



# Formulação de concreto

PCC 3222  
2023

# Objetivos

- Discutir princípios da formulação de concretos e quais parâmetros estão envolvidos
- Discutir como formular concretos mais eficientes com menor custo, menor desperdício de materiais e menor impacto ambiental

**Concreto é aplicado em diferentes tipos de obra e classes de resistência...**







MuCEM: Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée, Marseille, France  
Casca em UHPC



# Ponte Zhuhai-Macau-Hong Kong: 55 km sobre o mar (maior do mundo)



Ponte Zhuhai-Macau-Hong Kong: 55 km sobre o mar (maior do mundo)



**...para diferentes condições reológicas...**



**Seco: meio-fio extrusado**



**Seco: blocos vibro-prensados**



**Seco: piso drenante**

Plástico





**Fluido: autoadensável**



**Fluido: piso autonivelante industrial**

**...produzido com diferentes tecnologias...**





**Concreto feito assim**

**Na enxada**

**Não é tão difícil!!!**

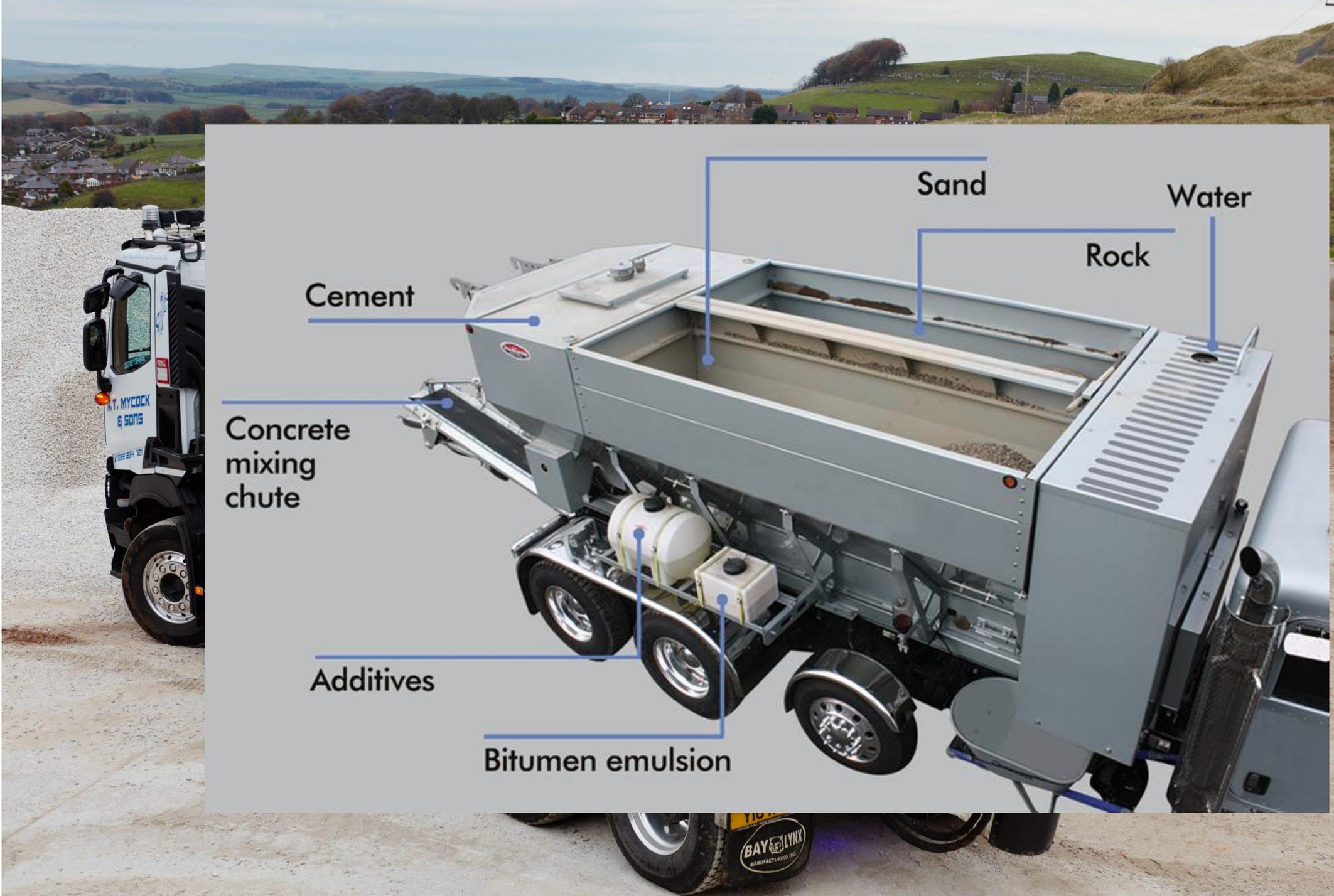


# Misturador planetário









Cement

Sand

Water

Rock

Concrete  
mixing  
chute

Additives

Bitumen emulsion

**# E como medir a eficiência dos concretos dosados?**

# Indicador de eficiência

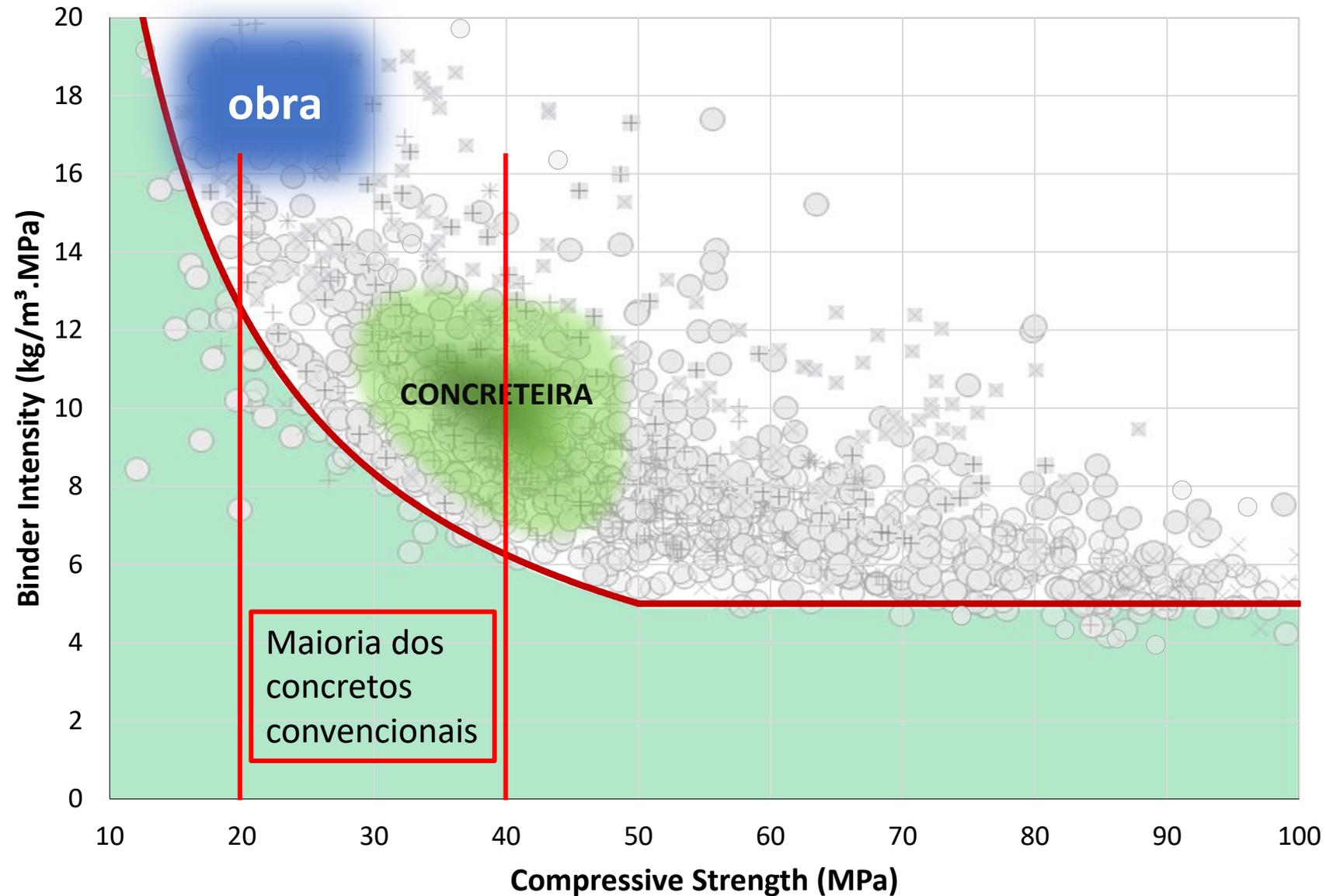
Intensidade de ligante (*binder intensity* – BI)

$$BI = \frac{B}{P} = \frac{C}{fc_j}$$

Consumo kg de ligantes por m<sup>3</sup>

Resistência à compressão em j dias

# Indicadores de eficiência



A tecnologia empregada afeta a eficiência da dosagem!

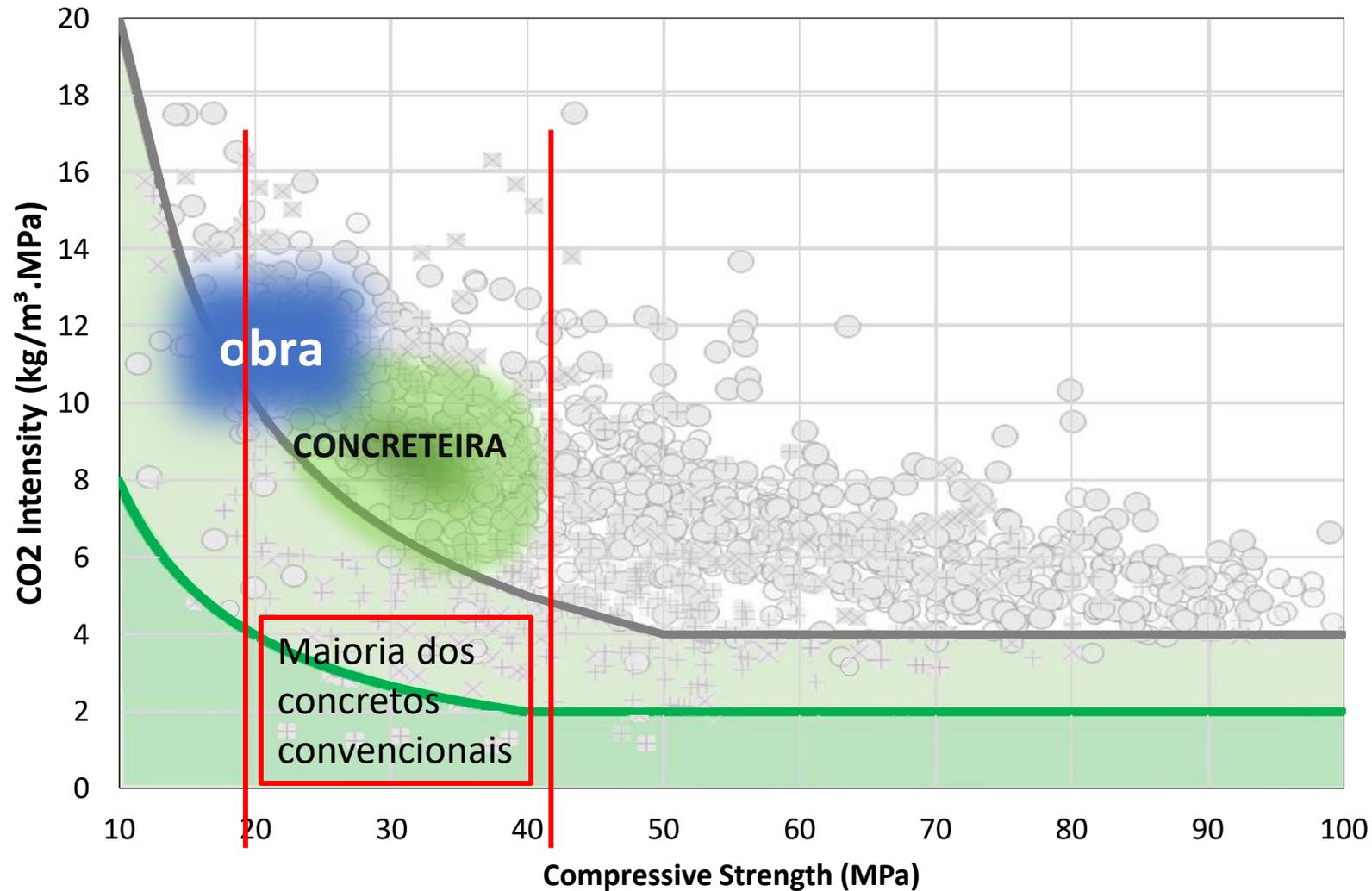
# Indicador ambiental

Intensidade de CO<sub>2</sub> – CI (*carbon intensity*)

$$CI = \frac{CO_2}{fcj}$$

→ Emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup>  
→ Resistência à compressão

# Indicador ambiental



A tecnologia empregada afeta a eficiência da dosagem!

# Afinal, o que é dosar?

Dosar [verbo transitivo direto] /do'zar/:

1. Dividir (algo) em doses; estabelecer a proporção da dose de
2. Ministras, utilizar ou misturar na proporção certa ou apropriada

**Dosagem é um processo de tomada de decisão!**

As decisões tomadas geram consequências de:

- Desempenho
- Custo
- Processo produtivo
- Impacto ambiental

# Métodos prescritivos

- Experiências passadas
- “cartilhas”
- Ignoram variações de propriedades dos materiais
- Margens de segurança elevada diminuem eficiência e aumentam o custo e impacto ambiental

**SISTEMA 1**  
RADIOLAS NORMAIS TRADICIONAIS  
BOCA CONSTANTE = 45,0 x 35,0 cm (por dentro)  
FUNDO CONSTANTE = 45,0 x 35,0 cm (por dentro)  
PROCURE AS ALTURAS NAS COLUNAS ABAIXO

**Calculador CALDAS BRANCO**  
PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL.

PARA RESOLUÇÃO DE TRAÇOS DE CONCRETO E ORIENTAÇÃO TECNO-PROFISSIONAL NAS DOSAGENS EM "PESO" OU VOLUME, AGORA TAMBÉM SOB A FORMA DE NOVISSIMA TABELA INTEGRADA.



TRAÇOS EM VOLUME	ALTURAS EM CENTÍMETROS			NÚMERO DE VIAGENS POR TRAZO DE 1 SACO DE CIMENTO			FATORES DE CÁLCULO			RENDIMENTOS POR SACO LITROS	CONSUMO POR m³ DE CONCRETO FRESCO					RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PROVADEIS kg/cm²			TRAÇOS EM "PESO" CORRESPONDENTES	Nº DE ORDEM NO PROGRAMA DE ESTUDOS			
	AREIA cm	BRITA Nº1 cm	BRITA Nº2 cm	AREIA Nº1	BRITA Nº2	BRITA Nº3	CIMENTO				AREIA		BRITAS		ÁGUA Litros	3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS					
							LITRO	kg	LITRO		SÉCA Litros	UMIDA 3% Litros	Nº 1 Litros	Nº 2 Litros									
1: 1 : 2	28,7	22,4	22,4	1	1	1	0,44	2,27	22,0	97,2	514	10,3	363	363	465	363	363	226	228	300	400	1,08 : 1,96	TRAÇO Nº 1
1: 1 ½ : 3	21,5	33,6	33,6	2	1	1	0,49	2,04	24,5	129,2	387	7,7	273	409	524	409	409	189	188	254	350	1,65 : 2,94	TRAÇO Nº 2
1: 2 : 2 ½	28,7	28,1	28,1	2	1	1	0,55	1,82	27,5	133,2	374	7,5	264	528	676	330	330	206	148	208	298	2,17 : 2,44	TRAÇO Nº 3
1: 2 : 3	28,7	33,6	33,6	2	1	1	0,61	1,64	30,5	145,5	344	6,9	243	486	622	364	364	210	117	172	254	2,17 : 2,94	TRAÇO Nº 4
1: 2 ½ : 3	23,9	33,6	33,6	3	1	1	0,65	1,54	32,5	157,9	319	6,4	225	562	719	337	337	207	100	150	228	2,71 : 2,94	TRAÇO Nº 5
1: 2 : 4	28,7	22,4	22,4	2	2	2	0,68	1,47	34,0	168,3	297	5,94	210	420	538	420	420	202	90	137	210	2,17 : 3,92	TRAÇO Nº 6
1: 2 ½ : 3 ½	23,9	19,6	19,6	3	2	2	0,71	1,41	35,5	170,6	293	5,86	207	517	662	362	362	208	80	123	195	2,71 : 3,42	TRAÇO Nº 7
1: 2 ½ : 4	23,9	22,4	22,4	3	2	2	0,73	1,37	36,5	181,2	276	5,5	195	487	623	390	390	201	74	114	185	2,71 : 3,92	TRAÇO Nº 8
1: 2 ½ : 5	23,9	28,0	28,0	3	2	2	0,79	1,27	39,5	203,3	246	4,9	174	435	557	435	435	195	58	94	157	2,71 : 4,89	TRAÇO Nº 9
1: 3 : 5	28,7	28,0	28,0	3	2	2	0,88	1,14	44,0	218,1	229	4,6	162	486	622	405	405	202	40	70	124	3,25 : 4,89	TRAÇO Nº 10
1: 3 : 6	28,7	33,6	33,6	3	2	2	0,95	1,05	47,5	240,9	208	4,2	147	441	564	441	441	198	30	54	100	3,25 : 5,87	TRAÇO Nº 11
1: 4 : 8	28,7	29,9	29,9	4	3	3	1,20	0,83	60,0	312,5	161	3,2	114	456	584	456	456	194	NÃO	NÃO	NÃO	4,34 : 7,83	TRAÇO Nº 12

**SISTEMA 2**  
CAIXAS TRAPEZOIDAIS PARA FIXAÇÃO SOBRE CHASSIS DE CARRINHOS  
BOCA CONSTANTE = 55,0 x 35,0 cm (por dentro)  
FUNDO CONSTANTE = 35,0 x 35,0 cm (por dentro)  
PROCURE AS ALTURAS NAS COLUNAS ACIMA

DIREITOS AUTORAIS RESERVADOS  
SÓ É AUTÊNTICO O CALCULADOR - TABELA IMPRESSO EM PAPEL ESPECIAL DE COR AMARELA; TODAS AS CÓPIAS OU REPRODUÇÕES POR QUALQUER SISTEMA INCLUSIVE XEROX ESTÃO SUJEITAS ÀS PENAS DA LEI.

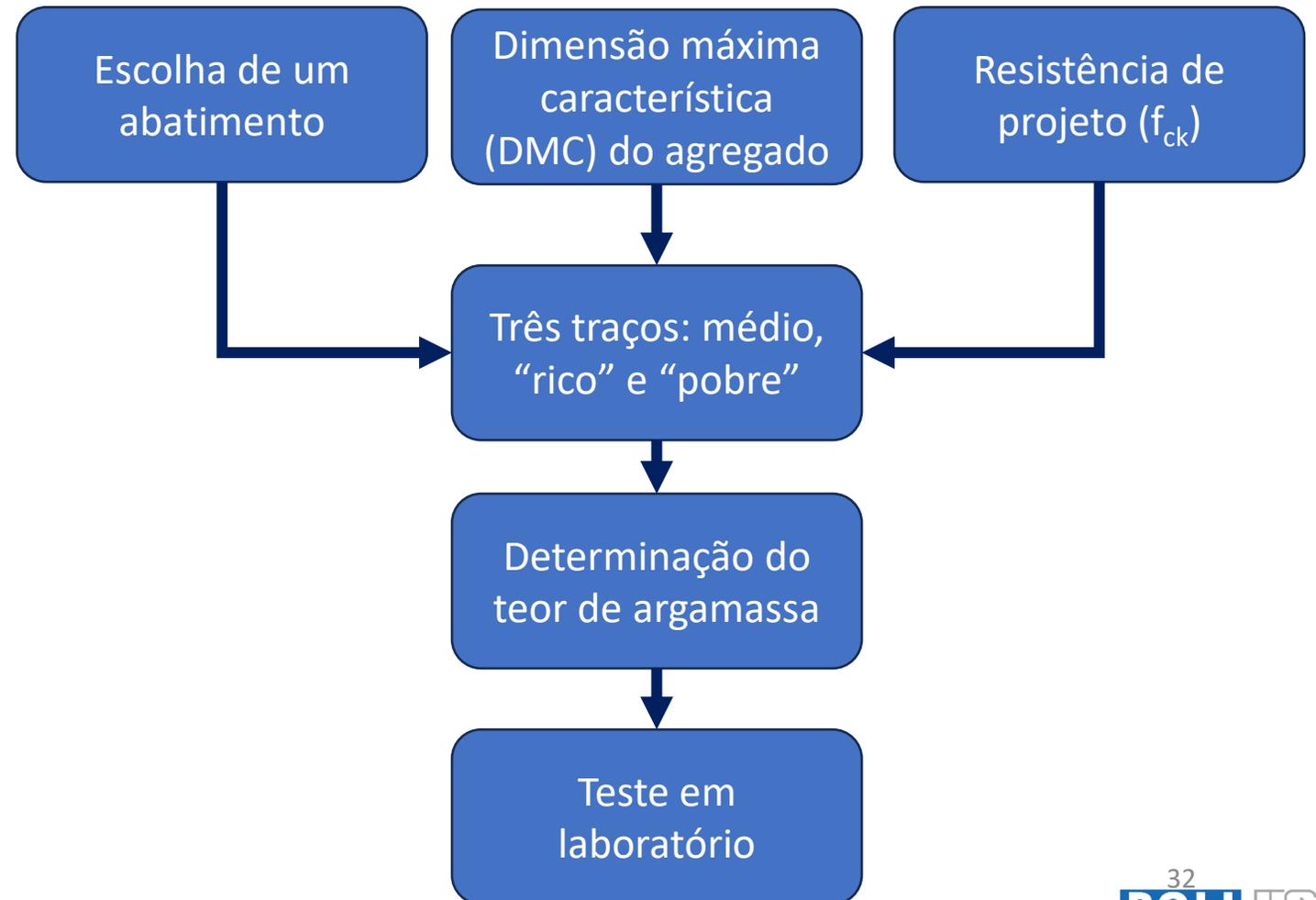
PROJETADO E REALIZADO PELO ENGENHEIRO CIVIL  
Abílio de Azevedo Caldas Branco  
CART. PROF. Nº 190 - D. C. R. C. A. - S. R. I.  
RUA MÉDICO, 111 - 5º - SALA 502  
AV. ATULÍDU DE PAIVA, 1827 AP. 801

CONSTRUA PARA A POSTERIDADE.  EM CONCRETO, O TEMPO É JUIZ!

RIO DE JANEIRO, GB - JANEIRO DE 1974

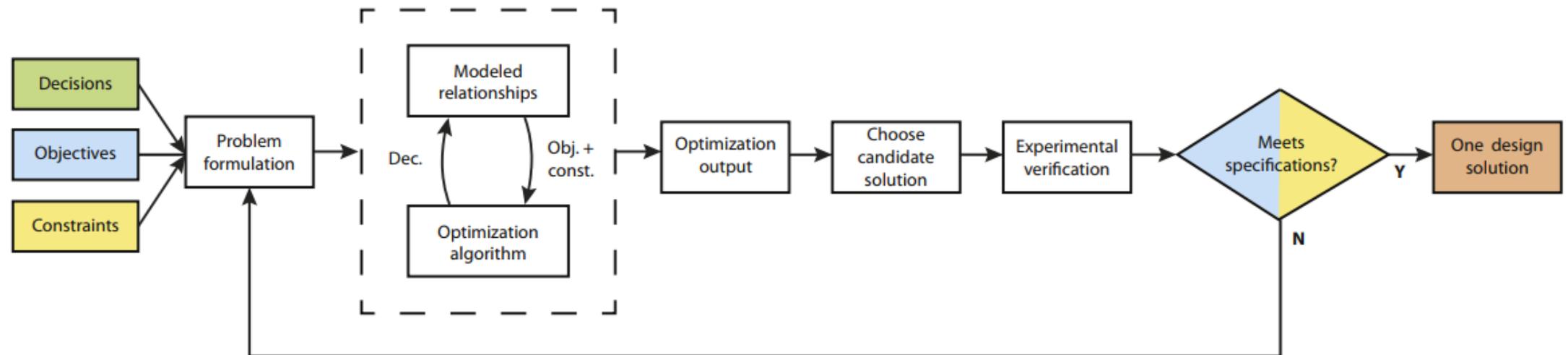
# Métodos experimentais

- Montagem de um plano experimental
- Teste das formulações
- Seleção da formulação de maior desempenho
- Método IPT/EP USP



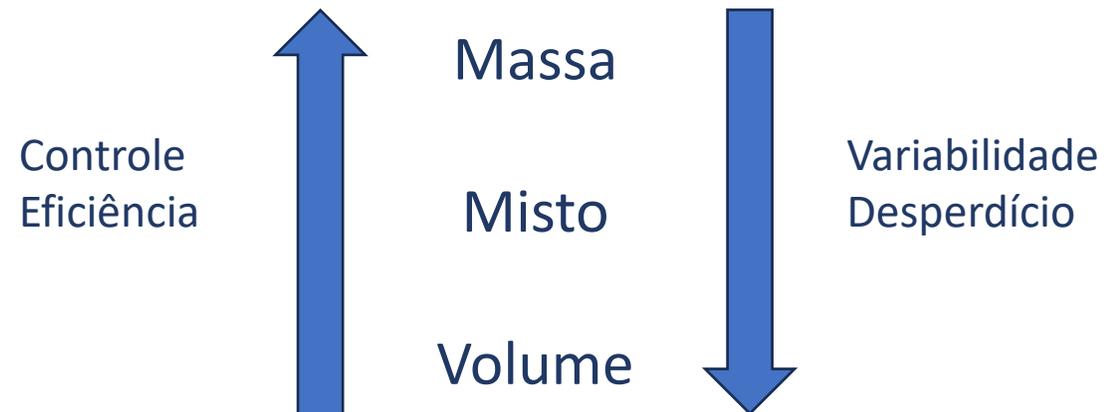
# Otimização computacional

- Definição de decisões, objetivos e restrições
- Aplicação no modelo
- Seleção de formulação candidata
- Teste da formulação

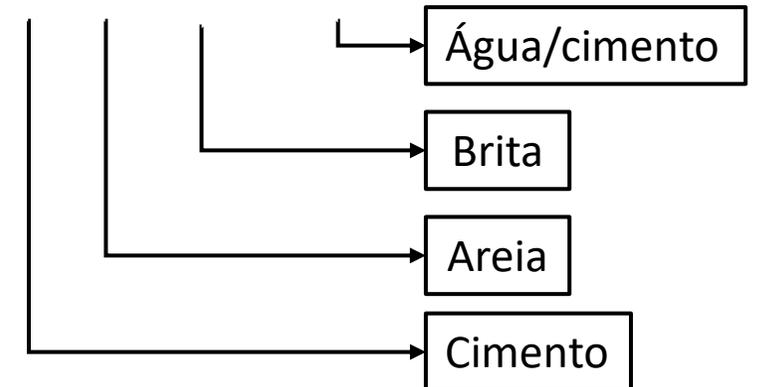


# Como ler um traço

Existem três formas de se apresentar uma formulação, baseada na forma de medir/pesar os componentes:



1: 2: 3: 0,5



# Como um traço pode ser lido?

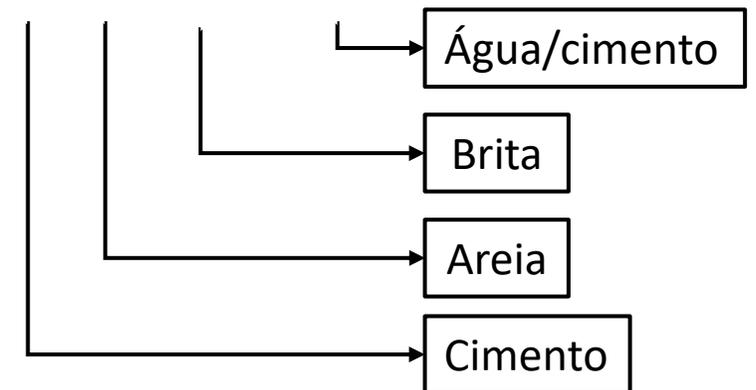
Traço em massa:

Os valores são normalizados pela massa de cimento

$$\frac{m_{\text{cimento}}}{m_{\text{cimento}}} : \frac{m_{\text{areia}}}{m_{\text{cimento}}} : \frac{m_{\text{brita}}}{m_{\text{cimento}}} : \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{cimento}}}$$

Maior controle, menor desvio padrão na produção

1: 2: 3: 0,5



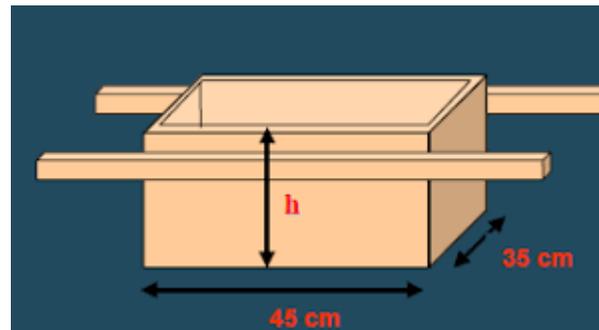
# Como um traço pode ser lido?

Traço misto:

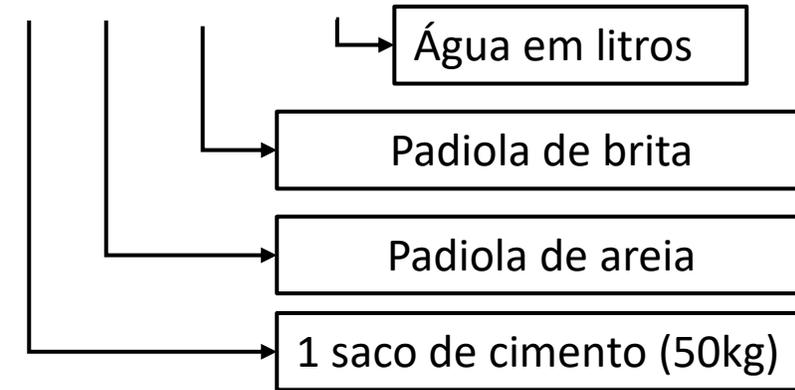
Cimento em massa, demais componentes em volume



Padiola: h ajustável ao volume para quantidades inteiras



$1: p_a: p_b: l_a$

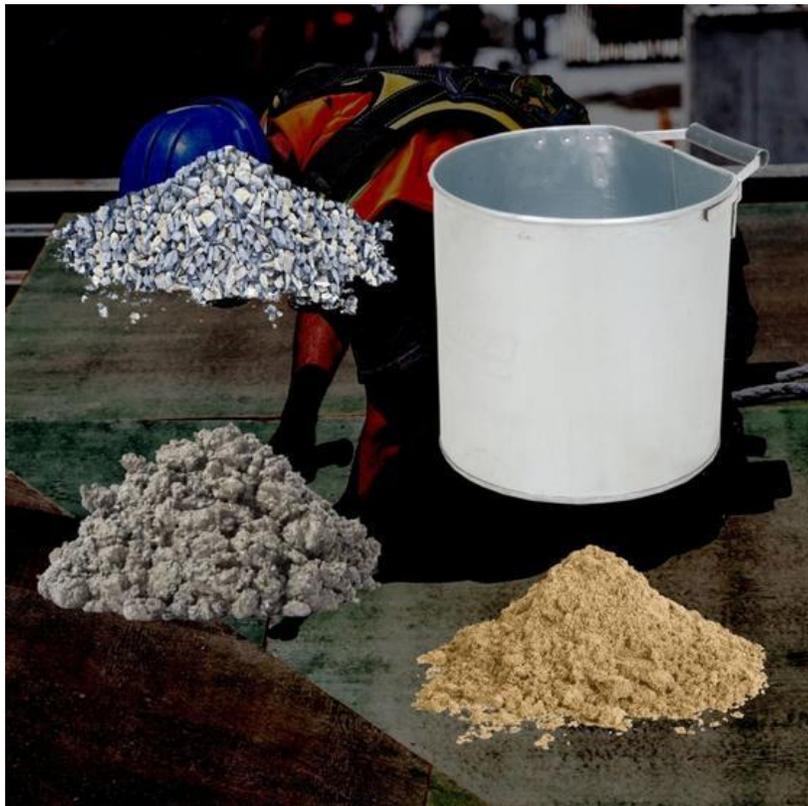


Calcular volumes usando massa unitária!

# Como um traço pode ser lido?

Traço em volume:

Utilizado para menores volumes, todos medidos pelo mesmo recipiente



Calcular volumes usando massa unitária!

# Efeito do controle na pesagem do materiais

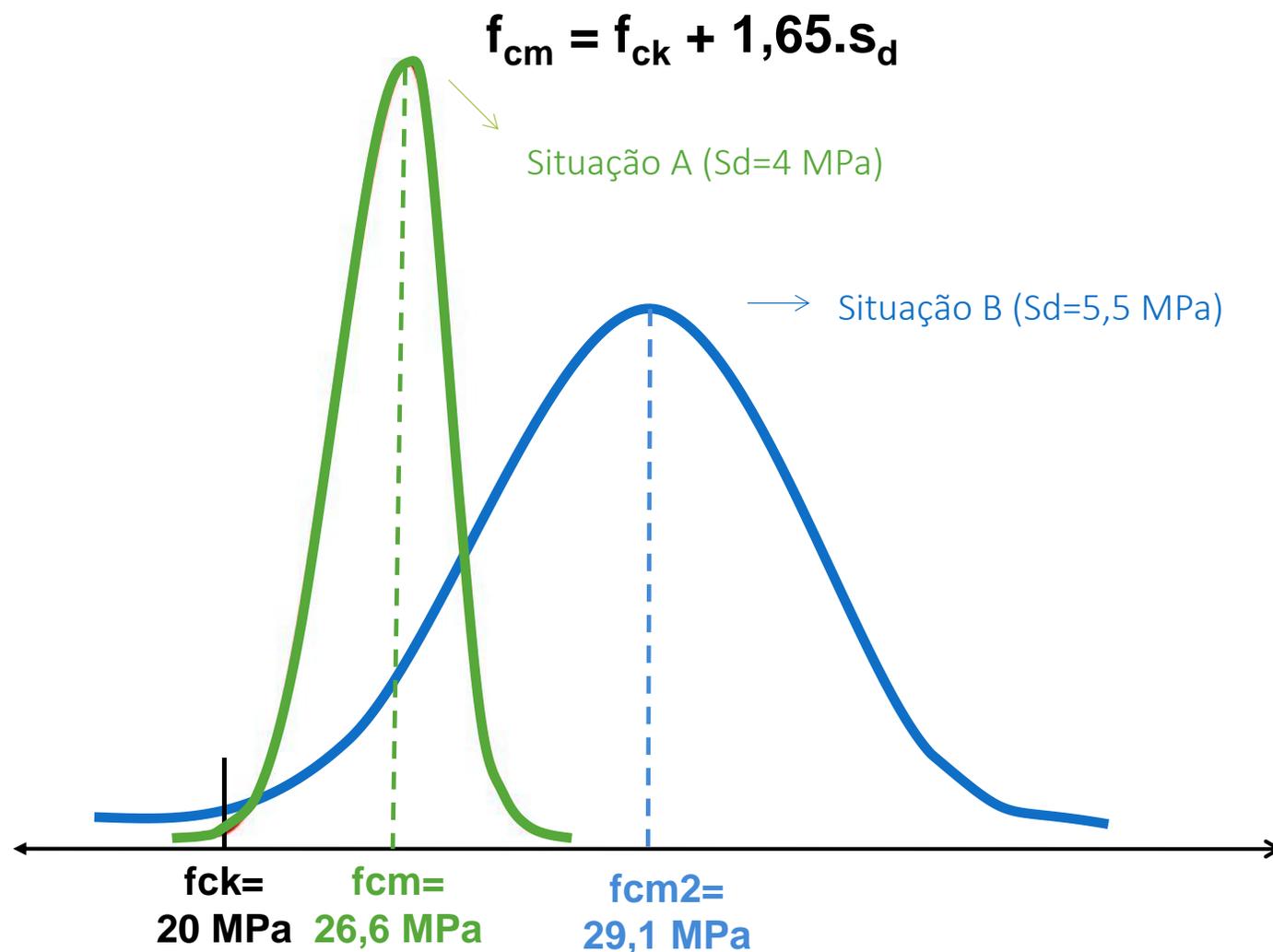
Menos controle gera mais variabilidade

ABNT NBR 12655: 2022

**Tabela 7 – Desvio-padrão a ser adotado em função de condição de preparo do concreto**

<b>Condição de preparo do concreto</b>	<b>Desvio-padrão MPa</b>
A	4,0
B	5,5
C	7,0

# Duas resistências médias mesmo $f_{ck_{28}}$



Qual formulação vai demandar mais cimento?

# Apresentação de formulação

A formulação pode ser convertida para a tabela de consumos e vice-versa

Tabela de consumos

Formulação	Quantidade de material (kg/m <sup>3</sup> )						Teor de Aditivo <sup>1</sup>
	Cimento	Brita 19mm	Brita 9.5mm	Areia Natural	Areia Britada	Água	
form1_b1_90_20	204	921	189	974	391	174	0,75%
form1_b1_90_25	233	930	191	954	374	174	0,75%
form1_b1_90_30	267	938	192	432	356	175	0,75%

Dissertação Mariana Menezes, 2020

1: 4,77 : 1,92 : 0,93 : 4,51 : 0,85 : 0,75%

Tamanho dos grãos

Calcular volumes usando densidade dos grãos (real)!

# Exercício 1 – Entrega no Moodle

- Para o traço unitário especificado a seguir, defina o consumo de materiais para produzir 1 m<sup>3</sup> de concreto e o BI para uma resistência à compressão de 35 MPa ( $d_{\text{concreto}} = 2391 \text{ kg/m}^3$ )

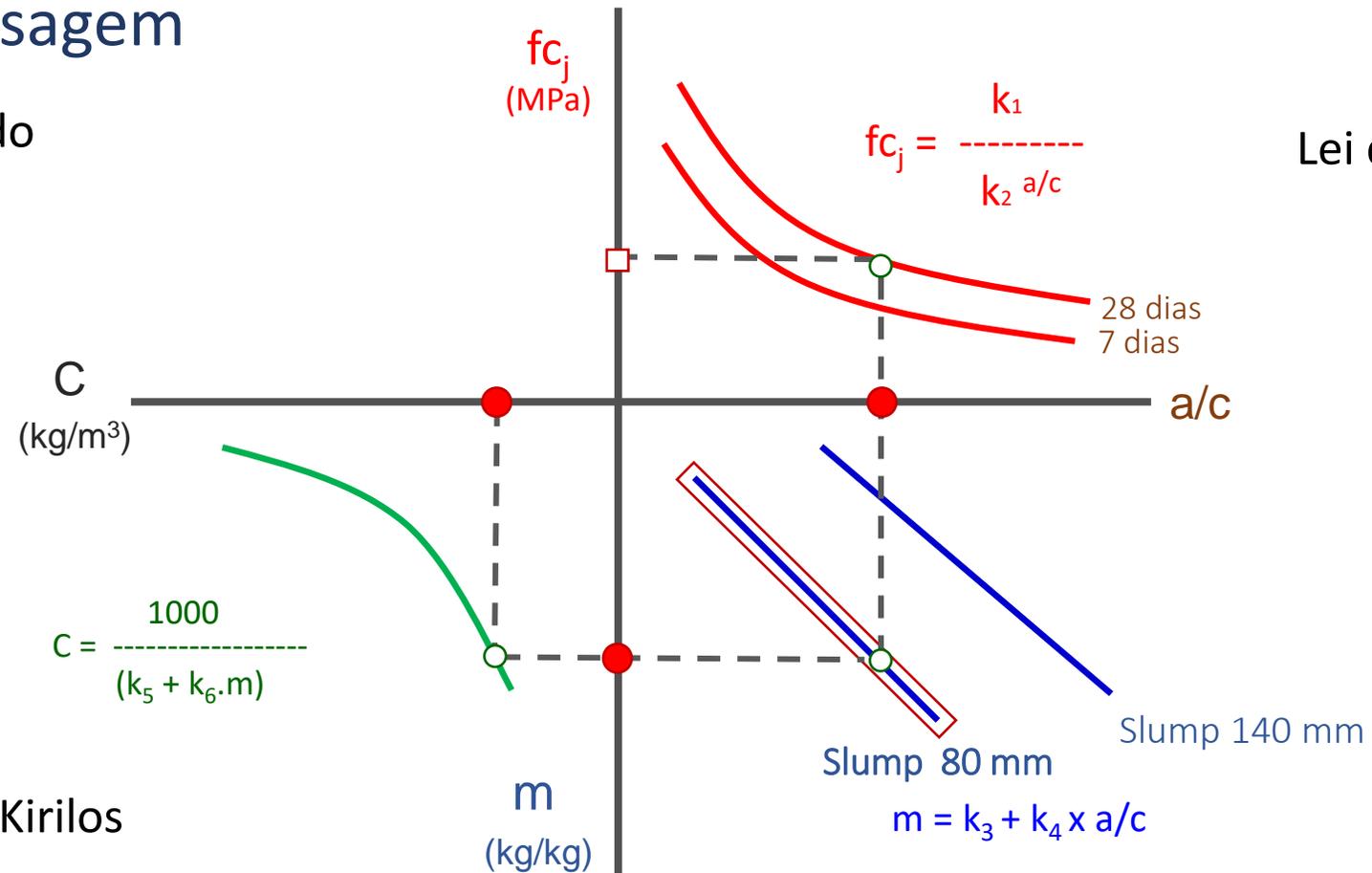
1: 1,25: 2,25: 0,45

Material	Densidade real (kg/dm <sup>3</sup> )
Cimento	3,1
Areia	2,66
Brita	2,7

# Diagrama de dosagem

## Diagrama de dosagem

- especificado
- resultado



Lei de Abrams

Lei de Priszkulnik e Kirilos

Lei de Lyse

# Diagrama de dosagem

## Diagrama de dosagem

- especificado
- resultado

Resistência à compressão em j dias

$f_{c_j}$   
(MPa)

$$f_{c_j} = \frac{k_1}{k_2 a/c}$$

Lei de Abrams

28 dias  
7 dias

Relação água/cimento

$a/c$

Consumo de cimento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C$   
( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 \cdot m)}$$

Lei de Priszkulnik e Kirilos

$m$   
( $\text{kg}/\text{kg}$ )

Slump 80 mm

$$m = k_3 + k_4 \times a/c$$

Slump 140 mm

Lei de Lyse

$\frac{\text{massa de agregados}}{\text{massa de cimento}}$

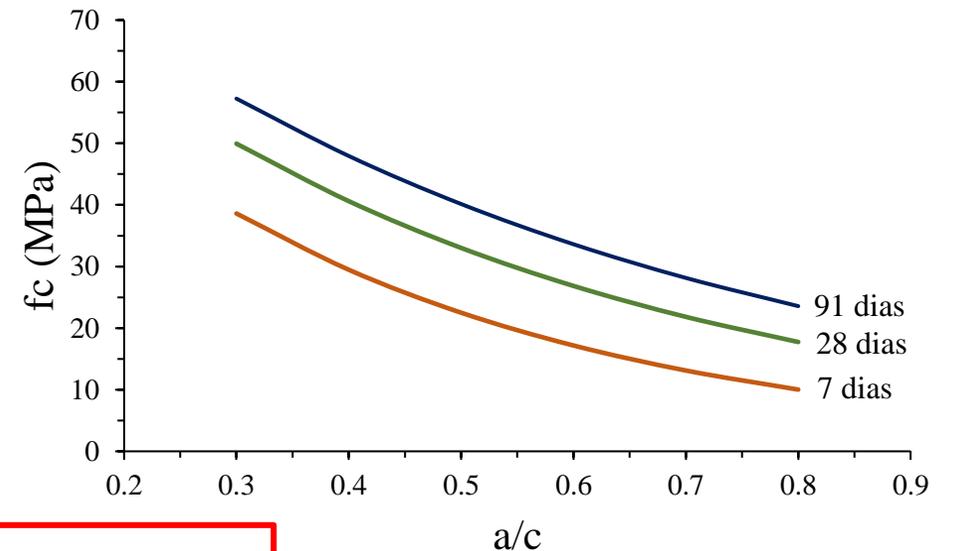
# Lei de Abrams

Lei de Abrams (1918): estabelecida empiricamente pela observação de + de 50.000 corpos de prova

$$f_{c_j} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$$

$k_1$  e  $k_2$  são constantes relativas ao material

A resistência é função da relação **água/cimento**



**Porosidade de pasta**

O quadrante da Lei de Abrams correlaciona resistência à compressão à relação água/cimento

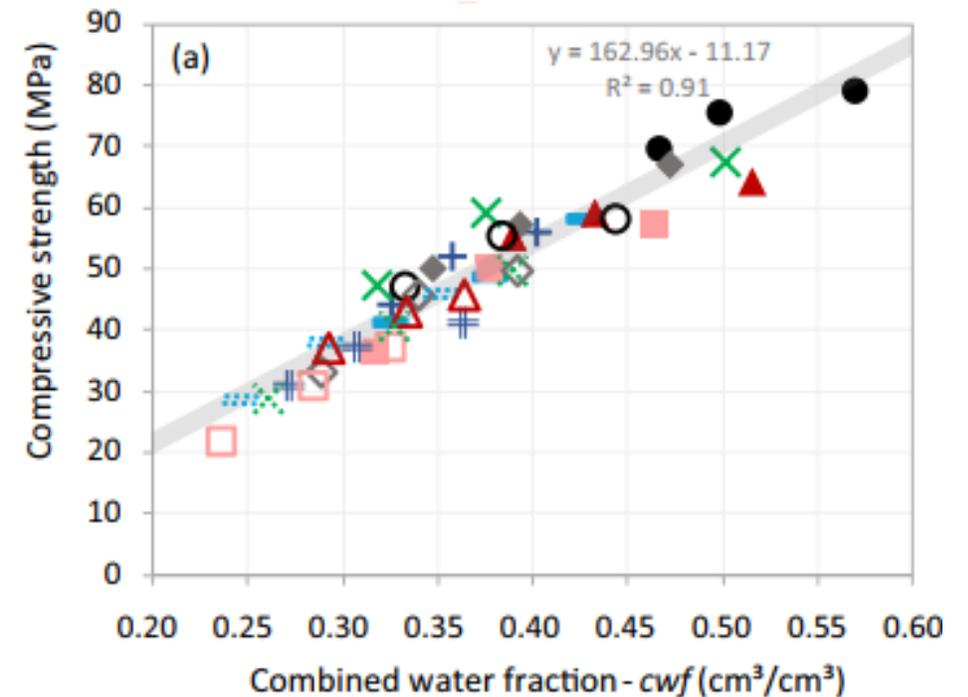
# Fração da água combinada

*cwf* (*combined water fraction*): fração da água mistura que se incorpora ao solado combinada

$$cwf = \frac{a_c}{a_m}$$

→ Água combinada  
→ Água de mistura

Todas idades representadas em uma reta.  
Característica do Cimento é dos agregados



Abrão *et al.* (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118546>

# Lei de Lyse

Lei de Lyse (1932):

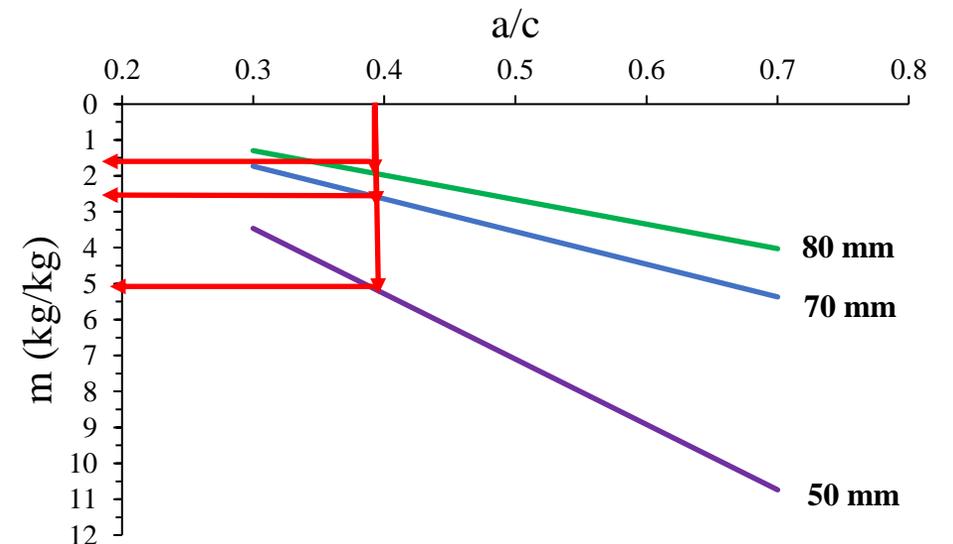
$$m = k_3 + k_4 \times a/c$$

m é a relação de agregados/cimento em massa seca

$k_3$  e  $k_4$  são constantes relativas ao material

Teor de pasta e argamassa:  
mobilidade do sistema

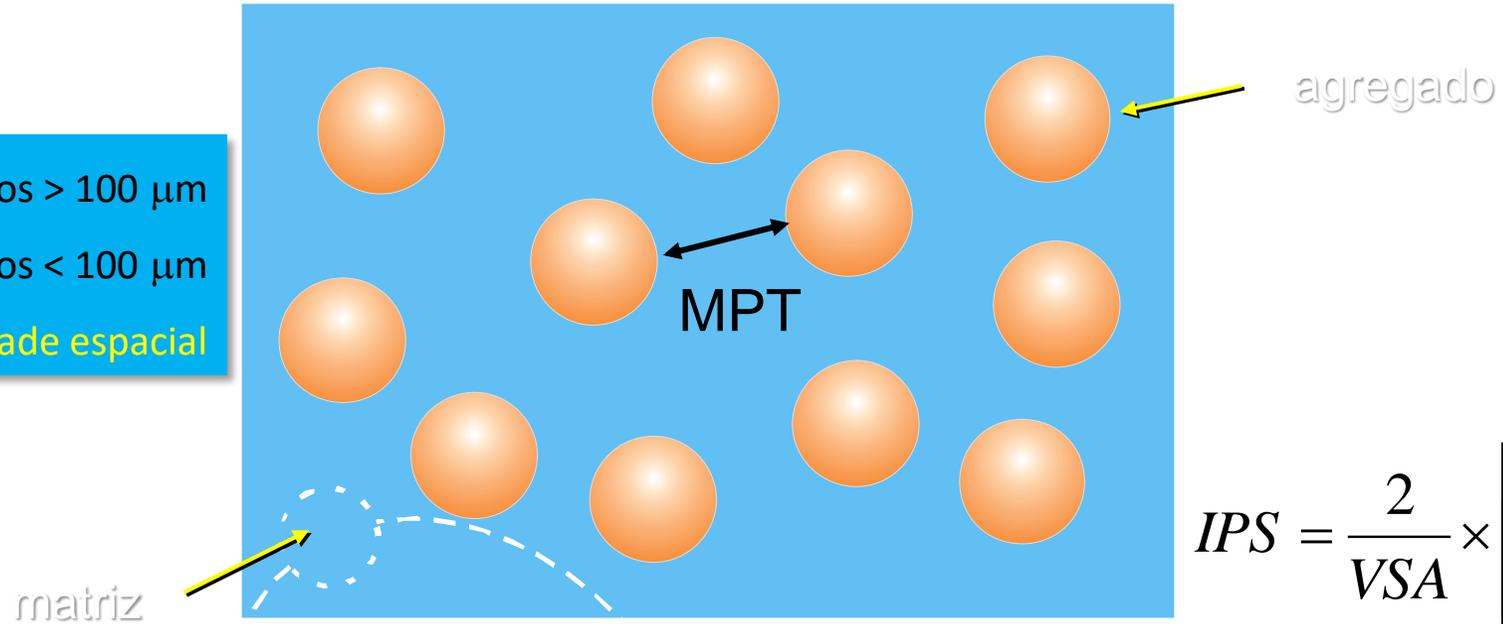
Este quadrante correlaciona a mobilidade, definida pelo volume de pasta e de argamassa com a relação a/c



MPT = distância entre agregados > 100 μm

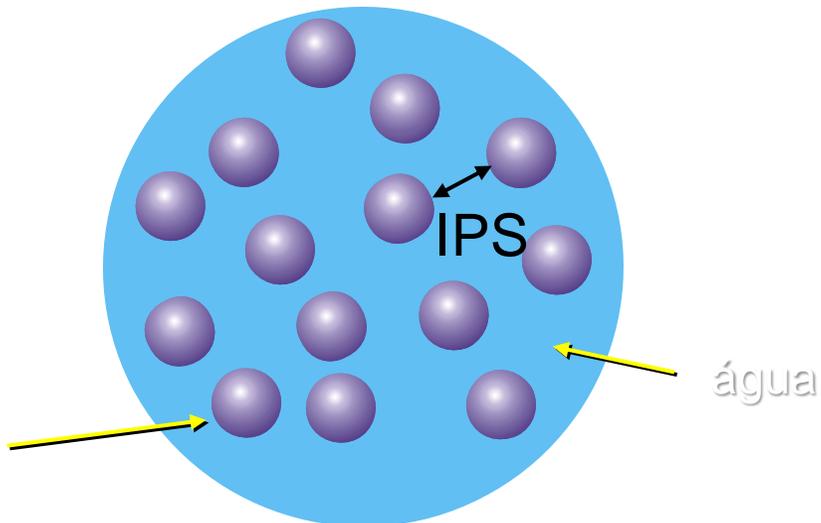
IPS = distância entre finos < 100 μm

IPS, MPT > 0 μm: continuidade espacial



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

Aplicável para a matriz (cimento, filer, água)



$$MPT = \frac{2}{VSA_g} \times \left[ \frac{1}{V_{sg}} - \left( \frac{1}{1 - P_{of_g}} \right) \right]$$

Aplicável para os agregados (areia e brita)

# Calculo do consumo de cimento

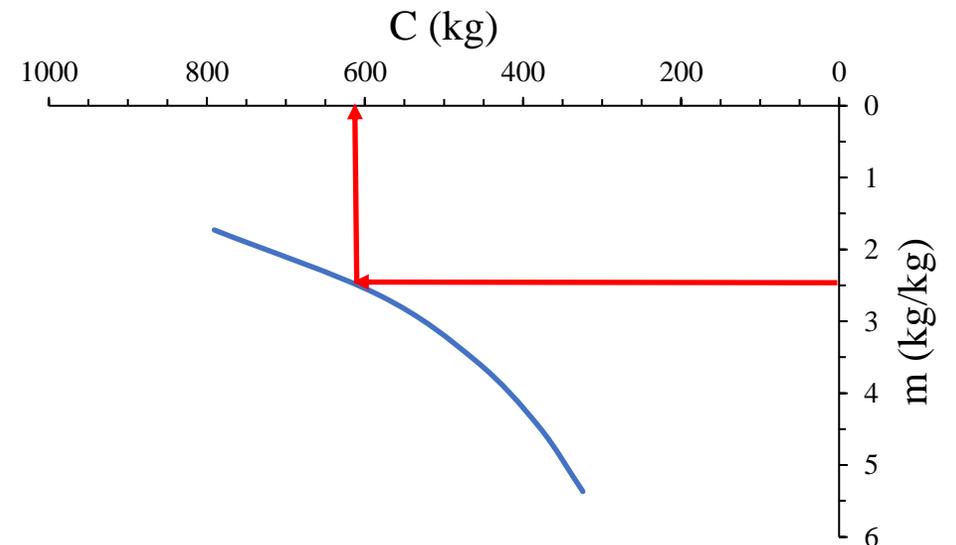
“Lei” de Prizskulnik & Kirilos (1974):

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \times m}$$

C é o consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto

k<sub>5</sub> e k<sub>6</sub> são constantes relativas ao material

Este quadrante correlaciona o teor de pasta e argamassa, que definem a mobilidade do sistema, com o consumo de cimento, principal responsável pela pegada de CO<sub>2</sub> do concreto





# Critérios para a dosagem?

# Seleção de materiais

Cimento e relação a/c - NBR 12655:2022

Tabela 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto $\text{kg/m}^3$	CA e CP	$\geq 260$	$\geq 280$	$\geq 320$	$\geq 360$
CA	Componentes e elementos estruturais de concreto armado.				
CP	Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.				

# Seleção de materiais

## Agregados

O tamanho máximo do agregado deve ser compatível com as distâncias entre as armaduras

## Recomendação NBR 6118:2013

“A dimensão máxima do agregado graúdo não pode superar em 20% a espessura nominal do cobrimento”

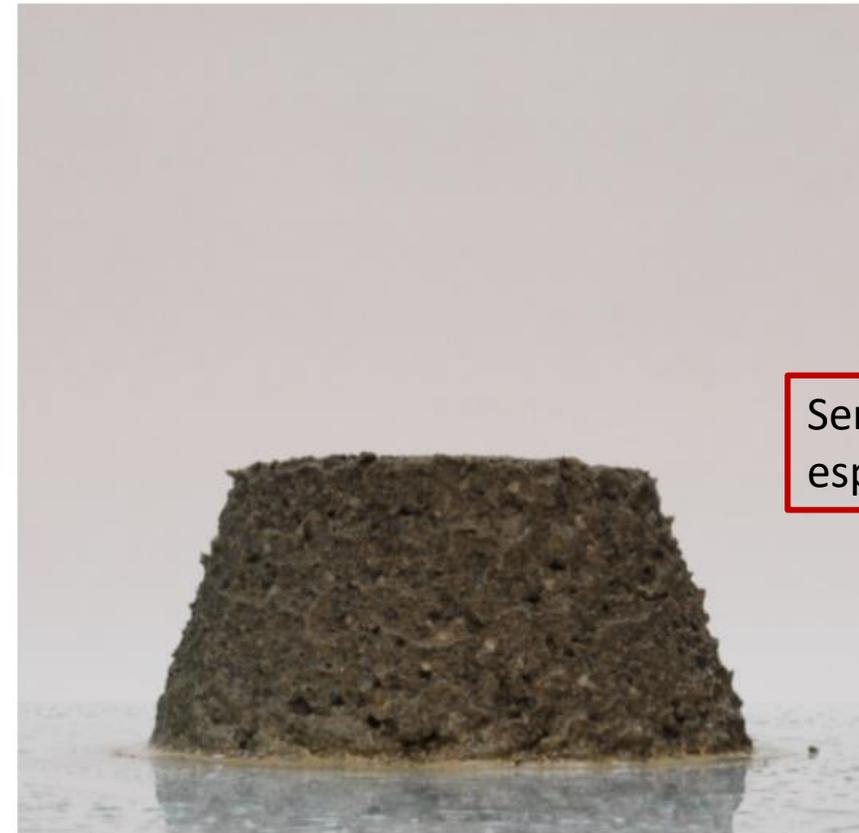
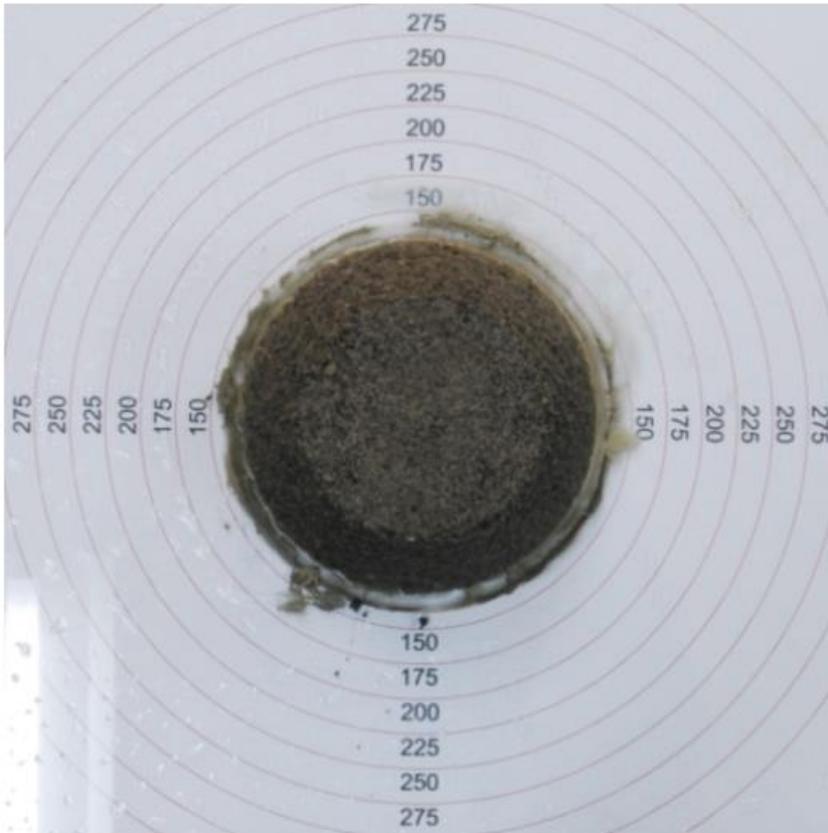
$$d_{m\acute{a}x} \leq 1,2c_{nom}$$



**# Que tipos de consequência podem ser observadas quando a dosagem dos materiais cimentícios não é feita de forma correta?**

# Erros de formulação

- Baixo teor de pasta

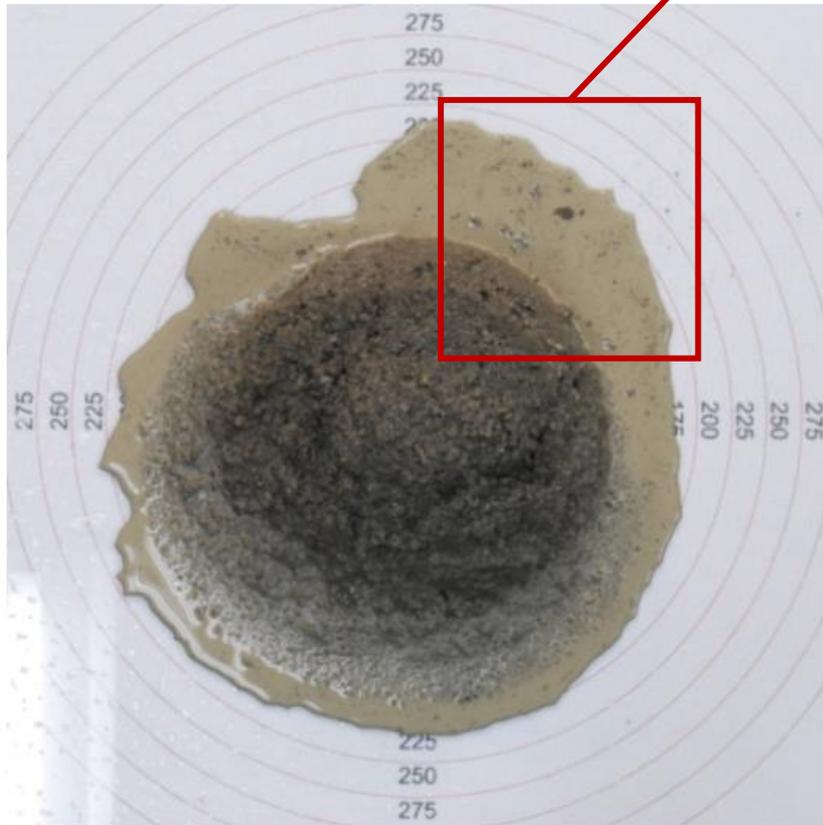


Sem continuidade espacial

# Erros de formulação

- Baixo teor de cimento

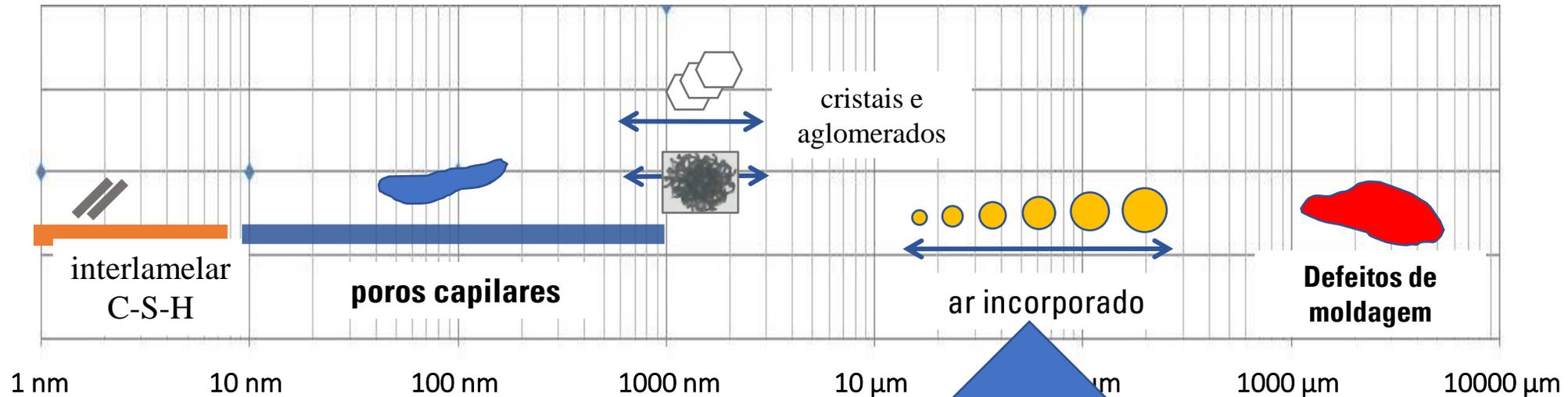
Pasta muito fluida,  
separação de fases



# Ar incorporado



# Ar incorporado



O concreto incorpora ar durante as etapas de mistura, transporte e adensamento

Volume considerado entre 2 e 3%

**# E como os concretos devem ser formulados para atender aos mesmos requisitos com menor impacto ambiental e maior eficiência?**

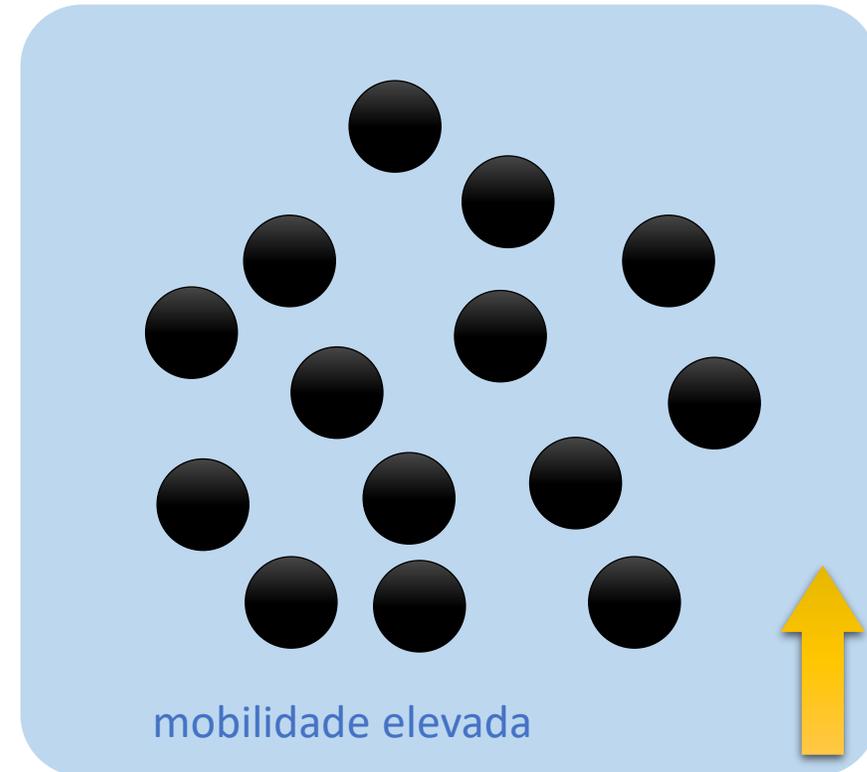
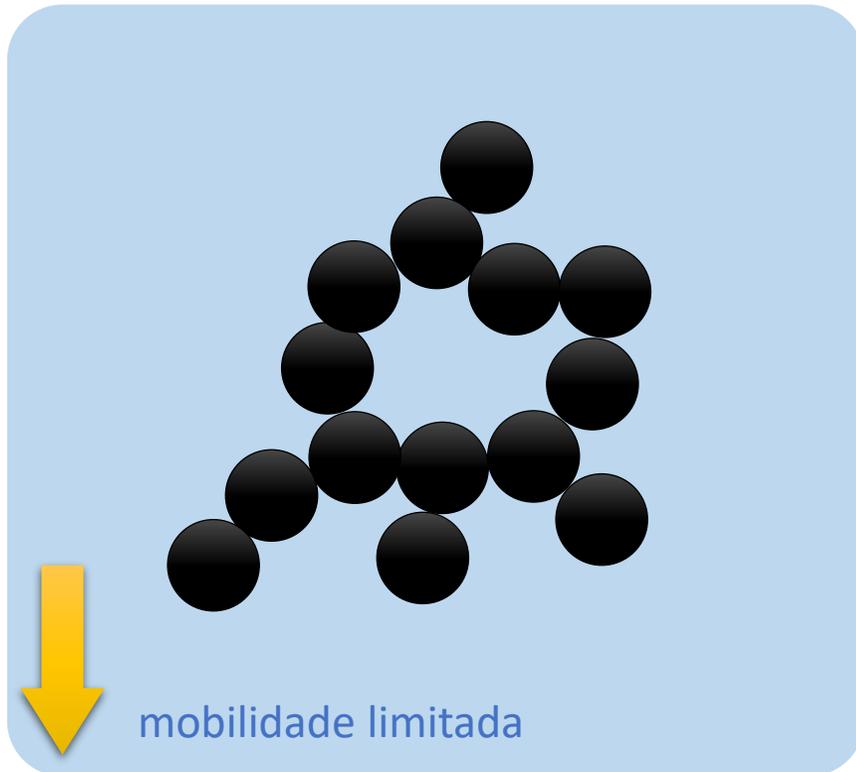
# Abordagem LME – Poli USP

HiFloW – High Filler, Low Water

- Uso de aditivos dispersantes para redução do teor de água
- Otimização granulométrica para reduzir teor de pasta (empacotamento)
- Substituição de cimento por outros materiais (fíleres, escórias, pozolanas)

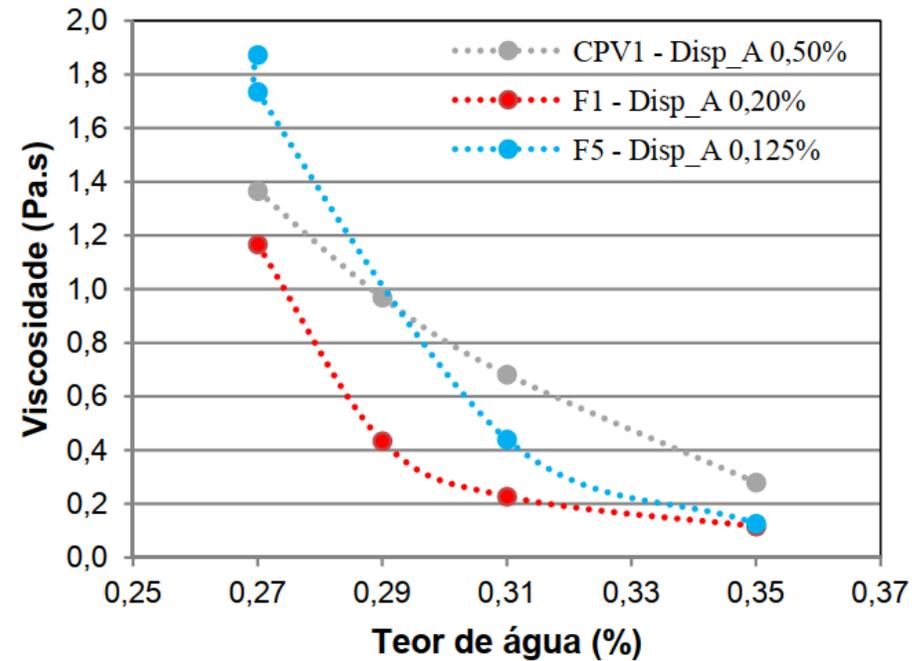
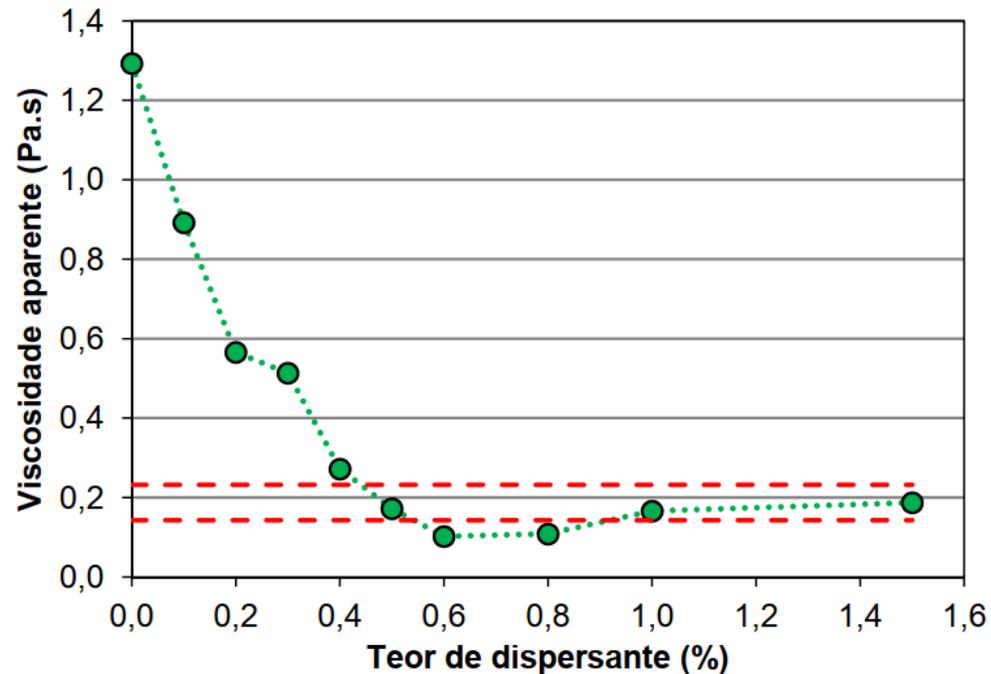
# Abordagem LME – Poli USP

- Uso de aditivos dispersantes para redução do teor de água



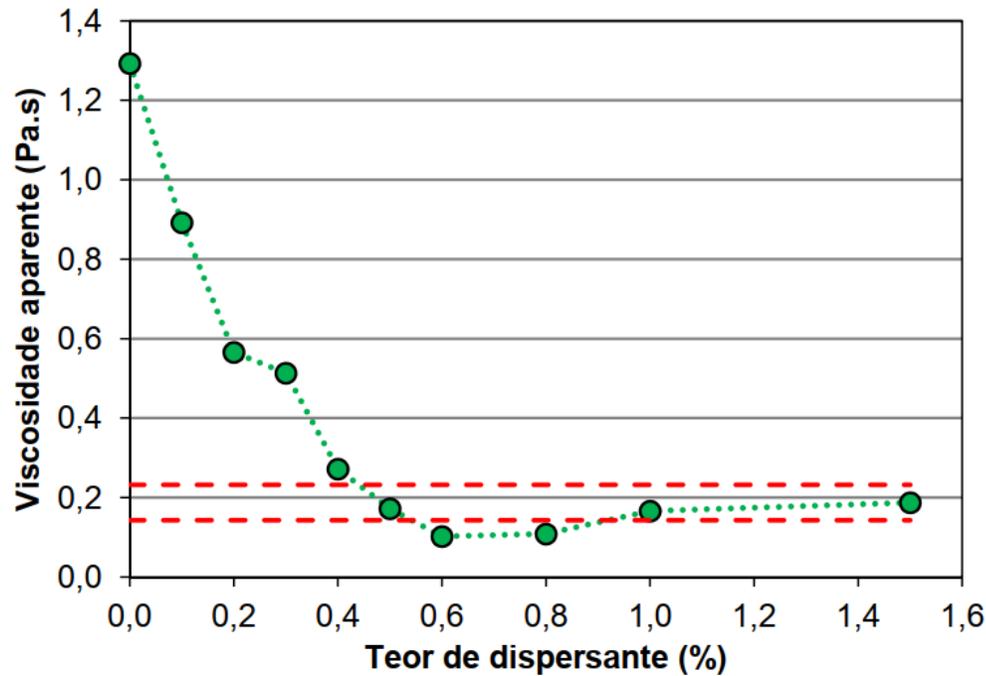
# Abordagem LME – Poli USP

- Uso de aditivos dispersantes para redução do teor de água

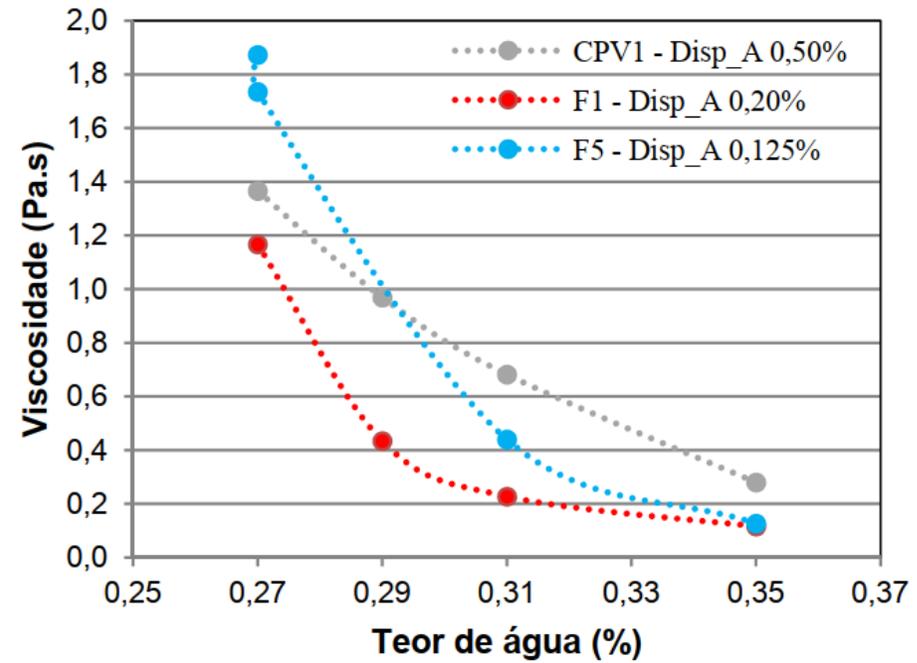


# Abordagem LME – Poli USP

- Uso de aditivos dispersantes para redução do teor de água



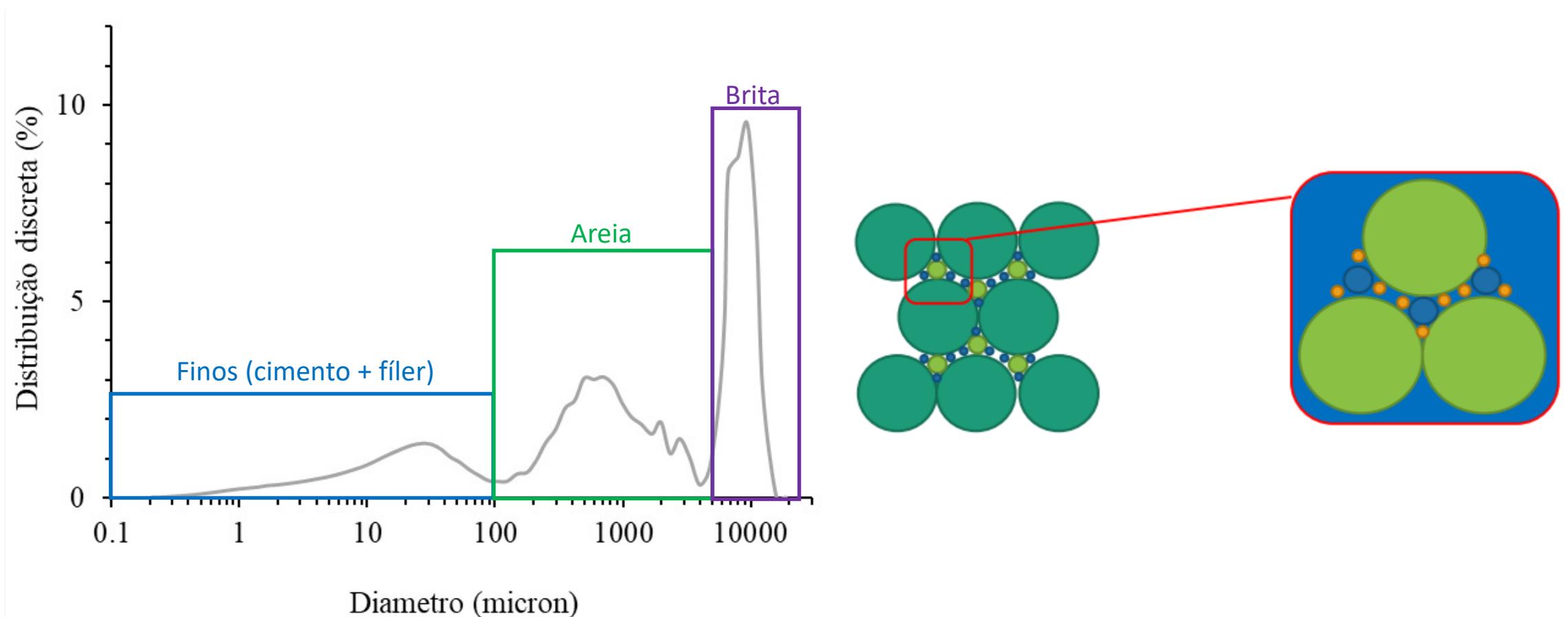
+ aditivo  
- propriedades reológicas



- teor de água

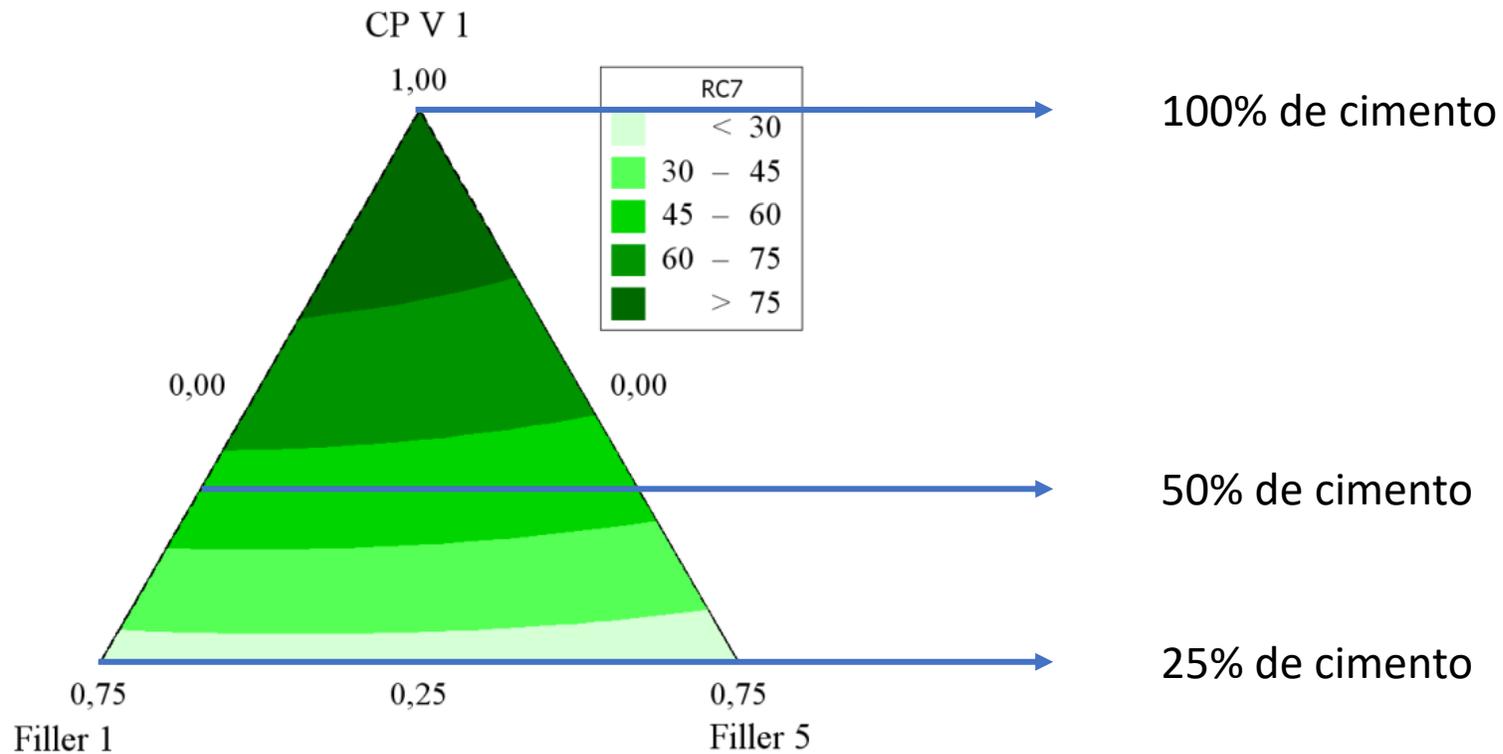
# Abordagem LME – Poli USP

- Otimização granulométrica para reduzir teor de pasta (empacotamento)



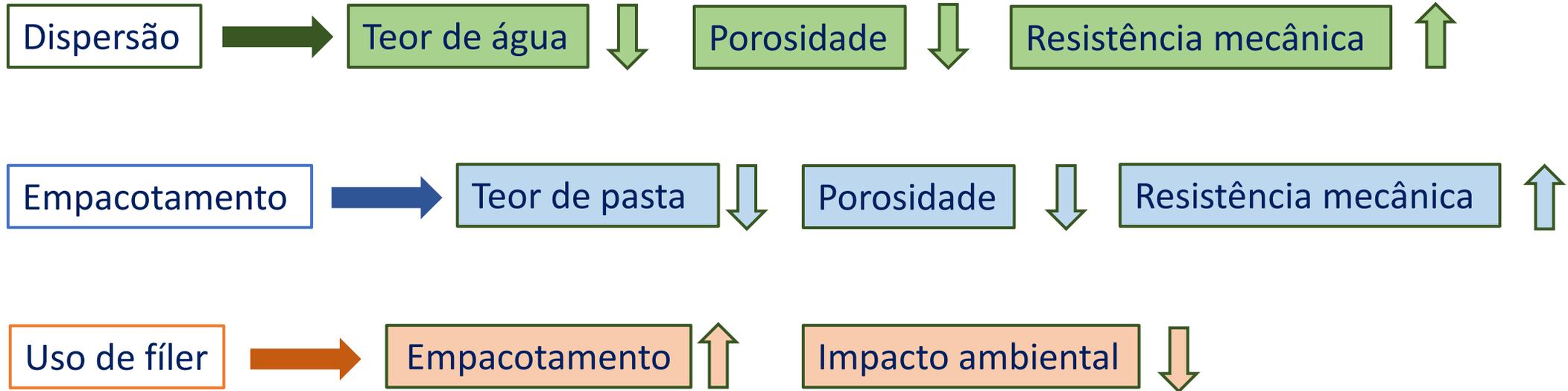
# Abordagem LME – Poli USP

- Substituição de cimento por outros materiais (fíleres, escórias, pozolanas)



Tese Bruno Damineli, 2013

# Abordagem LME – Poli USP



# Roteiro para dosagem de concretos - Método IPT/EP-USP

- 1. Definição de requisitos x classe de agressividade do ambiente
  - Resistência de dosagem : projeto + variabilidade
  - Trabalhabilidade (abatimento): processo produtivo empregado
  - Diâmetro máximo do agregado: compatibilizado com o projeto de armaduras
  - Caracterização dos materiais: densidade real
  - Requisitos de durabilidade (a/c, teor de cimento)

# Roteiro para dosagem de concretos - Método IPT/EP-USP

## 2. Determinar o teor mínimo de argamassa (A)

- i. Começar com proporção 1:5 ( $m=5$ , traço médio)
- ii. Testes sucessivos com teores crescentes de argamassa até encontrar o teor mínimo (mantendo brita fixa, adicionando gradualmente areia e cimento)
- iii. Utilizar água de acordo com a trabalhabilidade desejada (manter o abatimento estabelecido)
- iv. Determinar o teor mínimo de argamassa por inspeção visual
  - i. Preenchimento do esqueleto granular
  - ii. Coesão
  - iii. Acabamento similar ao da obra

# Roteiro para dosagem de concretos - Método IPT/EPUSP

Aumento do teor de argamassa (A)



Primeiro traço: falta de coesão (“farofa”)

# Roteiro para dosagem de concretos - Método IPT/EPUSP

Aumento do teor de argamassa (A)



Coeso, mas com vazios aparentes

# Roteiro para dosagem de concretos - Método IPT/EPUSP

Aumento do teor de argamassa (A)



Teor mínimo “ideal”: vazios preenchidos, acabamento uniforme

# Roteiro para dosagem de concretos - Método IPT/EPUSP

3. Executar, no mínimo, três concretos com relações a/c diferentes

Utilizar proporções de m rico (3,5), médio (5,0) e pobre (6,5)

Ajustar água para *slump* especificado, baseado na relação a/c obtida anteriormente

Medir o teor de ar incorporado

Moldar corpos de prova para determinação da resistência à compressão

4. Calcular o traço unitário

$$A = \frac{1 + a}{1 + m} \quad b = m - a \quad C = \frac{1000 - ar}{\frac{1}{dc} + \frac{a}{da} + \frac{b}{db} + a/c} \quad C = \frac{d_{concreto}}{1 + a + b + a/c}$$

5. Construir o diagrama de dosagem

6. Utilizar o diagrama para formular concretos com a família de materiais utilizada

# Exercício 2 – Entrega no Moodle

Obtenha o traço unitário, o consumo de cimento por m<sup>3</sup> e o BI de um concreto que atenda aos seguintes requisitos:

- $f_{ck} = 30$  Mpa
- Condição de preparo: A
- Classe de agressividade: III
- Teor de argamassa: 55%

Coeficientes	
k1	95.4
k2	9.1
k3	1
k4	6.9
k5	-0.1
k6	0.6

Lei de Abrams

Lei de Lyse

Lei de Priszkulnik e Kirilos

# Exercício 3 – Entrega no Moodle

1) A partir dos dados do laboratório disponibilizados abaixo, construa um diagrama de dosagem experimental de concretos. Apresente toda a memória de cálculo.

<b>Materiais</b>	<b>Traço concreto 1</b>	<b>Traço concreto 2</b>	<b>Traço concreto 3</b>
Cimento (kg)	11,11	8,33	6,67
Areia (kg)	13,89	16,67	18,33
Brita (kg)	25,00	25,00	25,00
Água (kg)	5,00	5,20	5,50
<b>Concreto fresco</b>	<b>Traço concreto 1</b>	<b>Traço concreto 2</b>	<b>Traço concreto 3</b>
Abatimento (mm)	140	180	160
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,35	2,28	2,29

# Exercício 3 – Entrega no Moodle

1) A partir dos dados do laboratório disponibilizados abaixo, construa um diagrama de dosagem experimental de concretos. Apresente toda a memória de cálculo.

Concreto endurecido	Traço concreto 1	Traço concreto 2	Traço concreto 3
Corpo de prova (CP-1)			
Diâmetro médio - d (mm)	100,1	100,4	100,2
Altura – h (mm)	198,7	194	196,4
Carga ruptura à compressão 14 dias (N)	236.854	170.712	93.406
Corpo de prova (CP-2)			
Diâmetro médio - d (mm)	100,4	100,8	100,9
Altura – h (mm)	198,8	195,5	195,8
Carga ruptura à compressão 14 dias (N)	260.167	169.573	103.246

# Exercício 3 – Entrega no Moodle

**1) A partir dos dados do laboratório disponibilizados abaixo, construa um diagrama de dosagem experimental de concretos. Apresente toda a memória de cálculo.**

Obs1: Se  $h/d < 1,94$ , multiplicar força x fator correção

Obs2:  $fc_{28}$  (resist. compressão aos 28 dias) =  $1,2 \times fc_{14}$  (resist. compressão aos 14 dias)

<b>h/d</b>	<b>Fator de correção</b>
1,90	0,991
1,91	0,992
1,92	0,993
1,93	0,994

# Leituras recomendadas

ISAIA, G. Concreto: Ciência e Tecnologia, IBRACON, 2011. Capítulo 12: Dosagem dos concretos de cimento Portland.

HELENE, P.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto, PINI, 1992. Capítulo 6: Roteiro Prático para a Dosagem dos Concretos Estruturais.