Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS A CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM AGREGADOS RECICLADOS

F.L.C. BRASILEIRO
Graduanda - Engenharia Civil
Universidade Estadual Vale do Acaraú
Ceará; Brasil
lilinhabr2@hotmail.com

K.M.V. MOREIRA
Professora Msc - Engenharia Civil
Universidade Estadual Vale do Acaraú
Ceará; Brasil
kelvyamoreira@gmail.com

L.M.S. MONTEIRO
Graduanda - Engenharia Civil
Universidade Estadual Vale do Acaraú
Ceará; Brasil
livia.msm@hotmail.com

F.R.C. RIBEIRO
Graduando - Engenharia Civil
Universidade Estadual Vale do Acaraú
Ceará; Brasil
roger.ribeiro_@hotmail.com

S.P. ANDRADE
Graduanda - Engenharia Civil
Universidade Estadual Vale do Acaraú
Ceará; Brasil
suzan_andrade@hotmail.com.br

RESUMO

Devido aos casos cada vez mais frequentes de desastres em estruturas, os estudos sobre patologias das construções vêm se intensificando. Paralelamente, o uso do Concreto Autoadensável (CAA) em estruturas correntes já é uma realidade no Brasil. A incorporação de resíduos de construção no CAA tem sido bastante estudada, fazendo-se necessário, também, avaliar sua durabilidade. Porém, independente do tipo de concreto, a manutenção periódica é a premissa básica para garantir longevidade às obras e evitar transtornos futuros. Esta pode ser feita por meio de ensaios não destrutivos, correlacionando seus resultados aos dos ensaios destrutivos realizados ainda na fase de execução. Logo, este estudo visa fazer essa correlação aplicada a CAA com diferentes percentuais de agregados reciclados. Para tal, foram realizados ensaios de compressão axial, ultrassom e carbonatação em diferentes idades de produção.
Palavras-chave: ensaios destrutivos e não destrutivos; concreto autoadensável; agregados reciclados.

ABSTRACT

Due to the increasingly frequent cases of disasters in structures, studies on diseases of the buildings have been intensifying. At the same time, the use of self-compacting concrete (SCC) in current structures is already a reality in Brazil. The incorporation of construction waste in the SCC has been widely studied, making it necessary also to evaluate its durability. However, regardless of the type of concrete, the periodic maintenance is the basic premise to ensure longevity to the works and avoid future problems. This can be done through non-destructive testing, correlating their results with those of destructive testing still in the implementation phase. Therefore, this study aims to do this correlation applied to SCC with different percentages of recycled aggregates. To this end, axial compression tests were performed, ultrasound and carbonation in different production ages.
Keywords: destructive and non-destructive testing; self-compacting concrete; recycled aggregates.

1. INTRODUÇÃO

A elaboração e execução de projetos pertinentes às obras civis devem, segundo a ABNT NBR 6118:2014 [1], garantir a segurança, estabilidade e aptidão em serviço por toda a vida útil da estrutura. De acordo com a ABNT NBR 15575:2013 [2], esta deve ser de, no mínimo, 50 anos. Para que esse período de tempo seja alcançado é considerado que haja periodicidade e processos de manutenção conforme a ABNT NBR 5674:2012 [3]. Esta última norma descreve de forma objetiva a obrigatoriedade de haver planejamento anual das atividades de manutenção das edificações.

Porém, apesar da evolução e aperfeiçoamento dos materiais e técnicas construtivas utilizados no ramo da construção civil, o que muito se vê atualmente são deteriorações em estruturas relativamente novas, evidenciando a importância do controle tecnológico do concreto e de seus materiais constituintes ainda na fase de execução da obra e da manutenção preventiva periódica em serviço.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Simultaneamente, o uso do Concreto Autoadensável (CAA) em estruturas correntes já é uma realidade no Brasil. Este traz consigo diversas vantagens: maior produtividade, eliminação de ruídos, diminuição da mão de obra, excelente acabamento superficial, capacidade de preenchimento de fôrmas com altas taxas de armadura e geometrias complexas sem apresentar nichos de concretagem, além de possibilitar a incorporação de resíduos industriais em sua composição (GOMES; BARROS, 2009) [4]. Em virtude do setor da construção civil representar um significativo percentual de produção destes resíduos (CONAMA, 2002) [5], os pesquisadores têm estudado maneiras de reaproveitá-los na produção de CAA.

Visando garantir a longevidade das estruturas, independentemente do tipo de concreto utilizado, é preciso que haja a conformidade entre o que foi projetado de maneira a satisfazer as premissas das normas vigentes e o que foi executado. Sendo atestada essa compatibilidade, por meio do controle tecnológico supracitado, os resultados obtidos podem ser utilizados como parâmetro para subsequente comparação de ensaios não destrutivos aplicados à estrutura como forma de manutenção predial.

Por causarem pouco ou nenhum dano à estrutura, os métodos de ensaio não destrutivos tornaram-se uma alternativa atraente para as manutenções prediais, pois aliados aos *checklists* já comumente utilizados para este fim, atribuem um grau de confiabilidade maior às inspeções. Outra vantagem é que podem ser aplicados com as estruturas em serviço e, caso a manutenção predial seja feita de maneira periódica, permitem que transtornos sejam identificados ainda em seu estágio inicial.

Sahuinco (2011) [6] comenta que a inspeção visual mostra uma condição qualitativa da estrutura, enquanto os métodos de ensaio não destrutivos são quantitativos e apresentam potencial de determinação de danos em seu interior que não são visíveis a olho nú, propondo a integração destes dois métodos a fim de um parecer mais preciso da condição estrutural. Evangelista (2002) [7] indica ainda correlações entre a resistência à compressão do concreto e os valores obtidos por meio de ensaios não destrutivos, sendo propostas expressões para avaliar a resistência à compressão a partir das medições de um ou dois ensaios não destrutivos.

Então, o objetivo deste trabalho é correlacionar resultados de ensaios destrutivos e não destrutivos aplicados a CAA em diferentes idades de produção. Estes foram desenvolvidos com variados percentuais de substituição de agregados naturais por agregados reciclados oriundos da britagem de corpos de prova de concreto convencional.

2. METODOLOGIA

Os CAA foram produzidos seguindo a metodologia de dosagem proposta por Gomes (2002) [8], em que se faz um estudo preliminar em pastas e/ou argamassas autoadensáveis separado do estudo do esqueleto granular da mistura, buscando um teor de pasta suficiente para que o concreto adquira as características de um CAA.

Concluído o referente estudo, produziram-se quatro tipos de CAA com diferentes teores de substituição de agregados naturais por reciclados: 100% do agregado graúdo (CGR); 50% do agregado graúdo e 50% do agregado miúdo (CGMR); 100% do agregado miúdo (CMR) e o de referência, utilizando apenas agregados naturais (CREF). As substituições foram em massa com compensação da massa específica.

2.1. Materiais

Utilizou-se o cimento Portland CP II-Z-32, comumente utilizado na região de estudo e que, segundo informações do fabricante, possui massa específica de 3100 kg/m³ e massa unitária de 1420 kg/m³. O CP II-Z contém adição de material pozolânico que varia de 6% a 14% em massa, o que lhe confere menor permeabilidade.

A adição mineral utilizada foi o riolito, rocha encontrada em abundância no Serrote Mumbaba, situado entre as cidades de Sobral e Massapê, à Noroeste do estado do Ceará. Este possui massa específica de 3000 kg/m³. O ensaio de espectroscopia por fluorescência de raios X forneceu a composição química disposta na tabela 1. Foi utilizado o material passante na peneira de abertura #150 μm, conforme ilustrado na figura 1.

Tabela 1 – Composição química da adição mineral riolito.

Óxidos	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Outros
Quantidade (%)	69,83	19,13	3,29	0,59	0,02	0,11	0,01	0,16	6,86

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Pela tabela 1 identifica-se que a soma dos teores de óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) foi superior a 50% (obteve-se 92,25%), valor mínimo exigido pela ABNT NBR 12653:2015 [9], classificando-o, portanto, como uma pozolana de Classe E.



Figura 1: Adição mineral riolito após beneficiamento.

O aditivo químico superplastificante utilizado é do tipo II (SP-II N) e, segundo informações do fabricante, é um aditivo para concreto, líquido, isento de cloretos, pronto para o uso. É composto por policarboxilatos que possuem grande poder de dispersão, aumentando a trabalhabilidade sem alterar as características originais de pega do material produzido. Este possui densidade aproximada de 1100 kg/m³ e teor de sólidos de 34%.

Os agregados naturais utilizados foram: areia quartzosa lavada oriunda das margens de rio e brita de origem granítica. Já para os agregados reciclados, primeiramente foi feita a separação dos corpos de prova no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual Vale do Acaraú, atentando-se para que estes fossem de concreto convencional, porém sem distinção de granulometria dos materiais constituintes do referido concreto.

O aspecto destes após o processo de britamento está apresentado na figura 2. Foram realizados ensaios de caracterização de todos os agregados (naturais e reciclados) de acordo com as normas técnicas pertinentes, obtendo os resultados expostos na tabela 2.

A água utilizada foi a fornecida pelo sistema de abastecimento público da cidade de Sobral/CE.



(a) (b)

Figura 2: Agregados reciclados (a) graúdo e (b) miúdo após processo de britamento.

Como o riolito é um material pozolânico, as quantidades de água e de superplastificante a serem adicionadas foram definidas pela soma dos aglomerantes (cimento + riolito). O teor de adição utilizado nas produções foi sobre a massa do cimento.

Segundo a norma que trata de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, ABNT NBR 15116:2004 [10], é necessária a pré-molhagem dos agregados miúdo e graúdo e a prática tem mostrado que valores em torno de 80% do teor de absorção de água do agregado reciclado em uso são adequados. Então, 10 minutos antes de iniciar o processo de mistura, retirou-se da própria relação a/agl o recomendado pela referida norma e efetuou-se a pré-molhagem dos agregados reciclados. As quantidades de material utilizadas nas produções estão dispostas na tabela 3.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.

Índice Físico	Agregado graúdo natural	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo natural	Agregado miúdo reciclado	Método de Ensaio
Massa específica (kg/m³)	2590	2310	2540	2360	Graúdo: ABNT NBR NM 53:2009 [11] Miúdo: ABNT NBR NM 52:2009 [12]
Massa unitária solta (kg/m³)	1300	1220	1250	1170	ABNT NBR NM 45:2006 [13]
Massa unitária compactada (kg/m³)	1420	1330	1370	1290	
Dimensão máxima característica (mm)	19,00	19,00	4,80	4,80	ABNT NBR NM 248:2003 [14]
Módulo de finura (adimensional)	-	-	3,06	3,56	
Absorção (%)	0,79	7,52	-	-	Graúdo: ABNT NBR NM 53:2009 [11]
Material pulverulento (%)	0,24	2,16	-	-	ABNT NBR NM 46:2003 [15]

Tabela 3 – Quantidades de material utilizado nas produções dos concretos.

Tipo de concreto	Cimento (kg)	Riolito (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Aditivo (g)	Água (kg)
CREF	13,64	4,09	18,90	28,90	184,0	6,67
CGR	13,64	4,09	18,90	25,78	294,2	6,67
CGMR	13,64	4,09	Natural: 9,45 Reciclado: 8,78	Natural: 14,45 Reciclado: 12,90	294,2	6,67
CMR	13,64	4,09	17,56	28,90	255,1	6,67

Pela tabela 3 percebe-se que foram utilizadas diferentes quantidades de aditivo superplastificante nas produções dos CAA. Isso se deve ao fato dos agregados reciclados ocasionarem uma menor trabalhabilidade no CAA, fazendo-se necessário este incremento de aditivo para manutenção da autoadensabilidade requerida.

A sequência de mistura do concreto utilizada neste trabalho foi a seguinte: com a betoneira já imprimada, colocaram-se os agregados (graúdo e miúdo) e parcela da água, deixando misturar por 30 segundos. Em seguida, adicionou-se o cimento e o riolito, misturando por mais 30 segundos. Então, adicionou-se outra parcela da água, misturando 90 segundos. Finalmente, adicionou-se o aditivo e o restante da água, deixando misturar por 120 segundos.

Para análise da trabalhabilidade dos CAA foram verificados o espalhamento e tempo de escoamento pelo método do cone de Abrams, indicado pela ABNT NBR 15823-2:2010 [16], que prescreve o método de ensaio para determinação da fluidez do concreto autoadensável, em fluxo livre, sob a ação do seu próprio peso; bem como a viscosidade pelo funil V, de acordo com a ABNT NBR 15823-5:2010 [17], que prescreve o ensaio para determinação da viscosidade do concreto autoadensável pela medida do tempo de escoamento de uma massa de concreto através do funil V. Os resultados obtidos foram avaliados segundo as classes de uso do CAA indicadas pela ABNT NBR 15823-1:2010 [18] e estão expostos na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios com CAA no estado fresco.

Tipo de concreto	Classe de espalhamento (*slump flow*)	Classe de viscosidade plástica aparente (T500 – sob fluxo livre)	Classe de viscosidade plástica aparente (Funil V – sob fluxo confinado)
CREF	SF 2	VS 1	VF 1
CGR	SF 1	VS 2	VF 2
CGMR	SF 1	VS 2	VF 2
CMR	SF 1	VS 2	VF 2

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Da tabela 4 tem-se que o CREF apresenta-se adequado para a maioria das aplicações correntes, como paredes, vigas e pilares, sendo compatível com elementos estruturais com alta densidade de armadura, mas exige controle da exsudação e da segregação.
Ainda pela tabela 4 tem-se que os concretos com agregados reciclados enquadraram-se para aplicações em estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e que exijam uma curta distância de espalhamento horizontal, como lajes, revestimentos de túneis, estacas e certas fundações profundas.

Após a realização dos ensaios no estado fresco foram moldados os corpos de prova cilíndricos (100x200)mm sem necessidade de vibração e, após 24 horas, procedeu-se à desmoldagem e armazenamento em tanque com água saturada de hidróxido de cálcio para cura úmida até as datas dos experimentos, conforme preconiza a ABNT NBR 5738:2015 [19]. Este procedimento só não foi atendido para o ensaio de carbonatação, o qual será explicado posteriormente.

2.2. Métodos

Os ensaios realizados no estado endurecido que serão correlacionados com o de resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2007 [20]) foram: velocidade de propagação de onda ultrassônica (ABNT NBR 8802:2013 [21]) e carbonatação (CPC 18:1994 [22]).

Para o ensaio de resistência à compressão axial foram moldados dois corpos de prova para cada idade e tipo de concreto. Como resultado foi adotado o maior valor entre estes dois. Para o capeamento dos corpos de prova foi utilizada uma almofada elastomérica, o policloroprene, comercialmente conhecido como neoprene.

Para o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica utilizou-se um aparelho de ultrassom com transdutores de 54 kHz e 50 mm de diâmetro (figura 3). Este ensaio foi executado por transmissão direta, ou seja, os transdutores foram posicionados em faces opostas do corpo de prova, ao longo de seu comprimento. Com o auxílio de um paquímetro, este comprimento é medido e inserido no aparelho para a transformação do tempo de propagação da onda em velocidade do pulso ultrassônico.



Figura 3: Demonstração do ensaio de ultrassom.

Para o ensaio de ultrassom utilizaram-se dois corpos de prova para cada idade e tipo de concreto e vaselina sólida à base de água como acoplante. Por ser um ensaio não destrutivo houve a possibilidade de reutilizar os corpos de prova para o de resistência à compressão axial. Portanto, o valor adotado como resultado deste foi o correspondente ao mesmo corpo de prova do ensaio de resistência.

Após 28 dias de cura, os corpos de prova a serem utilizados para o ensaio de frente de carbonatação foram retirados do tanque e expostos às intempéries naturais. Nos dias estabelecidos para o ensaio, estes foram rompidos transversalmente com o auxílio de uma marreta e ponteiro (figura 4) e foi aspergida a solução de fenolftaleína para a medição da frente de carbonatação com o auxílio de um paquímetro de precisão milimétrica, sendo o resultado expresso pela média aritmética de 8 medições.

Foram utilizados 2 corpos de prova para cada tipo de concreto. As idades expostas nos resultados referem-se à quantidade de dias desta exposição.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 4: Instrumentos necessários para a execução do ensaio de carbonatação.

Para este ensaio é utilizado o método colorimétrico, que consiste em aspergir uma solução alcoólica de fenolftaleína a 1% na superfície interna do concreto com o auxílio de um borrifador. Esta solução é de caráter básico: quando em contato com outra superfície básica, apresenta a coloração vermelho carmim; mas, quando em contato com uma superfície ácida, apresentar-se-á incolor, representando a superfície carbonatada (HELENE, 1999) [23]. Mede-se, portanto, a espessura da superfície carbonatada, que indicará a frente de acesso de dióxido de carbono (CO_2) no concreto.

De posse destes resultados, propôs-se uma análise matemática com o intuito de apresentar equações onde se possa estimar o valor de resistência à compressão axial (ensaio destrutivo) a partir do ultrassom e frente de carbonatação (na prática, ensaios não destrutivos).

Para esta finalidade utilizou-se o *software* Statistica 13.0, indicando como variável dependente o valor da resistência à compressão axial e como variáveis independentes os valores de ultrassom e frente de carbonatação, separadamente, com intervalo de confiança de 95% para ambos. As equações foram propostas para cada tipo de concreto e também com todos os resultados obtidos em conjunto.

As equações foram obtidas por Regressão Múltipla - Análise Residual - Variáveis Dependentes e Independentes. Após, realizou-se a análise de variância (ANOVA) de todos os resultados, com nível de significância de 5%, a fim de constatar a relevância das equações propostas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A priori, os resultados serão expostos por tipo de concreto e posteriormente será mostrada a equação unificada para todos os concretos analisados. Em cada item será apresentada a equação proposta seguida da ANOVA dos resultados obtidos experimentalmente e pelo modelo proposto.

Ressalta-se que, como informado na Metodologia, os mesmos corpos de prova ensaiados à compressão axial foram anteriormente utilizados no ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica. As entradas de dados foram iguais ao que se apresenta abaixo.

3.1. Concreto Referencial (CREF)

Tabela 5 – Resultados dos ensaios no estado endurecido do CREF.

Idade de Ensaio	Resistência à compressão axial (RCA)	Velocidade de propagação da onda ultrassônica (VPU)	Frente de carbonatação (CARB)
28 dias	43,6 MPa	4210 m/s	0 mm
56 dias	50,9 MPa	4310 m/s	2,18 mm
84 dias	52,8 MPa	4380 m/s	2,07 mm

3.1.1. Correlação RCA/VPU

Para esta correlação foi utilizado o valor de RCA como variável dependente e o de VPU como variável independente. Então, o valor de RCA da equação proposta (RCA_{EP}) foi o seguinte:

$$RCA_{EP} = -189,4 + (0,05547*VPU) \quad (1)$$

Na tabela 6 visualiza-se a comparação dos resultados de RCA obtidos experimentalmente (RCA_{EXP}) e pela equação proposta (RCA_{EP}).

Tabela 6 – Comparação dos resultados experimentais e da equação proposta para RCA/VPU no CREF.

RCA_{EXP}	43,6 MPa	50,9 MPa	52,8 MPa
RCA_{EP}	44,1 MPa	49,7 MPa	53,6 MPa

Percebe-se que os valores encontram-se bem aproximados. A ANOVA mostrada na tabela 7 confirma esta afirmação.

Tabela 7 – Análise de variância da equação proposta de RCA a partir de VPU no CREF.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	0,000228167	1	0,000228167	9,90123E-06	0,997640039	7,708647422
Dentro dos grupos	92,17711181	4	23,04427795			
Total	92,17733997	5				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

Analisando a ANOVA apresentada na Tabela 7 tem-se que a equação 1 expressa bem a influência do valor de VPU sobre a RCA, dado que o valor de prova (valor – p) foi bem superior a 0,05. Isso indica que se deve aceitar a igualdade. Além disso, o "F crítico" limita a região de rejeição, significando que para valores de "F" inferiores a ele, deve-se aceitar a igualdade. Ou seja, a igualdade foi bastante aceita nestes dois parâmetros.

3.1.2. Correlação RCA/CARB

Para esta correlação foi utilizada o valor de RCA como variável dependente e o de CARB como variável independente. Então, o valor de RCA da equação proposta (RCA_{EP}) foi o seguinte:

$$RCA_{EP} = 43,69 + (3,8421*CARB) \quad (2)$$

Na tabela 8 tem-se a comparação dos resultados de RCA obtidos experimentalmente (RCA_{EXP}) e pela equação proposta (RCA_{EP}).

Tabela 8 – Comparação dos resultados experimentais e da equação proposta para RCA/CARB no CREF.

RCA_{EXP}	43,6 MPa	50,9 MPa	52,8 MPa
RCA_{EP}	43,7MPa	52,1 MPa	51,6 MPa

Mais uma vez, percebe-se a proximidade entre os valores apresentados e a ANOVA mostrada na tabela 9 confirma esta afirmação.

Tabela 9 – Análise de variância da equação proposta de RCA a partir de CARB no CREF.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	1,92604E-07	1	1,92604E-07	8,39395E-09	0,999931286	7,708647422
Dentro dos grupos	91,78234042	4	22,94558511			
Total	91,78234062	5				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

Analisando a ANOVA apresentada na Tabela 9, tem-se que a equação 2 expressa bem a influência do valor de CARB sobre a RCA, dado que o valor de prova (valor – p) continuou sendo bem superior a 0,05. Porém, o "F" foi ainda menor em relação ao "F crítico".

Para estes dois parâmetros foram obtidos resultados de igualdade bastante satisfatórios, indicando que para este tipo de concreto, qualquer um destes meios de ensaios não destrutivos disponíveis para a inspeção apresentarão resultados bem aproximados da realidade.

Em todos os resultados subsequentes, nota-se, pela ANOVA e pelas comparações apresentadas, que as equações propostas são aceitáveis. Por isso, a partir daqui, serão apresentados apenas os resultados obtidos. Também foi seguida a mesma metodologia no que se refere à inserção dos dados.

3.2. Concreto com 100% de substituição do agregado graúdo (CGR)

Tabela 10 – Resultados dos ensaios no estado endurecido do CGR.

Idade de Ensaio	Resistência à compressão axial (RCA)	Velocidade de propagação da onda ultrassônica (VPU)	Frente de carbonatação (CARB)
28 dias	47,3 MPa	3920 m/s	1,45 mm
56 dias	48,9 MPa	4470 m/s	1,90 mm
84 dias	53,5 MPa	4240 m/s	1,70 mm

3.2.1. Correlação RCA/VPU

$$RCA_{EP} = 33,62 + (0,00387*VPU) \quad (3)$$

Tabela 11 – Comparação dos resultados experimentais e da equação proposta para RCA/VPU no CGR.

RCA_{EXP}	47,3 MPa	48,9 MPa	53,5 MPa
RCA_{EP}	48,8 MPa	50,9 MPa	50,0 MPa

Tabela 12 – Análise de variância da equação proposta de RCA a partir de VPU no CGR.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	0,000241935	1	0,000241935	4,25813E-05	0,995105967	7,708647422
Dentro dos grupos	22,72687494	4	5,681718735			
Total	22,72711688	5				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

3.2.2. Correlação RCA/CARB

$$RCA_{EP} = 42,606 + (4,3328*CARB) \quad (4)$$

Tabela 13 – Comparação dos resultados experimentais e da equação proposta para RCA/CARB no CGR.

RCA_{EXP}	47,3 MPa	48,9 MPa	53,5 MPa
RCA_{EP}	48,9 MPa	50,8 MPa	50,0 MPa

Tabela 14 – Análise de variância da equação proposta de RCA a partir de CARB no CGR.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	3,08267E-07	1	3,08267E-07	5,51708E-08	0,999823837	7,708647422
Dentro dos grupos	22,35000418	4	5,587501044			
Total	22,35000449	5				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

3.3. Concreto com substituições de 50% do agregado graúdo e 50% do agregado miúdo (CGMR):

Tabela 15 – Resultados dos ensaios no estado endurecido do CGMR

Idade de Ensaio	Resistência à compressão axial (RCA)	Velocidade de propagação da onda ultrassônica (VPU)	Frente de carbonatação (CARB)
28 dias	50,5 MPa	4060 m/s	1,63 mm
56 dias	52,2 MPa	4340 m/s	1,98 mm
84 dias	57,3 MPa	4290 m/s	2,25 mm

3.3.1. Correlação RCA/VPU

$$RCA_{EP} = -3{,}427 + (0{,}01342*VPU) \quad (5)$$

Tabela 16 – Comparação dos resultados experimentais e da equação proposta para RCA/VPU no CGMR.

RCA_{EXP}	50,5 MPa	52,2 MPa	57,3 MPa
RCA_{EP}	51,1 MPa	54,8 MPa	54,1 MPa

Tabela 17 – Análise de variância da equação proposta de RCA a partir de VPU no CGMR.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	0,000250907	1	0,000250907	3,02365E-05	0,995875947	7,708647422
Dentro dos grupos	33,19256611	4	8,298141527			
Total	33,19281701	5				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

3.3.2. Correlação RCA/CARB

$$RCA_{EP} = 32{,}414 + (10{,}706*CARB) \quad (6)$$

Tabela 18 – Comparação dos resultados experimentais e da equação proposta para RCA/CARB no CGMR.

RCA_{EXP}	50,5 MPa	52,2 MPa	57,3 MPa
RCA_{EP}	49,9 MPa	53,6 MPa	56,5 MPa

Tabela 19 – Análise de variância da equação proposta de RCA a partir de CARB no CGMR.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	1,176E-07	1	1,176E-07	9,94247E-09	0,999925216	7,708647422
Dentro dos grupos	47,31218973	4	11,82804743			
Total	47,31218985	5				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

3.4. Concreto com 100% de substituição do agregado miúdo (CMR):

Tabela 20 – Resultados dos ensaios no estado endurecido do CMR.

Idade de Ensaio	Resistência à compressão axial (RCA)	Velocidade de propagação da onda ultrassônica (VPU)	Frente de carbonatação (CARB)
28 dias	48,4 MPa	4020 m/s	1,92 mm
56 dias	50,7 MPa	4385 m/s	2,31 mm
84 dias	56,3 MPa	4090 m/s	1,75 mm

3.4.1. Correlação RCA/VPU

$$RCA_{EP} = 56{,}462 - (0{,}0011*VPU) \quad (7)$$

Tabela 21 – Comparação dos resultados experimentais e da equação proposta para RCA/VPU no CMR.

RCA_{EXP}	48,4 MPa	50,7 MPa	56,3 MPa
RCA_{EP}	52,0 MPa	51,6 MPa	52,0 MPa

Tabela 22 – Análise de variância da equação proposta de RCA a partir de VPU no CMR.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	0,014162042	1	0,014162042	0,001712	0,968978819	7,708647422
Dentro dos grupos	33,08887717	4	8,272219292			
Total	33,10303921	5				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

3.4.2. Correlação RCA/CARB

$$RCA_{EP} = 66{,}181 - (7{,}223*CARB) \quad (8)$$

Tabela 23 – Comparação dos resultados experimentais e da equação proposta para RCA/CARB no CMR.

RCA_{EXP}	48,4 MPa	50,7 MPa	56,3 MPa
RCA_{EP}	52,3 MPa	49,5 MPa	53,5 MPa

Tabela 24 – Análise de variância da equação proposta de RCA a partir de CARB no CMR.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	4,86E-08	1	4,86E-08	4,67314E-09	0,99994873	7,708647422
Dentro dos grupos	41,59944572	4	10,39986143			
Total	41,59944577	5				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

3.5. Equações unificadas para todos os tipos de concreto analisados

Neste caso, propôs-se analisar os resultados experimentais de todos os tipos de concreto em conjunto, a fim de averiguar a influência dos diferentes teores de substituição dos agregados naturais por reciclados na proximidade dos resultados obtidos a partir da equação proposta. Então, as equações unificadas propostas para os valores de RCA (RCA_{EUP}) foram os seguintes:

3.5.1. Correlação RCA/VPU

$$RCA_{EUP} = 31,774 + (0,00456*VPU) \quad (9)$$

Tabela 25 – Comparação dos resultados experimentais e da equação unificada proposta para RCA/VPU.

Tipo de concreto	RCA_{EXP}	RCA_{EUP}
CREF	43,6 MPa	51,0 MPa
	50,9 MPa	51,4 MPa
	52,8 MPa	51,7 MPa
CGR	47,3 MPa	49,6 MPa
	48,9 MPa	52,2 MPa
	53,5 MPa	51,1 MPa
CGMR	50,5 MPa	50,3 MPa
	52,2 MPa	51,6 MPa
	57,3 MPa	51,3 MPa
CMR	48,4 MPa	50,1 MPa
	50,7 MPa	51,8 MPa
	56,3 MPa	50,4 MPa

Pela tabela 25, nota-se que alguns dos valores obtidos a partir da equação proposta ficaram bastante destoados dos resultados experimentais. Essa diferença chegou a ser de: 16,82% para o CREF; 6,68% para o CGR; 10,41% para o CGMR e 10,40% para o CMR, enquanto que para as equações propostas anteriormente para cada tipo de concreto essa diferença foi de no máximo 7,67%.

Tabela 26 – Análise de variância da equação unificada proposta de RCA a partir de VPU.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	0,000584107	1	0,000584107	7,80901E-05	0,993028944	4,300949502
Dentro dos grupos	164,558004	22	7,479909274			
Total	164,5585881	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

Observando a tabela 26 percebe-se um valor de "F crítico" aproximadamente 44,16% menor do que os apresentados nas análises de variância separadas por tipo de concreto. Como já foi dito, o "F crítico" limita a região de rejeição da igualdade. Isso significa que quanto menor o seu valor, maior a possibilidade do valor de F se aproximar dele, tornando insegura a conformidade proposta.

3.5.2. Correlação RCA/CARB

$$RCA_{EUP} = 43,78 + (4,1187*CARB) \quad (10)$$

Tabela 27 – Comparação dos resultados experimentais e da equação unificada proposta para RCA/CARB.

Tipo de concreto	RCA_{EXP}	RCA_{EUP}
CREF	43,6 MPa	43,8 MPa
	50,9 MPa	52,8 MPa
	52,8 MPa	52,3 MPa
CGR	47,3 MPa	49,8 MPa
	48,9 MPa	51,6 MPa
	53,5 MPa	50,8 MPa
CGMR	50,5 MPa	50,5 MPa
	52,2 MPa	51,9 MPa
	57,3 MPa	53,0 MPa
CMR	48,4 MPa	51,7 MPa
	50,7 MPa	53,3 MPa
	56,3 MPa	51,0 MPa

A partir da tabela 27 verifica-se que alguns valores obtidos a partir da equação unificada proposta ficaram bem distintos dos obtidos experimentalmente. Essa diferença chegou a ser de: 3,59% para o CREF; 7,42% para o CGMR e 9,40% para o CMR. Nas equações propostas para cata tipo de concreto, o máximo dessas diferenças foi de: 2,27% para o CREF; 2,70% para o CGMR e 8,13% para o CMR.

Para o CGR, apesar dos valores máximos de diferença terem sido menores para a equação proposta unificada (5,55%) em relação à equação proposta para este tipo de concreto (6,56%), a média aritmética das diferenças obtidas nas três idades estudadas mostra que a equação unificada proposta é menos confiável do que a específica para este tipo de concreto. Estes valores foram, respectivamente, de 5,24% e 4,61%.

Tabela 28 – Análise de variância da equação unificada proposta de RCA a partir de CARB.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor - P	F crítico
Entre grupos	1,93802E-08	1	1,93802E-08	1,87048E-09	0,999965882	4,300949502
Dentro dos grupos	227,9434188	22	10,36106449			
Total	227,9434188	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrada.

A análise de variância observada na tabela 28 confirma que a equação unificada proposta é bem menos exata do que a equação proposta para cada tipo de concreto, pelo mesmo motivo citado anterioemente para a correlação RCA/VPU desta mesma seção.

4. CONCLUSÕES

Concluiu-se que, para os concretos estudados, é possível fazer uma correlação bastante aproximada entre ensaios destrutivos e não destrutivos. Este fato foi comprovado pelas Análises de Variância apresentadas. Constatou-se também que, sabendo o tipo de concreto utilizado na obra, o erro fica reduzido se comparado às equações unificadas. Daí a importância de controle tecnológico documentado na fase de execução.

Os ensaios de ultrassom e carbonatação mostraram-se eficazes, sendo ambos confiáveis para a aproximação da resistência à compressão axial nas idades estudadas. Verificou-se que os métodos de ensaios não destrutivos avaliados nesta pesquisa realmente atribuem maior confiabilidade às manutenções prediais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Iniciação Científica - Programa Bolsa Universidade da Universidade Estadual Vale do Acaraú pela concessão da bolsa e às empresas Viapol, Cimentos Votorantim, Construtora Mãe Rainha, SODBRITA e BA Britas pelo auxílio no fornecimento dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

6. REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15575:* Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5674:* Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro, 2012.
[4] GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. *Métodos de dosagem de concreto autoadensável*. 1.ed. São Paulo: PINI, 2009. 144p.
[5] CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. *Resolução nº 307*. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Presidente: Jose Carlos Carvalho. Brasília, 2002.
[6] SAHUINCO, M. H. C. *Utilização de métodos não destrutivos e semi-destrutivos na avaliação de pontes de concreto.* Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.
[7] EVANGELISTA, A. C. J. *Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos.* Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.
[8] GOMES, P. C. C. *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.* Tese de Doutorado. Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universltat Politécnica de Catalunya, Espanha. Barcelona, 2002.
[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 12653:* Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15116:* Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR NM 53:* Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR NM 52:* Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR NM 45:* Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR NM 248*: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR NM 46*: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15823-2*: Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.
[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15823-5*: Concreto auto-adensável - Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.
[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15823-1*: Concreto auto-adensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.
[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5738:* Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 5739:* Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 8802:* Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.
[22] RECOMMENDATIONS FOR THE TESTING AND USE OF CONSTRUCTIONS MATERIALS. *CPC 18:* Measurement of hardened concrete carbonation depth, 1994.
[23] HELENE, P. R. L. *Corrosão em armaduras para concreto armado.* 1.ed. São Paulo: PINI, 1999. 44p.