

# Características reológicas e propriedades específicas.

PCC-5021 CONCRETO PROJETADO

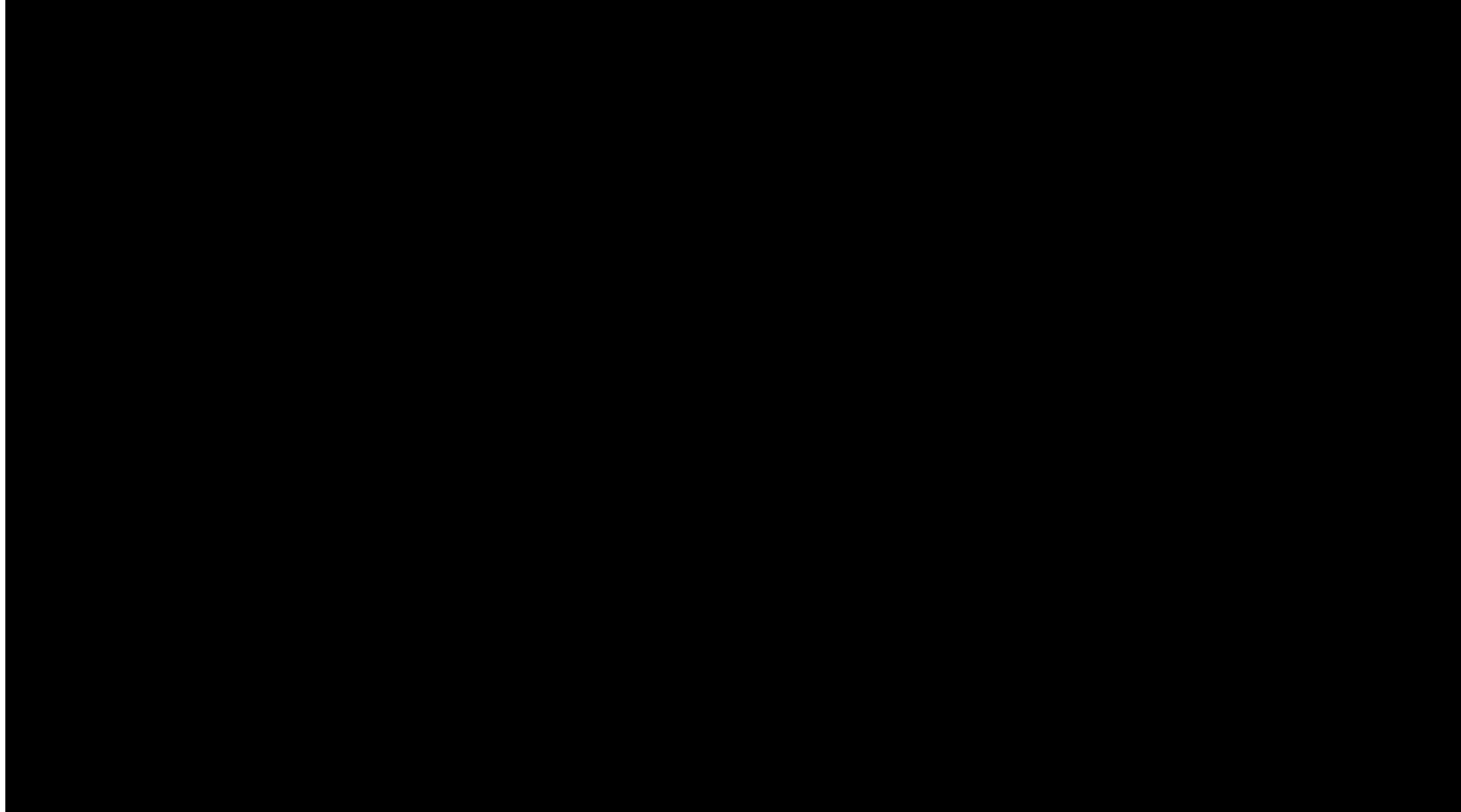
Antonio Figueiredo

Projeção via  
seca:  
Não há  
preocupação  
quanto à  
“bombeabilidade” e a  
“buildability”  
depende da  
coesão/aditivos.



- Projeção via úmida:

- Bombeabilidade avaliada pelo ensaio de consistência.
- “buildability” governada pelos aditivos aceleradores.



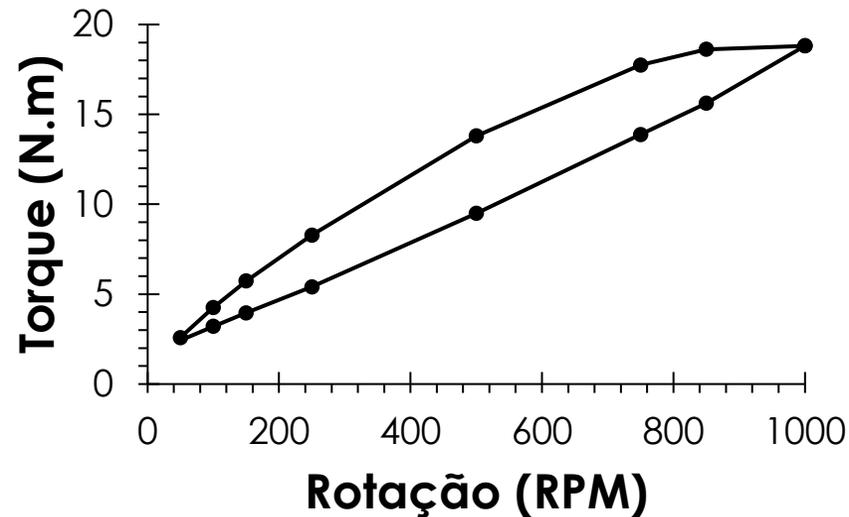
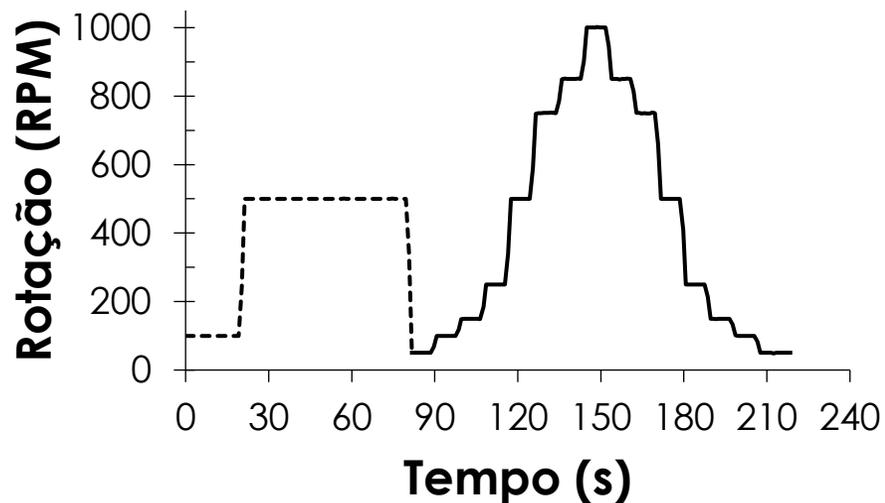
- Projeção via úmida:

- Bombeabilidade avaliada pelo ensaio de consistência.
- “buildability” governada pelos aditivos aceleradores.



# Como medir o comportamento reológico?

- Ciclo de cisalhamento
- Etapa de re-homogeneização
- Variação de velocidade 50 – 1000 – 50 RPM
- Patamares de velocidade (9s)



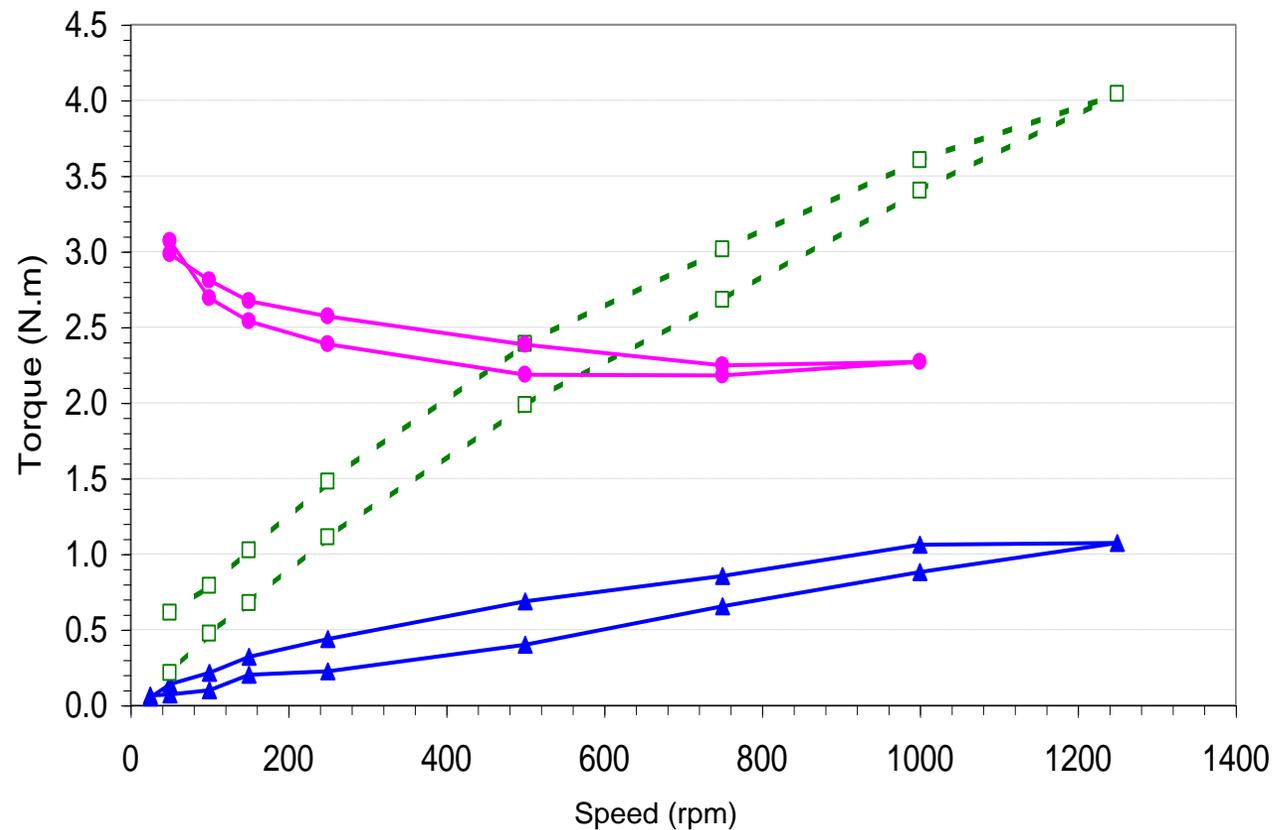
# Condições reológicas específicas



Projetado  
via úmida

Bombeável

[http://www.felcon.com.au/files/media/thumbcache/004/aea/0f9/iStock\\_000008409136Medium.jpg](http://www.felcon.com.au/files/media/thumbcache/004/aea/0f9/iStock_000008409136Medium.jpg)



Auto-adensável



<http://vhprasad.files.wordpress.com/2010/03/scc.jpg>

As relações de dosagem eficazes são volumétricas

$$V_{\text{água}} + V_{\text{ar}} > \text{Vol. entre grãos de cimento e fíleres}$$

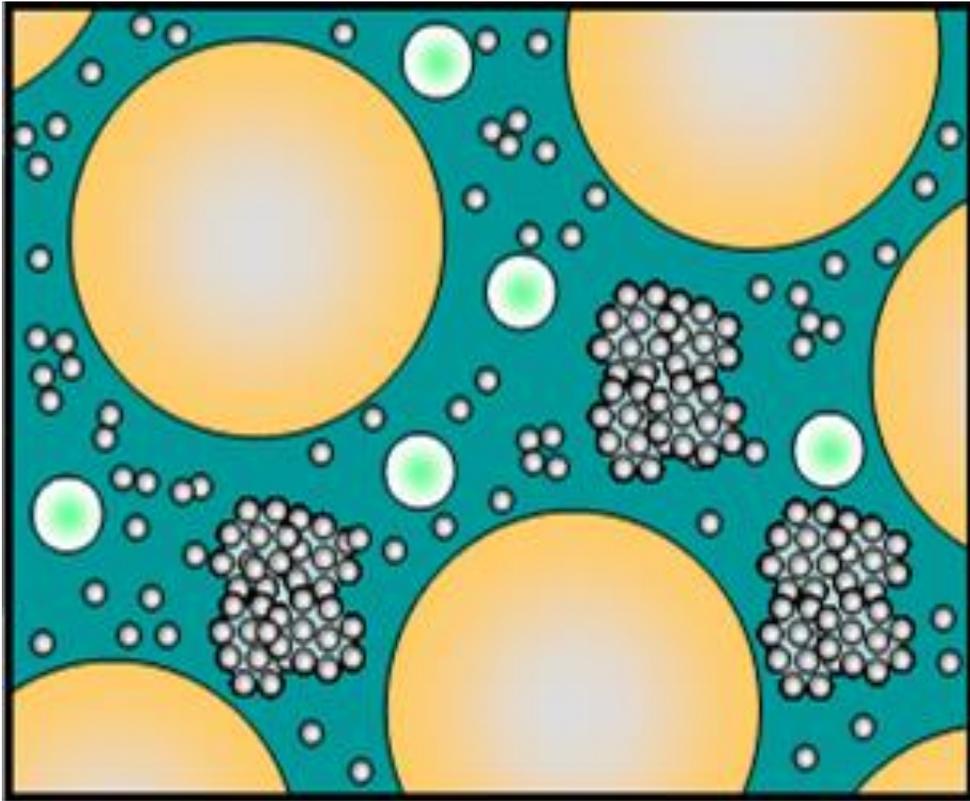
$$V_{\text{pasta}} > \text{Volume entre grãos de areia}$$

$$V_{\text{pasta}} = V_{\text{cimento}} + V_{\text{água}} + V_{\text{ar}}$$

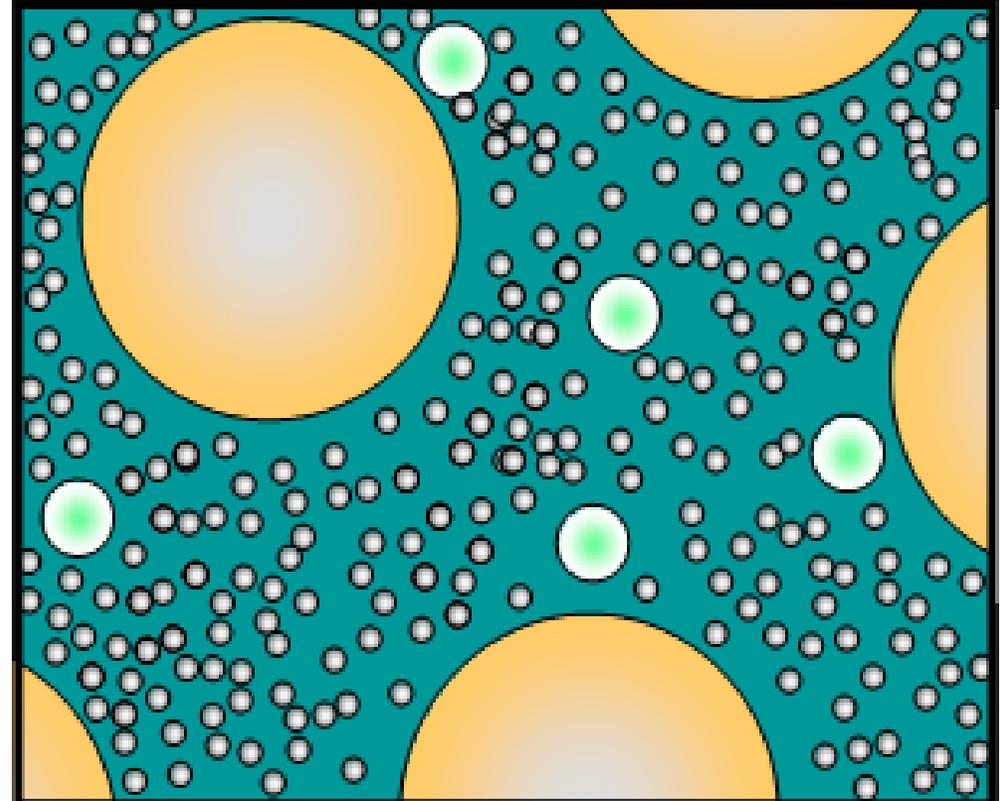
$$V_{\text{argamassa}} \gg \text{Volume entre grãos de ag. graúdo}$$

$$V_{\text{argamassa}} = V_{\text{pasta}} + V_{\text{areia}}$$

# Forças coesivas: aglomeração



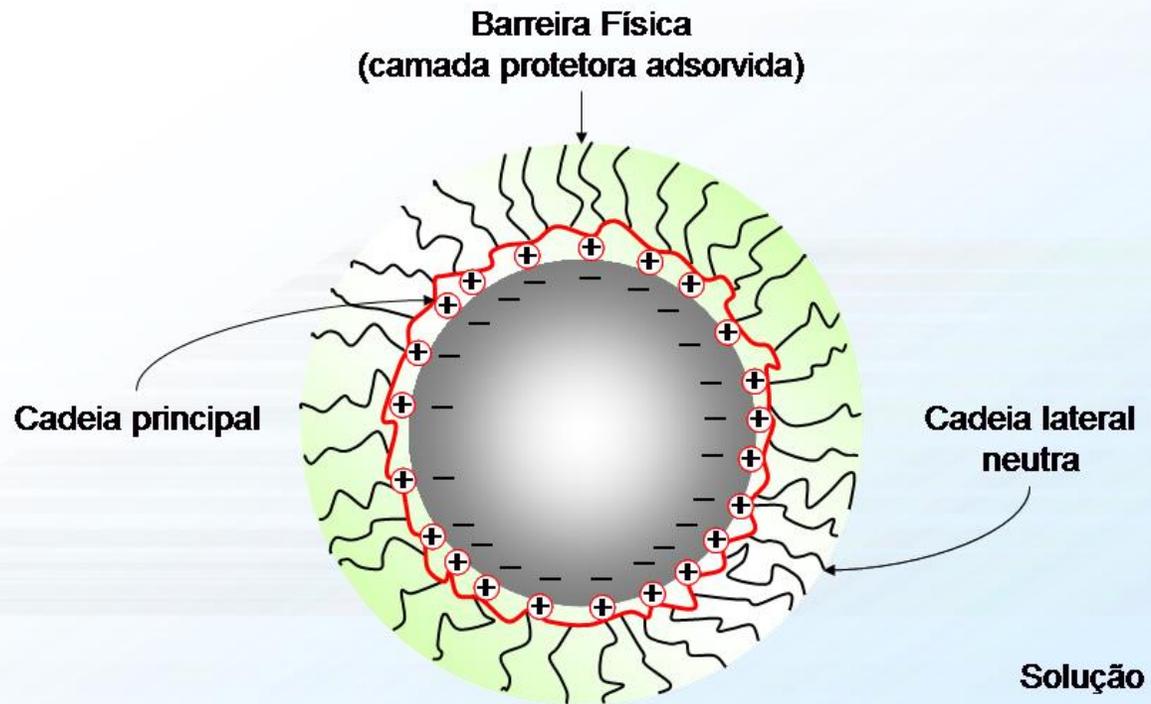
Aglomerado



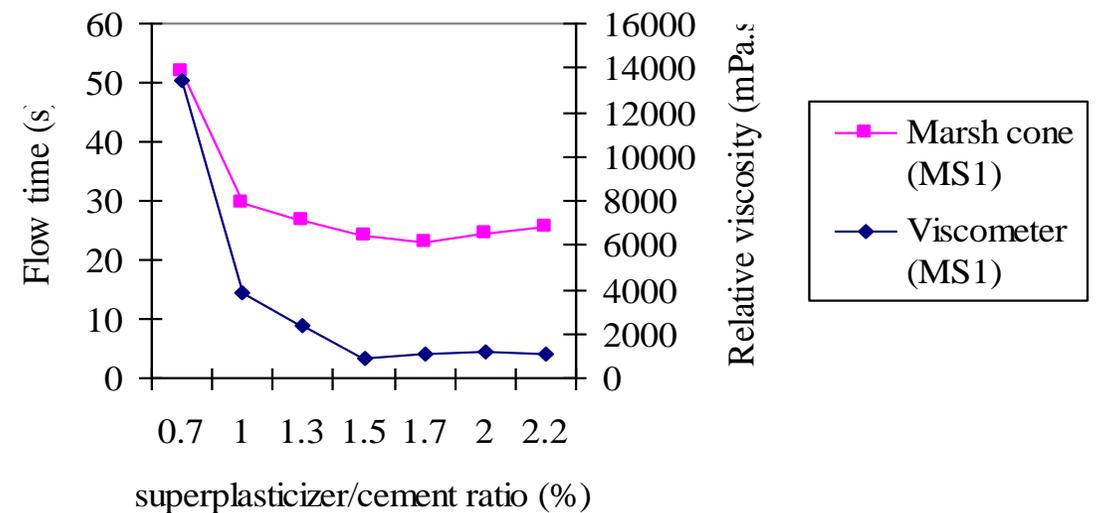
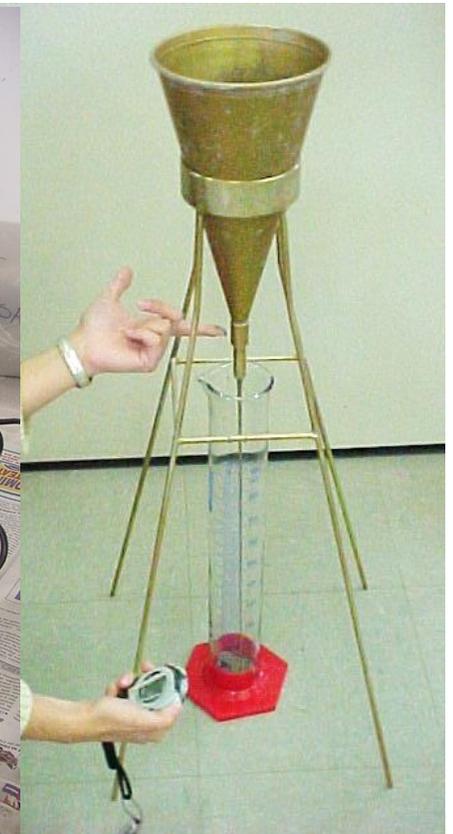
Disperso

Dispersão depende de aditivos: Garante mobilidade

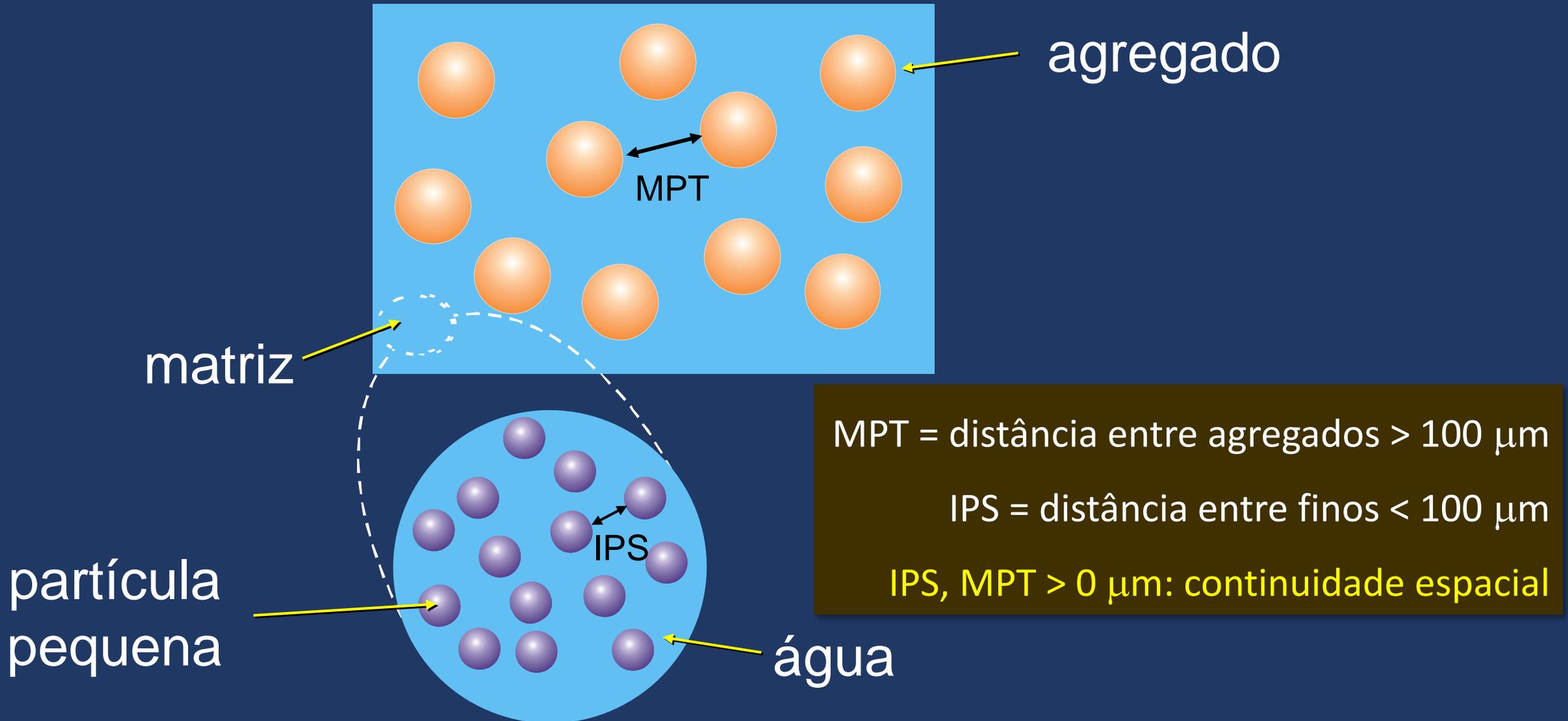
# Forças coesivas: aglomeração



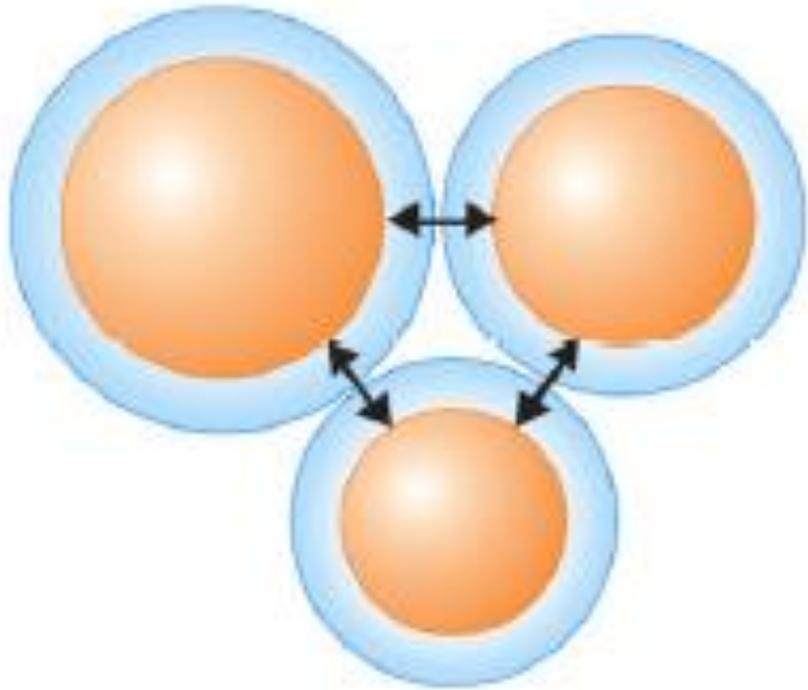
**Ex. policarboxilato**



# Modelo conceitual para proporcionamento de misturas



# Distância de separação entre partículas finas



$$IPS = \frac{2}{VSA} \times \left[ \frac{1}{V_s} - \left( \frac{1}{1 - P_{of}} \right) \right]$$

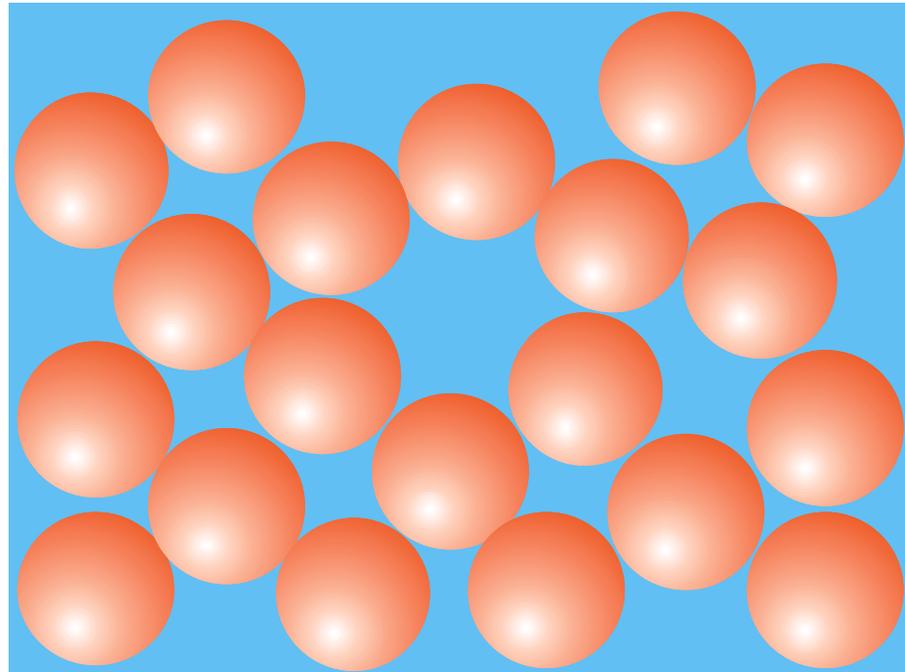
Aplicável para a matriz (cimento, filler, água)

VSA – área superficial volumétrica ( $\text{m}^2/\text{cm}^3$ ) = área superficial ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) x densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$V_s$  – fração volumétrica dos sólidos

$P_{of}$  – fração de poros no sistema, quando as partículas estão empacotadas

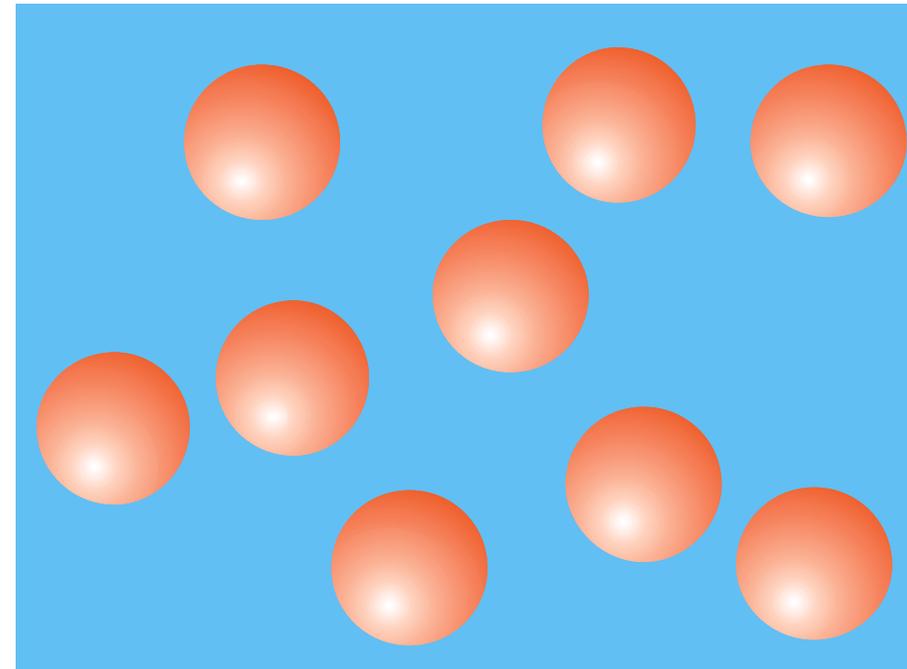
# Teor de água afeta a mobilidade, mas apenas para a viá úmida



↓ Água

Mobilidade reduzida

Reflexão alta

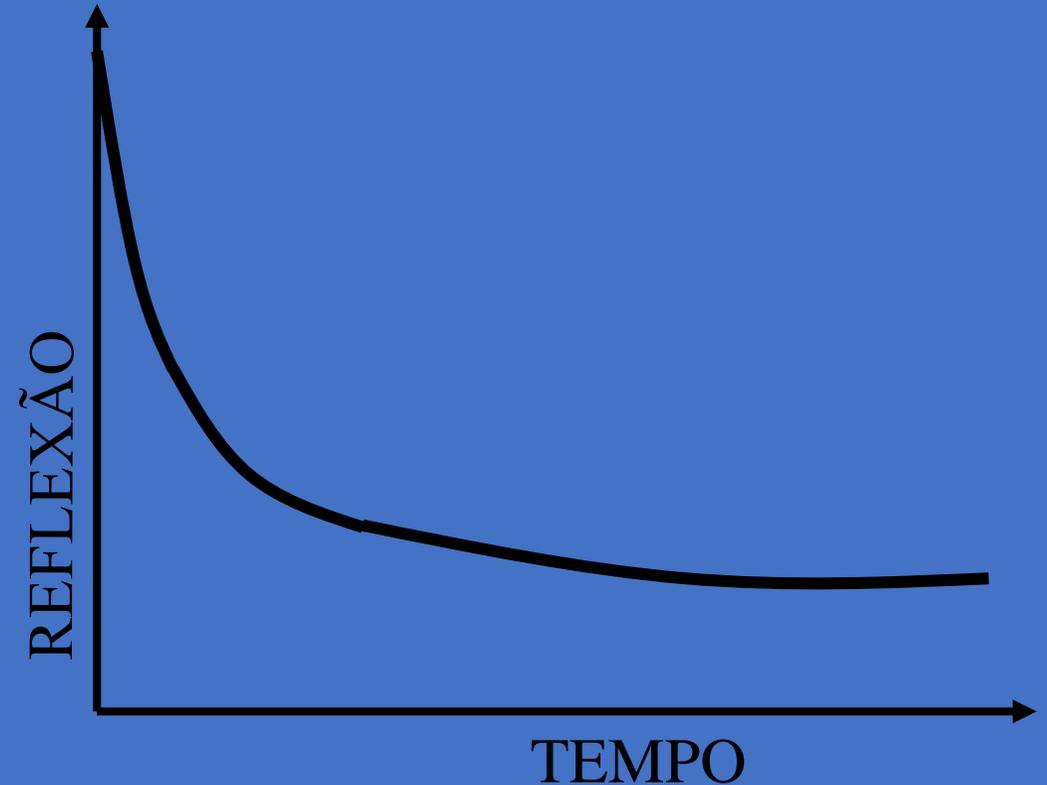
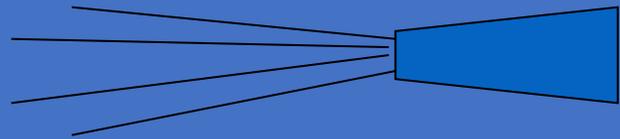
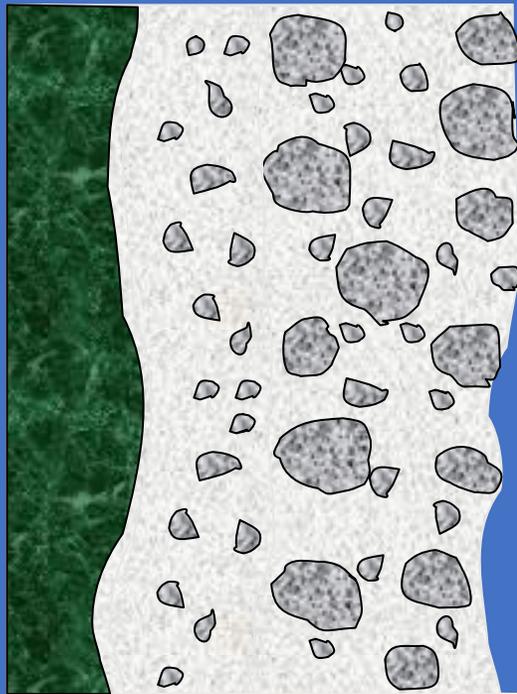


↑ Água

Mobilidade facilitada

Reflexão baixa

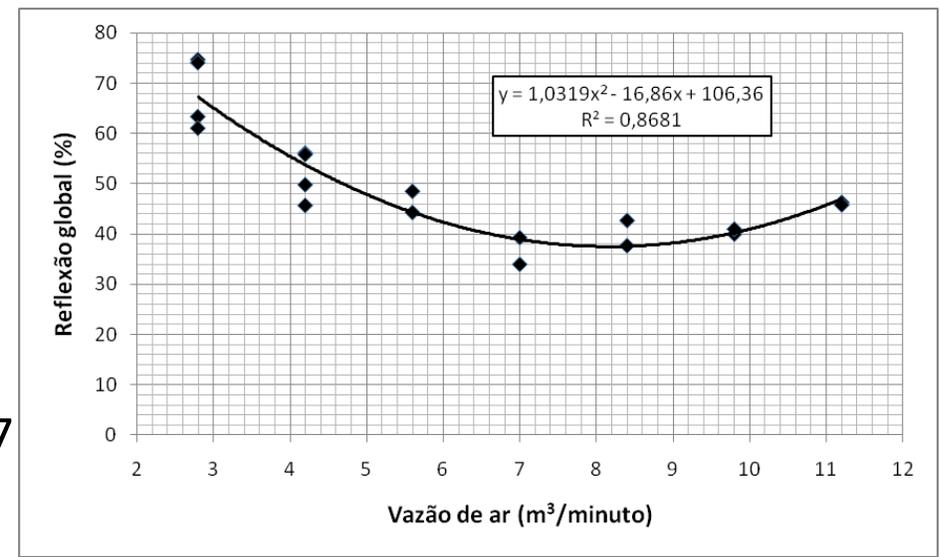
Definição: **fenômeno** que ocorre durante a projeção do concreto, onde parte do material projetado ricocheteia do alvo de projeção.



# Aspectos que incidem sobre a intensidade da reflexão:

- Espessura da camada
  - Quanto maior → menor a reflexão
- Substrato
  - Quanto mais irregular e duro → maior a reflexão
- Umidificação ou processo
  - Quanto maior → menor a reflexão
- Velocidade de projeção
  - Quanto maior → maior a reflexão
- Distância de projeção
  - distância ótima ~1m
- Inclinação do jato
  - Quanto maior → maior a reflexão
- Granulometria da mistura
  - Quanto maior → maior a reflexão
- Vazão de ar

Armelin, 1997



# Reflexão e teor de argamassa incorporado

Teor de argamassa inicial (%)	Traço (1:a:b:x)	Teor de argamassa incorporado (%)
40	1:2,02:0,47:0,16	85
	1:1,30:1,32:0,35	73
	1:2,38:0,62:0,26	85
50	1:1,72:0,83:0,25	82
	1:1,65:1,14:0,33	78
	1:2,25:0,75:0,29	81
60	1:2,16:1,10:0,36	81
	1:2,11:1,06:0,32	81
	1:2,23:0,97:0,31	77
70	1:2,44:1,00:0,42	83
	1:2,47:0,68:0,23	87
	1:2,24:1,06:0,36	75
Média e desvio padrão		81±4

# Granulometrias recomendadas historicamente (ACI 506) porcentagem retida acumulada

Abertura da peneira (mm)	Graduação no. 1	Graduação no. 2
12	-	0
9,5	0	0 a 10
4,8	0 a 5	15 a 30
2,4	12 a 20	30 a 50
1,2	15 a 50	45 a 65
0,6	40 a 75	65 a 80
0,3	70 a 90	80 a 92
0,15	90 a 98	90 a 98

# Análise “reológica” do concreto projetado via seca

Antonio Figueiredo

# Introdução

- Historicamente abordou-se o concreto projetado via seca com o enfoque similar ao do concreto convencional.
- A avaliação experimental mostrou que o comportamento é bem diferenciado e específico.
- Isso só foi possível com a avaliação da consistência de projeção pela agulha de Proctor
- Obrigado Josué!

# Estudo experimental

Primeira série de placas:

Traço 1:5

Manteve-se a pressão de água e ar constante (0,7 MPa e 0,5 MPa, respectivamente)

Test panel	Dry-mix mixture proportions (1:a:b*)	Mortar content (%)	Moisture H* (%)	Stiffness (MPa)	Shotcrete mixture proportions (1:m:x*)
A70	1:3.2:1.8	70	9.42	2.40	1:3.44:0.42
A60	1:2.6:2.4	60	8.47	4.00	1:3.26:0.36
A50	1:2.0:3.0	50	7.05	5.01	1:2.55:0.25
A40	1:1.4:3.6	40	4.47	6.89	1:2.49:0.16

# Estudo experimental

Segunda série de placas:

Traço 1:5

Manteve-se a pressão de ar constante (0,5 MPa)

Variou-se a pressão de água

Test panel	Dry-mix mixture proportions 1:a:b*	Mortar content (%)	Moisture H* (%)	Stiffness (MPa)	Water pressure (MPa)	Shotcrete mixture proportions 1:m:x*
B70	1:3.2:1.8	70	6.35	4.67	0.7	1:3.25:0.27
B60	1:2.6:2.4	60	7.76	4.67	0.8	1:3.17:0.32
B50	1:2.0:3.0	50	8.83	5.12	0.9	1:2.79:0.33
B40	1:1.4:3.6	40	9.72	4.00	1.0	1:2.62:0.35

# Estudo experimental

Terceira série de placas:

Traço 1:5

Manteve-se a pressão de ar constante (0,5 MPa)

Tentou-se manter a quantidade de água constante

Ideia inicial que não funcionou

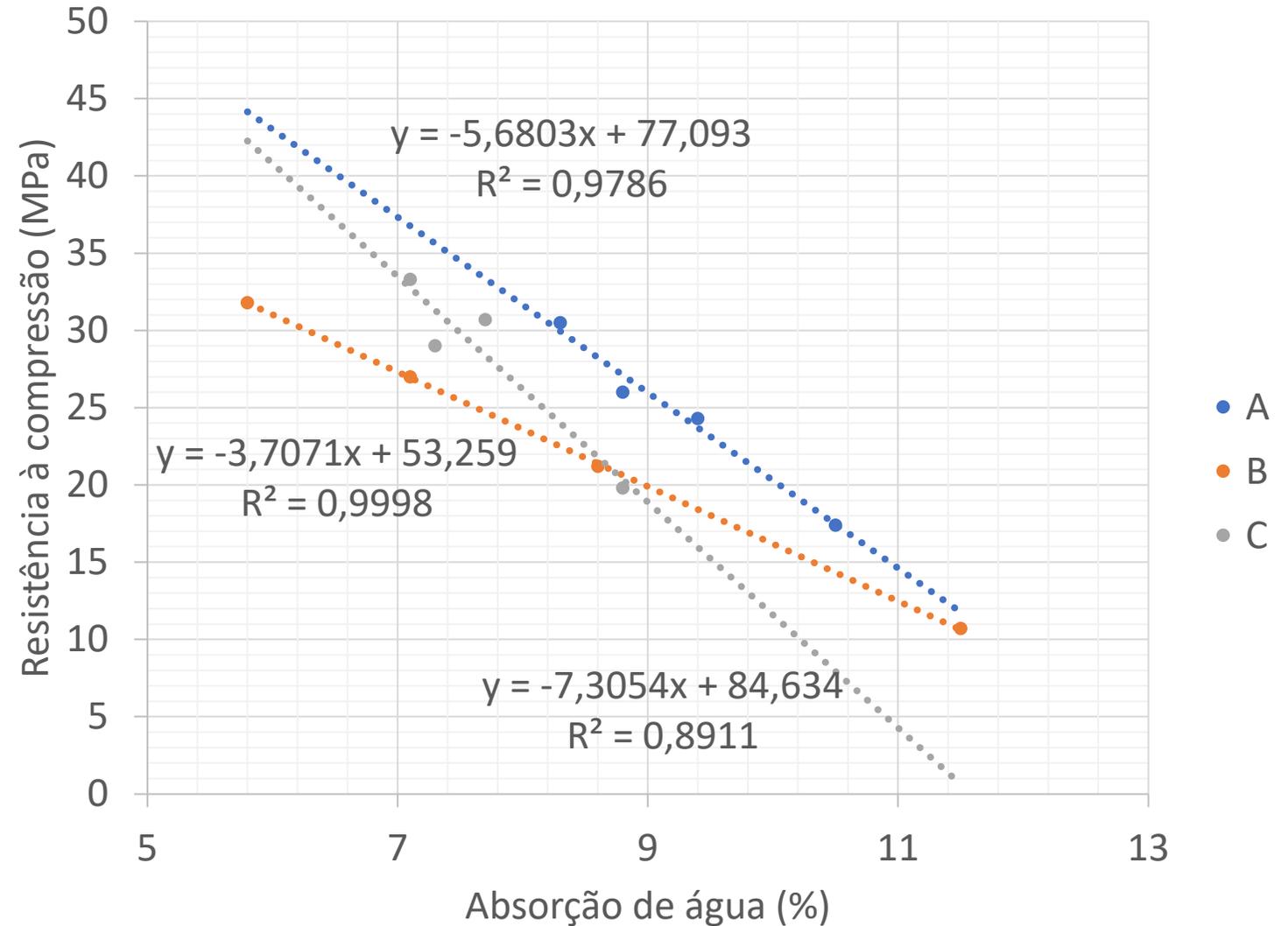
Test panel	Dry-mix mixture proportions 1:a:b*	Mortar content (%)	Moisture H* (%)	Stiffness (MPa)	Water pressure (MPa)	Shotcrete mixture proportions 1:m:x*
C70	1:3.2:1.8	70	8.30	4.84	0.70	1:3.30:0.36
C60	1:2.6:2.4	60	7.35	4.49	0.75	1:3.20:0.31
C50	1:2.0:3.0	50	7.35	5.01	0.80	1:3.00:0.29
C40	1:1.4:3.6	40	6.50	6.03	0.90	1:3.00:0.26

# Resultados

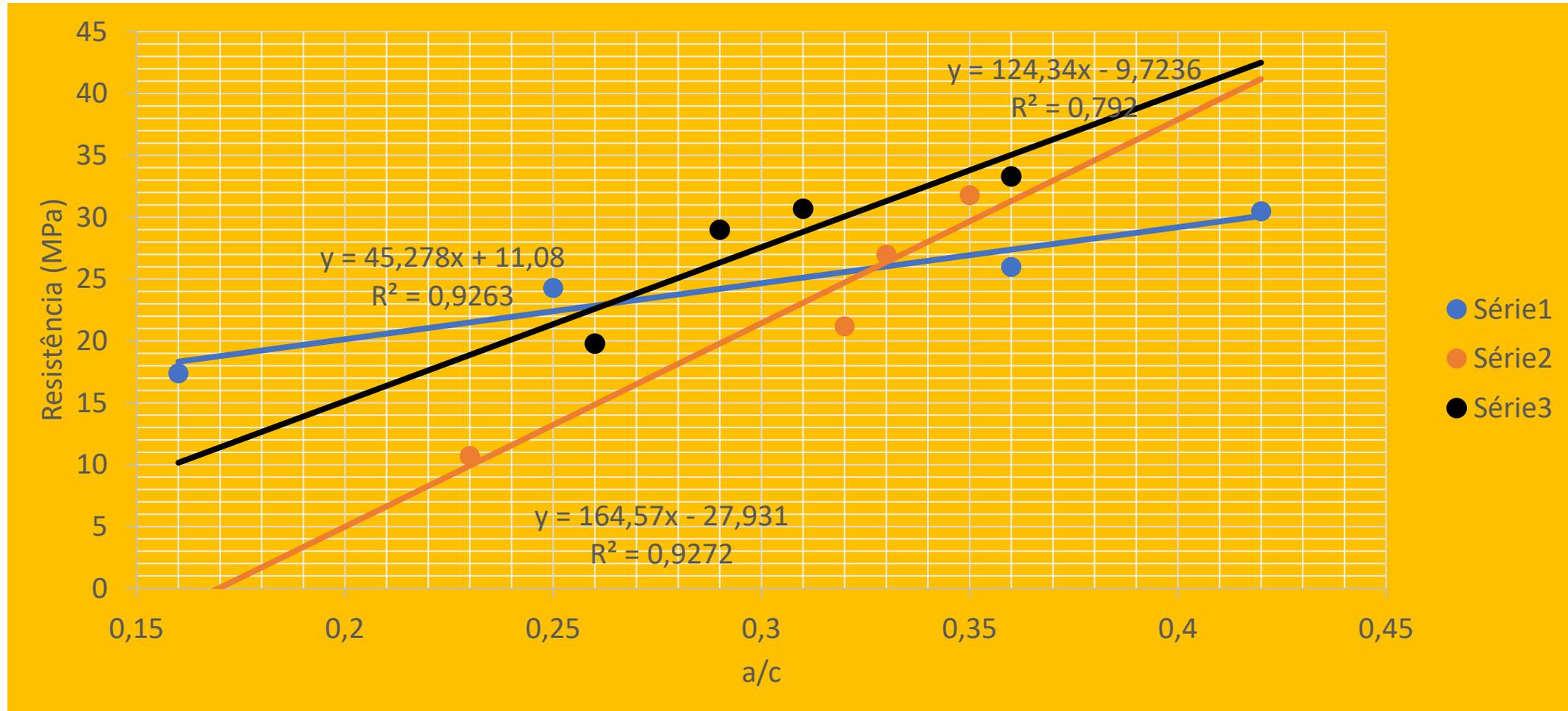
Test panel	Mixture proportions of the shotcrete (1:a:b:x)	Mortar content in the shotcrete (%)	Water absorption (%)	Cement consumption (kg/m <sup>3</sup> )	Water consumption (kg/m <sup>3</sup> )	Volume of paste per cubic meter (l/m <sup>3</sup> )
A70	1:2,44:1,00:0,42	83	8,3	409	172	304
A60	1:2,16:1,10:0,36	81	8,8	431	155	294
A50	1:1,72:0,83:0,25	82	9,4	516	129	295
A40	1:2,02:0,47:0,16	85	10,5	521	83	251
B70	1:2,47:0,68:0,23	87	11,5	443	102	245
B60	1:2,11:1,06:0,32	81	8,6	452	145	291
B50	1:1,65:1,14:0,33	78	7,1	502	166	328
B40	1:1,30:1,32:0,35	73	5,8	531	186	357
C70	1:2,24:1,06:0,36	75	7,1	481	173	328
C60	1:2,23:0,97:0,31	77	7,7	494	153	313
C50	1:2,25:0,75:0,29	81	7,3	522	151	320
C40	1:2,38:0,62:0,26	85	8,8	514	134	299

# Resultados

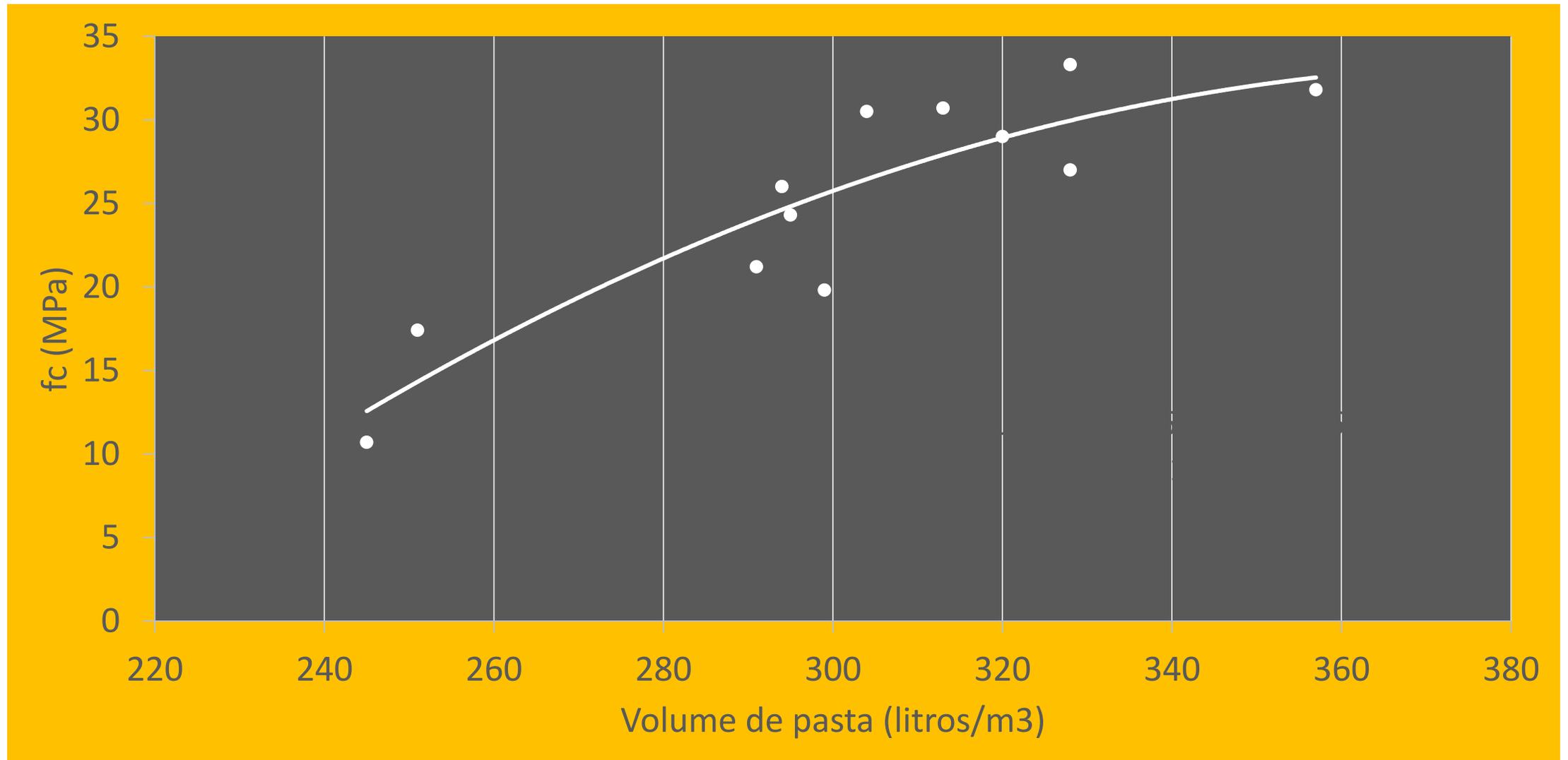
Test panel	Compressive strength (MPa) at 28 days	Water absorption (%)
A70	30.5±2.3	8.3±0.4
A60	26.0±2.3	8.8±0.9
A50	24.3±3.2	9.4±0.1
A40	17.4±1.8	10.5±0.3
B70	10.7±2.0	11.5±0.4
B60	21.2±6.1	8.6±1.1
B50	27.0±6.6	7.1±1.0
B40	31.8±6.4	5.8±0.4
C70	33.3±2.7	7.1±0.6
C60	30.7±3.3	7.7±1.1
C50	29.0±6.4	7.3±1.2
C40	19.8±7.1	8.8±1.6



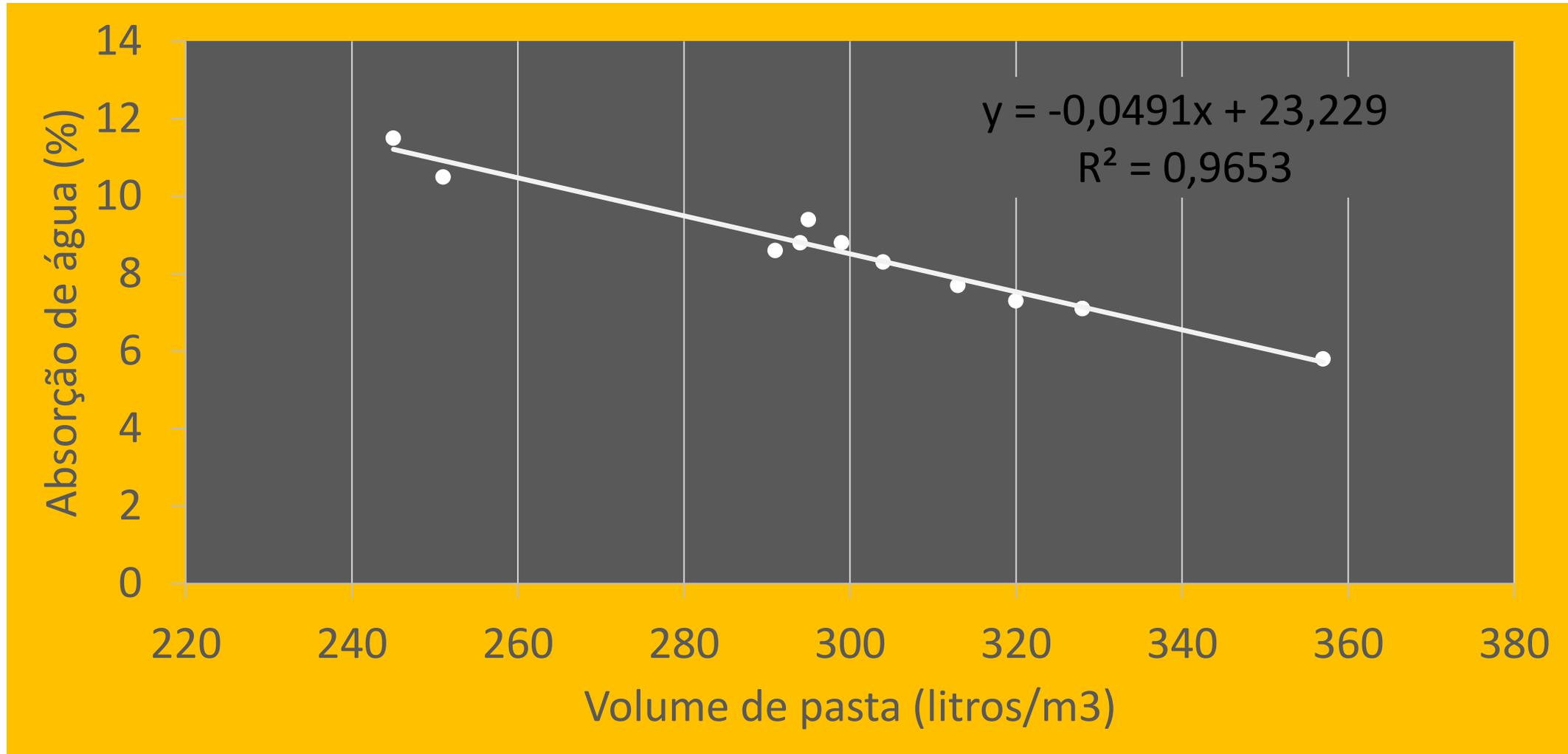
# O que governa a resistência? a/c ?



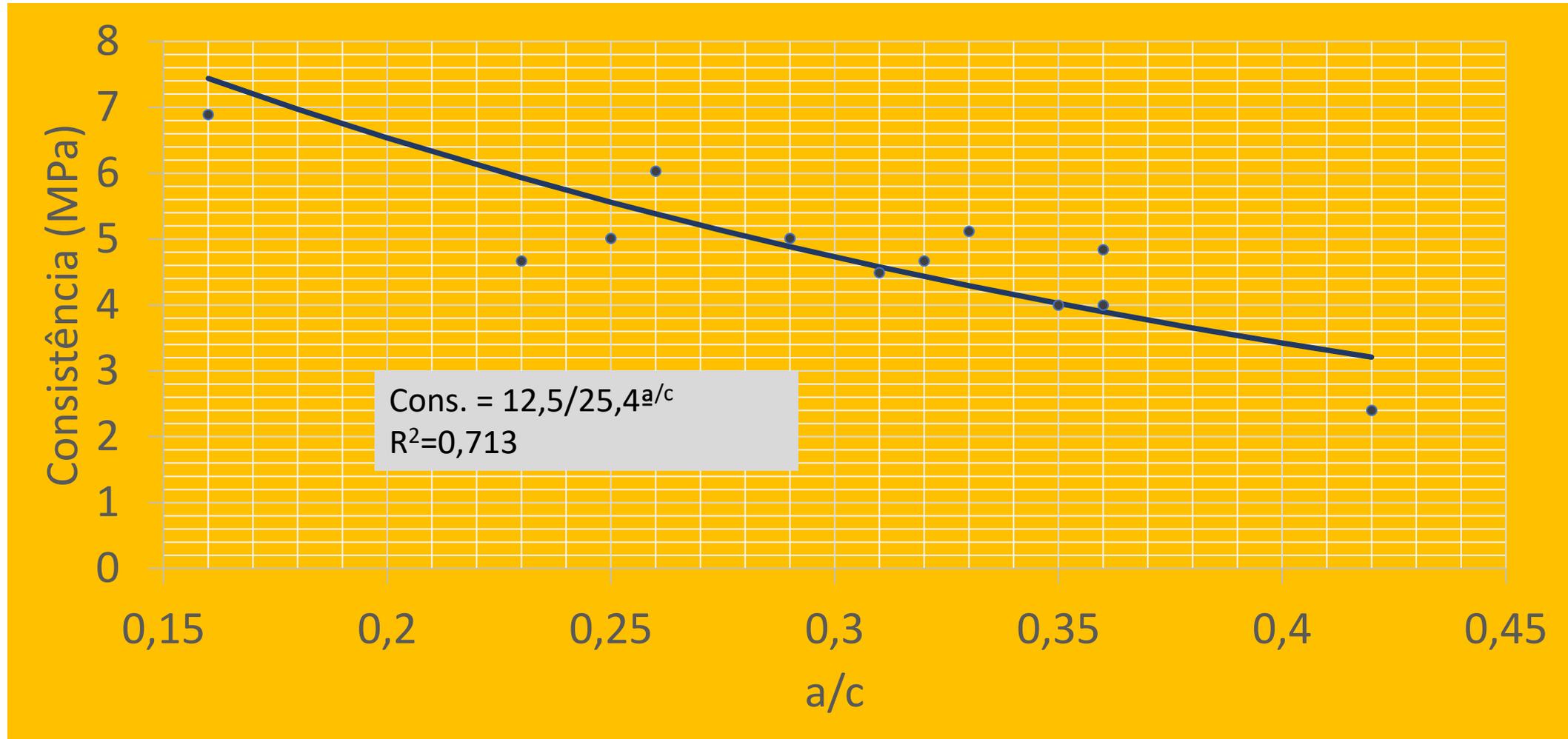
# O que governa a resistência?



# O que governa a porosidade?



# O que governa a consistência?



## Comentários:

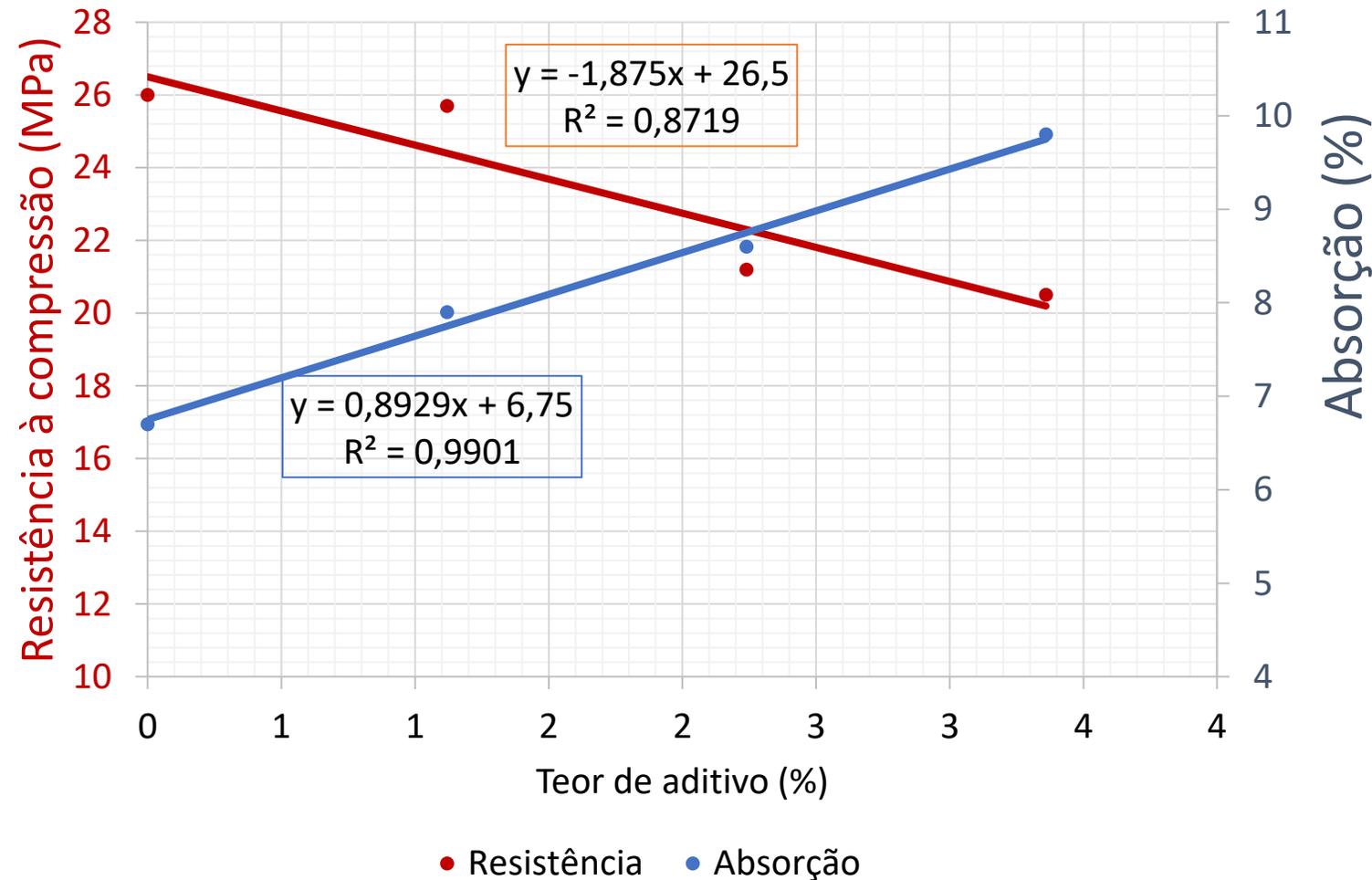
- A relação água/cimento governa a consistência do concreto projetado via seca e, conseqüentemente, o “buildability”.
- A maior facilidade de compactação (menor consistência) pode propiciar melhor resistência em conjunto com um volume de pasta adequado para preenchimento dos vazios dos agregados.
- Se aumentar demais a/c a resistência começa a cair junto com a consistência: umidade ótima de compactação.
  - Isto pode ocorrer com o uso intenso de aditivos.

# Aditivos aceleradores

- Os aditivos podem ser de dois tipos básicos:
  - Alcalinos e
  - Não alcalinos
- Cada tipo exige estudo prévio de dosagem pois depende da **compatibilidade com o cimento**.
- É fundamental caracterizar e ter um procedimento de qualificação do produto, pois dele depende a estabilidade da frente de escavação.

# Aditivos aceleradores

- Para via seca são dispensáveis (o sistema pode trabalhar por coesão)
- Para via úmida são necessários para aplicabilidade.
- Para o revestimento primário de túneis são fundamentais para garantir resistência inicial adequada para estabilização da frente de escavação.



(FIGUEIREDO, 1997)

# Permeabilidade e porosidade do concreto projetado

Grande preocupação (ITA, 1998)

“Necessidade” de túnel “estanque”

- Entrada de agentes agressivos
- Lixiviação
- Alteração do nível do lençol freático
- Ataque às instalações do túnel

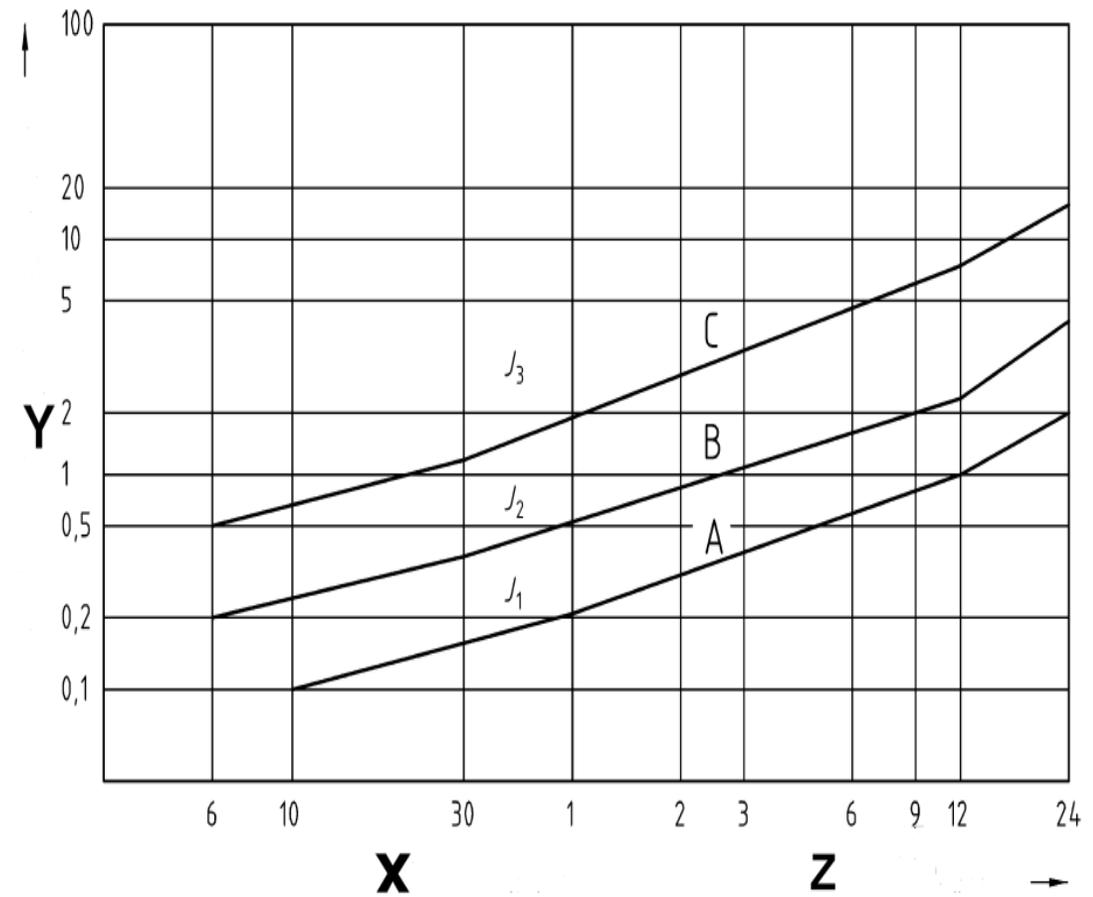
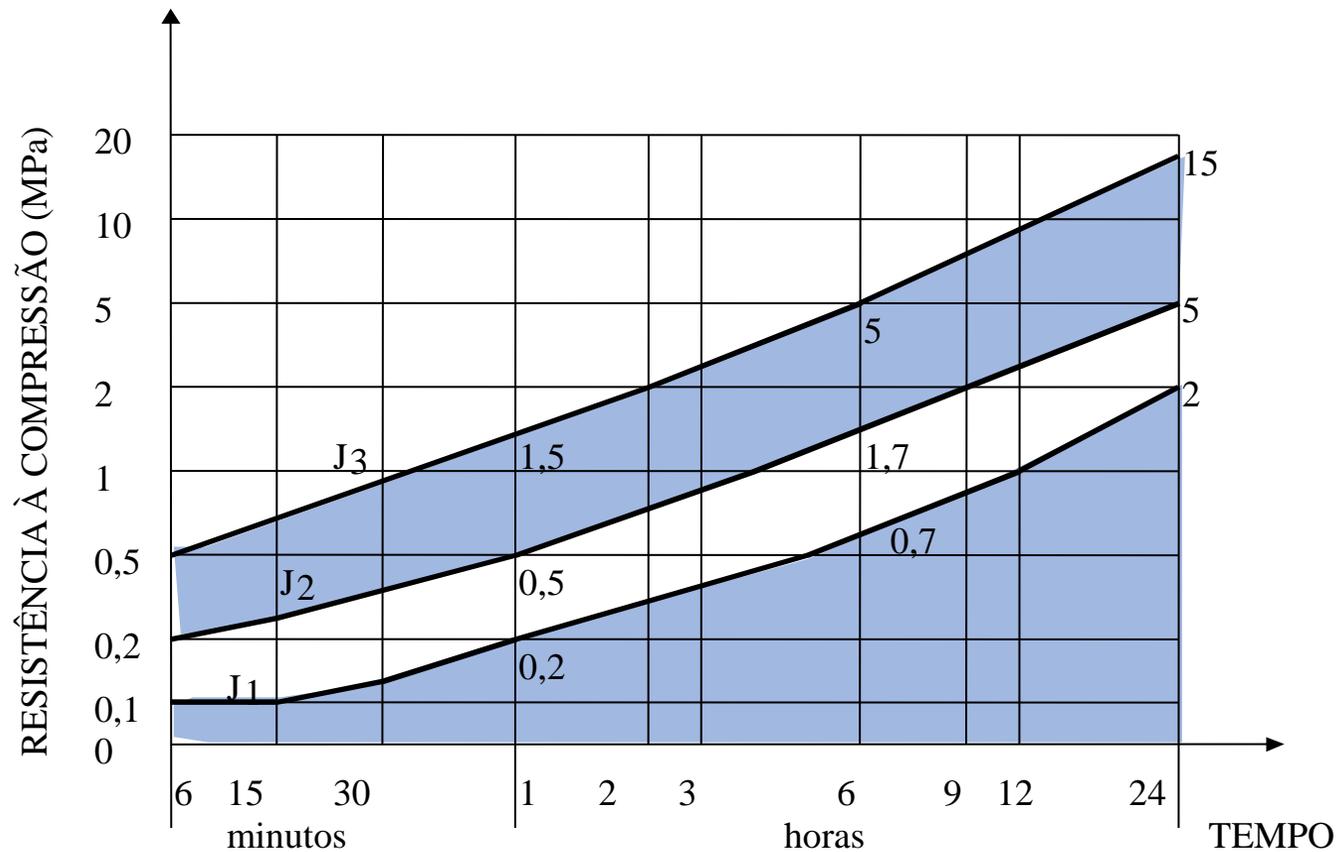
# Permeabilidade e porosidade do concreto projetado vs concreto convencional

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)

# Requisitos de desempenho à baixa idade

## Austrian Concrete Society (1990) = EN14.488-1

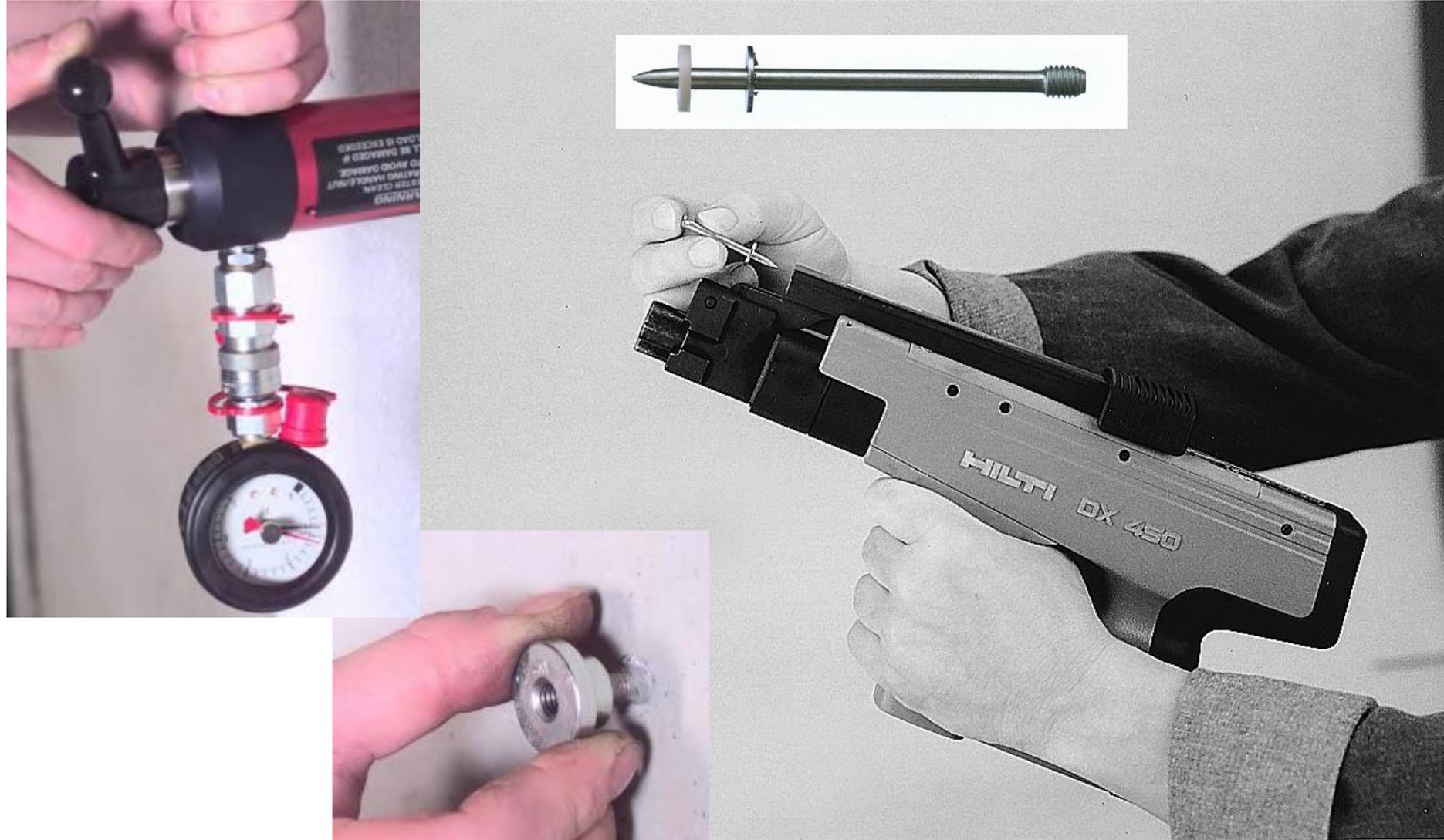




# Determinação da evolução de resistência inicial

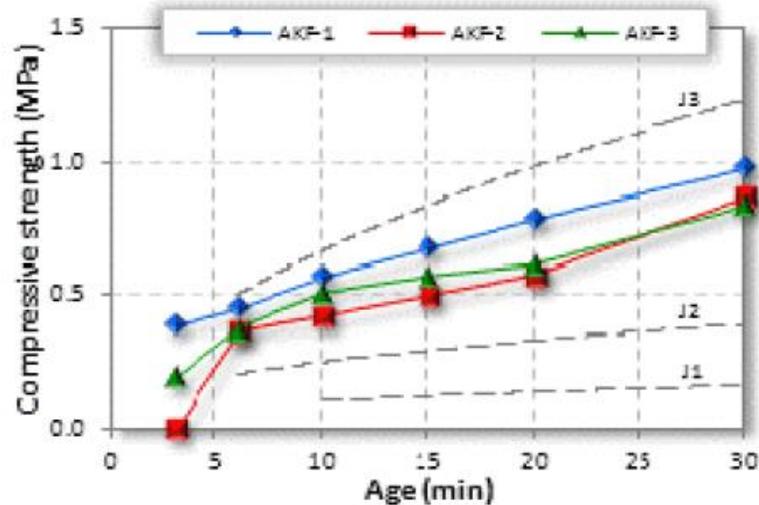


# Determinação da evolução de resistência inicial



# Controle da evolução da resistência pelos métodos convencionais

## Desenvolvimento da resistência à compressão

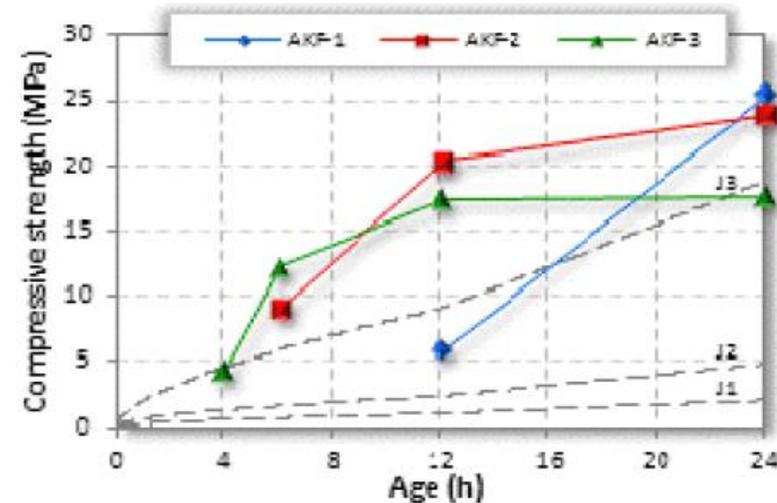


## Penetrômetro

- Relacionado ao teor de acelerador
- Fenômeno relacionado à hidratação do  $C_3A$ , observado na evolução da temperatura

## Cravação de pino

- Relacionado ao tipo de cimento utilizado: resistência específica
- Fenômeno relacionado à hidratação dos silicatos  $C_2S$  e  $C_3S$ , observado na evolução da temperatura

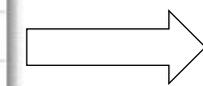
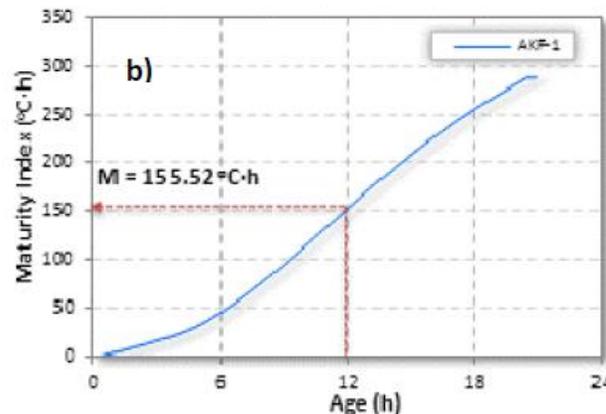
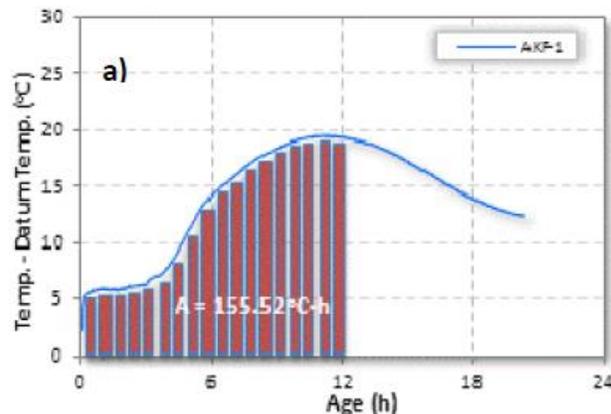


# Controle da evolução da resistência pelo método da maturidade

- Proposta: Método da maturidade

→ Relação entre resistência inicial e índice de maturidade(M)

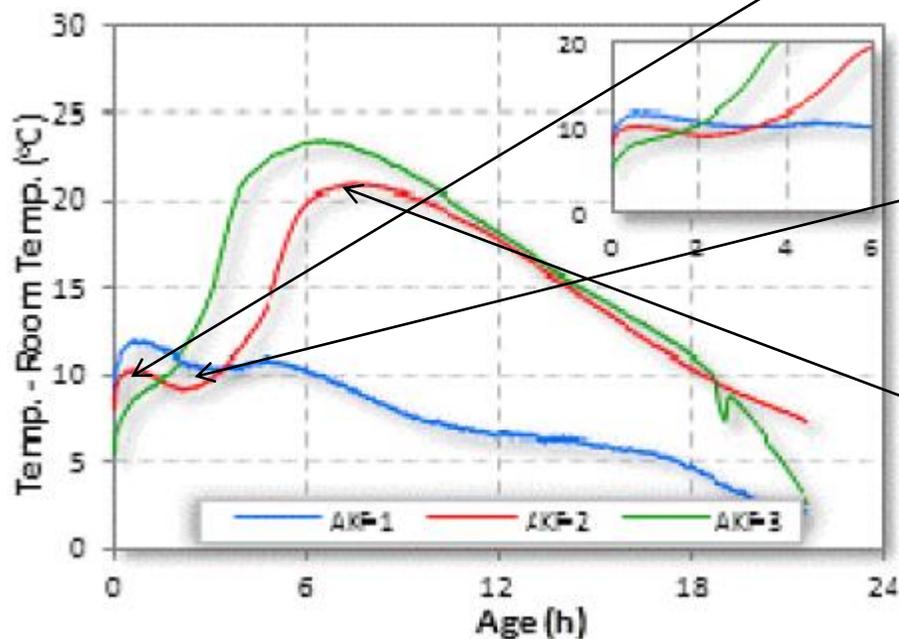
$$M = \sum_0^t T - T_o \cdot \Delta t \quad (\text{Integração da evolução da temperatura})$$



Estimativa da evolução no tempo da resistência à compressão a partir da evolução da temperatura (índice de maturidade)

# Controle da evolução da resistência pelo método da maturidade

Evolution of temperature



## Primeira elevação

- Hidratação dos aluminatos ( $C_3A$ )
- Mais alto com aumento do teor de acelerador

## Período de dormência

- Mais longo para baixos teores de aceleradores

## Segunda elevação

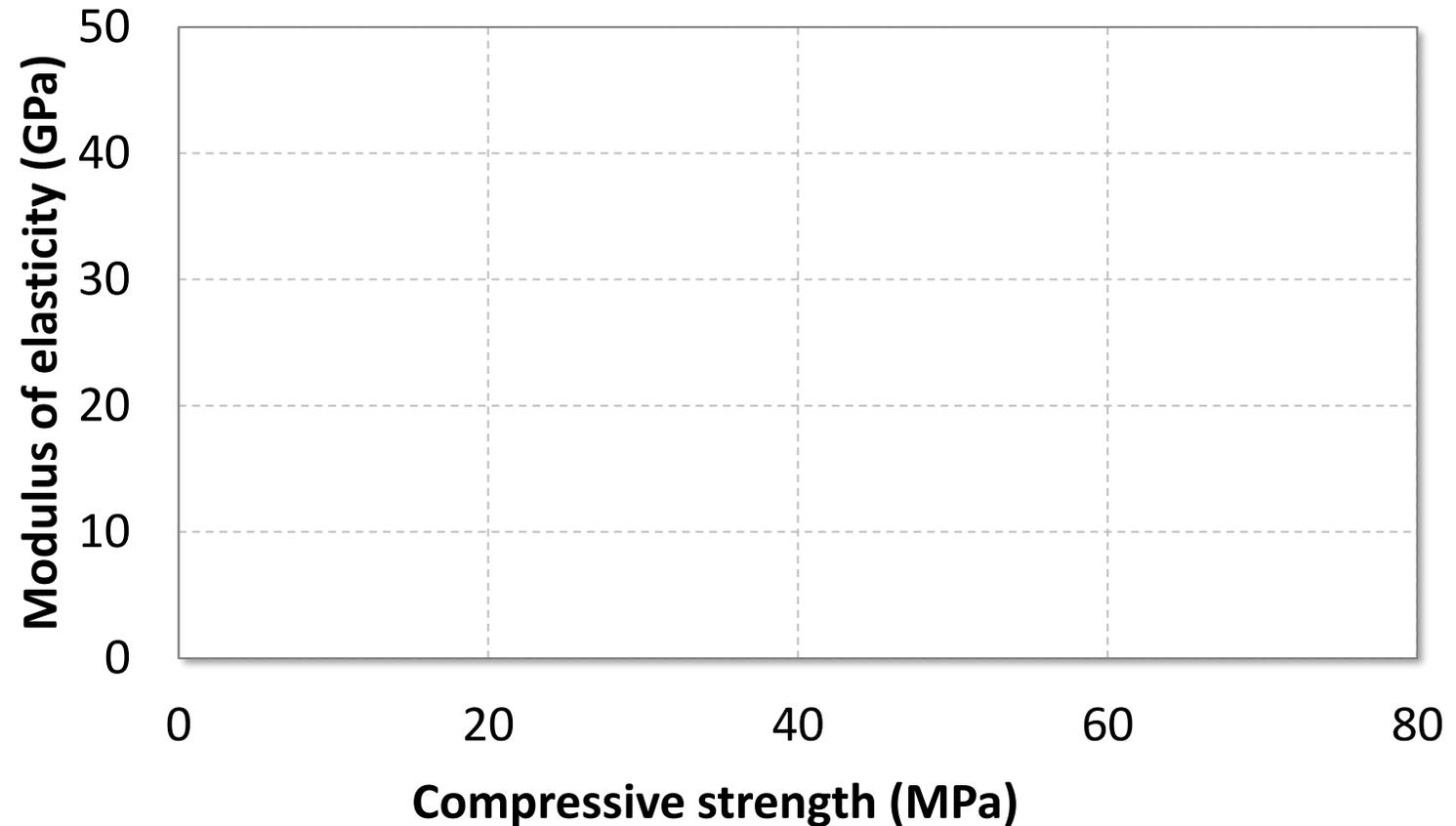
- Hidratação dos silicatos ( $C_2S$  e  $C_3S$ )
- Maior para o cimento CEM 152.5 devido ao maior teor de clínquer

Misturas que apresentam temperaturas mais elevadas no primeiro pico tendem a apresentar segundo pico com temperaturas mais baixas.

# Como parametrizar o comportamento estrutural do concreto projetado?

Resistência à compressão

Módulo de elasticidade



# Modelos de previsão de comportamento

Model Code 2010

Eurocode 2

EHE-08

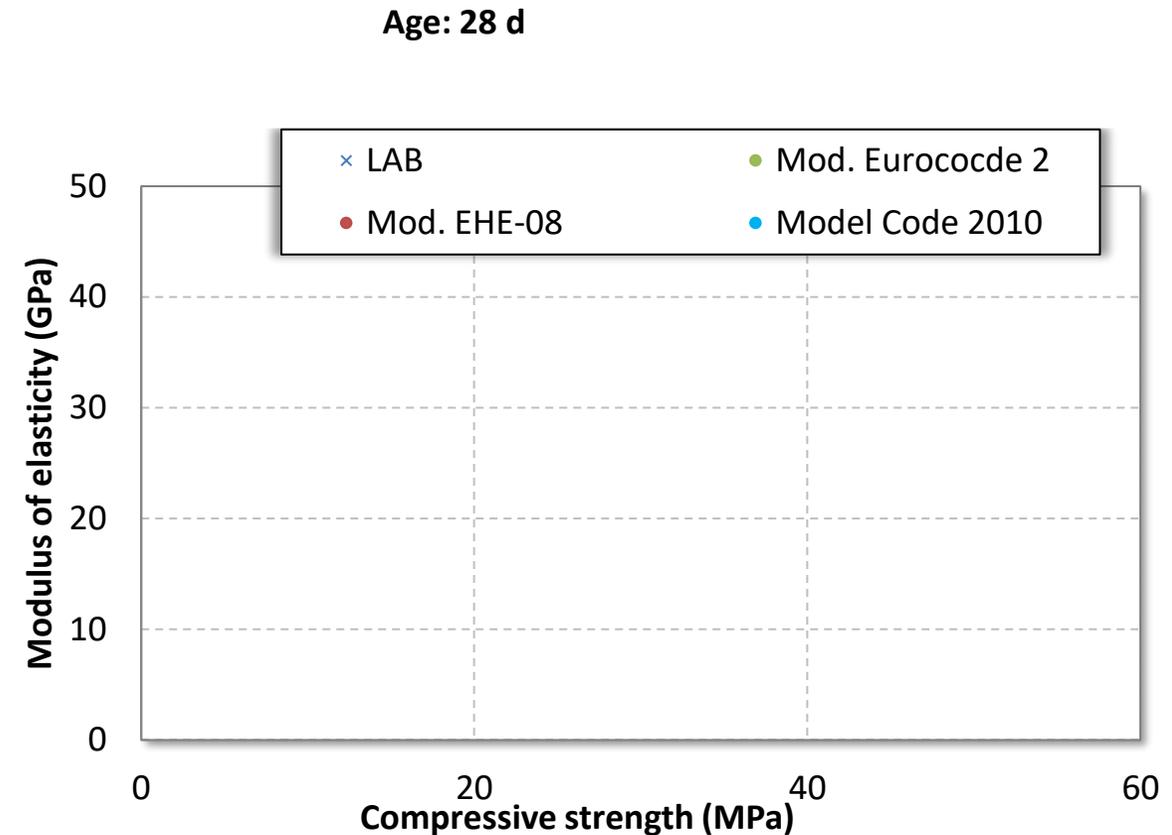
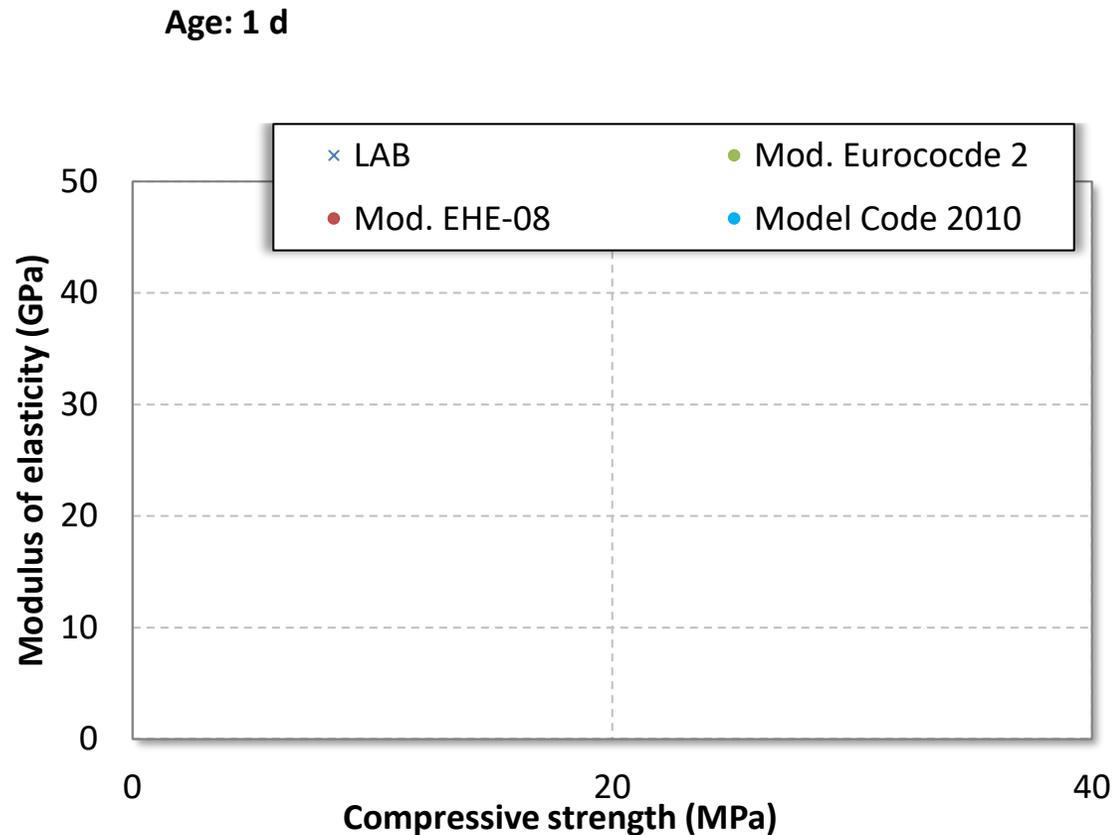
**Equações empíricas da literature europeia**

**Similares à NBR 6118**

	Model Code 2010	Eurocode 2	EHE-08
$E_{cm}$	$E_{cm} = E_{co} \cdot \alpha_E \cdot \left( \frac{f_{ck} + \Delta f}{10} \right)^{1/3}$	$E_{cm,j} = 9.5 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,j}}$	$E_{cm} = \alpha \cdot 8.5 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}$
	$E_{cm} = E_{co} \cdot \alpha_E \cdot \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}$		$E_{cm,j} = \left( \frac{f_{cm,j}}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm}$
$E_{cm,j}$	$E_{cm,j} = \sqrt{\exp \left\{ s \cdot \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\}} \cdot E_{cm}$		

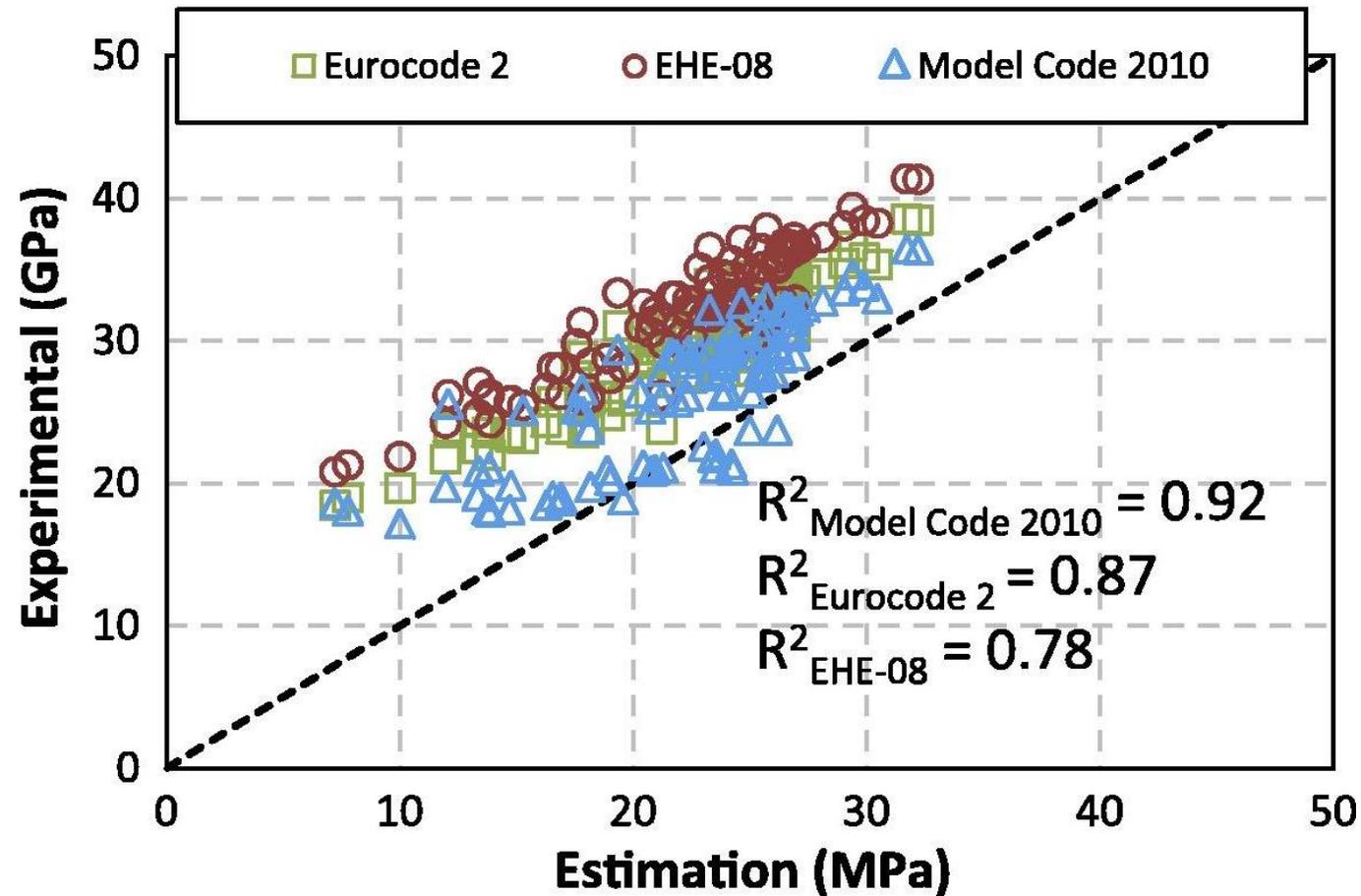
# Modelos de previsão de comportamento

## Avaliação das equações existentes

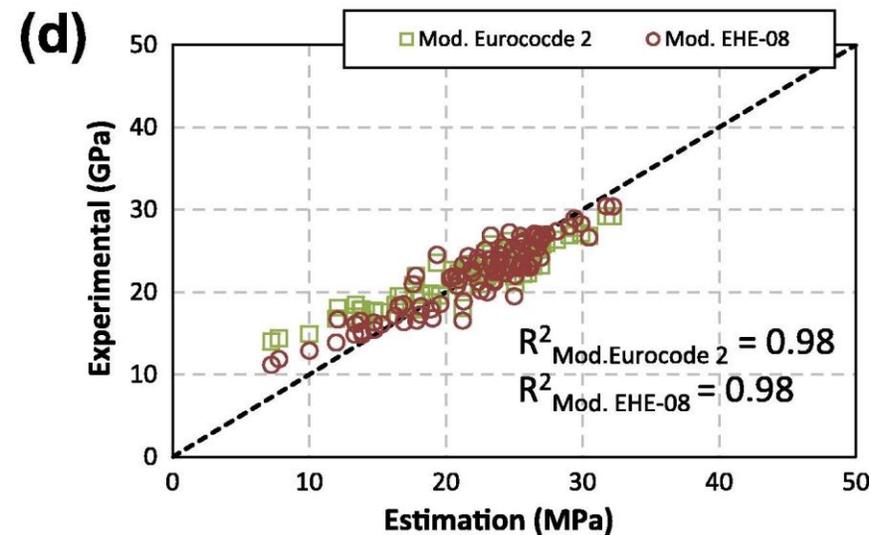
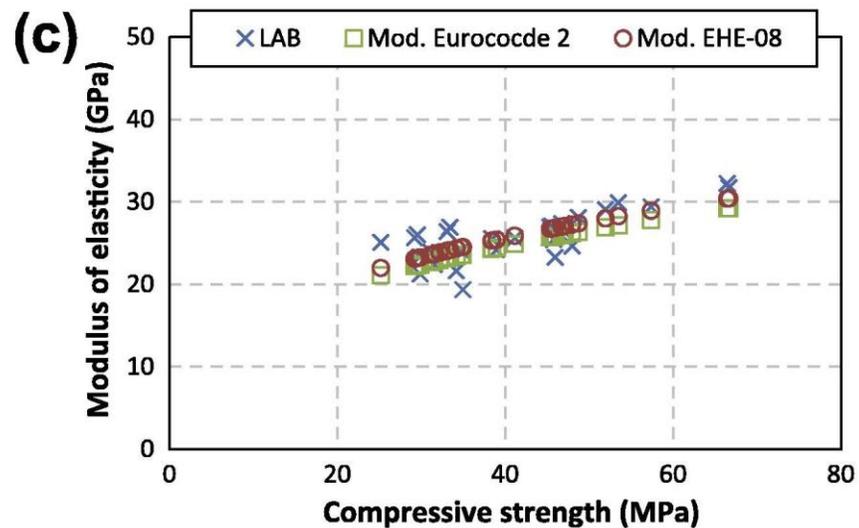
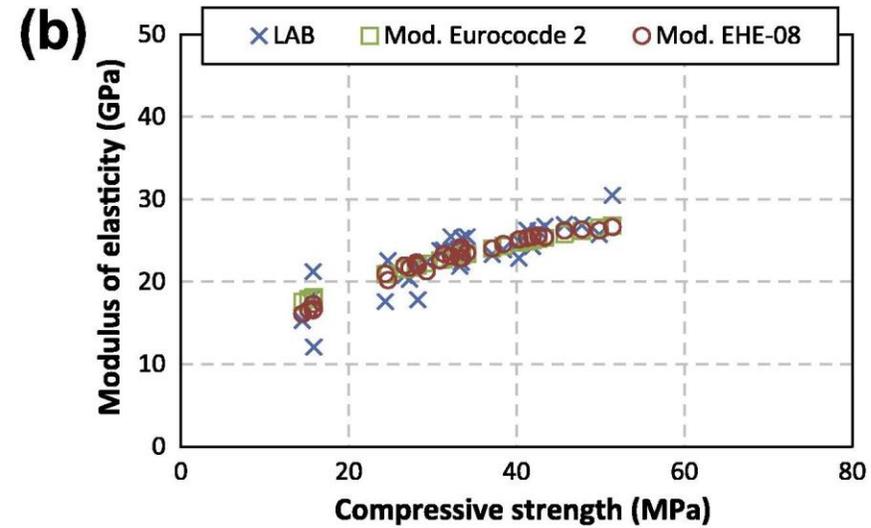
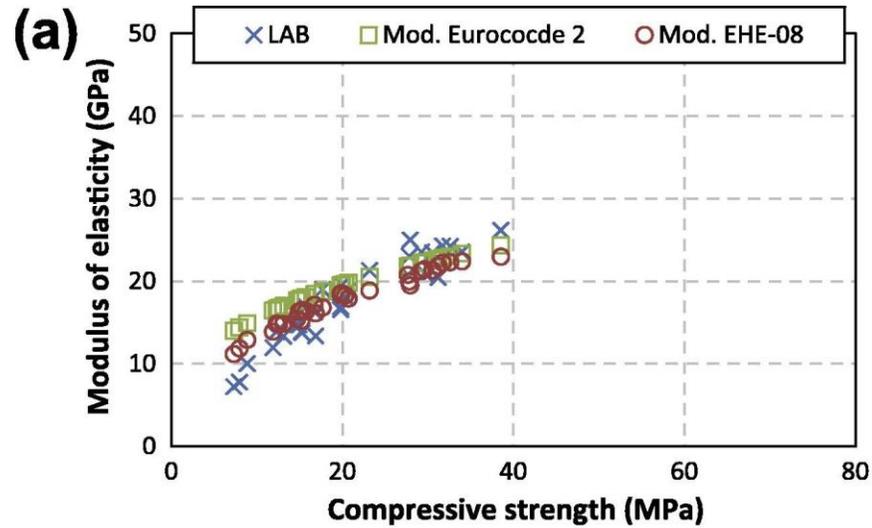


**Tendência se superestimação dos valores**

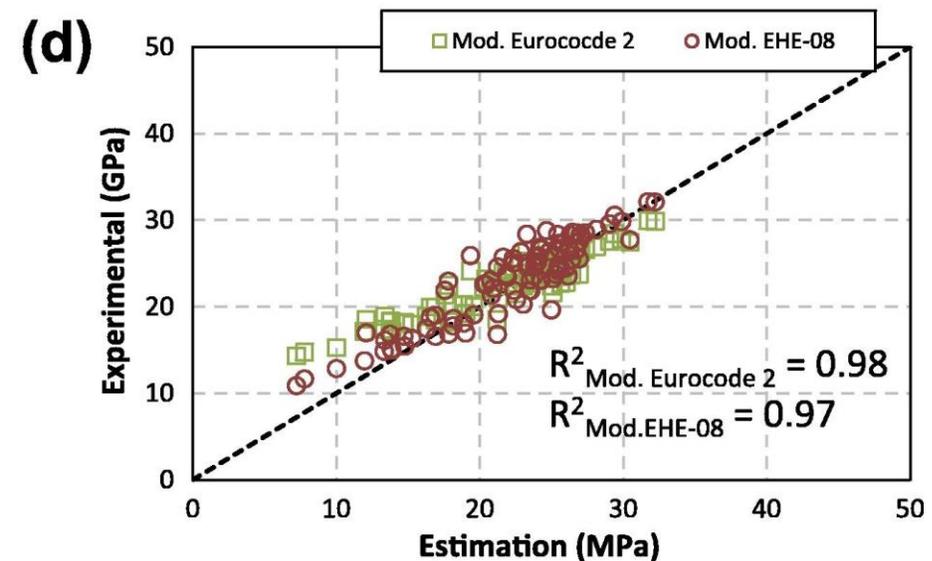
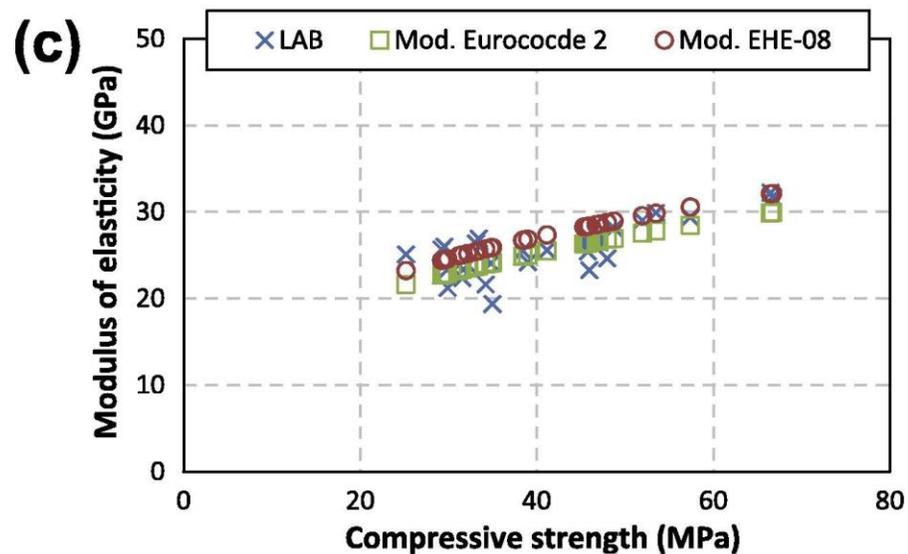
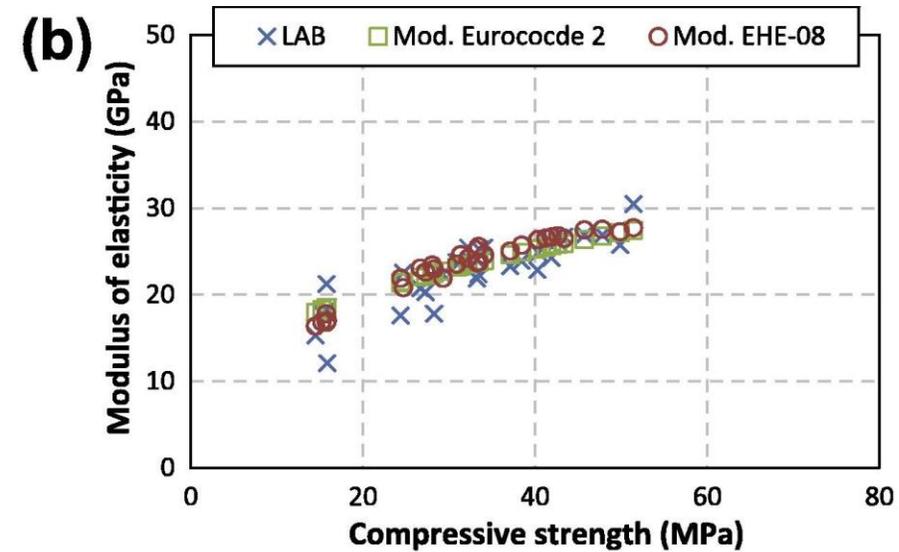
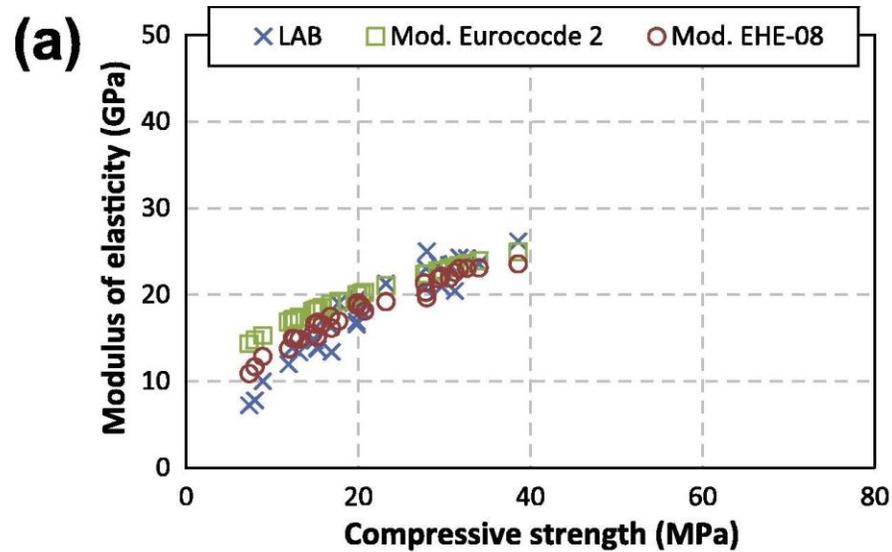
O erro das estimativas sempre superestima o valor de E do concreto projetado



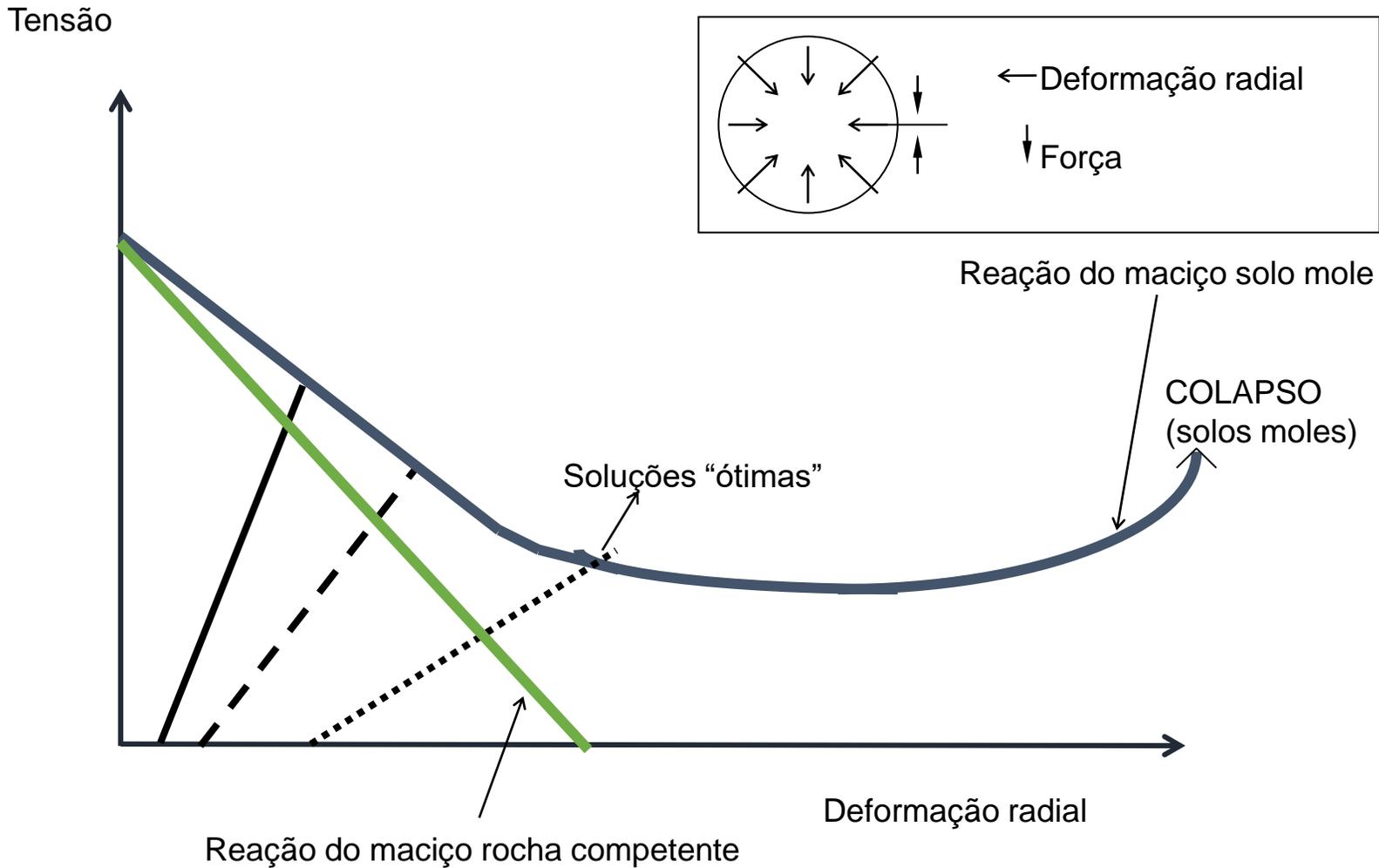
# Aplicando fatores de correção empíricos



# Modelo de correção semi-analítico (lei das misturas)

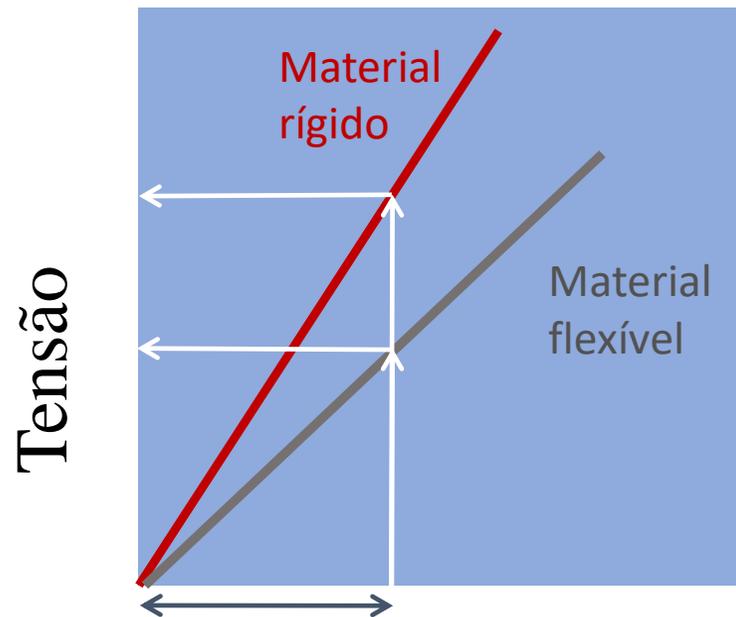


# Modelo (NATM)



# A importância do Módulo de elasticidade

- Considerando que  $E$  do concreto projetado é superestimado, deve-se avaliar as condições de tensão e fissuração dos projetos com mais cuidado.



Dada uma deformação imposta à estrutura: teremos um “nível de solicitação” distinto à medida de sua rigidez

Conclusão:

**Concreto projetado**  
**≠**  
**concreto convencional**