

Vigas de Transição do Empreendimento Brookfield Malzoni em São Paulo

Um caso de aplicação de concreto massa e
autoadensável

Paulo Helene

Diretor PhD Engenharia

Presidente da ALCONPAT

Diretor Conselheiro IBRACON

Prof. Titular Universidade de São Paulo USP

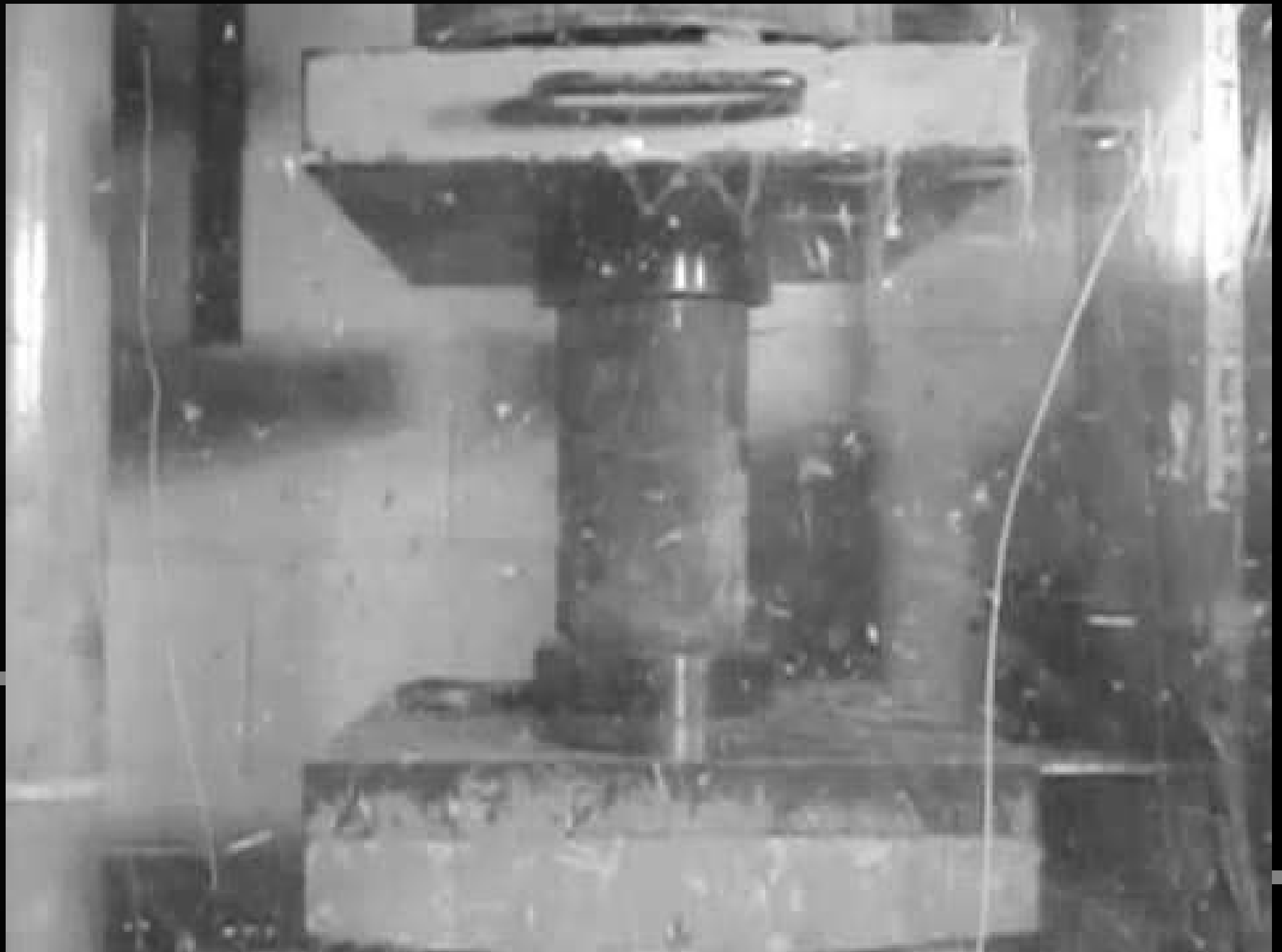
fib (CEB-FIP) member of Model Code for Service Life

Concreto de Alta Resistencia

Mitos e Verdades

HSC > 50MPa

**Concreto de
Alta Resistência
EXPLODE !**



VERDADE

HSC > 50MPa

**pode explodir o corpo de
prova no ensaio, mas
nunca o pilar, viga ou laje,
pois a ductilidade é um dos
critérios do Projeto
Estrutural**

HSC > 50MPa

**consome muito
cimento e não é
SUSTENTÁVEL**

VERDADE

pode consumir mais
cimento por m^3 , mas a
quantidade de CO_2 , de
Energía e de H_2O diminui
com MPa mais alto

CO_2 / MPa

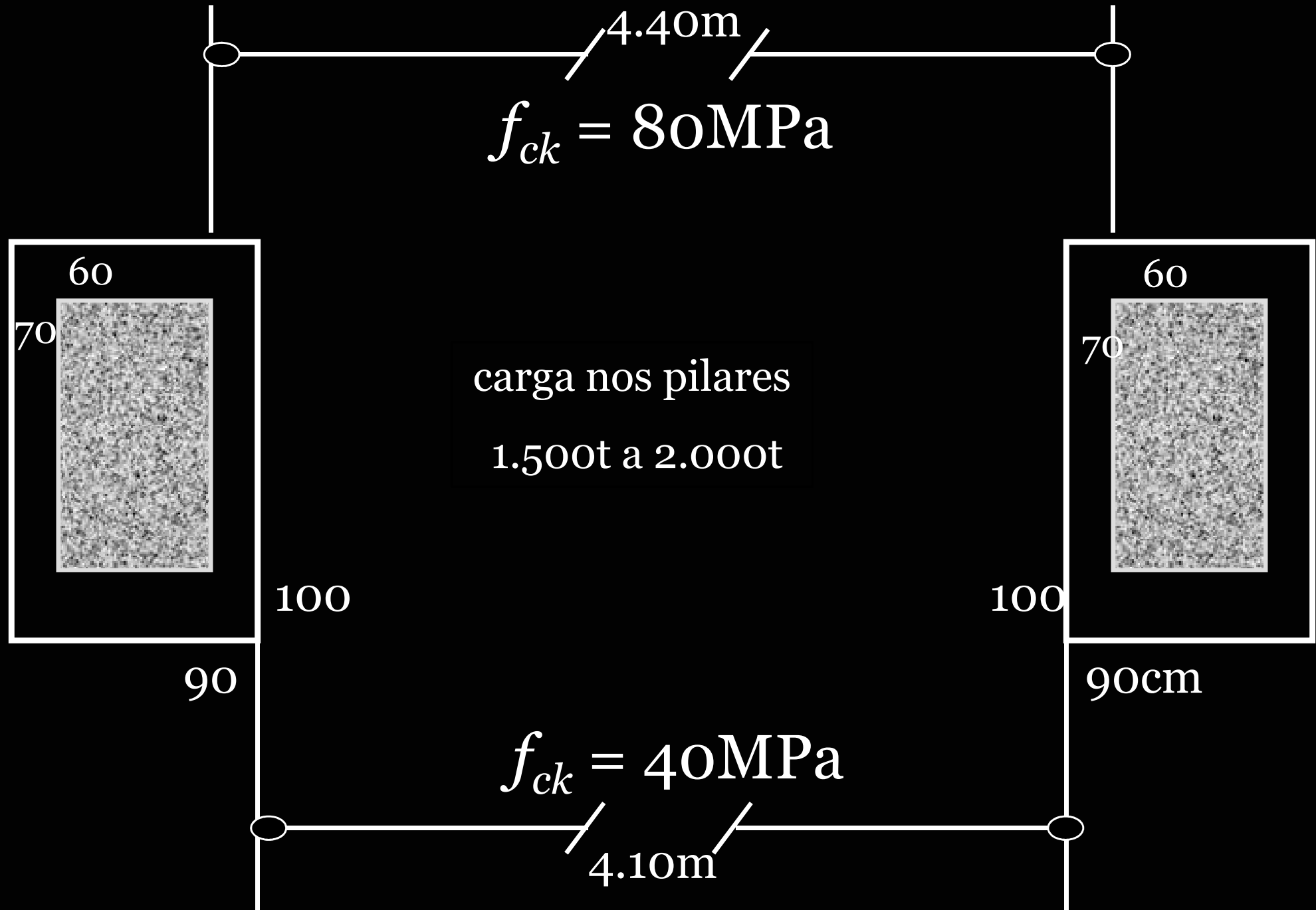
e-Tower



- Edifício e-Tower SP
- 42 andares
- Heliponto
- Piscina semi-olímpica
- Academia de ginástica
- 2 restaurantes
- Concreto colorido
- f_{ck} pilares = 80MPa



Projeto estrutural (*e-Tower*)







Economia de recursos naturais

Original:

$$f_{ck} = 40\text{MPa}$$

seção transversal \rightarrow 90cm x 100cm

$$0,90\text{m}^2$$

HPC / HSC:

$$f_{ck} = 80\text{MPa}$$

seção transversal \rightarrow 60cm x 70cm

$$\mathbf{0,42\text{m}^2}$$

Economia de recursos naturais

- **70% menos areia**
- **70% menos brita**
- **53% menos concreto**
- **53% menos água**
- **20% menos cimento**

HSC > 50MPa

**EXPLODE frente
a incêndio**
(explosive spalling)

Corpo-de-prova no forno



Eurotunnel 1996, 2006 e 2008





Edifício JOELMA

Estrutura de Concreto Armado

26 andares
10 garagens
+ 15 escritórios

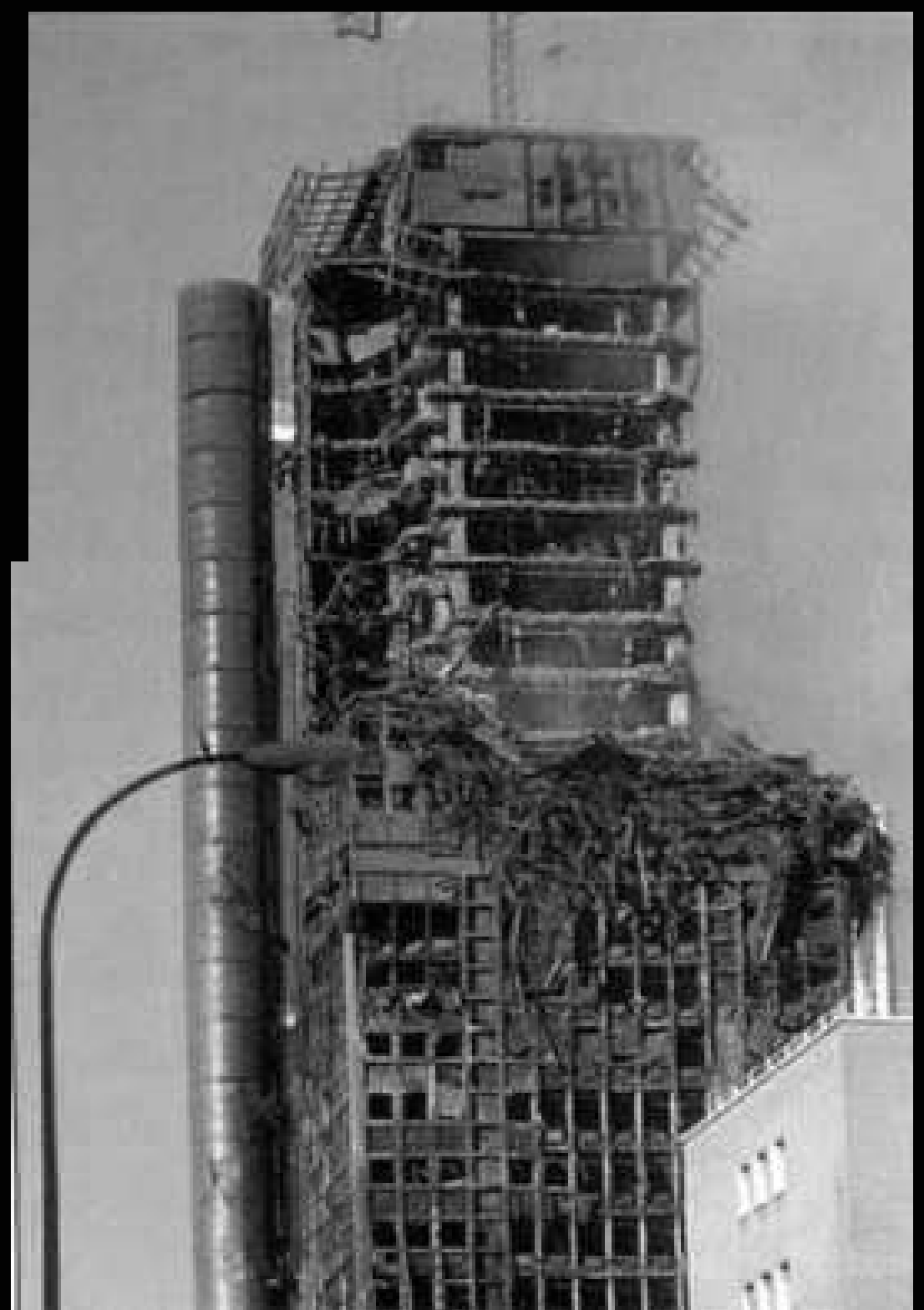
Construção: 1971

Incêndio: 1 Fevereiro 1974

duração: 6h30min
390min

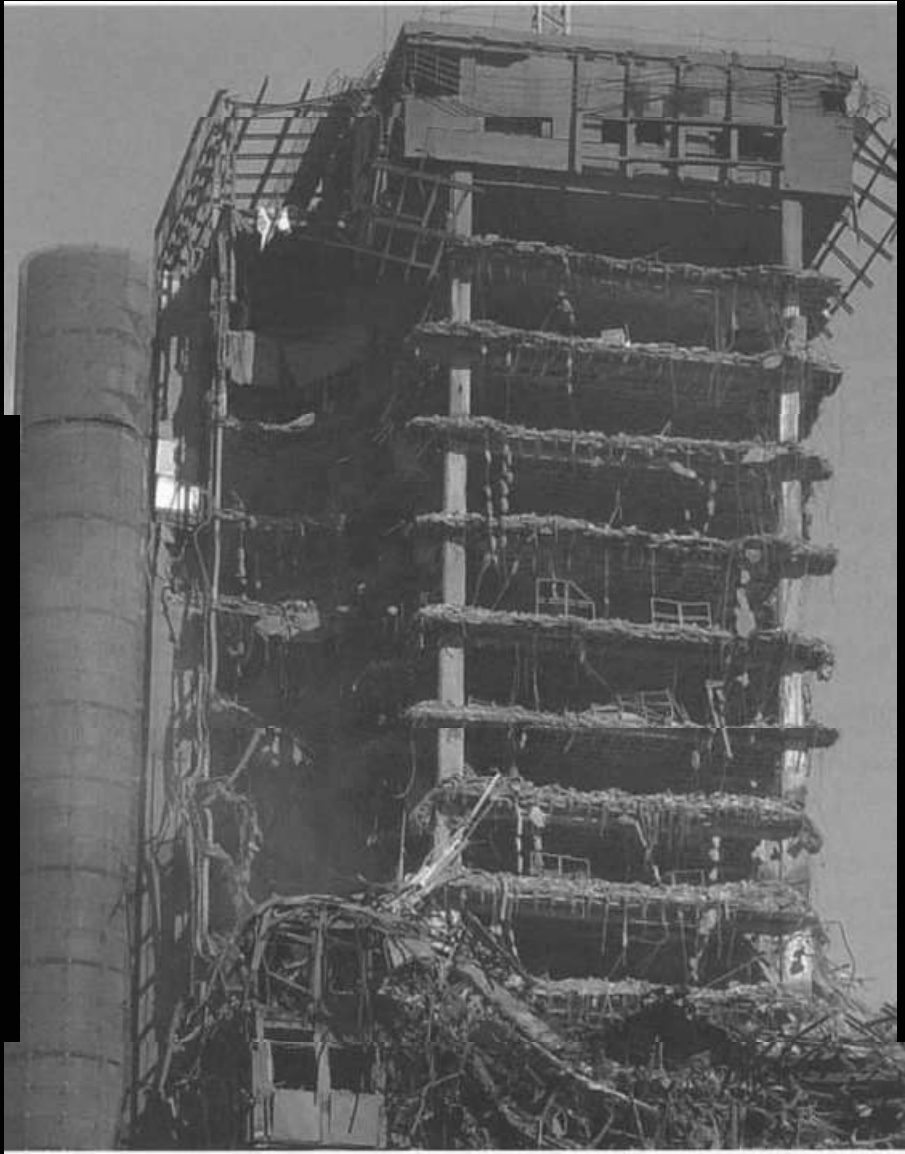
Perfeitas condições
Nada colapsou

Edificio WINDSOR
Madrid
España
2005



Edifício WINDSOR

Estrutura mista aço-concreto



37 andares
5 garagens
+ 31 escritórios

Construção: 1991

Incêndio: 12 Fevereiro 2005

Duração: 16h
960min

→ somente as partes de
aço colapsaram
→ totalmente demolido

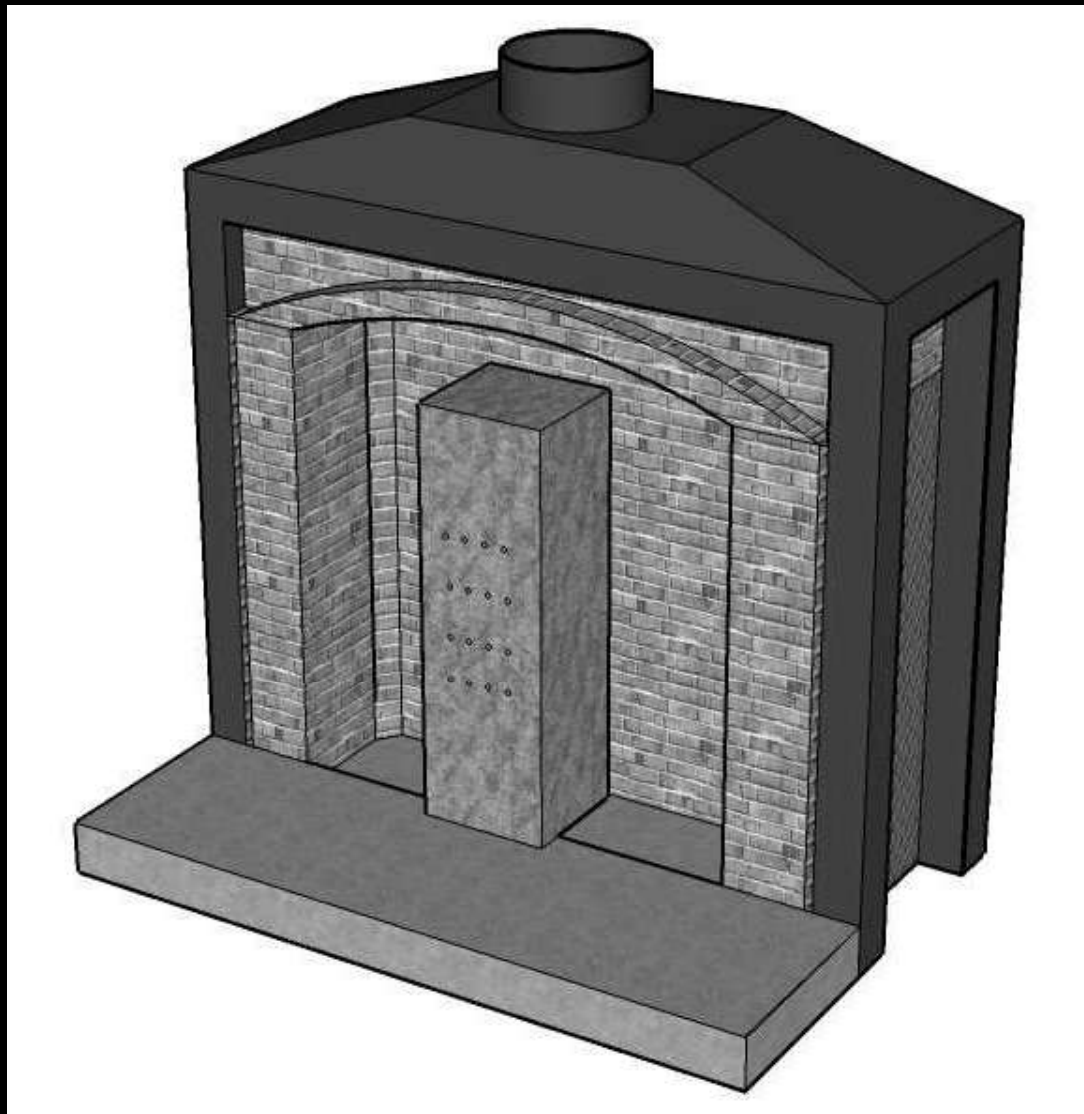
**pilar similar aos da obra
mantido em ambiente externo**

8anos

140MPa

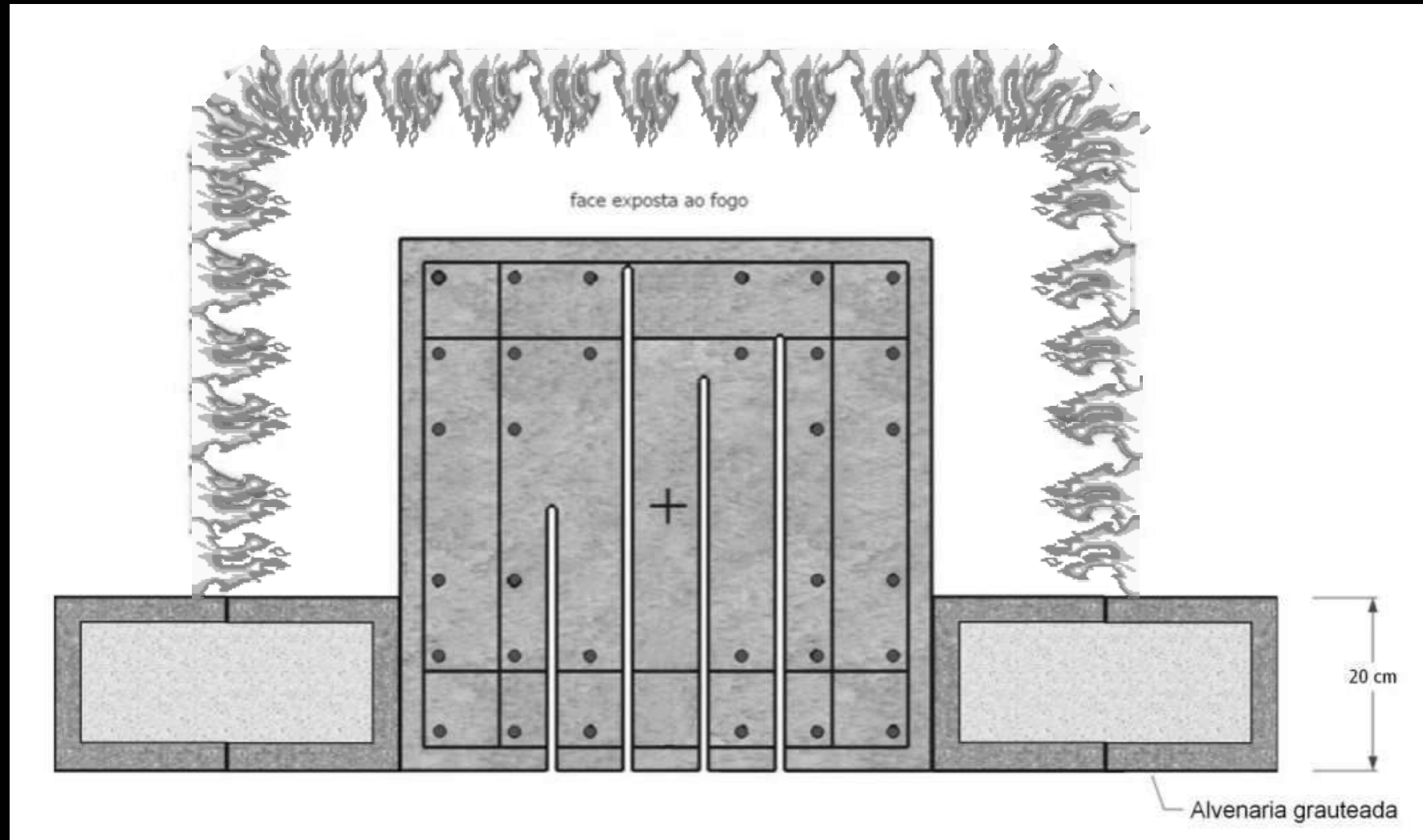


Laboratório (forno)



- ✓ **sem carga**
- ✓ **3 lados (faces)**
- ✓ **ISO 834**
- ✓ **180 min (3h)**

Condições de ensaio (3 lados)



ISO 834 standard fire

Integridade depois de 3h (180min)



VERDADE

**HSC > 50MPa
pode explodir o corpo de
prova no ensaio, mas
nunca o pilar, viga ou laje
desde que armados com
um critério adequado de
Projeto Estrutural**

SCC ou CAA

**acarreta muitos problemas
patológicos (retrai, fissura,
vaza, estoura a forma, não
tem acabamento superficial,
é muito caro !**

BROOKFIELD MALZONI 2010

ARQUIT.: BOTTI e RUBIN

ESTR.: J. KASSOY e M. FRANCO

CONSTRUÇÃO: BROOKFIELD

FÔRMAS E ANDAIMES: MILLS

LABORATÓRIO: CONCREMAT

CONSULTORIA DE CONCRETO: PhD



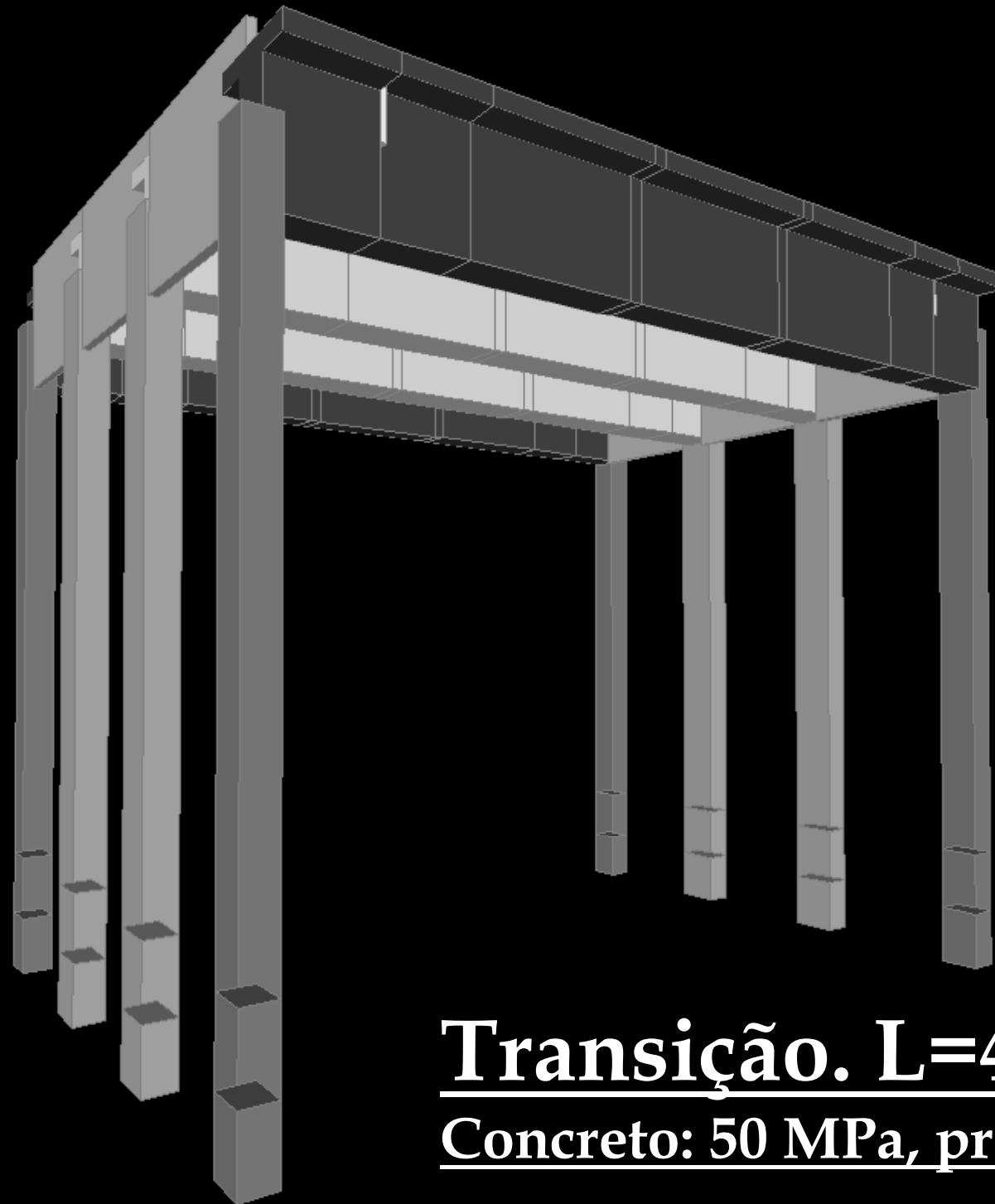


2 vigas centrais
mesa 5,5m
2,5m x 6m
770m³

2 vigas
mesa 5m
2m x 6m
640m³

pilares centrais
2,5m x 1,5m
35MPa

4 pilares
2m x 1,5m
35MPa



Transição. L=44,4 m
Concreto: 50 MPa, protendido

Cabos de protensão:

24 cabos x 24 cordoalhas 15.2 mm

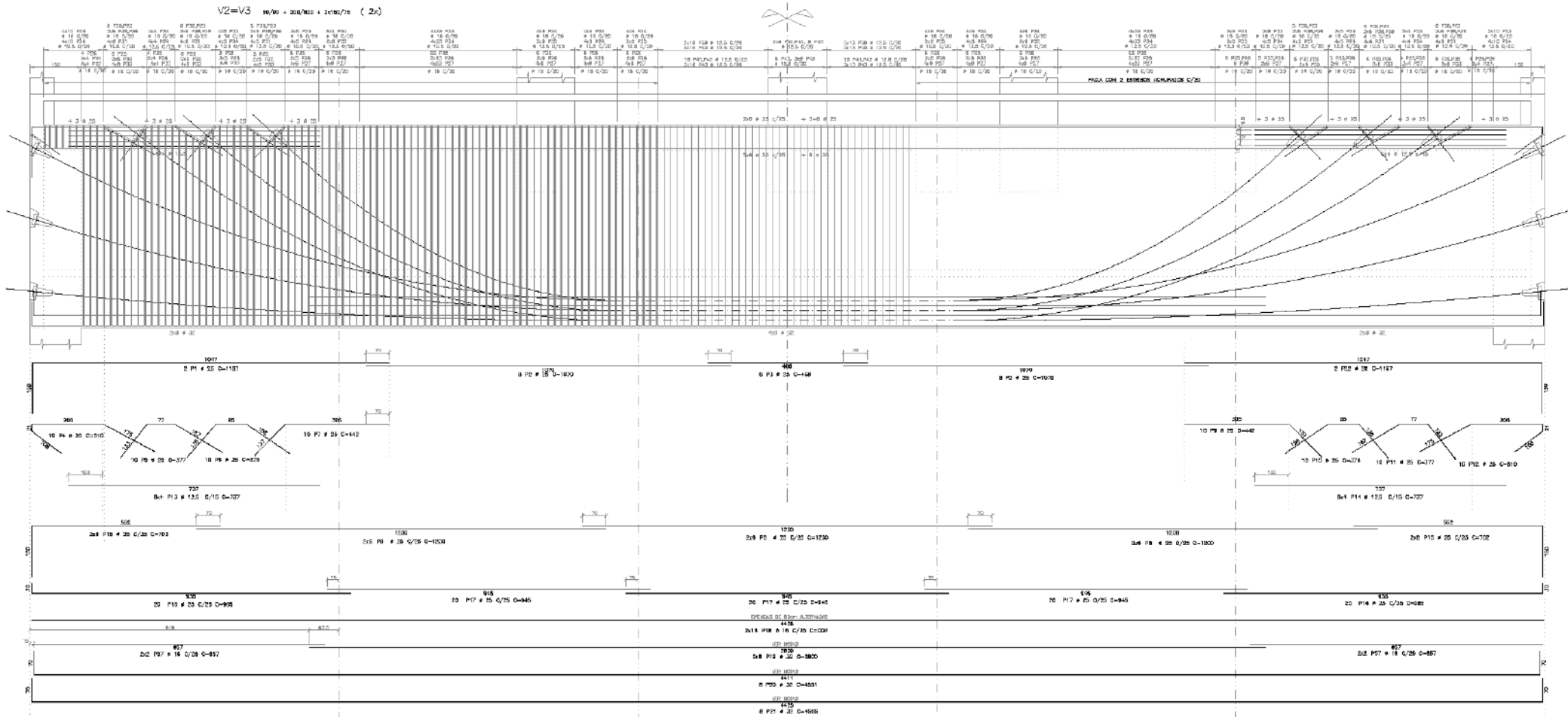
Força inicial total de protensão: 11.760 tf

Protensão

1/3 → até 4 andares

2/3 → até 8o andar

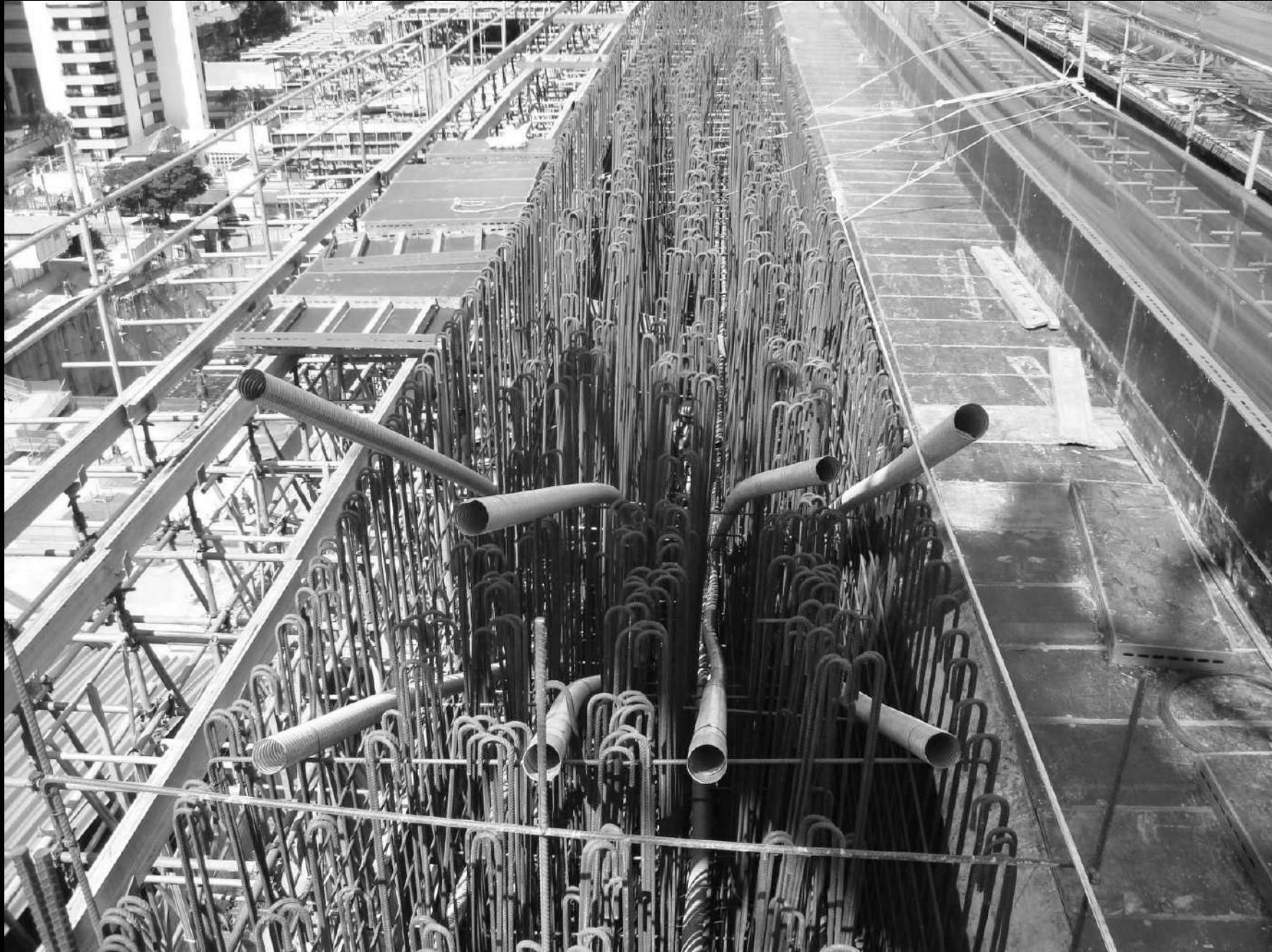
3/3 --.



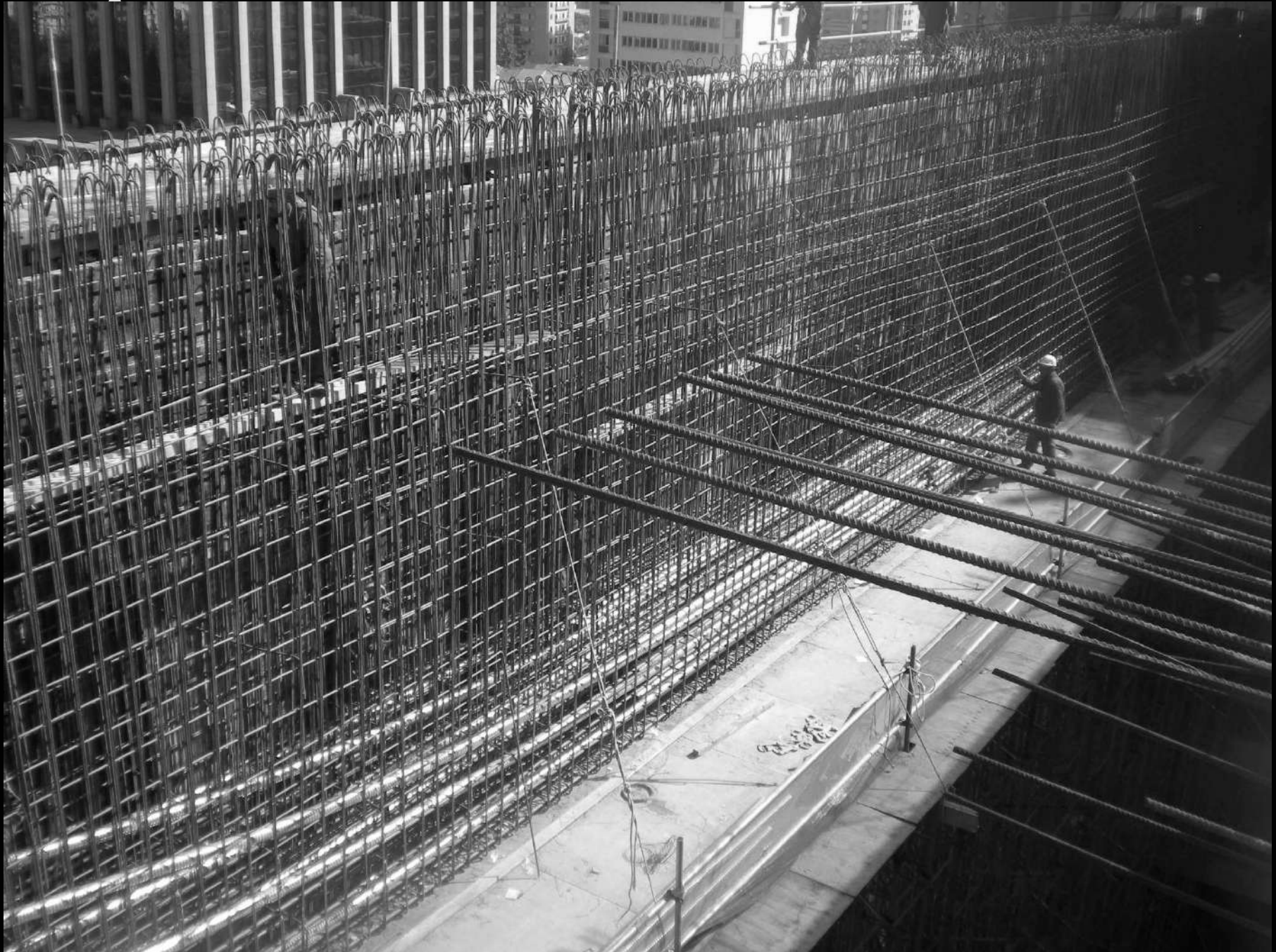
Radiografia da estrutura

- ✓ dimensões da viga: 44,40m x 2,5m x 6,0m
- ✓ geometria “Viga T”, mesa 5,5m x 0,75m
- ✓ volume de concreto: 770m³
- ✓ concreto: f_{ck} 50MPa (autoadensável)
- ✓ concretagem numa única etapa
- ✓ gelo: 100%

Por que concreto autoadensável?



Por que concreto autoadensável?







Por que concreto autoadensável?

Construtibilidade!

Sustentabilidade

Produtividade

Acabamento

Concreto autoadensável: definição

“Concreto fluído que pode ser moldado in loco sem o uso de vibradores para formar um produto livre de vazios e falhas”

Mehta & Monteiro, 2008

Concreto autoadensável: critérios

- ✓ capacidade de preencher todos os espaços no interior da forma (*filling ability*)
- ✓ capacidade de passar através de pequenas aberturas como espaçamento entre barras de aço (*passing ability*)
- ✓ capacidade de permanecer uniforme e coeso durante o processo de transporte e lançamento (*segregation resistance*)

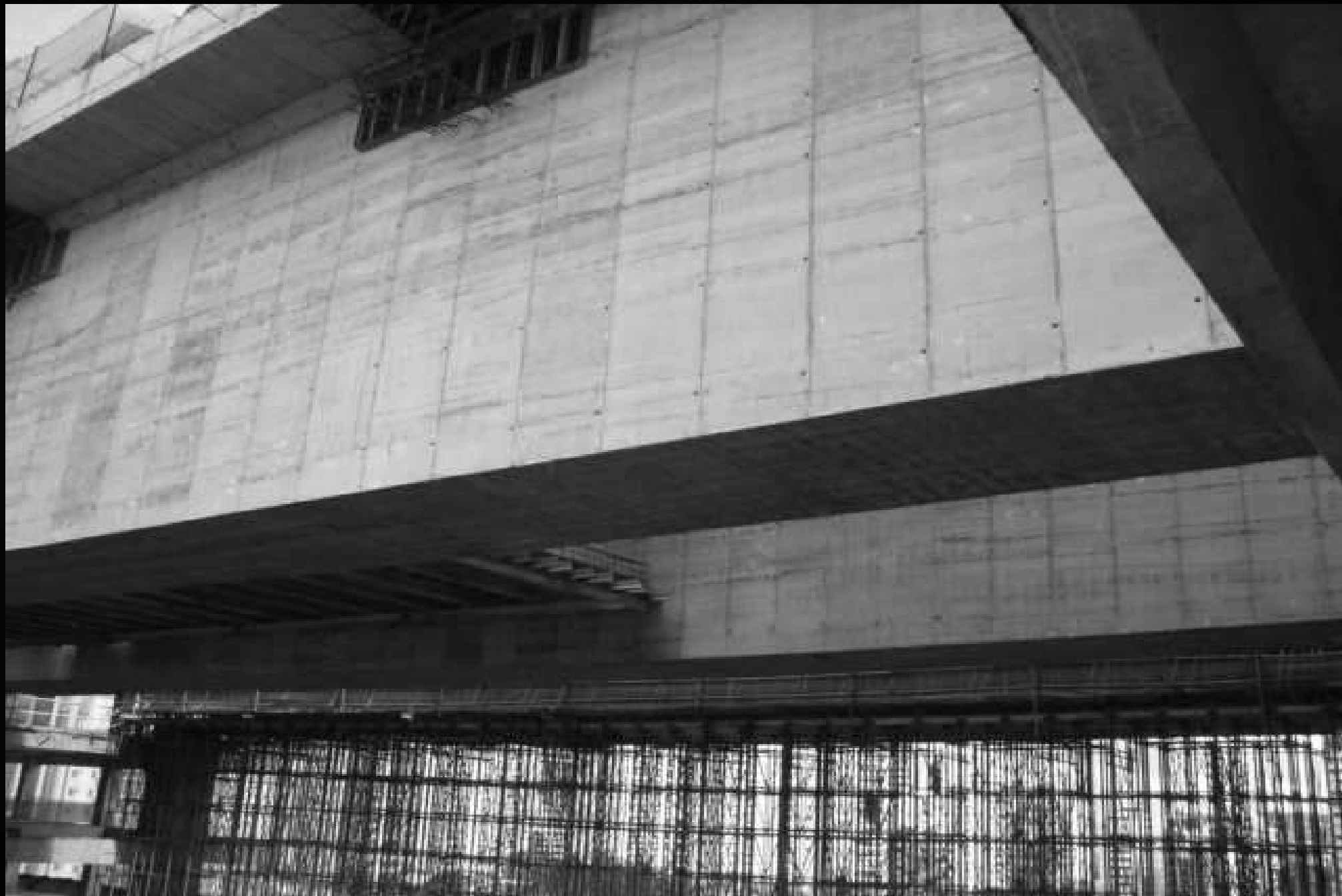
Acabamento



Acabamento



Acabamento



O concreto autoadensável



Radiografia da obra

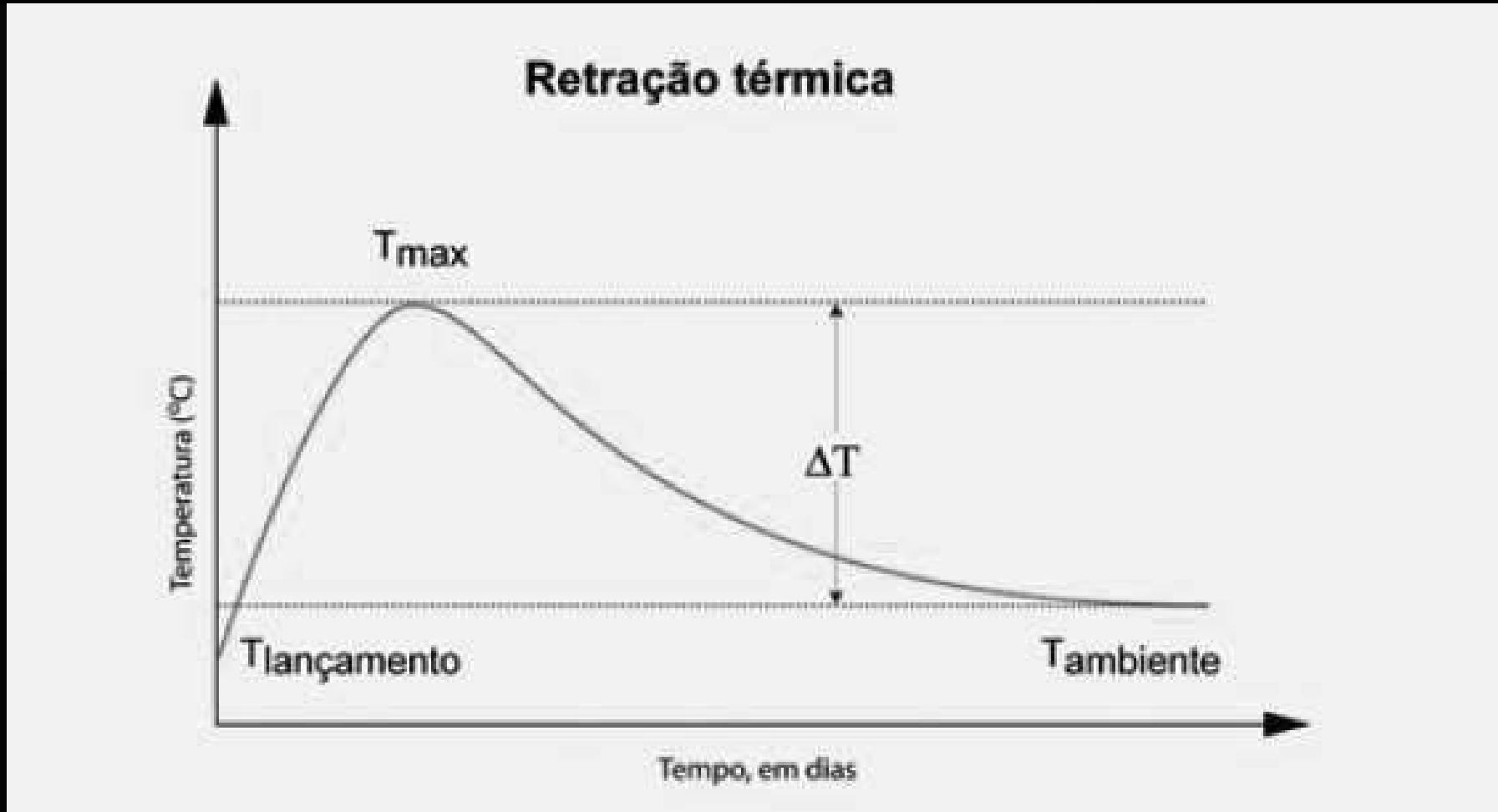
- ✓ dimensões da viga: 44,40m x 2,5m x 6,0m
- ✓ geometria “Viga T”, mesa 5,5m x 0,75m
- ✓ volume de concreto: 770m³
- ✓ concreto: f_{ck} 50MPa (autoadensável)
- ✓ concretagem numa única etapa
- ✓ gelo: 100%

Concreto massa: definição

“Concreto-massa é qualquer volume de concreto moldado in situ com dimensões de magnitude suficiente para exigir que sejam tomadas medidas para controlar a geração de calor e a variação de volume decorrente, a fim de minimizar a sua fissuração”

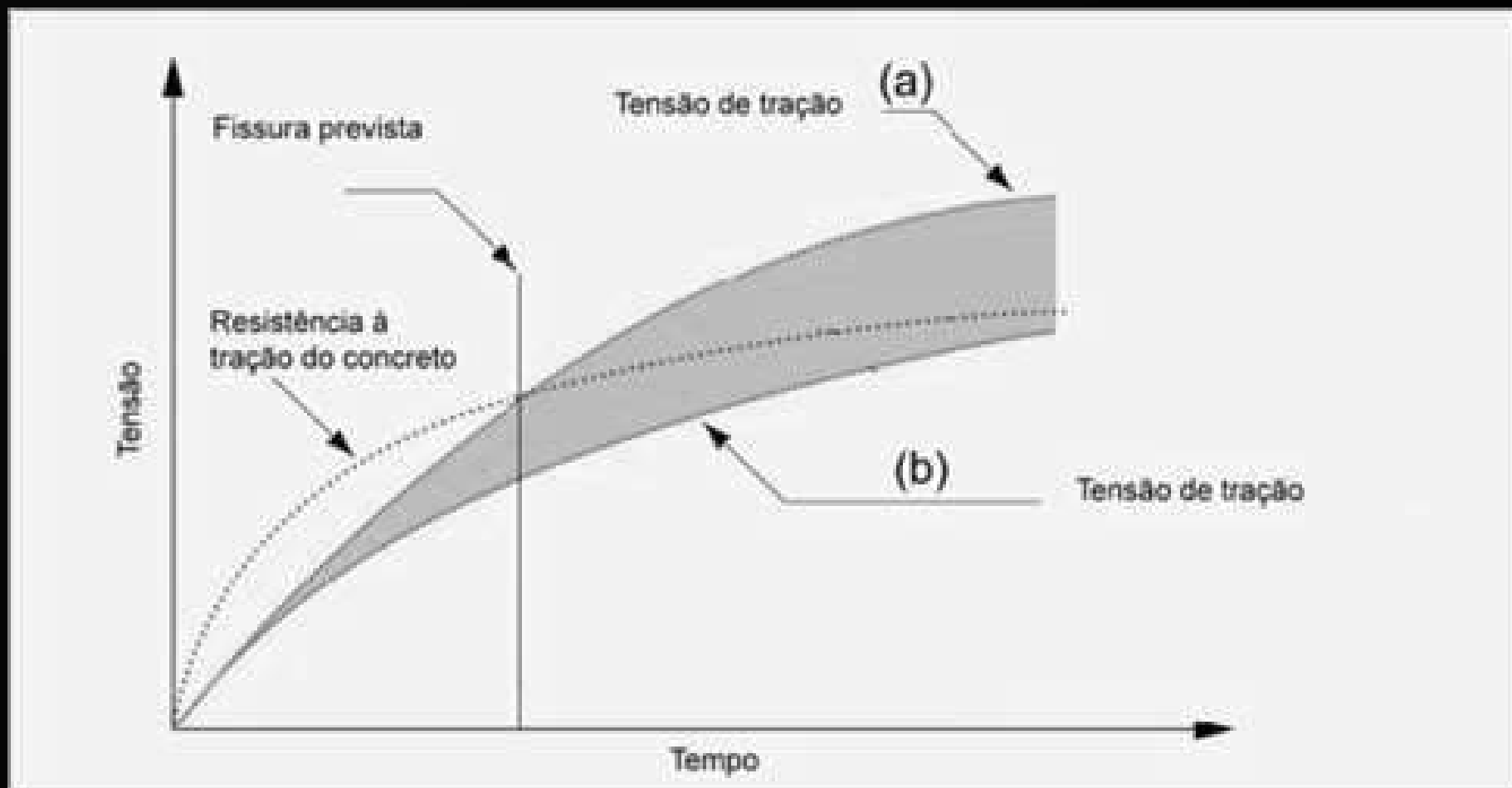
IBRACON, 2005

Conceituação básica



equilíbrio de temperaturas

Conceituação básica

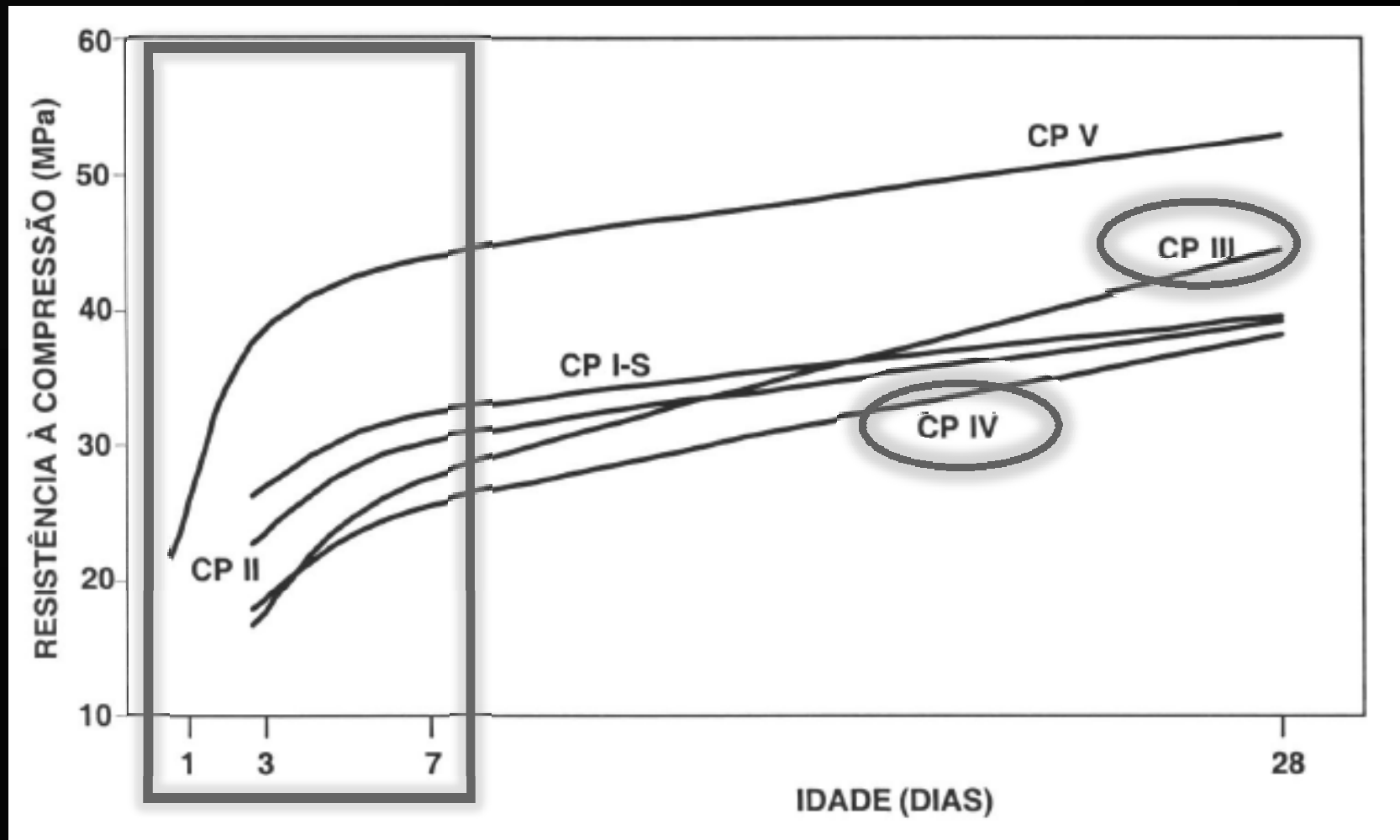


equilíbrio de tensões

Como reduzir as tensões

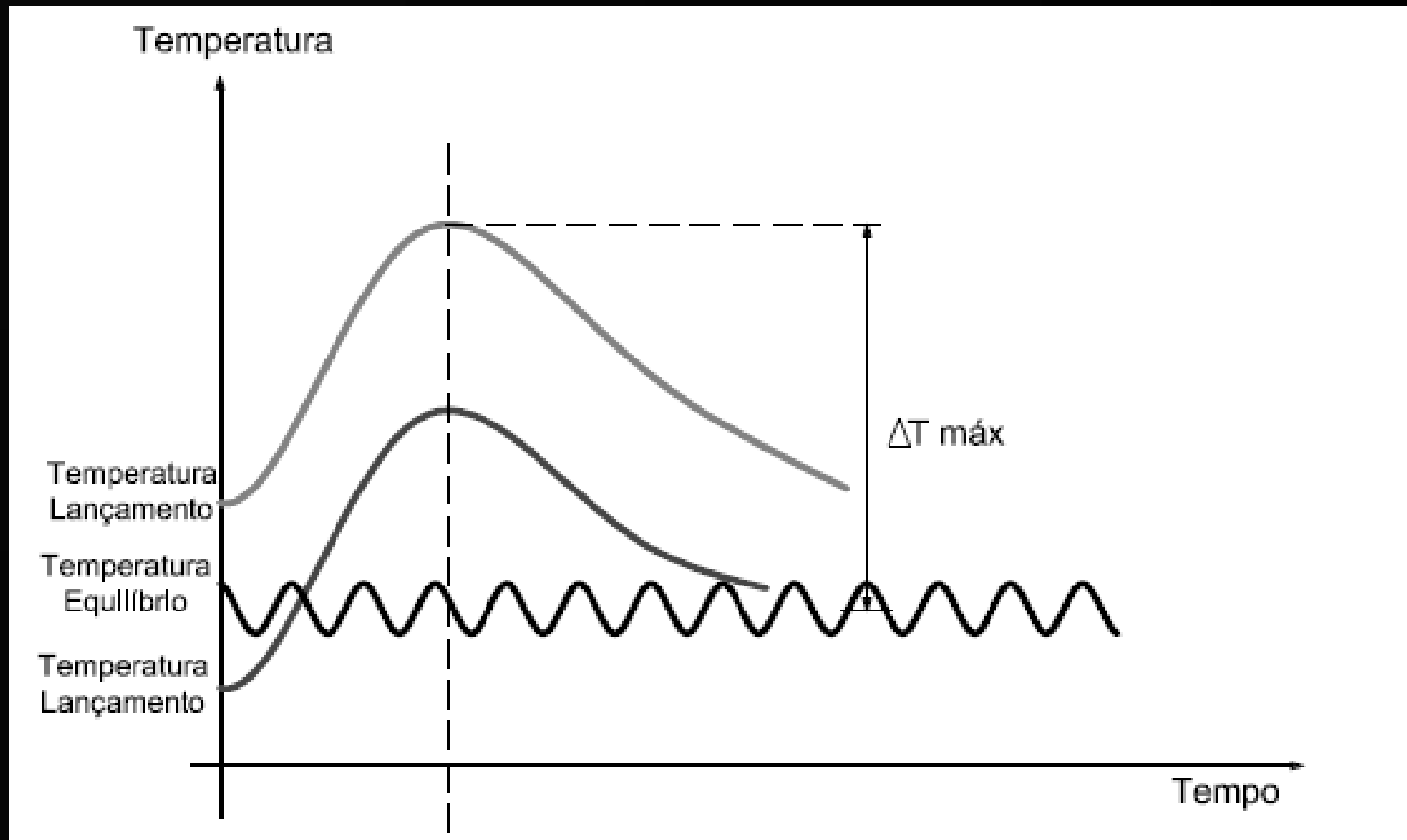
- ✓ redução do consumo de cimento
- ✓ adições ativas
- ✓ cimento com baixo calor de hidratação
- ✓ pré-refrigeração do concreto
- ✓ pós-refrigeração do concreto

Geração de calor



cimento: consumo e tipo

Temperatura de lançamento



Temperatura de lançamento

- ✓ depende do consumo dos materiais (traço)
- ✓ depende do calor específico dos materiais
- ✓ depende da temperatura natural dos materiais
- ✓ depende da logística (fator tempo)*

** tempo associado a transporte e descarga do concreto*

dado de entrada mutável

Temperatura de lançamento

Material	Consumo kg/m ³	Calor específico kcal/kg.°C	q=m.c (kcal/m ³ .°C)	T (°C)	Q (kcal/m ³)
Cimento.CPII E-40	365	0,240	87,60	55	4818
Microssílica	29,6	0,200	5,92	40	236,8
Areia Artif.	525,3	0,200	105,06	22	2311,32
Areia Nat.	525,3	0,200	105,06	22	2311,32
Brita 0	336,5	0,200	67,30	22	1480,6
Brita 1	504,7	0,200	100,94	22	2220,68
Água	119,8	1,000	119,84	25	2996,1
Umidade Miúdo Art.	13,1	1,000	13,13	25	328,3
Umidade Miúdo Nat.	42,0	1,000	42,02	25	1050,6
Umidade Graúdo	0	1,000	0	25	0
Betoneira					2000
Total			646,88		19753,72
Transporte (Ganho)		10,0°C			
T Lançamento=		40,5°C			

sem gelo

Temperatura de lançamento

Material	Consumo kg/m ³	Calor específico kcal/kg.°C	q=m.c (kcal/m ³ .°C)	Ti (°C)	Tf (°C)	Ti -Tf (°C)	Q (kcal/m ³)
Cimento.CPII E-40	365	0,240	87,60	55	0	55	4818
Microsílica	29,6	0,200	5,92	40	0	40	236,8
Areia Artif.	525,3	0,200	105,06	22	0	22	2311,32
Areia Nat.	525,3	0,200	105,06	22	0	22	2311,32
Brita 0	336,5	0,200	67,3	22	0	22	1480,6
Brita 1	504,7	0,200	100,94	22	0	22	2220,68
Água	0	1,000	0	25	0	25	0
Umidade Miúdo Art.	13,1	1,000	13,13	25	0	25	328,31
Umidade Miúdo Nat.	42,0	1,000	42,02	25	0	25	1050,6
Umidade Graúdo	0	1,000	0	25	0	25	0
Gelo	119,8	0,500	59,92	0	0	0	0
Fusão Gelo	119,8	1,000	119,84	0	0	0	-9587,48
Gelo + Água	119,8	1,000	119,84	0	18	-18	-2157,18
Betoneira							2000
Total			826,65				5012,97
Transporte (Ganho)		10,0°C					
T Lançamento=		16,1°C					

com gelo: redução de 60%

Temperatura de lançamento



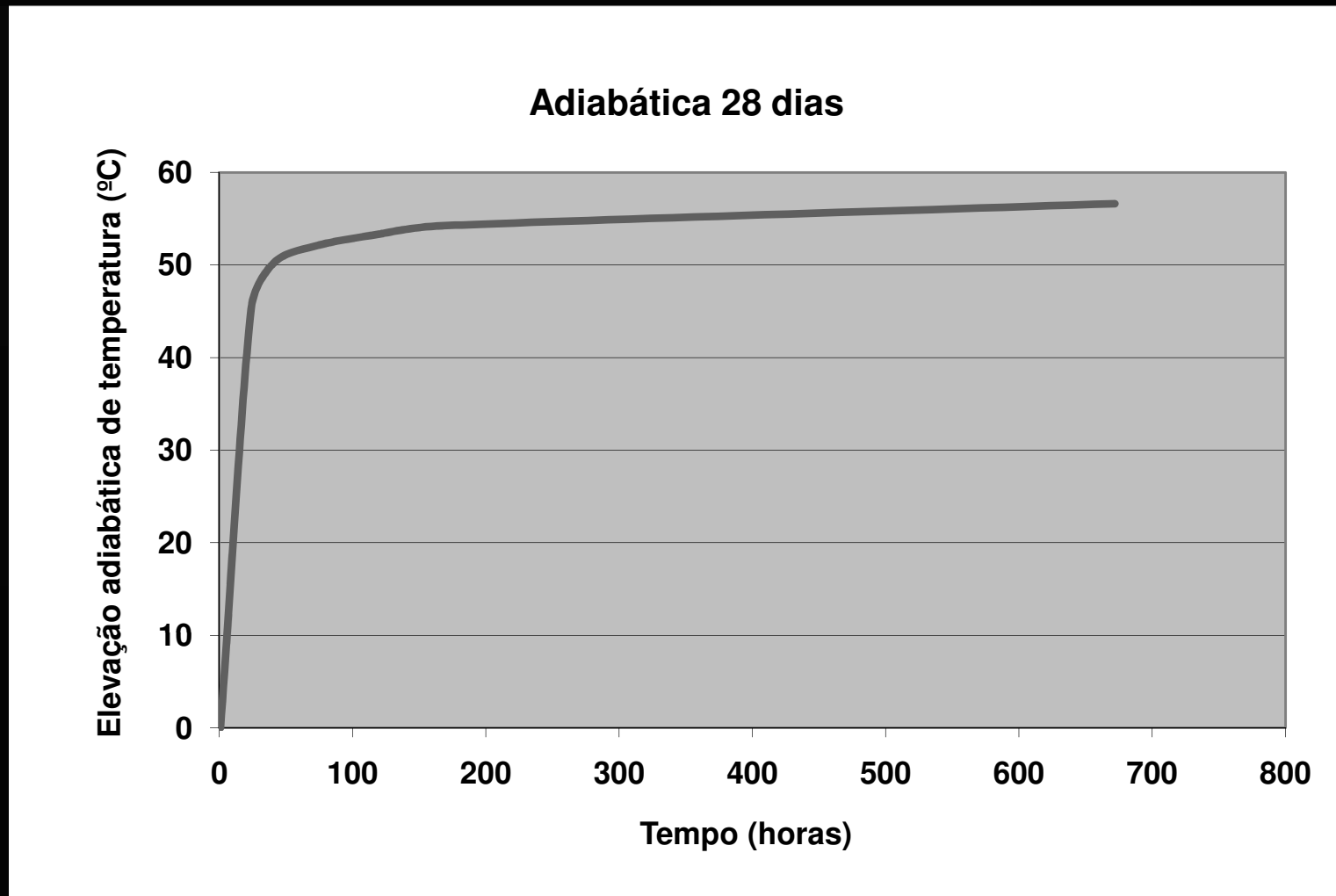
é possível ...

Temperatura máxima (pico)

- ✓ depende do consumo de cimento
- ✓ depende do tipo de cimento (calor de hidratação)
- ✓ depende do calor específico do concreto
- ✓ depende da elevação adiabática / dissipação
- ✓ temperatura de lançamento

dado de entrada mutável

Elevação adiabática



tipos de cimento ...

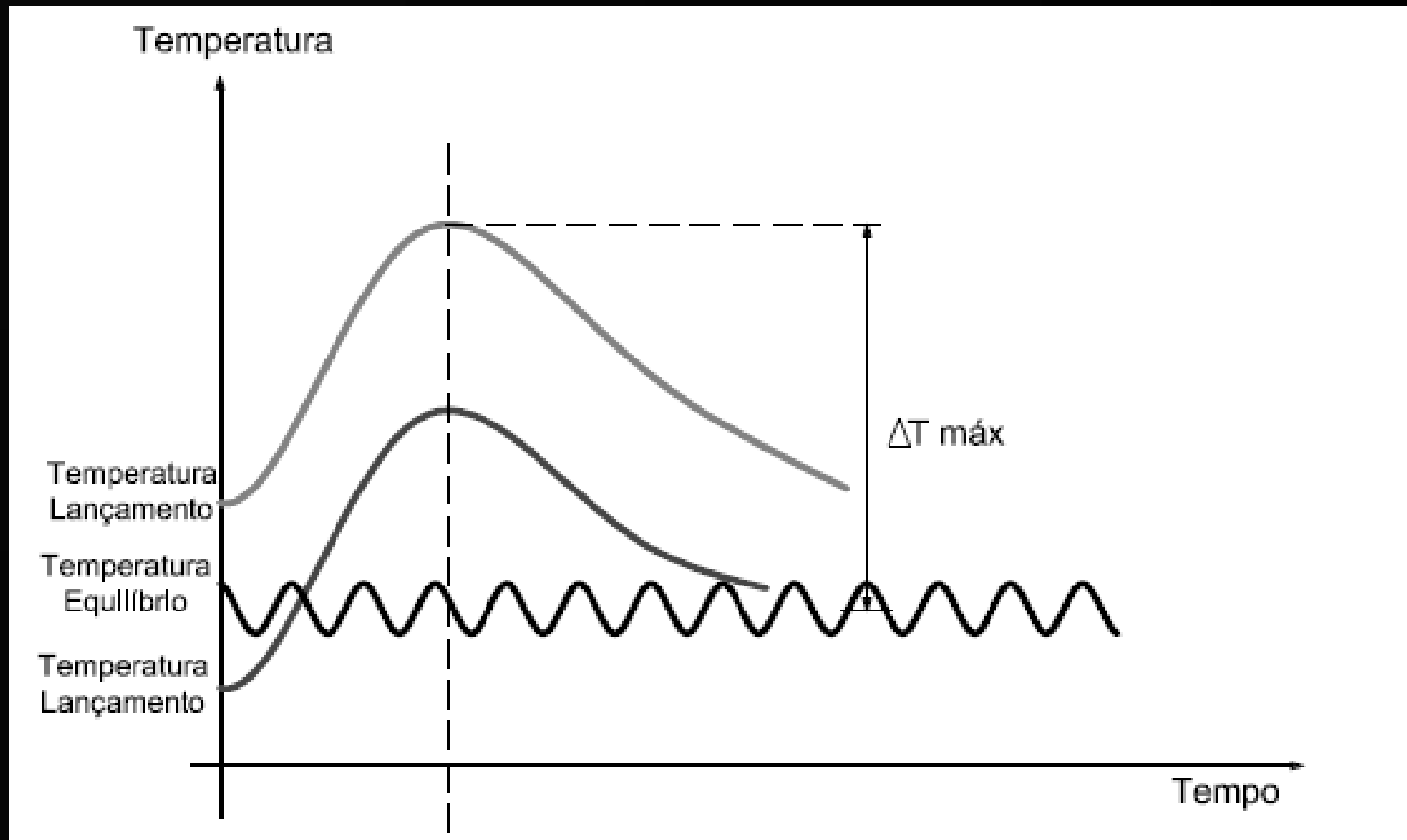
Temperatura média anual

- ✓ depende da região
- ✓ depende da natureza
- ✓ não depende dos materiais, da dosagem, do consumo de cimento, etc...



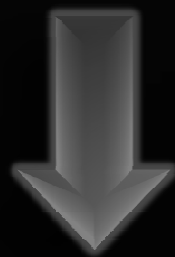
dado de entrada imutável*

Temperatura de lançamento



As quatro chaves fundamentais

- ✓ estudo de dosagem
- ✓ estudo térmico (simulações)
- ✓ procedimento executivo
- ✓ gerenciamento técnico

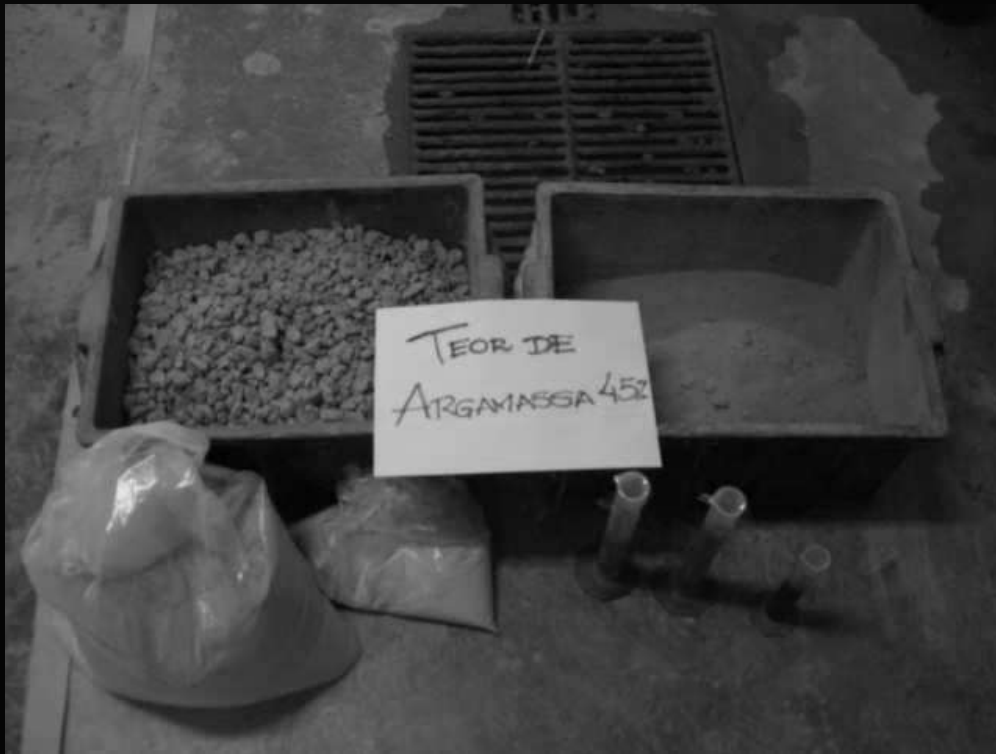


controle tecnológico

Estudo de dosagem

- ✓ estudo do teor de argamassa ideal
- ✓ traço piloto, rico e pobre
- ✓ variação de aditivos e adições
- ✓ controle da temperatura ambiente
- ✓ controle da massa específica
- ✓ controle da temperatura inicial do traço
- ✓ simulação em caminhão betoneira (percurso)

Estudo de dosagem método IBRACON adaptado



teor de argamassa ideal

Estudo de dosagem

verificação do teor
de ar incorporado



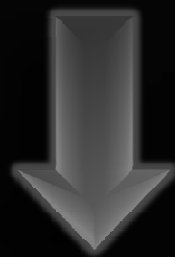
verificação da
massa específica

Estudo de dosagem



As quatro chaves fundamentais

- ✓ estudo de dosagem
- ✓ estudo térmico (simulações)
- ✓ procedimento executivo
- ✓ acompanhamento técnico

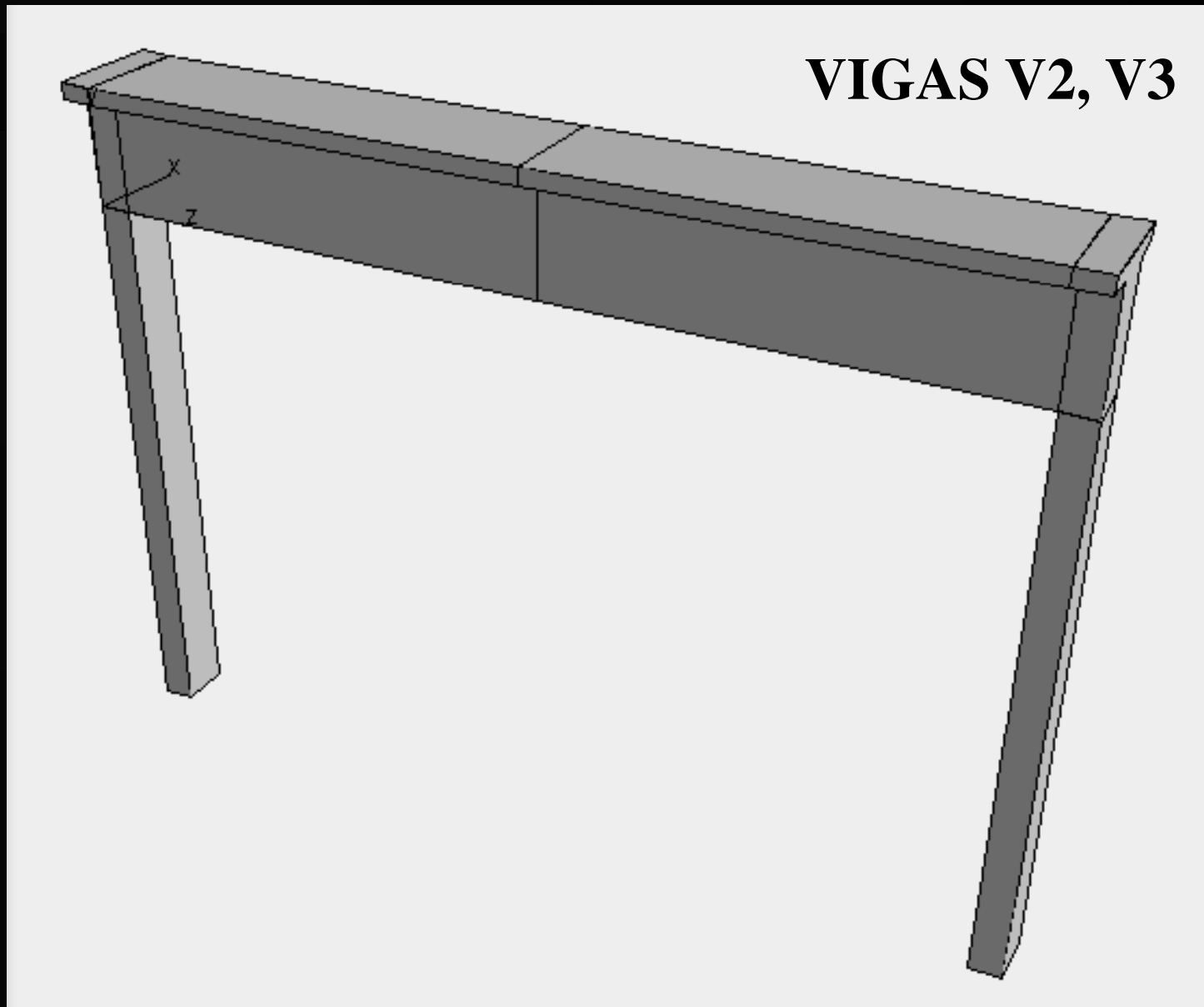


controle tecnológico

Estudo térmico

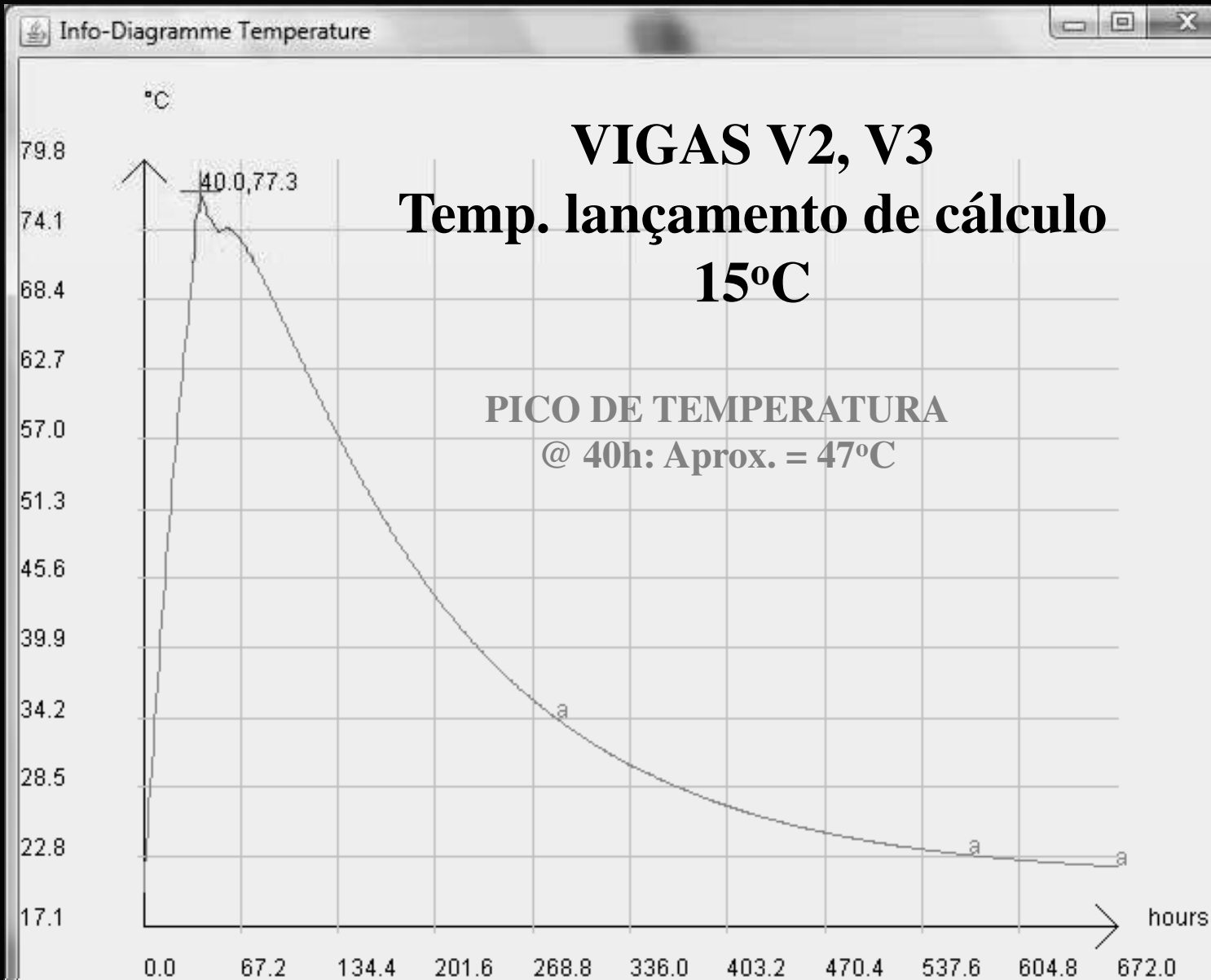
- ✓ **simulação piloto**
- ✓ **simulações posteriores**
- ✓ **calibragem do modelo**
- ✓ **coeficiente de segurança**
- ✓ **retroalimentação de dados (monitoração)**
- ✓ **verificação da temperatura inicial do traço**

Estudo térmico



Modelo - Concretagem numa única etapa

Estudo térmico



CONDIÇÕES DE CONTORNO

$t_{amb} = 20,5 \text{ °C}$

$t_{lanç} = 15 \text{ °C}$

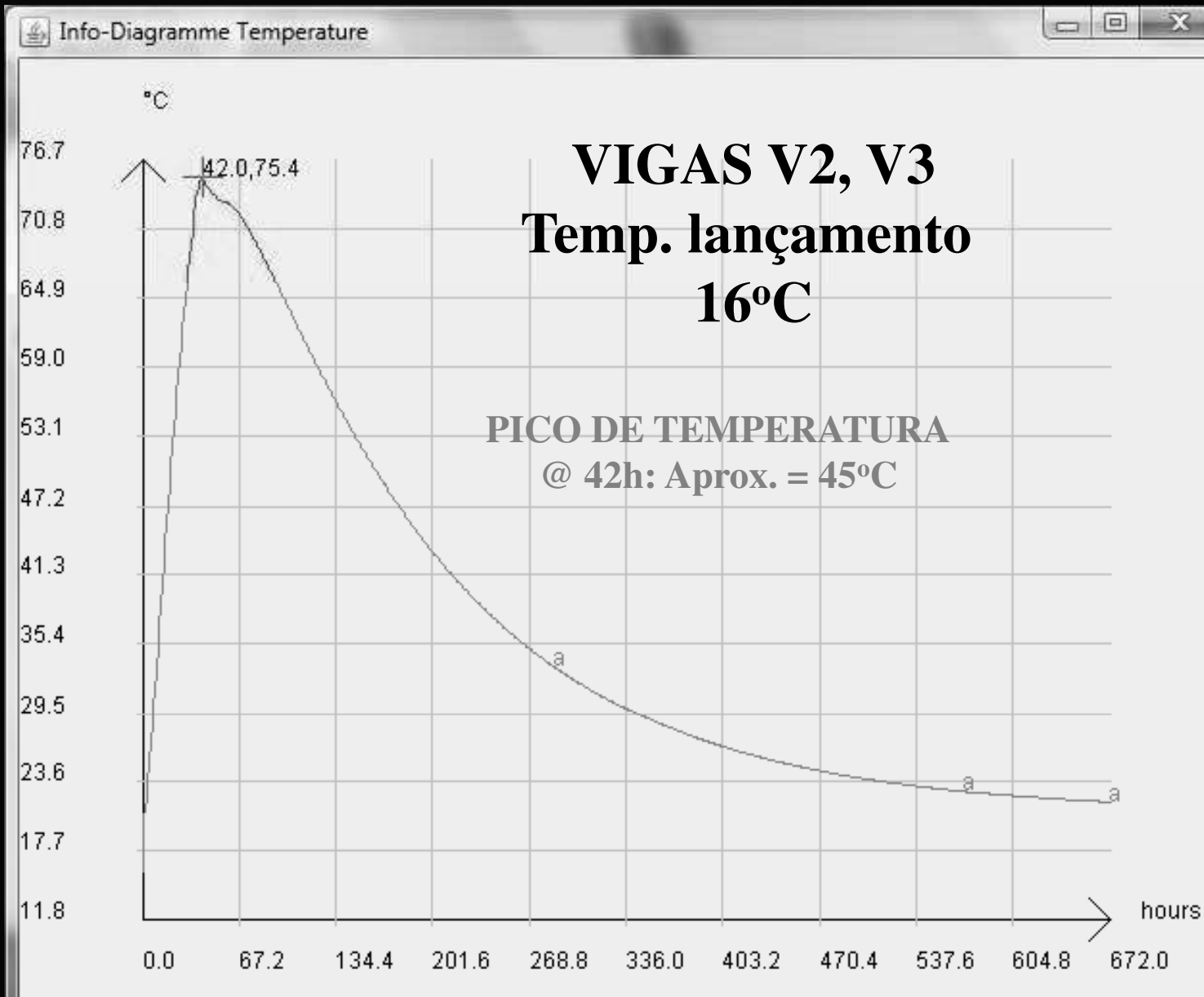
Vento = 5m/s

Cura úmida = 7d

Forma madeira e=15mm

Diagrama temperaturas

Estudo térmico



VIGAS V2, V3
Temp. lançamento
16°C

PICO DE TEMPERATURA
@ 42h: Aprox. = 45°C

CONDIÇÕES DE
CONTORNO

$t_{amb} = 20,5 \text{ °C}$

$t_{lanç} = 16 \text{ °C}$

Vento = 5m/s

Cura úmida = 7d

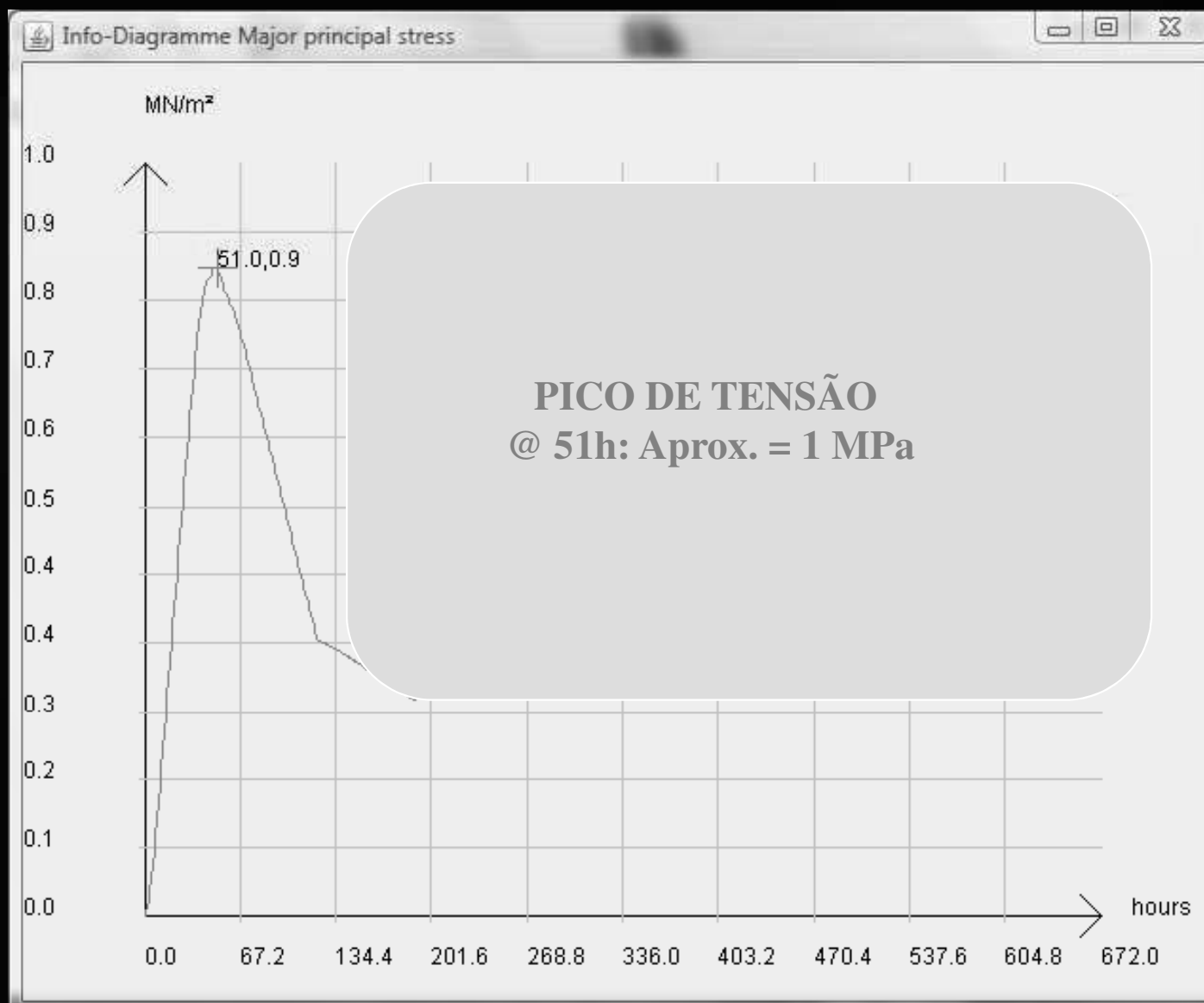
Forma madeira e=15mm

Diagrama temperaturas

Estudo térmico

VIGAS V2, V3

Temp. lançamento real: 16°C



Tensões de tração

Estudo térmico

VIGAS V2, V3

Temp. lançamento: 16°C

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

@ 51h: Aprox. = 1,7 MPa

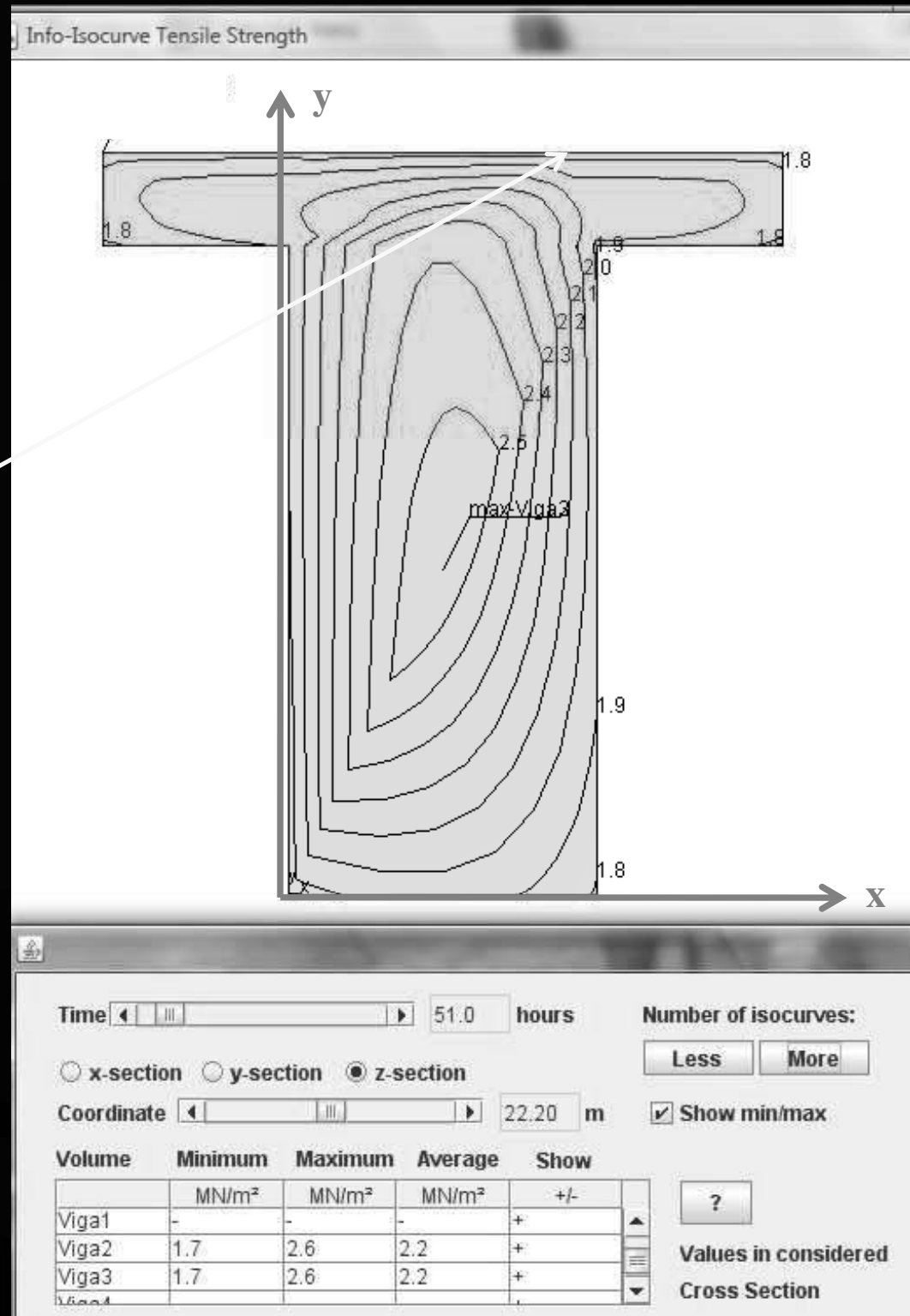
Localização:

x=2.24m

y=6m

z=22.2m

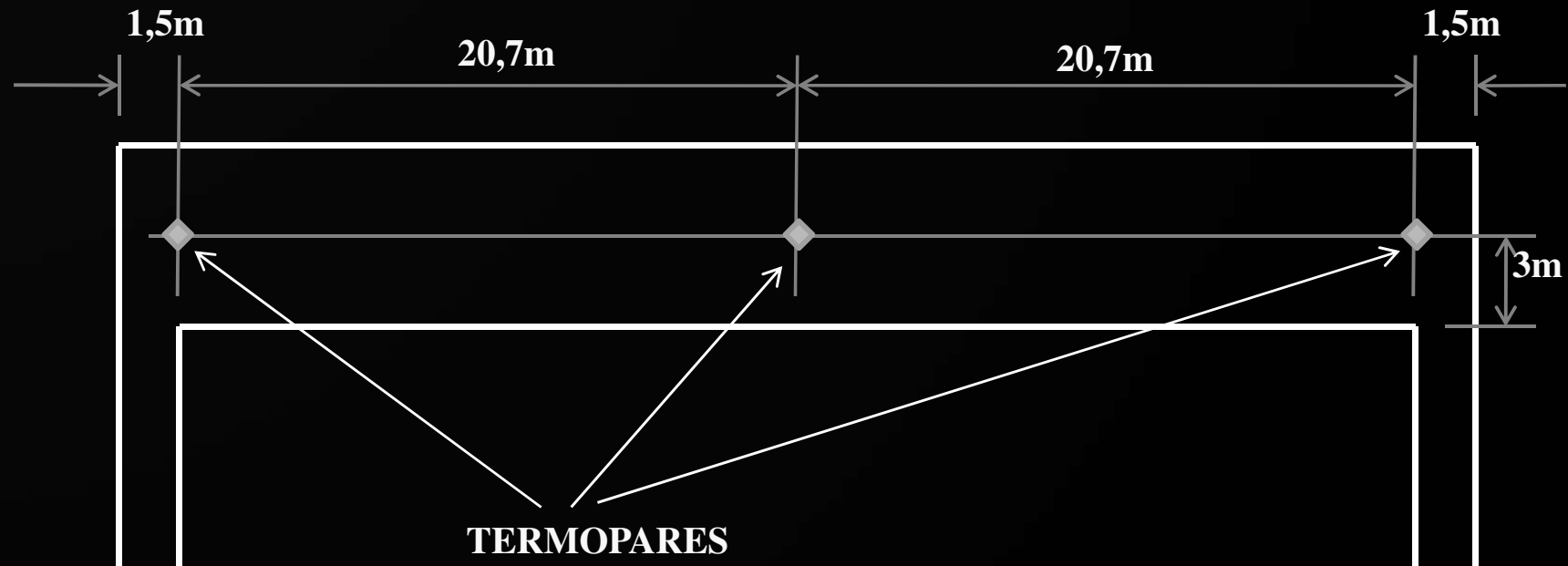
Corte em z=22.2m



Resistência à tração

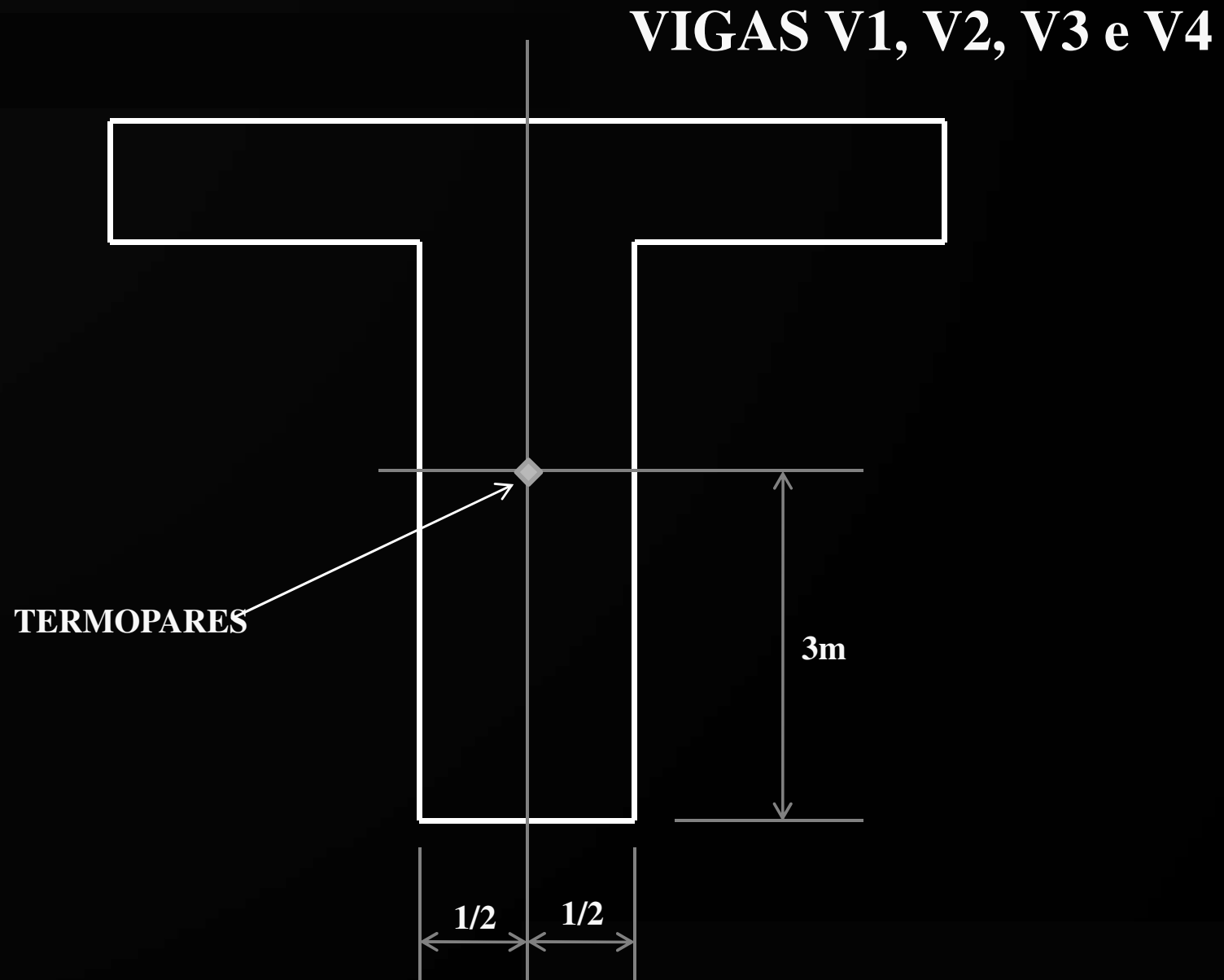
Estudo térmico

VIGAS V1, V2, V3 e V4



Posicionamento dos termopares

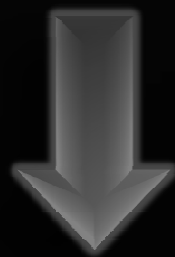
Estudo térmico



Posicionamento dos termopares

As quatro chaves fundamentais

- ✓ estudo de dosagem
- ✓ estudo térmico (simulações)
- ✓ procedimento executivo
- ✓ acompanhamento técnico



controle tecnológico

Procedimento executivo (documento)

Produção de concreto e controle da produção na central :

Medir temperatura agregados e cimento

Molhar agregado graúdo (refrigeração)

Substituição de toda a água de amassamento por gelo

Pesagem dos sacos de gelo para determinar peso médio

Medir umidade da areia

Carregar apenas 6m³ por CB, já com aditivo

Fluxo constante de caminhões betoneira

Controle do lançamento na obra :

Medir temperatura do concreto

Medir consistência

Moldar corpos de prova (compressão e módulo)

Medir temperatura do concreto da viga com termopares

Recomendações para concretagem :

Posicionamento bombas

Precaução contra chuva

Cálculo das formas

Cura

As quatro chaves fundamentais

- ✓ estudo de dosagem
- ✓ estudo térmico (simulações)
- ✓ procedimento executivo
- ✓ gerenciamento técnico



controle tecnológico

Gerenciamento técnico

temperatura areia
natural na usina



temperatura areia
artificial na usina



Acompanhamento técnico

temperatura brita 0
na usina



temperatura brita 1
na usina

Acompanhamento técnico

superfície do
caminhão



gelo no caminhão
frigorífico



Acompanhamento técnico

temperatura do
concreto na obra



temperatura do
concreto dentro do
caminhão betoneira

Acompanhamento técnico



aspecto do concreto com 13°C

Lançamento

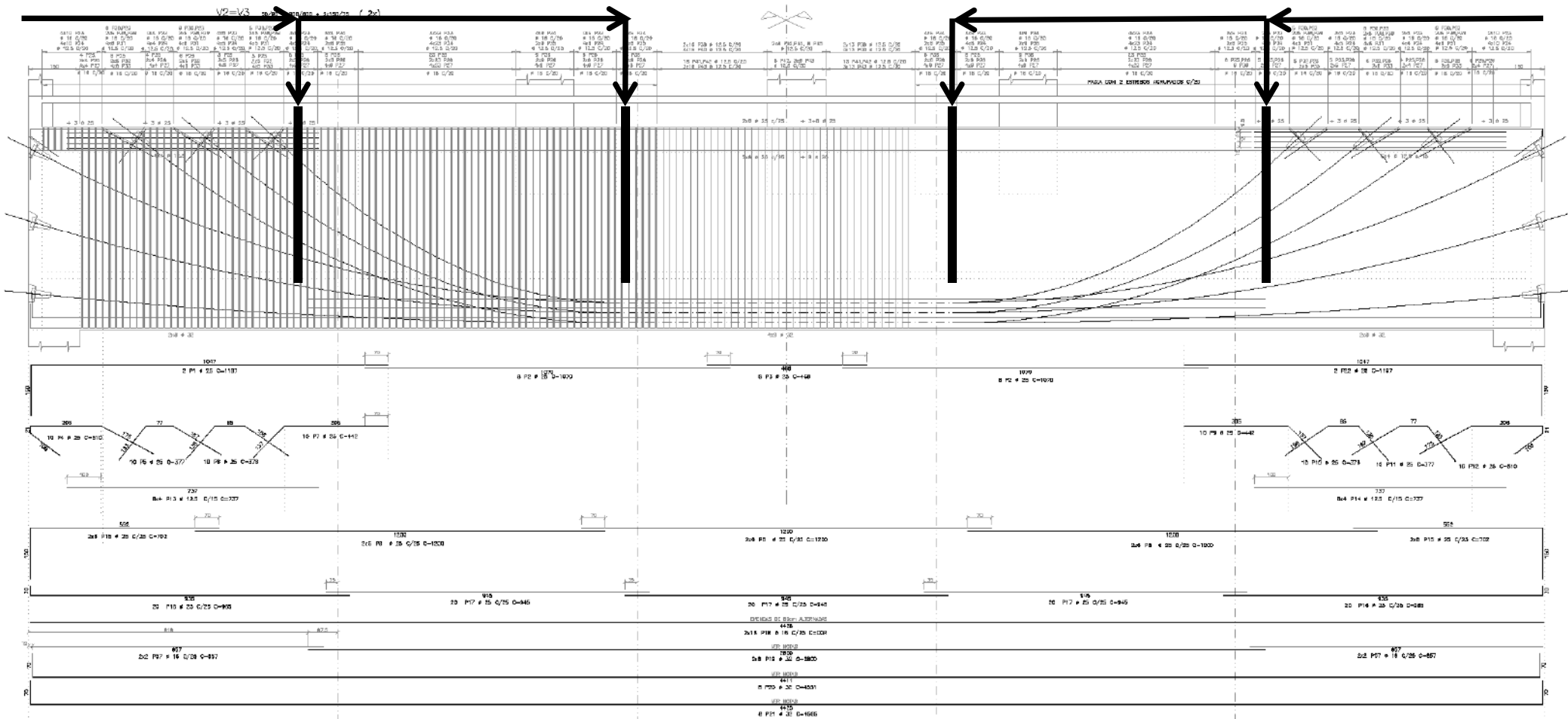
4 pontos de lançamento igualmente espaçados

Tubos de PVC levantados aos poucos, h lançamento < 2,7m

Ritmo lançamento compatível com a resistência da fôrma

Bomba A

Bomba B



Acompanhamento técnico



Bomba A

Bomba B

lançamento

Radiografia da obra

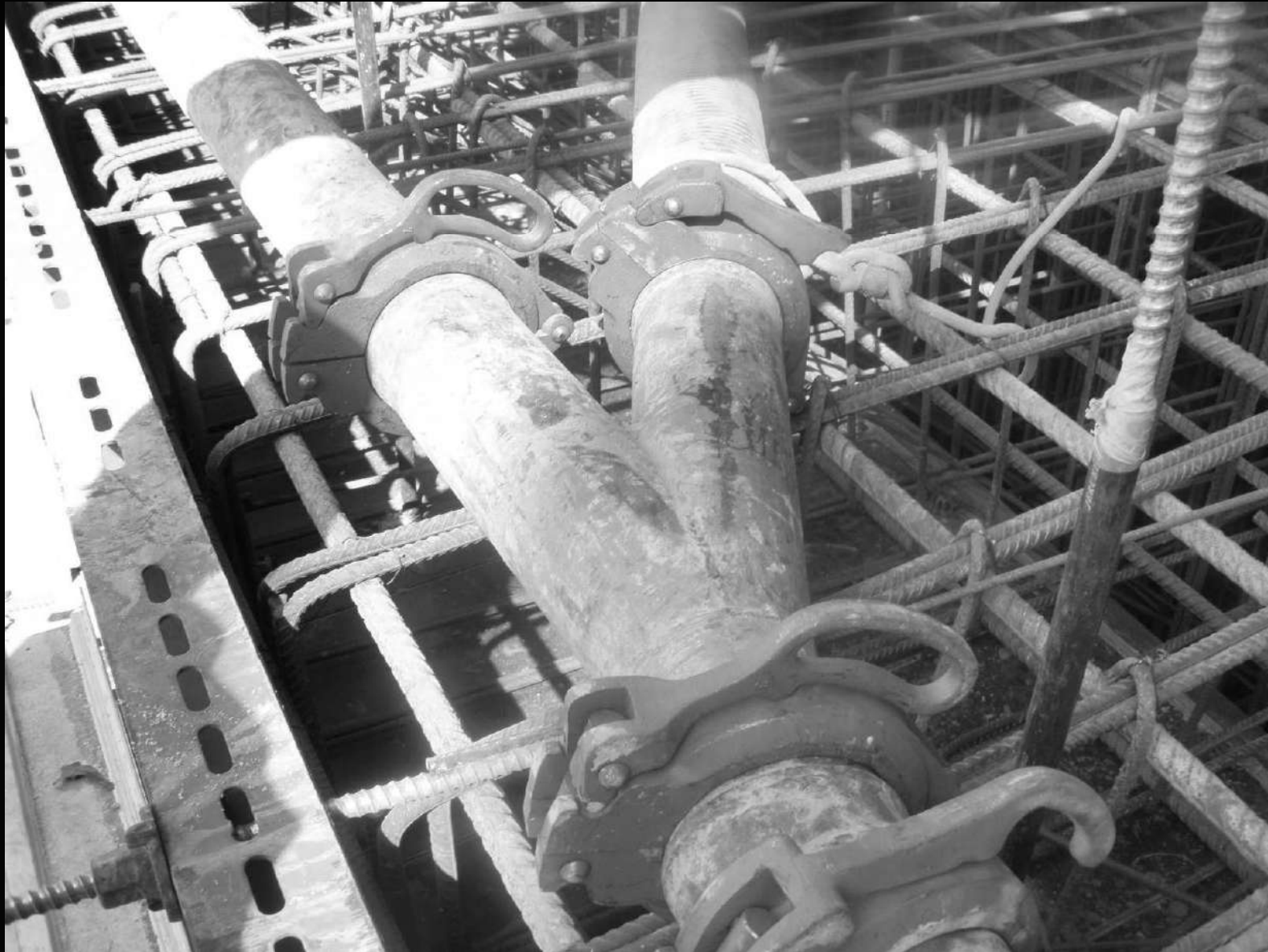
- ✓ fôrmas → 600kgf/m²
- ✓ 40cm/h → V2 e V3 4 caminhões/h por bomba
- ✓ vigas V1 e V4 → 3 caminhões/h por bomba
- ✓ 4 caminhões 2 cada concretagem
- ✓ 128 caminhões → 16h (19h)

Acompanhamento técnico



lançamento

Acompanhamento técnico



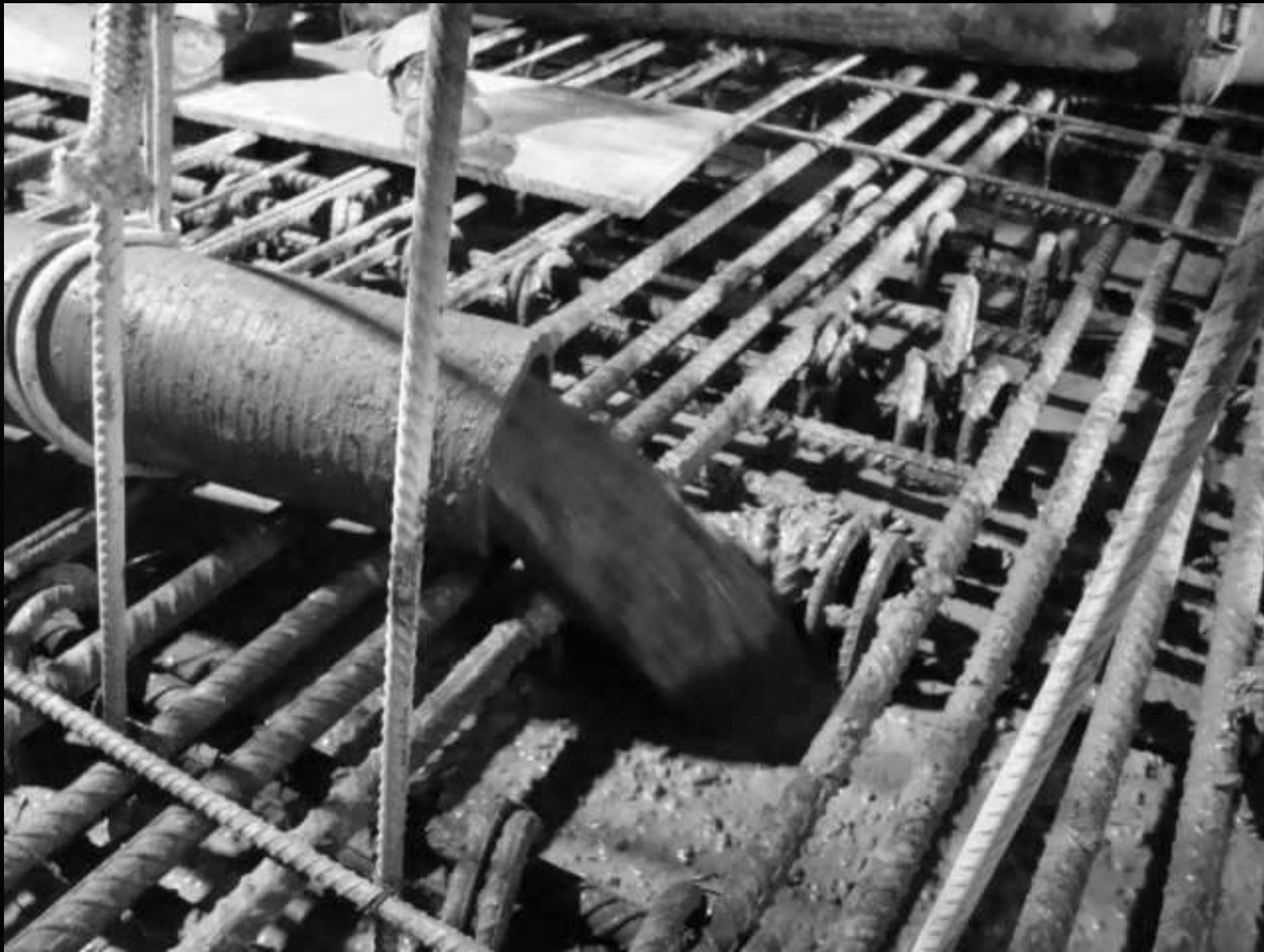
lançamento

Acompanhamento técnico



lançamento

Acompanhamento técnico



lançamento

Acompanhamento técnico



proteção contra a chuva

Acompanhamento técnico



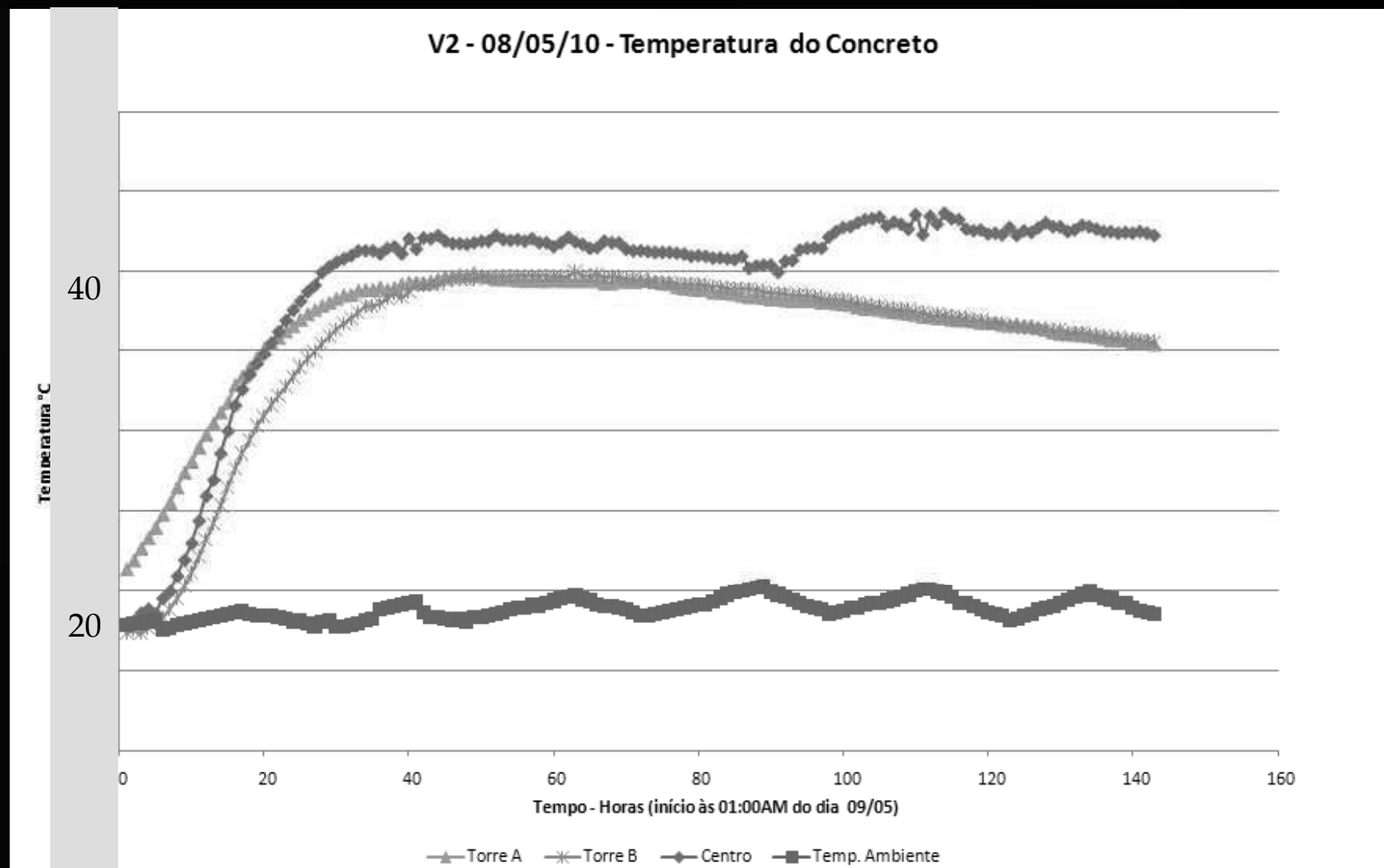
proteção contra a chuva

Acompanhamento técnico



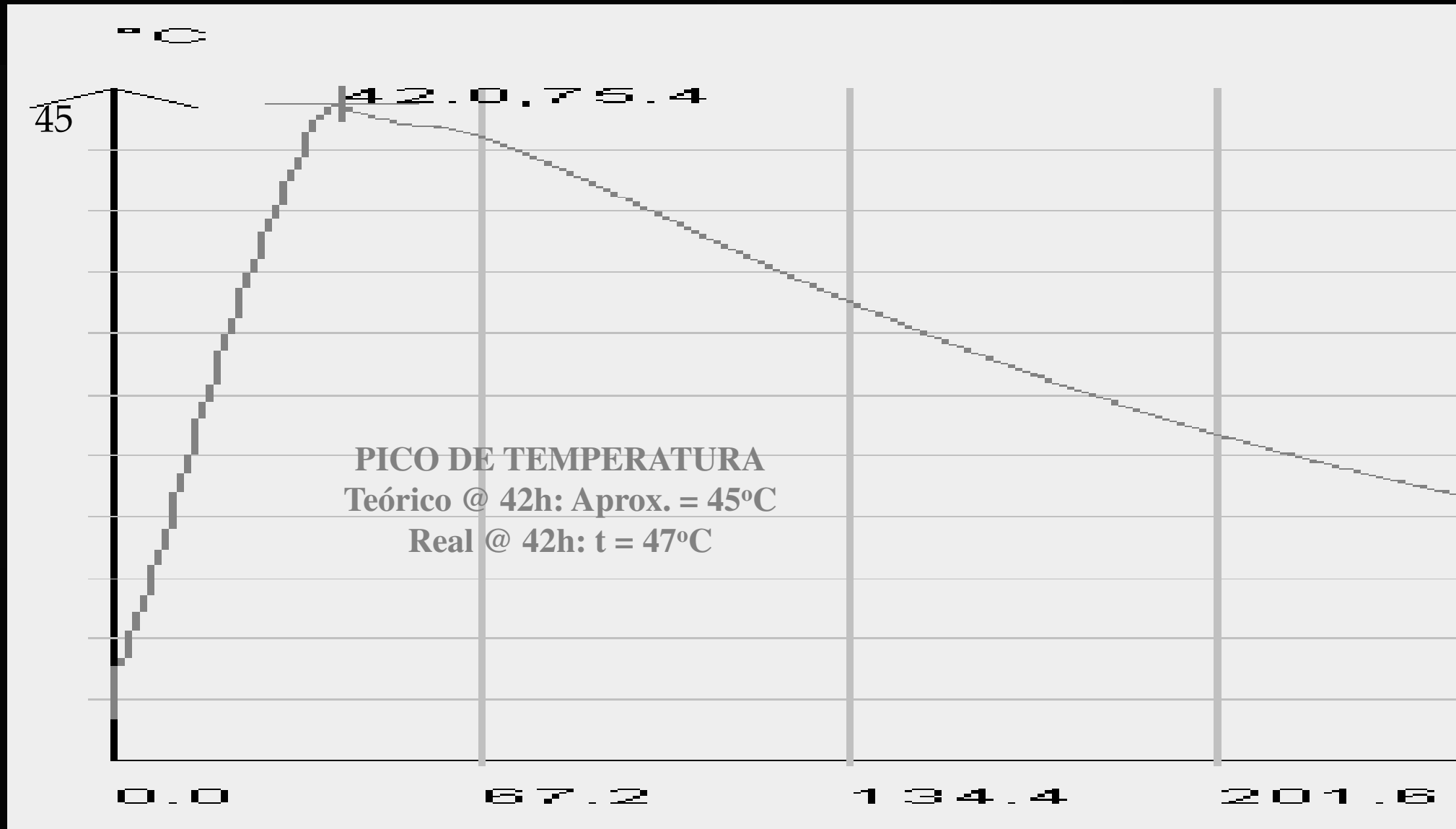
cura úmida por 7 dias

Gerenciamento técnico



monitoração de temperatura

Modelo teórico



Temperatura

Detalhes da execução



Formas: carga máxima $60\text{kn}/\text{m}^2$

Detalhes da execução



Formas: carga máxima 60kn/m^2

Detalhes da execução



Formas: estanqueidade

Detalhes da execução



Escoramento em balanço

Detalhes da execução



Escoramento “normal”

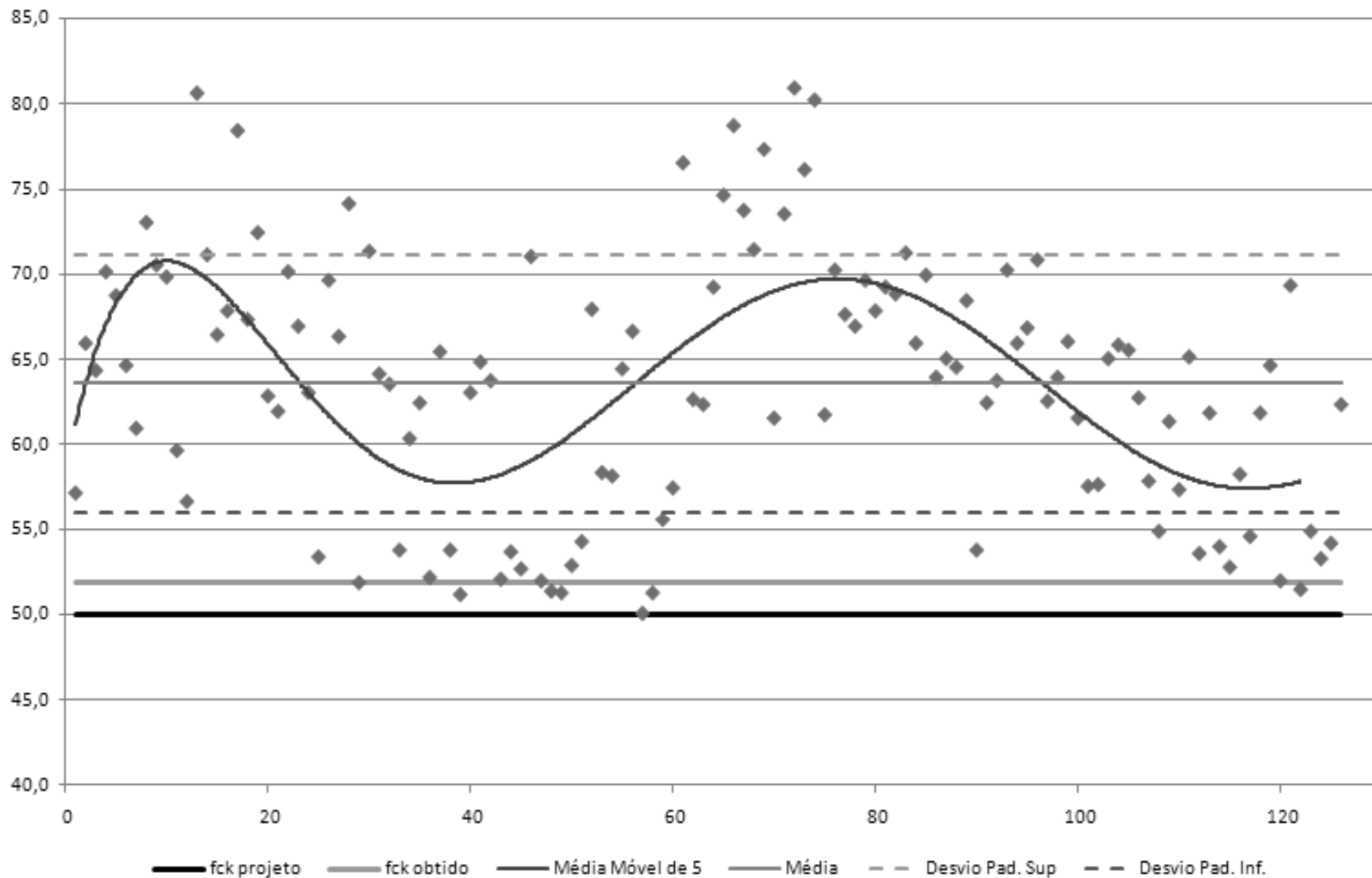
Gerenciamento técnico



moldagem de corpos de prova

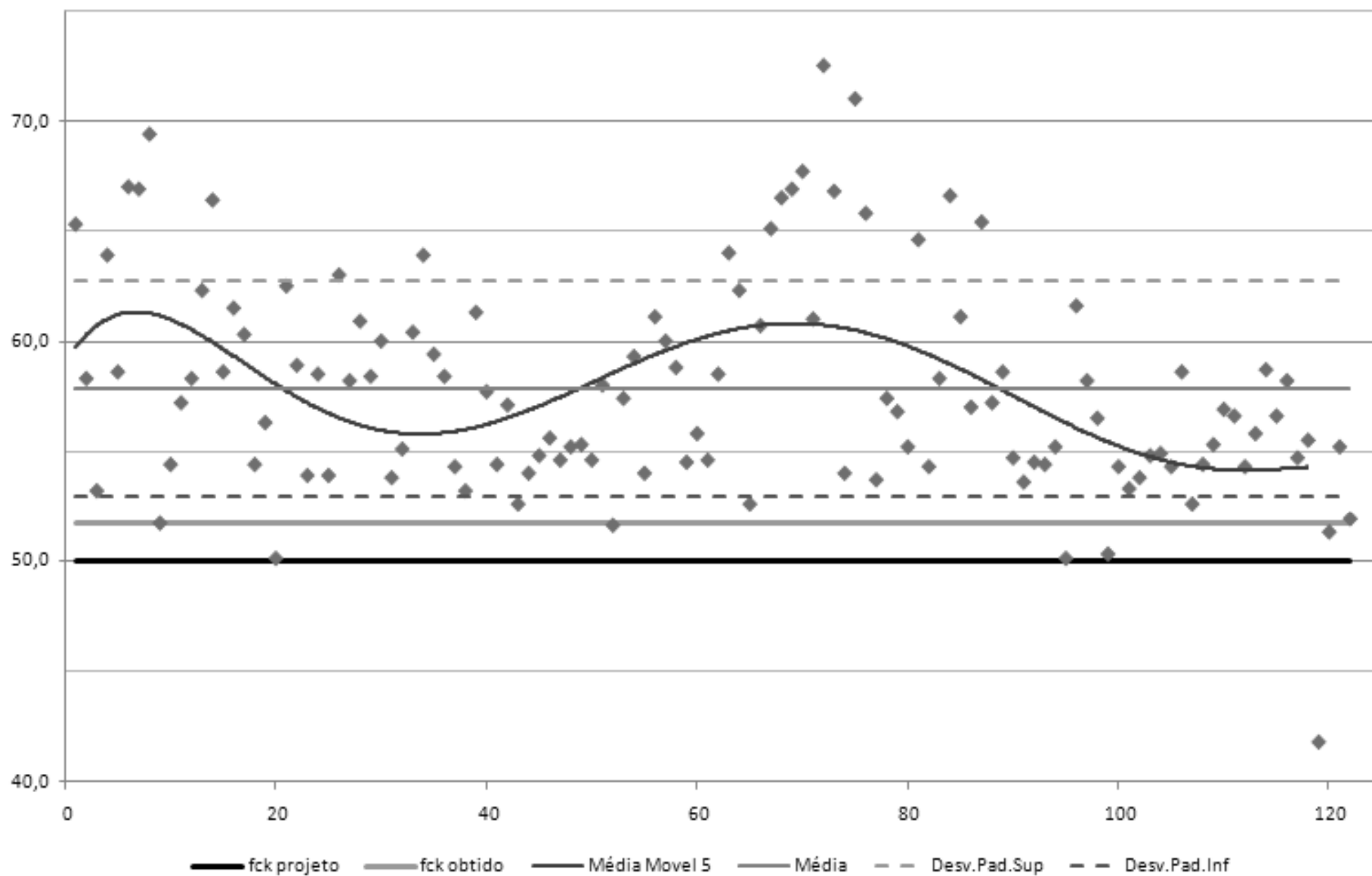
Resistência à compressão

Valores de Resistência do Concreto aos 28 dias de Idade ($f_{c28,est}$) - V2



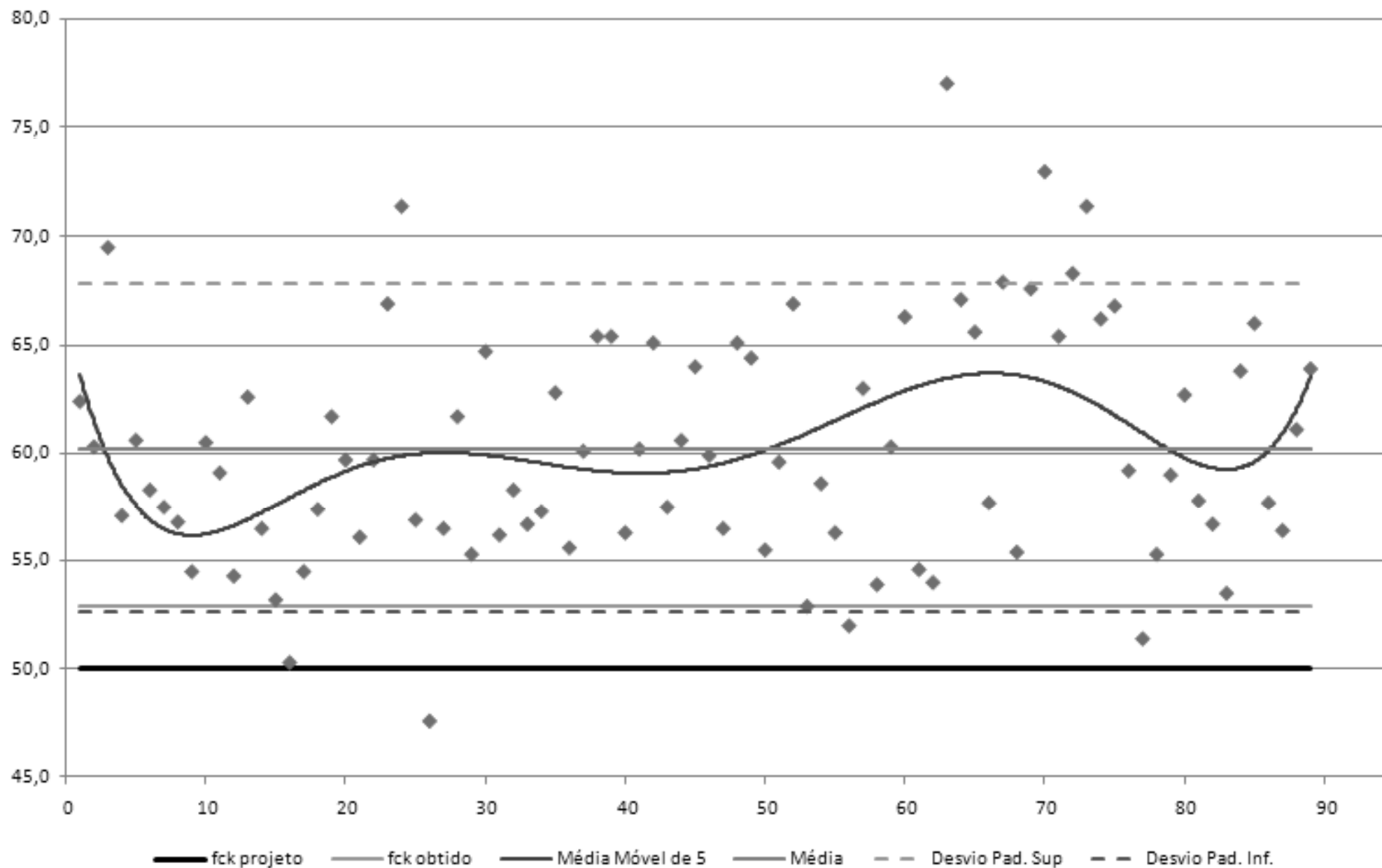
Resistência à compressão

Valores de Resistência do Concreto aos 28 dias de Idade ($f_{c28,est}$) - V3



Resistência à compressão

Valores de Resistência do Concreto aos 28 dias de Idade ($f_{c28,est}$) - V4





Obrigado!