

Avaliação do ensaio de *pull-out* na estimativa da resistência à compressão do betão em idades jovens



Manuel Vieira¹



Nuno Mendes²



António Lopes
Batista³

RESUMO

No presente trabalho procurou-se, através da realização de um programa experimental, avaliar a aplicabilidade dos ensaios de arranque, vulgo “*pull-out*”, para a estimativa das resistências *in situ* dos betões a idades jovens. Com este estudo pretende-se avaliar o efeito da máxima dimensão do agregado e da localização dos êmbolos de arranque na relação entre *pull-out* e a resistência à compressão.

Palavras-chave: *Pull-out*; resistência; máxima dimensão do agregado; NDT

1. INTRODUÇÃO

O tempo de execução das estruturas é um fator cada vez mais condicionante para a economia da construção. Esta exigência conduziu ao desenvolvimento de tecnologias de construção cada vez mais sofisticadas que, para serem implementadas, obrigam a um conhecimento mais aprofundado do crescimento da resistência do betão.

A resistência à compressão é correntemente utilizada como um indicador da qualidade do betão e constitui uma referência importante de especificações e controle de qualidade para as estruturas. No entanto, os valores obtidos na verificação da resistência à compressão do betão aplicado na estrutura não consideram as variações associadas ao transporte, colocação, compactação e cura, cujas condições são diferentes daquele que é moldado em laboratório, tipicamente, em cilindros ou cubos normalizados.

Uma alternativa aos ensaios em provetes normalizados é a avaliação das propriedades do betão *in situ*. Nas últimas décadas foram desenvolvidas inúmeras técnicas de ensaio para que a estimativa da resistência do betão seja mais rápida, económica, simples e com poucos danos para estrutura. Estas técnicas são designadas por Ensaios Não-destrutivos e Ensaios Parcialmente Destrutivos.

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. mvieira@lnec.pt

² Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa. nunomsmendes@gmail.com

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. a.l.batista@lnec.pt

Na presente comunicação apresentam-se alguns resultados de um trabalho que teve como objetivo avaliar a influência da máxima dimensão do agregado e da localização dos êmbolos de arranque na adequabilidade dos ensaios de arranque do tipo “pull-out” para a caracterização da resistência à compressão do betão em idades jovens. Também se fará uma avaliação comparativa dos resultados com outras técnicas não destrutivas, nomeadamente utilizando ultrassons e esclerómetro.

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTO DE ENSAIO

2.1 Número e tipo de provetes

Numa primeira fase, de modo a gerir o material disponível para as amassaduras, realizaram-se ensaios de arranque em dois provetes de dimensões diferentes para verificar se a distância entre os dispositivos e os bordos dos provetes influenciavam os resultados. Refira-se que na norma europeia EN 12504-3 [1], relativa aos ensaios *pull-out*, vem especificado que a distância mínima entre os dispositivos e os bordos dos elementos de betão deve ser de 100 mm.

Foram utilizados provetes prismáticos de dimensões $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$ e $200 \times 200 \times 600 \text{ mm}^3$. Nos primeiros, a menor distância do centro do disco à aresta mais próxima do provete era de 75 mm, enquanto nos segundos era de 100 mm, respeitando o exigido na norma EN 12504-3 [1]. Em ambos os provetes utilizaram-se betões com composições e tempos de cura iguais. Efetuaram-se 7 ensaios de arranque em cada um, sendo que 3 foram na face de enchimento e os restantes 4 nas faces moldadas (2 em cada face). Os discos foram dispostos nos moldes conforme se apresenta na Fig. 1. Os cortes A-A e C-C referem-se a vista em planta.

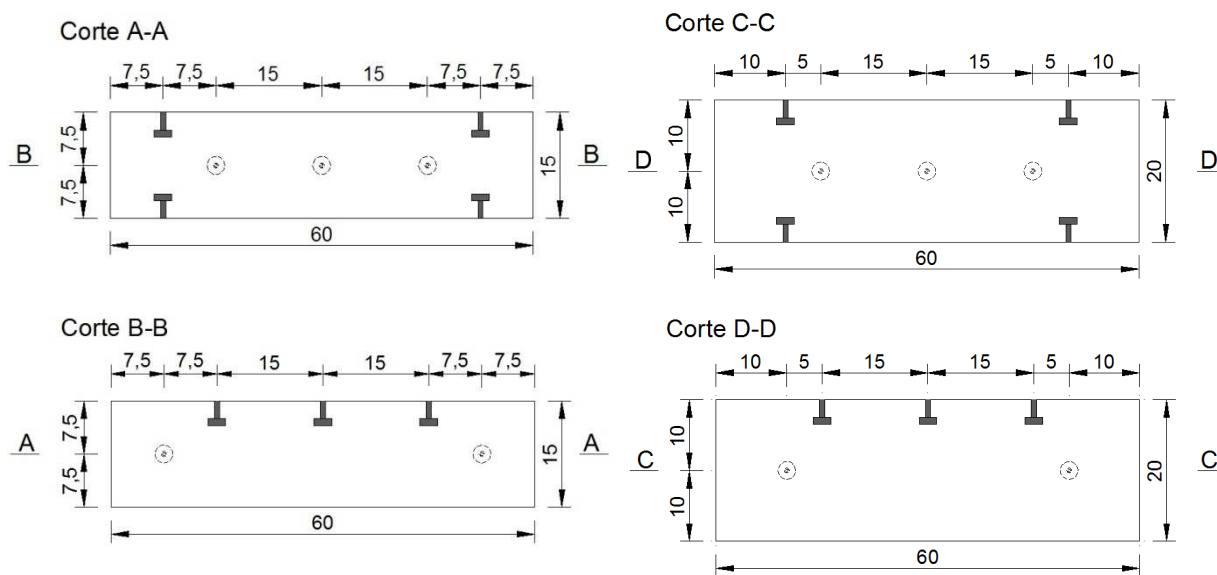


Figura 1. Localização dos êmbolos nos provetes de $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$ (cortes A-A e B-B) e nos provetes de $200 \times 200 \times 600 \text{ mm}^3$ (cortes C-C e D-D).

Depois de se realizarem os ensaios concluiu-se que o facto de os êmbolos ficarem a uma distância de 75 mm, mais pequena que a mínima recomendada (100 mm), dos bordos dos provetes, não tem influência significativa nos valores dos ensaios de arranque, visto que em ambos os provetes esses resultados foram bastante próximos.

Posto isto, decidiu-se que os ensaios de arranque e os restantes ensaios não destrutivos (de propagação de ondas ultrassonoras e de medição da dureza superficial) seriam realizados em provetes prismáticos de dimensões $150 \times 150 \times 175 \text{ mm}^3$, com o objetivo de reduzir o volume de betão a produzir.

Para cada tipo de betão foram realizados 6 provetes de 150x150x175 mm³, para os referidos ensaios, e ainda 2 provetes cúbicos de 150 mm, para o ensaio de compressão.

2.2 Tipo e composição dos betões

Tendo em conta os objetivos do presente trabalho, foram realizados 4 tipos de betões e uma argamassa.

Os materiais utilizados para a execução dos vários betões foram: cimento CEM I 42,5R, agregados grossos britados de origem granítica, agregados finos naturais de origem siliciosa e um adjuvante superplastificante.

No Quadro 1 são apresentadas as composições por metro cúbico dos vários betões produzidos. Os pesos dos agregados referem-se ao estado saturado com superfície seca. Também se indica o espalhamento medido de acordo com a NP EN 12390-8 [2]. Optou-se pela produção de betões autocompactáveis de modo a mitigar a influência da compactação na homogeneidade do betão no provete.

Quadro 1. Composição dos betões

Betão	D20 AC050	D12 AC070	D12 AC050	D12 AC030	D4 AC050
Brita 8/20 [kg/m ³]	280,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brita 4/12 [kg/m ³]	460,0	740,0	740,0	740,0	0,0
Areia 0/4 [kg/m ³]	420,0	420,0	420,0	420,0	760,0
Areia 0/1 [kg/m ³]	520,0	515,0	520,0	520,0	920,0
Cimento [kg/m ³]	400,0	325,0	400,0	525,0	400,0
Água efetiva [kg/m ³]	200,0	227,5	200,0	157,5	200,0
Adjuvante [kg/m ³]	6,00	3,89	6,00	12,71	6,00
Relação A/C	0,50	0,70	0,50	0,30	0,50
Espalhamento [mm]	670	620	640	550	-

As designações dadas aos vários betões são relativas às suas características em termos de composição. Por exemplo, D20 AC050 significa que a máxima dimensão do agregado deste betão é de 20 mm e que a relação água-cimento é de 0,50.

No betão D4 AC050 (que na realidade é uma argamassa, por a máxima dimensão do agregado ser de 4 mm) não foi realizado o ensaio de espalhamento por não ter apresentado fluidez adequada. Tal deveu-se ao facto de se ter optado por manter fixo o teor de pasta na composição, variando-se apenas o parâmetro relativo à máxima dimensão do agregado maior. Efetivamente, a diminuição deste parâmetro obrigaria a aumentar o teor de pasta caso se pretendesse manter a fluidez da mistura.

2.3 Execução dos provetes

Para a realização dos ensaios de arranque, de ultrassons e esclerométrico, os provetes foram executados em moldes de 150x150x600 mm³, mas com a particularidade de se terem colocado no seu interior duas peças de madeira a 175 mm das faces de topo. Para a realização dos ensaios de compressão, os provetes cúbicos foram executados em moldes metálicos de 150 mm de aresta.

Após a amassadura e caracterização da consistência do betão, procedeu-se à moldagem dos provetes, na qual foram tidos em atenção alguns cuidados de modo a assegurar a correta posição dos dispositivos do ensaio *pull-out*. A moldagem dos provetes foi realizada em duas camadas, colocando-se o betão nos moldes sem compactação, de modo a garantir a correta envolvência dos discos.

Como já foi referido, a argamassa D4 AC050, durante o seu processo de amassadura, não apresentou fluidez, pelo que no processo de betonagem dos provetes foi necessário proceder à sua compactação recorrendo a uma mesa vibratória.

Relativamente à cura dos provetes, foram mantidos numa sala com condições controladas a uma temperatura média de 21°C, protegidos com uma tela plástica para que não houvesse evaporação excessiva da água.

A desmoldagem dos provetes foi realizada cerca de 20 horas depois da betonagem, para que os ensaios pudessem ser feitos com cerca de 24 horas de idade.

2.4 Procedimento de ensaio

2.4.1 Ensaios de propagação de ondas ultrassonoras

De acordo com a teoria da propagação do som em sólidos, a velocidade de transmissão é função da densidade e do módulo de elasticidade do material, e é independente da frequência da vibração que se transmite ao meio. A velocidade de propagação das ondas entre dois pontos (v) é determinada a partir do conhecimento da distância (d) e da medição do tempo de percurso da onda entre esses dois pontos (t) através da Eq. (1) [3]

$$v = \frac{d}{t} \quad (1)$$

Segundo a norma ASTM C 597 [4], antes de iniciar o ensaio deve proceder-se à calibração do aparelho, utilizando a barra de calibração. A seguir devem marcar-se os pontos de colocação dos transdutores e medir-se rigorosamente o comprimento de percurso. De seguida aplica-se um agente condutor (massa, óleo) nas faces dos transdutores ou na superfície a ensaiar, ou em ambos. Pressionam-se firmemente as faces dos transdutores contra as superfícies do betão até que o tempo de percurso exibido fique estável e regista-se o tempo percorrido. O método de transmissão das ondas utilizado foi o direto. As leituras foram realizadas no centro das faces moldadas dos provetes, de modo que não houvesse grande interferência dos êmbolos do ensaio *pull-out* nos resultados. Em cada ensaio registou-se o tempo de percurso das ondas (em μ s) e mediu-se o comprimento do provete.

Devido à interferência que as armaduras introduzem neste ensaio, só é adequado para betão em massa.

2.4.2 Ensaios de medição da dureza superficial (esclerométrico)

No ensaio esclerométrico utiliza-se um aparelho de medição da dureza superficial, designado por esclerómetro (Rebound Hammer).

Este ensaio baseia-se no princípio de que o recuo de uma massa depende da dureza da superfície com a qual colide, sendo o resultado expresso em termos do índice esclerométrico (IE), que é uma medida do recuo do martelo do equipamento. O IE expressa uma medida da dureza relativa da superfície da zona avaliada, não devendo ser relacionada diretamente com qualquer outra propriedade do betão. Ainda assim, a utilização deste método permite verificar a uniformidade da qualidade do betão, obter uma estimativa aproximada da resistência e classificar a superfície em termos da sua resistência à abrasão.

Seguindo as recomendações da norma ASTM C 805 [5], na realização deste ensaio os provetes foram colocados numa máquina de compressão sob uma tensão de cerca de 3 MPa, para impedir o seu movimento. Foram efetuadas leituras nas faces moldadas que continham os dispositivos para o ensaio de arranque, nas imediações destes, com o aparelho operado na horizontal. Em cada face ensaiada foram realizadas 5 leituras.

2.4.3 Ensaios de compressão

Para a determinação da tensão de rotura do betão foi utilizada como referência a norma NP EN 12390-3 [6].

2.4.4 Ensaios de arranque (*pull-out*)

O ensaio *pull-out* baseia-se no princípio de que a resistência à compressão do betão está relacionada com a carga de tração máxima que pode ser aplicada a um êmbolo metálico incorporado no betão antes da sua rotura.

O procedimento para o ensaio *pull-out*, nomeadamente o Lok-Test, consiste na fixação de dispositivos (*pull-out insert*) nas cofragens antes da betonagem. Estes dispositivos são constituídos por um disco metálico (*insert head*) com 25 mm de diâmetro, que é colocado a 25 mm de profundidade da camada superficial do betão, ligado por um veio metálico cónico (*shaft insert*) com 7 mm de diâmetro, centrado no disco (Fig. 2 a). Estes dispositivos são aparafusados à cofragem, ficando perpendiculares à superfície a ensaiar. Depois da cura do betão e da sua descofragem, o veio é retirado do disco, deixando um furo tronco-cónico na superfície do betão, concêntrico a este. De seguida é colocado um dispositivo que liga o disco ao aparelho de aplicação de carga. O aparelho de aplicação de carga é constituído por um anel de contrapressão com diâmetro interior de 55 mm, colocado concentricamente à volta do veio e contra a superfície a ensaiar, e um sistema de medição de carga com um instrumento de leitura, que é ligado ao veio do dispositivo (Fig. 2 b). A carga é aplicada através de um macaco hidráulico, operado manualmente. A carga deve ser aplicada lentamente, com velocidade constante e perpendicularmente à superfície a testar. O ensaio é realizado até à rotura do betão, registando-se a força de pico indicada no manómetro do aparelho. A rotura dá-se quando o ponteiro do manómetro decresce ligeiramente. A força é medida com uma precisão de $\pm 2\%$ e é arredondada para o valor de 0,5 kN mais próximo [1].

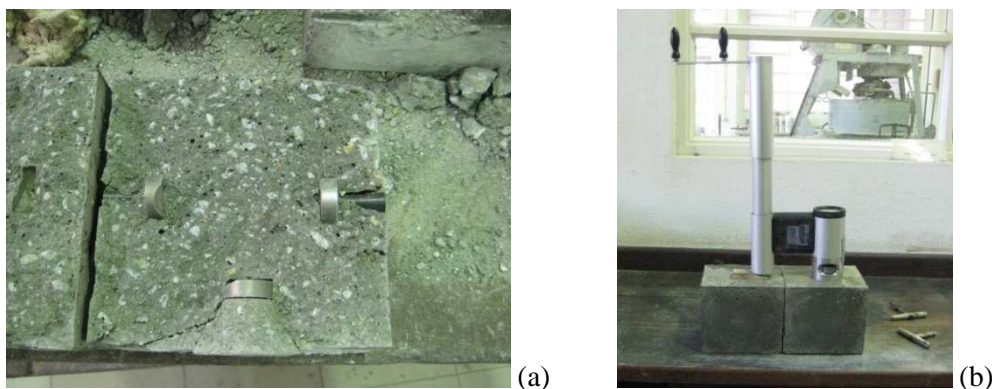


Figura 2. Vista dos discos embebidos no betão após o ensaio (a) e sistema de aplicação de carga (b).

Outro tipo de ensaio de arranque é o designado Capo-Test. Contrariamente ao Lok-Test, este tipo de ensaio pode ser planeado após a betonagem. O Capo-Test consiste na realização de um furo no betão, perpendicular à superfície deste, com posterior introdução do dispositivo de arranque, constituído por um veio e uma anilha expansiva. Esta anilha é colocada a uma profundidade de 25 mm que, depois de expandida, fica com 25 mm de diâmetro. De seguida, com o mesmo equipamento utilizado no Lok-Test, procede-se à aplicação de carga até à rotura do betão, registando-se a força indicada no manómetro. Refira-se que no âmbito do presente trabalho só foram realizados ensaios *pull-out* do tipo Lok-Test.

Em cada tipo de betão procedeu-se ao arranque de 18 dispositivos previamente fixados nas faces dos provetes. Cada provete continha 3 dispositivos: 2 nas faces moldadas e 1 na face de enchimento.

Como as faces de enchimento apresentavam algumas irregularidades em termos de planura, já que a sua regularização era difícil, devido ao sistema de fixação do dispositivo de arranque, considerando possível a fissuração do provete durante o ensaio, decidiu-se ensaiar as faces moldadas em primeiro lugar, e só depois a face de enchimento. De modo a não comprometer o ensaio dos restantes

dispositivos, o primeiro ensaio da face moldada foi realizado só até à rotura do betão, registando-se a força correspondente e o modo de rotura, sem a tentativa de extração do dispositivo. Nos ensaios das outras faces houve a tentativa de remoção dos mesmos. Por vezes, e por falta de capacidade do aparelho de aplicação de carga, essa remoção não foi possível.

Um aspeto muito importante a ter em conta nos ensaios de arranque é o processo de vibração do betão. Por vezes, apesar de serem colocados na posição correta, os dispositivos não ficam bem apertados devido a erros humanos e, no processo de vibração do betão, os moldes (ou as cofragens) ficam, também, sujeitas a vibrações, o que pode provocar um desaperto das pastilhas em relação ao eixo, ou até mesmo a deslocação dos mesmos em relação à posição pretendida. Tal anomalia foi verificada nos êmbolos, tendo este ficado incapacitado para se realizar o ensaio. Em obra, será pouco provável a ocorrência de tal problema, a não ser que haja contacto do vibrador com o êmbolo ou nos caos em que a vibração seja externa.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

No Quadro 3 são apresentados os resultados médios dos ensaios.

Quadro 3. Resultados médios obtidos nos ensaios realizados.

Betão	Velocidade de Propagação de Ultrassons [VUS (km/s)]	Índice Esclerométrico [IE, (-)]	Força pull-out [PO (kN)]		f_{cm} [MPa]
			Face Moldada	Face de Enchimento	
D12 AC070	3,59	17	10,8	9,5	10,6
D20 AC050	3,87	21	17,9	12,9	19,6
D12 AC050	3,90	23	18,7	14,4	20,5
D4 AC050	3,95	24	21,4	17,9	20,7
D12 AC030	4,24	30	35,8	28,7	42,3

Na Fig. 3 pode verificar-se que os parâmetros medidos nos vários ensaios apresentam a mesma tendência para cada tipo de betão, nomeadamente no que diz respeito aos ensaios de arranque e de da resistência à compressão.

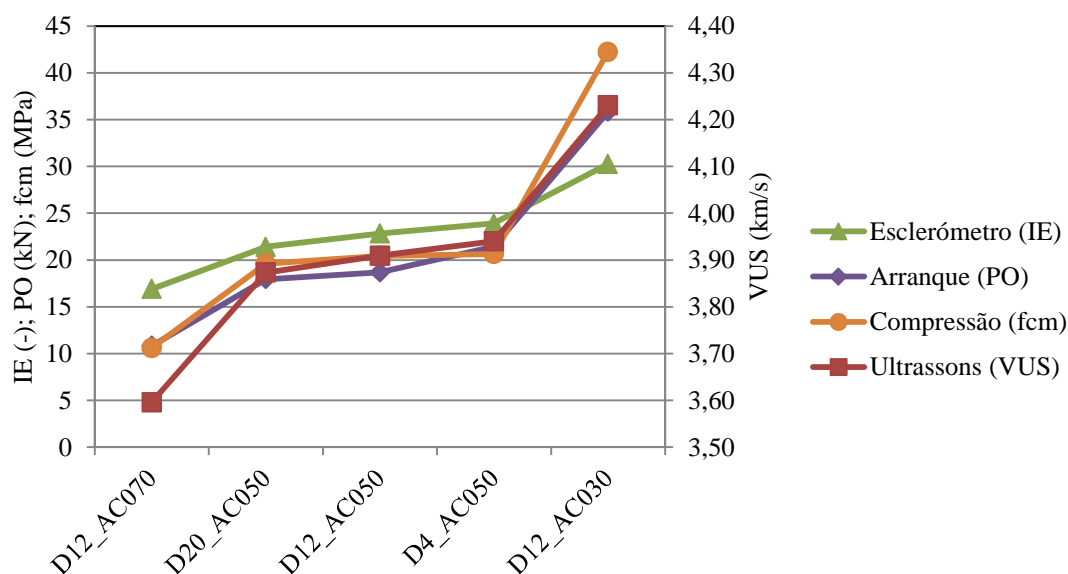


Figura 3. Resultados dos ensaios em função do tipo de betão.

3.1. Efeito da máxima dimensão dos agregados

Para avaliar o efeito da máxima dimensão dos agregados compararam-se os resultados obtidos nos betões D20 AC050, D12 AC050 e D4 AC050. A composição destes é idêntica, com exceção da máxima dimensão dos agregados, que varia de 20 mm a 4 mm.

Na Fig. 4 apresentam-se os resultados da força de arranque e da resistência à compressão em função da máxima dimensão dos agregados do betão. Também se indica, com umas barras de erro, a amplitude do desvio padrão dos resultados obtidos para cada betão. No que se refere à resistência à compressão considera-se que não é significativa a variação observada. Relativamente aos resultados do ensaio de arranque verifica-se que estes foram mais altos quando se utilizou um agregado com máxima dimensão de apenas 4 mm. Tal deve-se eventualmente ao facto de se ter mantido constante a quantidade de água efetiva nas diferentes composições, o que, associado à maior superfície específica dos agregados de menor dimensão, conduz a uma melhor qualidade da interface agregado-matriz, nas primeiras idades, devido ao aumento localizado da razão A/C junto à superfície dos agregados. Tal não se verificou para os betões com agregados de maior dimensão máxima, não se considerando que a variação seja significativa.

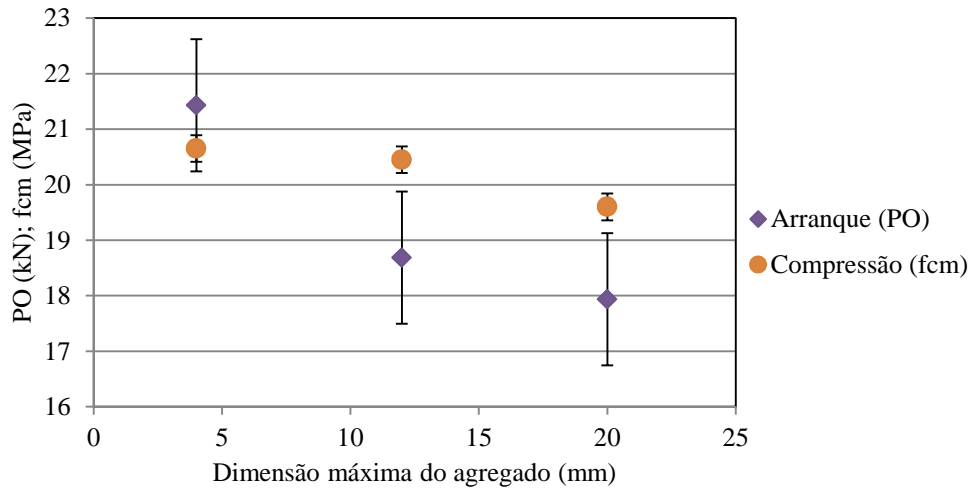


Figura 4. Força de arranque e resistência à compressão em função à máxima dimensão do agregado.

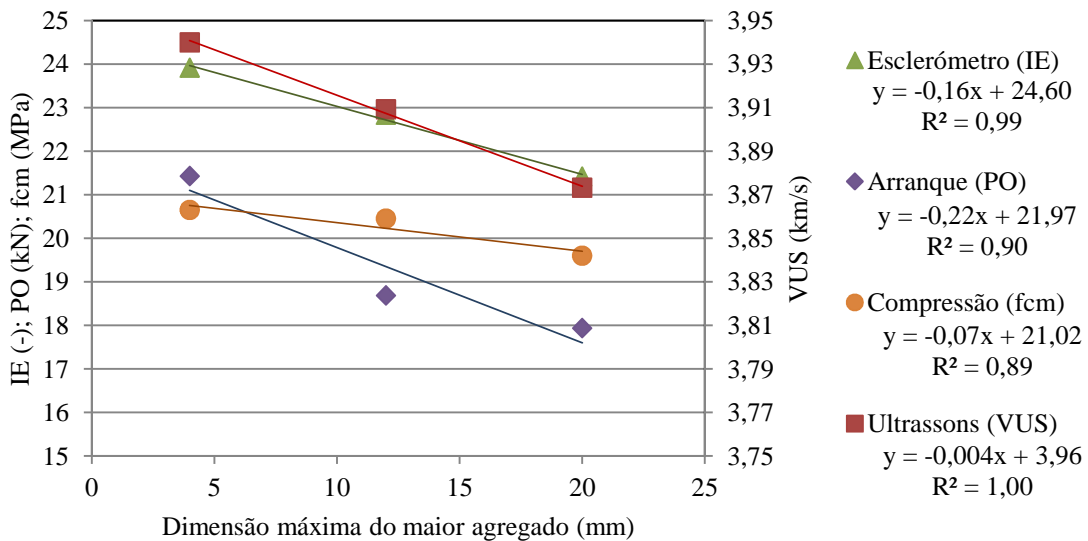


Figura 5. Resultados das determinações efetuadas em função da máxima dimensão dos agregados.

Relativamente ao ensaio de arranque as restantes determinações são menos sensíveis aos fatores acima expostos, como se pode ver do maior coeficiente de correlação obtido para os ensaios de ultrassons e esclerométrico (Fig. 5).

3.2 Efeito da relação água-cimento.

O efeito da relação água-cimento permitiu a avaliação dos resultados dos ensaios para diferentes níveis de resistência, mantendo-se constante a máxima dimensão do agregado, pelo que se avaliam nesta secção as composições D12 AC070, D12 AC050 e D12 AC030. Na Fig. 6 apresentam-se os valores médios das determinações efetuadas nos ensaios não destrutivos em função da resistência à compressão obtida no mesmo betão.

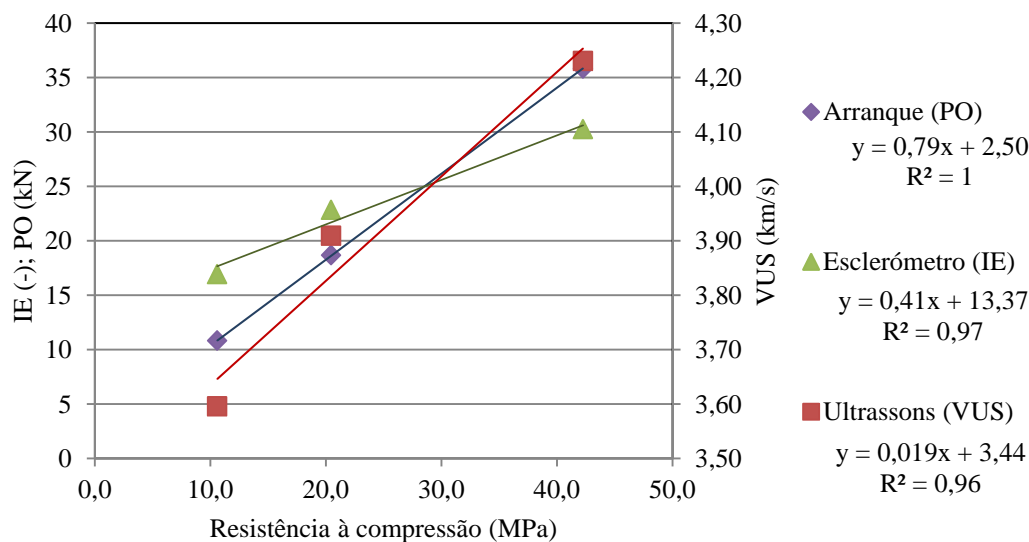


Figura 6. Força de arranque em função da resistência à compressão

Verifica-se uma relação linear entre os resultados da força de arranque e os da resistência à compressão, concordante com outros resultados da literatura [7].

As determinações efetuadas pelos ensaios de ultrassons e esclerométrico apresentam relações com a resistência à compressão que se afastam da linearidade, pelo que indiciam a influência de outros fatores além da relação A/C.

3.3 Efeito da localização dos dispositivos de arranque

A localização dos dispositivos de arranque nas faces moldadas obriga à previsão de utilizar janelas na cofragem, pelo que a alternativa de os colocar na face de enchimento poderá tornar-se mais prática. Assim, para avaliar o efeito da localização dos dispositivos de arranque compararam-se os valores obtidos nas faces moldadas dos provetes e nas faces de enchimento dos mesmos.

Verifica-se que, em cada tipo de betão, a face de enchimento apresenta uma força de arranque menor do que a face moldada (Fig. 7). Isto deve-se a eventuais efeitos de segregação e acabamento da superfície. Por outro lado, as faces de enchimento foram as últimas a serem testadas, o que pode ter influenciado os resultados devido às fissuras existentes provenientes dos ensaios das faces moldadas. Outro aspeto que faz diferenciar os resultados das duas faces é o facto de as faces de enchimento apresentarem irregularidades, fazendo com que o contacto entre o anel de contrapressão e a superfície não seja o ideal.

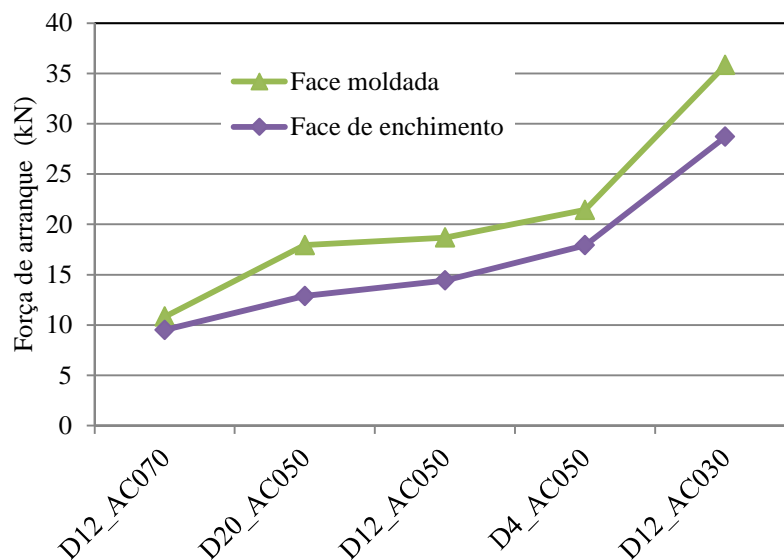


Figura 7. Força de arranque em função do tipo de betão.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a adequação do ensaio de *pull-out* na estimativa da resistência à compressão do betão em idades jovens. Para isso analisou-se a influência da máxima dimensão dos agregados, da relação água-cimento (nível de resistência) e da localização dos dispositivos de arranque, chegando-se às seguintes conclusões:

- Na gama de máximas dimensões do agregado avaliada, esta grandeza só influenciou o resultado da força de arranque quando foi de 4 mm. Tal poderá dever-se a um aumento localizado da razão A/C junto à superfície destes agregados que apresentam maior superfície específica;
- Verificou-se uma boa correlação linear entre a resistência à compressão e a força de arranque quando se varia apenas a razão A/C, mantendo constante o volume de pasta. O valor desta correlação é superior à verificada nos outros ensaios não destrutivos;
- Para se ter uma boa caracterização da resistência à compressão *in situ* é preferível que os dispositivos de arranque sejam colocados nas faces moldadas em vez nas de enchimento, pelo que deverá prever-se a utilização de janelas na cofragem.

Em face dos resultados obtidos considera-se adequada e vantajosa, em relação a outras técnicas não destrutivas, a utilização dos ensaios *pull-out* para a caracterização da resistência à compressão do betão *in situ*, nomeadamente nas suas primeiras idades para avaliar, por exemplo, a possibilidade de aplicação de pré-esforço ou de descofragem.

REFERÊNCIAS

- [1] EN 12504-3 (2005), Testing concrete in structures - Part 3: Determination of pull-out force. CEN.
- [2] NP EN 12350-8 (2010) Ensaios do betão fresco. Parte 8: Betão autocompactável. Ensaio de espalhamento. IPQ
- [3] Berke, M. (2000), Nondestructive material testing with ultrasonics. Introduction to the basic principles. Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics, Vol. 5, N° 9
- [4] ASTM C 597 (2002). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. American Society of Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia.

- [5] ASTM C 805 (2002). Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. American Society of Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02, Philadelphia.
- [6] NP EN 12390-3 (2011) Ensaaios do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes. IPQ
- [7] Krenchel, H. & Petersen, C.G. (1984), In-Situ pullout testing with Lok-Test, ten years experience, in CANMET/ACI International Conference on In-Situ/Non-Destructive Testing of Concrete, Ottawa, Ontario, Canada