

AGREGADOS

uso em concretos e argamassas

PCC 3222

Versão 2023

Objetivo

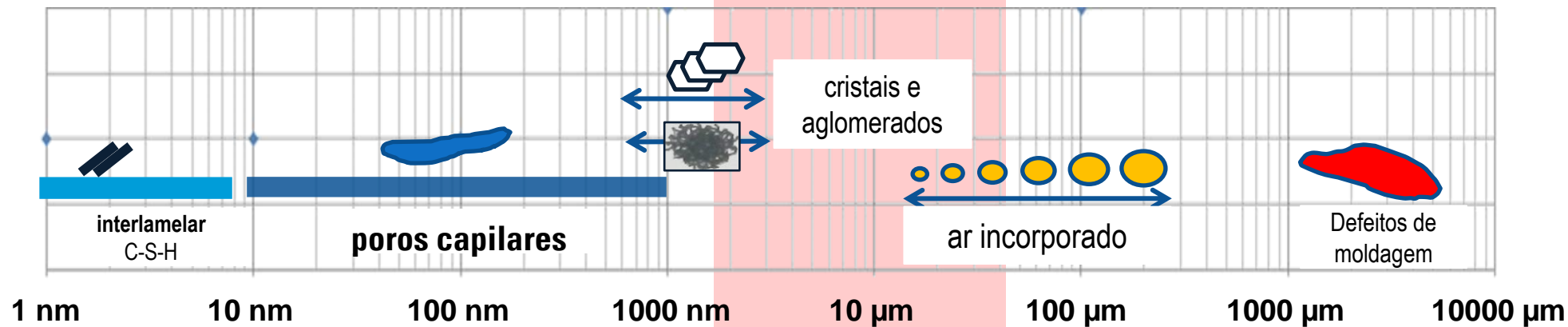
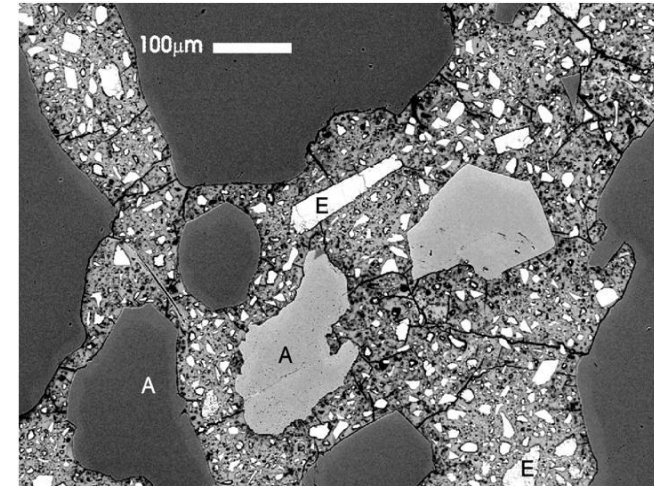
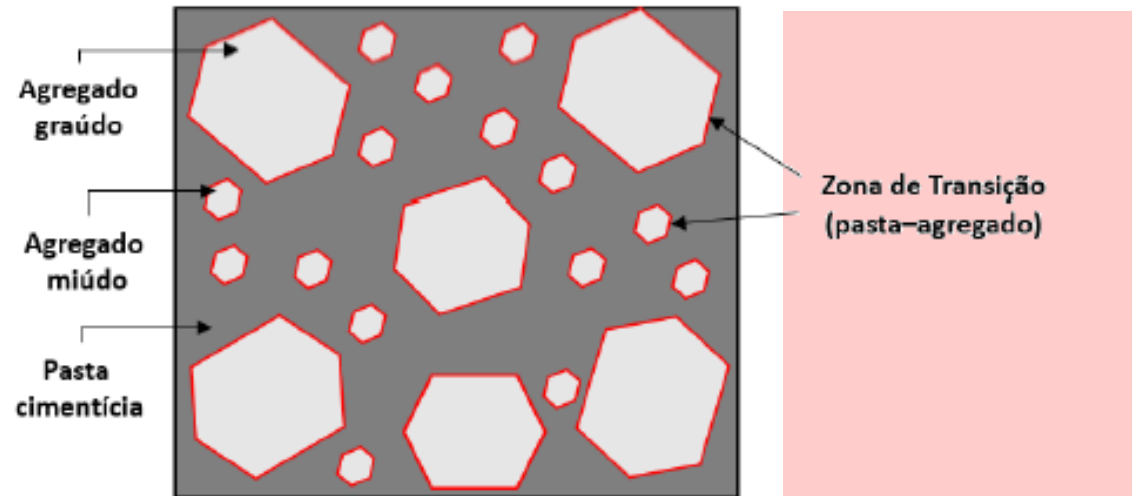
- Entender como os agregados afetam o desempenho dos materiais cimentícios
- Entender como selecionar e caracterizar os agregados para aplicação em materiais cimentícios

Concreto é um sólido contínuo

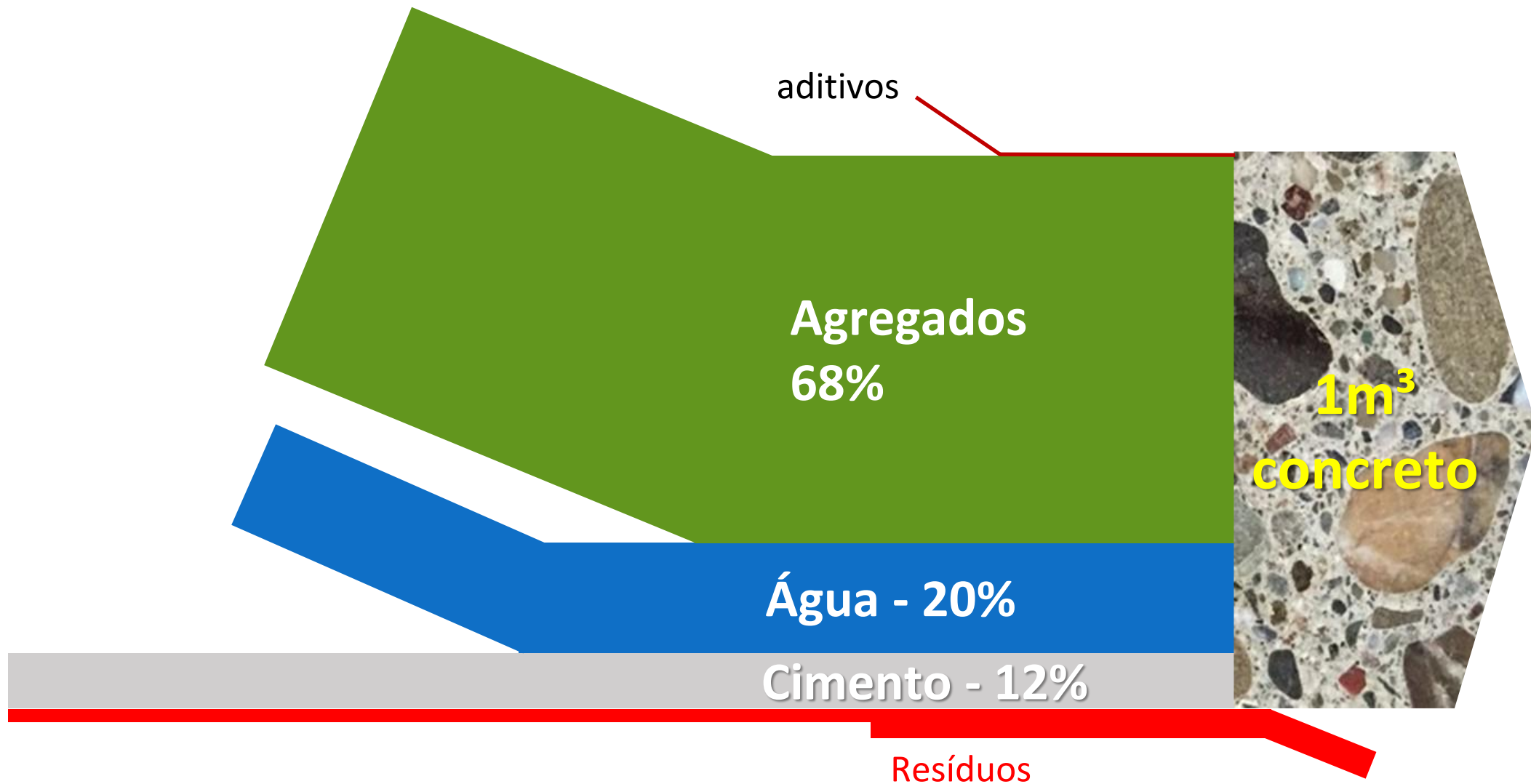


Volume de pasta (cimento e água) preenche os vazios dos agregados

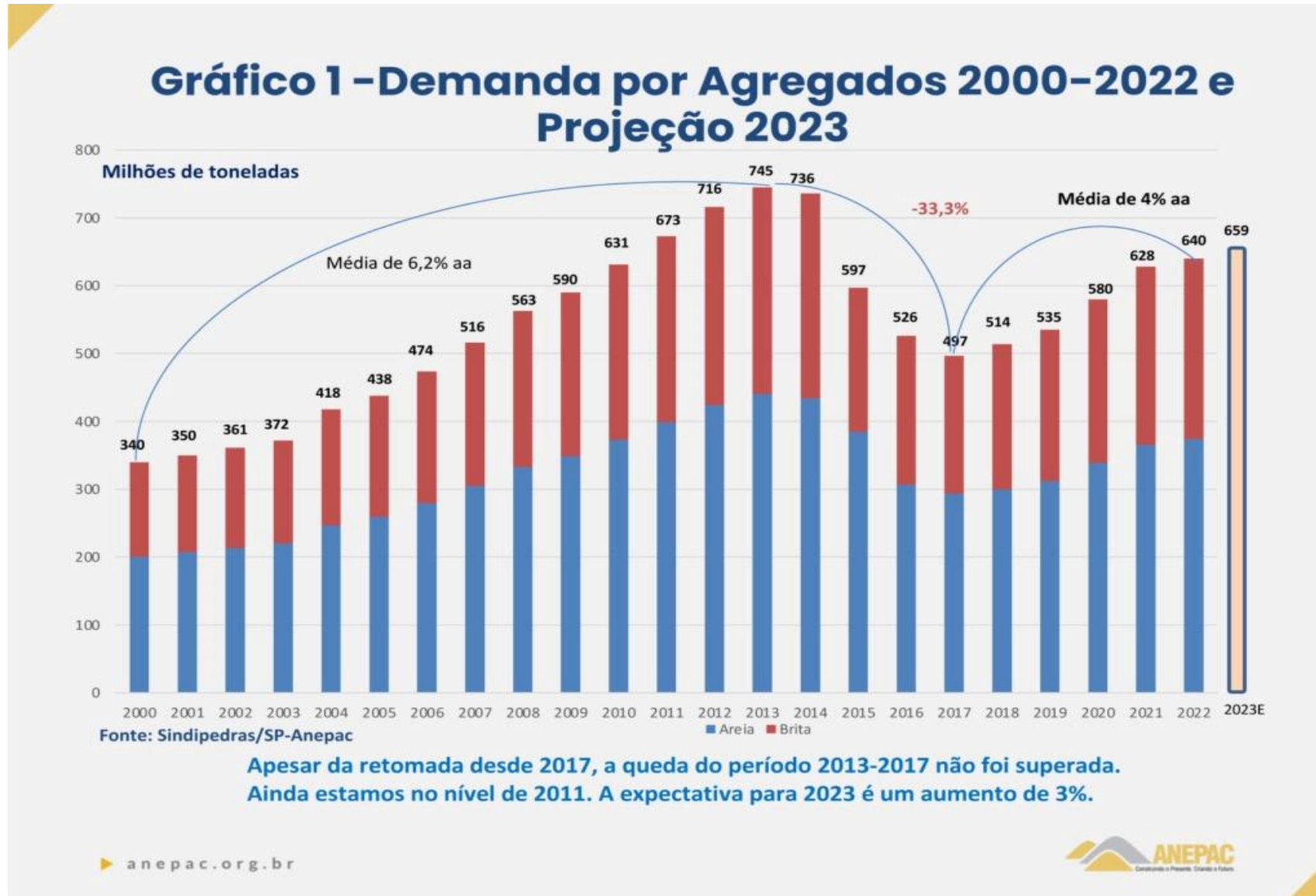
Concreto: multifásico, complexo



Agregados: 65-75% do volume do concreto



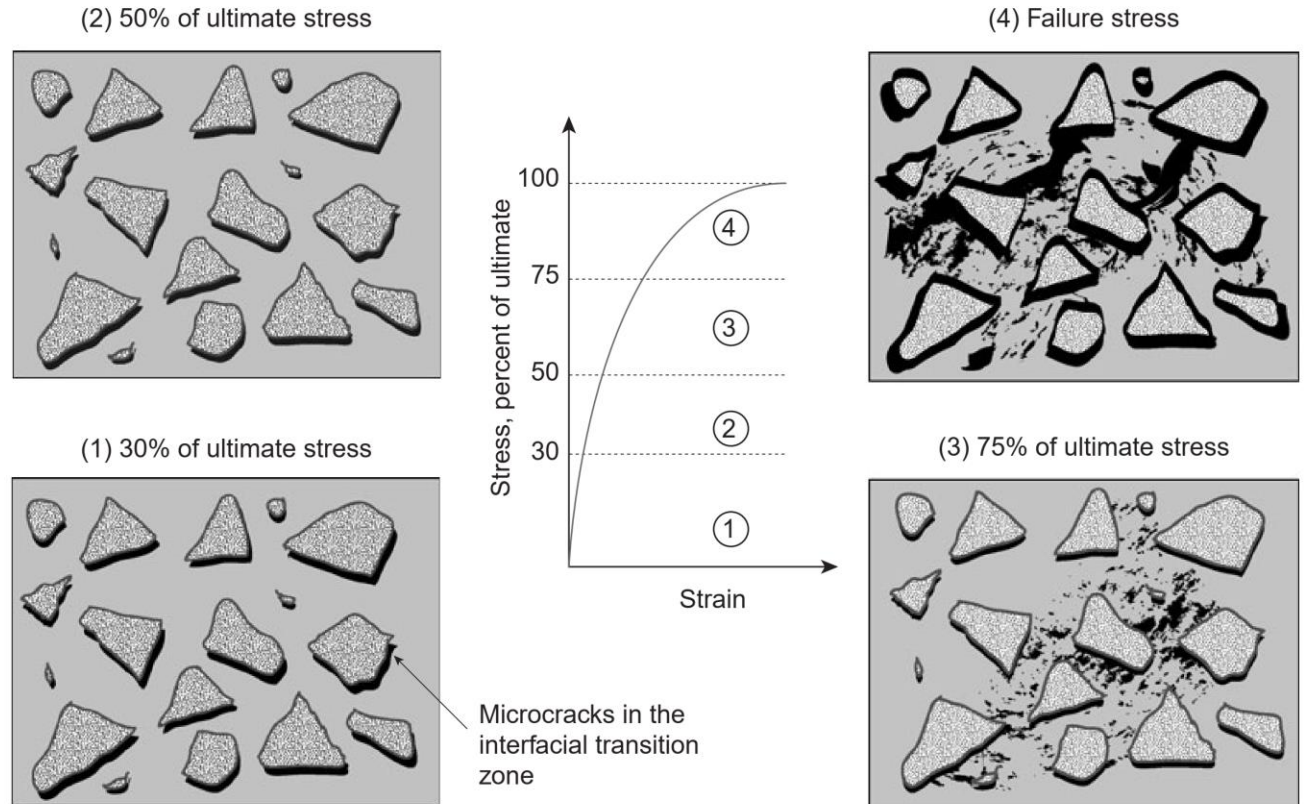
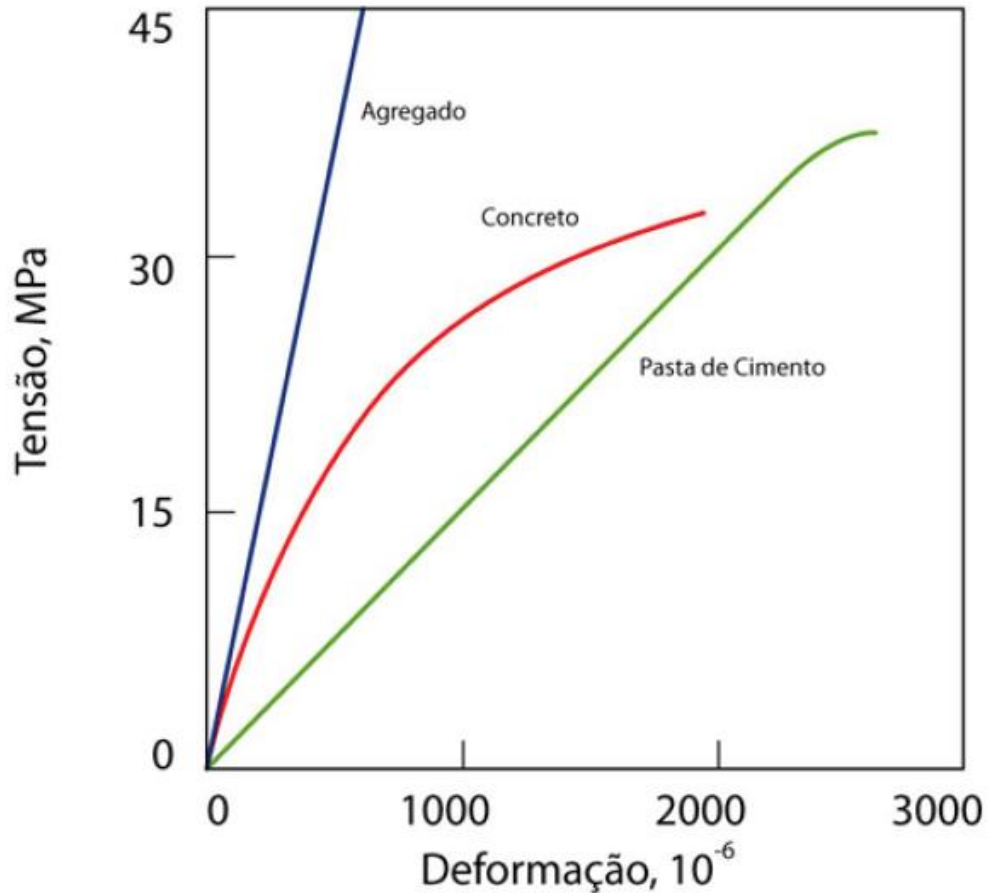
Produção de agregados no Brasil: ~10x cimento



Porque usamos agregados no concreto?

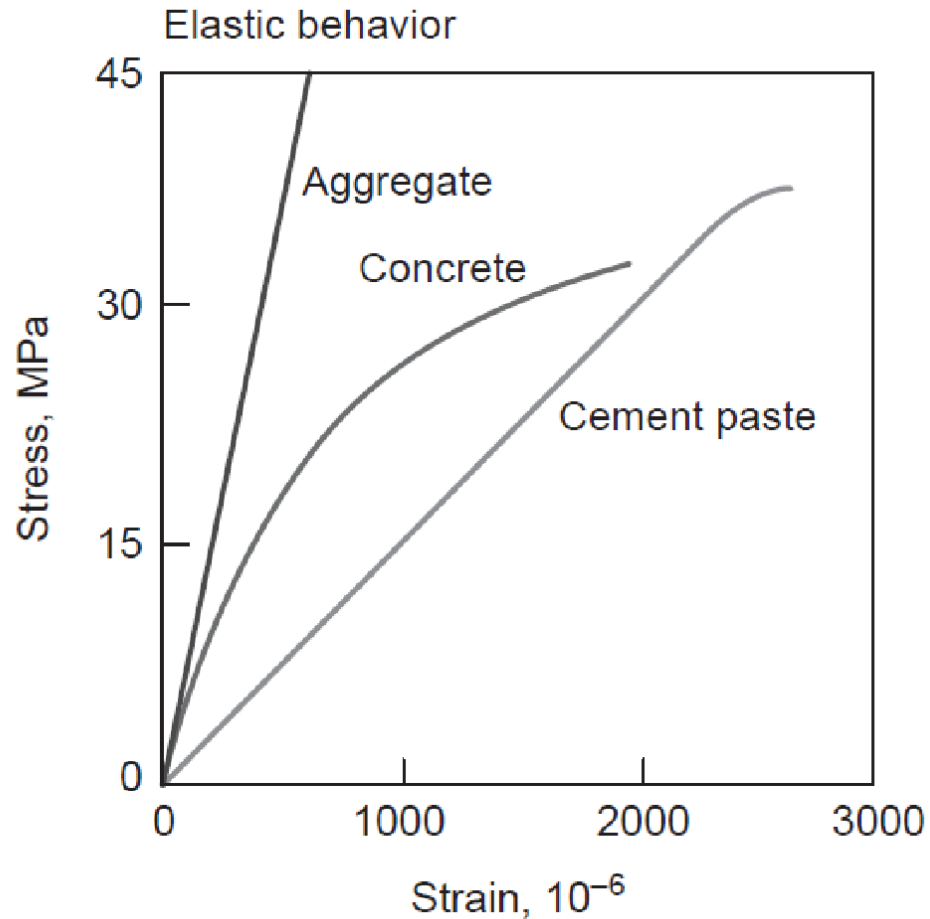
- Reduzir custos
- Reduzir impacto ambiental
- Melhorar a estabilidade dimensional
 - Fluência
 - Retração
- Controlar a densidade
- Influencia o módulo de elasticidade do concreto

Agregados e módulo de elasticidade do concreto



O concreto apresenta comportamento elástico linear?

Módulo elástico do concreto: maior influência do agregado



Fração volumétrica
de pasta

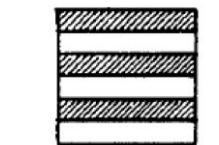
Fração volumétrica
de agregado

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - V_a}{E_m} + \frac{V_a}{E_a}$$

Módulo do
concreto

Módulo da pasta
de cimento

Módulo do
agregado

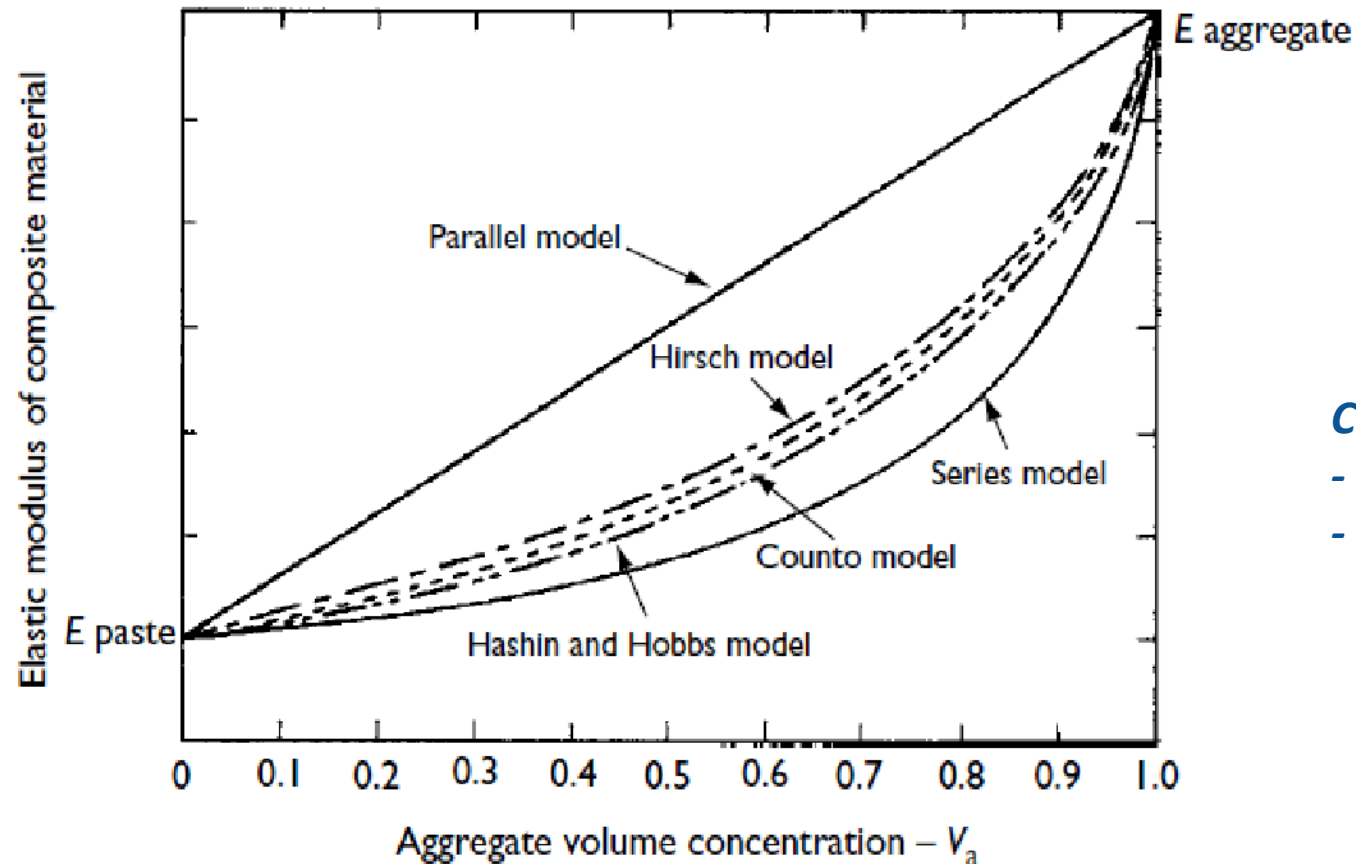


1 Series model
(uniform stress)

Mehta; Monteiro. Concreto, microestrutura, propriedades e materiais. 2006.

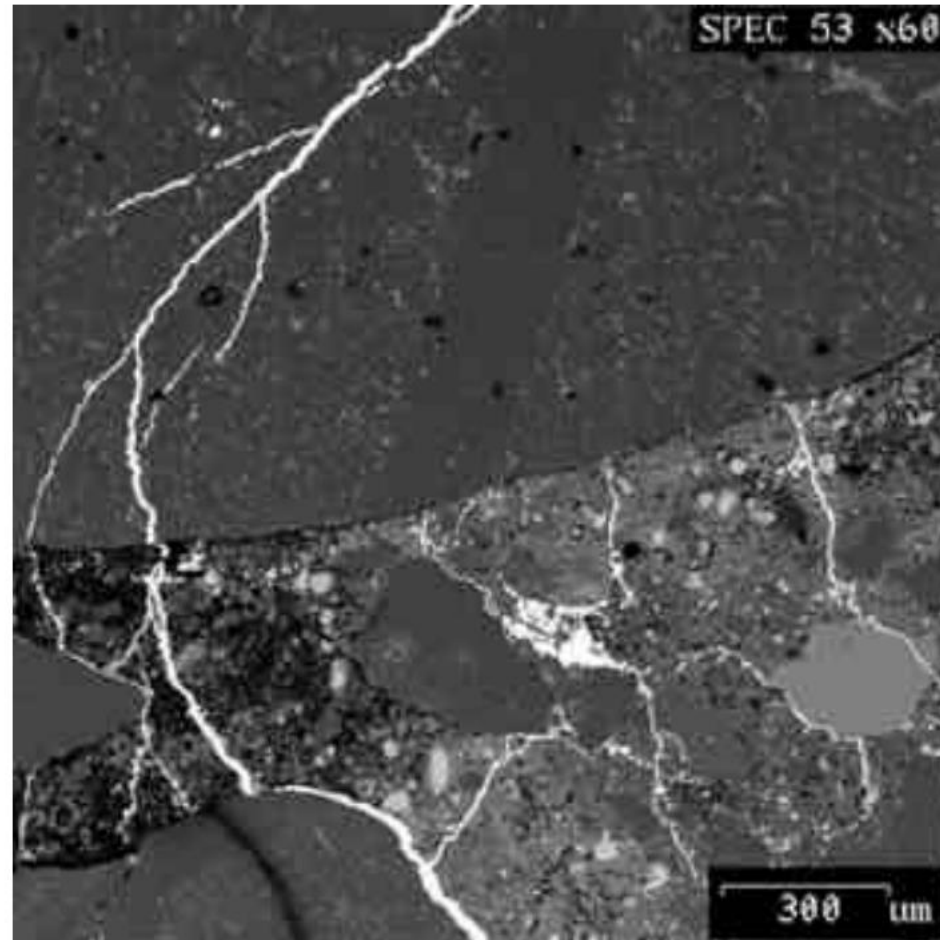
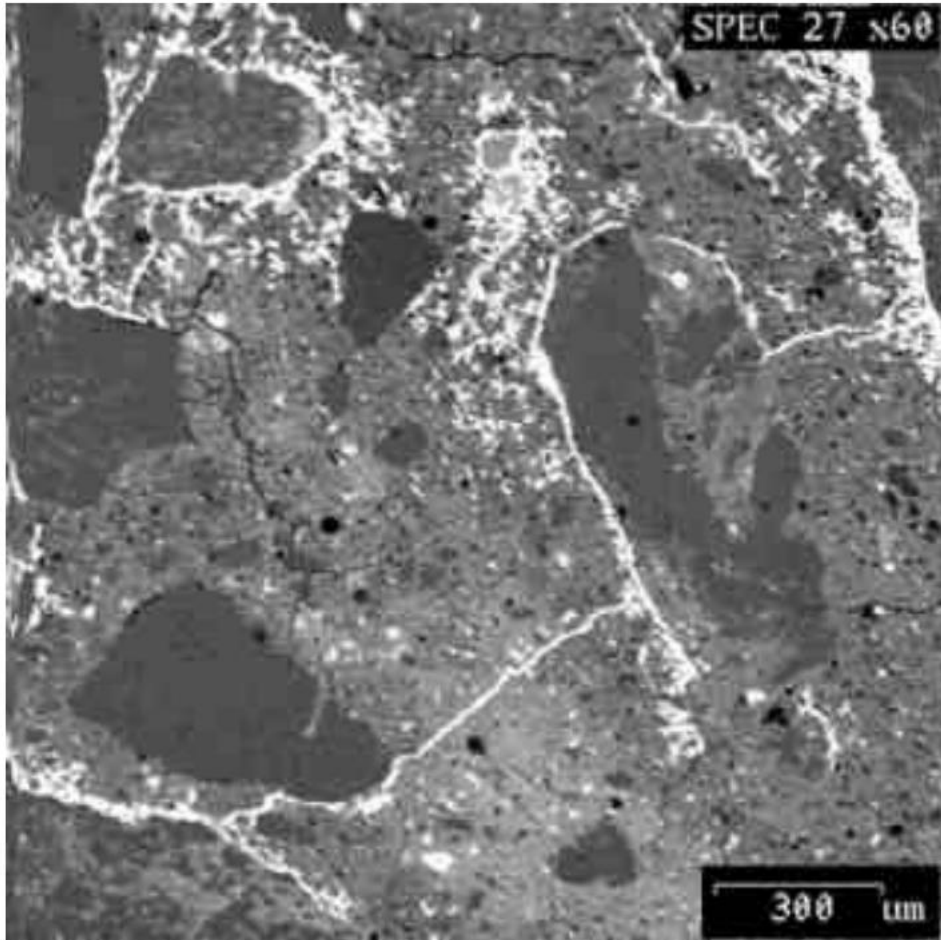
Mark Alexander; Mindess. Aggregates in Concrete. 2005.

Módulo elástico do concreto: maior influência do agregado

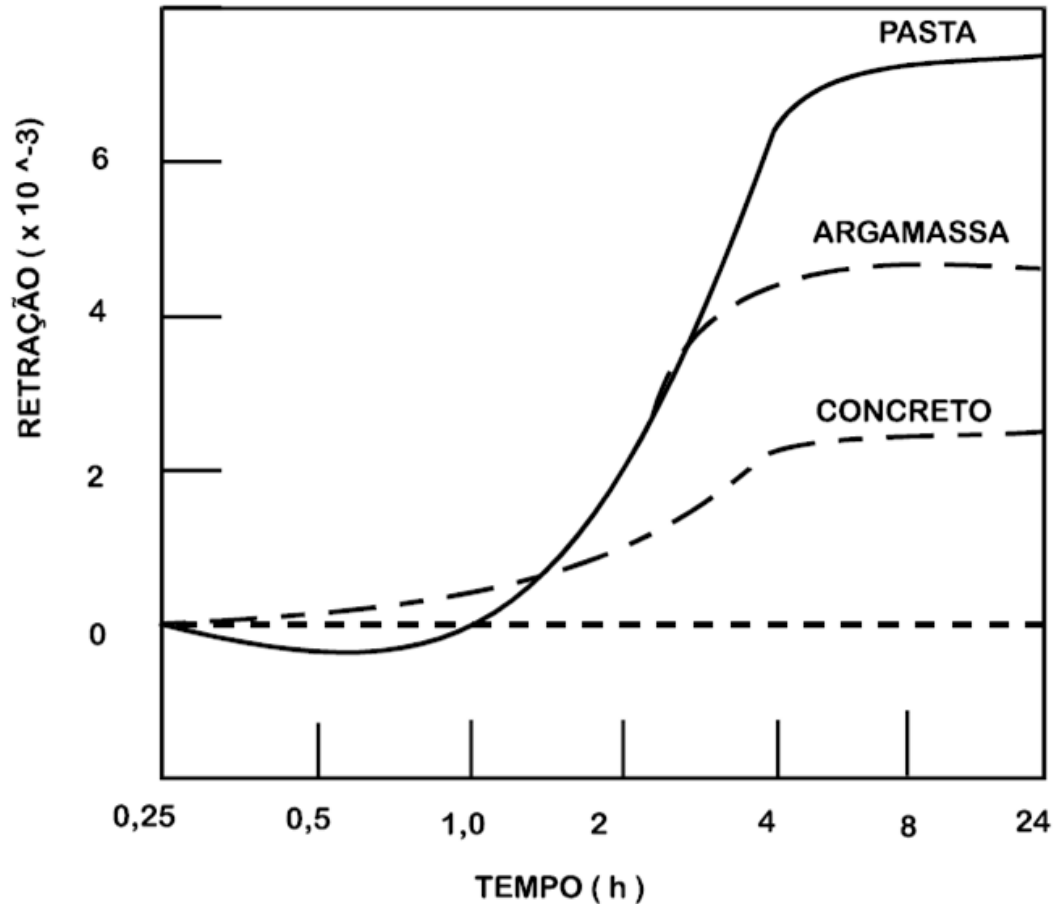


Condições (validade das leis):
- aderência entre pasta-agregado.
- continuidade no sólido.

Fissuras de interface & agregados

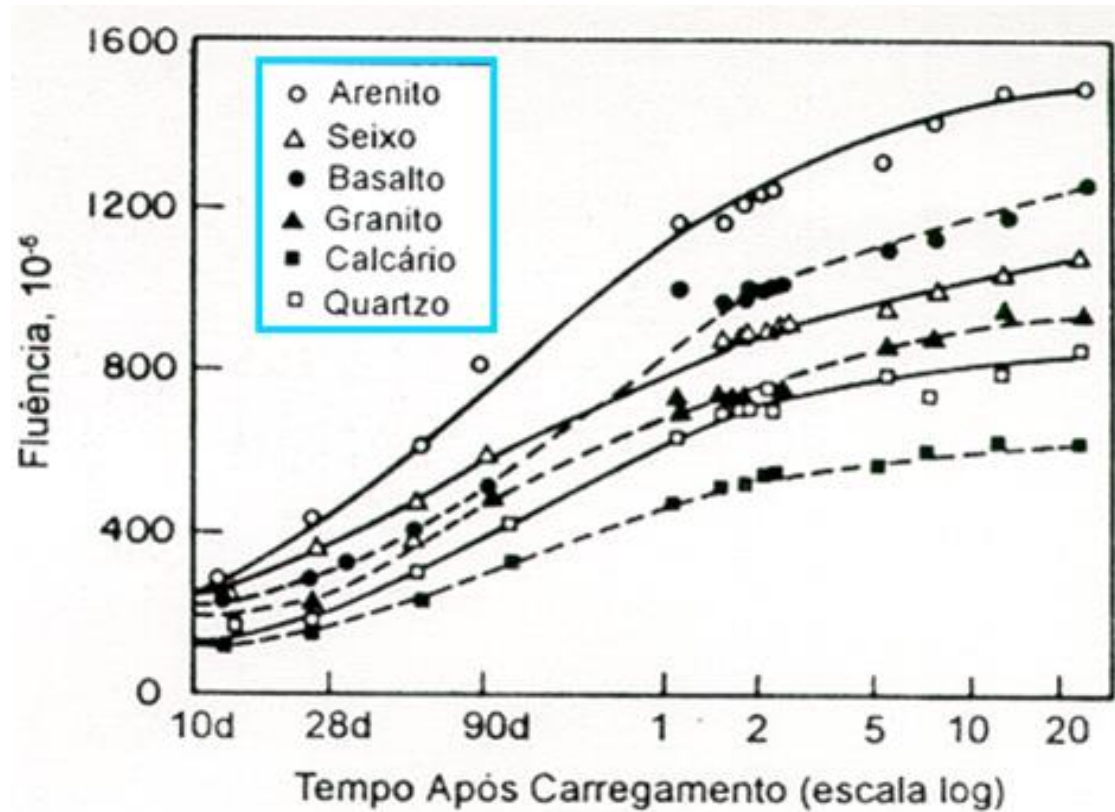


Retração por secagem: efeito do volume dos agregados



O aumento do volume de agregados reduz a retração por secagem do concreto!

Agregados e fluência do concreto

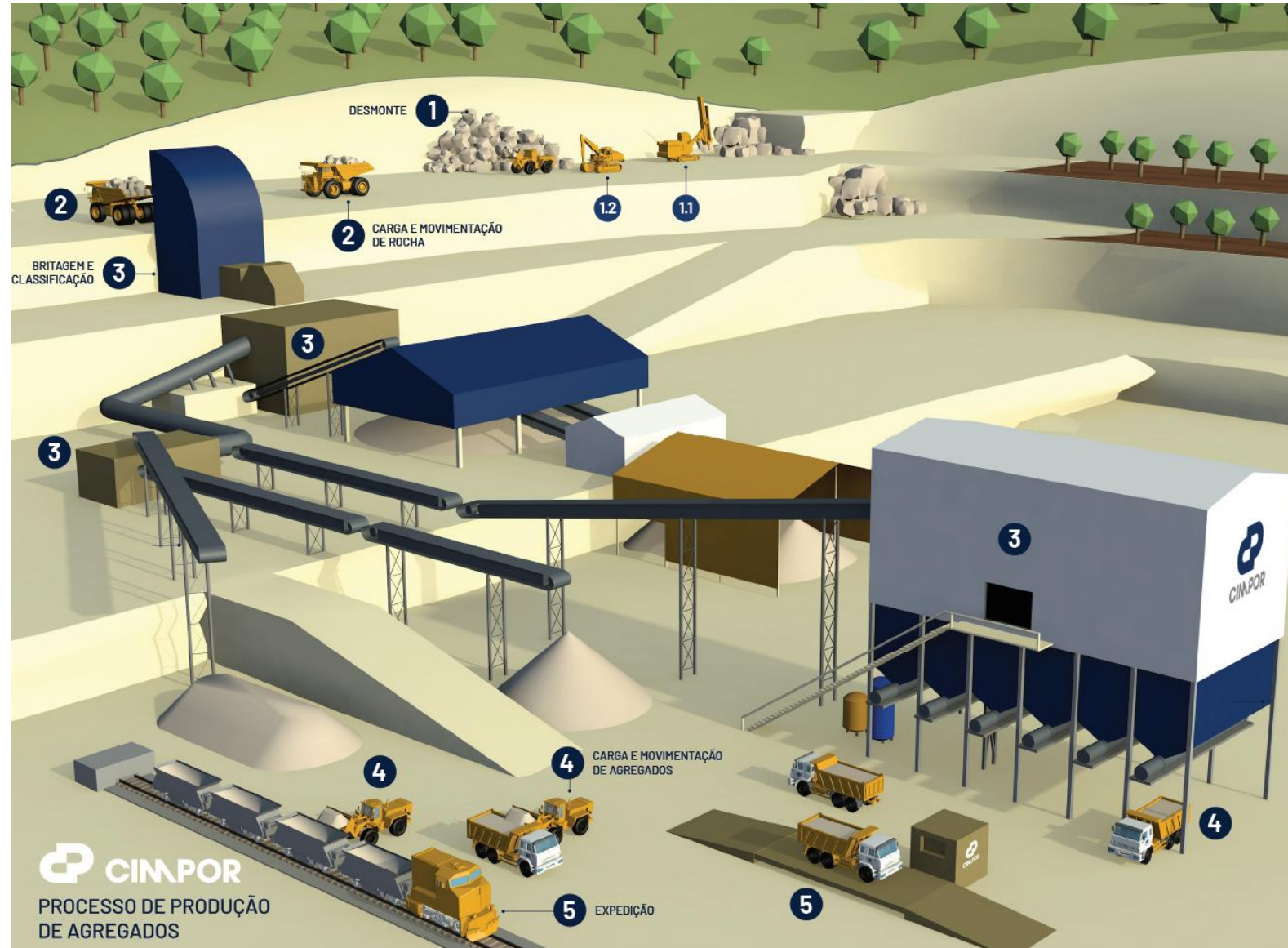


Quanto maior o módulo elástico do agregado, menor será a fluência do concreto!

PRODUÇÃO DE AGREGADOS

Produção de agregados graúdos britados

1. Desmonte – explosões, escavação
2. Transporte
3. Britagem ou moagens
4. Peneiramento (classificação granulométrica)
5. (Lavagem)
6. Expedição







Obtidos a partir de resíduos



Brita reciclada (resíduo de concreto)



Areia fina (rejeitos de minério da VALE)
Escórias, muitos outros.....

Tipos de agregados

Natural (peneiramento)



Cascalho
> 4,8 mm



Areia
< 4,8 mm

Artificial (britagem de rochas)



> 4,8 mm



Areia
< 4,8 mm

Agregados especiais

Agregados leves

- Concretos leves
- Baixa condutividade térmica
- Argila expandida (0,4-0,6 kg/dm³)



Agregados pesados

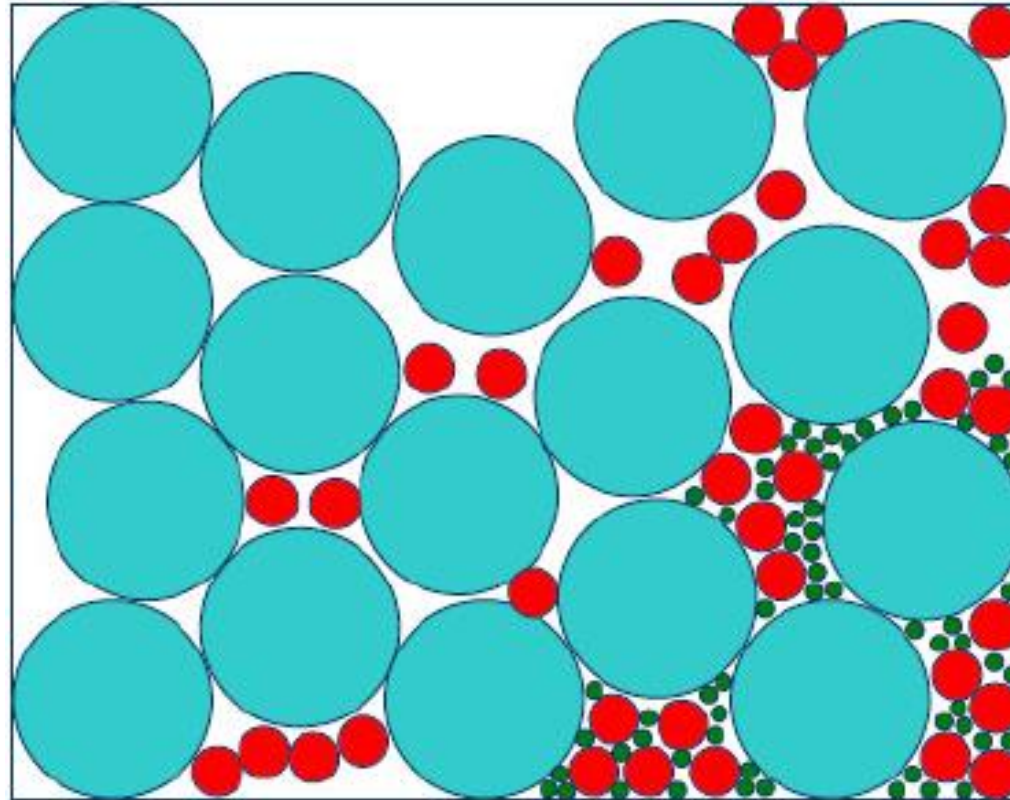
- Proteção contra radiação
- Barita (d 4,5kg/dm³)
- Esferas de aço



Papel da granulometria dos agregados no concreto

- Influencia no volume de pasta necessária para a trabalhabilidade
- Influencia nas propriedades do estado endurecido no geral
- Influencia no impacto ambiental

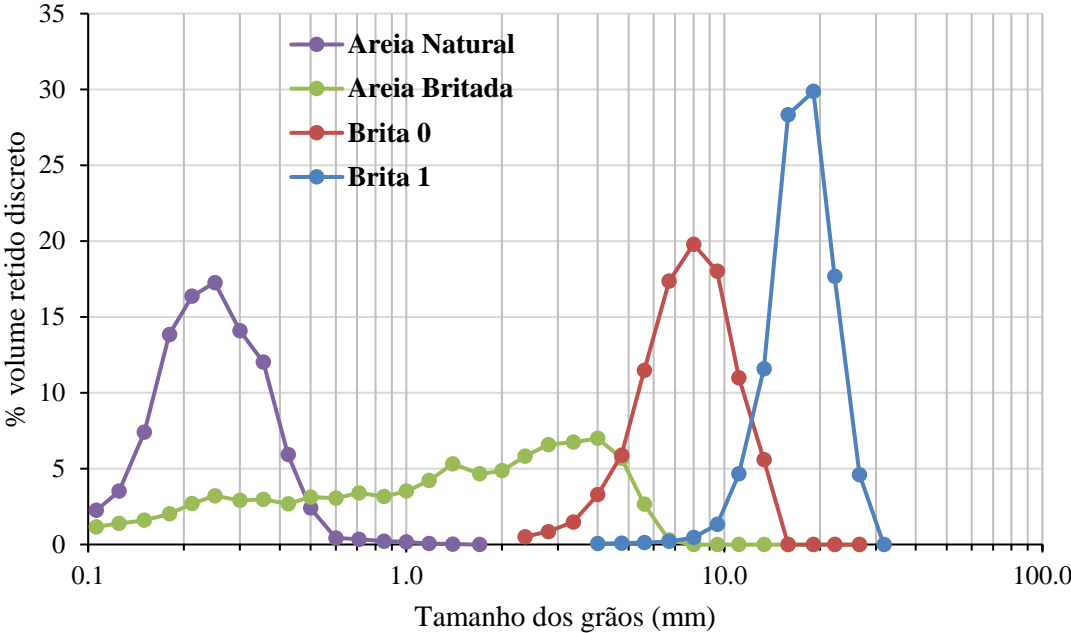
Distribuição de tamanho de partículas



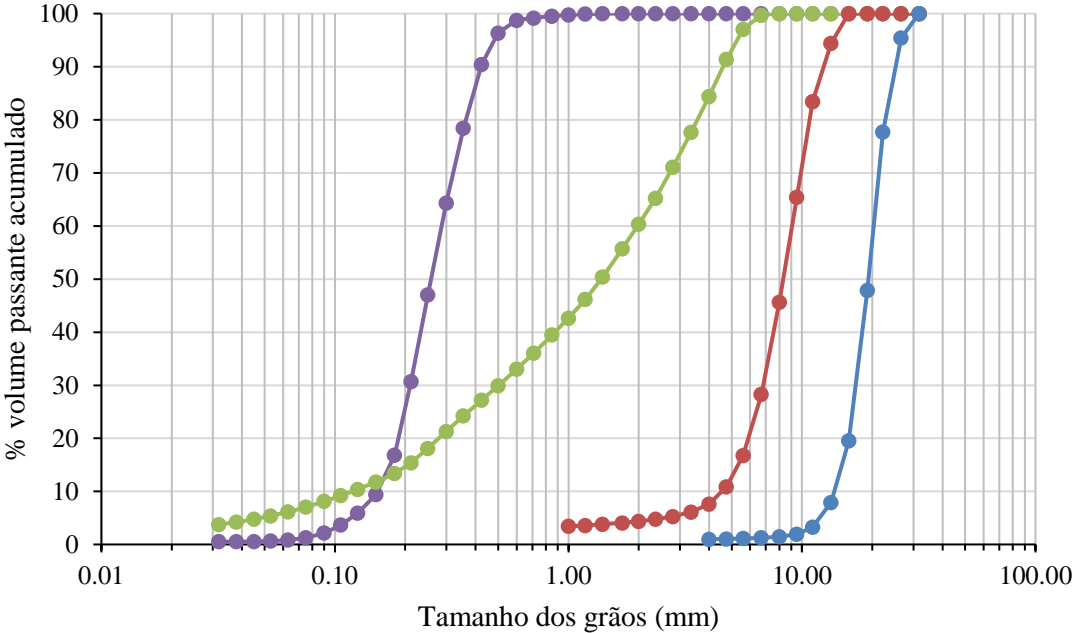
<http://www.clubedoconcreto.com.br/2016/10/porque-reduzir-os-vazios-no-concreto.html>

Curvas de distribuição granulométricas

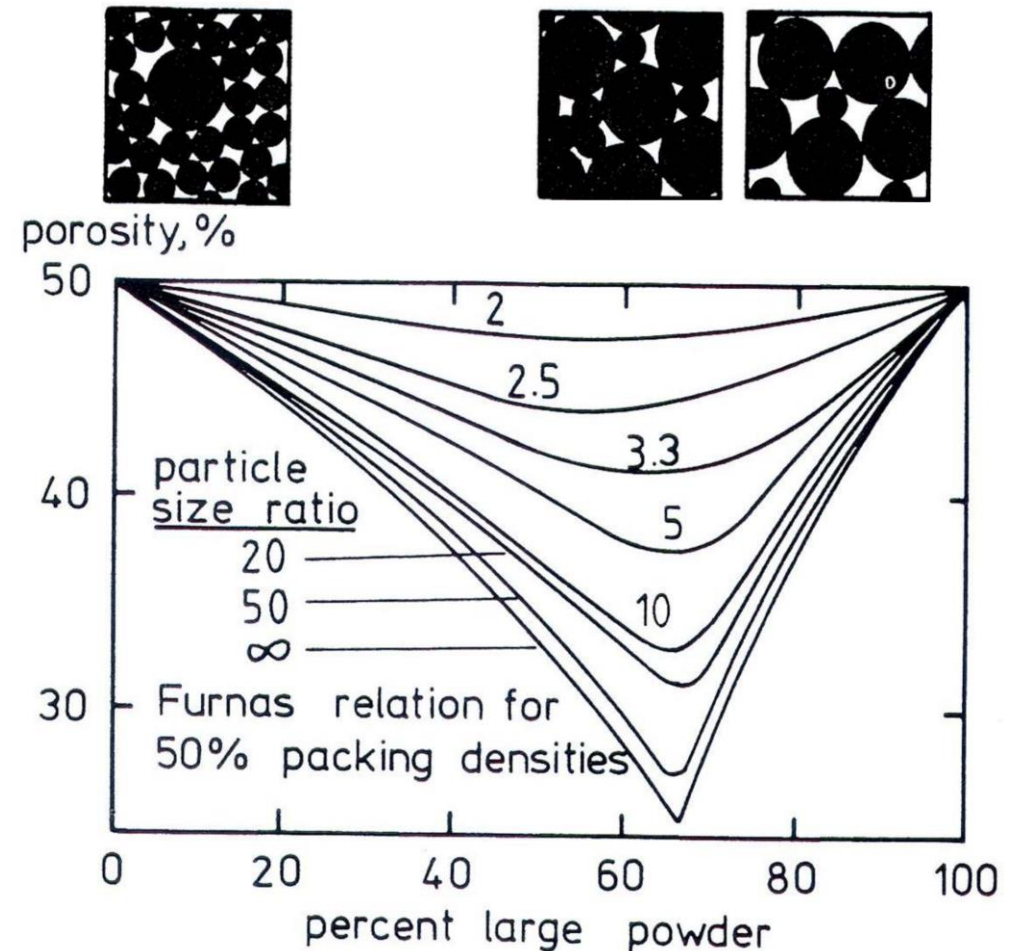
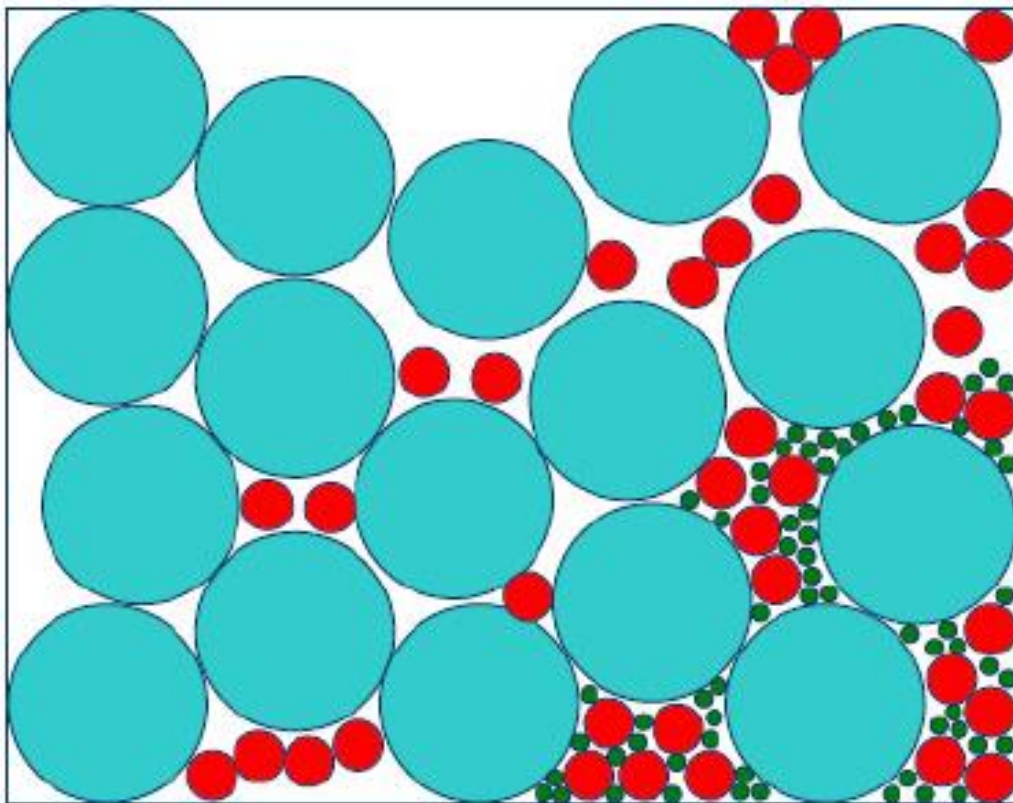
Distribuição discreta



Distribuição acumulada



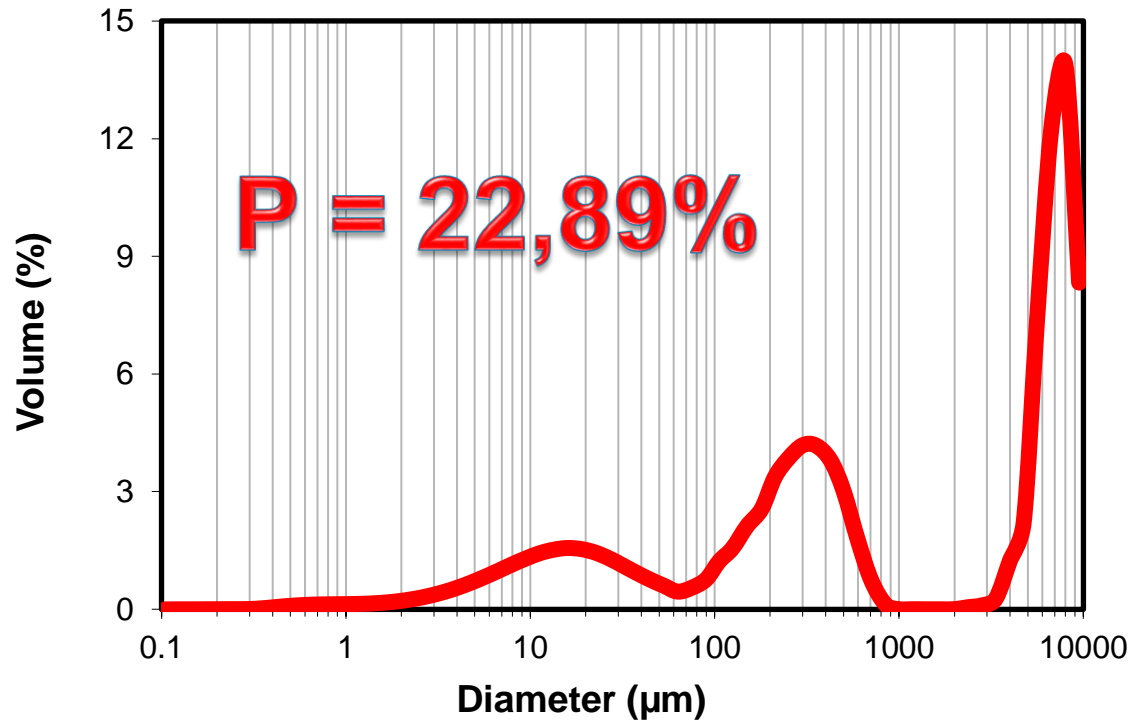
Empacotamento dos agregados: minimiza vazios (preenchidos por cimento e água)



Distribuições granulométricas de concretos: diferentes níveis de compactidade

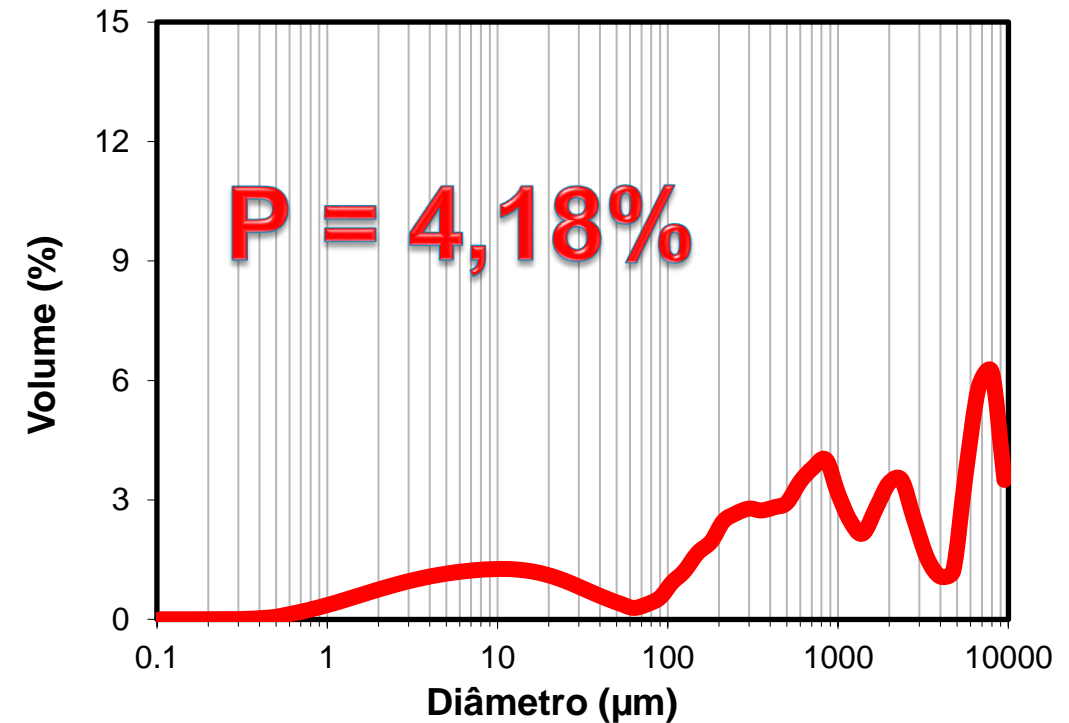
Conventional

cement, fine and coarse aggregate



Optimized

cement + 3 fillers + 2 fine + coarse



Damineli, Pileggi, John Low binder eco-efficient concretes.

In: Pacheco-Torgal, Jalali, Labrincha e John, [Eco-efficient concrete](#). Woodhead 2012.

Dimensão do agregado & Armadura do aço: incompatibilidade gera defeitos de moldagem

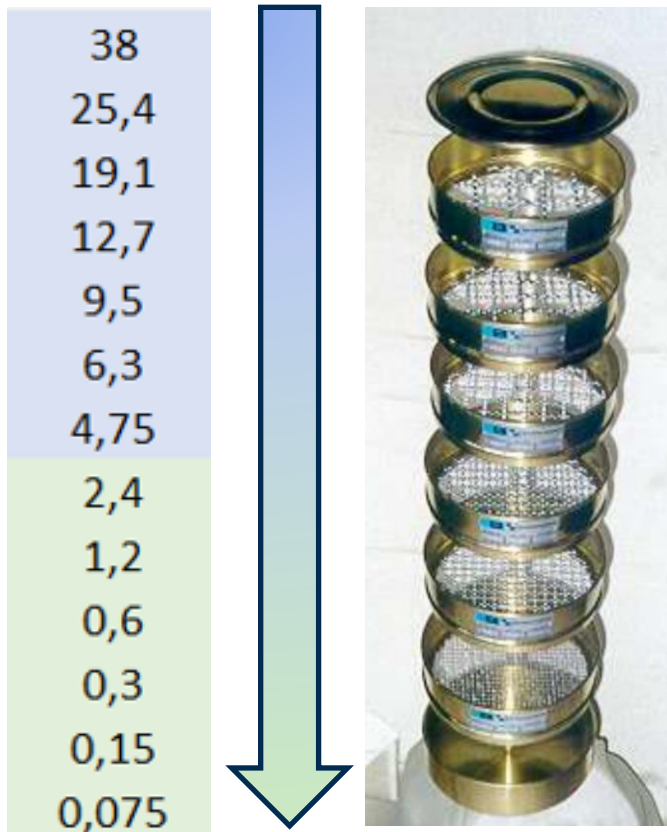
- **Regras práticas do American Concrete Institute (ACI)**
 - D max agregado no concreto \leq 1/5 da menor dimensão entre as faces da forma
 - D max agregado \leq 1/3 da espessura das lajes
 - D max agregado \leq 3/4 do espaço livre entre armaduras



[Como evitar bicheiras no concreto? \(concretousinado.com.br\)](http://concretousinado.com.br)

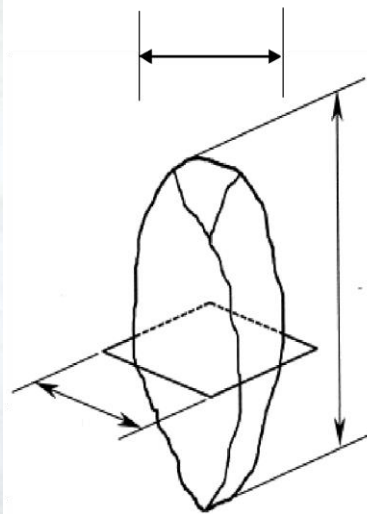
Distribuição granulométrica: como se determina os tamanhos das partículas?

Peneiramento

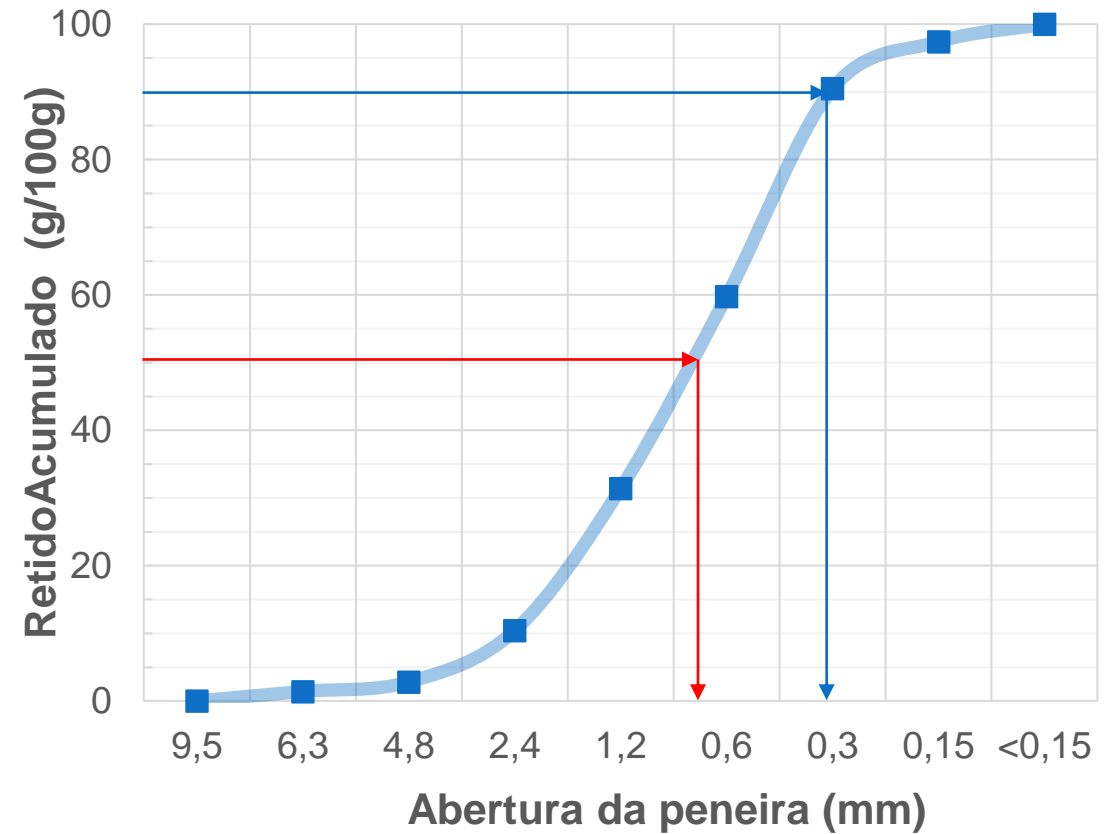
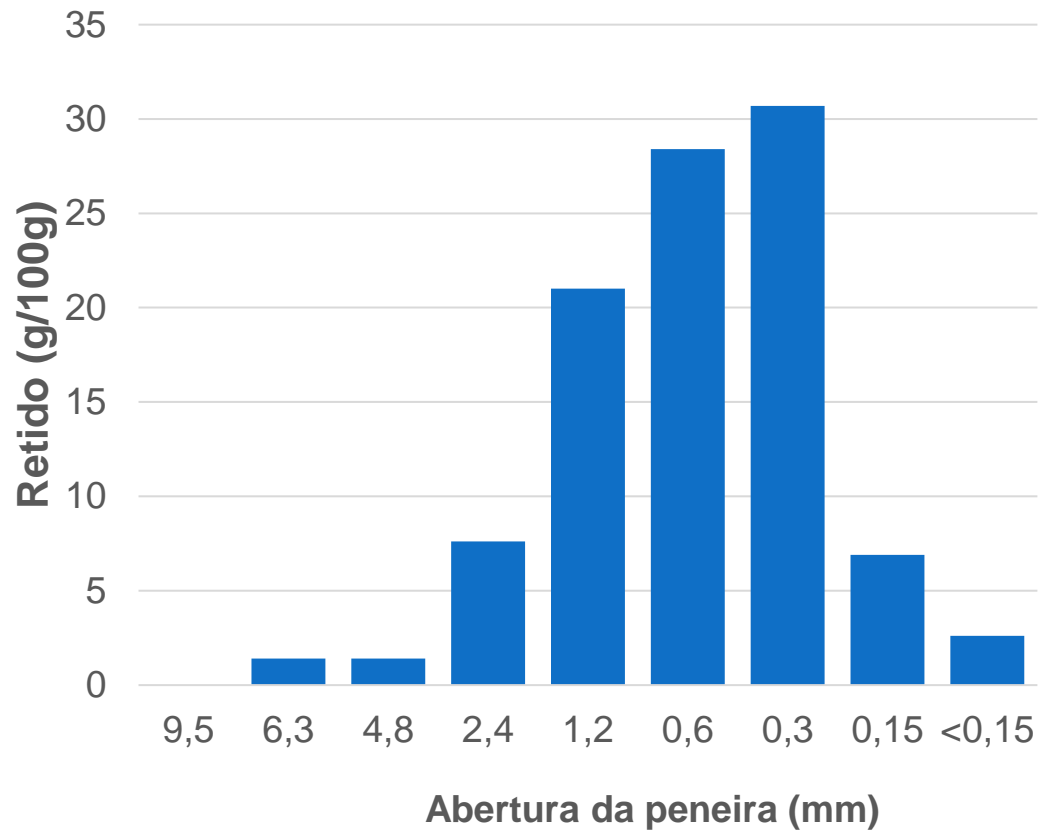


- 38
- 25,4
- 19,1
- 12,7
- 9,5
- 6,3
- 4,75
- 2,4
- 1,2
- 0,6
- 0,3
- 0,15
- 0,075

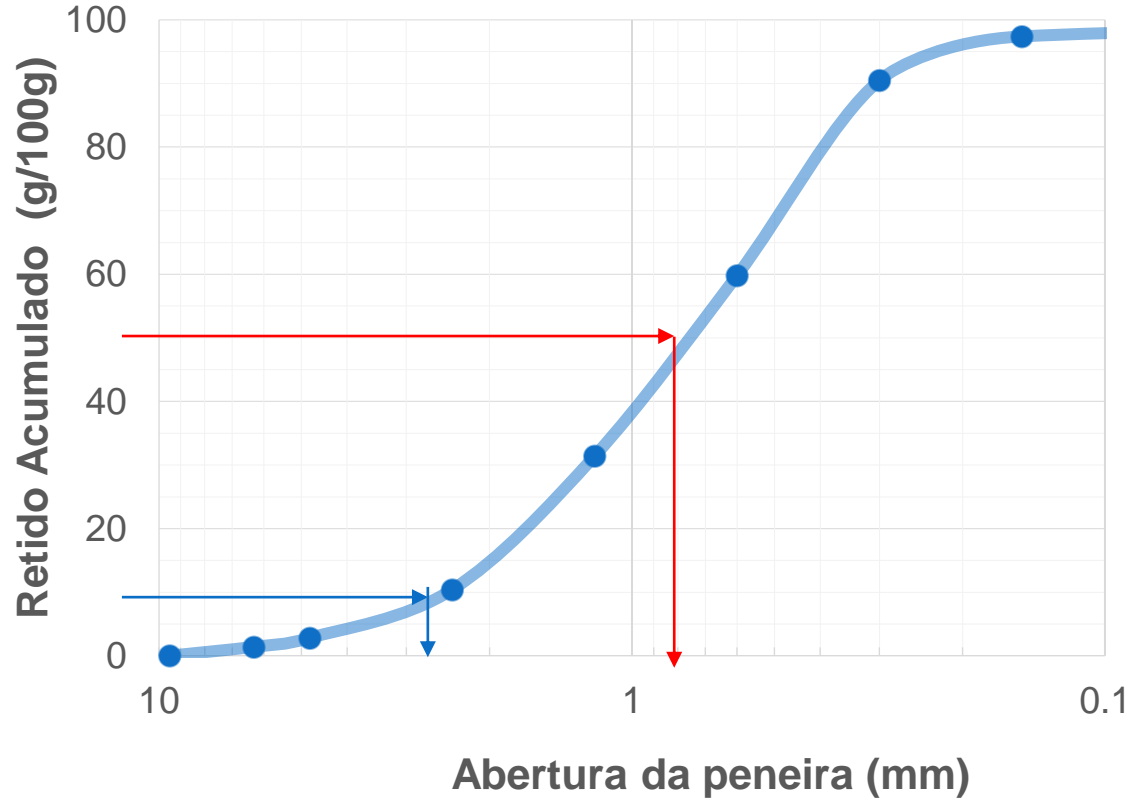
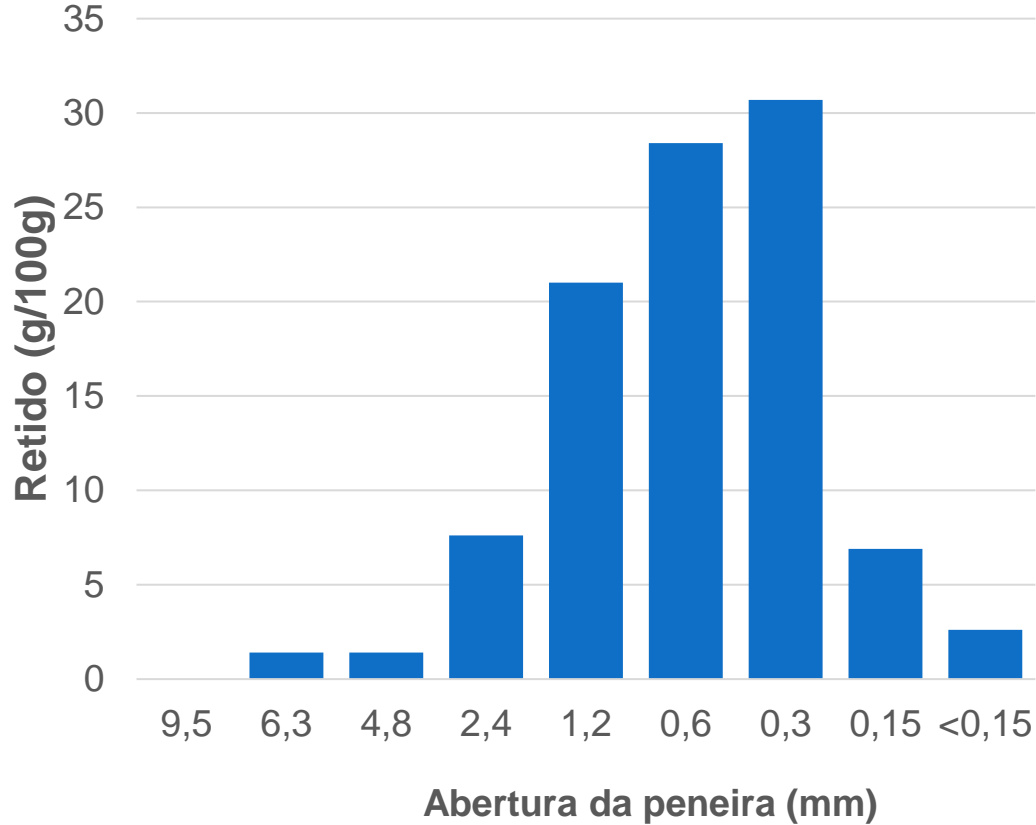
Segunda maior
dimensão da
partícula fica retida
na peneira



Distribuição Granulométrica



Distribuição Granulométrica



Exercício 1 - Moodle

Monte as curvas granulométricas do agregado, a partir do peneiramento

Plote o gráfico de massa retida e distribuição de frequência (pesquisar na literatura)

Abertura da malha (mm)	Massa retida (gramas)	Massa retida (% g/g)	Massa retida acumulada (% g/g)	Massa passante acumulada (% g/g)
9,5	0,0			
6,3	6,7			
4,8	6,5			
2,4	35,8			
1,2	98,7			
0,6	133,7			
0,3	144,8			
0,15	32,5			
-0,15	12,2			
Soma	470,9			

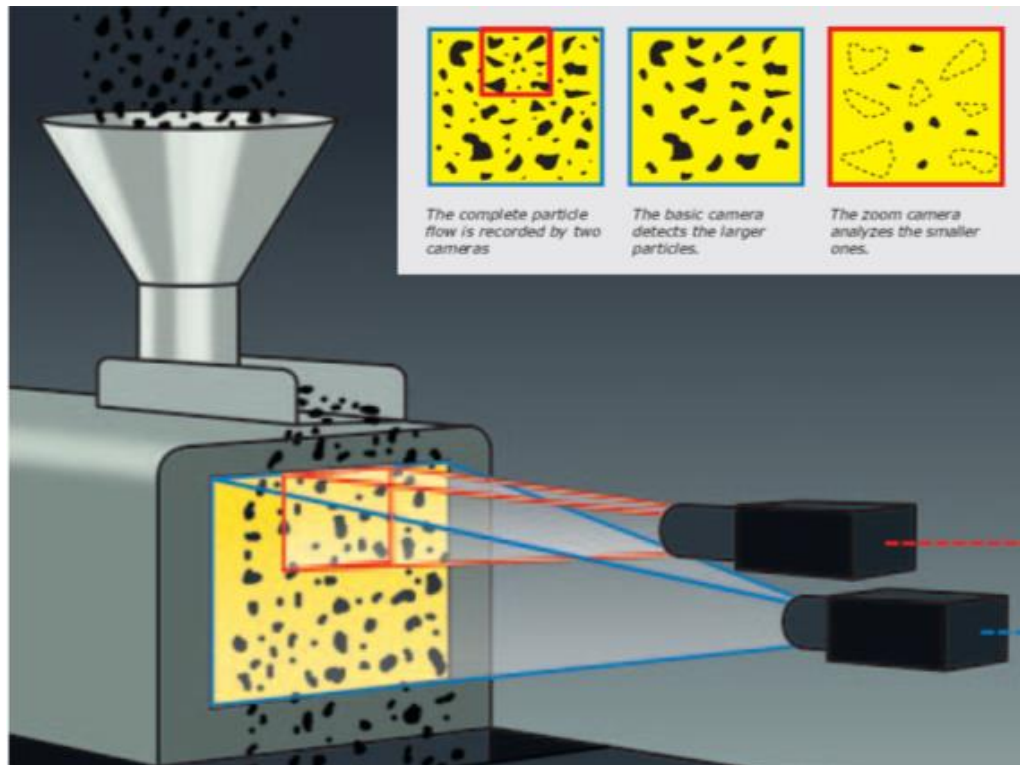
Classificação granulométrica NBR 9935

faixas de tamanho dos produtos comerciais

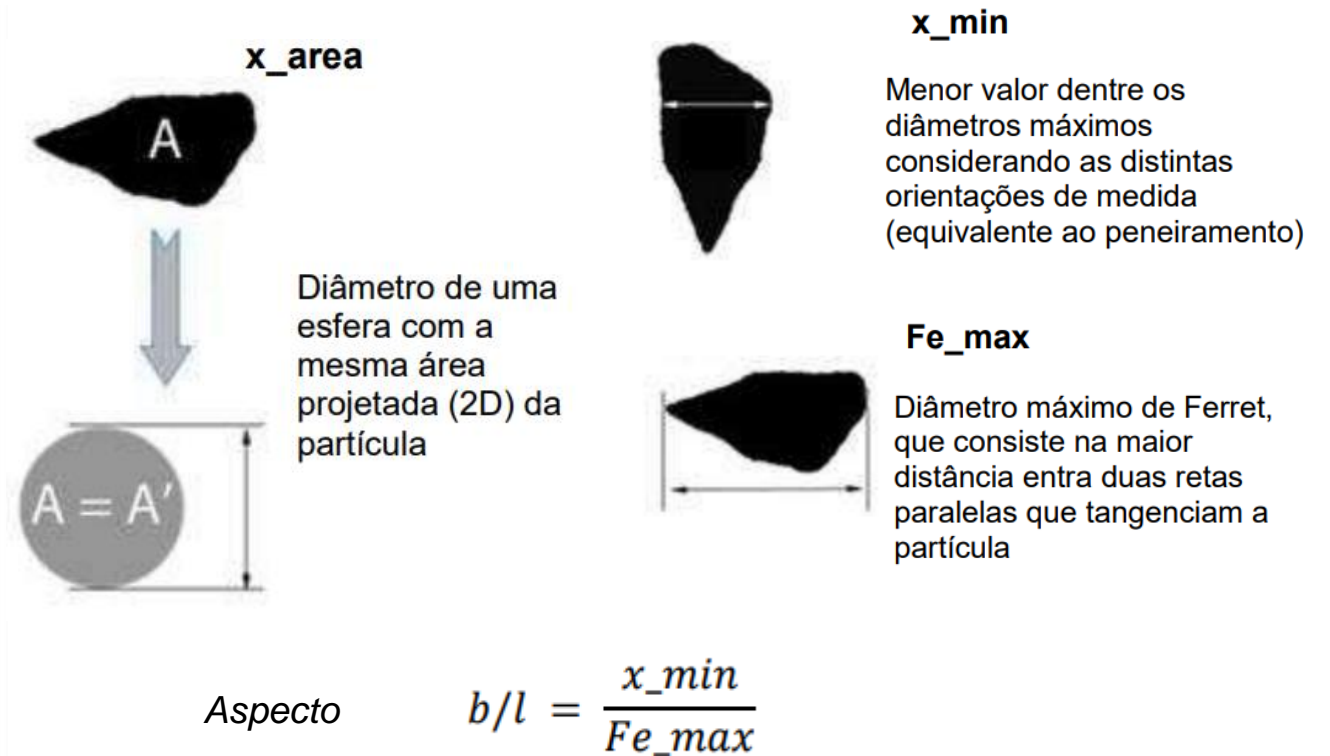
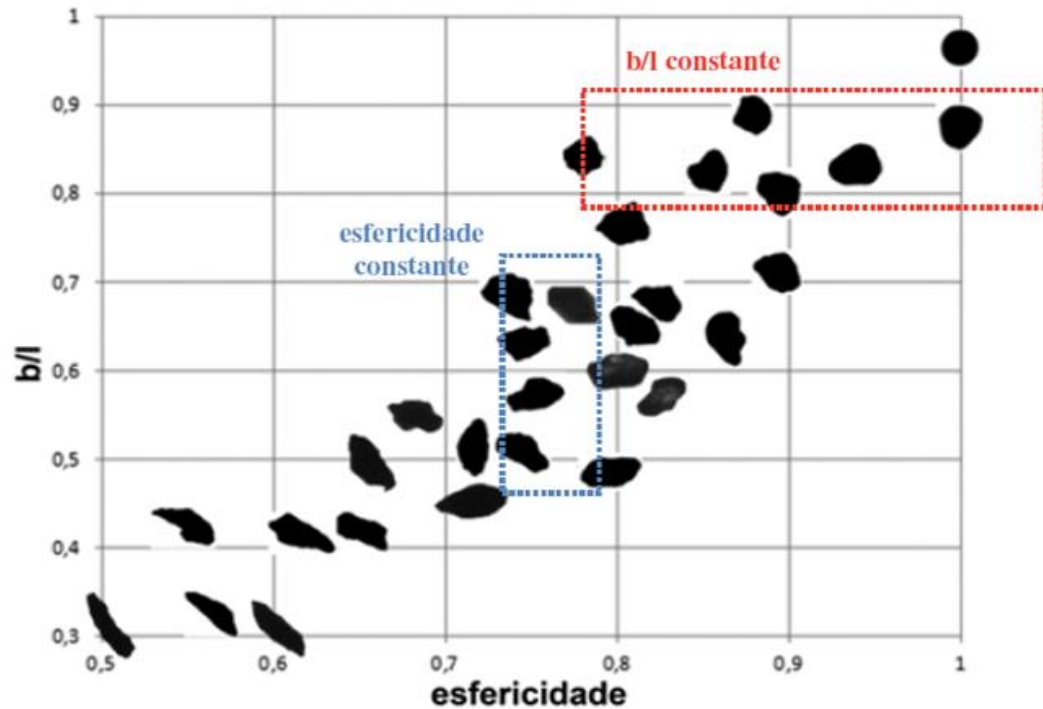
Peneira (mm) Nomenclaturas: NBR 9935, produtos comerciais					
38					
25,4		Brita 2 (31,5-19,1 mm)			
19,1					
12,7	Agregado Graúdo 75 - 4,75 mm		Brita 1 (25-9,5 mm)		
9,5					Pedrisco (12,7-4,8 mm)
6,3				Brita 0 (9,5-4,8 mm)	
4,75					
2,4		Areia Grossa (4,8-2,4 mm)			
1,2	Agregado Miúdo 4,75 - 0,075 mm		Areia Média (2,4-0,6 mm)	Pó de pedra (< 4,8 mm)	
0,6					
0,3					Areia Fina (1,2 - 0,075 mm)
0,15					
0,075					
< 0,075	Finos				

Distribuição granulométrica: como se determina os tamanhos das partículas?

Análise de Imagem Dinâmica



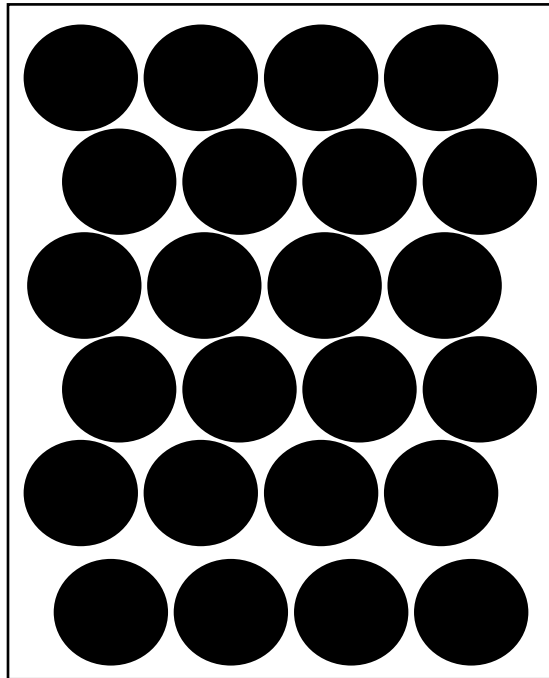
Morfologia pode ser determinada pela imagem das partículas



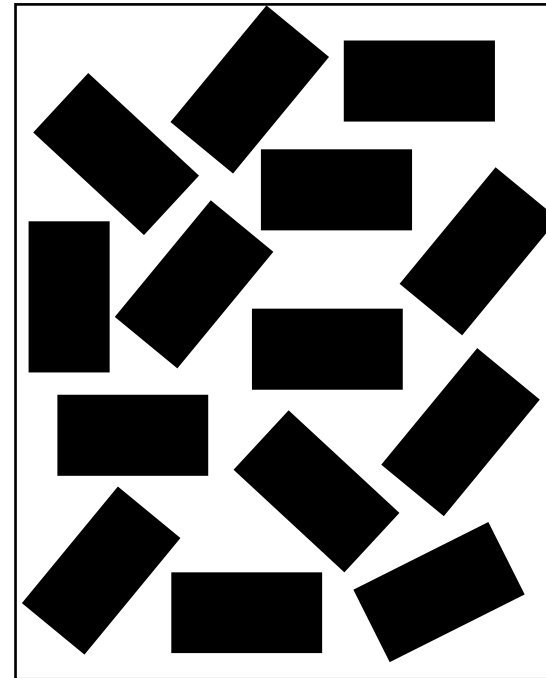
Hawlitcheck (2013); Revista Brasil Mineral, edição 329

$$Esfericidade = \frac{4\pi A}{(\text{Perímetro da partícula})^2}$$

Como a forma afeta o empacotamento?

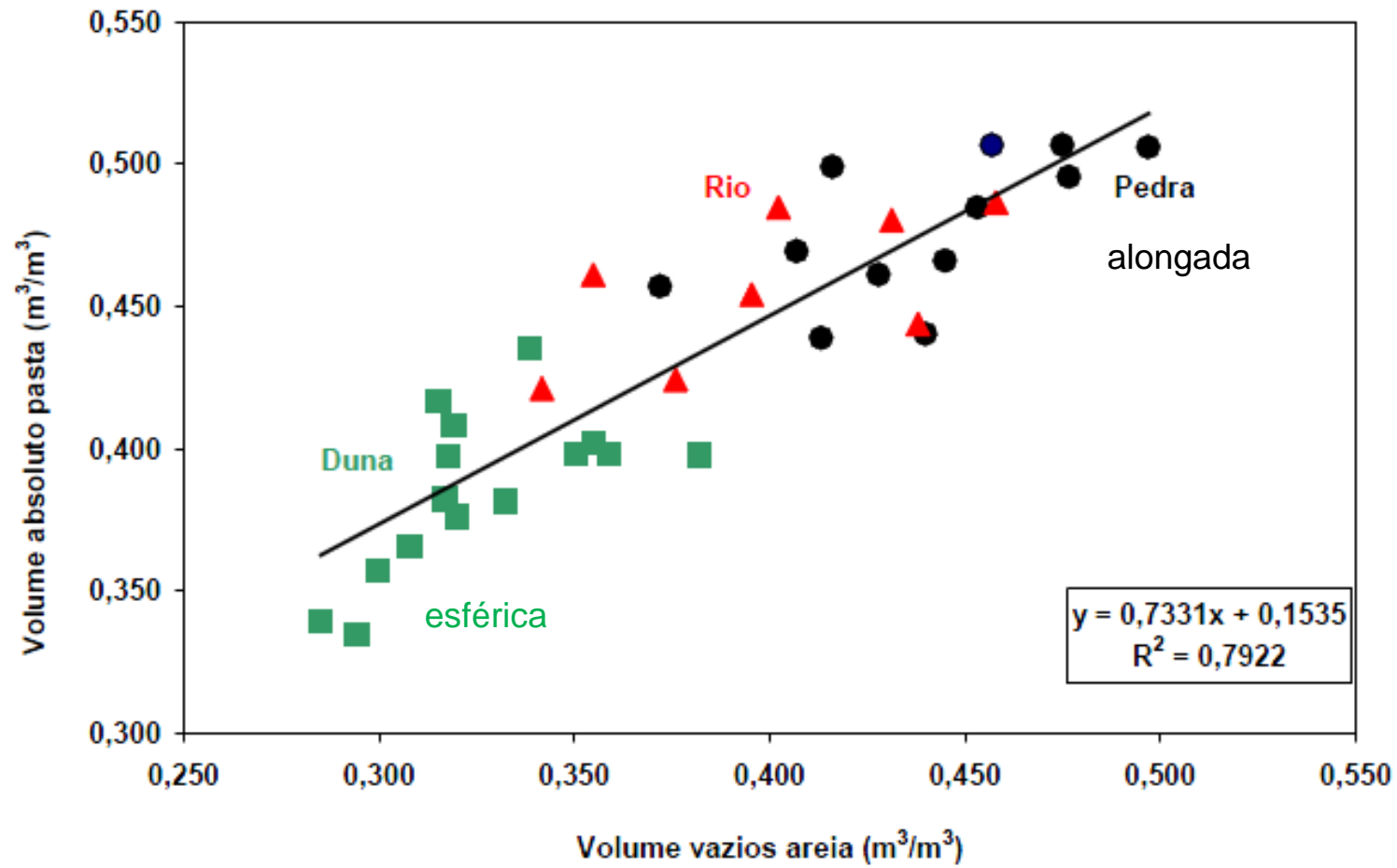


Menor índice de vazios
Movimentação facilitada



Maior índice de vazios
Movimentação dificultada

Efeito da forma no volume de pasta

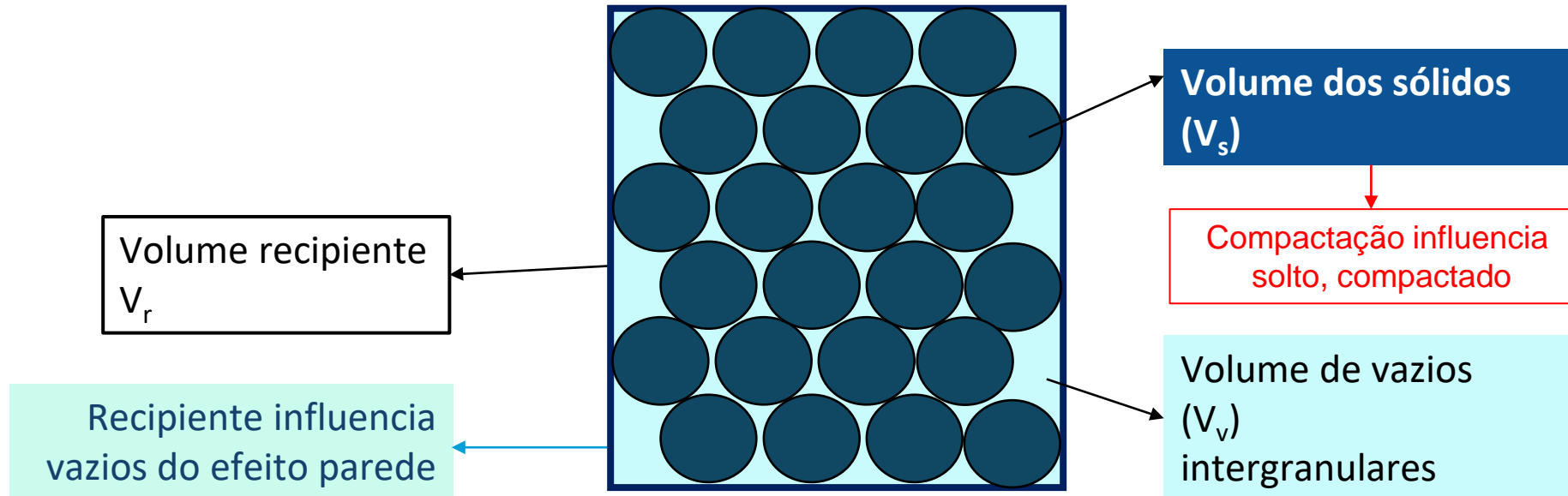


Resultados obtidos para argamassas – a partir de Tristão (2005)

Como medir as características físicas do agregado

Massa unitária (kg/dm³)

dm³ representa o recipiente



$$M_u = M / (V_v + V_s) = M / V_r$$

Útil para estimar volume de vazios que precisam ser preenchidos pelo volume de pasta.

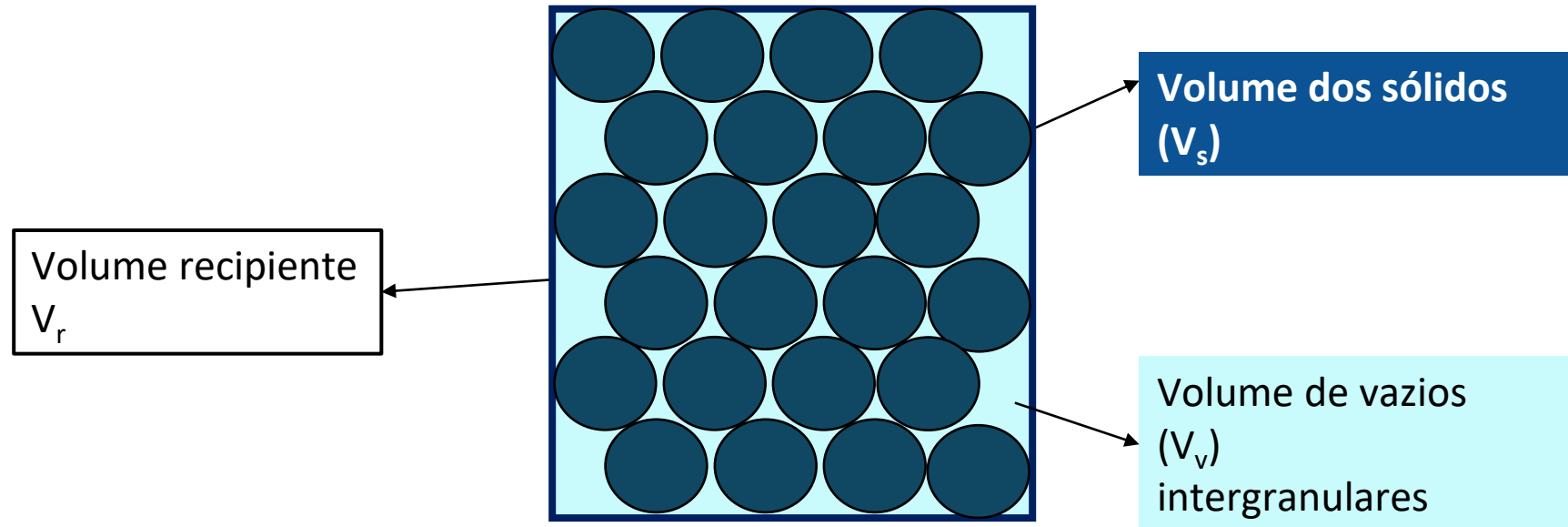
Também permitem medir massa de agregados sabendo o volume do recipiente.

Afetada pela energia de compactação e volume e forma do recipiente (efeito parede).

Nos agregados miúdos depende muito da umidade.

Densidade dos grãos (kg/dm³)

dm³ é espaço efetivamente ocupado pelos grãos



$$D_g = M/V_s = M/(V_r - V_v)$$

*Permite estimar o volume efetivamente ocupado pelos agregados dentro do concreto.
(Caso o agregado contenha poros internos estes podem influenciar o volume efetivo ocupado pelo agregado pois podem absorver água e até mesmo pasta)*

Massa unitária x Densidade: para que servem.



Massa unitária: estimar o tamanho de um recipiente (padiola) para uma massa de agregados (dosagem em volume). Estimar volume de depósito de materiais.

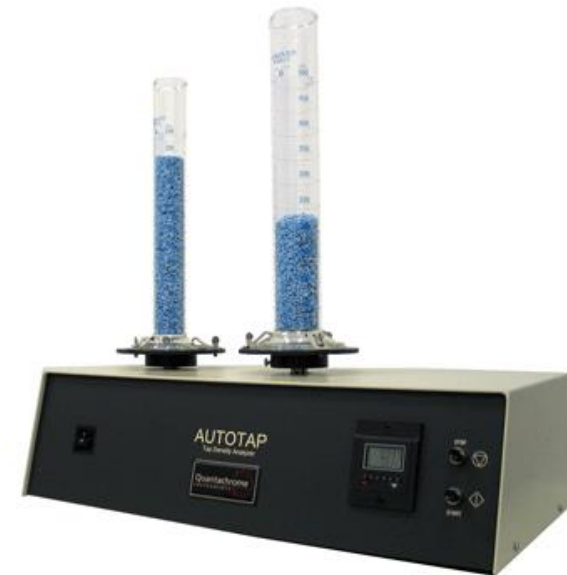


Densidade dos grãos: qual o espaço efetivamente ocupado pelos agregados; consumo de materiais kg/m^3 de concreto

Densidade aparente dos agregados

(estado solto ou compactado)

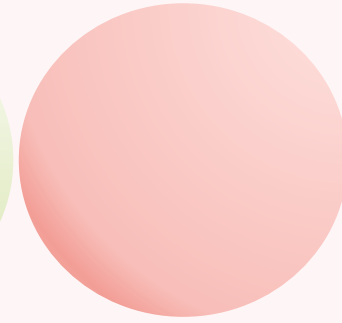
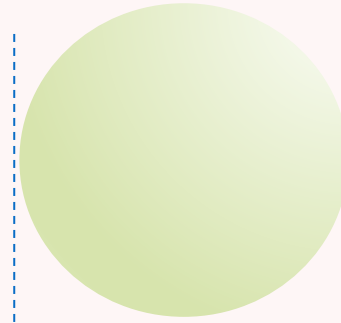
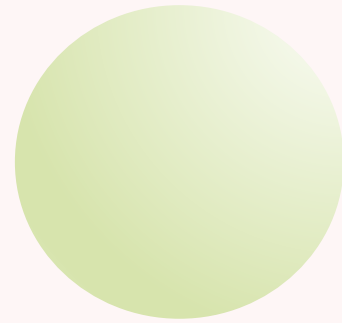
- *Bulk density* ou Massa unitária
- Densidade aparente (estado solto)
- Tap density (estado compactado)



$D_{ap} = \text{Massa de agregado (M)} / \text{volume do recipiente (V) preenchido}$

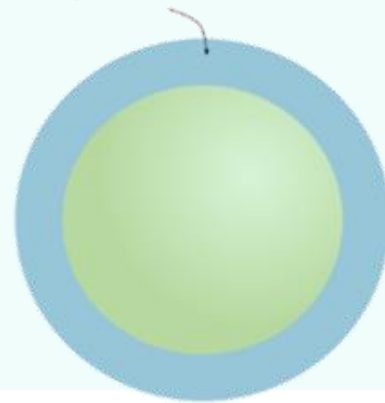
Efeito da massa umidade na massa unitária: pontes líquidas dão coesão e aumentam o volume aparente da areia

Partículas com superfície seca

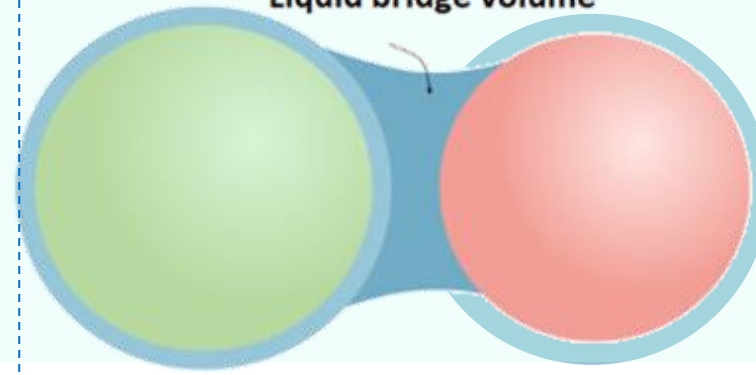


Partículas com superfície úmida

Liquid film volume



Liquid bridge volume



<https://www.ipc-dresden.de/agglomeration-59.html>

<https://rocky.esss.co/blog/liquid-bridge-model-accounting-for-liquid-film-in-wet-material-modeling/>

Inchamento da areia por umidade:

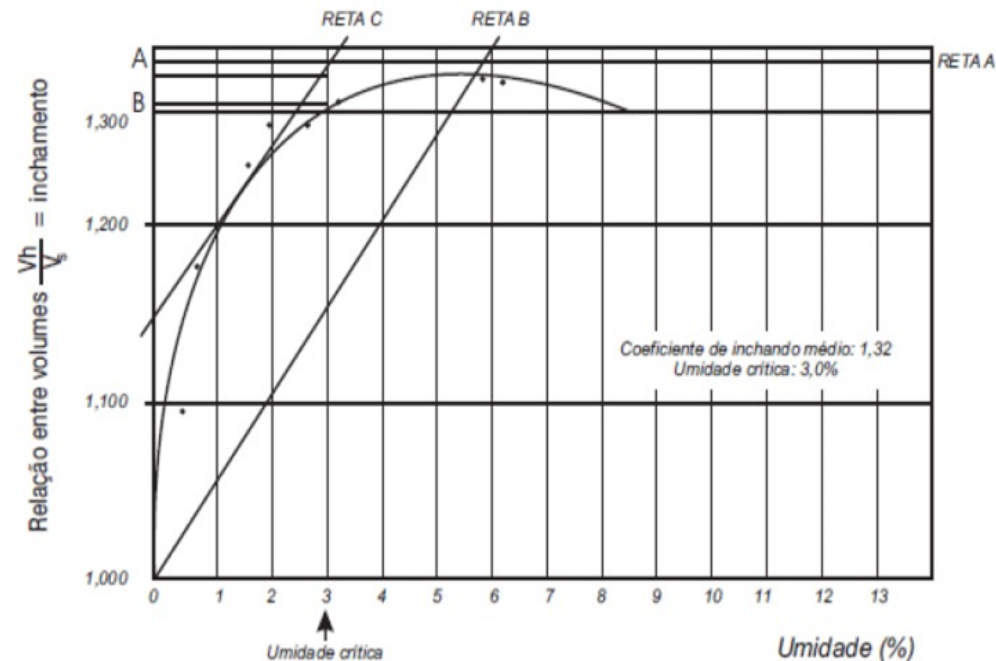
camada de água adsorvida afasta os grãos, afetando massa unitária



Seca

$h = 3\%$

$h = 6\%$

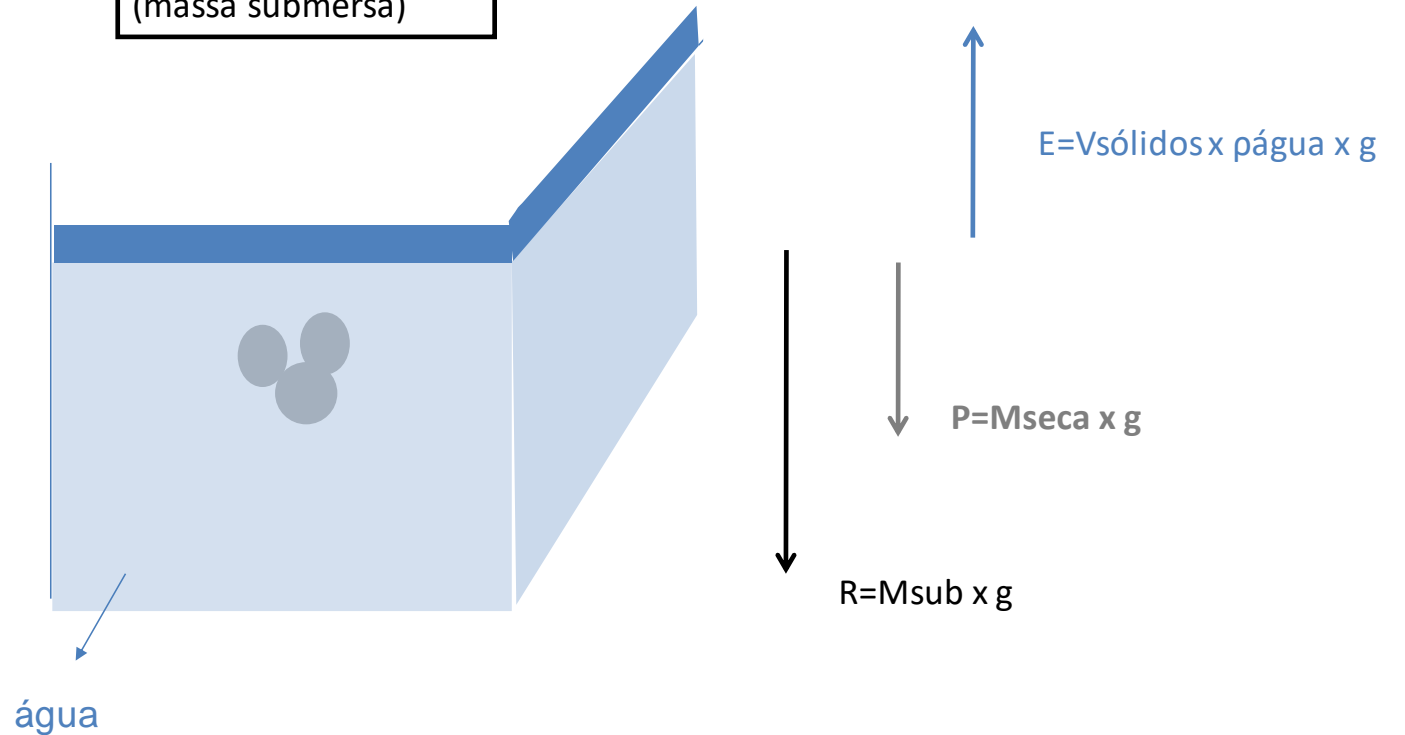


Aumento do Volume aparente da areia (estado solto)
Umidade afeta dosagem ou compra em volume aparente

Densidade dos agregados : balança hidrostática



Balança Hidrostática
(massa submersa)



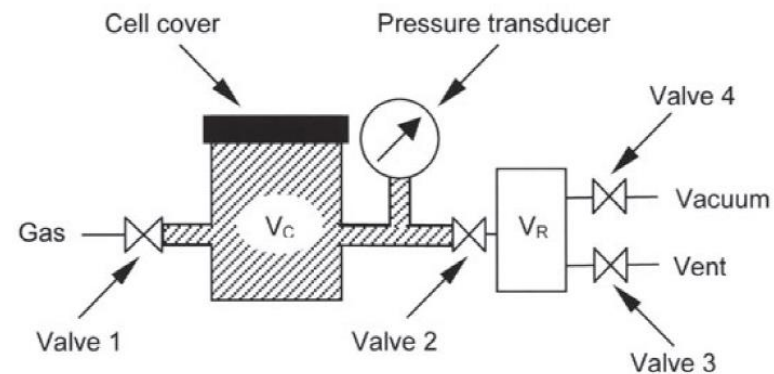
$$\text{Densidade} = \frac{M_{\text{seca}}}{(M_{\text{seca}} - M_{\text{sub}})} \times \rho(\text{água})$$

$$Vol_{\text{agregados}} = \frac{M_{\text{seca}} - M_{\text{sub}}}{\rho_{\text{água}}}$$

Densidade dos grãos

Picnômetro (gás Hélio)

Determinação do **volume ocupado** pelos sólidos através de **medidas indiretas** → diferença de pressão de gás hélio em uma dada unidade de volume (célula), quando vazia e quando preenchida com o sólido.



Lei de Boyle-Mariotte

$$PV=nRT$$

$$P_1V_1=P_2V_2$$

$$\frac{\text{Vol amostra}}{\text{Vol célula}} = \frac{P_1}{P_1 - P_2}$$

$$D = \frac{\text{Massa}}{\text{Vol amostra}}$$

Estimando a porosidade intergranular a partir da massa unitária e densidade dos grãos

1.
$$\text{Porosidade} \left(\frac{dm^3}{dm^3} \right) = \frac{V_{\text{recip}} - V_{\text{sólidos}}}{V_{\text{recip}}}$$

2.
$$\text{Porosidade} \left(\frac{dm^3}{dm^3} \right) = 1 - \frac{V_{\text{sólidos}}}{V_{\text{recip}}}$$



Substituindo.....
 $V_{\text{sólidos}} = \text{Massa} / \text{Densidade dos grãos}$
 $V_{\text{recipiente}} = \text{Massa} / \text{Massa unitária}$

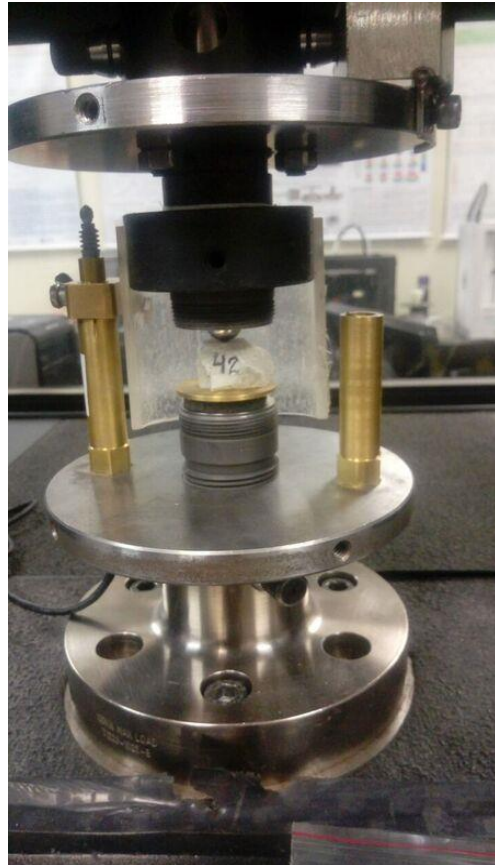
3.
$$V_{\text{vazios}} = 1 - \frac{Mu \cdot M}{Dg \cdot M}$$

4.
$$\text{Porosidade} = 1 - \frac{Mu}{Dg}$$

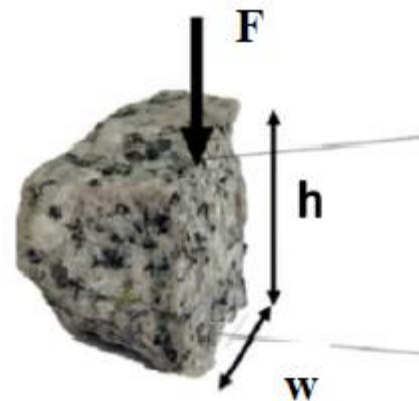
Exercício 2

- Estime os volumes de vazios nas duas situações abaixo, desprezando a porosidade interna dos grãos. Analise as diferenças.
- Situação I (areia de quartzo)
 - Densidade aparente (estado solto) = $1,43 \text{ kg / dm}^3$
 - Densidade real = $2,67 \text{ kg / dm}^3$
- Situação II (esferas de aço)
 - Densidade aparente (estado solto) = $4,43 \text{ kg / dm}^3$
 - Densidade = $7,67 \text{ kg / dm}^3$

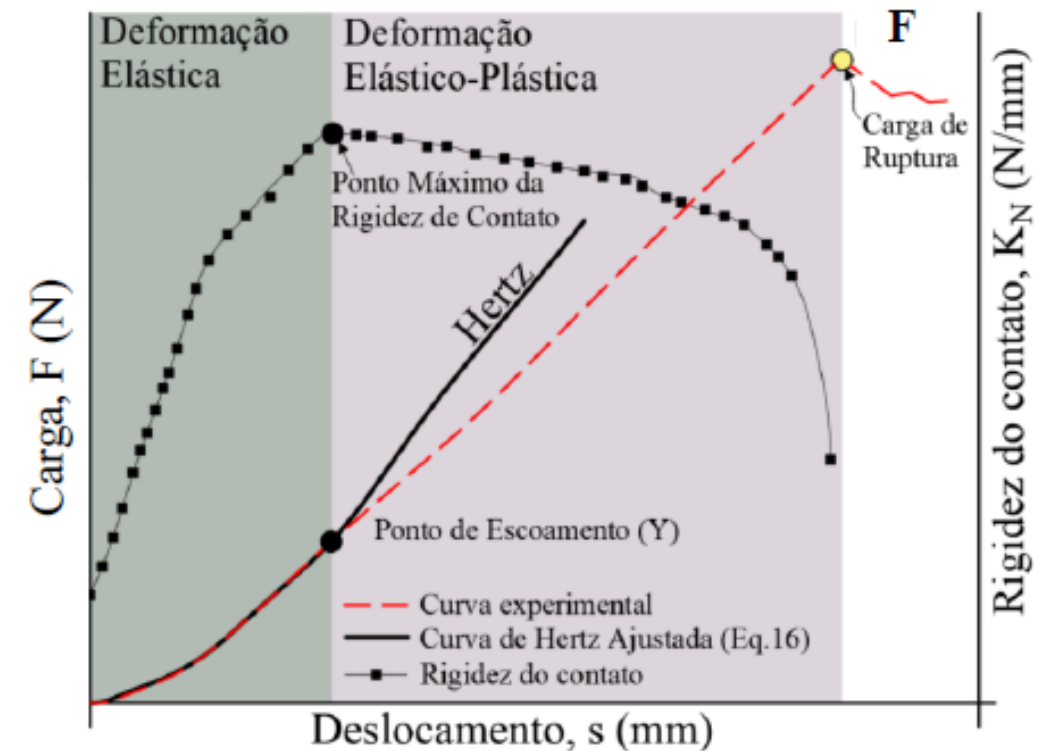
Resistência e módulo de elasticidade de grãos: método desenvolvido equipe Prof Sergio Angulo



$$\sigma_t = \frac{0,9 F}{h^2}$$



$$K_e = \frac{(1 - \nu_{ap}^2)}{E_{ap}} + \frac{(1 - \nu_{am}^2)}{E_{am}}$$



Exercício 3

- Determine o módulo de elasticidade de um concreto convencional.
 - Módulo da pasta = 15 GPa
 - 70% do volume de agregados de calcário.
 - Módulo do calcário = 40 GPa
- Compare com o concreto com o mesmo volume de agregados de basalto.
 - Módulo do basalto = 80 GPa

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - V_a}{E_m} + \frac{V_a}{E_a}$$

Fração volumétrica de pasta

Fração volumétrica de agregado

Módulo do concreto

Módulo da pasta de cimento

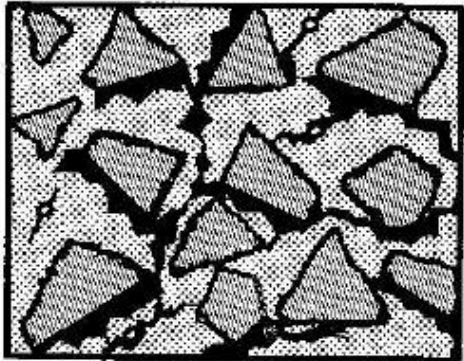
Módulo do agregado



<https://forms.gle/4DZSHngj12iFyoCCA>

Quanto maior o volume e módulo elástico do agregado menor a retração e fluência do concreto!

Resistência do Concreto: efeito dos agregados

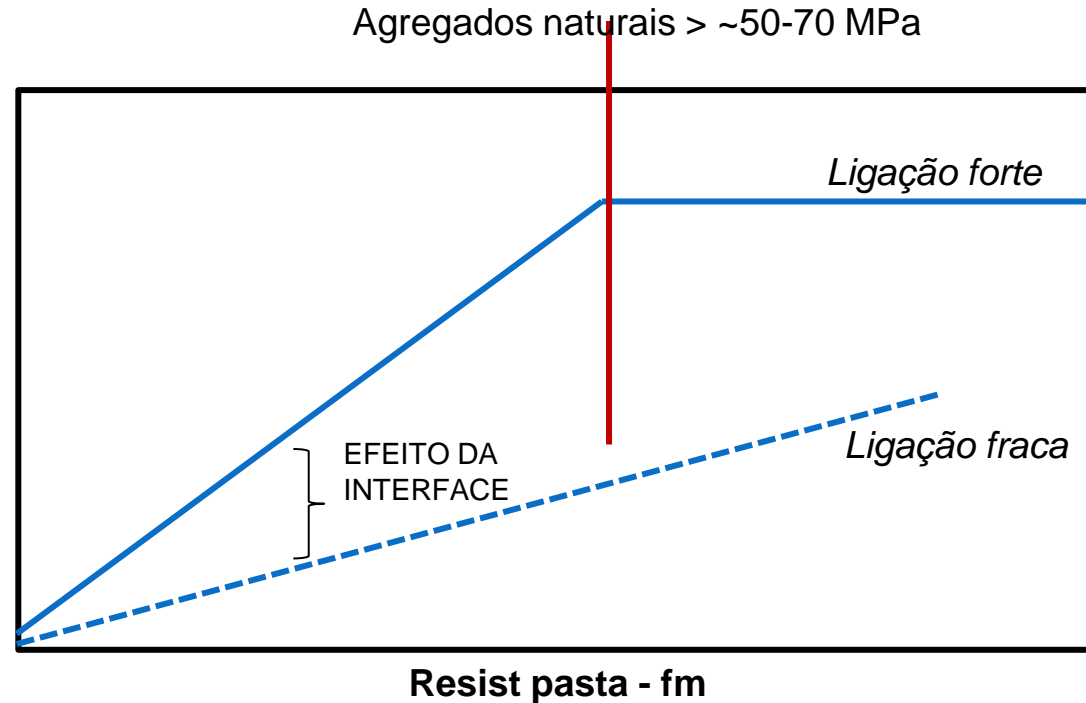


fratura da pasta e contorno de agregados. Mais dútil.

Concreto <50MPa



Resist concreto - f_c



fratura frágil rompe agregados e pasta.

EX: Concreto >50MPa

Exercício 4

Seria viável usar exclusivamente cimento para produzir materiais cimentícios?



<https://forms.gle/CwNyd5BVUAZdpeqM8>

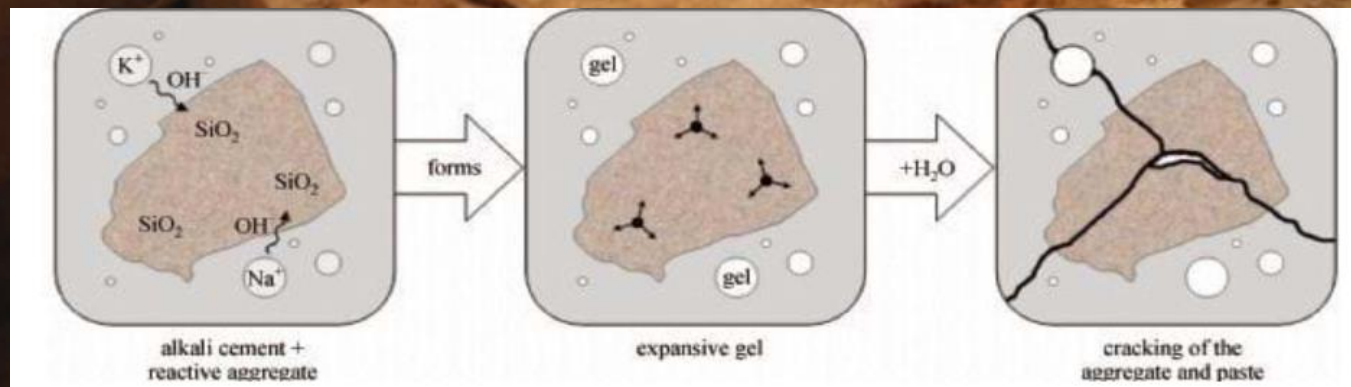
Reação álcali-agregado (RAA)



Tibério Wanderley C. de O. Andrade, José Jeferson do Rêgo Silva
PROFESSORES DA UFPE

Reação álcali-agregado (RAA)

- RAA no edifício residencial em Boa Viagem
- Idade: 09 anos março de 2004



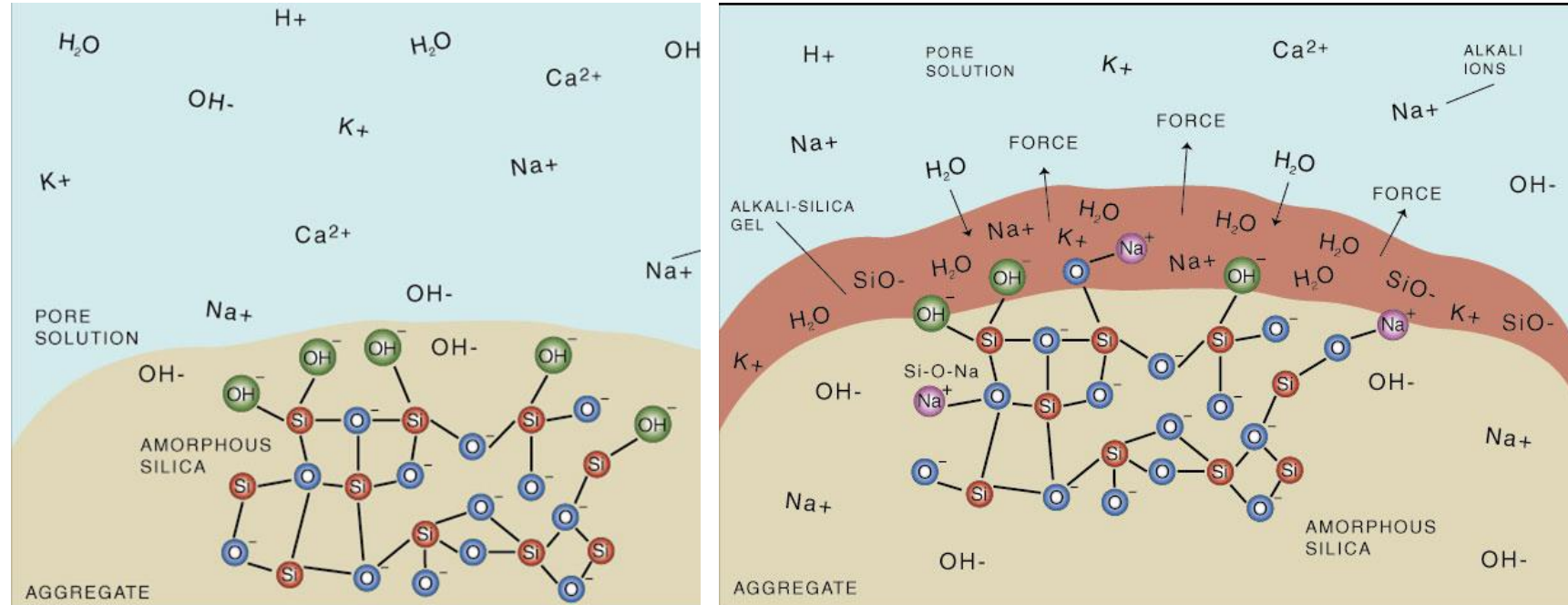
Dissolution of reactive silica

Formation of alkali-silica gel

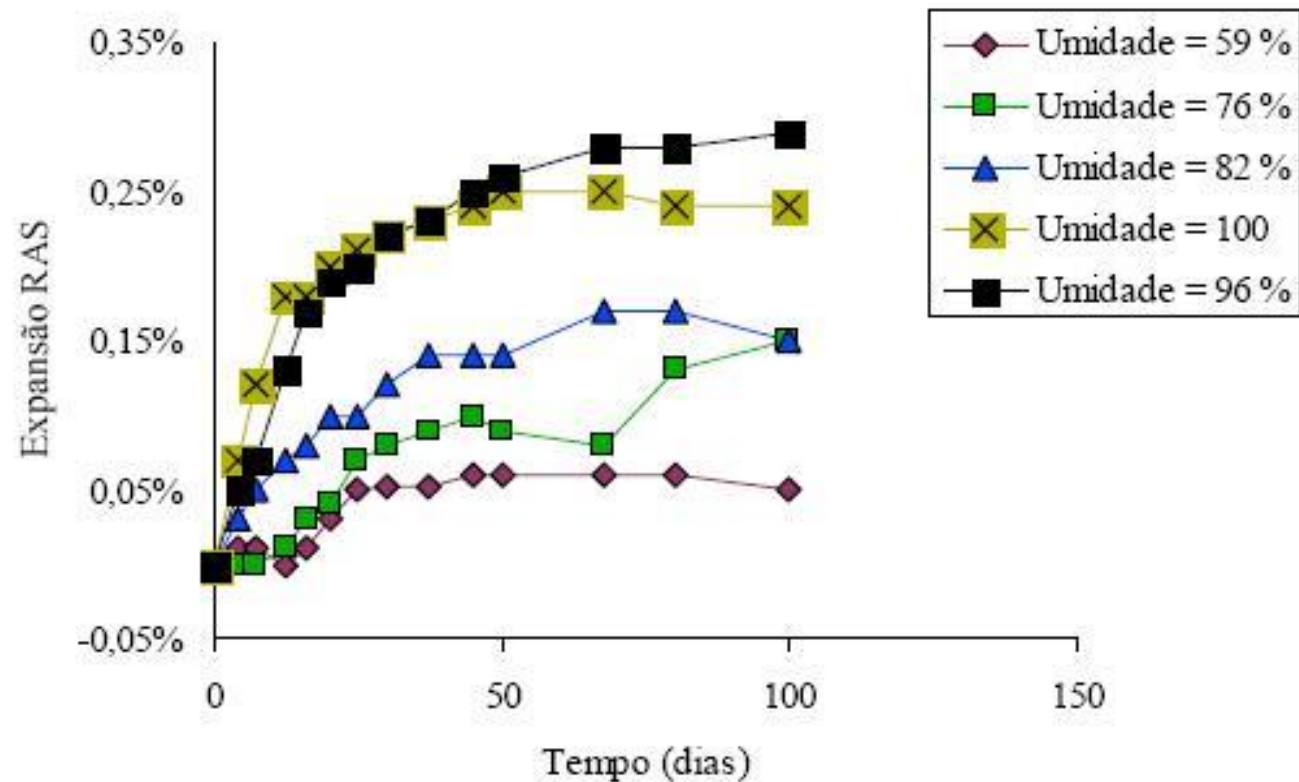
Expansion of alkali-silica gel by absorbing of water

Reação álcali-agregado: a estabilidade química no tempo

- Reação química dos álcalis do cimento com sílica reativa dos agregados, que forma um gel que se expande ao absorver quantidades crescentes de água
- O processo é **muito lento**. Precisa ser monitorado por **investigação petrográfica, testes de expansão no tempo, formas de mitigar**



Reação álcali-agregado depende da umidade



Expansão devida à RAS em amostras de argamassa submetidas a diferentes umidades relativas (FORAY et.al. 2004).

Condições para evitar a reação

- Garantir que o agregado não é reativo
 - Fazer análise petrográfica
 - Fases que contenham sílica reativa (biotita, filonita, ...)
 - Medir expansibilidade acelerada (banhos térmicos, 60 graus) em barras de argamassa
- Selecionar cimento com baixo teor de álcalis no cimento
 - Priorizar cimentos com escória (CP III) ou pozolanas (CPIV) (menos álcalis)
 - Evitar CP V
- Evitar Umidade

Agregados nos materiais cimentícios

1. Define o módulo elástico (variação dimensional recuperável)

- Módulo dos agregados \gg Módulo da pasta de cimento
- Vol. Agregados $>$ Vol. pasta

2. Reduz a retração e fluência (def. lenta) do concreto

3. Resistência do agregado pode limitar a do concreto (elevada resistência)

Estado endurecido

4. Reduz volume de vazios (empacotamento)

- Redução do consumo de pasta (cimento e água)

5. Interfere no comportamento reológico do concreto

- Área superficial, atrito (rugosidade), pode ter porosidade (reciclados)

Ecoeficiência/
Estado fresco

6. Estabilidade Química

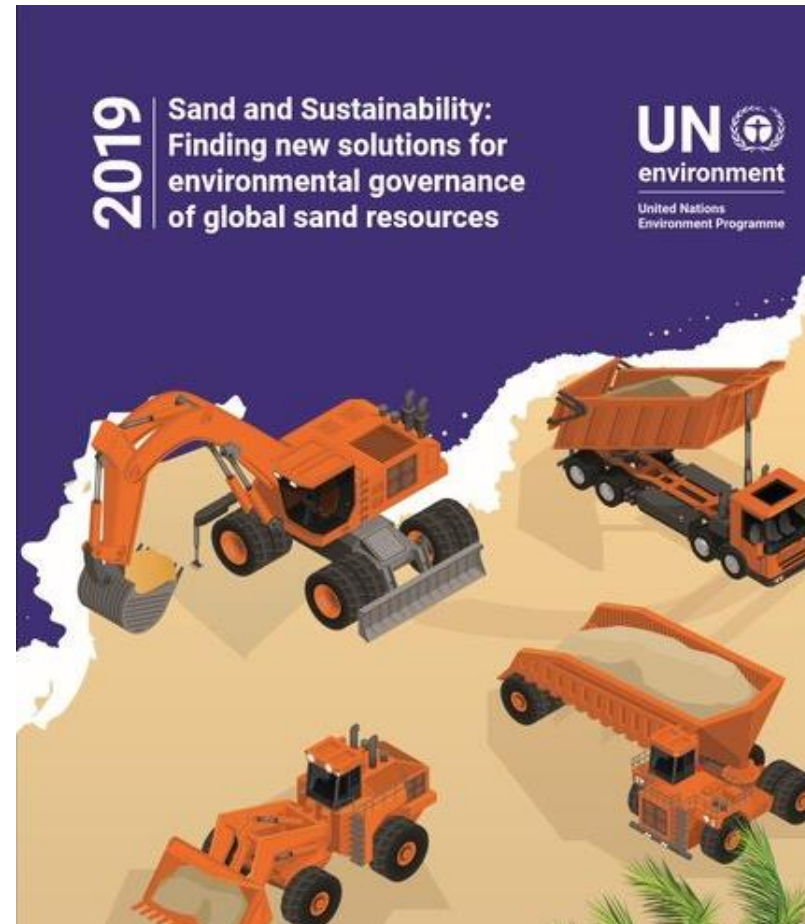
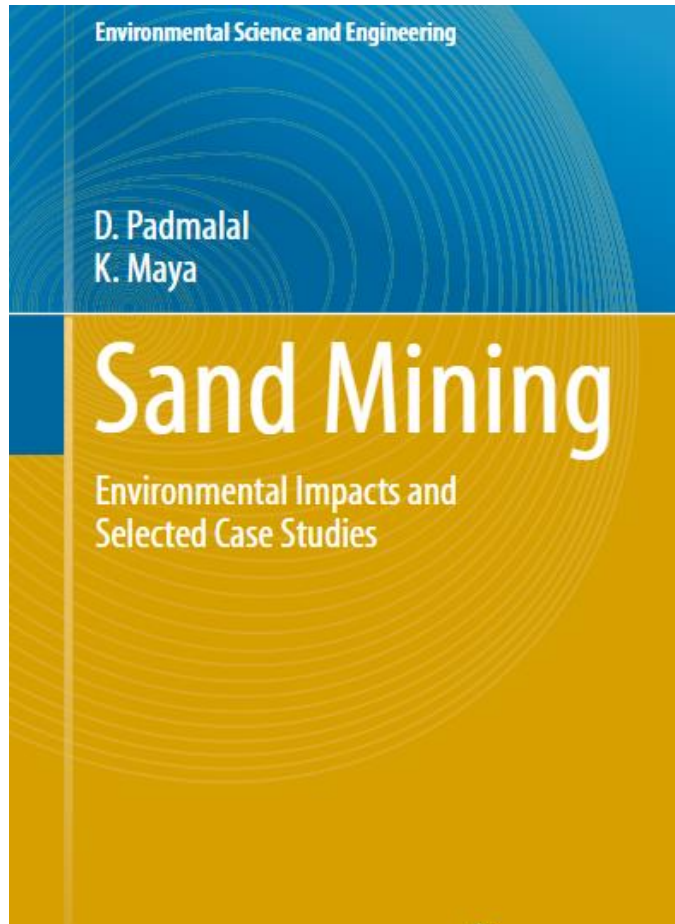
Durabilidade

Impactos ambientais

Pegada de CO2 e Energia

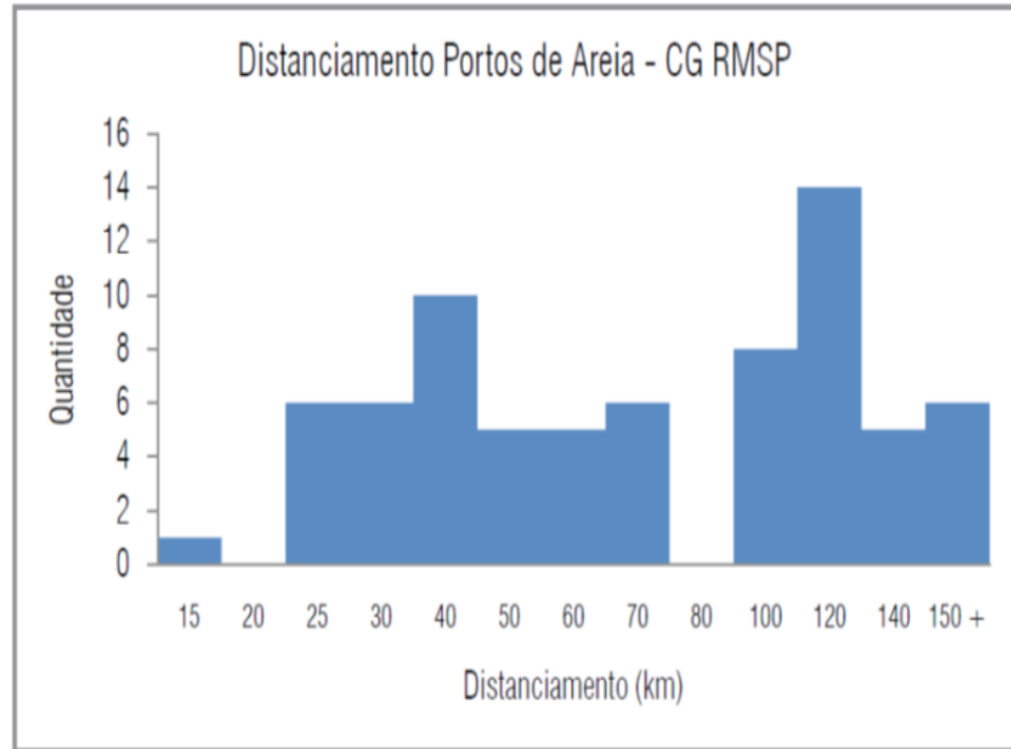
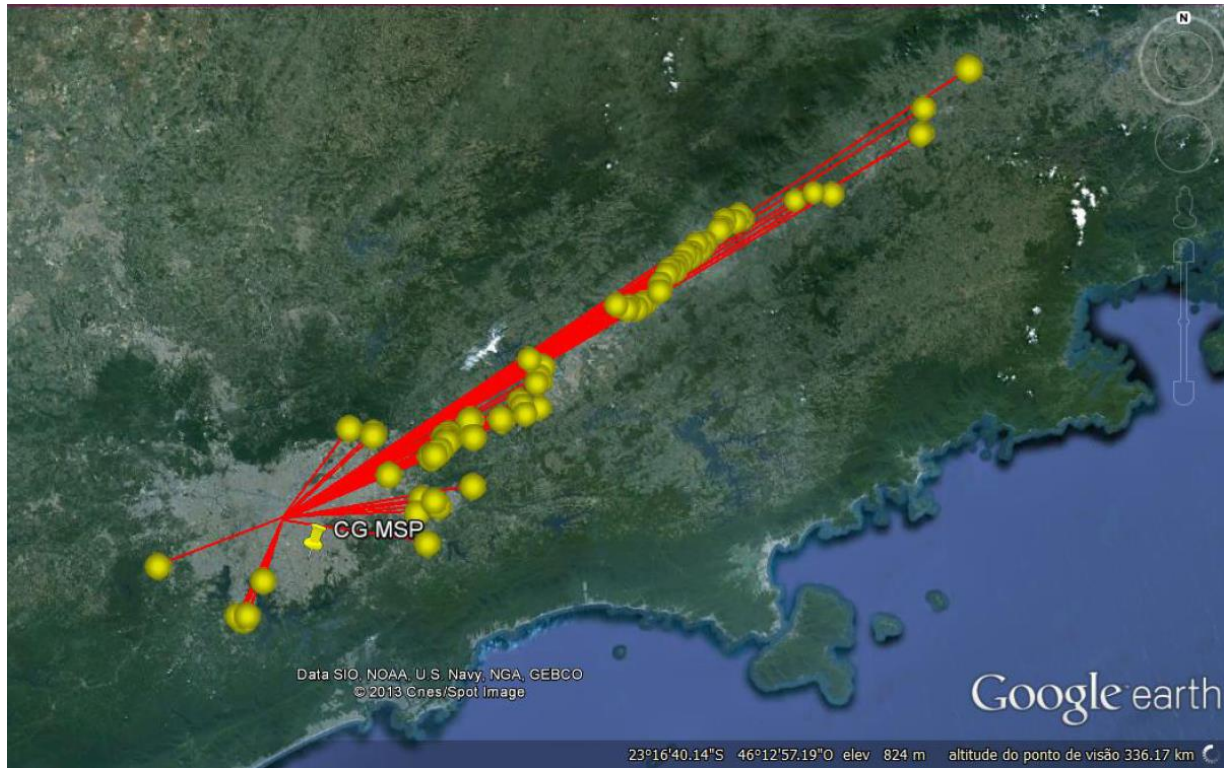
- Agregados naturais:
 - Energia de desmonte (explosivos, bombas, equipamentos diesel..)
 - Energia de britagem e peneiramento (eletricidade)
 - Distancia de transporte
- Areia: <12kgCO2/t; <19MJ/t
- Brita: <4,7kgCO2/t; 2-9MJ/t (<https://sidac.org.br/produtos/36>)

Areia: escassez local, impactos ambientais

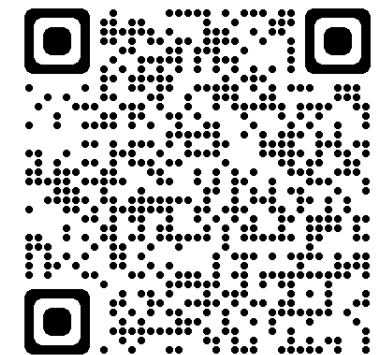


Não existe reposição completa dos sedimentos (fração extraída).
Rio alaga áreas cultiváveis, aumenta turbidez da água, aumenta salinidade

Custo alto e CO2 impactado por logística



Extração ilegal Seropédica, RJ: destruição da natureza & acidificação dos aquíferos



Marques, E. D., Tubbs, D., Gomes, O. V. O. & Silva-Filho, E. V. Influence of acid sand pit lakes in surrounding groundwater chemistry, Sepetiba sedimentary basin, Rio de Janeiro, Brazil. *J. Geochem. Explor.* **112**, 306–321 (2012).

<https://revistamineracao.com.br/2016/12/22/extracao-ilegal-de-areia-no-brasil/>



1



2

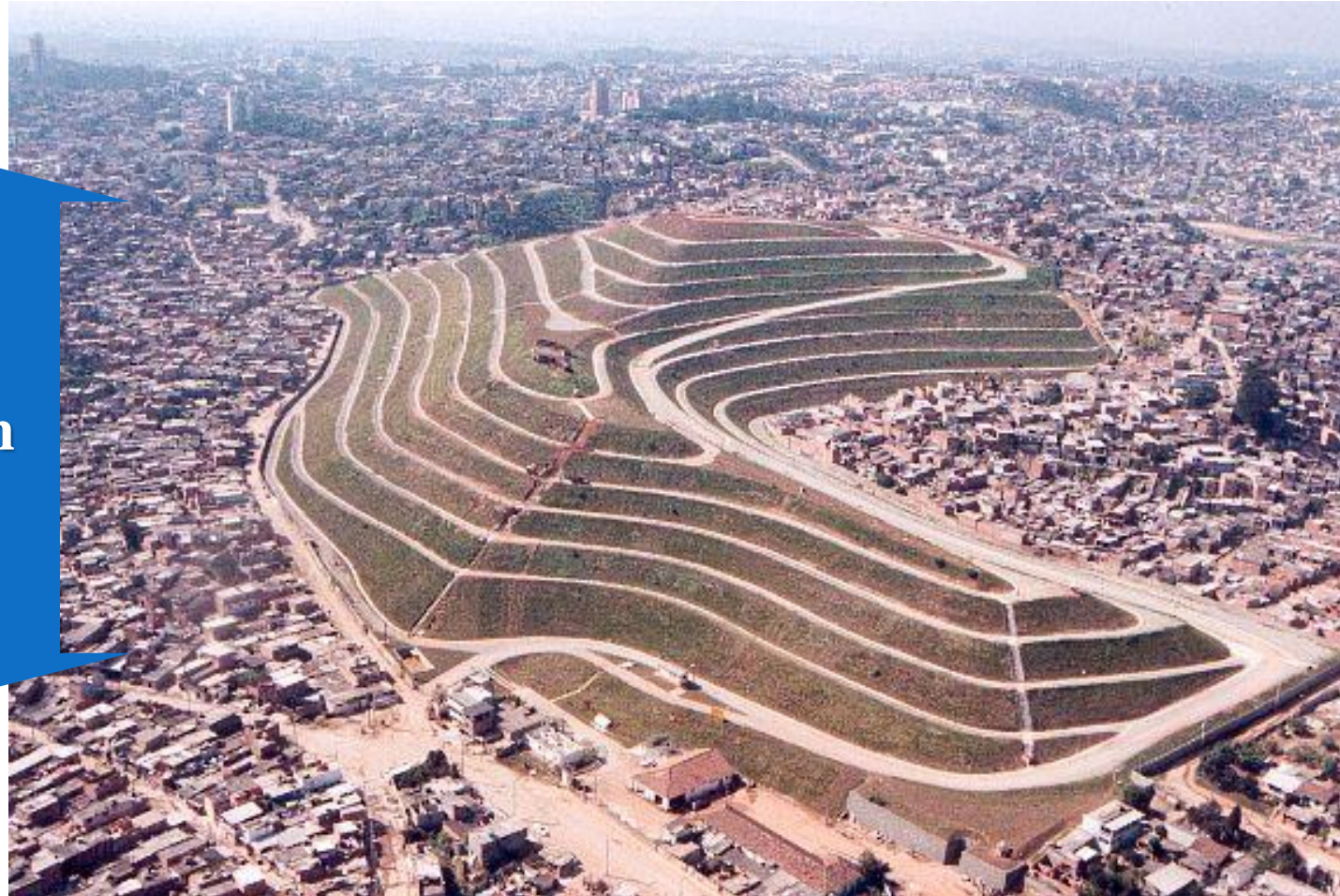
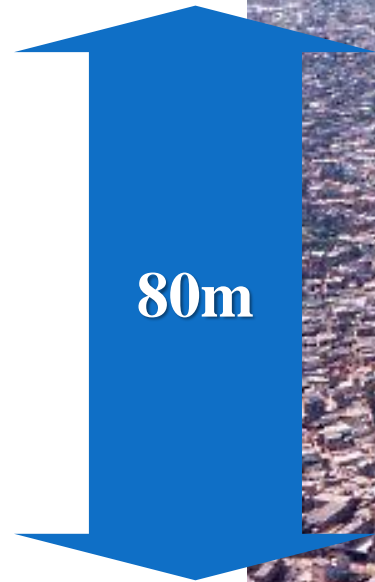


3



4

Resíduos da construção são majoritariamente agregados



Resíduos como agregados: RCD reciclados, finos de pedreira



Agregados naturais: extração de rochas, britagem e peneiramento. finos residuais são gerados



Agregados reciclados de resíduos de construção: seleção, triagem, britagem, peneiramento

Exercício 5

- (I) Estime as densidades dos concretos, a partir dos constituintes, assumindo estes como sólidos contínuos.
- (II) Calcule os consumos dos materiais para 1 m³ de concreto.

Materiais secos	Concreto 1	Concreto 2	Concreto 3
Cimento (kg)	12,22	9,17	7,33
Areia (kg)	16,92	19,99	21,81
Brita (kg)	25,84	25,86	25,84
Água (kg)	5,40	5,35	5,55

Densidade do cimento = 3,1 kg/dm³

Densidade da areia = 2,65 kg/dm³

Densidade da brita = 2,67 kg/dm³

Densidade da água = 1,00 kg/dm³

$$D_{concreto} = \frac{\sum \text{Massa materiais}}{\sum \text{Volume materiais}}$$

Exercício 6: fazer em casa, entrega via moodle

- Estime os volumes das fases dos dois traços de concreto.
- Estime a porosidade das pastas e dos concretos (100% de hidratação).

	Densidade (g/cm ³)	Traço 1 (% Massa)	Traço 2 (% Massa)
Cimento	3,1	15	10
Areia	2,6	25	31
Brita	2,6	52	52
Água	1	8	7

- Qual concreto seria o mais resistente? E qual seria o menos deformável?

Bibliografia

- Angulo, S.C. Agregados. In: João Fernando Dias. (Org.). BAUER - Materiais de Construção - Volume 1. 6ed.: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2019, v. 1, p. 1-37.