (desprotegidos) – Fonte: Jacobs, 2007.

# O fogo e o incêndio



Incêndio é fogo que foge ao controle do homem

# O fogo, o concreto e o incêndio

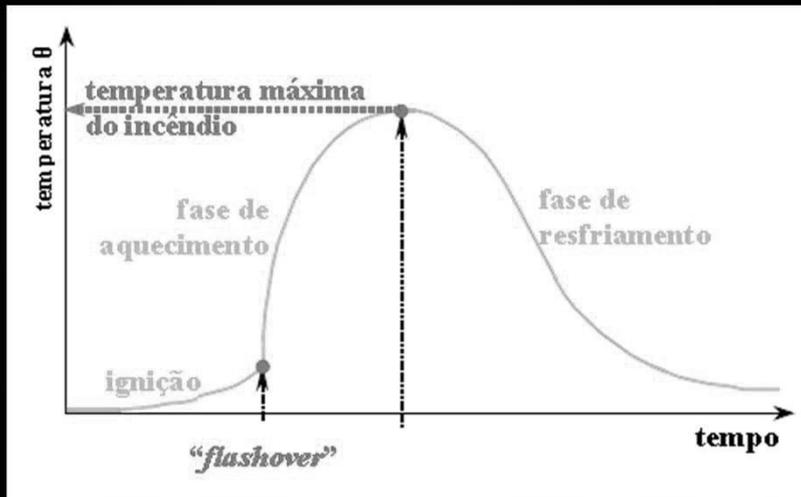


## Concreto

- material estrutural incombustível
- possui baixa condutividade térmica
- não exala gases tóxicos ao ser aquecido
- não é um combustível em forma sólida

Isolamento térmico e estanqueidade do concreto -  
Fonte: Jacobs, 2007.

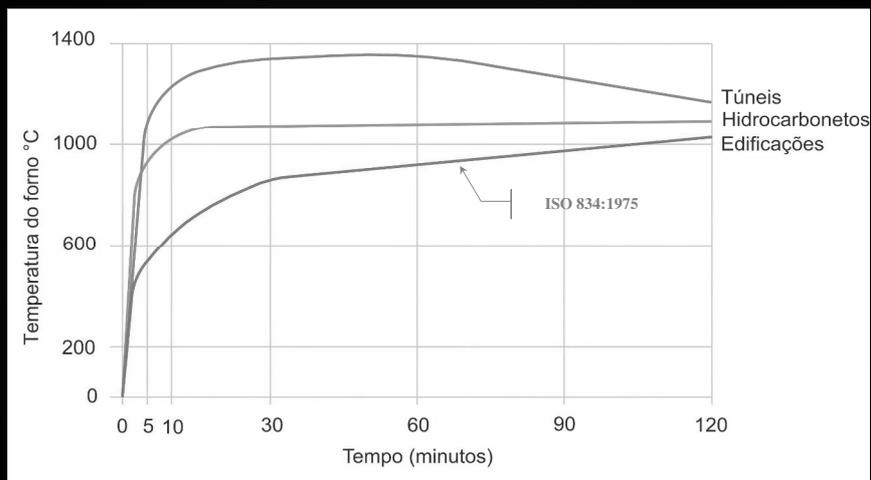
# Incêndio real (genérico)



Estágios principais de um incêndio real. - Fonte: Costa & Silva, 2003.

# Incêndio padrão

Adaptado de Concrete Centre, 2004

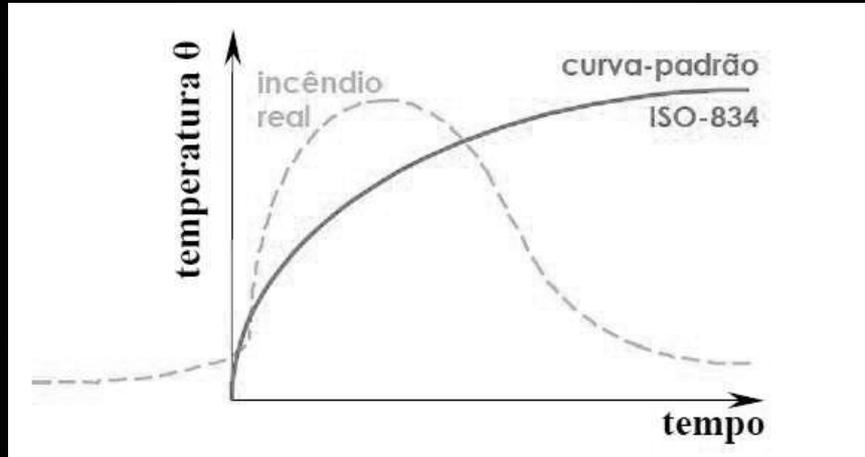


Curvas padronizadas de incêndio

**ABNT NBR 15200:2012 Curva ISO 834**

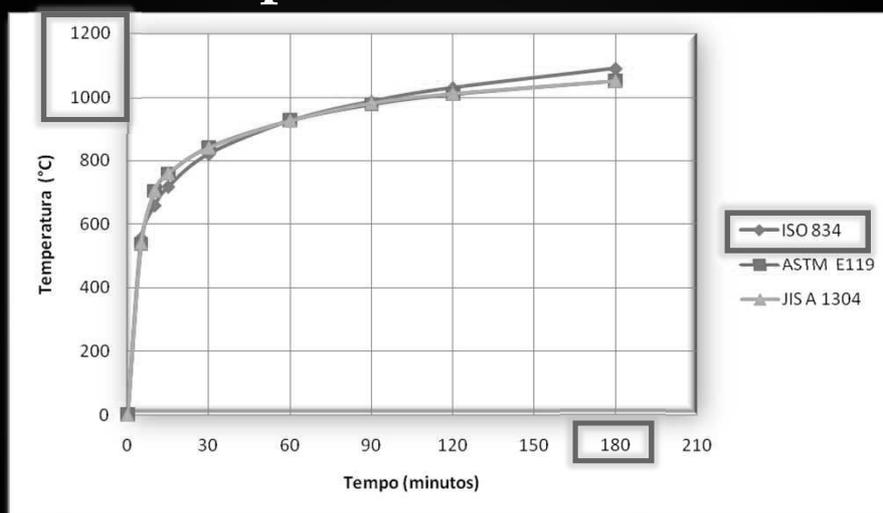
# Incêndio real e incêndio padrão

Costa & Silva, 2003



ABNT NBR 15200:2012 Curva ISO 834

# Métodos de ensaio: curvas de incêndio padrão



Phan, 2004

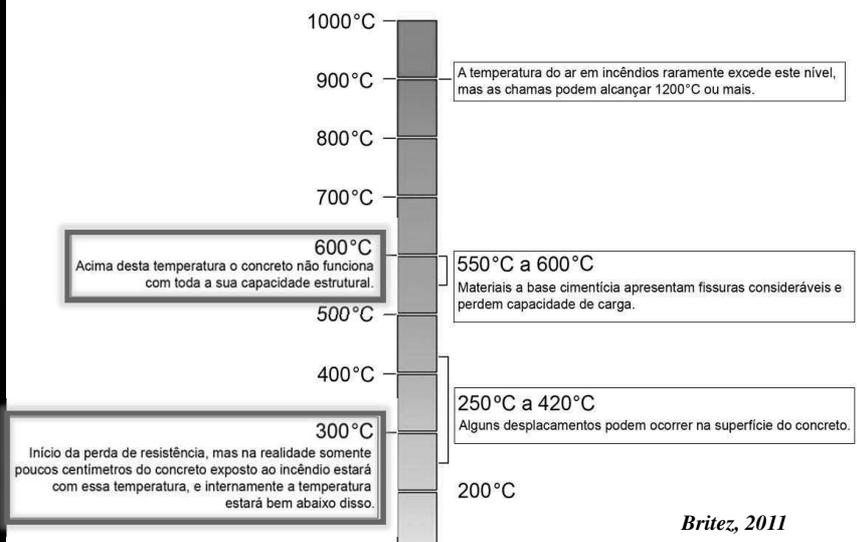
# Métodos de ensaio: Curvas de incêndio-padrão

Phan, 2004

Tempo (min)	Elevação de temperatura no forno ( $T - T_0$ ) em °C		
	ISO 834	ASTM E119	JIS A 1304
5	556	538	540
10	659	704	705
15	718	759	760
30	821	843	840
60	925	927	925
90	986	978	980
120	1029	1010	1010
180	1090	1052	1050

# Concreto em situação de incêndio

## O que acontece com o aumento da temperatura?



## Normalização nacional

- **NBR 5628/2001**  
Componentes construtivos estruturais –  
determinação da resistência ao fogo
- **NBR 14432/2001**  
Exigências de resistência ao fogo de elementos  
construtivos de edificações - Procedimento
- **NBR 15200/2012**  
Projeto de estruturas de concreto em situação de  
incêndio

## ABNT NBR 5628:2001

- Trata das prescritivas do **método de ensaio** destinado a determinar a resistência ao fogo de componentes construtivos estruturais representada pelo tempo em que respectivas amostras, submetidas a um **programa térmico**, atendem a exigências mínimas pré-estabelecidas

- Baseada na **curva de incêndio-padrão ISO 834**

**norma para experimentos**

# ABNT NBR 14432:2001

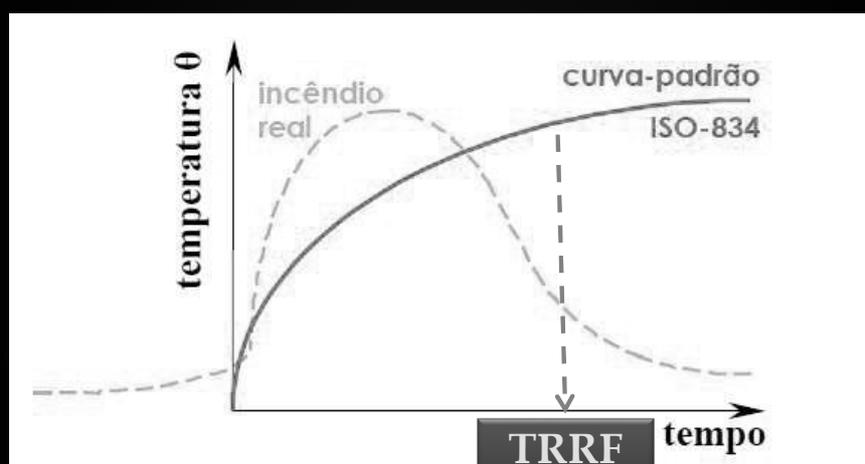
Define um dos principais conceitos quando se trata de exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos: **TRRF** ou **T**empo **R**equerido de **R**esistência ao **F**ogo

O TRRF é definido como o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo, quando sujeito ao incêndio-padrão

Edificação acima de 30m: IT 08/2011 (Corpo de Bombeiros)

Decreto 56.819 (março/2011) – Estado de SP

## Incêndio real e incêndio padrão



Costa & Silva, 2003

# ABNT NBR 14432:2001

Ocupação/ Uso	Altura da Edificação (metros)				
	$h \leq 6$	$6 < h \leq 12$	$12 < h \leq 23$	$23 < h \leq 30$	$h > 30$
Residências	30	30	60	90	120
Hotéis	30	60	60	90	120
Supermercados	60	60	60	90	120
Escritórios	30	60	60	90	120
Shoppings	60	60	60	90	120
Escolas	30	30	60	90	120
Hospitais	30	60	60	90	120

somente até 120 minutos...

# ABNT NBR 14432:2001 x IT08/2011

ABNT NBR 14432:2001

IT/08 (2011) - CB

Ocupação/ Uso	Altura da Edificação							
	$h \leq 6m$	$6m < h \leq 12m$	$12m < h \leq 23m$	$23m < h \leq 30m$	$30m < h \leq 80m$	$80m < h \leq 120m$	$120m < h \leq 150m$	$150m < h \leq 180m$
Residência	30	30	60	90	120	120	150	180
Hotel	30	60	60	90	120	150	180	180
Supermercado	60	60	60	90	120	150	150	180
Escritório	30	60	60	90	120	120	150	180
Shopping	60	60	60	90	120	150	150	180
Escola	30	30	60	90	120	120	150	180
Hospital	30	60	60	90	120	150	180	180
Igreja	60	60	60	90	120	150		

# ABNT NBR 15200:2012

- Válida para pré-moldados, pré-fabricados, protendidos na ausência de normas específicas
- Permite o uso de procedimentos e normas internacionais desde que demonstrado o atendimento ao nível de segurança da norma brasileira
- **Método tabular, método analítico (adequado para nós fixos), método simplificado, métodos avançados, método experimental**
- Inclusão de Anexos de A a G (destaque para o **Método do tempo equivalente**)

# ABNT NBR 15200:2012

TRRF min	$\lambda_{R1}$	$b_{min}/c_t$			
		$v_{R1}=0,15$	$v_{R1}=0,30$	$v_{R1}=0,50$	$v_{R1}=0,70$
30	30	150/25	200/30.200	300/30.250	500/40.550
	40	150/25	150/30.200	300/25	500/40.550
	50	150/25	200/40.250	350/40.500	550/25
	60	150/25	300/25	550/25	600/30
	70	200/25	350/40.500	550/30.600	a
	80	250/25	550/25	a	a
60	30	150/30.200	200/40.300	300/40.500	500/25
	40	200/30.250	300/35.350	450/50.550	550/40.600
	50	200/40.300	350/45.550	550/30.600	600/55
	60	250/35.400	450/50.550	600/35	a
	70	300/40.500	550/30.600	600/80	a
	80	400/40.550	600/30	a	a
90	30	200/40.250	300/40.400	500/50.550	550/40.600
	40	250/40.350	350/50.550	550/35.600	600/50
	50	300/40.500	500/60.550	600/40	a
	60	300/50.550	550/45.600	a	a
	70	400/50.550	600/45	a	a
	80	500/60.600	a	a	a

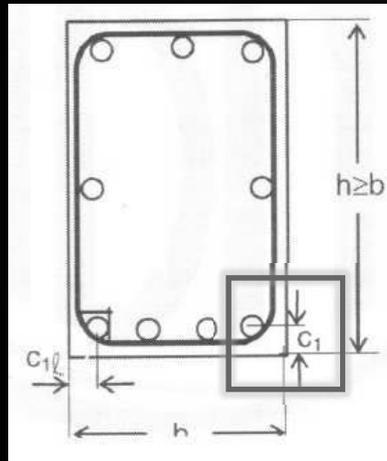
Requer largura superior a 600mm. Avaliação específica é requerida

TRRF min	$\lambda_{R1}$	$b_{min}/c_t$			
		$v_{R1}=0,15$	$v_{R1}=0,30$	$v_{R1}=0,50$	$v_{R1}=0,70$
120	30	250/50:350/25	400/50:550/25	550/25	550/60:600/45
	40	300/50:500/25	500/50:550/25	550/50:600/25	a
	50	400/50:550/25	550/50:600/25	600/60	a
	60	500/50:550/25	550/55:600/50	a	a
	70	500/60:600/25	600/60	a	a
	80	550/50:600/25	a	a	a
180	30	400/50:500/25	500/60:550/25	550/60:600/30	a
	40	500/50:550/25	550/50:600/25	600/80	a
	50	550/25	600/60	a	a
	60	550/50:600/25	600/80	a	a
	70	600/55	a	a	a
	80	600/70	a	a	a

Requerer Largura superior a 600mm. Avaliação específica é requerida

**método tabular (ao todo 09 tabelas): Anexo E**

## ABNT NBR 15200:2012



A medida "C1" é do cento geométrico da armadura (não é o cobrimento especificado em projeto para um dado elemento estrutural)

## Spalling (desplacamento)

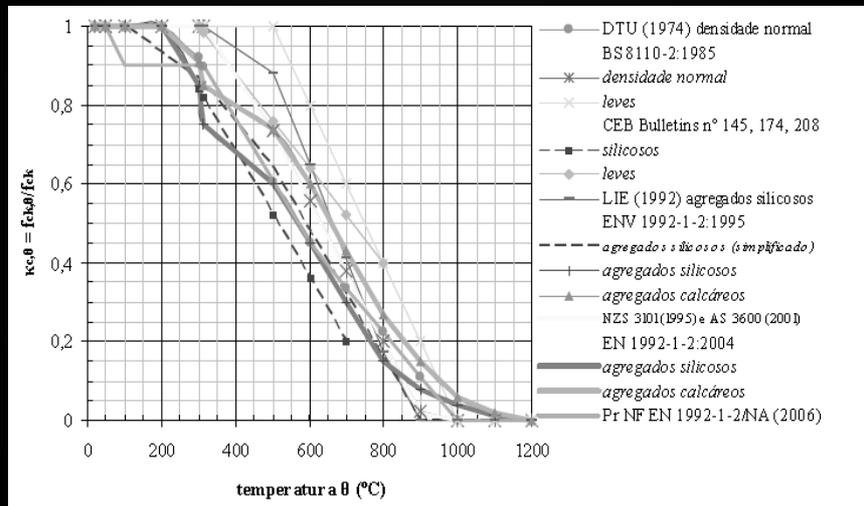


Kodur, 2005

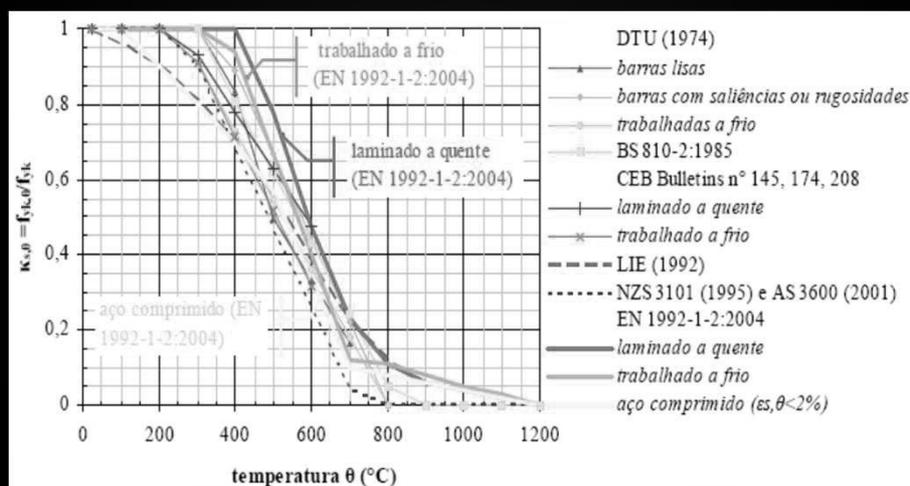
Desplacamento de camadas ou pedaços de concreto da superfície de um elemento estrutural quando exposto a elevadas temperaturas e rápidas taxas de aquecimento, ambas caracterizadas por um cenário de incêndio

mais suscetível  
no CAR ?

## Propriedades mecânicas do concreto: Costa (2008)



## Propriedades mecânicas do aço: Costa (2008)



Mito ou verdade?

# Contexto e literatura (tese exemplo)

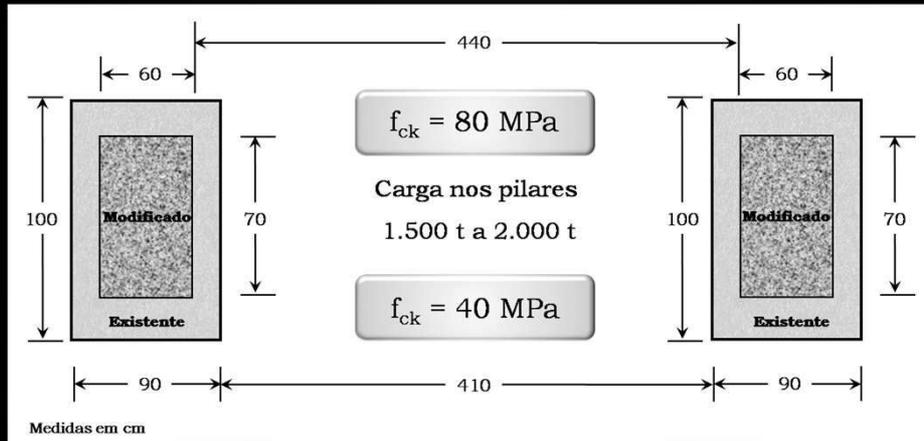
defesa ocorrida em 23/03/2011

## Contexto



concreto pigmentado

## Contexto



adequação ao projeto

## Contexto

Materiais	Quantidades (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento CPV ARI + escória	460(cimento) +163 (escória)
Sílica ativa ou metacaulim	93 (15% de adição)
Agregado miúdo (quartzo)	550
Agregado graúdo (basalto)	1027
Pigmento inorgânico (óxido de ferro)	25 (4%)
Aditivo superplastificante (policarboxilato)	6,2 (1%)
Aditivo estabilizador de hidratação	3,2 (0,5%)
Água (relação água/materiais cimentícios = 0,19)	135 (a/mc = 0,19)

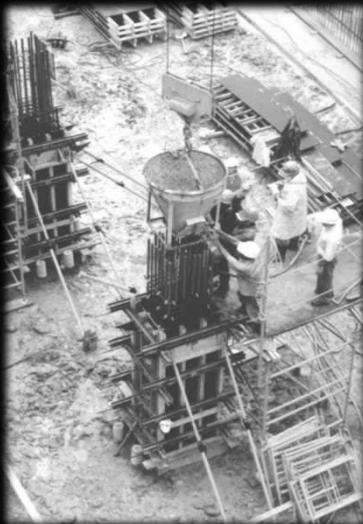
dosagem original

## Contexto



aspecto do concreto

## Contexto



concreto pigmentado



## Originalidades (e características)

✓ Pioneirismo e réplica

✓ Tipo de agregado graúdo (basalto)

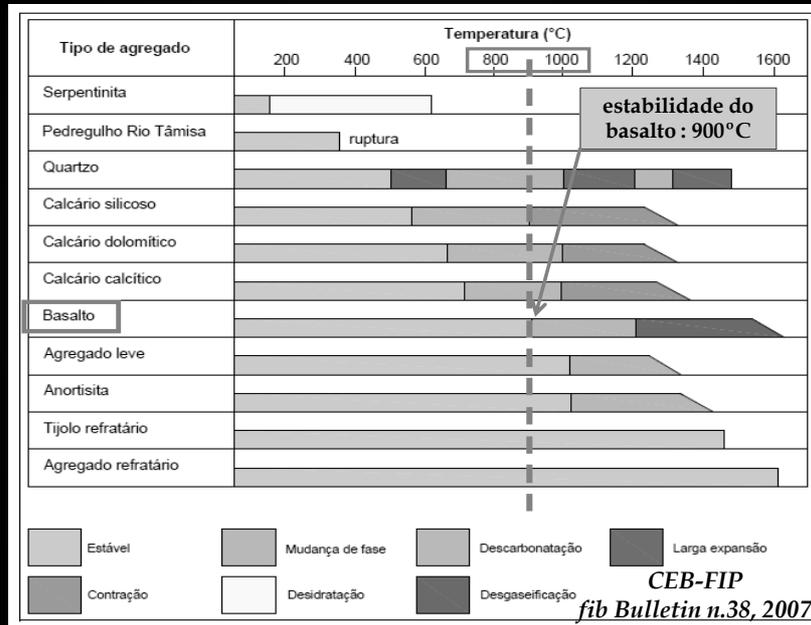
✓ Idade e envelhecimento natural\*

✓ Concreto colorido pigmentado\*

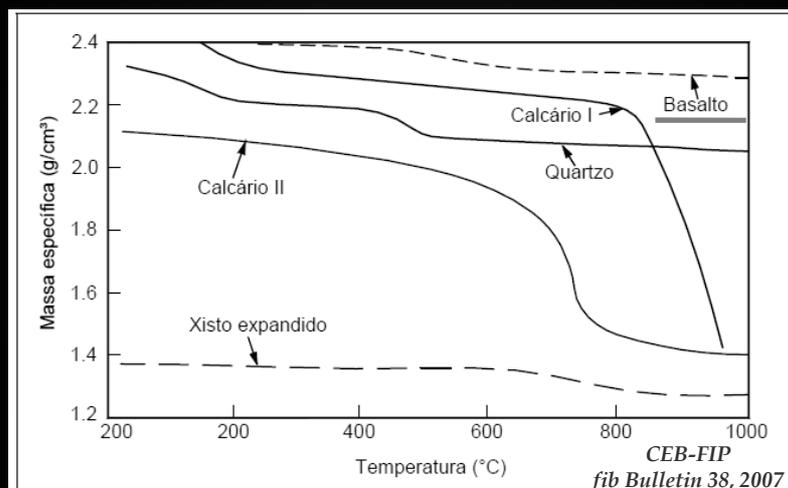
\* internacionais

favorável ou desfavorável?

## Originalidade: tipo de agregado

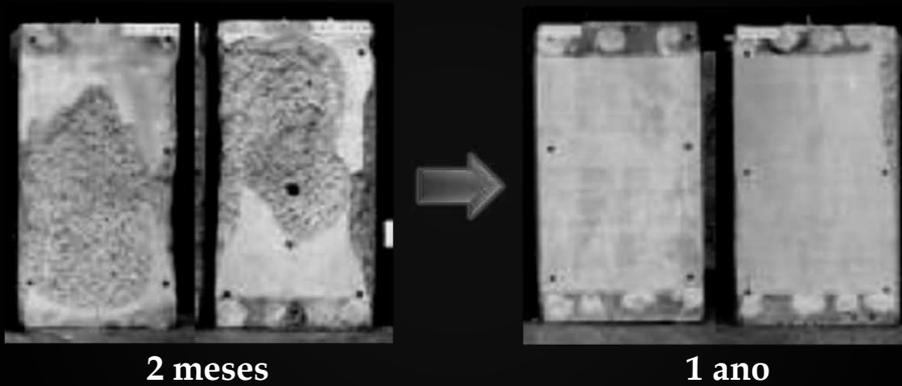


## Originalidade: tipo de agregado



Agregado basalto: menor perda de massa

## Originalidade: idade avançada



elementos irmãos ensaiados  
ao fogo com idades distintas

*Morita et al, 2002*

## Algumas discussões

- ✓ Amostras (universos distintos)
- ✓ Método de ensaio (carregamento)
- ✓ Presença de aço (concreto armado)
- ✓ Tamanho da seção transversal
- ✓ Fibras de polipropileno

importante em situação de incêndio

# Universo das amostras

GRUPO DOS MATERIAIS

corpos de prova cilíndricos e/ou cúbicos

GRUPO DOS COMPONENTES

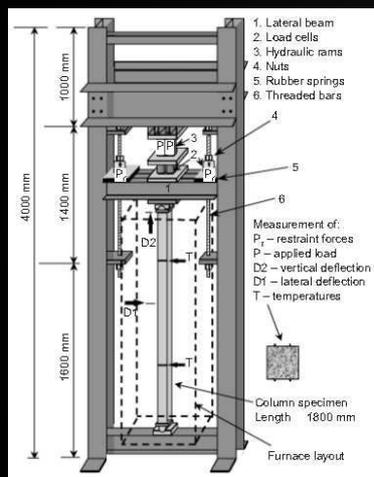
vigas pilares e lajes

GRUPO DA ESTRUTURA

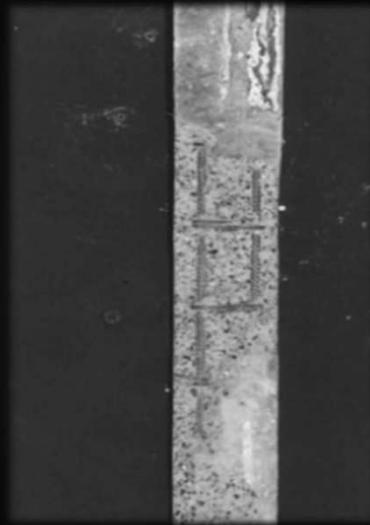
sistemas estruturais protótipos e/ou edificações incendiadas

comportamentos distintos

# Universo das amostras

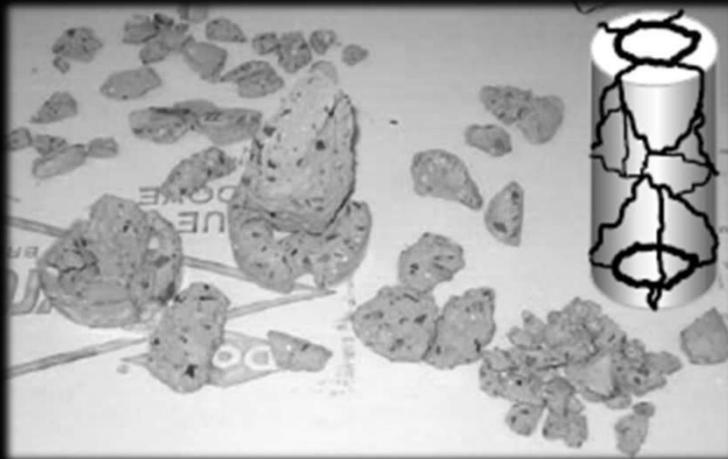


elemento de 12,5cm x 12,5cm x 1,80m



Benmarce ;  
Guenfoud, 2005

## Universo das amostras



*Phan, 2002*

## Discussão

**O tipo e as dimensões da amostra influenciam potencialmente nos resultados obtidos referentes ao material que está sendo avaliado, independentemente de sua classe de resistência, por exemplo.**

## Métodos de ensaio

A presença de carregamento na amostra é favorável ou desfavorável quando em ensaios em elevadas temperaturas?

## Estrutura global



*Projeto Cardington*

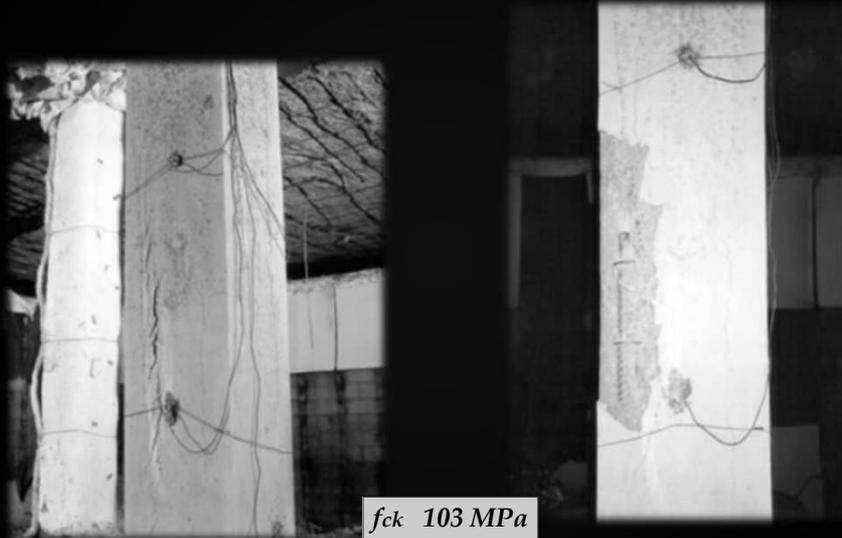


*f<sub>ck</sub> 103 MPa (pilares)*  
*f<sub>ck</sub> 74 MPa (lajes)*

*Chana e Price, 2003*

**Pavimento térreo**

## Estrutura global (detalhes)



Chana e Price, 2003

## Métodos de ensaio

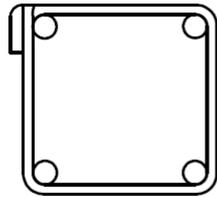
A presença de carregamento na amostra parece conduzir a menos *spalling*...

- ✓ depende de diversos fatores
- ✓ resultados sempre específicos
- ✓ deve haver comparativo direto
- ✓ sem resposta precisa, sem padrão

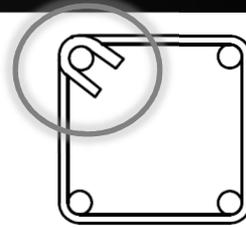
... fenômeno aleatório

## Presença de aço na amostra

elemento de concreto armado (pilar)



(a) Configuração convencional de estribos



(b) Configuração modificada de estribos

espaçamento de estribos:  
0,75 vezes do convencional

*Kodur, 2005*

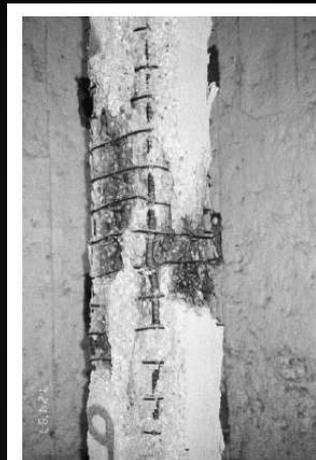
## Presença de aço na amostra



Configuração Convencional de Estribos

*Kodur, 2005*

*f<sub>ck</sub> 83 MPa*

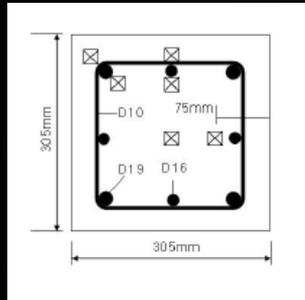


Configuração Modificada de Estribos

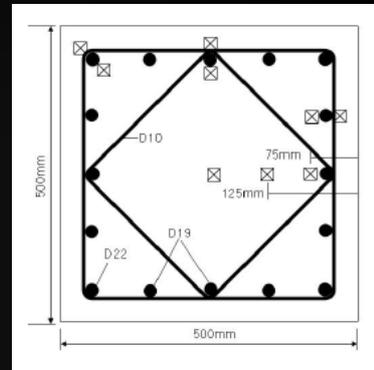
**confinamento**

**corpos de prova não possuem armadura...**

## Tamanho da seção transversal



30,5cm x 30,5cm x 3,4m

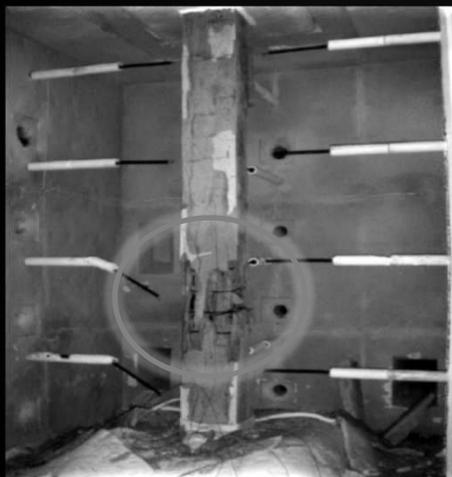


50cm x 50cm x 3,4m

**pilares de 120MPa  
(mesmo concreto, taxa de aço e  
intensidade de carregamento)**

*Park et al., 2007*

## Tamanho da seção transversal



30,5cm x 30,5cm (120MPa)

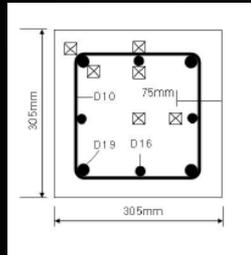


50cm x 50cm (120MPa)

*Park et al., 2007*

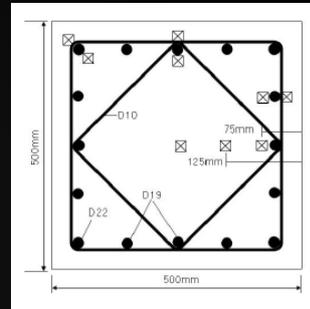
## Tamanho da seção transversal

30,5cm x 30,5cm x 3,4m



$f_{ck}$  120 MPa

50cm x 50cm x 3,4m



- ✓ *spalling*: até 13mm
- ✓ resistência ao fogo: 176min.
- ✓ colapso por compressão

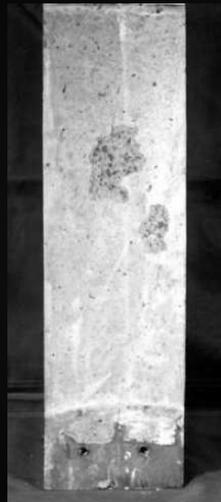
- ✓ *spalling*: de 0mm até 5mm
- ✓ resistência ao fogo: 240min.
- ✓ não houve colapso

Park et al., 2007

## Presença de fibras de polipropileno



sem fibras



com fibras

maiores quantidades com menores diâmetros e maiores comprimentos, diminuem o *spalling*.

Kawai, 2005



2kg/m<sup>3</sup> ?

## Resumo dos agentes influenciadores

- ✓ tipo da amostra (cp / elemento / estrutura)
- ✓ presença e intensidade de carregamento
- ✓ presença e configuração da armadura
- ✓ geometria e tamanho da seção transversal
- ✓ espessura de cobrimento (concreto armado)
- ✓ idade da amostra (grau de hidratação)
- ✓ classe de resistência do concreto
- ✓ natureza do agregado
- ✓ presença de fibras de polipropileno...

## Visão geral

**O concreto de alta resistência pode apresentar comportamento distinto, em condições de incêndio, simplesmente pela mudança do tipo de agregado ou da configuração da armadura, por exemplo.**

**muitos agentes influenciadores**

*CEB-FIP  
fib Bulletin 38, 2007*

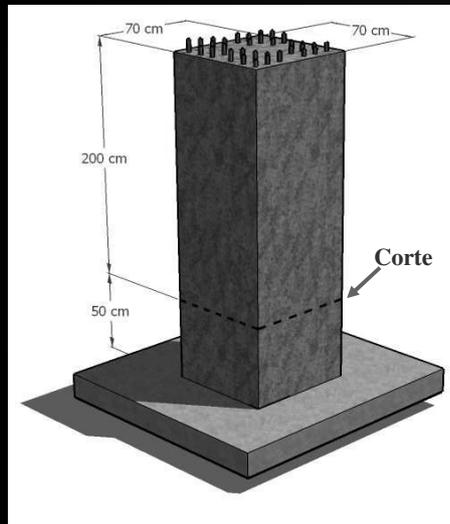
# Programa experimental



## Amostra

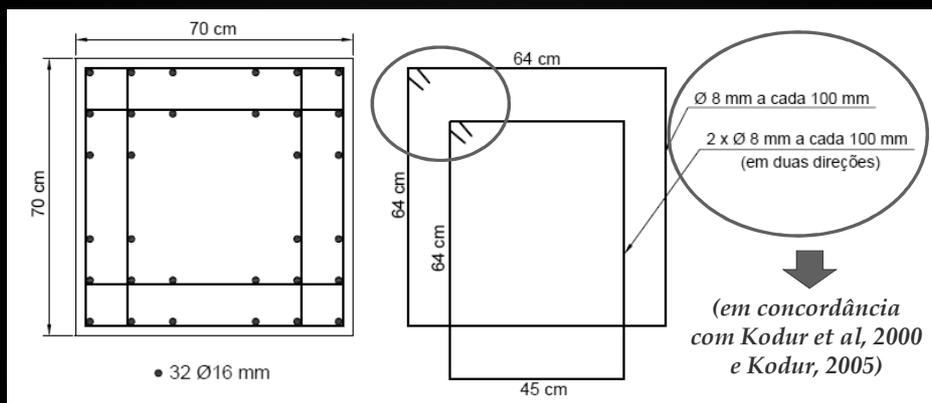


## Amostra experimentada



- ✓ seção: 70cm x 70cm
- ✓ altura útil: 2m
- ✓ massa: 2,5t
- ✓ idade: 8 anos
- ✓ concreto:  $f_{ck}$  140MPa
- ✓ cobrimento: 25mm
- ✓ parte remanescente
- ✓ 16 termopares

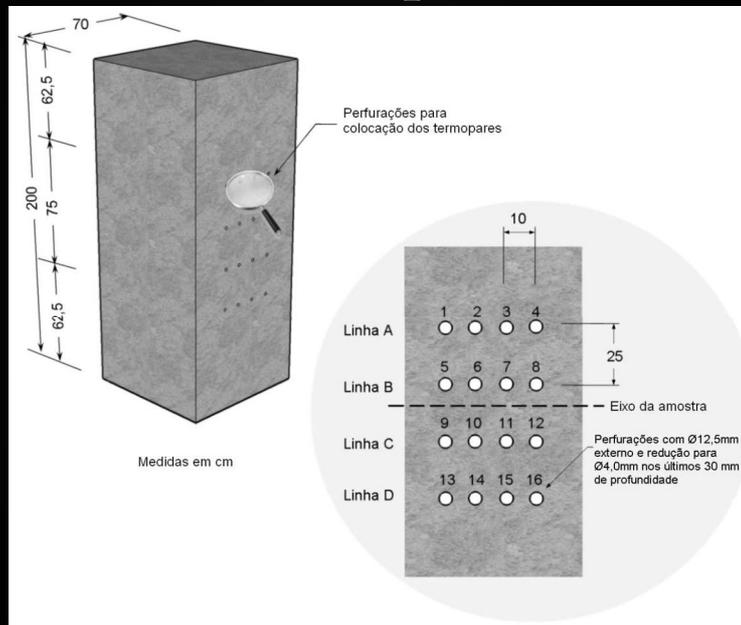
## Configuração da armadura



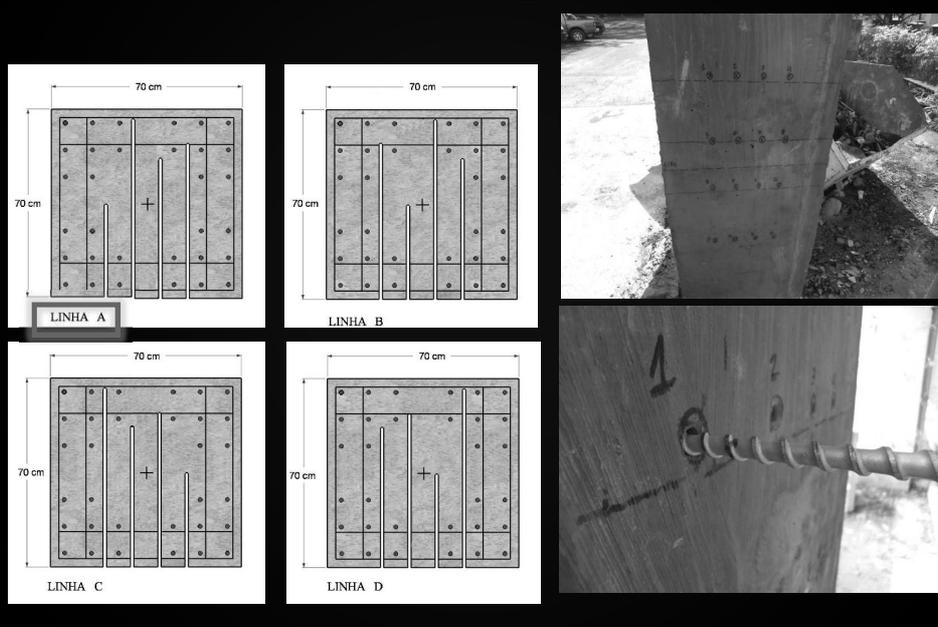
geometria e configuração da armadura

projeto original *e-Tower* : 2001

# Esquema dos termopares



# Esquema dos termopares



## Detalhe da ancoragem (içamento)



- ✓ ancoragem química
- ✓ resina epoxídica
- ✓ ganchos  $\varnothing$  16mm
- ✓ profundidade 20cm
- ✓ massa da amostra:

**2,5 toneladas**

## Corte, içamento e transporte



- ✓ corte com uso de fio diamantado
- ✓ içamento e transporte da amostra



## Amostra remanescente



região das extrações dos testemunhos

## (Re) caracterização do concreto

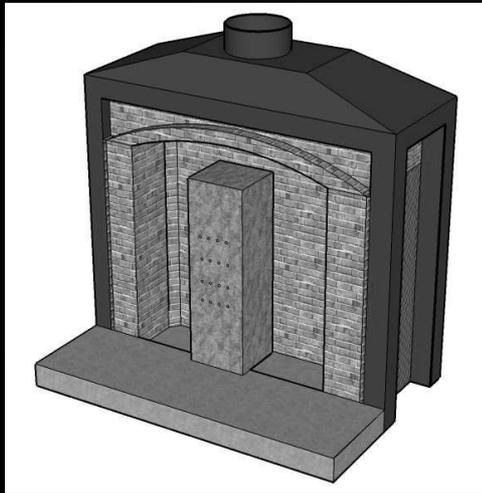


após oito anos  
de idade:

**140 MPa**

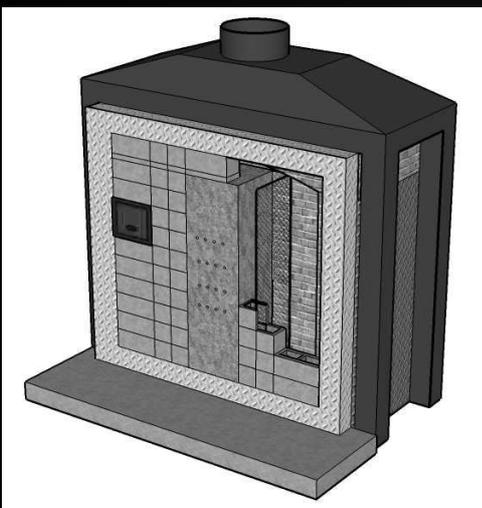


## Esquema geral do experimento



- ✓ forno IPT (tradição)
- ✓ logística: 600m
- ✓ sem carregamento
- ✓ exposição: três faces
- ✓ curva-padrão ISO 834
- ✓ simulação: 180 min

## Esquema geral do experimento



- ✓ alvenaria fechamento
- ✓ gaiola de segurança
- ✓ fibra cerâmica interna
- ✓ grauteamento
- ✓ preenchimento areia
- ✓ janelas de alívio

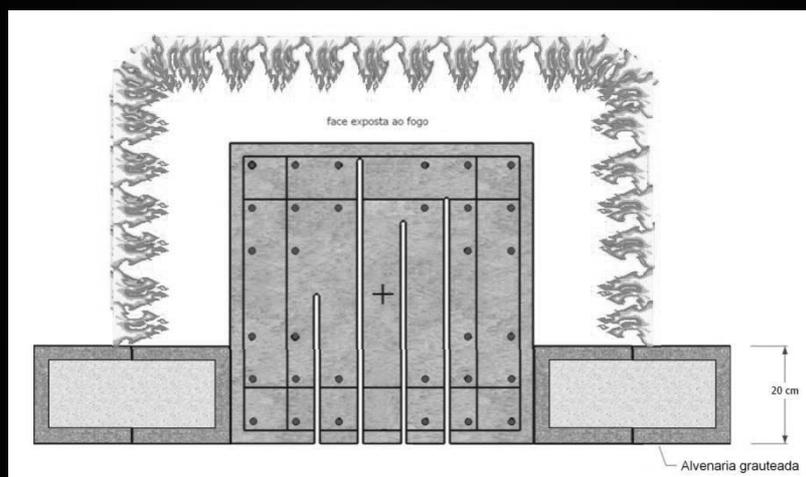
## Esquema geral do experimento

extremidades  
protegidas com manta  
de fibra cerâmica



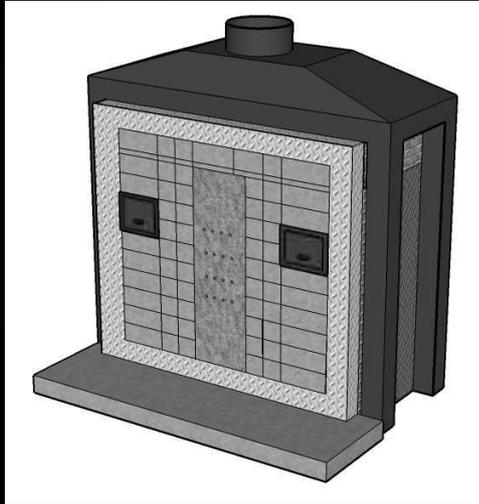
simulação de calor  
unidirecional

## Esquema da simulação (em planta)



exposição em três faces

## Experimento

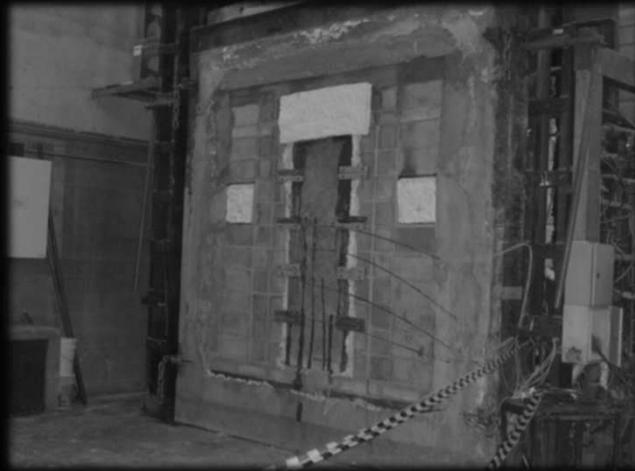


## Programa experimental: pré ensaio



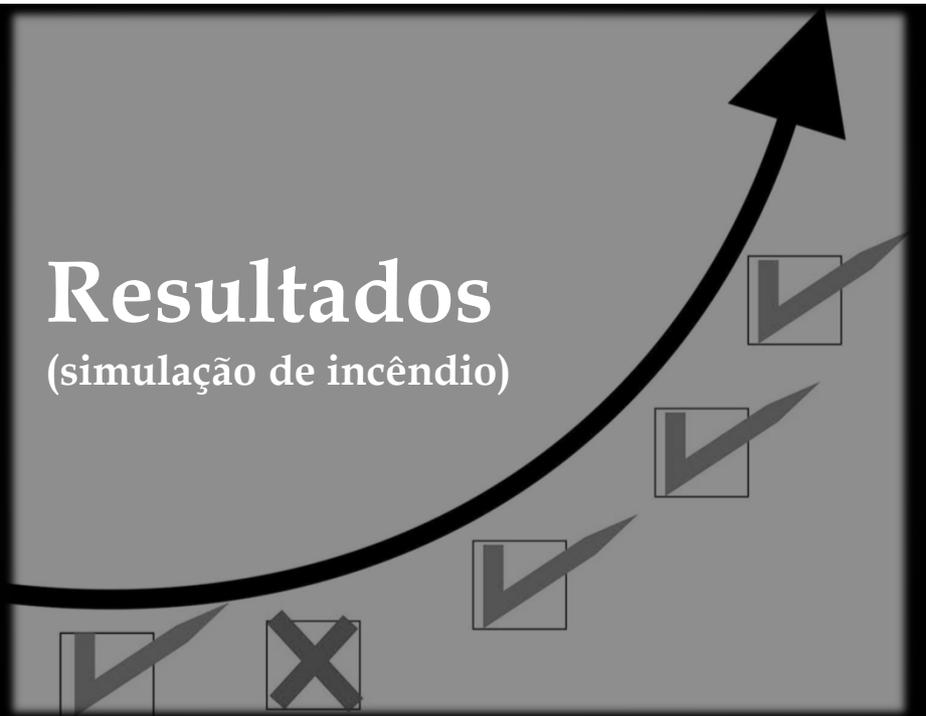
instrumentação precedente ao ensaio

## Programa experimental: ensaio



monitoramento durante o ensaio

**Resultados**  
(simulação de incêndio)



## Resultados preliminares: integridade



condições da amostra após o ensaio

## Integridade

*spalling* superficial nas  
três faces expostas



detalhe das  
arestas intactas

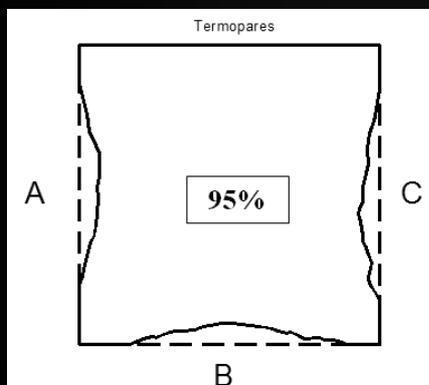
## Integridade: *spalling*



- ✓ *spalling* superficial
- ✓ ocorrência: 36min (inicial)
- ✓ som "pipocamento"
- ✓ arestas intactas
- ✓ tipo: deslocamento
- ✓ profundidade: 0 até 48mm (num único ponto), média de 9,3mm

## Integridade: seção transversal

aproximadamente 5 %  
da área da seção transversal  
perdida por *spalling*



profundidade de *spalling*  
quantificada em 450  
pontos (150 por face)

profundidade  
média: 9,3mm

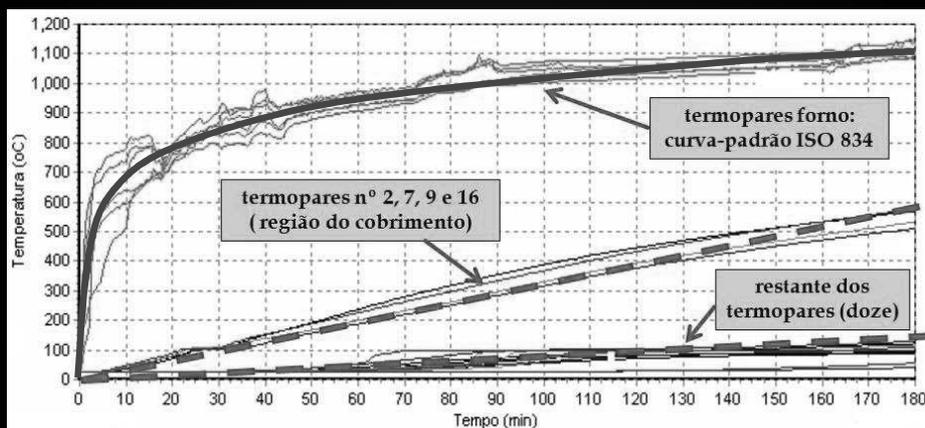
## Integridade: armadura exposta



armadura exposta:

inferior a 5%

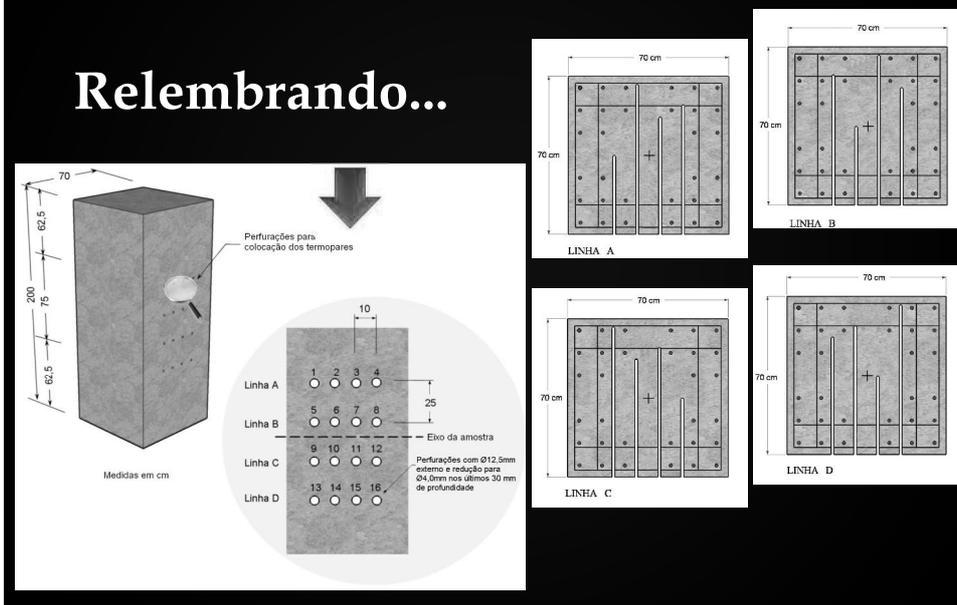
## Evolução das temperaturas



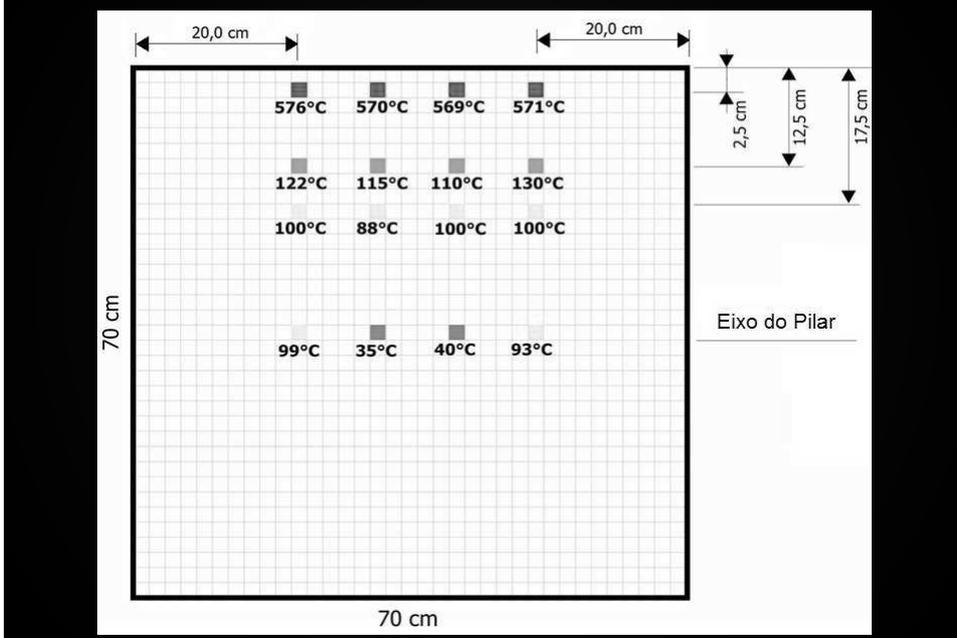
termopares internos e externos

# Esquema dos termopares

## Relembrando...



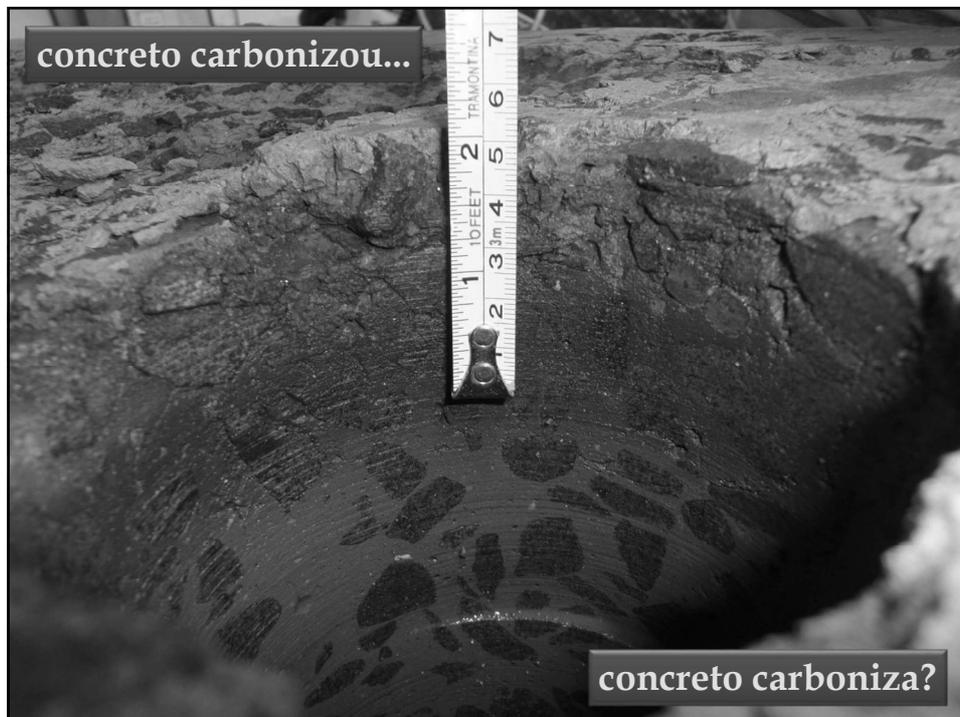
# Temperaturas: instante 180 minutos



## Indicador colorimétrico: externo



coloração preservada na projeção da alvenaria



concreto carbonizou...

concreto carboniza?

## Indicador colorimétrico (faces)



região do centro da face exposta

- ✓ óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
- ✓ profundidade:  $\approx 55\text{mm}$
- ✓ centro das faces
- ✓ arestas não evidentes
- ✓  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- ✓ hematita em magnetita

aproximadamente  $600^\circ\text{C}$

*Rosenqvist, 2004*



concreto não carboniza!  
madeira carboniza!

*Edna Moura Pinto, 2007*

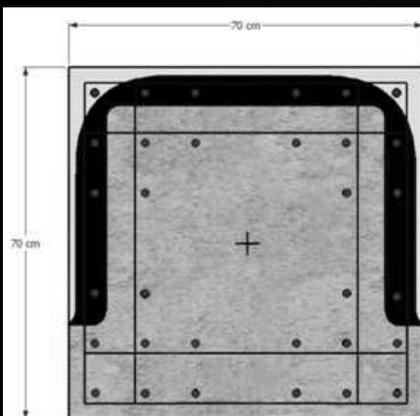
## Indicador colorimétrico: arestas

amostra extraída na região da aresta do pilar (exposta ao fogo)

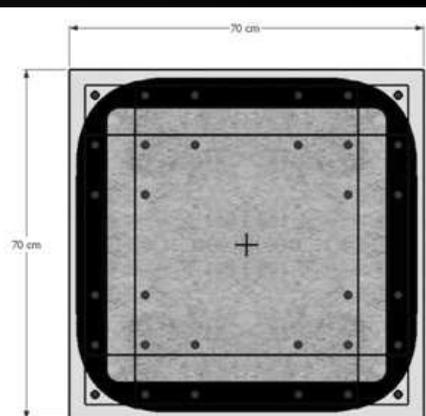


coloração resultante não tão evidente quanto na região central da face

## Indicador colorimétrico (pigmento)

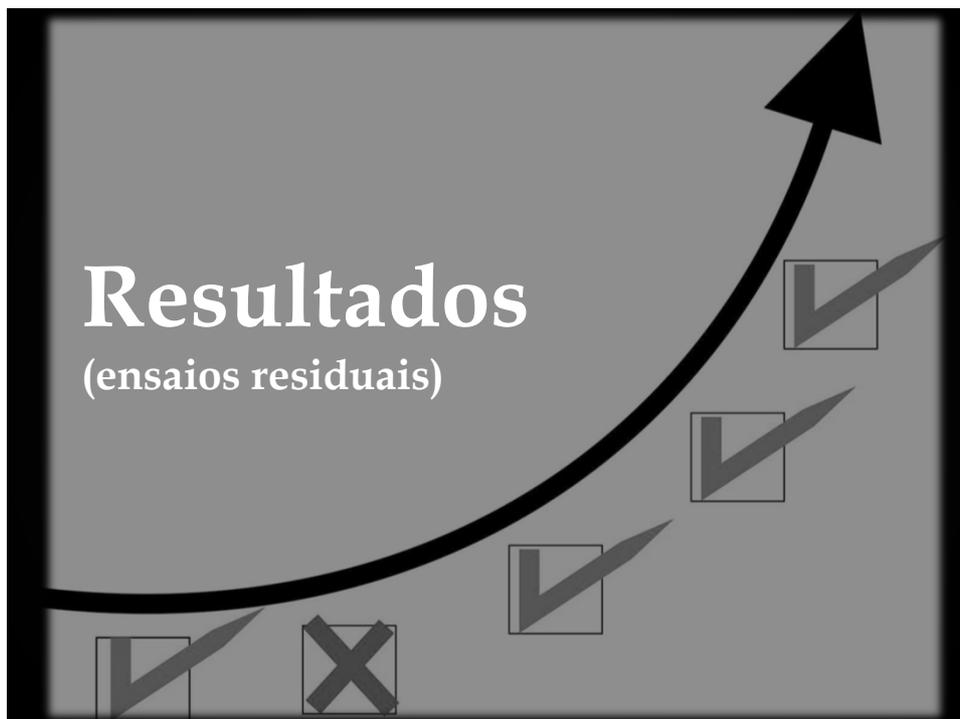


(a) situação real



(b) situação hipotética

seção transversal pós simulação



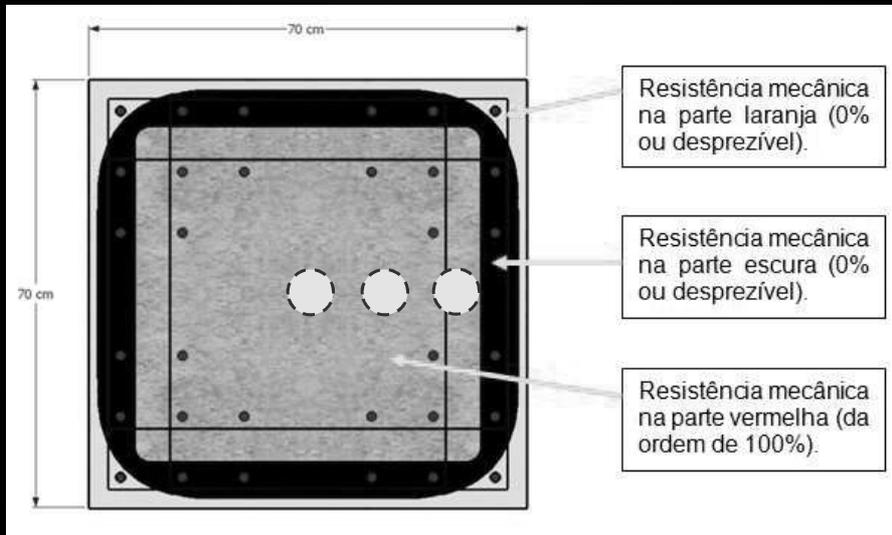
## Propriedades mecânicas residuais (concreto)

testemunhos extraídos  
próximo às profundidades  
dos termopares

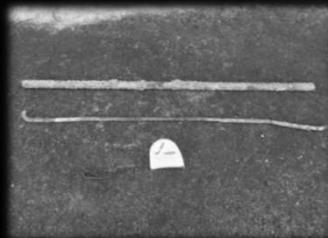


na direção ortogonal  
às faces ( $\varnothing 75\text{mm}$  e  $\varnothing 50\text{mm}$ )

## Propriedades mecânicas residuais (concreto)

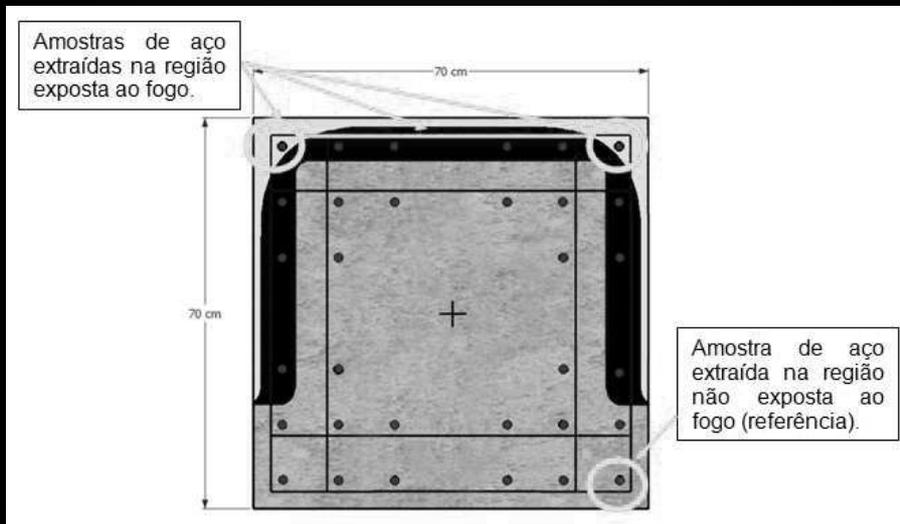


## Propriedades mecânicas residuais (aço)

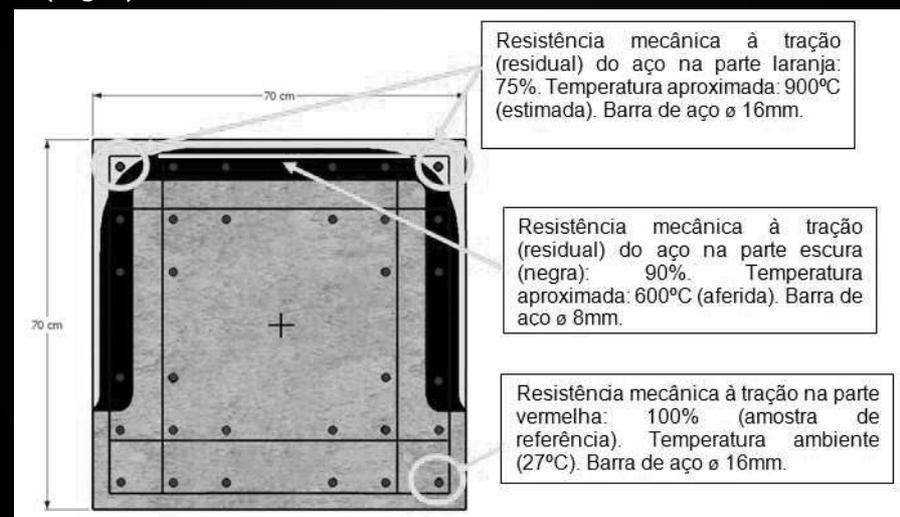


longitudinais e  
transversais

## Propriedades mecânicas residuais (aço)



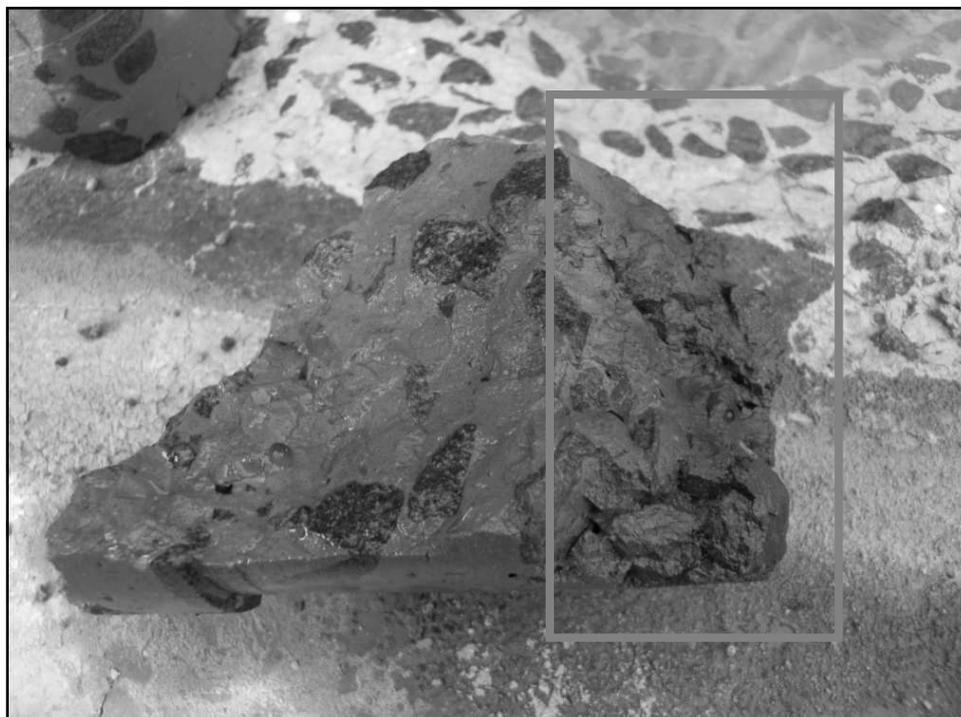
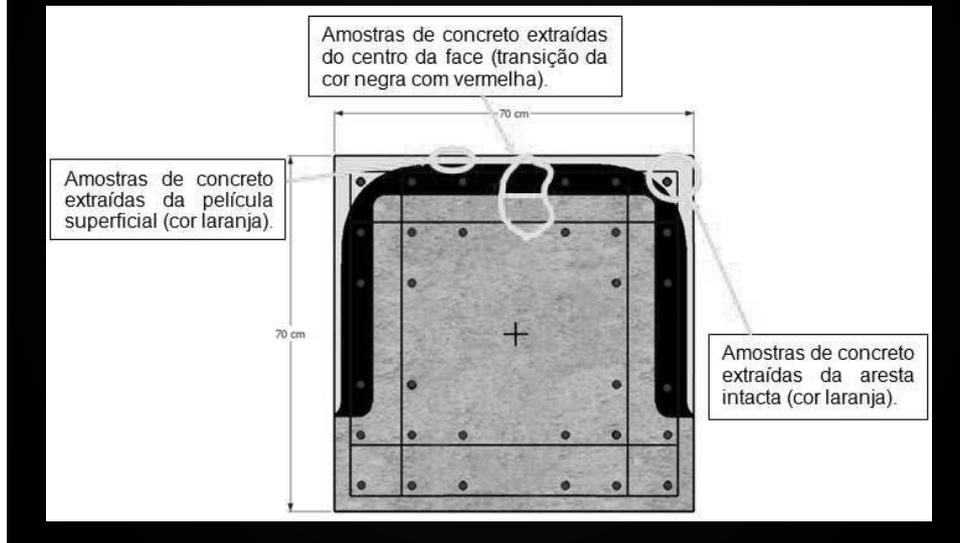
## Propriedades mecânicas residuais (aço)



muito similar a *Cabrita Neves; Rodrigues; Loureiro, 1996*

# Ensaio residuais

(caracterização mineralógica e análise térmica)

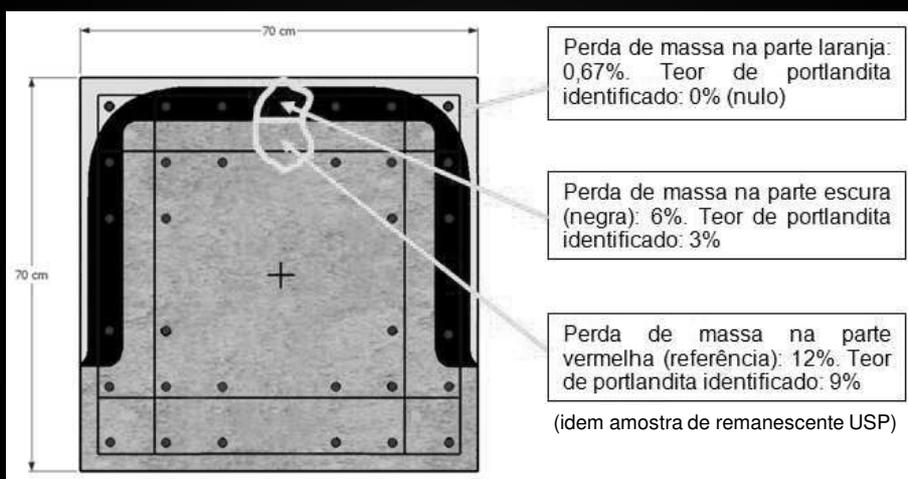


Minerais	Quimismo aproximado	cor vermelha		cor negra	cor laranja	
		remanescente (USP) 25°C	centro face (transição) < 570°C	centro face (transição) > 600°C	aresta intacta ≈ 900°C	película superficial ≈ 900°C
		amostra 01	amostra 02	amostra 03	amostra 04	amostra 05
Etringita	$\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	*	tr	*	-	-
Wollastonita	$\text{CaSiO}_3$	-	-	-	*	*
Akermanita	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	-	-	-	**	*
Quartzo	$\text{SiO}_2$	***	***	***	***	***
Feldspato	$(\text{K,Na})[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	tr	tr	tr	tr	*
Calcita	$\text{CaCO}_3$	*	*	*	tr	tr
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	tr	tr	-	-	-
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	-	-	tr	tr	tr
Periclásio	$\text{MgO}$	tr	tr	tr	tr	tr
Minerais anidros de Clínquer	Silicatos cálcicos anidros	***	***	***	***	***

**difratometrias por raios X**

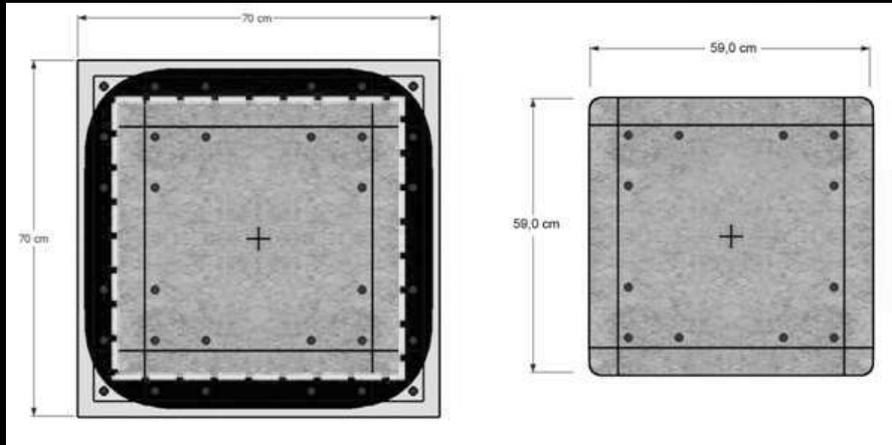
**Legenda:**  
 - = não detectado      \* = presente      \*\*\* = frequente  
 tr = traços              \*\* = pouco frequente

## Ensaio residuais (resultados termogravimétricos)



cor vermelha preservada = amostra remanescente

## Ensaio residuais (resultado global)



muito similar ao "Método dos 500°C", prescrito no Anexo B do Eurocode 2 (Anderberg, 1978)

Mito ou verdade?

**O concreto de alta  
resistência explode  
em situação de  
incêndio?**

## Pós-incêndio

- ✓ Recuperação propriedades
- ✓ Impressões fortes x realidade
- ✓ Demolição x reabilitação



*Incêndio no Edifício Windsor em Madrid, 2005 (Calavera Ruiz et al, 2007)*