

Ensaio não destrutivo no betão autocompactável



Miguel
Nepomuceno¹



Luiz Pereira-de-
Oliveira²



João Costa³

RESUMO

Os betões autocompactáveis (BAC) apresentam algumas especificidades face aos betões correntes vibrados, nomeadamente uma maior dosagem de pasta e um menor volume de agregados grossos. A máxima dimensão dos agregados grossos é também reduzida nos BAC para prevenir o efeito de bloqueio. Tais especificidades são suscetíveis de afetar os resultados dos ensaios não destrutivos, comparativamente àqueles obtidos em betões correntes vibrados com o mesmo nível de resistência e materiais de natureza idêntica. No presente estudo avalia-se a aplicabilidade de alguns ensaios não destrutivos no BAC para estimar a resistência à compressão. Os ensaios selecionados incluíram: o ensaio da velocidade de ultrassons (PUNDIT), o ensaio da dureza superficial (esclerómetro de Schmidt tipo N), o ensaio da força de arranque (Lok-test) e o ensaio da maturidade do betão (COMA-meter). Foram produzidos 7 conjuntos de provetes de BAC a partir de uma única mistura. Todos os provetes foram sujeitos a cura normalizada. Os ensaios foram aplicados nas idades de 1, 2, 3, 7, 14, 28 e 94 dias, correspondendo cada idade a um dos conjuntos de provetes. A resistência à compressão do betão variou entre os 45 MPa (às 24 horas) e os 97 MPa (aos 94 dias). Foram estabelecidas correlações entre as leituras dos ensaios não destrutivos e a resistência à compressão, efetuada a análise da variabilidade dos ensaios e definidos os limites de confiança de 95% para essas correlações. Os resultados obtidos evidenciaram boas correlações entre a resistência à compressão e as leituras dos ensaios não destrutivos, mas com diferenças face às correlações obtidas em betões correntes vibrados.

Palavras-chave: Betão autocompactável; ensaio da velocidade de ultrassons; ensaio da dureza superficial; ensaio da força de arranque; ensaio da maturidade do betão.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de ensaios não destrutivos para avaliar a qualidade do betão e estimar a sua resistência à compressão *in situ* é já bem conhecida há algumas décadas [1, 2, 3, 4]. Muitos dos ensaios foram inicialmente desenvolvidos para aplicação em betões vibrados da gama de resistência normal, mas na

¹ Universidade da Beira Interior, Centre of Materials and Building Technologies, Covilhã, Portugal. mcsn@ubi.pt

² Universidade da Beira Interior, Centre of Materials and Building Technologies, Covilhã, Portugal. luiz.oliveira@ubi.pt

³ Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. joacosta.engenharias@gmail.com

década de 90 alguns deles foram adaptados para aplicação em betões vibrados de alta resistência [5, 6, 7, 8]. Os procedimentos de aplicação da grande maioria dos ensaios não destrutivos estão bem definidos em documentos normativos de diferentes países, ainda que possam ser encontradas pequenas diferenças entre eles. O leque de ensaios disponíveis pode variar desde os mais económicos, simples e fáceis de usar até aos mais complicados e dispendiosos. A seleção criteriosa dos tipos de ensaios a combinar em cada situação é fundamental, tanto para a precisão dos resultados como para a redução de custos [3]. Nesse processo é necessário observar as variáveis que afetam os ensaios e as correlações, sendo que neste aspeto alguns ensaios são mais sensíveis do que outros.

O número e tipo de fatores que afetam as correlações com a resistência poderão ser diferentes para cada método de ensaio não destrutivo. Algumas correlações incluem mesmo parâmetros de correção para alguns desses fatores, na tentativa de alargar o leque de aplicações, enquanto outras são omissas nesse aspeto. Refira-se, a título de exemplo, sem referência a nenhum método em particular, alguns desses fatores [3]: as diferenças na composição do betão (quantidade, natureza, forma e textura dos agregados; tipo e quantidade de ligante; proporção ligante/agregados; razão água/cimento; etc.); as diferenças nas condições de humidade (saturado ou seco); o tipo e dimensão dos provetes utilizados para estabelecer a correlação; a carbonatação da superfície (altera a relação entre as zonas superficial e interior do betão); a influência da idade do betão e tipo de cura (em alguns métodos as correlações são diferentes para betões em idades curtas em relação a betões acima dos 28 dias); as diferenças no tipo de acabamento da superfície (cofragens metálicas poderão conduzir a diferenças na camada superficial face às cofragens de madeira e isto afeta as medições em alguns dos ensaios); o equipamento utilizado (equipamento similar, com a mesma referência técnica, não significa que tenha a mesma relação de correlação); o procedimento utilizado (procedimentos diferentes podem conduzir a resultados diferentes); diferenças no estado de tensão do elemento ensaiado poderão afetar as leituras em alguns ensaios; a massa do provete ou do elemento *in situ*, etc.

Pelas razões descritas, facilmente se depreende que as especificidades dos BAC face aos betões correntes vibrados, nomeadamente uma maior dosagem de pasta, um menor volume de agregados grossos, agregados grossos com menor máxima dimensão, a ausência de vibração, entre outros aspetos, são suscetíveis de afetar as correlações com a resistência. Nesse sentido, o presente estudo avalia a aplicabilidade de alguns ensaios não destrutivos no BAC para estimar a resistência à compressão. Os ensaios selecionados incluíram: o ensaio da velocidade de ultrassons (PUNDIT), o ensaio da dureza superficial (esclerómetro de Schmidt tipo N), o ensaio da força de arranque (Lok-test) e o ensaio da maturidade do betão (COMA-meter).

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolveu-se em três fases. Na primeira fase foi estudada e caracterizada a composição de um betão autocompactável com resistência média à compressão aos 28 dias da ordem de 90 MPa. Na segunda fase foram produzidas sete séries de provetes para ensaio, identificadas pelas siglas P1, P2, P3, P7, P14, P28 e P94, correspondendo cada série a uma idade do betão. Na terceira fase foram aplicados os ensaios não destrutivos selecionados, nomeadamente o ensaio da velocidade de ultrassons (PUNDIT), o ensaio da dureza superficial (esclerómetro de Schmidt tipo N), o ensaio da força de arranque (Lok-test) e o ensaio da maturidade do betão (COMA-meter).

2.1 Estudo e caracterização do BAC

O estudo da composição do BAC foi realizado de acordo com a metodologia proposta por Nepomuceno *et al.* [9, 10, 11, 12] e os ensaios de caracterização no estado fresco e endurecido foram realizados de acordo com os ensaios previstos na NP EN 206-9:2010 [13].

2.1.1 Materiais

Para a produção do BAC foram selecionados os seguintes materiais: cimento Portland (CEM I 42,5R) com massa volúmica de 3140 kg/m³; cinzas volantes (CV) com massa volúmica de 2380 kg/m³;

superplastificante (SP) à base de carboxilatos modificados com massa volúmica de 1050 kg/m³; areia natural rolada fina (Areia 0/2), com massa volúmica de 2600 kg/m³ e módulo de finura de 2,104; areia natural rolada do rio de grão médio (Areia 0/4), com massa volúmica de 2640 kg/m³ e módulo de finura de 3,035; agregado grosso britado de granito (Brita 3/6) com massa volúmica de 2710 kg/m³ e módulo de finura de 5,311 e ainda um agregado grosso britado de granito (Brita 6/15) com massa volúmica de 2700 kg/m³, módulo de finura de 6,692 e máxima dimensão de 19,1 mm.

Os agregados finos foram combinados na proporção em volume absoluto de 50% de Areia 0/2 e 50% de Areia 0/4, resultando numa mistura com um módulo de finura de 2,569. Os agregados grossos foram combinados na proporção em volume absoluto de 65% de Brita 3/6 e 35% de Brita 6/15, resultando numa mistura com um módulo de finura de 5,794.

2.1.2 Composição do BAC

O estudo da fase argamassa do BAC foi definido a partir da metodologia proposta por Nepomuceno *et al.* [9, 10], que considera a definição da mistura de materiais finos (proporção entre cimento e adição), o parâmetro V_p/V_s (relação em volume absoluto entre os materiais finos e os agregados finos), a razão V_w/V_p (relação em volume absoluto entre a água e os materiais finos) e a razão $S_p/p\%$ (relação em percentagem entre as dosagens em massa de superplastificante e de materiais finos). Assim, considerando o tipo de cimento selecionado e a resistência média pretendida foi estimada a razão W/C (em massa) de 0,35. De seguida fixou-se o parâmetro V_p/V_s em 0,80 e, tendo por base a razão W/C e o tipo de cimento e de adição selecionados, estimou-se a percentagem de substituição do cimento pela adição em 30%. Os parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$ foram obtidos experimentalmente através do processo descrito por Nepomuceno *et al.* [9, 10], atingindo-se os valores de $V_w/V_p = 0,77$ e $S_p/p\% = 0,70$.

De acordo com a metodologia descrita por Nepomuceno *et al.* [11, 12] para o estudo da composição do betão, este fica concluído com a definição do volume de vazios ($V_v = 0,03 \text{ m}^3$) e com a definição do parâmetro V_m/V_g (razão entre os volumes absolutos de argamassa e de agregados grossos). O parâmetro V_m/V_g adotado foi de 2,279 tendo em conta as propriedades requeridas para o estado fresco. A composição final obtida é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1. Composição do BAC para um metro cúbico.

<i>Material</i>	<i>Dosagem</i>
CEM I 42,5R	487,5 [kg]
Cinzas volantes	158,4 [kg]
Água	170,8 [litros]
Superplastificante	4,3 [litros]
Areia 0/2	360,4 [kg]
Areia 0/4	366,0 [kg]
Brita 3/6	521,1 [kg]
Brita 6/15	279,6 [kg]

2.1.3 Propriedades no estado fresco

A avaliação das propriedades do betão no estado fresco foi realizada pelo ensaio de espalhamento, ensaio de fluidez no Funil V e ensaio de autocompactabilidade na Caixa L. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 2 e enquadram-se nos objetivos definidos. Estes ensaios foram ainda complementados pela observação visual do desempenho do betão. Conforme se ilustra na Figura 1, o betão apresentou uma distribuição muito homogénea, sem qualquer segregação ou exsudação visíveis.

Quadro 2. Propriedades do BAC no estado fresco.

<i>Espalhamento</i>	<i>Funil V</i>	<i>Caixa L</i>
<i>Dm [mm]</i>	<i>t [s]</i>	<i>H2/H1</i>
780	15,6	0,92

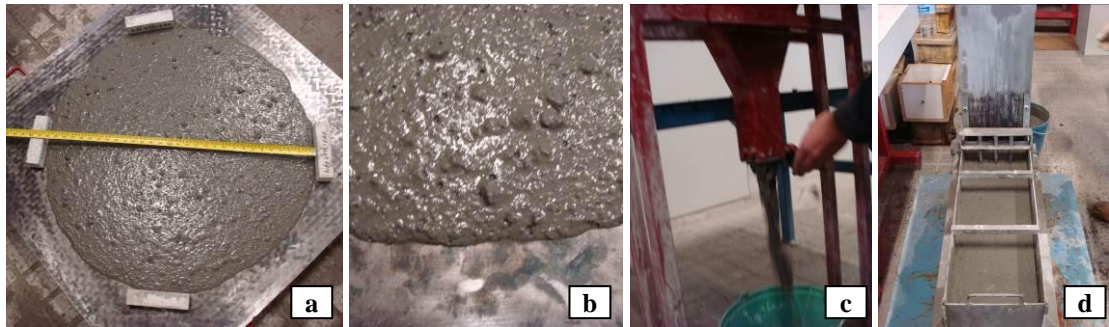


Figura 1. Imagens dos ensaios do betão no estado fresco.

2.1.4 Propriedades no estado endurecido

As únicas propriedades avaliadas no estado endurecido foram a resistência à compressão e a massa volúmica. Os resultados da resistência média à compressão são apresentados no Quadro 3 para as diferentes séries produzidas, correspondentes a diferentes idades do mesmo betão. A massa volúmica aos 28 dias foi da ordem de 2300 kg/m³.

Quadro 3. Propriedades do BAC no estado endurecido.

Série	Idade [dias]	f_{cm} [MPa]	Sd [MPa]	Cv [%]
P1	1	45,31	1,48	3,26
P2	2	58,16	2,21	3,81
P3	3	64,06	2,09	3,26
P7	7	71,92	3,00	4,16
P14	14	81,47	6,16	7,56
P28	28	90,70	1,33	1,46
P94	94	97,00	1,79	1,84

2.2 Produção de provetes para ensaio

No total foram produzidas sete séries de provetes, todas moldadas no mesmo dia e a partir de uma única mistura de betão, com descarga direta e sem qualquer forma de compactação (Fig. 2). Cada série foi constituída por um provete cúbico de 200 mm de aresta, para alojar as cinco sondas do ensaio de arranque (Fig. 2) e o medidor de maturidade (Fig. 3), e quatro provetes cúbicos de 150 mm de aresta para os restantes ensaios (velocidade de ultrassons, dureza superficial e resistência à compressão).



Figura 2. Moldagem dos provetes para ensaio.

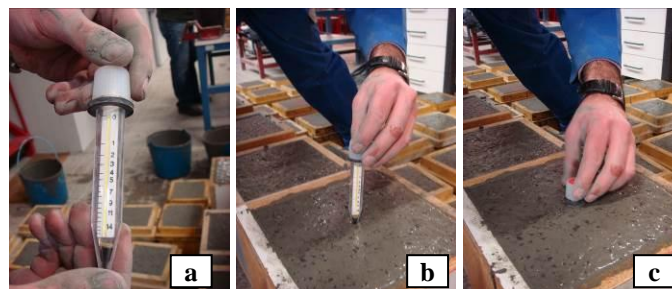


Figura 3. Aplicação do medidor de maturidade COMA-Meter.

Após a moldagem todos os provetes foram protegidos com tela plástica para evitar a perda prematura de humidade e foram conservados no interior do laboratório durante 24 horas (Fig. 4a). Decorridas as 24 horas, os provetes foram desmoldados (Figs. 4b e 4c) e foram posteriormente colocados numa câmara de cura à temperatura de 19 ± 1 °C e HR de $90 \pm 5\%$.



Figura 4. Proteção dos provetes após moldagem e descofragem às 24 horas.

2.3 Ensaios não destrutivos

Todos os procedimentos de aplicação e obtenção das correlações para os ensaios não destrutivos selecionados seguiram as recomendações da BS 1881: Part 201: 1986 [14].

2.3.1 Ensaio da velocidade de ultrassons

O ensaio de medição da velocidade de ultrassons foi efetuado de acordo com a BS 1881 :Part 203: 1986 [15] com recurso a um aparelho do tipo (PUNDIT) ligado por cabos a transdutores eletroacústicos com frequências de 54 kHz. Previamente à execução dos ensaios de cada série foi verificada a calibração do aparelho (Fig. 5). De seguida foram efetuadas quatro medições entre duas faces paralelas e perpendiculares à direção de betonagem, uma em cada provete cúbico de 150 mm de aresta. As leituras registadas são apresentadas no Quadro 4.



Figura 5. Imagem da calibração do PUNDIT.

Quadro 4. Ensaio da velocidade de propagação de ultrassons.

Série	Idade [dias]	V [km/s]	Sd [km/s]	Cv [%]
P1	1	4,31	0,035	0,82
P2	2	4,44	0,011	0,24
P3	3	4,57	0,025	0,56
P7	7	4,64	0,030	0,64
P14	14	4,80	0,063	1,31
P28	28	4,84	0,022	0,45
P94	94	4,83	0,015	0,31

2.3.2 Ensaio da dureza superficial

Os ensaios de dureza superficial foram efetuados de acordo com a BS 1881: Part 202: 1986 [16] por aplicação de um esclerómetro de Schmidt do Tipo N, com uma energia de impacto de 2,207 N.m. Previamente à execução deste ensaio e após medição dos ultrassons, procedeu-se à medição da resistência à compressão em três provetes cúbicos de 150 mm de aresta. Avaliada a resistência média à compressão do betão, submeteu-se o quarto provete de 150 mm de aresta que restou de cada série a

uma tensão equivalente a 1/10 da tensão média de rotura, de modo a confinar o provete entre os pratos da prensa de compressão e prevenir o seu ressalto durante o ensaio (Fig. 6b). O esclerómetro foi aplicado na posição horizontal e efetuaram-se nove leituras em duas faces opostas do provete, ambas moldadas e perpendiculares à direção de moldagem (Fig. 6c). Previamente à execução dos ensaios foi verificada a calibração do aparelho (Fig. 6a). O valor médio do número de ressalto (R) traduz o resultado do ensaio em cada série. As leituras registadas são apresentadas no Quadro 5.

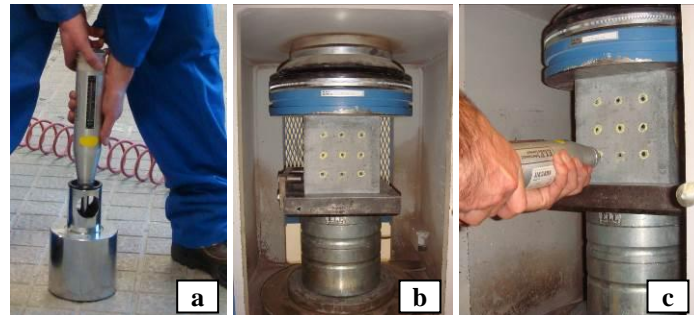


Figura 6. Aplicação do ensaio de dureza superficial.

Quadro 5. Ensaio de dureza superficial (Número de ressalto R).

Série	Idade [dias]	R	Sd	Cv [%]
P1	1	37,44	0,63	1,69
P2	2	41,00	1,20	2,92
P3	3	43,06	1,07	2,49
P7	7	45,39	1,39	3,06
P14	14	45,44	2,24	4,93
P28	28	47,56	1,26	2,65
P94	94	49,61	0,65	1,31

2.3.3 Ensaio da força de arranque

Os ensaios de arranque foram efetuados de acordo com a BS 1881: Part 207:1992 [17] e utilizando um aparelho com capacidade de carga de 0 a 150 kN da *Germann Instruments A/S*, baseado no sistema *Lok-test*. Previamente à campanha de ensaios foi aferida a calibração fornecida pelo fabricante para a conversão do valor da carga de arranque última lido diretamente no equipamento em carga última real, em kN. Essa verificação foi efetuada com aplicação de uma célula de carga (Fig. 7b) ligada a um *data logger* (Fig. 7a), tendo-se confirmado a validade da curva de calibração fornecida pelo fabricante através de vários ciclos de carga e de descarga consecutivos.

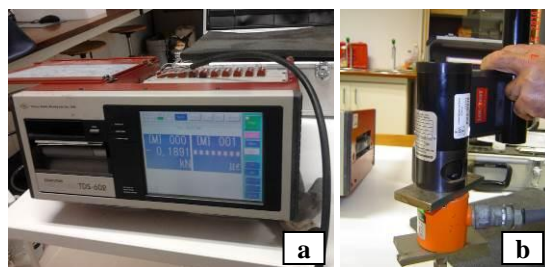


Figura 7. Verificação da calibração do equipamento do ensaio de arranque.

Os ensaios de arranque foram aplicados em cinco faces do provete cúbico de 200 mm de aresta, de acordo com a disposição das sondas já ilustradas na Figura 2. A geometria da sonda do sistema *Lok-test* é definida por um disco com 25 mm de diâmetro colocado a 25 mm de profundidade (Fig. 2a) e um anel de apoio (máquina) com um diâmetro interior de 55 mm (Fig. 8a). Atingida a carga de arranque última registou-se a leitura e retirou-se o fragmento troncocónico para observar a geometria da rotura e inferir quanto à validade do resultado (Figs. 8b). A carga de arranque última lida no aparelho foi convertida em carga de arranque última real (em kN) e foi calculado o valor médio final das cinco leituras obtidas em cada série. As leituras registadas são apresentadas no Quadro 6.



Figura 8. Execução do ensaio de arranque.

Quadro 6. Ensaio da força de arranque Lok-test.

Série	Idade [dias]	P [kN]	Sd [kN]	Cv [%]
P1	1	26,81	1,50	5,58
P2	2	34,51	1,50	4,34
P3	3	35,69	1,13	3,15
P7	7	43,20	1,29	2,98
P14	14	47,74	3,23	6,76
P28	28	53,07	4,27	8,04
P94	94	60,96	2,25	3,69

2.3.4 Ensaio da maturidade do betão

Para o ensaio da maturidade do betão selecionaram-se medidores da gama de 0 a 14 M_{20} dias do tipo COMA-Meter (CONcrete MATurity-Meter), constituídos por um tubo capilar fechado contendo um líquido especial (Fig. 3). Imediatamente antes de se iniciar o ensaio, o tubo capilar foi quebrado no seu extremo superior, inserido imediatamente no invólucro protetor roscado e, de seguida, colocado no betão a partir da superfície (Fig. 3). A partir desse momento o líquido que está no interior do tubo capilar começa a evaporar-se devido à temperatura do betão. Fixa ao tubo existe uma lâmina que mostra uma escala em dias de maturidade equivalente M_{20} . Logo após a betonagem foram instalados medidores de maturidade nos provetes cúbicos de 200 mm de aresta das séries P1, P2, P3, P7 e P14. As leituras da maturidade M_{20} , decorridos 1, 2, 3, 7 e 14 dias, são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7. Ensaio da maturidade do betão.

Série	Idade [dias]	M_{20} [dias]	Sd [dias]	Cv [%]
P1	1	1,26	0,089	7,10
P2	2	2,29	0,114	4,98
P3	3	3,26	0,119	3,66
P7	7	6,64	0,263	3,96
P14	14	11,92	0,698	5,85

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaio da velocidade de ultrassons

A Figura 9 ilustra a correlação obtida entre a velocidade de ultrassons (V) e a resistência à compressão (f_{cm}) para o BAC estudado (representada a traço contínuo), juntamente com a respetiva equação do tipo exponencial e o coeficiente de correlação da ordem de 0,97. Adicionalmente, apresenta-se a traço interrompido a correlação obtida por Nepomuceno [3] para betões vibrados usando materiais idênticos mas com máxima dimensão do agregado grosso de 25 mm. No caso em apreço a diferença entre as correlações é pouco acentuada e os pequenos desvios devem-se provavelmente a diferenças no meio elástico decorrentes das diferentes razões argamassa/agregado grosso. Parece no entanto evidenciar-se que no caso dos betões vibrados o ensaio de ultrassons perde sensibilidade na estimativa da resistência a partir da velocidade de 4,6 km/s, enquanto nos BAC isso ocorre para velocidades superiores da ordem de 4,8 km/s.

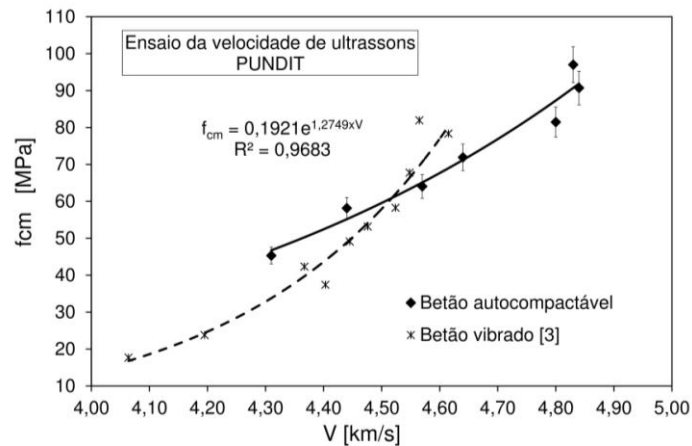


Figura 9. Velocidade dos ultrassons versus resistência à compressão

3.2 Ensaio de dureza superficial

A Figura 10 ilustra a correlação obtida entre o número de ressalto (R) e a resistência à compressão (f_{cm}) para o BAC estudado (representada a traço contínuo), juntamente com a respetiva equação da reta e o coeficiente de correlação da ordem de 0,96. Adicionalmente, apresenta-se a traço interrompido a correlação obtida por Nepomuceno [3] para betões vibrados usando materiais idênticos mas com máxima dimensão do agregado grosso de 25 mm. As diferenças identificadas decorrem provavelmente das diferentes razões argamassa/agregado grosso nos dois casos, da diferença na máxima dimensão do agregado grosso, mas também do facto dos betões vibrados terem sido compactados com vibração externa, densificando a zona próxima da superfície. Numa primeira análise, parece evidenciar-se que em igualdade de resistência à compressão, os betões vibrados apresentam maior dureza superficial comparativamente aos BAC.

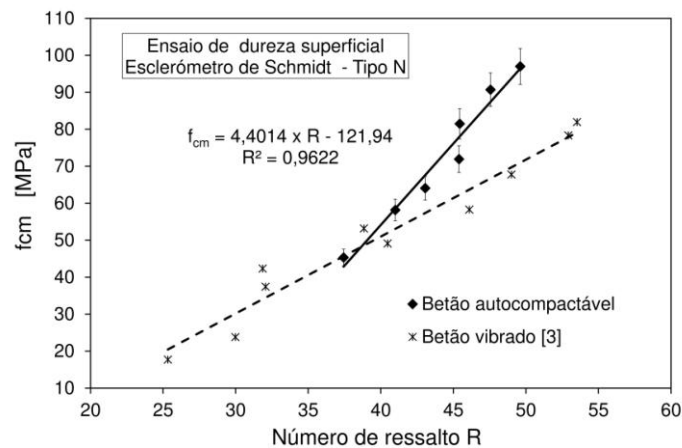


Figura 10. Número de ressalto versus resistência à compressão

3.3 Ensaio da força de arranque

A Figura 11 ilustra a correlação obtida entre a força de arranque (P) e a resistência à compressão (f_{cm}) para o BAC estudado (representada a traço contínuo), juntamente com a respetiva equação da reta e o coeficiente de correlação da ordem de 0,98. Na mesma figura apresenta-se a traço interrompido a correlação obtida por Nepomuceno [3] para betões vibrados usando materiais idênticos mas com máxima dimensão do agregado grosso de 25 mm e ainda as correlações propostas por Krenchel e Peterson [2], também para betões vibrados. Em ambos os tipos de betão (vibrado e autocompactável) as correlações mostram a mesma tendência e elevados coeficientes de correlação. Não obstante, em igualdade de resistência à compressão, a força de arranque é maior nos betões vibrados do que nos

BAC. Este facto pode ser explicado pela existência de maior quantidade de argamassa nos BAC e pela presença de agregados de menor dimensão na zona envolvente da sonda. No caso dos betões vibrados a presença de partículas de maiores dimensões na zona envolvente da sonda proporciona maior resistência à rotura na zona do braço de compressão que liga a sonda ao anel de contrapressão.

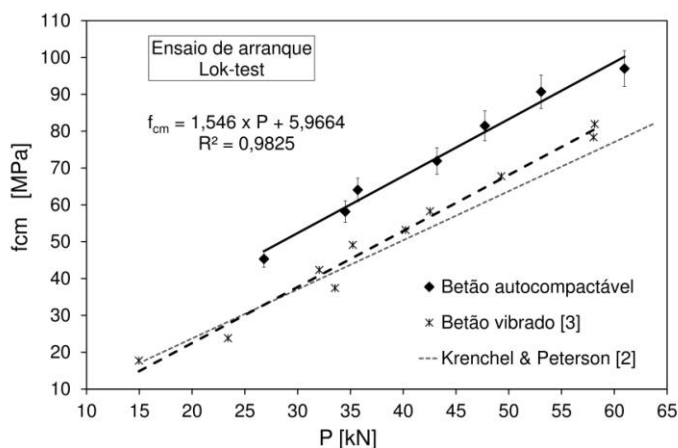


Figura 11. Força de arranque versus resistência à compressão

3.4 Ensaio da maturidade do betão

A Figura 12 ilustra a correlação entre a maturidade (M_{20}) e a resistência à compressão (f_{cm}) para o BAC estudado, juntamente com a respetiva equação logarítmica e o coeficiente de correlação da ordem de 0,98. Tendo por base os valores apresentados nas colunas 2 e 3 do Quadro 6 é possível verificar um pequeno desfasamento entre os dias de maturidade M_{20} e os dias de cura efetiva do betão, a partir dos 7 dias. Essas pequenas diferenças podem dever-se ao facto da temperatura da camara de cura ter-se situado, em média, ligeiramente abaixo dos 20 °C. Em todo o caso, os resultados obtidos permitem indicar o ensaio da maturidade como um meio eficaz de estimar a resistência à compressão. Não obstante, salienta-se que estes medidores têm custos elevados e não podem ser reutilizados.

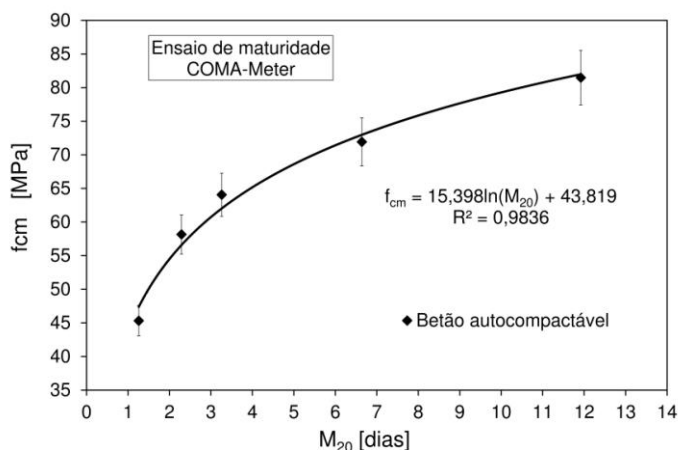


Figura 12. Maturidade M_{20} versus resistência à compressão

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciaram boas correlações entre a resistência à compressão do BAC e as leituras dos ensaios não destrutivos, mas com diferenças face às correlações obtidas em betões correntes vibrados. Os resultados indicam que as proporções argamassa/agregado grosso, a máxima dimensão dos agregados e a forma como o betão é adensado são suscetíveis de afetar os resultados, pelo que a validade das correlações existentes deve ser analisada com precaução em cada situação.

REFERÊNCIAS

- [1] Bungey, J.H; Millard, S.G. (1996). *Testing of Concrete in Structures*, 3th edition, London, Chapman & Hall.
- [2] Krenchel, H; Petersen, C.G. (1984). In-situ Pullout Testing with Lok-test. Ten Years' Experience. *International Conference on In situ/ Non-destructive Testing of Concrete*, Ottawa, 2-5 Oct.1984.
- [3] Nepomuceno, M.C.S. (1999). Ensaaios Não Destrutivos em Betão. *Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica*, Covilhã, UBI, p. 469.
- [4] Nepomuceno, M.C.S.; Lopes, S.M.R. (2002). Non-destructive Tests on Concrete. *Journal of Concrete Technology Today Incorporating Structural Steel*, Trade Link Media, Singapore, Jul.-Sept., pp. 14-20.
- [5] Lopes, S.M.R.; Nepomuceno, M.C.S. (1997). A Comparative Study of Penetration Resistance Apparatus on Concrete. *Proc. of ICCE/4*, Hawaii, David Hui Edition, pp. 615-616.
- [6] Lopes, S.M.R.; Nepomuceno, M.C.S. (1998). Evaluation of In-place Concrete Strength by Near-to-surface Tests. *Proc. of 12th European Ready Mixed Concrete Congress*, Lisbon, Portugal, pp. 338-347.
- [7] Lopes, S.M.R.; Nepomuceno, M.C.S. (1999). High Strength Concrete: Penetration Resistance Tests on High Strength Concrete. *Proc. of 1st International Conference on High Strength Concrete*, ASCE, USA, pp. 425-433. ISBN 0-7844-0419-4.
- [8] Lopes, S.M.R.; Nepomuceno, M.C.S. (2001). Non-Destructive Tests on Normal and High Strength Concrete. *Proc. of 26th Conference on Our World in Concrete & Structures*, vol. XX, Singapore, pp. 53-67. ISBN 981-04-2513-9.
- [9] Nepomuceno, M.C.S.; Pereira-de-Oliveira, L.A. (2008). Parameters for Self-compacting Concrete Mortar Phase. *Proc. of Fifth ACI/CANMET International Conference on High-Performance Concrete Structures and Materials, Brazil, Jun 2008*, ACI – SP-253-21, USA, pp. 323-340, ISBN: 978-0-87031-277-9.
- [10] Nepomuceno, M.C.S.; Pereira-de-Oliveira, L.A.; Lopes, S.M.R. (2012). Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, 26(1), pp. 317-326
- [11] Nepomuceno, M.C.S.; Pereira-de-Oliveira, L.A.; Lopes, S.M.R. (2014). Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. *Construction and Building Materials*, 64, 2014, pp. 82–94.
- [12] Nepomuceno, M.C.S.; Pereira-de-Oliveira, L.A.; Franco, R.M.C. (2012). Otimização de betões auto-compactáveis para diferentes restrições ao escoamento. *Atas do 3º Congresso Iberoamericano sobre betão auto-compactável*, Madrid, Espanha, pp. 45-54.
- [13] NP EN 206-9:2010. Regras adicionais para o betão autocompactável (BAC). Instituto Português da Qualidade, Portugal
- [14] British Standard BS 1881: Part 201: 1986. *Testing Concrete: Guide to the Use of Non-destructive Methods of Test for Hardened Concrete*, London, British Standards Institution.
- [15] British Standard BS 1881 :Part 203: 1986. *Testing Concrete: Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete*, London, British Standard Institution.
- [16] British Standard BS 1881: Part 202: 1986. *Testing Concrete: Recommendations for Surface Hardness Testing by Rebound Hammer*, London, British Standards Institution.
- [17] British Standard BS 1881: Part 207: 1992. *Testing Concrete. Recommendations for the Assessment of Concrete Strength by Near-to-surface Tests*, London, British Standards Institution.