



Avaliação de indicadores de durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto

Pietra Guasti Vande Meerssche¹; Mauro de Vasconcellos Real²; María Noel Pereyra³; Fábio Costa Magalhães⁴; Rita de Cássia Taveira de Oliveira⁵

Resumo: A aplicação de agregados reciclados na produção de concretos estruturais permanece relativamente limitada na prática de engenharia. A heterogeneidade dos resíduos de origem, a falta de previsibilidade do desempenho reológico e mecânico do concreto e os impactos de sua utilização na durabilidade do concreto são os principais desafios encontrados. Este trabalho apresenta resultados de um estudo preliminar de avaliação de indicadores de durabilidade de concretos produzidos com diferentes teores de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto (20%, 50%, 75% e 100%). Foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, coeficiente de migração no estado não estacionário, coeficiente de difusão nos estados estacionário e não estacionário, resistividade elétrica superficial e volumétrica e absorção de água por capilaridade. Os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram resistências à compressão axial superiores à resistência de dosagem e foram considerados adequados para uso estrutural. A resistência à tração por compressão diametral dos concretos avaliados não difere mais do que 7% aos 28 dias de idade. A resistividade diminuiu com o aumento da substituição de agregados reciclados, indicando menor resistência à penetração de agentes agressivos. Quanto ao coeficiente de migração de cloretos não foi identificada uma correlação direta entre o teor de substituição e as variações no coeficiente, seja de aumento ou redução. A absorção de água também aumentou com o maior uso de agregados reciclados.

Palavras-chave: Durabilidade do concreto; Abordagem com base no desempenho; Agregado reciclado de concreto. Indicadores de durabilidade.

¹ Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO), Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – pietrameerssche@outlook.com.

² Professor Doutor, Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – mvrealgm@gmail.com.

³ Professora Doutora, Universidad de La República (UDELAR) – mpereyra@fing.edu.uy.

⁴ Professor Doutor, Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Rio Grande – fabio.magalhaes@riogrande.ifrs.edu.br.

⁵ Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – ritaoliveira@outlook.es.

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é responsável pelo consumo de 20% a 50% dos recursos extraídos da natureza. A disposição irregular dos Resíduos da Construção Civil (RCC) é problema de saneamento no ambiente urbano, já que esses resíduos provocam proliferação de vetores nocivos à saúde, enchentes, interdição parcial de vias e degradação do ambiente urbano. No Brasil, estima-se que apenas 20% RCC sejam reutilizados (Iglesias *et al.*, 2023; Miranda, 2009 *apud* Júnior, 2019).

Ao contrário dos países mais desenvolvidos, a legislação brasileira acerca do gerenciamento de resíduos ainda é muito recente. Somente em 2002, entrou em vigor a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307, que trata de procedimentos para a gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e, apenas em 2010, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Em virtude disso, o manejo dos resíduos ainda ocorre de forma inadequada, o que implica problemas de ordem econômica, social e principalmente ambiental (Menezes e Salles, 2019).

No Brasil, a NBR 15116 (ABNT, 2021) especifica os requisitos para produção e recepção dos agregados reciclados (AR), miúdos e graúdos, obtidos a partir do beneficiamento dos RCC Classe A. De acordo com a norma, a substituição de agregados naturais (AN) por AR, na produção de concretos de cimento Portland com função estrutural, deve ser limitada a 20% da massa de agregados totais e a concretos das classes de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2023). Em concretos sem função estrutural, a norma indica até 100% de substituição de AN por AR. A norma ainda recomenda a pré-molhagem dos AR para ajuste das propriedades reológicas, como trabalhabilidade, consistência, perda de abatimento, entre outras.

Os agregados reciclados de concreto apresentam algumas desvantagens em relação ao agregado natural devido a argamassa residual aderida à sua superfície, que o torna mais poroso, com menor densidade específica, com maior capacidade de absorção de água, com baixa resistência à abrasão e compressão. Além disso, introduz-se na mistura uma quantidade de zonas de transição interfacial (Aguilar *et al.*, 2007; Gomes *et al.*, 2019; Salles *et al.*, 2021).

Nesse contexto, é evidente a necessidade de divulgação de estudos mais abrangentes com o objetivo de avaliar o potencial de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto (ARCO). Os diversos estudos citados mostram que, apesar de haver uma redução na resistência do concreto ao utilizar-se ARCO, a grande maioria atende aos requisitos das normas vigentes de uso para concreto estrutural. É necessário que sejam estudados os diversos fatores que envolvem a durabilidade do concreto, como a origem dos ARCO, o tipo de cimento utilizado, presença e tipo de adições minerais, presença e tipo de aditivos, relação a/c, procedimento de mistura, entre outros. Desse modo, espera-se que seja possível estimar-se com maior precisão o comportamento do material em diversos ambientes e também que o mesmo esteja cada

vez mais presente nos canteiros de obras, servindo de insumo para a produção de concretos com excelente desempenho e gerando diversos benefícios para a sociedade.

Esse estudo tem como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e os indicadores de durabilidade de concretos produzidos com diferentes percentuais de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto. A análise foi realizada através de ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, coeficientes de migração e difusão de cloretos em estados estacionário e não estacionário, resistividade elétrica superficial e volumétrica e absorção de água por capilaridade.

2 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia empregada no presente trabalho. Inicialmente, apresenta-se o programa experimental realizado, compreendendo as características dos materiais utilizados, a dosagem e execução dos concretos e os métodos de ensaio empregados. A caracterização dos materiais inclui a granulometria, absorção de água e massa específica do agregado graúdo natural, agregado reciclado de concreto e agregado miúdo.

2.1 Materiais

Foi utilizado Cimento Portland Composto. A composição do cimento é de 84-88% de clínquer, 12-16% de filler calcário e 1-2% de argila calcinada. As propriedades do cimento seguem os requisitos estabelecidos pela norma UNIT 20 (UNIT, 2022).

Foi utilizado aditivo superplastificante Viscocrete Artigas. De acordo com o catálogo do fabricante, o produto possui massa específica de $1,1 \text{ g/cm}^3$. Foi utilizado 0,85% de aditivo por kg de cimento.

Para a produção dos concretos utilizou-se água potável fornecida pela distribuidora local.

Foram utilizados como agregado miúdo areias de distintas granulometrias. A areia fina é proveniente da Ciudad del Plata, Departamento de San José, Uruguai. A areia grossa é proveniente de Paso de Pache, Departamento de Canelones, Uruguai. A determinação da composição granulométrica, da massa específica e da absorção de água dos agregados miúdos e graúdos para a produção dos concretos foi realizada de acordo com as normas NM 248 (UNIT, 2002) e ISO 20290-1 (UNIT, 2021), respectivamente.

Foram utilizados como agregado graúdo brita natural e agregado reciclado de concreto. A brita natural é proveniente de Las Piedras, Departamento de Canelones, Uruguai. O agregado graúdo reciclado de concreto tem origem desconhecida e foi processado pela RCD reciclagem em Montevideo, Departamento de Montevideo, Uruguai. A Tabela 2.1 apresenta as características físicas dos agregados utilizados.

Características	Areia fina	Areia grossa	Aggregado graúdo reciclado	Aggregado graúdo natural
Absorção de água	0,44	0,44	2,43	0,91
Módulo de finura	1,87	3,80	7,23	6,82
Dimensão máx (mm)	6,30	12,50	31,5	25
Massa específica (g/cm ³)	2,60	2,62	2,34	2,58

Tabela 2.1 - Características físicas dos agregados.

As curvas granulométricas dos agregados são apresentadas na Figura 2.1.

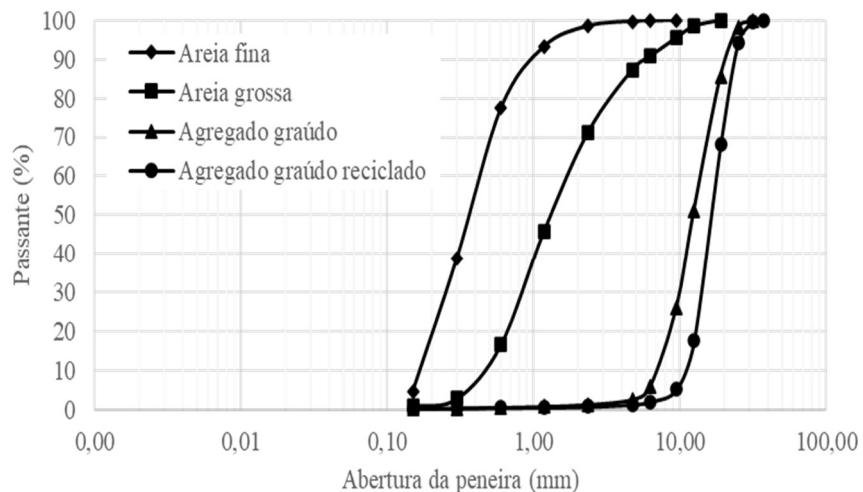


Figura 2.1 – Curvas granulométricas dos agregados.

Utilizou-se como método de dosagem o método do Instituto de Cimento Portland Argentino (ICPA). Adotou-se o valor de 120 ± 10 mm para o abatimento dos concretos. A Tabela 3.4 apresenta as misturas produzidas e o consumo de materiais para a produção de 1 m³ de concreto. O nome “REF” se refere à mistura de referência, sem a utilização de agregado reciclado. As demais misturas são identificadas de acordo com o percentual de substituição de agregado graúdo natural por agregado reciclado de concreto (20%, 50%, 75%, 100%).

Nome	a/c	Cimento	Agregado miúdo		Agregado graúdo	
			Areia fina	Areia grossa	Natural	Reciclado
REF	0,39	410	343,34	516,66	952,65	0,00
20 HR	0,39	410	343,34	516,66	762,12	169,39
50 HR	0,41	410	341,64	511,51	469,72	415,98
75 HR	0,41	410	341,64	511,51	234,86	623,97
100 HR	0,41	410	344,90	510,01	0,00	838,56

Tabela 2.1 – Identificação e composição dos concretos produzidos.

2.2 Métodos

Os ensaios realizados para determinação da resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, coeficiente de migração no estado não estacionário, coeficiente de difusão nos estados estacionário e não estacionário e resistividade elétrica serão descritos a seguir. Os resultados obtidos pelo conjunto de ensaios serão os indicadores de durabilidade, utilizados para avaliar o potencial de durabilidade de cada mistura.

2.2.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial dos corpos de prova de concreto foi determinada de acordo com os procedimentos da ISO 1920-4 (UNIT, 2020). Foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm para cada um dos traços avaliados aos 7 e 28 dias

$$f_c = \frac{F}{A_C} \quad (2.1)$$

de idade. A resistência à compressão axial f_c é determinada pela Equação 2.1: onde F é a carga máxima [N] e A_C é a área da seção transversal do corpo de prova sobre a qual atua a força de compressão [mm^2].

2.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova de concreto foi determinada de acordo com os procedimentos da ISO 1920-4 (UNIT, 2020). Foram utilizados 2 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm para cada um dos traços avaliados aos 28 dias de idade. A resistência à tração por compressão diametral f_{ct} é determinada pela Eq. 2.2:

$$f_{ct} = \frac{2F}{\pi L l} \quad (2.2)$$

onde F é a carga máxima [N], L é o comprimento da linha de contato com a amostra [mm] e l é a dimensão da seção transversal designada [mm].

2.2.3 Resistividade elétrica

Resistividade elétrica volumétrica

A determinação da resistividade elétrica volumétrica pelo método direto, consolidado pela norma espanhola UNE 83988-1 (AENOR, 2008), utiliza como metodologia a aplicação de um campo elétrico nas bases de um corpo de prova de concreto completamente saturado.

Foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm completamente saturados de cada mistura para a realização do ensaio. A resistência elétrica é calculada, de acordo com a Lei de Ohm, por meio da Eq. (2.3).

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.3)$$

onde R é a resistência elétrica [Ω], I é a corrente elétrica que circula pelo circuito [A] e V é a diferença de potencial entre os eletrodos [V].

A resistência elétrica do concreto é obtida por meio da Eq. (2.4).

$$R_c = R_{c+sp} - R_{sp} \quad (2.4)$$

onde R_c é a resistência elétrica do concreto [Ω], R_{c+sp} é a resistência elétrica do concreto somada à das esponjas [Ω] e R_{sp} é a resistência elétrica das esponjas [Ω].

A resistividade elétrica do concreto pode então ser obtida a partir da Eq. (2.5):

$$\rho_c = R_c \frac{S}{L} \quad (2.5)$$

onde ρ_c é a resistividade elétrica do concreto [$\Omega \cdot m$], R_c é a resistência elétrica do concreto [Ω], S é a área da face da amostra em que a esponja está localizada [m^2] e L é a altura das amostras [m].

A resistividade elétrica volumétrica do concreto é expressa em números inteiros, representando uma média das oito medidas feitas em cada corpo de prova, de acordo com a Eq. (2.6).

$$\rho_{vcon} = \underline{\rho_c} k_c \quad (2.6)$$

onde ρ_{vcon} é a resistividade elétrica volumétrica do concreto [$\Omega \cdot m$], ρ_c é a média das duas medidas feitas em cada corpo de prova [$\Omega \cdot m$] e k_c é o fator de cura, igual a 1 para cura em câmara úmida ou imersão em água e 1,1 para cura em imersão em água saturada de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio).

Resistividade elétrica superficial

O ensaio para determinação da resistividade elétrica superficial pelo método dos quatro pontos, também conhecido como método de Wenner, foi consolidado pela norma americana AASHTO T 358-15 (AASHTO, 2015) e utiliza como metodologia a aplicação de corrente elétrica entre dois eletrodos de potencial.

Para realização do ensaio foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm de cada mistura completamente saturados. A resistividade elétrica superficial do concreto é representada pela média das oito medidas feitas em cada corpo de prova, de acordo com a Eq. (2.7).

$$\rho_{scon} = \underline{\rho_c} k_c k_f \quad (2.7)$$

onde ρ_{scon} é resistividade elétrica superficial do concreto [$\Omega \cdot m$], k_c é o fator de cura, com valor igual a 1 para cura em câmara úmida ou em imersão em água, e 1,1 para cura em imersão em água saturada de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), e k_f é o fator de forma, igual a 0,571.

2.2.4 Penetração de cloretos

O método de ensaio proposto pela NT Build 492 (NORDTEST, 1999) foi utilizado para a determinação do coeficiente de migração de cloretos no estado não estacionário. O ensaio consiste na aplicação de um potencial elétrico externo através da amostra, que força os íons cloretos a migrar pela amostra.

Inicialmente é aplicada uma tensão de 30 V e a corrente inicial é registrada. De acordo com a corrente inicial, será ajustada a tensão aplicada e determinada a duração de ensaio, de acordo com a Tabela 2.2.

Corrente inicial (com 30 V) [mA]	Tensão aplicada (depois do ajuste) [V]	Possível nova corrente inicial [mA]	Duração do ensaio [h]
$I_o < 5$	60	$I_o < 10$	96
$5 \leq I_o < 10$	60	$10 \leq I_o < 20$	48
$10 \leq I_o < 15$	60	$20 \leq I_o < 30$	24
$15 \leq I_o < 20$	50	$25 \leq I_o < 35$	24
$20 \leq I_o < 30$	40	$25 \leq I_o < 40$	24
$30 \leq I_o < 40$	35	$35 \leq I_o < 50$	24
$40 \leq I_o < 60$	30	$40 \leq I_o < 60$	24
$60 \leq I_o < 90$	25	$50 \leq I_o < 75$	24
$90 \leq I_o < 120$	20	$60 \leq I_o < 80$	24
$120 \leq I_o < 180$	15	$60 \leq I_o < 90$	24
$180 \leq I_o < 360$	10	$60 \leq I_o < 120$	24
$I_o \geq 360$	10	$I_o \geq 120$	6

Tabela 2.2 – Tensão e duração do ensaio de penetração de cloretos.

Após uma certa duração de ensaio, a amostra é dividida axialmente e uma solução de nitrato de prata (AgNO_3) a 0,1 M é pulverizada sobre uma das seções divididas. A profundidade de penetração de cloretos pode então ser determinada. A partir da profundidade de penetração de cloretos, pode-se determinar o coeficiente de migração no estado não estacionário de acordo com a Eq. (2.8).

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273 + T) L}{(U - 2) t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) L x_d}{U - 2}} \right) \quad (2.8)$$

onde D_{nssm} é o coeficiente de migração não estacionário ($\times 10^{-12}$) [m^2/s], U é o valor absoluto da tensão aplicada [V], T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução do anólito [$^\circ\text{C}$], L é a espessura da amostra [mm], x_d é o valor médio das profundidades de penetração [mm] e t é a duração do ensaio [h].

O método de ensaio consolidado pela UNE 83987 (AENOR, 2012) foi utilizado para determinação do coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário e não estacionário. Consiste em um método acelerado, também conhecido como Método Multi-Regime.

Similarmente ao ensaio proposto pela NT Build 492 (NORDTEST, 1999), a amostra de concreto é posicionada entre duas soluções, uma contendo água destilada e a outra

solução de cloreto de sódio. Nesta metodologia, uma diferença de potencial de 12 V é aplicada através da amostra, forçando os íons cloretos a migrarem para o eletrodo positivo. O aumento da concentração de cloretos no anólito é medido através da determinação da condutividade elétrica do anólito.

A condutividade elétrica é um parâmetro que depende da temperatura, desse modo, na ausência de uma célula de condutividade com correção automática dos valores obtidos, estes devem ser corrigidos. A correção da condutividade elétrica na temperatura de referência é feita de acordo com a Eq. (2.9).

$$c_{25} = c_T + 0,0217 (25 - T) c_T \quad (2.9)$$

onde c_{25} é a condutividade elétrica obtida a 25 °C [mS/cm], c_T é a condutividade elétrica obtida à temperatura T (°C) [mS/cm] e T a temperatura [°C].

A quantidade de cloretos no anólito, a partir dos valores de condutividade à temperatura de referência, é calculada através da Eq. (2.10).

$$Cl^- = 10^{-3} [-1,71 + (11,45 c_{25})] V_a \quad (2.10)$$

onde Cl^- é a quantidade de cloretos [mol], c_{25} é a condutividade elétrica obtida a 25 °C [mS/cm] e V_a é o volume do anólito [L].

O cálculo do coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário é feito a partir da Eq. (2.11), obtida a partir da modificação da equação de Nernst-Planck:

$$D_s = \frac{A R T e}{z S F Cl \gamma \Delta\Phi_{ss}} \quad (2.10)$$

onde D_s é o coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário [cm²/s], A é a inclinação da equação de regressão linear do segmento do período de estado estacionário [mol/s], R é a constante dos gases perfeitos [1,9872 cal/mol·K], T é a temperatura média do anólito durante o ensaio [K], e é a espessura do corpo de prova [cm], z é a valência do íon cloreto [1], S é a área superficial do corpo de prova exposta à solução de cloretos [cm²], F é constante de Faraday [23060 cal/Veq], Cl é a concentração inicial de cloretos no católito [mol/cm³], γ é o coeficiente de atividade do íon cloreto da solução catódica [0,657] $\Delta\Phi_{ss}$ é a média das tensões efetivas medidas durante o período de regime permanente [V].

O coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário é determinado a partir da Eq. (2.12).

$$D_{ns} = \frac{e^2}{2 \tau \varphi} \quad (2.12)$$

onde D_{ns} é o coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário [cm²/s], e é a espessura do corpo de prova [cm], τ é time lag [s] e φ é fator de aceleração do campo elétrico [V/cm] apresentado na Eq. (2.13).

$$\varphi = \frac{z F}{R T} \Delta\phi \quad (2.13)$$

onde z é a valência do íon cloreto [1], F é constante de Faraday [23060 cal/Veq], R é a constante dos gases perfeitos [1,9872 cal/mol·K], T é a temperatura média do anólito durante o ensaio [K] e $\Delta\phi$ é o campo elétrico normalizado [V/cm], apresentado na Eq. (2.14).

$$\Delta\phi = \frac{\Delta E}{e} \quad (2.14)$$

onde ΔE é a média das tensões efetivas medidas nas duas faces do corpo de prova, durante o trecho correspondente ao estado não estacionário [V] e e é a espessura do corpo de prova [cm].

2.2.5 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada de acordo com os procedimentos da IRAM 1871 (NA, 2004). Foram utilizados 3 corpos de prova de cada um dos traços avaliados. Para cada corpo de prova, no momento da leitura, o aumento de massa por unidade de área é determinado pela Equação 2.15:

$$c_{it} = \frac{M_{hit} - M_{si}}{A_i} \quad (2.15)$$

onde c_{it} é o incremento de massa por unidade de área da seção transversal do corpo de prova no instante de leitura [g/m^2], M_{hit} é a massa úmida do corpo de prova no instante de leitura [g], M_{si} é a massa seca do corpo de prova [g], A_i é a área da seção transversal do corpo de prova [m^2].

3 RESULTADOS

3.1 Resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos aos 7, 28 e 56 dias são apresentados na Figura 3.1.

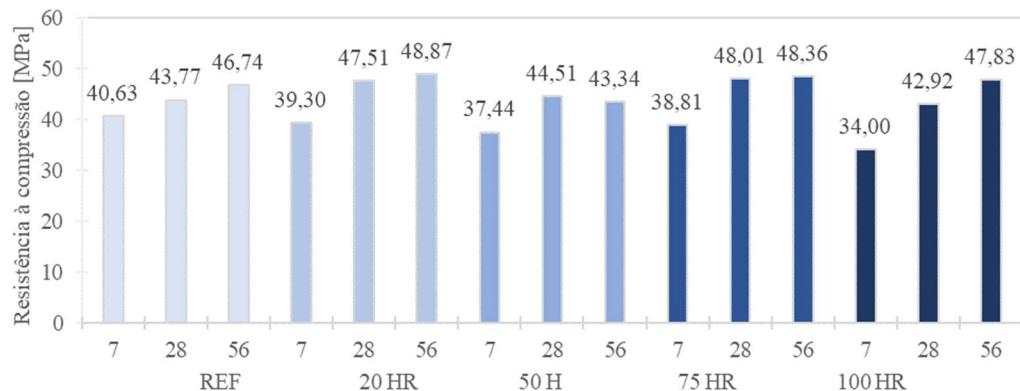


Figura 3.1 – Resistência à compressão axial.

Verifica-se na Figura 3.1 que, em relação ao traço de referência, os traços com 20%, 50%, 75% e 100% de substituição apresentaram reduções na resistência aos 7 dias de 3%, 8%, 5% e 16%, respectivamente. Em relação ao traço de referência, apenas o traço com 100% de substituição apresentou redução na resistência aos 28 dias, na ordem de 2%. Os traços com 20%, 50% e 75% apresentaram incrementos na resistência aos 28 dias de 9%, 2%, 10%, respectivamente, em relação ao traço de referência. O traço com 50% de substituição apresentou redução na resistência aos 56 dias, na ordem de 7%. Os traços com 20%, 75% e 100% apresentaram incrementos na resistência aos 56 dias de 5%, 4% e 2% respectivamente, em relação ao traço de referência.

Observa-se ainda que todos os traços produzidos com agregados reciclados apresentaram valores de resistência à compressão aos 28 dias superiores à resistência de dosagem ($f_{ck} = 35$ MPa). Os valores obtidos mostram que os concretos com ARCO podem ser utilizados com finalidade estrutural, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023) para todas as classes de agressividade ambiental, uma vez que os limites variam de 25 MPa a 40 MPa.

3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias são apresentados na Figura 3.2.

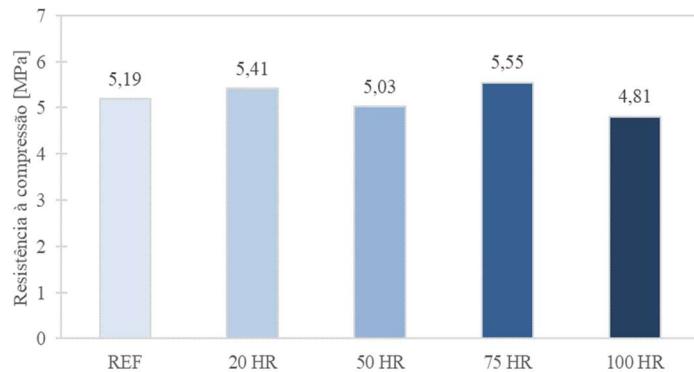


Figura 3.2 – Resistência à tração por compressão diametral.

Observa-se que os traços 20 HR e 75 HR apresentaram resistências ligeiramente superiores ao REF, na ordem de 4% e 7%, respectivamente. Os traços 50 HR e 100 HR apresentaram resistências ligeiramente inferiores ao REF, na ordem de 3% e 7%, respectivamente.

Os valores obtidos para a resistência à tração por compressão diametral ficaram no intervalo de 11% a 12% da resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias.

3.3 Resistividade elétrica

Os resultados dos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica, realizados aos 182 dias, são apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente.

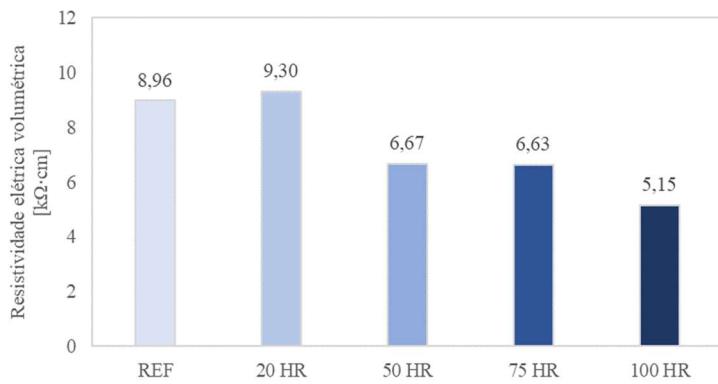


Figura 3.3 – Resistividade elétrica volumétrica.

Observa-se que, a partir de 50% de substituição, os concretos produzidos tendem a apresentar resistividades mais baixas com o aumento da substituição. O leve aumento, de 3,8%, da resistividade no traço 20 HR em relação ao traço REF pode estar associado à redução no teor de água da mistura. Os concretos 50 HR, 75 HR e 100 HR apresentaram 26%, 26% e 42% de redução, respectivamente, na resistividade em relação ao concreto REF.

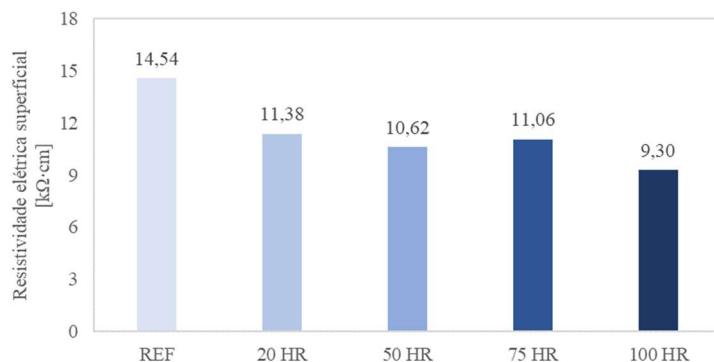


Figura 3.4 – Resistividade elétrica superficial.

Os concretos 20 HR, 50 HR, 75 HR e 100 HR apresentaram 22%, 27%, 24% e 36% de redução, respectivamente, na resistividade em relação ao concreto REF. Observa-se que o concreto de referência apresentou o melhor comportamento em ambos os ensaios e o concreto com 100% de substituição, o pior resultado.

3.4 Penetração de cloreto

Os resultados obtidos no ensaio de determinação do coeficiente de migração em estado não-estacionário D_{nssm} aos 56 e 91 dias são apresentados na Figura 3.5. Não foram considerados os possíveis efeitos do processo de carbonatação das amostras durante a fase de pré-condicionamento.

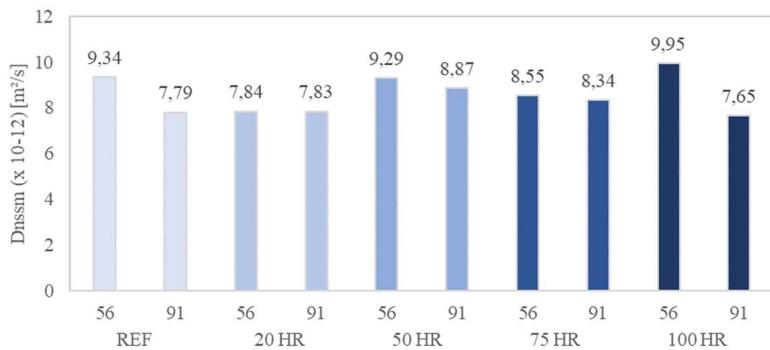


Figura 3.5 – Coeficiente de migração em estado não estacionário.

Observa-se que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram diferenças entre 1% e 16% nos valores de coeficiente de difusão em relação ao concreto de referência. Não foi observado relação direta entre aumento ou redução do coeficiente com a variação do teor de substituição.

Nota-se que, de acordo com a classificação proposta por Nilsson *et al.* (1998), todos os traços avaliados possuem alta resistência à penetração de cloreto. Entretanto, ainda que todos os traços tenham obtido a mesma classificação, a discrepância entre os valores dos coeficientes de migração em estado não-estacionário pode acarretar previsões de vida útil significativamente diferentes. A Figura 3.6 apresenta a curva de concentração de cloreto no tempo.

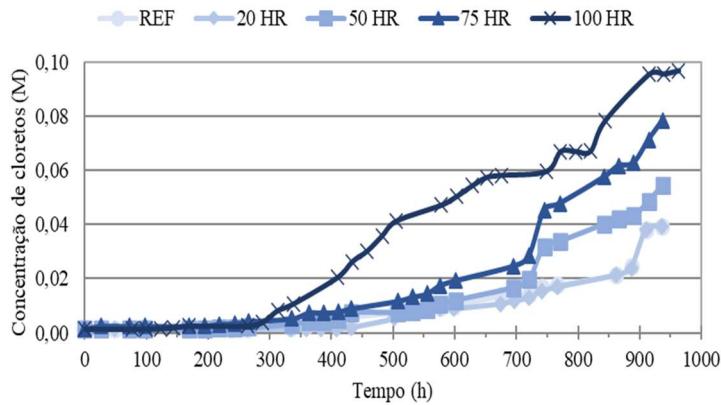


Figura 3.6 – Curvas de concentração de cloreto no tempo.

A Tabela 3.1 apresenta os valores de time-lag, fluxo de íons, coeficiente de migração em estado estacionário e não-estacionário dos concretos produzidos.

Traço	Time-lag [h]	Fluxo de íons [mol/(cm²·s)]	D _s [m²/s]	D _{ns} [m²/s]
REF	300	2,16E-10	4,05E-09	2,63E-08
20 HR	375	2,49E-10	4,67E-09	2,10E-08
50 HR	250	1,97E-10	3,69E-09	3,16E-08
75 HR	200	2,51E-10	4,71E-09	3,94E-08
100 HR	250	7,51E-10	1,41E-08	3,16E-08

Tabela 3.1 – Coeficientes de migração no estado estacionário e não estacionário.

3.5 Absorção de água por capilaridade

Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade são apresentados na Figura 3.7.

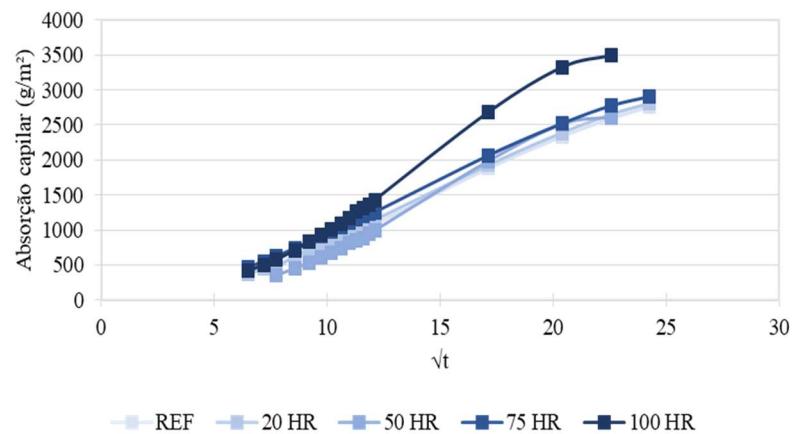


Figura 3.7– Curvas de absorção capilar.

A análise da Figura 4.8 permite concluir que quanto maior o percentual de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto, maior a absorção de água por capilaridade do concreto produzido. Com 48 horas de ensaio, os traços apresentaram valores de 2% (20 HR), 7% (50 HR), 8% (75 HR) e 42% (100 HR) acima dos valores de absorção capilar apresentados pelo concreto de referência (REF).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta o estudo experimental das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido sem e com substituição parcial do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto, nos teores de 20%, 50%, 75% e 100%. Em relação às propriedades mecânicas, o seguinte pode ser concluído desse estudo:

- A resistência à compressão axial dos concretos avaliados não difere mais do que 16% em todas as idades estudadas (7, 28 e 56 dias). Todos os concretos apresentaram valores acima da resistência de dosagem ($f_{ck} = 35$ MPa). Os resultados indicam que todos os concretos produzidos podem ser utilizados com finalidade estrutural, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023), para todas as classes de agressividade ambiental;
- A resistência à tração por compressão diametral dos concretos avaliados não difere mais do 7% aos 28 dias de idade e os resultados obtidos ficaram no intervalo de 11% a 12% da resistência à compressão diametral.

Em relação às propriedades relacionadas à durabilidade, o seguinte pode ser concluído neste estudo:

- Quanto maior o percentual de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado empregado, maior é a absorção de água por capilaridade apresentada pelo concreto;
- Os valores de resistividade elétrica superficial e volumétrica reduziram com o aumento do teor de substituição;
- Não foi observado relação direta entre aumento ou redução do coeficiente de difusão de cloretos nos estados estacionário e não estacionário com a variação do teor de substituição.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, J. R.; MENDOZA, D. N. Caracterización del hormigón elaborado con áridos reciclados producto de la demolición de estructuras de hormigón. *Materiales de construcción*. ISSN 0465-2746, Vol. 57, Nº. 288, 2007, p. 5-15.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021). ABNT NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2023). ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2012). ASTM C 1760: Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete. ASTM: West Conshohock-en.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2022). ASTM C1556: Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN (2012). Determinación de los Coeficientes de Difusión de los Iones Cloruro en el Hormigón Endurecido - Método multiregimen. UNE 83987.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN (2012). UNE 83987: Determinación de los Coeficientes de Difusión de los Iones Cloruro en el Hormigón Endurecido - Método multiregimen.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2021). ABNT NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2023). ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT.
- GOMES, C. L., POGGIALI, F. S. J. A., CABRAL, R. Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica. Matéria (Rio de Janeiro) [online]. 2019, v. 24, n. 2.

- IGLECIAS, Patrícia; TANURE, Fernanda A.; GOUVEIA, Jorge; *et al* (2023). Proteção ao Meio Ambiente no Brasil: Passado, Presente e Futuro: Estudos em Homenagem a Patrícia Iglesias. São Paulo: Grupo Almedina.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS (2002). UNIT NM-ISO 248: Agregados. Determinación de la composición granulométrica.
- INSTITUTO URUGUAYO DE NORMAS TÉCNICAS (2022). UNIT 20: Cimentos portland para uso general – Definiciones y requisitos. Montevideo: UNIT.
- JÚNIOR, N. S. A.; SILVA, G. A. O.; DIAS, C. M. R.; RIBEIRO, D. V (2019). Concrete containing recycled aggregates: Estimated lifetime using chloride migration test. Construction and Building Materials, v. 222, p. 108-118.
- MENEZES, M. F. S.; SALES, A. T. C (2019). Agregado graúdo reciclado de concreto em substituição ao agregado natural na produção de concreto estrutural. Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção, 6., p. 185–196.
- MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, É. D (2009). A reciclagem de re-síduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. Ambiente Construído, v. 9, n. 1, p. 57–71.
- NANYA, C. S.; FERREIRA, F. G. DA S.; CAPUZZO, V. M. DA S (2021). Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete. Matéria (Rio de Janeiro), v. 26, n. 4, p. e13073.
- NILSSON, L., NGO, M.H., and GJØRV, O.E. (1998). High- Performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg. In Proceedings, Second International Conference on Concrete under Severe Conditions—Environment and Loading, vol. 2, ed. O.E. Gjørv, K. Sakai, and N. Banthia. E & FN Spon, London, pp. 1193–1198.
- NORDTEST (1999). NT BUILD 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Espoo: NT BUILD.
- NORMA ARGENTINA (2004). IRAM 1871: Hormigón. Método de ensayo para la determinación de la capacidad y el coeficiente de succión capilar de agua del hormigón endurecido.
- PIMENTEL, L. L.; RIZZO, G. F.; JACINTHO, A. E. P. G. A.; FONTANINI, P. S. P (2020). Concrete produced with recycled aggregate: a durability analysis for structural use. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 13, n. 6, p. e13613.
- RESOLUÇÃO CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil.
- SALLES, P. V.; GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; RODRIGUES, C. de S (2021). A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 177-196, jul./set. 2021.