

Pull Off test to evaluate the compressive strength of concrete: an alternative to Brazilian standard techniques

Ensaio de “Pull Off” para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil

E. PEREIRA ^a
engenheiroeduardopereira@gmail.com

M. H. F. DE MEDEIROS ^b
medeiros.ufpr@gmail.com

Abstract

To estimate the compressive strength of concrete is necessary in many reinforced concrete structures inspection works. In Brazil, the standard tests for this purpose are: Compressive test in drilled cores, rebound hammer test and ultrasonic test. In the United States and Europe are also regulated other techniques. The aim of this paper is to analyze the use of Pull Off test as an inspection tool of concrete and also disclose the possibility of use of complementary techniques to the standard ones in Brazil. The results show that the Pull Off test results in high correlation ($R^2 > 0.93$) with the compressive strength, measured in cylindrical and prismatic specimens. The rebound hammer test did not show satisfactory correlation ($R^2 \cong 0.6$) for the case of cylindrical specimens. The ultrasonic test showed high correlation ($R^2 > 0.98$), but behaves differently with the shape changing of the specimens.

Keywords: nondestructive test, concrete strength, rebound hammer test, ultrasonic test, Pull Off.

Resumo

Estimar a resistência à compressão do concreto é uma necessidade em muitos trabalhos de inspeção de estruturas de concreto armado. No Brasil, as ferramentas regulamentadas pela ABNT para este fim são a extração de testemunho, a esclerometria e o ultrassom. Nos Estados Unidos e Europa também são regulamentadas outras técnicas. O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade do uso do ensaio de “Pull Off” como ferramenta de inspeção em concreto e ainda divulgar a possibilidade de emprego de técnicas complementares as normalizadas no Brasil. Os resultados demonstram que o ensaio “Pull Off” apresenta alto índice de correlação ($R^2 > 0,93$) com o resultado de resistência à compressão medido tanto em corpos de prova cilíndricos como nos prismáticos. A técnica de esclerometria não apresentou correlação satisfatória ($R^2 \cong 0,6$) para o caso de corpos de prova cilíndricos e o ultrassom apresentou alta correlação ($R^2 > 0,98$), mas se comporta diferente com a mudança de forma dos corpos de prova.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos, resistência do concreto, esclerometria, ultrassom, “Pull Off”.

^a Universidade Federal do Paraná, engenheiroeduardopereira@gmail.com, Curitiba, Brasil;

^b Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com, Curitiba, Brasil.

1. Introdução

Em estruturas de concreto armado, a resistência do concreto é uma das propriedades mais importantes, sendo um dos parâmetros principais usados para seu dimensionamento. Maneiras de avaliar esta propriedade em estruturas já acabadas e em uso, sem danos a sua funcionalidade ou aparência, são preocupações de profissionais de engenharia ao longo dos anos.

Na engenharia civil estão disponíveis diversos métodos de ensaio para avaliar a resistência do concreto. O ensaio mais utilizado é a determinação da resistência à compressão do concreto aos 28 dias através de compressão simples em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos, sendo o primeiro normalizado no Brasil e Estados Unidos [1, 2] e ambos os formatos normalizados na Europa [3, 4].

Apesar da facilidade de execução deste tipo de ensaio, tanto em termos de preparação de amostra quanto na obtenção de resultados, o ensaio apresenta a limitação de ter de ser planejado antes da execução das estruturas, não favorecendo inspeções em obras acabadas, nem o controle do desenvolvimento da resistência do material ao longo do tempo, caso não seja prevista a moldagem dos corpos de prova para este fim.

Nas últimas décadas, outros métodos de ensaio foram desenvolvidos, os chamados ensaios não destrutivos que, através de processos mais rápidos, mais simples e mais econômicos, permitem obter informação das propriedades do concreto e uma estimativa da resistência à compressão medida in situ, eliminando a necessidade de extração de muitos corpos de prova para a determinação

da resistência à compressão das obras inspecionadas. Os ensaios mais populares são os ensaios de esclerometria e de velocidade de ultrassom, sendo estes normalizados no Brasil. Porém, existem outros como penetração de pinos, "Pull Off", "Break Off" e "Pull Out", que se apresentam como alternativas viáveis [5; 6; 7; 8; 9; 10].

As técnicas não destrutivas produzem pouco ou nenhum dano a peça inspecionada, podendo ser executadas nas estruturas de concreto em uso e permitindo a detecção de problemas ainda em estágios incipientes. Isto pode ser uma vantagem, principalmente pelo ponto de vista financeiro, pois ao detectar-se um problema no estágio inicial, pode-se proceder as intervenções necessárias antes da ruína completa da estrutura.

A escolha do método de ensaio depende de vários fatores como acesso a estrutura, custo de intervenção, danos causados durante a execução do ensaio, rapidez de execução, características e o tipo de avaliação que se pretende realizar [9]. Neste artigo estão discutidas as técnicas normalizadas no Brasil de esclerometria [11] e velocidade de propagação de ultrassom [12] além do ensaio de arrancamento "Pull Off", ensaio este já normalizado na Europa pela BS 1881 part. 207 [13].

2. Ensaios não-destrutivos

2.1 Esclerometria

O ensaio não destrutivo mais usado na atualidade é, sem dúvida, a determinação do índice esclerométrico. O método baseia-se na medição da dureza superficial do concreto e possui como variá-

Figura 1 – Mecanismo de funcionamento do esclerômetro (14)

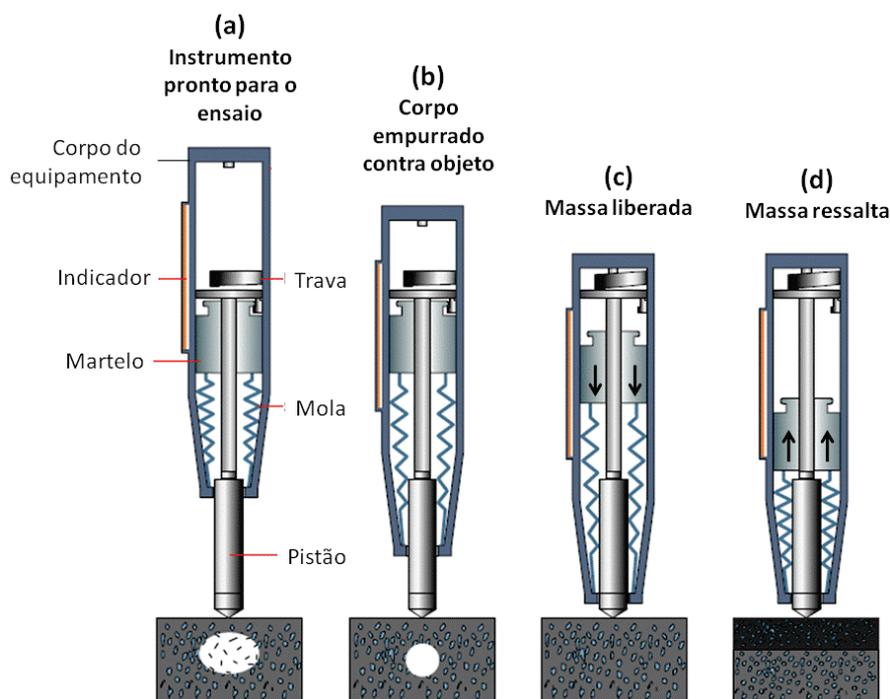
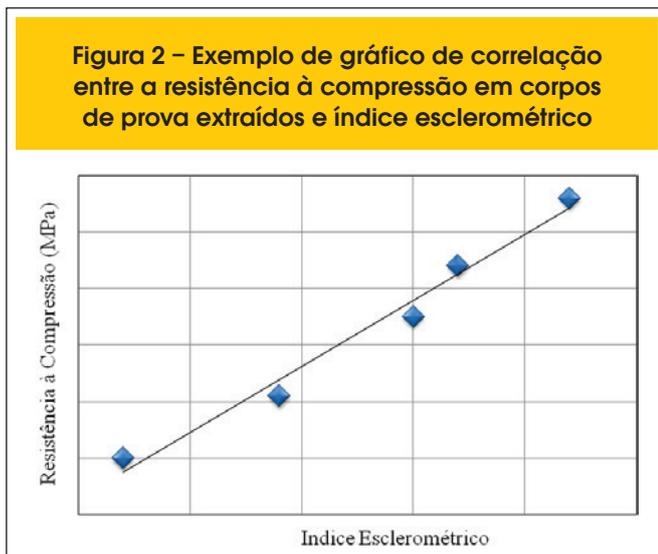


Figura 2 – Exemplo de gráfico de correlação entre a resistência à compressão em corpos de prova extraídos e índice esclerométrico



vel de resposta um índice de reflexão que pode ser usado para a estimativa da resistência a partir da construção de curvas de correlação. O esclerômetro é um aparelho portátil, simples, de baixo custo e que pode viabilizar uma grande quantidade de dados rapidamente.

O aparelho é constituído por um tubo cilíndrico em cujo interior há uma mola, um êmbolo e uma massa. O êmbolo é colocado em contato com a superfície do concreto de modo a deslocar a massa metálica por dentro do tubo cilíndrico e a mola padrão é estendida. Quando a massa metálica chega ao final do tubo, um dispositivo do aparelho a libera de modo que, pela ação da mola, ela se choca no êmbolo e rebota em certo grau. Pelo efeito do choque, a massa retorna em certa magnitude gerando um índice indicado por um cursor que se move ao longo de uma escala graduada [Figura 1]. O índice esclerométrico é proporcional a distância percorrida pela massa no rebote e a resistência do concreto é diretamente proporcional à distância a que a massa é refletida no interior do aparelho após o choque.

As leituras através do esclerômetro são bastante sensíveis às variações locais no concreto, especialmente a inertes e buracos próximos da superfície e ainda a descontinuidades próximas da área ensaiada. Segundo Malhotra [14], os fatores que mais influenciam os resultados do ensaio esclerométrico são o tipo de acabamento da superfície, tipo de agregado, inclinação do esclerômetro, carbonatação das camadas mais externas do concreto, idade da estrutura, umidade e tipo de cimento além do proporcionamento do concreto. De acordo com o ACI 228.1R [15], o ensaio fornece uma estimativa da dureza superficial, da região mais externa do elemento estrutural – cerca de 2 a 3 cm da superfície. Apesar de ser uma avaliação superficial, na maioria dos casos a norma citada relata como satisfatória a correlação entre índice de reflexão e resistência à compressão do concreto, justificando a aplicação em análises usuais de engenharia.

De acordo com Machado [16] e Evangelista [17], a estimativa da resistência à compressão do concreto, nos ensaios realizados em corpos de prova com o esclerômetro, apresenta uma confiabilidade de $\pm 20\%$ e o coeficiente de variação médio é de aproximadamente 10%. No entanto, para Malhotra [14], estes ensaios devem ser encarados como uma técnica adicional, e não como substitutos dos ensaios destrutivos.

O próprio equipamento utilizado nos ensaios fornece curvas de correlação do índice esclerométrico com a resistência do concreto, porém a NBR 7584 [11] recomenda a utilização de curvas de correlação adequadas, obtidas por meio de ensaios com materiais da região onde o concreto foi fabricado, quando se deseja usar o esclerômetro para avaliar a resistência à compressão do concreto, garantindo-se assim maior segurança nos resultados. Por outro lado, sendo o ensaio esclerométrico um ensaio bastante antigo e difundido, para o DNER [18] já existe uma experiência consolidada sobre o procedimento, inclusive com curvas de correlação (índice esclerométrico x resistência do concreto fornecidas junto com o equipamento) bastante confiáveis.

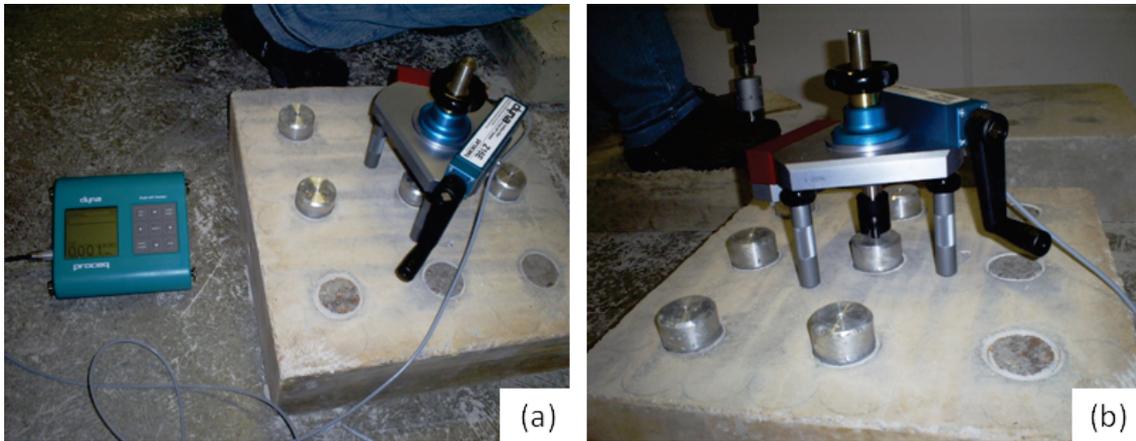
Este é um tema bastante controverso, uma vez que a recomendação normativa vigente no Brasil é que as curvas genéricas para serem aplicadas em qualquer que seja o concreto não são recomendadas. Sobre este assunto, estes autores são adeptos do ponto de vista de que a forma mais confiável de fazer uso do esclerômetro é o associando a ensaios de compressão em testemunhos extraídos do concreto da obra que seja inspecionada. Ou seja, adotar a prática de usar as curvas de correlação genéricas não é exatamente uma prática recomendada. Então, deve-se elaborar uma curva de correlação para cada obra inspecionada, com a realização do ensaio esclerométrico, em alguns pontos, associado a extração de testemunhos e posterior ruptura. Isso possibilita a construção de uma correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão obtida nos mesmos pontos, permitindo a construção de uma curva de correlação semelhante a apresentada na Figura 2, que é usada na obra para estimar a resistência à compressão nos pontos em que foram executados apenas o ensaio com o esclerômetro. Esta prática evita a extração de quantidades exageradas de testemunhos, que é uma técnica que causa mais danos às peças e é mais onerosa para os trabalhos de inspeção em campo.

O ensaio de esclerometria possui outras aplicações além da medida quantitativa da resistência mecânica do concreto. Castro et al. [19] o aponta como útil para avaliação da uniformidade da resistência mecânica, com danos muito pequenos aos elementos estruturais, podendo ser comparadas diferentes regiões de uma estrutura. É possível também estimar a evolução da resistência para prosseguimento das obras, peças pré-moldadas, aplicação de carregamentos em estruturas recém-executadas ou recém-descimbradas, além da verificação da resistência às cargas de serviço em estruturas deterioradas [9].

2.2 Velocidade de propagação de ultrassom

Os primeiros estudos baseados na medição da velocidade de propagação de uma onda, gerada mecanicamente, datam de meados dos anos 40. Estes estudos permitiram demonstrar que a velocidade de propagação se relaciona com as propriedades elásticas e com a densidade do material e que era praticamente independente da geometria do elemento. A forma de ensaio desenvolveu-se até o atual processo de medição da velocidade de propagação de ultrassons, com aparelhos constituídos por circuitos elétricos capazes de gerar e registrar ondas com frequência entre 20 - 150 kHz [6]. Atualmente, os equipamentos comercializados são constituídos por uma unidade central, que possui um gerador de impulsos elétricos, um par de transdutores, emissor e receptor, um amplificador e um dispositivo eletrônico para medição do tempo que decor-

Figura 3 – “Pull Off” Test: (a) Ensaio de arrancamento e (b) equipamento de ensaio



re entre o pico (amplitude máxima) do pulso gerado no transdutor emissor e a chegada do pico ao transdutor receptor.

O método da medição da velocidade de propagação de ultrassons é provavelmente entre os ensaios não destrutivos aquele que tem mais aplicações, por ser um ensaio fácil e rápido de executar. Suas principais aplicações são a determinação da homogeneidade do concreto, avaliação da existência e estimativa da profundidade de fissuras, da existência de grandes vazios ou buracos, estimativa da resistência à compressão e determinação do módulo de elasticidade.

A velocidade do pulso das ondas longitudinais geradas é função das propriedades elásticas do material – tais como módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson – e de sua densidade, conforme citado por Castro et al. [19] e ACI 228.2R [20]. A dependência entre as propriedades do material e o comportamento das ondas que por ele passam permite correlação que pode ser usada, por exemplo, para determinação da resistência mecânica do concreto. Grullón et al. [21], em seu trabalho de avaliação da resistência mecânica do concreto através do ultrassom para diferentes traços de concreto e condições de umidade, obtiveram baixa sensibilidade do ensaio para essa avaliação. Para resistência dos corpos de prova variando entre 41 e 64 MPa, a velocidade de propagação do ultrassom variou entre 4425 a 4721 m/s, sendo valores muito próximos, suscetíveis a erros experimentais.

Machado et al. [22], utilizando os ensaios de esclerometria, penetração de pinos e ultrassom para determinação da resistência do concreto, chegaram à conclusão que o ultrassom apresentou os piores resultados quanto à correlação para obtenção da resistência. Popovics [23] cita que a estimativa da resistência não pode ser obtida com grande precisão utilizando apenas o valor do ensaio de ultrassom. O autor relata uma inexistência de relação teórica entre as duas grandezas citadas, embora em outros ensaios isso também ocorra.

A velocidade de propagação pode ser influenciada por vários fatores sendo os mais importantes o comprimento de percurso, dimensões da peça a ensaiar, presença de armaduras, além da temperatura e do estado de umidade do concreto. Para obter resultados

com um elevado grau de precisão é necessário ter em conta os seguintes fatores: preparação da superfície a ensaiar, ligação dos transdutores, método de seleção e colocação dos transdutores.

2.3 “Pull Off”

O ensaio “Pull Off” foi desenvolvido na Inglaterra, nos anos 70, com o objetivo de determinar a resistência do concreto in loco, devido a problemas relacionados com concretos produzidos com cimentos de alto teor de alumina [5]. O ensaio tem sido usado desde então com sucesso para avaliar a resistência de concretos. Este método também pode ser usado para verificar a tensão de aderência de materiais de reparo em peças de concreto [24].

O ensaio de “Pull Off” não é normalizado no Brasil, porém países como Inglaterra e Estados Unidos reconhecem este método como uma possibilidade em trabalhos de estimativa da resistência à compressão em campo [13]. Esta metodologia tem revelado resultados bastante consistentes e de grande confiança, além do que, os resultados não satisfatórios são visíveis após o ensaio, através da observação da superfície de ruptura.

Dada a sua grande simplicidade, o ensaio pode ser executado na própria estrutura, inclusive sem planejamento anterior a concretagem. A técnica é eficiente para ser utilizada em vigas e lajes, pois o ensaio mostra-se também adequado para execução em elementos estruturais de pequena seção, sendo suficiente uma única face de exposição do elemento para realização do ensaio. Outro ponto importante é o fato de que o equipamento utilizado na execução do “Pull Off” é o mesmo utilizado nos ensaios de aderência em argamassas, já normalizado no Brasil a alguns anos, o que pode facilitar sua aplicação.

O ensaio de “Pull Off” é baseado no conceito de que a força de tração, necessária para arrancar um disco metálico colado a uma camada da superfície de concreto, está relacionada com a resistência à compressão do material [19]. No ensaio, a tração é transmitida axialmente a uma peça metálica colada previamente ao concreto. Depois de decorrido o tempo suficiente de cura da resina (cola), uma força de tração é aplicada a este disco usando-se

um sistema mecânico portátil [Figura 3(a) e 3(b)]. O aumento gradual da força pode ser observado no aparelho, diretamente numa escala, em Megapascal (MPa), e seu valor é registrado assim que se dá o arrancamento do concreto. A força de tração que causa ruptura, em conjunto com as curvas de calibração, torna possível uma estimativa da resistência à compressão [5].

Existem vários fatores que podem influenciar os valores obtidos, e que são responsáveis pela variabilidade neste ensaio. Além da composição e propriedades do concreto, influem também a variação na superfície de ruptura, orientação e posição do agregado sobre o disco, material do disco (aço ou alumínio), diâmetro e espessura do disco (razão e/d), sistema de contrapressão (anel ou tripé) e velocidade de aplicação da carga [7]. Uma grande diferença deste ensaio, tradicionalmente usado no Brasil para medir a resistência de aderência de argamassas, sendo usado para concreto é que o agregado gráudo passa a ser um fator de influência importante, inclusive sua forma e posição em relação a superfície de teste. Este é um tema que necessita ser melhor estudado para determinar o sentido e condicionantes desta variável. Outro fator de interferência nos resultados é se logo abaixo da pastilha colada e posteriormente arrancada existir armadura. A falta de controle deste fator causaria distorções nos resultados interferindo nos trabalhos de inspeção. Por este motivo, aconselha-se que antes da colagem de qualquer pastilha, seja usado um localizador de armaduras para garantir que não se está colando as pastilhas em áreas em que a presença de armadura ocorra.

2.4 Vantagens e desvantagens dos três métodos

Entre as vantagens do esclerômetro estão a facilidade de operação, leveza, rapidez de execução das leituras e a não efetivação de danos na peça de concreto inspecionada. Como desvantagens deste método pode-se citar que a medida realizada se refere a uma pequena camada superficial do concreto (cerca de 30 mm). Além disso, após 3 meses de idade das peças, há a influência da carbonatação do concreto, que densifica o concreto da camada carbonatada e tende a elevar os valores de índice esclerométrico [25; 15].

Frente a outros métodos, a esclerometria pode ser aplicada em elementos bastante delgados, sendo nesses pontos mais vantajoso que outros métodos, tais como extração de testemunhos. Para estes casos, o esclerômetro é aconselhável de ser utilizado em conjunto com outras técnicas para confirmar homogeneidade dos elementos [26].

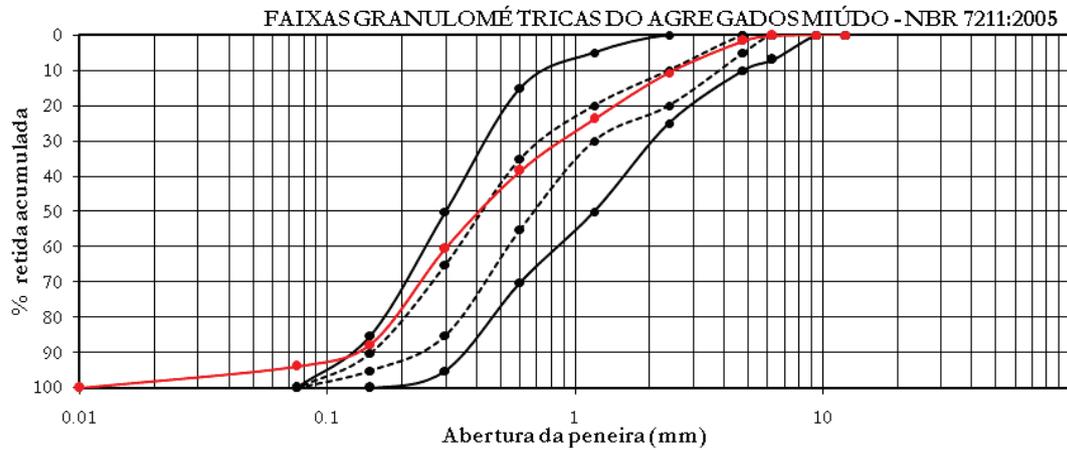
O ensaio de ultrassom também é uma forma de medida portátil e de rápida execução. Comparando com a esclerometria esta técnica apresenta a vantagem de, sendo feita a medida de forma direta, o resultado se referir a peça como um todo não sendo uma leitura superficial, diluindo a influência da camada carbonatada, tão presente nos trabalhos de inspeção de estruturas. Comparando custo, este método envolve um equipamento cerca de 4 vezes mais caro do que o esclerômetro de reflexão.

Uma desvantagem importante do método de ultrassom é que o sentido da influência da umidade nos resultados ocorre de forma inversa a medida da resistência à compressão, usando corpos de prova extraídos e uma prensa. Isso significa que quanto maior o teor de umidade do concreto, maior a velocidade de propagação do ultrassom e menores os valores de resistência à compressão de corpos de prova extraídos. Este detalhe é importante para os casos em que se deseja produzir curvas de correlação da velocidade de ultrassom versus resistência à compressão para uma efetivação de estimativas em toda a edificação utilizando resultados de ultrassom. Outra desvantagem que pode ser citada é a influência da presença de armaduras, pois o som tem velocidade de propagação no aço carbono muito superior do que no concreto [27]. Desse modo, sua presença tende a elevar os valores de velocidade de propagação do ultrassom, mascarando os resultados. Comparando o ensaio de "Pull Off" com os de esclerometria e ultrassom, pode-se citar como desvantagem a redução da velocidade do ensaio, uma vez que a leitura depende de uma colagem prévia de pastilhas metálicas na superfície do concreto. A execução de furo com serra copo, se esta prática for adotada, também envolve as desvantagens de consumir mais tempo e o uso de outros equipamentos (furadeira com serra copo) no trabalho de inspeção. Porém, este detalhe também pode ser citado como uma vantagem, pois apresenta a possibilidade de executar o furo pas-

Tabela 1 – Composição química e caracterização física e mecânica do cimento

(a) Composição química										
Cimento	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda Fogo (%)	CaO livre (%)	Resid. Insol. (%)	Equiv. Alcal. (%)
CP II-F-32	18,35	4,07	2,54	59,64	5,19	3,07	5,35	1,2	1,47	0,63
* Na ₂ O _e = Na ₂ O + 0.658 K ₂ O										
(b) Caracterização física e mecânica										
Exp. Quente (mm)	Tempo de Pega		Cons. Normal (%)	Blaine (cm ² /g)	Resistência à Compressão		Resistência à Compressão (MPa)			
	Início (h:min)	Fim (h:min)			# 200 (%)	# 325 (%)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
0,83	3:31	4:10	25,5	3,338	3,87	17,76	11,1	25,1	32,0	40,4

Figura 4 – Curva granulométrica do agregado miúdo



sando a camada carbonatada, eliminando este fator de influência nas medidas. Quanto ao custo do equipamento empregado, ele é da ordem do equipamento de ultrassom, ou seja, é mais caro do que o esclerômetro de reflexão.

Como desvantagem, pode ser citada a necessidade de reparos nos locais onde foram executados os ensaios, uma vez que o concreto sofrerá fratura local na superfície. Também deve-se considerar o tempo de espera necessário para a cura da resina usada na colagem do disco antes da aplicação da carga que pode variar entre 1,5 h e 24 h dependendo do tipo de cola adotada. A resina empregada com maior frequência é o epóxi. Outro ponto limitante para aplicação deste ensaio é a impossibilidade de sua execução em concretos de alta resistência, devido a limitação de carga dos equipamentos disponíveis no mercado. Como exemplo, pode-se citar o equipamento usado nesta pesquisa que foi um Dyna Z16E da Proceq com tração máxima de 16 kN, ou seja, para uma pas-

tilha de 5,0 cm, capacidade máxima de tensão de tração de 8,15 MPa. Isso significa que, para este equipamento, seria possível estimar a resistência à compressão de concretos de até algo em torno de 80 MPa, considerando que a resistência à tração é em torno de 10% da resistência à compressão do concreto. Porém, como os concretos convencionais de hoje em dia apresentam resistência à compressão entre 20 e 35 MPa, pode-se dizer que o método é apto a ser utilizado na maioria dos casos de aplicação prática do concreto de cimento Portland.

O intuito deste estudo é comparar a precisão dos três métodos abordados, uma vez que existem questionamentos sobre as duas técnicas normalizadas nacionalmente (esclerometria e ultrassom). Como exemplo, pode-se citar Evangelista [17] e Castro [28] que relatam a pouca precisão do ensaio de esclerometria quando se tenta correlacionar com a resistência à compressão. Já Grullón et al. [21] relatam a pouca correlação entre a velocidade

Figura 5 – Curva granulométrica do agregado graúdo

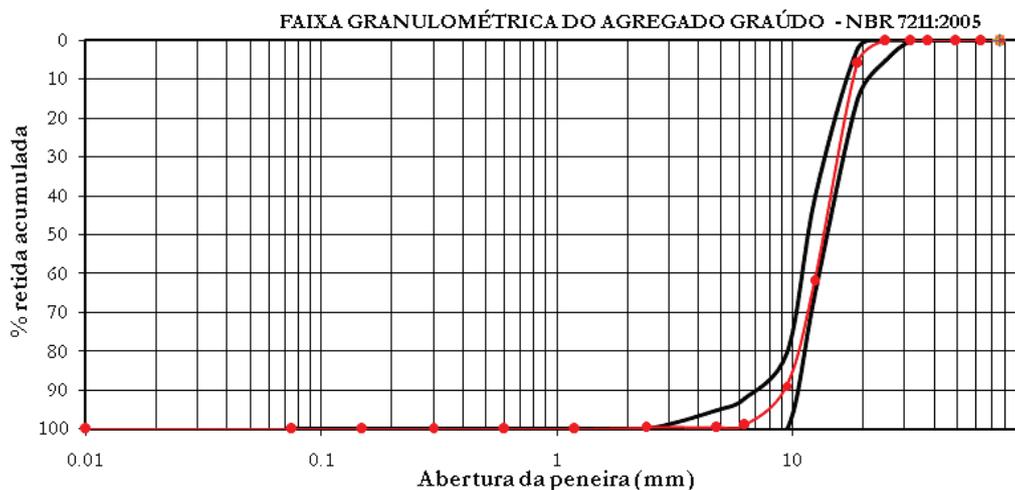


Tabela 2 – Proporcionamento dos concretos empregados

Cimento: agregados	Cimento: areia: brita: a/c	Abatimento do tronco de cone (mm)
1: 3	1: 1,08: 1,92: 0,43	105
1: 4	1: 1,60: 2,40: 0,50	90
1: 5	1: 2,12: 2,88: 0,59	95

de de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência à compressão. Além disso, Machado et al. [22], utilizando os ensaios de esclerometria, penetração de pinos e ultrassom para determinação da resistência do concreto, chegaram à conclusão que o ultrassom apresentou os piores resultados quanto à correlação para obtenção da resistência.

Desse modo, o foco do presente trabalho é verificar se o ensaio de “Pull Off” apresenta melhor correlação com a resistência à compressão do que os dois ensaios normalizados atualmente pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3. Planejamento experimental

O planejamento experimental desta pesquisa buscou investigar a eficiência de ensaios não destrutivos como ferramenta de avaliação da resistência do concreto comparativamente aos resultados obtidos por compressão simples em corpos de prova cilíndricos e prismáticos. Para isto, selecionou-se os ensaios de esclerometria e velocidade de ultrassom, normalizados no Brasil e o ensaio de arrancamento “Pull Off”, apresentado aqui como uma alternativa aos ensaios populares de avaliação de estruturas.

3.1 Materiais empregados

O cimento utilizado foi o CP II F-32 e sua composição química e caracterização física e mecânica encontram-se representados na Tabela 1.

O agregado miúdo é uma areia natural oriunda de rio, com módulo de finura de 2,23 cuja distribuição granulométrica se enquadra como zona ótima, sendo equivalente a uma areia média. O agregado graúdo é de natureza calcário, se enquadrando como faixa de dimensões entre 9,5 e 25,0 mm, com dimensão máxima característica de 25 mm. As Figuras 4 e 5 apresentam as curvas granulométricas destes dois agregados.

3.2 Descrição das variáveis de estudo

Inicialmente foi realizada a dosagem do concreto com três diferentes relações água/cimento (0,43; 0,5 e 0,59). Com este concreto moldou-se corpos de prova cilíndricos e prismáticos para os ensaios de compressão simples, esclerometria e ultrassom. Para o ensaio de “Pull Off” foi moldada uma placa de concreto para cada relação água/cimento. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas localizado no Campus da UFPR.

3.3 Dosagem do concreto

Para a definição dos traços usados na pesquisa, foi utilizado o método de dosagem experimental do IPT/EPUSP, também conhecido como método dos quatro quadrantes, que é fundamentado nas leis de Lyse, Molinari e Abrams e se baseia no ajuste de curvas de resistência e trabalhabilidade em função dos requisitos estruturais. O abatimento (Slump Test) fixado para esta dosagem foi de 100 ± 10 mm e o teor de argamassa utilizado para todas as misturas foi de $\alpha = 52$ %. Os dados de proporcionamento dos materiais e consistência estão expostos na Tabela 2. Vale salientar que não foi usado adição mineral nem aditivo superplastificante na composição do concreto.

Para cada concreto foram moldados 1 placa prismática de 55 cm x 55 cm x 20 cm para realização do ensaio “Pull Off”, 6 corpos de prova cilíndricos de 15 cm x 30 cm e 6 corpos de prova prismáticos com 15 cm de arestas para os ensaios de compressão simples, esclerometria e velocidade de propagação de ultrassom.

Para garantir a homogeneidade da mistura, todo o concreto utilizado nesta pesquisa foi confeccionado em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 240 litros e adensado em mesa vibratória com preenchimento dos corpos de prova feito em duas camadas de concreto, tanto para os cilíndricos quanto os prismáticos. Cada camada foi submetida a um ciclo de 20 segundos de adensamento em mesa vibratória.

Após a moldagem, os corpos de prova foram curados em câmara úmida (95% de umidade relativa e 23 ± 2 °C de temperatura) conforme NBR 5738 [29], durante 112 dias. A escolha de uma idade elevada para os ensaios de resistência deve-se ao fato de que nas obras os ensaios são destinados a avaliar estruturas antigas e com grau de hidratação elevado, sendo assim, ensaios em idades maiores demonstram maior confiabilidade com relação ao que ocorre na prática.

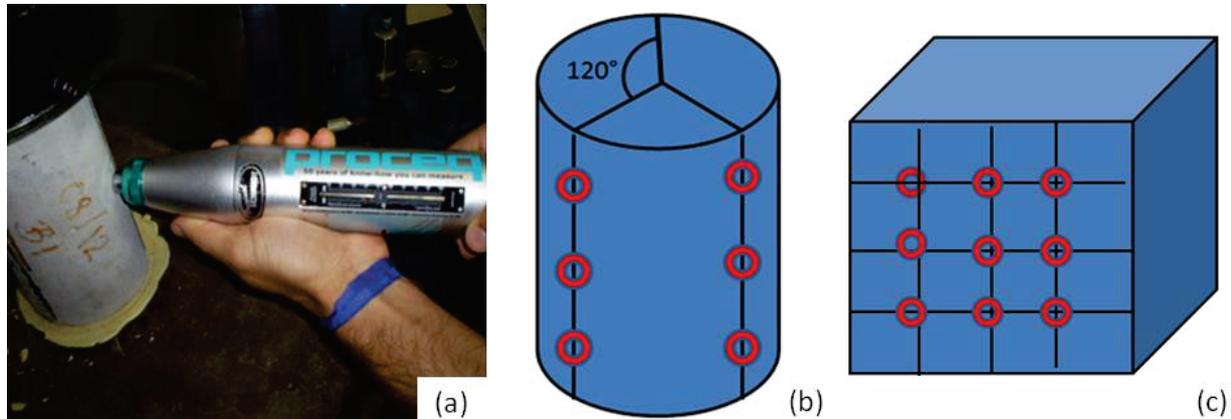
3.4 Velocidade de propagação de ultrassom

Após o tempo de cura dos corpos de prova, procederam-se os ensaios de ultrassom em todos os corpos de prova conforme a

Figura 6 – Ensaio de ultrassom



Figura 7 – a) Esclerômetro de reflexão; b e c) Pontos de aplicação dos impactos nos corpos de prova



NBR 8802 [12]. Inicialmente, 24 horas antes do ensaio, os corpos de prova foram retirados da água para secagem superficial em ambiente de laboratório. Antes do início dos ensaios, verificou-se as superfícies dos corpos de prova para garantir que estas estivessem secas e planas.

Os transdutores foram posicionados em faces opostas nos corpos de prova, conforme observa-se na Figura 6. O contato entre o transdutor e a superfície de concreto foi realizado com gel de ultrasonografia com o intuito de produzir um acoplamento próximo do perfeito. Para um mesmo ponto, a maior velocidade de propagação de pulso indicada como leitura foi considerada como valor representativo do corpo de prova, uma vez que este valor é interpretado como o acoplamento mais próximo do perfeito conseguido na leitura.

O resultado final de cada concreto foi obtido a partir da média entre as leituras representativas dos seis corpos de prova de cada concreto estudado.

3.5 Esclerometria

Após os ensaio de velocidade de ultrassom, os corpos de prova foram ensaiados com esclerômetro. Para execução dos ensaios de esclerometria, o aparelho utilizado foi um esclerômetro modelo CT-320AM da Soiltest.

No procedimento seguido desta pesquisa, o primeiro passo foi romper um corpo de prova à compressão segundo a NBR 5739 [1]. Esta prática teve o intuito de determinar a resistência do concreto para calcular o valor de carga que iria ser impresso nos corpos de prova para a execução dos ensaios esclerométricos, uma vez que a NBR 7584 [11] determina que seja aplicada nos corpos de prova uma carga de aproximadamente 15% de sua carga de ruptura para restringir movimentos nos corpos de prova durante o ensaio. Desse modo, sabendo-se aproximadamente a resistência do concreto, os outros cinco corpos de prova cilíndricos destinados aos ensaios de esclerometria e resistência à compressão, fo-

Figura 8 – Ensaio de compressão em corpos de prova (a) cilíndricos e (b) cúbicos

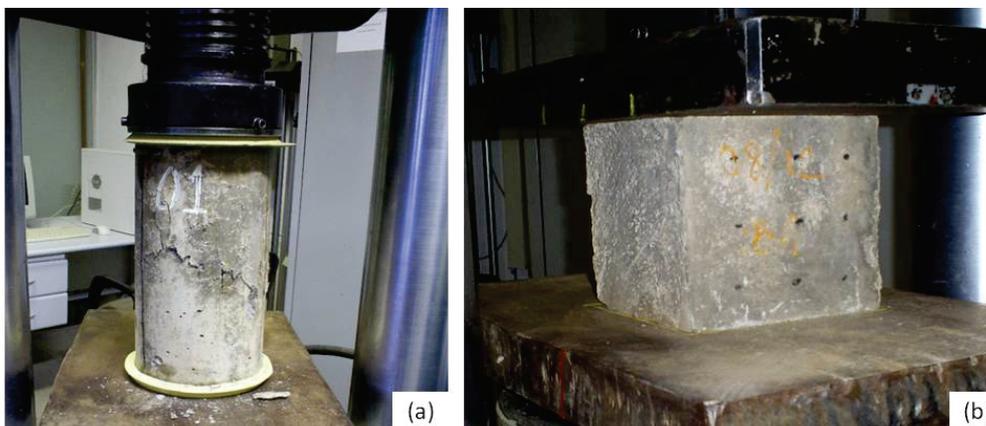


Tabela 3 – Valores obtidos nos ensaios não destrutivos e de compressão simples em corpos de prova cilíndricos e prismáticos

Concreto	Corpos de prova de 15 x 15 x 15			
	Esclerometria (MPa)	Ultrassom (MPa)	Pull Off (MPa)	Compressão (MPa)
Pobre	31	4511,2	1,91	30,32
Intermediário	38	4635,2	2,8	37,83
Rico	40	4702,5	3,08	44,63
Concreto	Corpos de prova de 15 x 30			
	Esclerometria (MPa)	Ultrassom (MPa)	Pull Off (MPa)	Compressão (MPa)
Pobre	37	4570,5	1,91	30,00
Intermediário	36	4613,8	2,8	38,87
Rico	46	4641,5	3,08	45,73

ram previamente carregados com 15% da sua resistência máxima e a determinação dos índices esclerométricos foi executada.

Em cada corpo de prova, tanto cilíndrico quanto prismático, nove leituras do índice esclerométrico foram realizadas. A Figura 7(a) apresenta a execução do ensaio em um corpo de prova. No caso de ensaio em cilindros, cada corpo de prova foi dividido em três partes de 120° onde em cada uma delas realizou-se três leituras, sendo uma no centro, uma na extremidade superior e a outra na extremidade inferior do corpo de prova [Figura 7(b)]. Nos corpos de prova prismáticos as nove leituras foram feitas na mesma face, conforme pode ser verificado no esquema da Figura 7(c).

3.6 Ensaios de resistência à compressão simples

Após a execução dos ensaio de esclerometria e velocidade de ultrassom, os corpos de prova cilíndricos e prismáticos foram ensaiados à compressão simples. Para o capeamento dos corpos de prova foi utilizado pasta de enxofre. A prensa empregada foi uma prensa EMIC, com controle de velocidade de aplicação de carga. Os ensaios de compressão simples em corpos de prova cilíndricos foram realizados seguindo os procedimentos propostos na NBR 5739 [1] [Figura 8(a)]. Os ensaios de compressão em corpos de prova cúbicos foram executados conforme a BS 12390-3 [3] [Figura 8(b)]. Para ambos os ensaios adotou-se a velocidade de carga de 0,4 MPa/s.

A resistência à compressão do concreto adotada para os ensaios realizados foi a média dos resultados dos seis corpos de prova ensaiados em cada caso.

3.7 Ensaios “Pull Off”

O ensaio de “Pull Off” aplicado a concreto não é normalizado no Brasil, sendo neste trabalho adotadas as recomendações da BS 1881: parte 207 [13]. Por este método, a tração é transmitida axialmente a uma pastilha metálica colada previamente na superfície do concreto. Depois de decorrido o tempo suficiente de cura da

resina epóxi usada na colagem das pastilhas, uma força de tração é aplicada a este disco usando-se um sistema mecânico portátil [Figura 3(a)]. O aumento gradual da tensão pode ser observado diretamente numa escala (MPa), e a tensão máxima é registrada, assim que se dá o arrancamento do concreto. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de arrancamento foi o Dyna Z 16E da Proceq [Figura 3(b)].

Para a execução do ensaio de “Pull Off” utilizou-se placas de concreto de 55 cm x 55 cm x 20cm moldadas em laboratório com o mesmo concreto usado nos corpos de prova para ensaio de resistência, sendo realizadas nove leituras em cada placa. O número de leituras em cada placa foi definido por recomendações da BS 1881: Parte 207 [13]. Outro ponto determinante no dimensionamento das placas deve-se a recomendação da norma de que os discos devam ser colados a uma distância mínima de dois diâmetros uns dos outros e também posicionados a uma distância

Figura 9 – Correlação entre os ensaios de esclerometria e resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos e prismáticos

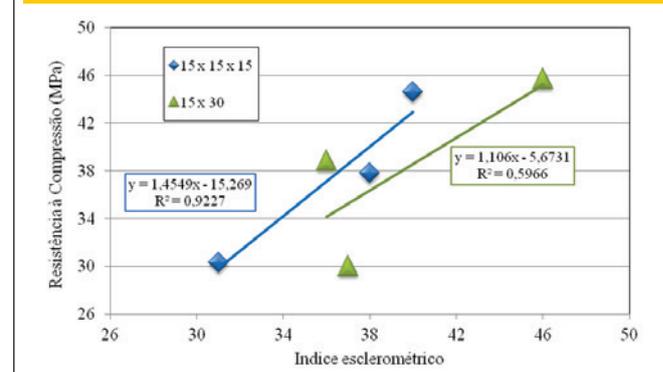
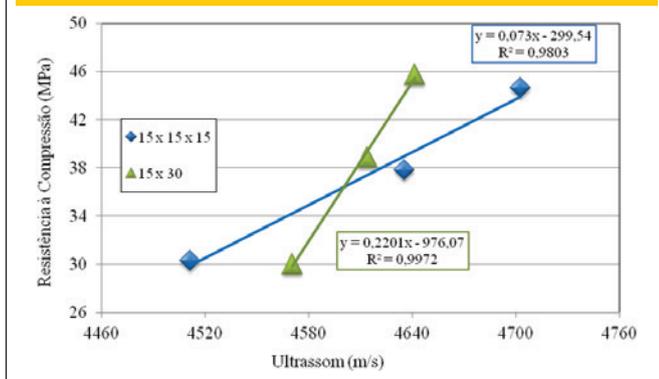


Figura 10 – Correlação entre os ensaios de Ultrassom e resistência a compressão em corpos de prova cilíndricos e prismáticos



mínima de um diâmetro dos bordos do elemento a ser ensaiado. O material das pastilhas utilizadas no ensaio é o alumínio e suas dimensões são 25 mm de altura e 50 mm de diâmetro. O ensaio foi realizado com corte superficial de 5 mm de profundidade seguindo a dimensão do disco metálico. A execução do corte foi feita para evitar a influência das condições da superfície do concreto, como no caso das superfícies carbonatadas. Antes de iniciarem-se à colagem dos discos metálicos na superfície do concreto, as superfícies foram preparadas de modo a obter-se uma boa aderência. Este procedimento é adotado principalmente para retirada da nata presente na superfície do concreto e para tornar o agregado aparente. Um cuidado foi tomado para que o local de colagem estivesse liso o suficiente para garantir que a cola estivesse presente em toda a superfície do contato entre a pastilha e o concreto, garantindo que a força aplicada fosse uniforme em toda a área de colagem. Para regularização deste local utilizou-se uma lixadeira com lixa fina. A colagem foi feita com uma camada fina de cola e o excedente que se concentrou à volta do disco foi retirado ainda no estado fresco, garantindo assim que a superfície de ruptura tivesse a área do disco. Utilizou-se como cola uma resina epóxi com cura de 24 horas.

4. Resultados e discussões

Inicialmente os resultados obtidos com os ensaios propostos no programa experimental foram tratados estatisticamente com o objetivo de eliminar valores espúrios, que poderiam comprometer a validade das análises.

Para os ensaios de esclerometria foram determinadas nove leituras em cada corpo de prova, sendo considerado válida a leitura obtida quando pelo menos cinco valores individuais não diferiram da média em mais de 10 %. Seguindo recomendações da NBR 7584 [11], os valores fora do limite foram descartados e a média foi recalculada somente com os valores válidos. Como este ensaio foi executado em cinco corpos de prova do mesmo concreto, ao fim do tratamento preliminar o resultado final foi calculado pela média simples dos valores finais obtidos das amostras válidas. Para os corpos de prova cilíndricos e prismáticos ensaiados a compressão simples considerou-se os valores de resistência como sendo a média entre os seis resultados de cada ensaio para

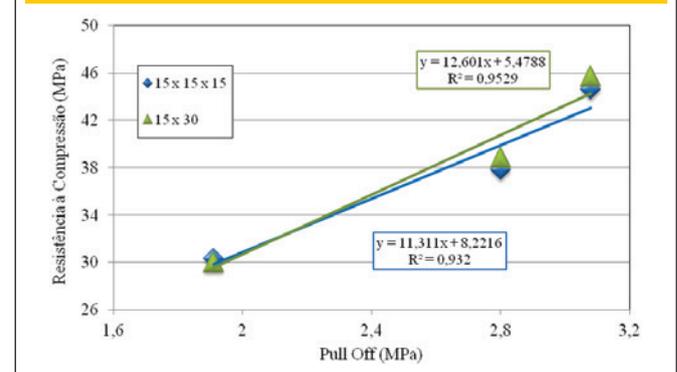
cada concreto estudado. Os resultados do ensaio de velocidade de propagação de ultrassom, tanto nos corpos de prova cilíndrico quanto prismáticos, foram obtidos pela média das leituras feitas nos seis corpos de prova. Para o ensaio de “Pull Off” não existe normalização brasileira, sendo neste trabalho utilizadas as recomendações da BS 1881 part 207 [13]. Foram ensaiadas em cada placa nove pontos, sendo considerada válida a leitura obtida quando pelo menos seis valores individuais não diferiram da média em uma vez o desvio padrão. Todas as placas estavam dentro deste limite. A resistência ao arrancamento foi obtida com a média dos valores válidos após o tratamento inicial. Os valores médios de resistência à compressão e de velocidade de ultrassom, bem como os valores de “Pull Off” e esclerometria após o tratamento preliminar estão apresentados na Tabela 3.

De posse dos dados organizados na Tabela 3 foram elaborados gráficos para demonstrar as correlações entre os ensaios e a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos para os três traços de concreto estudados. A Figura 9 refere-se as correlações entre a resistência à compressão simples e o índice esclerométrico.

No Brasil, sem dúvidas, o ensaio de esclerometria é o ensaio não destrutivo mais popular, porém vários pesquisadores questionam a eficiência do método para avaliar precisamente a resistência do concreto. Ao analisar-se os resultados obtidos com os ensaios de esclerometria pode-se visualizar uma relação direta entre os valores de resistência à compressão do concreto e de índice esclerométrico. Por outro lado, esta correlação mostra-se fraca ($R^2 \approx 0,60$) quando utilizado para a análise com corpos de prova cilíndricos, como normalizado no Brasil.

Para os ensaios de esclerometria aplicados em corpos de prova prismáticos a correlação aumenta consideravelmente ($R^2 = 0,92$). Uma justificativa possível para esta diferença pode ser o fato de que no ensaio em corpos de prova cilíndricos, o impacto do esclerômetro é aplicado em uma superfície que não é plana, diferente do caso de corpos de prova prismáticos. Acredita-se que isto possa interferir negativamente nos resultados, porém estudos ainda precisam ser realizados para melhor entender esta influência, uma vez que as incertezas a respeito da eficiência do ensaio de esclerometria permanecem.

Figura 11 – Correlação entre os ensaios de “Pull Off” e resistência a compressão em corpos de prova cilíndricos e prismáticos



No Brasil, uma alternativa de complementação ao ensaio de esclerometria é o ensaio de ultrassom [12]. Desse modo, a Figura 10 apresenta os resultados obtidos com o ensaio de ultrassom.

Através dos ensaios de ultrassom com os dois tipos de corpo de prova pode-se verificar uma ótima correlação entre os resultados ($R^2 > 0,98$). O ensaio de propagação de velocidade de ultrassom, executado nos corpos de prova cilíndricos, apresentaram correlações muito próximas aos ensaios executados nos corpos de prova prismáticos. Confirmando a hipótese anteriormente discutida sobre a execução do ensaio em superfícies côncavas afetarem negativamente os resultados obtidos. No ensaio de ultrassom a velocidade de propagação de ultrassom é medida nas faces planas dos corpos de prova cilíndricos e possivelmente por este motivo os resultados obtidos por ambos os tipos de corpos de prova apresentam correlações similares. Apesar disso, a velocidade de propagação apresenta forte influência da forma do corpos de prova, uma vez que para um mesmo concreto existe grande diferença entre a resposta no corpo de prova cilíndrico e no cúbico.

Apesar da maior precisão obtida com o ensaio de propagação da velocidade de ultrassom, a aquisição deste equipamento demanda um investimento alto quanto comparado ao esclerômetro, por exemplo. Alternativamente ao ensaio de ultrassom e a esclerometria, existe o ensaio de "Pull Off", que apesar de também ter um custo elevado de compra, é o mesmo equipamento utilizado para execução do ensaio de resistência de aderência em argamassas. A Figura 11 apresenta a correlação entre os resultados dos ensaios de "Pull Off" obtidos através do arrancamento na superfície de placas de concreto e a resistência à compressão medida em corpos de prova moldados com o mesmo concreto das placas.

Ao se analisar os valores obtidos com o programa experimental, bem como os gráficos apresentados, pode-se concluir que o ensaio de "Pull off" (ensaio de campo) mostra resultados consistentes para comparação de seus valores com os resultados de resistência obtidos em laboratório sendo uma ferramenta adequada para avaliação da resistência do concreto in situ. Esta constatação é fundamentada na observação dos valores de correlação com os ensaios de compressão simples (ambos com R^2 acima de 0,93), o que, sob o ponto de vista técnico, habilitaria o ensaio analisado neste trabalho a ser usado para análise da resistência do concreto. Vale salientar que, neste caso, a estimativa da resistência à compressão pelo "Pull off" leva a resultados muito semelhantes tanto para os corpos de prova cilíndricos como para os cúbicos, o que não ocorreu no caso da esclerometria e do ultrassom.

A execução do ensaio mostrou-se simples, o que permite afirmar que, em comparação a outros ensaios não destrutivos, o "Pull Off" não apresenta detalhes de execução mais complexos, podendo ser realizado por uma mão de obra treinada, porém sem necessidade de grande qualificação profissional, assim como no caso do esclerômetro e do ultrassom. O equipamento é relativamente simples de operar e sendo este o mesmo utilizado para ensaios de aderência em argamassas, a sua disponibilidade bem como o profissional para executar o ensaio tornam-se maiores.

5. Conclusões

Os ensaios não destrutivos são ferramentas adequadas e bastante úteis no monitoramento de estruturas de concreto e na estimativa de sua resistência medida em campo. A utilização racional dos vários métodos disponíveis, bem como uma possível combinação

de mais de uma técnica pode ser muito interessante principalmente pelo ponto de vista da validade dos resultados.

O ensaio de esclerometria apresentou diferentes correlações com a resistência à compressão do concreto quando medida em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos. Uma possível causa disto pode ser distorções causadas durante o ensaio sobre as superfícies curvas dos corpos de prova cilíndricos. De um modo geral, verifica-se que estudos sobre a eficiência e confiabilidade dos resultados do esclerômetro devem ainda ser melhor realizadas. Recomenda-se que o ensaio de esclerometria seja utilizado como complementar a outros ensaios ou ainda em um estágio preliminar de inspeção.

Quanto ao ensaio de ultrassom, verificou-se que ele apresenta ótimas correlações ($R^2 > 0,95$) com a resistência à compressão do concreto, tanto medida em corpos de prova cilíndricos quanto cúbicos. Porém, o comportamento dos resultados pareceu ser influenciado pela forma dos corpos de prova, o que vai contra a teoria do método. Os resultados obtidos com o "Pull Off" permitem afirmar que o ensaio é plenamente factível de emprego para a estimativa da resistência mecânica do concreto in situ. Esta afirmação se fundamenta nos valores de correlação com o ensaio de compressão simples, tanto em corpos de prova cilíndricos quanto nos prismas, em comparação aos valores do "Pull Off" (ambos com R^2 acima de 0,93).

Além do alto índice de correlação encontrado para este último ensaio, acrescenta-se que o uso do "Pull Off" apresenta a vantagem de que o equipamento é o mesmo usado para medir a resistência de aderência em argamassas. A experiência adquirida nesta área pode ser aproveitada na popularização do ensaio em estruturas de concreto, uma vez que os procedimentos de execução dos ensaios são similares. Desse modo, estes autores recomendam que este ensaio seja assunto de estudo por outros pesquisadores, a fim de futuramente ser objeto de normalização no Brasil, assim como já é normalizado na Europa.

6. Referências bibliográficas

- [01] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5739: 2007. Rio de Janeiro.
- [02] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39 / C39M. 2012.
- [03] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens. BS 12390 part 3. 2002.
- [04] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes. BS 1881 part 116. 1983.
- [05] LONG, A. E.; MURRAY, A. The Pull-off Partially Destructive Test for Concrete, in: In-situ Non-destructive Testing of Concrete, SP-82, Detroit, American Concrete Institute, 1984.
- [06] BUNGEY, J.H. The Testing of Concrete in Structures. Surrey University Press, 2nd Edition, Glasgow, 1989.
- [07] PEREIRA, J. P. V. V. Avaliação da resistência à compressão do betão através de ensaios não-destrutivos. Dissertation (Master in civil engineering). Universidade de Coimbra. Coimbra – Portugal, 1999.

- [08] NEPOMUCENO, M. C. S. Ensaios não destrutivos em betão. Dissertation (Master in civil engineering). Universidade da Beira Interior. Covilhã – Portugal, 1999.
- [09] MEDEIROS, M.; BARBOSA, P.; GRULLÓN, M.; HELENE, P. Influência da dosagem do concreto na correlação entre resistência à compressão e índice esclerométrico. In: 46. Congresso Brasileiro do Concreto, 2004, Florianópolis. 46. Congresso Brasileiro do Concreto, 2004. v. II. pp. 1065-1072.
- [10] PEREIRA, E; FREZ, J. C; MEDEIROS, M. H. F. Estimativa da resistência do concreto em campo: ensaios normalizados ou não no Brasil. *Concreto e Construção*, v. 63, p. 88-96, 2011.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto endurecido- avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. NBR 7584. Rio de Janeiro, 1995.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica - NBR 8802. Rio de Janeiro, 1994.
- [13] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Testing concrete. Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests. BS 1881 part 207. 1992.
- [14] MALHOTRA, V.M. - In-situ/Nondestructive Testing of Concrete - A Global Review, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, SP-82, American Concrete Institute, Detroit, 1984.
- [15] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. In-place methods for determination of strength of concrete. ACI 228.1R, Detroit, 2003.
- [16] MACHADO, M. D. Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no rio de janeiro por meio de ensaios não destrutivos. Dissertation (Master in sciences in civil engineering) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.
- [17] EVANGELISTA, A. C. J. Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos. PhD thesys in Civil Engineering – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.
- [18] DNER. Manual de inspeção de obra-de-arte especiais. Ministério dos Transportes - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro. 1994.
- [19] CASTRO, A. L; ÂNGULO, S. C; BILESKY, P. C; SANTOS, R. F. C. ; HAMASSAKI, L. T. ; SILVA, E. Métodos de ensaios não destrutivos para estruturas de concreto. *Revista de Tecnologia da Construção - Técnica* (São Paulo), v. 17, pp. 56-60, 2009.
- [20] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures. ACI 228.2R, Detroit, 1998.
- [21] GRULLÓN, M; BARBOSA, P; MEDEIROS, M; HELENE, P. Correlação entre resistência à compressão e ultrassom: influência da dosagem e da umidade. In: IBRACON 2004 - Volume II - Construções em Concreto - Trabalho CBC0101 – p. II.587 - II.596, 2004.
- [22] MACHADO, M. D; SHEHATA, L. C. D; SHEHATA, I. A. E. M. Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos. *Revista IBRACON de Materiais e Estruturas - RIEM*, pp. 100-123, volume II, número 2, 2009.
- [23] POPOVICS, J. S.; SONG, W.; GHANDEHARI, M.; SUBRAMANIAM, K.V.; ACHENBACH, J. D.; SHAH, S. P. Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete. *ACI Materials Journal*, 97, 2, p. 127-135, 2000.
- [24] GONÇALVES, A. F. Novos ensaios não destrutivos para a determinação da resistência do betão nas estruturas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1986.
- [25] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Determination of concrete strength by nondestructive method. BS 1881: Part 202. London, 1986.
- [26] HELENE, P. Análise da resistência do concreto em estruturas acabadas com vistas à revisão da segurança estrutural In: *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción - ALCONPAT*, pp. 67-92, volume 1, número 1, 2011.
- [27] BUNGEY, J. H; SOUTSOS, M. N. Reliability of partially-destructive tests to assess the strength of concrete on site. In: *Construction and Building Materials Magazine*, p. 81-92, 2001.
- [28] CASTRO, E. Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria. Dissertation (Master). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2009.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738: 2003. Rio de Janeiro.