BETÕES ESTRUTURAIS COM AGREGADOS RECICLADOS

Jorge de Brito jb@civil.ist.utl.pt
Rui Vasco Silva rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt

TÉCNICO LISBOA

Agregados reciclados: Barreiras à utilização

Agregados reciclados: Barreiras à utilização

- Agregados reciclados são o produto certificado da triagem, trituração e processamento de resíduos de construção, demolição e de escavações.

Agregados reciclados:
Barreiras à utilização

Segregação de resíduos inadequada na origem

- Implementação de demolição selectiva

Agregados reciclados:
Barreiras à utilização

Oferta e/ou procura insuficientes

- Banir aterros
- Adaptar taxas nas centrais de RCD
- Melhorar o controlo do transporte de RCD
- Aumentar taxas ambientais relativas à extracção de agregados naturais

Agregados reciclados:
Barreiras à utilização

<u>Baixa qualidade de agregados reciclados</u>

- Triagem melhorada dos RCD
- Processos de tratamento actualizados
- Classificação de agregados com base no desempenho

Materials and Structures, 1994, 27, 557–559

RILEM RECOMMENDATION:
RECOMMANDATION DE LA RILEM

121-DRG GUIDANCE FOR DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY
RECOMMANDATIONS POUR LA DÉMOLITION ET LE RECYCLAGE DU BÉTON ET DES MAÇONNERIES

Specifications for concrete with recycled aggregates

These specifications were prepared by Task Force 1 of RILEM TC 121-DRG in a draft version which was presented for comments at the 3rd International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Odense, 24–27 October 1993. Taking due account of the comments received the specifications have been amended and now constitute a RILEM Recommendation.

1. SCOPE OF THE DOCUMENT

This document is a RILEM recommendation dealing with recycled coarse aggregates (>4 mm for concrete. The specifications are based on the assumption that the fine (<4 mm) fraction of the concrete is composed of materials whose traditional specifications for this material are well known. Recycled fine aggregates are not to be used as substitute for the natural sand or parts thereof as long as the above mentioned material specifications are not available for the recycled fine aggregates. In addition, the same requirements concerning the coarse aggregates as for coarse aggregate according to Table 1 apply if the sand fraction contains recycled materials.

These specification classify different categories for the recycled aggregates according to their use. The use of application for concrete containing these recycled aggregate classes in terms of acceptable environmental exposure classes and strength classes for concrete in accordance with Eurocode 2, "Design of Concrete Structures" (ENV 1992-1-1:1991). Limits of the properties for the different categories are defined in relation to the applied aggregate class.

2. CLASSIFICATION

Recycled coarse aggregates are classified into the three following categories.

Type I aggregates which are implicitly understood to originate primarily from masonry rubble.

Type II aggregates which are implicitly understood to originate primarily from concrete rubble.

Type III aggregates which are implicitly understood to consist of a blend of recycled aggregates and natural aggregates.

This classification of the materials is based on the mandatory requirements stated in Table 1.

The composition of type III aggregates shall meet the following additional requirements:

- the maximum content of natural aggregates is at least 80% (m/m)
- the maximum content of type I aggregates is 10% (m/m)

Table 2 lists the material properties for which requirements can be specified. Such requirements are not mandatory unless specified in national documents or CEN standards.

The recycled aggregate must not contain any material or any other substances which retard the setting of the concrete or which, in the quantities used, have a harmful effect on the chemical composition with traditional aggregates, or which are detrimental to the concrete.

Table 1 and 2 contains requirements related to environmental aspects which must be satisfied. Such requirements may concern:

- the contamination of the aggregates by heavy metals, PAC,
- leaching characteristics, and
- radiation.

Agregados reciclados:
Barreiras à utilização

Falta de normas/especificações e legislação actualizadas

BRITISH STANDARD

Aggregates for concrete

BSI

E 471 - 2009

ESPECIFICAÇÃO LNEC

GUIA PARA A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS GROSSOS EM BETÕES DE LIGANTES HIDRÁULICOS

- Actualizar documentos normativos com descobertas mais recentes
- Maior homogeneidade nas especificações para utilização de agregados reciclados no betão

Agregados reciclados:
Barreiras à utilização

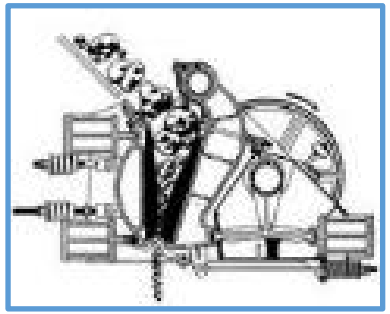
Falta de conhecimento dos utilizadores

- Marketing “verde”
- Aumentar aplicações reais
- Cursos especializados

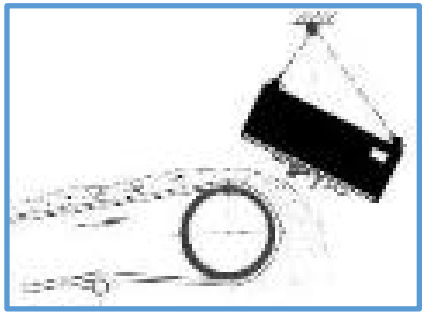
Agregados reciclados: Produção

Agregados reciclados: Produção

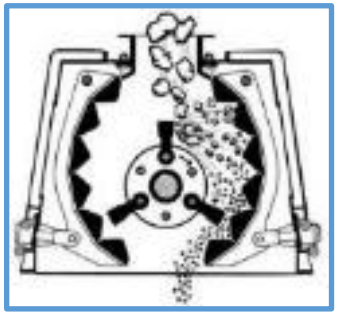
- Tratamento dos resíduos de construção e demolição.



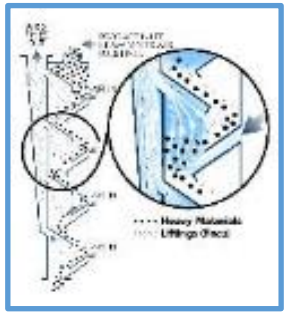
Redução de tamanho com trituradora de maxilas



Remoção eletromagnética de metais ferrosos



Redução de tamanho com moinho de martelos



Remoção de partículas leves

Agregados reciclados: Produção

- De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente, existem centenas de operadores que tratam de RCD.
- Um estudo feito às propriedades dos agregados reciclados destas empresas mostrou uma dispersão significante

Sample	Maximum value	AMB-c	AMB-m	ARV	RTR	SGR#1	SGR#2	TRI	VAL	VIM#1	VIM#2
Water content (wt%)	–	10.06	4.71	2.16	1.96	3.70	2.06	5.58	3.53	6.01	5.02
Particles density (kg/m^3)	–	2685	2601	2646	2573	2638	2647	2649	2653	2644	3059
Oven-dry density (kg/m^3)	–	2225	2340	2191	2284	2321	2382	2138	2358	2230	2671
Saturated surface-dry density (kg/m^3)	–	2396	2441	2363	2396	2441	2482	2331	2469	2387	2798
Bulk density (kg/m^3)	–	1354	1442	1332	1256	1383	1286	1306	1387	1291	1321
Void content (v%)	–	39.1	38.4	39.2	45.0	40.4	46.0	38.9	41.2	42.1	50.5
Water content (wt%)	7	7.1	4.1	7.3	4.7	4.9	4.0	8.3	4.5	6.6	5.5
Fines content (g/kg)	2	0.73	1.11	1.29	1.40	3.08	3.20	1.18	1.11	3.37	2.48

Sample	Maximum value	AMB-b	AMB-m	ARV	RTR	SGR#1	TRI	VAL	VIM#1
Water soluble chlorides (%)	0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Water soluble sulphates (%)	1	0.03	0.14	0.11	0.18	0.25	0.14	0.13	0.16
Acid soluble sulphates (SO_3 %)	0.2/0.8	0.32	0.6	0.41	0.77	1.53	0.77	0.27	0.91
Total sulphur content (%)	1	0.06	0.11	0.1	0.34	0.6	0.29	0.03	0.00
Light contaminants (%)	0.25	1.20	1.60	0.60	17.10	2.30	3.10	1.00	0.28
Water solubility (%)	10	2.0	1.7	1.1	1.6	1.9	3.4	2.7	2.7

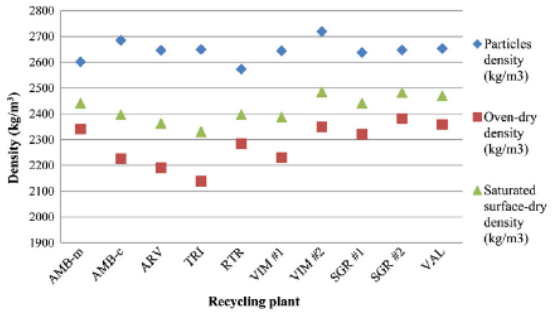
Fonte: Rodrigues et al. (2013)

Agregados reciclados: Produção

- A aplicação de diferentes processos de tratamento (ou inexistência de alguns) resulta numa variação considerável na propriedades físicas e químicas dos agregados reciclados.

Sample	Maximum value	AMB-b	AMB-m	ARV	RTR	SGR#1	TRI	VAL	VIM#1
Water soluble chlorides (%)	0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Water soluble sulphates (%)	1	0.03	0.14	0.11	0.18	0.25	0.14	0.13	0.16
Acid soluble sulphates (SO_3 %)	0.2/0.8	0.32	0.6	0.41	0.77	1.53	0.77	0.27	0.91
Total sulphur content (%)	1	0.06	0.11	0.1	0.34	0.6	0.29	0.03	0.00
Light contaminants (%)	0.25	1.20	1.60	0.60	17.10	2.30	3.10	1.00	0.28
Water solubility (%)	10	2.0	1.7	1.1	1.6	1.9	3.4	2.7	2.7

Dispersão considerável



Fonte: Rodrigues et al. (2013)

Agregados reciclados: Produção

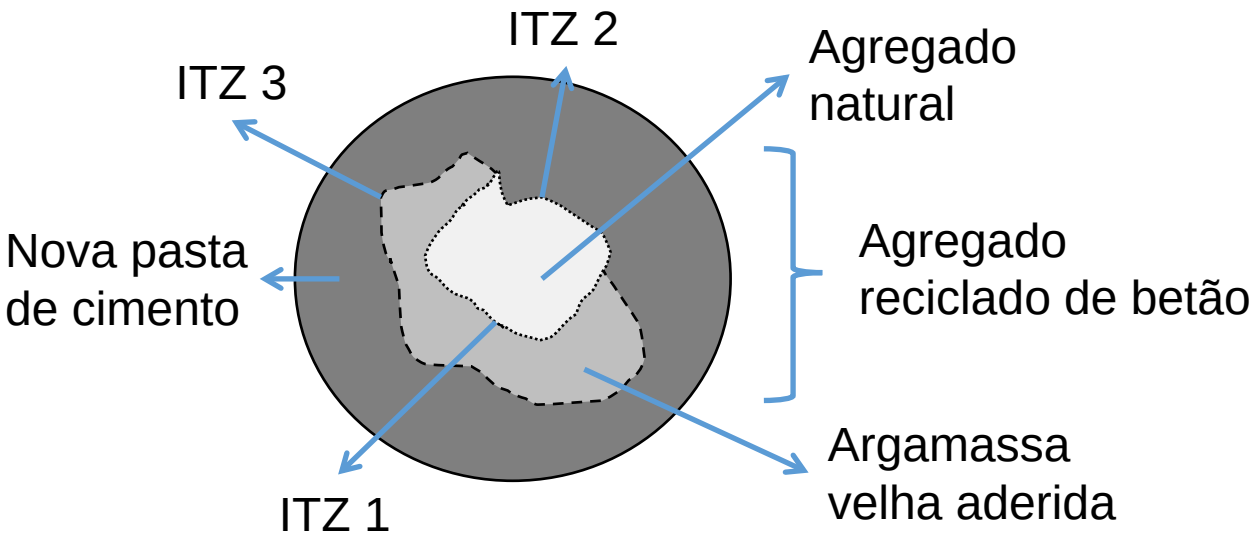
Triturador de mandíbulas

Moinho de martelos

Influência da trituração primária + secundária

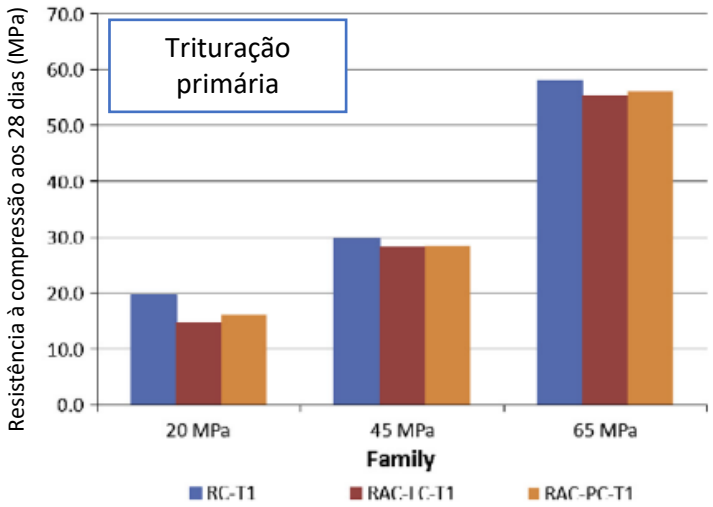
Agregados reciclados: Produção

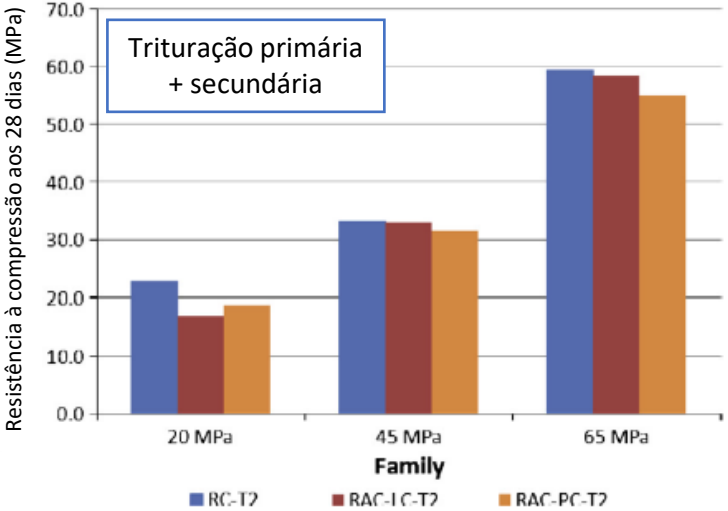
- Betões convencionais apresentam uma zona de interface (ITZ), mas betões com agregados reciclados podem apresentar três.



Agregados reciclados: Produção

- Trituração primária + secundária produziu agregados mais redondos e com menor quantidade de argamassa aderida, o que resultou em resistências à compressão maiores.





Influência da trituração primária + secundária na resistência à compressão

TÉCNICO LISBOA

Agregados reciclados:
Classificação

Agregados reciclados: Classificação

- Composição dos agregados reciclados pela EN 933-11.

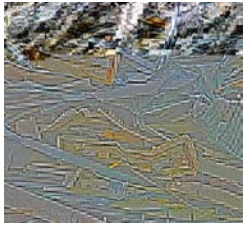
Rc - Betão, produtos de betão, argamassa

Rb - Produtos cerâmicos de alvenaria e acabamento

Ru - Agregados naturais

Ra - Materiais betuminosos

Rg - Vidro



X - Outros (gesso, solo, metais, madeira, plástico)

Agregados reciclados: Classificação

- A norma EN 12620 permite a utilização de agregados reciclados provenientes de RCD.

- Contudo, alguns limites estão desactualizados de acordo com as descobertas mais recentes.

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 12620:2002+A1

April 2008

ICS 91.100.15; 91.100.30

Supersedes EN 12620:2002

English Version

Aggregates for concrete

Granulats pour béton

Gesteinskörnungen für Beton

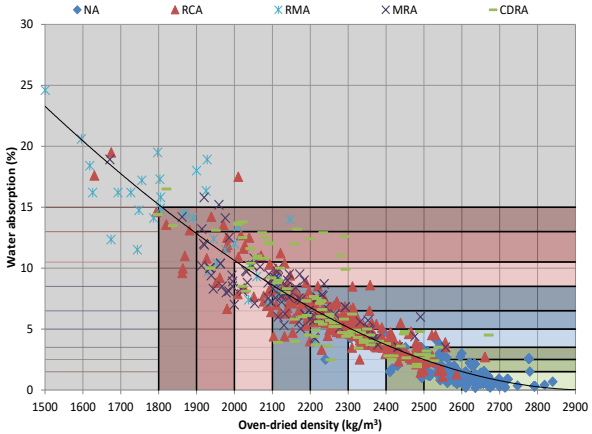
This European Standard was approved by CEN on 1 August 2002 and includes Corrigendum 1 issued by CEN on 26 May 2004 and Amendment 1 approved by CEN on 16 February 2008.

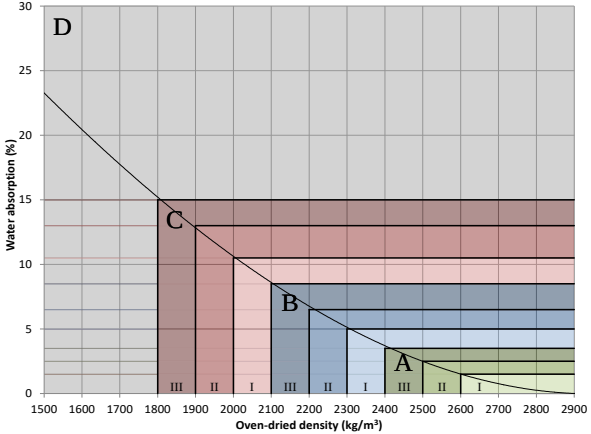
CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN Management Centre or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the CEN Management Centre has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.

Agregados reciclados: Classificação





Classe do agregado	A			B			C			D
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Densidade seca mínima (kg/m³)	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	Sem limite
Absorção de água máxima (%)	1,5	2,5	3,5	5	6,5	8,5	10,5	13	15	
Abrasão de Los Angeles máxima (%)	40			45			50			

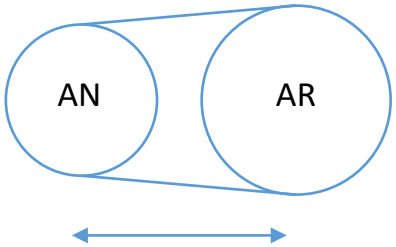
Classificação de agregados reciclados com base no desempenho

TÉCNICO LISBOA

Betões com agregados reciclados: Produção

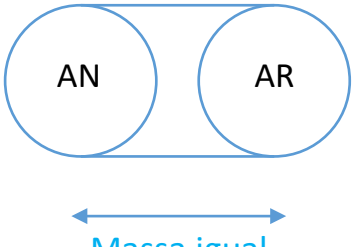
Agregados reciclados: Produção

Substituição em massa

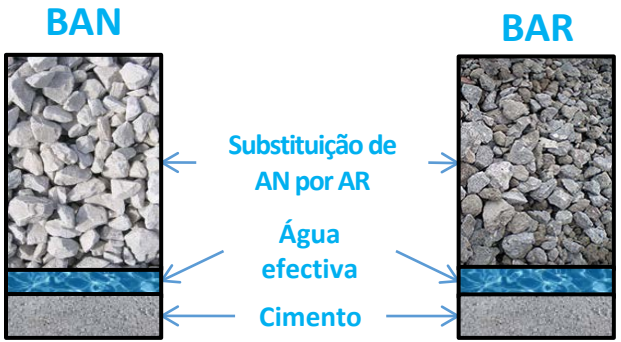


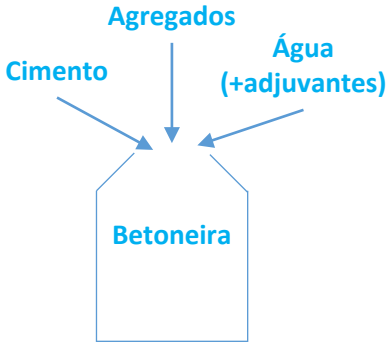
Massa igual
Volume diferente

Substituição em volume



Massa igual
Volume igual





- Os agregados (AN+AR) deverão ser colocados dentro da misturadora com 1/2 a 2/3 da água total (incluindo água de compensação) e misturarem cerca de 4 minutos.
- Adiciona-se o cimento deixando a mistura homogeneizar durante 1 minuto.
- Adiciona-se a água restante com os adjuvantes misturando por mais 5 minutos.

Agregados reciclados: Produção

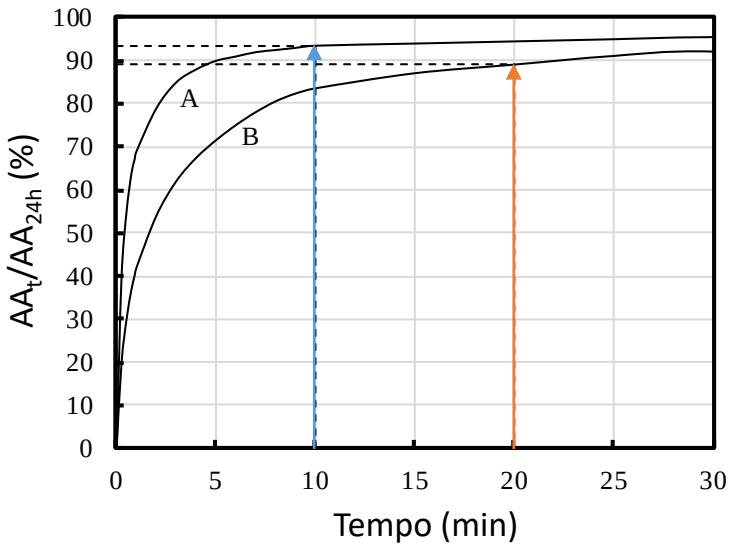
Deve-se colocar uma quantidade adicional de água para obter um betão com trabalhabilidade estável e expectável.

$$A_{ad} = (AA_t - a) \times M_{AR}$$

A_{ad} corresponde à massa de água adicional de compensação;
AA_t é a água absorvida pelos AR em t minutos;
a é o teor de humidade dos AR;
M_{AR} é a massa de AR na mistura.

$$a/c_{total} = (A_{ef} + A_{ad})/C$$

A_{ef} corresponde à massa de água efectiva (i.e. livre) e **C** é a massa de cimento.

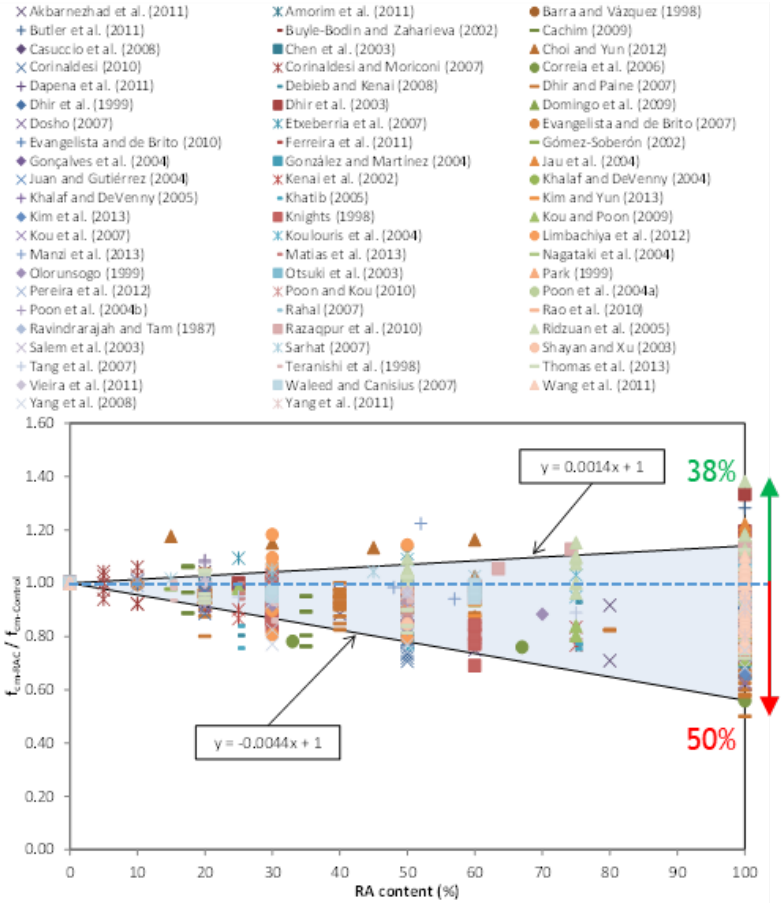


A – AA_{24h} = 5%; a = 1.5%; AA_{10min} = 4.7%; M_{AR} = 1000 kg → **A_{ad}** = 32 kg

B – AA_{24h} = 12%; a = 4.5%; AA_{20min} = 10.7%; M_{AR} = 1000 kg → **A_{ad}** = 62 kg

TÉCNICO LISBOA

Betões com agregados reciclados:
Influência do agregado na propriedades



Resistência à compressão

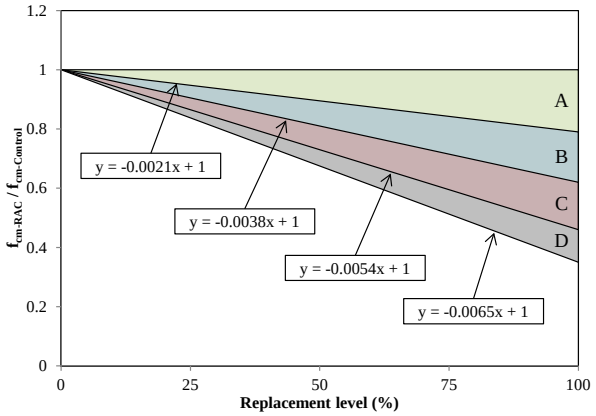
Betões com agregados reciclados: Influência do agregado nas propriedades

- A resistência à compressão geralmente diminui com o aumento da taxa da substituição.

- Limites superiores e inferiores do intervalo de confiança a 95% → Betões com agregados reciclados com resistência 14% acima até 44% abaixo daqueles do betão de referência.

Betões com agregados reciclados: Influência do agregado nas propriedades

- Com a classificação com base no desempenho dos agregados reciclados, é possível prever a perda de resistência à compressão com uma confiança de 95% para uma dada taxa de substituição.



Perda máxima (%)	Taxa de substituição máxima (%)			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
5	23.8	13.2	9.3	7.7
10	47.6	26.3	18.5	15.4
15	71.4	39.5	27.8	23.1
20	95.2	52.6	37.0	30.8

Betões com agregados reciclados: Influência do agregado nas propriedades

$$f_{ctk;0.05} = 0.7 \cdot f_{ctm}$$

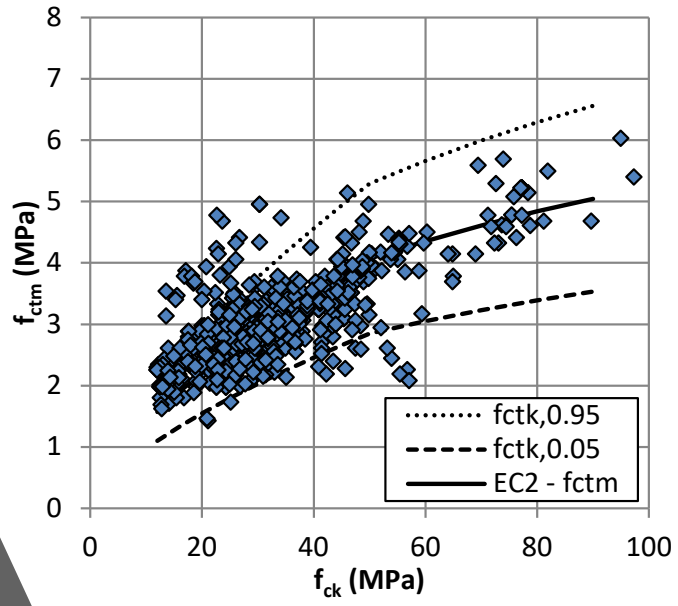
$$f_{ctk;0.95} = 1.3 \cdot f_{ctm}$$

$$f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

Para classes ≤ C50/60

$$f_{ctm} = 2.12 \cdot ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right)$$

Para classes> C50/60



Resultados de 630 misturas de 41 publicações

- As formulas do EC2 para betões convencionais podem ser utilizadas para betões com agregados reciclados independentemente da classe do agregado.

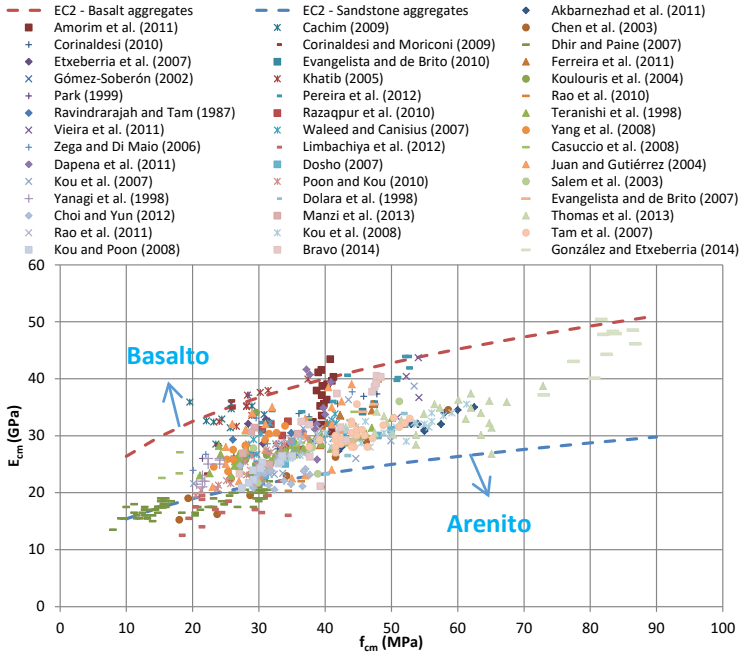
Resistência à tracção

Betões com agregados reciclados: Influência do agregado nas propriedades

$$E_{cm} = \alpha \times 22 \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \quad [GPa]$$

- Mais de 95% de todas os betões com agregados reciclados encontram-se acima da relação do EC2 correspondente aos agregados de arenito/grés.

Resultados de 588 misturas de 43 publicações.



Módulo de elasticidade

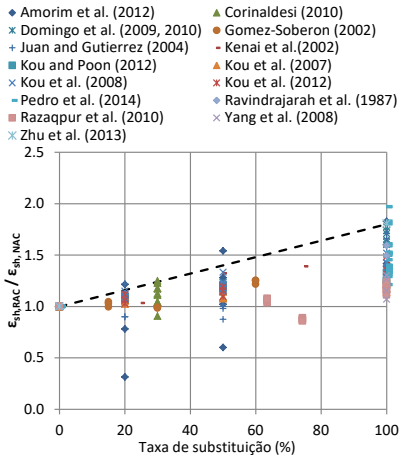
vs.

Resistência à compressão

Betões com agregados reciclados: Influência do agregado nas propriedades

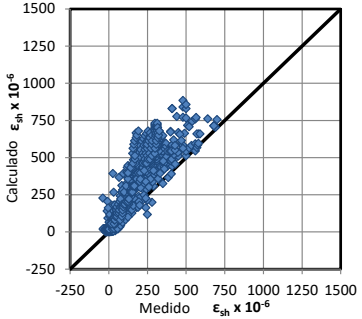
- O aumento da taxa de substituição leva a um aumento da retracção.
- Os limites de confiança a 95% mostram um aumento máximo de 80% de retracção com a introdução de 100% de agregados reciclados.
- Os modelos de previsão de retracção actuais são aplicáveis aos betões com agregados reciclados.

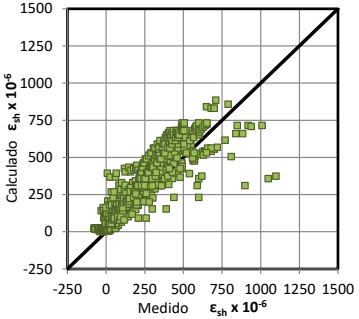
Retracção



Factores de correcção da retracção		
20% ARB grossos	50% ARB grossos	100% ARB grossos
1.20	1.40	1.80

BAN





BAR

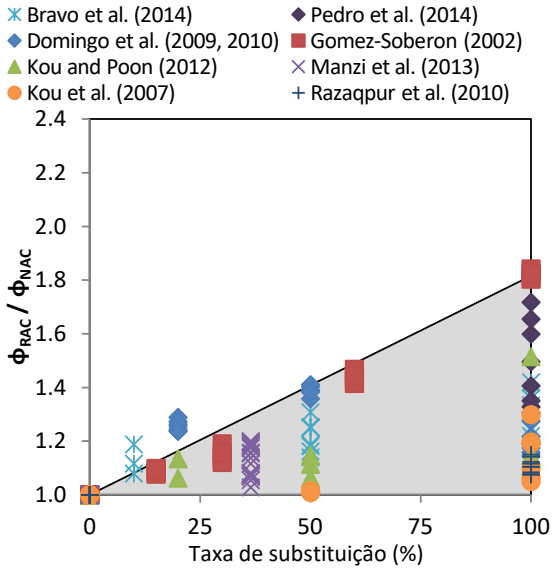
Betões com agregados reciclados: Influência do agregado nas propriedades

- Os limites de confiança a 95% mostram um aumento máximo de 80% de fluência com a introdução de 100% de agregados reciclados.

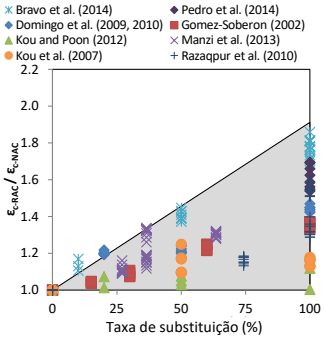
$$E_{c.eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \alpha \cdot \phi(\infty, t_0)}$$

Onde:
$E_{c.eff}$ - módulo de elasticidade efectivo (GPa);
E_{cm} - módulo de elasticidade médio (GPa);
α - factor de correcção para o coeficiente de fluência;
$\phi(\infty,t_0)$ - coeficiente de fluência para uma dado período e carregamento.

Factores de correcção do coeficiente de fluência		
20% ARB grossos	50% ARB grossos	100% ARB grossos
1.20	**1.40**	**1.80**



Coeficiente de fluência relativo



Deformação relativa

Betões com agregados reciclados: Influência do agregado nas propriedades

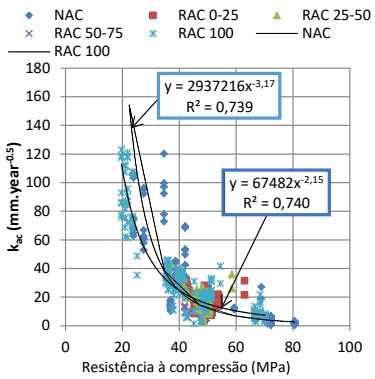
- Geralmente, a carbonatação aumenta com a taxa de substituição.

- Não existe diferença estatisticamente significante na relação entre k_{ac} e f_{cm} dos betões com agregados reciclados e naturais, independentemente da taxa de substituição, tipo e tamanho de agregados reciclados

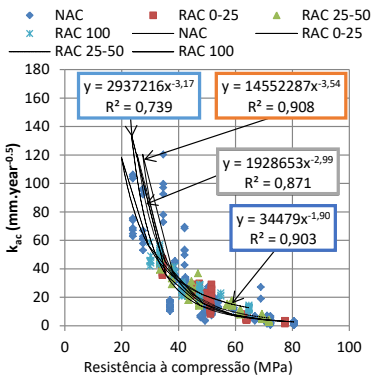
Relação entre os recobrimentos BAN e BAR

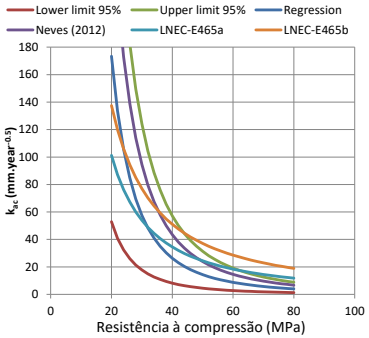
$$\frac{X_{BAR}}{X_{BAN}} = \frac{k_{ac,BAR}}{k_{ac,BAN}} = \left(\frac{f_{cm,BAN}}{f_{cm,BAR}}\right)^{2,7}$$

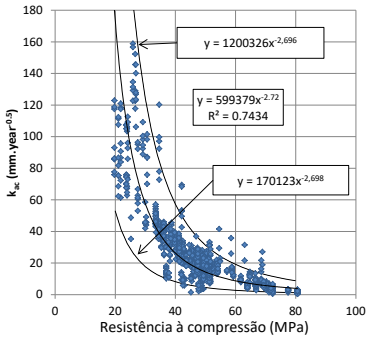
AR Grossos



AR Finos







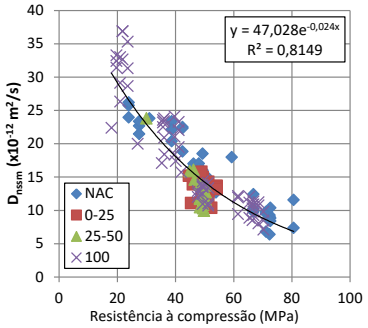
Betões com agregados reciclados: Influência do agregado nas propriedades

- A penetração de cloretos aumenta com a taxa de substituição de agregados grossos de betão.

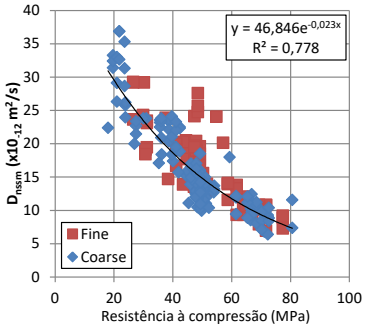
- Não existe diferença estatisticamente significante na relação entre D_{nssm} e f_{cm} dos betões com agregados reciclados e naturais, independentemente da taxa de substituição, tipo e tamanho de agregados reciclados

Relação entre os recobrimentos BAN e BAR

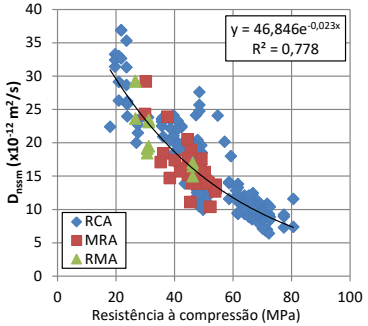
$$\frac{X_{BAR}}{X_{BAN}} = \sqrt{\frac{D_{0,BAR}}{D_{0,BAN}}} = \sqrt{e^{-0,023(f_{cm,BAR}-f_{cm,BAN})}}$$



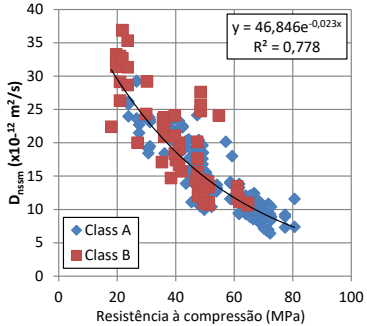
Taxa de substituição



Tamanho do agregado



Tipo do agregado



Classe do agregado

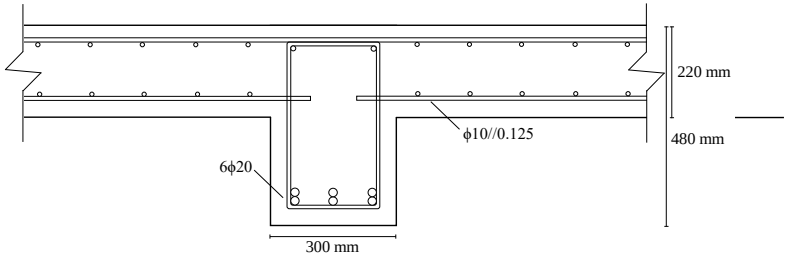
TÉCNICO LISBOA

Betões com agregados reciclados: Dimensionamento

Betões com agregados reciclados: Dimensionamento

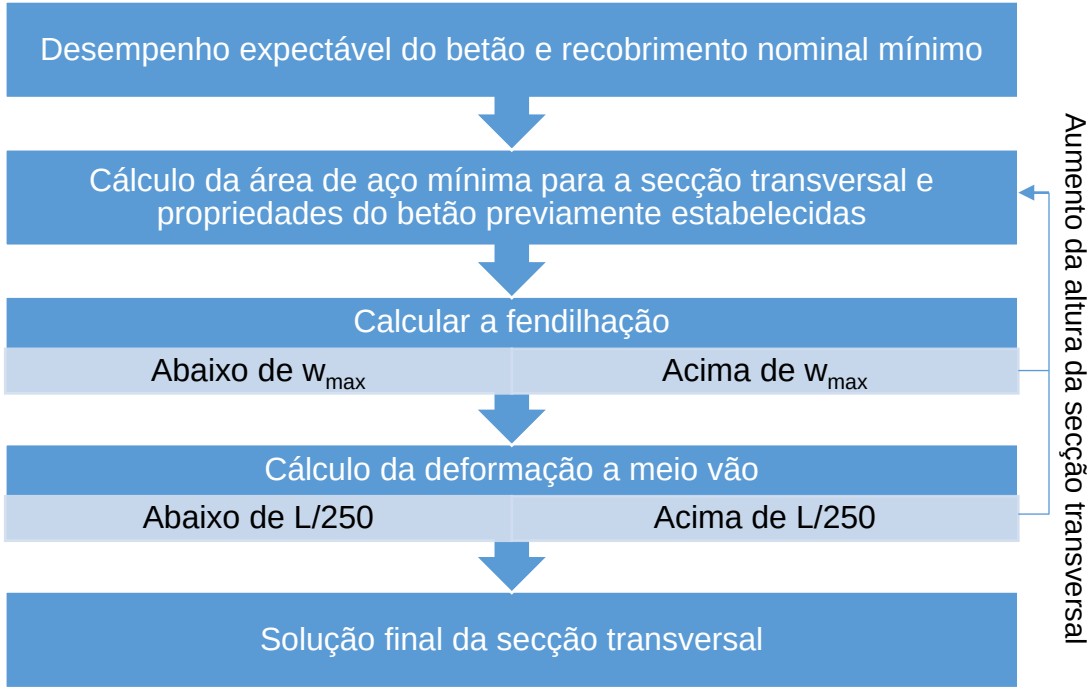
- Lajes rectangulares armadas numa só direcção e vigas simplesmente apoiadas;
- Taxas de substituição de 20%, 50% e 100% de agregados reciclados de classes A, B e C;
- Perda de resistência *vs*. nenhuma perda de resistência;
- Cenários conservativos *vs.* médios.

Classe de resistência	C30/37
Tipo de cimento	CEM I 42.5
Máxima dimensão do agregado (mm)	25.4
Classe de trabalhabilidade	S3
Exposição ambiental	XC3 + XS1

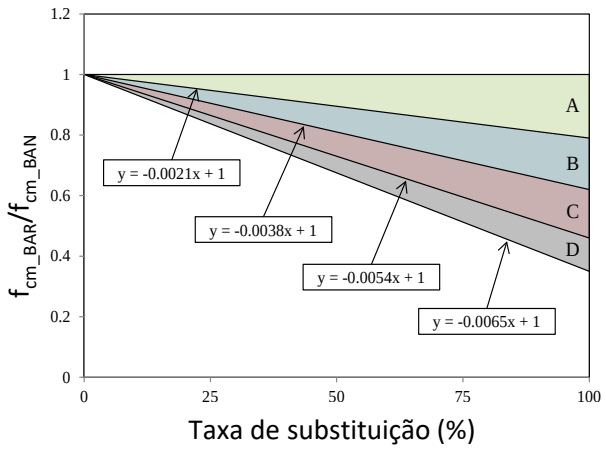


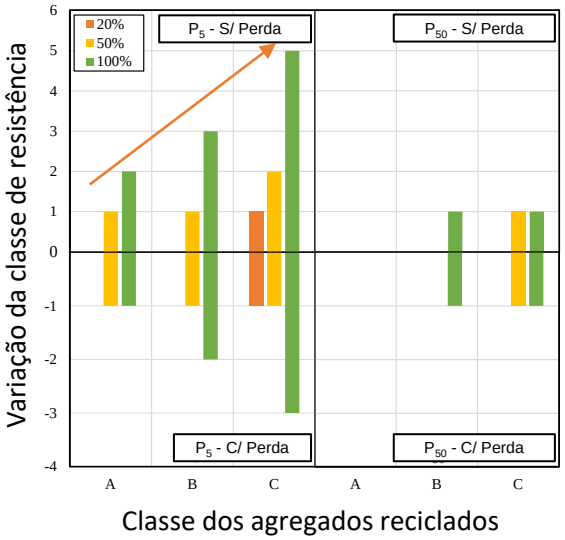
Betões com agregados reciclados: Dimensionamento

Processo iterativo para o dimensionamento estrutural



Betões com agregados reciclados: Dimensionamento





Maior alteração à composição ao colocar agregados de menor qualidade.

Variação mínima na resistência em condições “médias”

Variação da classe de resistência dos betões consoante a classe dos agregados reciclados

Betões com agregados reciclados: Dimensionamento

Cenário	Propriedade	Taxa de substituição (%)	P_5			P_{50}		
			A	B	C	A	B	C
Perda de resistência	f_{ctm} (MPa)	20	2.90	2.90	2.56	2.90	2.90	2.90
		50	2.56	2.56	2.56	2.90	2.90	2.56
		100	2.56	2.21	1.90	2.90	2.56	2.56
	$E_{c,eff}$ (GPa)	20	6.57	6.57	6.30	9.19	8.73	8.73
		50	6.30	6.30	6.30	8.91	8.26	7.55
		100	6.30	5.99	5.72	8.35	7.10	7.37
Sem perda de resistência	f_{ctm} (MPa)	20	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90
		50	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90
		100	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90	2.90
	$E_{c,eff}$ (GPa)	20	6.57	6.57	6.57	9.19	8.73	8.73
		50	6.57	6.57	6.57	8.91	8.26	7.88
		100	6.57	6.57	6.57	8.35	7.41	7.69

Perda na resistência à compressão leva a uma perda proporcional na resistência à tracção (maiores problemas de fendilhação)

Sem perda de resistência → Resistência à tracção equivalente ao betão com agregados naturais e alterações mínimas no módulo de elasticidade efectivo

Apesar da mesma resistência à compressão, o módulo de elasticidade efectivo diminui com o aumento da taxa de substituição

$$f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

Para classes ≤ C50/60

$$f_{ctm} = 2.12 \cdot ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right)$$

Para classes > C50/60

Variação da resistência à tracção e módulo de elasticidade efectivo

Betões com agregados reciclados: Dimensionamento

Carbonatação

$$\frac{X_{BAR}}{X_{BAN}} = \frac{k_{ac,BAR}}{k_{ac,BAN}} = \left(\frac{f_{cm,BAN}}{f_{cm,BAR}}\right)^{2,7}$$

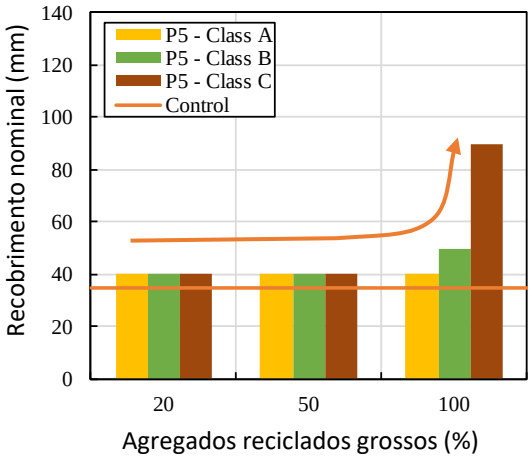
Penetração de cloretos

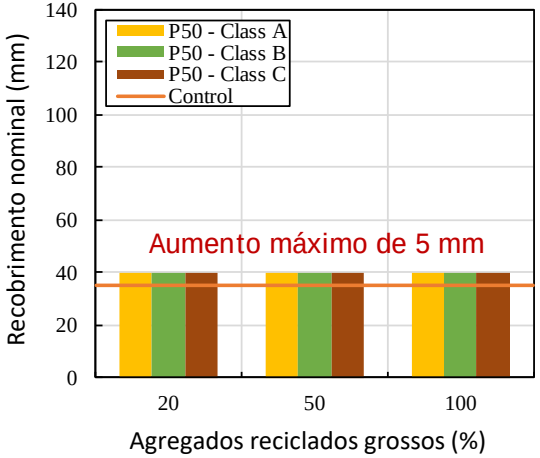
$$\frac{X_{BAR}}{X_{BAN}} = \sqrt{\frac{D_{0,BAR}}{D_{0,BAN}}} = \sqrt{e^{-0,023(f_{cm,BAR}-f_{cm,BAN})}}$$

Factores resultantes serão multiplicados pelo recobrimento mínimo no EC2:

XC3 → 15 mm x 1,17 = 17,6 → 20 mm
XS1 → 25 mm x 1,03 = 25,8 → 30 mm

Recobrimento nominal é o máximo dos dois acima + desvio de 10 mm → 40 mm





Recobrimento ao aceitar perda de resistência

Betões com agregados reciclados: Dimensionamento

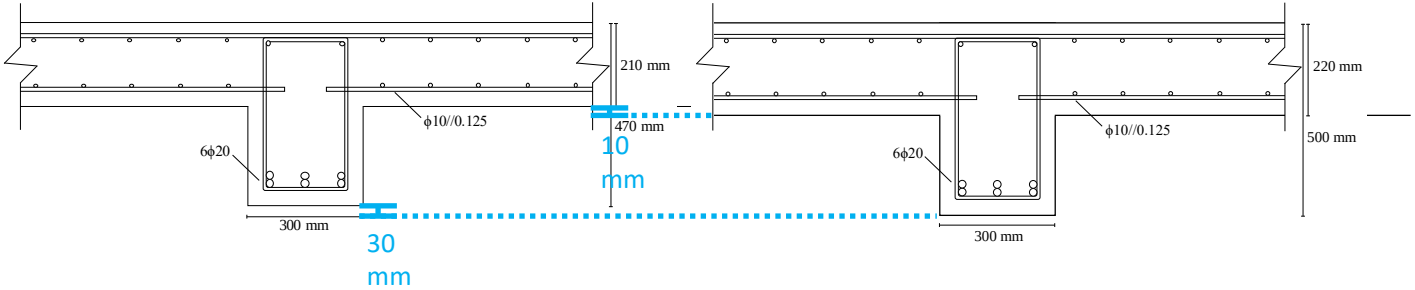
Elemento	Cenário	Taxa de substituição (%)	Altura da secção transversal (mm)					
			P_5			P_{50}		
			Classe A	Classe B	Classe C	Classe A	Classe B	Classe C
Laje	Perda	Referência	210	210	210	210	210	210
		20%	230	230	240	220	220	220
		50%	240	240	240	220	220	230
		100%	240	260	400	220	230	230
	Sem Perda	20%	230	230	230	220	220	220
		50%	230	230	230	220	220	220
		100%	230	240	240	220	220	220
Viga	Perda	Referência	470	470	470	470	470	470
		20%	520	520	530	480	490	490
		50%	530	530	530	490	490	500
		100%	530	560	-	490	510	510
	Sem Perda	20%	510	510	510	480	480	480
		50%	510	510	510	480	490	490
		100%	510	510	510	490	500	500

Aumento:
maior do que 5%;
entre 5% e 10%;
acima de 10%.

Altura das secções transversais da laje e da viga

Betões com agregados reciclados: Dimensionamento

Cenário P_{50} com classe de resistência constante



Betão de referência

Betão com 100% de agregados reciclados de betão de classe B ou C

Variação na secção transversal laje-viga

TÉCNICO LISBOA

Betões com agregados reciclados: Alteração das normas

Agregados reciclados: Classificação

Propriedades	Cláusula em EN 12620:2002+A1:2008	Classe do agregado	Categoria de acordo com a EN 12620
Conteúdo de finos	4.6	A+B+C	Valor a ser declarado
Índice de forma	4.4	A+B	$\leq FI_{50}$ ou $\leq SI_{55}$
Resistência à fragmentação	5.2	A+B+C	$\leq LA_{50}$
Densidade seca	5.5	A	≥ 2400 kg/m^3
		B	≥ 2100 kg/m^3
		C	≥ 1800 kg/m^3
Absorção de água	5.5	A	$\leq 3{,}5\%$
		B	$\leq 8{,}5\%$
		C	$\leq 15\%$
Constituintes	5.8	A	Rc_{90}, Rcu_{95}, Rb_{10-}, Ra_{1-}, FL_{2-}, XRg_{1-}
		B	Rc_{50}, Rcu_{70}, Rb_{30-}, Ra_{5-}, FL_{2-}, XRg_{2-}
		C	Rc_{NR}, Rcu_{NR}, Rb_{NR}, Ra_{10-}, FL_{5-}, XRg_{2-}
Sulfatos solúveis em ácido	6.3.1	A+B+C	$\leq AS_{0.8}$
Sulfatos solúveis em água	6.3.3	A+B+C	$\leq SS_{0.2}$
Cloretos solúveis em ácido	6.2	A+B	0,04%
		C	SR
Efeito no tempo de presa inicial	6.4.1	A+B	$\leq A_{10}$
		C	$\leq A_{40}$

Novos limites para a densidade seca e absorção de água máxima (limites actuais para A e B são de 2100 kg/m^3 e 1700 kg/m^3, respectivamente, e não existem limites para a absorção de água)

Classe adicional de agregados reciclados - classe C (para betões não estruturais ou não armados)

Novos limites para o conteúdo de cloretos e sulfatos solúveis em água e em ácido para todas as classes (presentemente, não existem limites)

Nota: FI - índice de achatamento (EN 933-3); SI - índice de forma (EN 933-4); LA - abrasão Los Angeles (EN 1097-2); AS - sulfatos solúveis em ácido (EN 1744-1); SS - sulfatos solúveis em água (EN 1744-1); SR - sem requerimento; A - alteração no tempo inicial de presa (EN 1744-6).
Rc - conteúdo em massa de fragmentos de betão; Rcu - betão + agregados naturais; Rb - fragmentos cerâmicos; Ra - materiais betuminosos; Rg - vidro; X - outros materiais (EN 933-11)

Betões com agregados reciclados: Dimensionamento

Classe do agregado	Classes de exposição		
	X0	XC1-XC4, XA1, XS1, XD1	All other exposure classes
A[a]	70%	50%	0%
B[b]	40%	30%	0%
C[b]	30%	30%	0%

[a] Agregados reciclados de classe A de uma fonte conhecida podem ser utilizadas em classes de exposição ambiental desde que o betão original tivesse sido feito com uma taxa máxima de 50%.

[b] Betões com uma classe de resistência ≤ C30/37.

Para cada classe de agregado, a taxa de substituição máxima permitida causará uma perda de resistência à compressão máxima de 15% quando comparado com um betão com agregados naturais com a mesma composição.

Classe do agregado	A	B	C
Redução da relação a/c_{ef}		0.05	
Resistência à tracção (f_{ctm})		1.00	
Modulo de elasticidade (E_{cm})	0.80	0.85	0.90
Coeficiente de fluência ($\phi(\infty,t_0)$)	1.65	1.35	1.25
Retracção (ε_{cs})	1.65	1.35	1.25

Apesar de os agregados grossos reciclados levarem a uma diminuição do desempenho em termos de durabilidade, uma correcção na relação a/c_{ef} pode equalizar as taxas de carbonatação e penetração de cloretos.

Os betões com agregados reciclados apresentam uma resistência à tracção semelhante aos congéneres naturais para a mesma resistência à compressão.

As alterações dimensionais dos betões reciclados podem ser estimadas com estes factores conservativos, que são dependentes nas taxas de substituição máximas apresentadas na tabela anterior.

$$E_{cm} = \alpha \cdot \beta \cdot 22 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3}$$

α é um factor de correcção que depende da taxa de substituição;
β é um factor que depende da natureza do agregado natural.

TÉCNICO LISBOA