



AVALIAÇÃO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUO DE VIDRO NO ATAQUE DE SOLUÇÕES AGRESSIVAS

José Venâncio Pinheiro Rotta¹, Silvia Paula Sossai Altoé², Isadora Bedusqui de Goes Radke³, Paulo Henrique Carvalho Mello⁴, Daise Fernanda Rubio da Silva⁵

¹Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá. josevprotta@hotmail.com

²Docente, Doutora, Orientadora, Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Maringá. spsaltoe@uem.br

³Mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá. isadora_goes@hotmail.com

⁴Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá. paulohcm123@gmail.com

⁵Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual de Maringá. daiserubio.ec@gmail.com

RESUMO

Com o crescimento econômico, o concreto se estabeleceu como um material globalmente predominante. Entretanto, a demanda por seus componentes tradicionais, como o cimento, contribui para impactos ambientais, incluindo emissões de CO₂ e esgotamento de recursos naturais. Substituições e adições são soluções sustentáveis que podem trazer vantagens em termos de propriedades mecânicas e durabilidade do concreto. Assim, estudos têm focado na utilização do resíduo de vidro como substituto parcial do cimento, melhorando propriedades mecânicas e de resistência a ambientes agressivos. Isso oferece uma destinação alternativa para o resíduo e reduz a utilização de cimento. Assim, avaliou-se de concretos confeccionados com substituição parcial do cimento Portland pelo pó de vidro, variando em teores de 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% em relação à massa. Tal avaliação contempla um estudo preliminar da durabilidade desses traços diante de uma exposição externa a sulfatos. Durante um período de 91 dias, as amostras foram imersas em soluções de sulfato de sódio, em concentrações de 5% e 10%, simulando um meio agressivo. Os resultados obtidos revelaram a viabilidade da utilização do pó de vidro em concretos, evidenciando parâmetros que se aproximaram significativamente ao traço referência, mesmo em proporções altas de substituição. No caso da mistura contendo 25% de pó de vidro, as variações foram muito pequenas tanto nas duas soluções agressivas, quanto na câmara úmida, e ainda foram inferiores às variações apresentadas pelo traço piloto, sem resíduos, demonstrando resistência aos efeitos do ataque de sulfatos.

PALAVRAS-CHAVE: Ataque de sulfatos; Concreto sustentável; Resíduo de vidro.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material fundamental na construção civil de diversos países, sendo composto principalmente por cimento Portland, agregados e água, e ainda pode ser utilizado junto ao aço. Apesar de existirem diversos materiais na indústria da construção, o concreto e o concreto armado continuam sendo amplamente empregados. O elevado consumo de cimento para atender à crescente demanda na construção resulta em uma maior produção e, consequentemente, maior emissão de gases de efeito estufa (BARROS, 2016).

Nesse sentido, a incorporação do resíduo de vidro em concretos e argamassas, atuando como adição ou substituição dos agregados ou do cimento, tem sido amplamente pesquisada. Essa aplicação proporciona uma solução sustentável que contribui para a conservação dos recursos naturais, redução das emissões de CO₂ e eficiência energética. Nas pesquisas, é comum utilizar o resíduo em forma de pequenas partículas denominadas pó de vidro (PDV). Devido as características químicas e físicas do vidro, alguns autores destacam uma melhoria nas propriedades mecânicas e de durabilidade, incluindo uma maior resistência à ação de agentes agressivos (GUIGNONE, 2017).

Para avaliar novos materiais que podem ser incorporados ao concreto tradicional, Schmalz (2018) enfatiza a importância de estudar a resistência aos principais mecanismos de deterioração, como corrosão da armadura, ataque de cloretos, carbonatação e ação de



agentes agressivos, como os sulfatos. A agressividade de certas soluções pode ocasionar a expansão, fissuração e desgaste do concreto, resultando na perda de massa e resistência mecânica. No caso dos sulfatos, o ataque pode ser interno, quando ocorre a contaminação dos agregados ou quando estão presentes no cimento, ou externo, quando as estruturas são expostas à água do mar, solo, lençol freático, esgoto, efluentes industriais, entre outros. Além disso, é possível que ambos os tipos de ataque ocorram simultaneamente.

Neste estudo, foi utilizada a substituição parcial do cimento em concretos pelo resíduo de vidro proveniente da laminação de vidros temperados, nos teores de 0% (sem resíduos), 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. A pesquisa concentrou-se principalmente no efeito das substituições em concretos submetidos ao ataque externo de sulfatos, em dois teores de concretração, avaliado nos valores da resistência a compressão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Utilizou-se o cimento de alta resistência inicial CPV-ARI Premium, da marca Liz, para confeccionar os corpos de prova (CP). Essa escolha do material baseou-se na sua baixa incorporação de aditivos e no alto teor de clínquer presente. Os agregados escolhidos foram a areia e a brita 1, adquiridos junto a fornecedores na localidade de Maringá, estado do Paraná.

A água empregada no processo de mistura era potável e encontrava-se à temperatura ambiente. O resíduo de vidro empregado no estudo foi fornecido por uma empresa situada em Apucarana, no Paraná, e é subproduto do corte de placas de vidro temperado.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Caracterização dos agregados

No Laboratório de Materiais de Construção - P02, da Universidade Estadual de Maringá, foram conduzidas análises o intuito de adquirir informações dos materiais empregados. Estas informações compreenderam a distribuição granulométrica, densidade em massa unitária e densidade específica dos referidos agregados.

Para a obtenção da distribuição granulométrica da areia e brita, procedeu-se conforme as diretrizes estabelecidas na norma NBR 17054 (ABNT, 2022). A massa unitária foi obtida de acordo com os preceitos da norma NBR 16972 (ABNT, 2021). Para determinar a massa específica do agregado miúdo, seguiu-se o estabelecido na NBR 16916 (ABNT, 2021), enquanto para o agregado graúdo, a NBR 16917 (ABNT, 2021). Já para o cimento, sua caracterização e análise foram concretizadas com embasamento nas informações disponibilizadas pelo fabricante, conjuntamente com a granulometria mencionada na literatura.

2.2.2 Coleta e preparo do PDV

O resíduo de vidro neste estudo é derivado da operação de corte de placas de vidro temperado, realizada por meio da aplicação de jatos de água. Esse procedimento resulta em uma mistura de resíduo e água, com aparência semelhante a de lama, sendo então encaminhado para o processo de tratamento de efluentes interno na empresa. Após o recebimento, ocorre a decantação e densificação nos funis com a adição de polímeros. Todo o material é disposto em sacos plásticos (Figura 1) para a destinação final em aterros



controlados e a água tratada é armazenada em caixas d'água para serem reutilizadas no mesmo processo de corte. A partir disso, o resíduo foi seco ao sol e moído em um moinho de barras.



Figura 1: Funis de decantação

Fonte: Os autores

2.2.3 Dosagem e moldagem dos corpos de prova

Em se tratando da dosagem dos concretos, o traço em massa foi fixado na proporção 1:1,96:2,72. Com base nessa relação, variou-se os a quantidades de cimento substituído pelo PDV, nos teores de 0% (denominado piloto ou referência), 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Essa substituição foi efetuada mantendo-se uma relação água/cimento de 0,55, aferida em termos de massa (Tabela 1). O objetivo foi produzir concretos com slump de 10 ± 2 cm, classificados na categoria S100.

Tabela 1: Traço em massa dos concretos

Traço	a/c	Cimento	Areia	Brita 1	Resíduo de vidro	
					PDV	Teor de substituição
T0	0,55	1,00	1,96	2,72	0	0%
T1		0,90	1,96	2,72	0,10	10%
T2		0,85	1,96	2,72	0,15	15%
T3		0,80	1,96	2,72	0,20	20%
T4		0,75	1,96	2,72	0,25	25%
T5		0,70	1,96	2,72	0,30	30%

Fonte: Dados da pesquisa

Na betoneira de capacidade de 320 litros, os materiais foram adicionados na seguinte sequência: brita, água, cimento, resíduo e areia, com medições realizadas em massa e sem correção de umidade. Os agregados empregados estavam em estado seco em umidade ambiente. Todo o procedimento seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 12655 (ABNT, 2022). Para cada traço foram confeccionados corpos de prova de dimensões 10x20 cm, em conformidade com as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Posteriormente, o abatimento do concreto foi avaliado conforme estipulado na norma NBR 16889 (ABNT, 2020). Os corpos de prova permaneceram nos moldes durante 24 horas, sendo posteriormente desmoldados e transferidos para uma câmara úmida, onde foram mantidos até alcançarem a idade necessária para a realização dos ensaios pertinentes a pesquisa.



2.2.4 Imersão em sulfatos

Os procedimentos experimentais consistiram, basicamente, na imersão dos CPs em soluções agressivas. Cabe ressaltar que os corpos de prova não foram submetidos a quaisquer procedimentos prévios, como imersão em água ou cal, e também não receberam tratamentos de impermeabilização em suas superfícies.

No presente estudo, foram empregadas duas soluções de sulfato de sódio uma com concentração de 5% e outra com 10%. Os corpos de prova foram submetidos a um período de cura de 28 dias em uma câmara úmida, após o qual foram submersos por 91 dias. Nesta data, foram registrados os valores de resistência à compressão.

Considerando a inexistência de um ensaio de referência padronizado, o procedimento foi conduzido em de acordo com as descrições encontradas nos estudos de Zhao *et al.* (2020a), Zhao *et al.* (2020b) e Zhao, Li, Shao (2018). A metodologia adotada foi fundamentada na norma japonesa JSTM C 7401 (JSTM, 1999), que estabelece diretrizes para a determinação da resistência à compressão do concreto em ambientes de alta agressividade.

Ao longo do experimento, a disposição das amostras durante o período de imersão foi alterada com frequência, assegurando a exposição de todos os lados ao meio (Figura 2). Ainda, os compartimentos plásticos que abrigavam as amostras permaneceram vedados e a solução foi renovada após 45 dias de imersão.

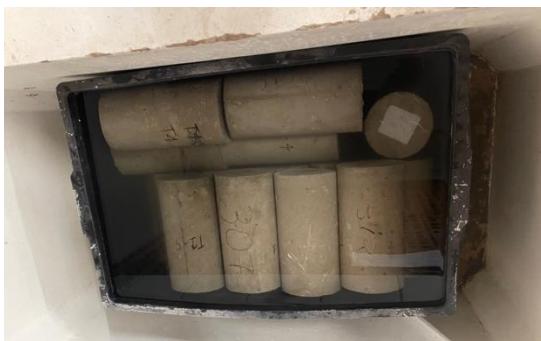


Figura 2: Corpos de prova imersos
Fonte: Os autores

Com esse ensaio, comparou-se a resistência à compressão das amostras mantidas em 91 dias de imersão (curadas por 28 dias), com as amostras que ficaram em câmara úmida por 120 dias. Ou seja, verificou-se a influência da soluções agressivas na resistência de corpos de prova que possuem a mesma idade, sendo um mantido em câmara, sem ataque de sulfatos, e outro imerso, com ataque.

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS

Na análise dos materiais, observou-se que a brita atendeu satisfatoriamente aos requisitos de classificação estabelecidos para a brita 1. No entanto, o agregado miúdo demonstrou estar próximo dos limites inferiores da faixa apropriada para utilização em concretos, devido ao processo prévio de peneiração utilizado para eliminar detritos como folhas e galhos. Cabe destacar que o resíduo possui um valor de massa específica aproximadamente metade do valor do cimento. Os resultados detalhados dessa caracterização, incluindo os parâmetros relevantes da brita e da areia, podem ser encontrados na Tabela 2.



Tabela 2: Parâmetros dos materiais

Parâmetro	Brita	Areia	Resíduo	Cimento
Massa unitária [g/cm ³]	1,466	2,658	2,52	3,12
Massa específica [g/cm ³]	2,39	1,52	0,66	1,18
Diâmetro máximo [mm]	19,00	1,18	-	-
Módulo de finura	6,82	1,57	-	-

Fonte: Dados da pesquisa

Ao comparar as granulometrias dos agregados, aglomerantes e resíduos conforme ilustrado na Figura 3, nota-se que a distribuição das partículas do PDV, situa-se em uma posição intermediária entre a curva representativa da areia e a curva do cimento CPV. No entanto, essa distribuição se encontra mais próxima da curva do cimento CPV do que da curva da areia.

Além disso, é observado que o cimento possui uma granulometria mais fina em comparação ao resíduo, indicado pela posição relativa das respectivas curvas. É importante destacar que o cimento CPV-ARI utilizado para fins comparativos foi obtido da pesquisa conduzida por Cesapolucha (2016), que realizou a análise granulométrica do material.

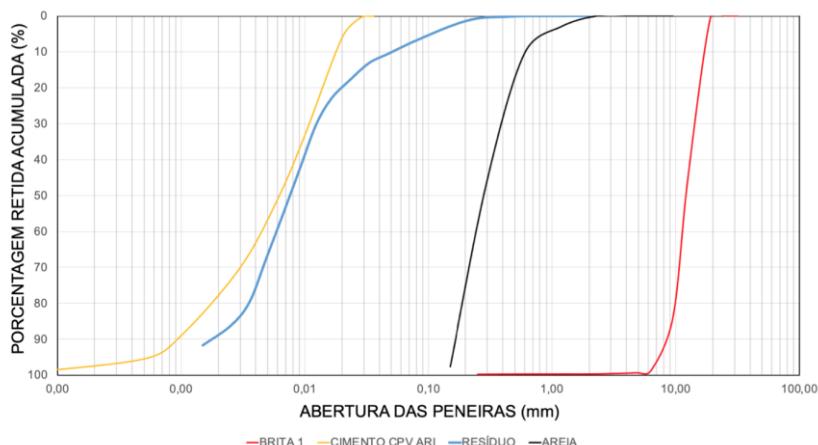


Figura 3: Curvas granulométricas dos materiais utilizados na pesquisa

Fonte: Cesapolucha (2016), dados da pesquisa, adaptado pelos autores

3.2 ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE (SLUMP)

Durante a elaboração dos corpos de prova, foi observado que à medida que a quantidade de resíduo no concreto aumentava e a quantidade de cimento diminuía, o volume aparente do concreto também aumentava, isso ocorreu devido a diferença de massa específica e massa unitária dos materiais.

A influência da temperatura e da umidade do ar no abatimento do concreto foi amplamente evidenciada tanto no traço piloto quanto nos traços contendo resíduos. Para examinar essa relação, alguns traços foram produzidos em três condições climáticas adversas, resultando em três valores distintos.

Assim, certos traços foram refeitos sob condições controladas de temperatura, mantendo-a ambiente e com umidade superior a 90%. Sob essas circunstâncias, os traços com substituição, independentemente do teor, permaneceram na classe de consistência S100, com abatimento entre 10 e 16 cm (Tabela 3), o que é considerado adequado para elementos estruturais com lançamento convencional do concreto.

No entanto, para as diversas condições climáticas, não foi possível identificar uma tendência clara no comportamento da trabalhabilidade das substituições.



Tabela 3: Relação slump, temperatura e umidade relativa do ar

Traço	Slump (cm)	Classe	Temperatura (°C) ambiente	Umidade relativa do ar (%)
T0	16	S100	19	100
T1	14	S100	20	94
T2	12	S100	21	94
T3	13	S100	21	94
T4	11	S100	22	88
T5	10	S100	21	94

Fonte: Dados da pesquisa

3.3 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO APÓS ATAQUE DE SULFATOS

Na Figura 4, verifica-se a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo de exposição à solução. É importante destacar que os valores registrados para 0 dias de imersão correspondem aos valores de resistência obtidos após 28 dias de cura em câmara úmida.

Dessa forma, a análise do comportamento da resistência à compressão é realizada utilizando misturas curadas durante 28 dias em câmara úmida e posteriormente imersas nas soluções, cujas medições foram realizadas após 28 e 91 dias de imersão (119 dias de idade). As linhas tracejadas ilustram as resistências dos concretos mantidos em câmara úmida, com idades de 28 e 120 dias.

Verifica-se que em todas as situações, tanto na imersão quanto na câmara úmida, que os valores das resistências aumentaram. É evidente que o T0 (0%), apesar de já partir de uma valor inicial maior, resultou nos maiores valores de resistência, principalmente na solução de com 10% de sulfatos. Os traços que obtiveram maiores valores do que na câmara úmida foram o T2, T3 e o T5.

De acordo com as observações de Liu *et al.* (2018), a variação na resistência do concreto está intrinsecamente ligada ao processo contínuo de cristalização de sais e à subsequente formação de gesso e etringita nos poros ou microfissuras do material.

Na fase inicial, a expansão decorrente da cristalização e a criação de novos produtos são capazes de preencher os poros e microfissuras, contribuindo para o incremento da compacidade do concreto e, consequentemente, resultando em um aumento na resistência à compressão a uma escala macro.

Em etapas mais avançadas, contudo, à medida que ocorre uma cristalização mais pronunciada dos sais e se desenvolvem maiores quantidades de gesso e etringita, os poros e microfissuras presentes no concreto se tornam incapazes de absorver mais expansões. O surgimento e crescimento de novas fissuras ganham forma quando a tensão decorrente da expansão excede a resistência à tração. Como consequência desse cenário, a resistência à compressão do concreto tende a decrescer, em maiores idades.

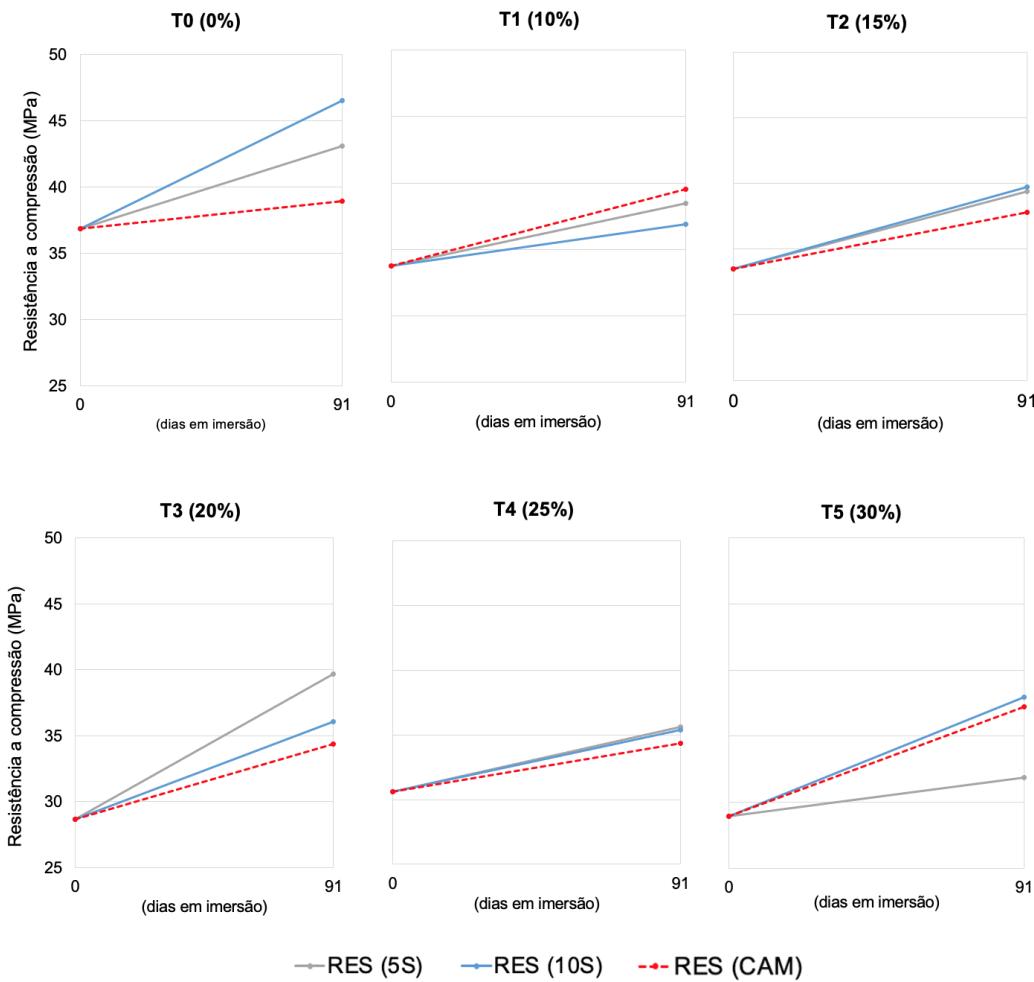


Figura 4: Evolução das resistências em câmara úmida e nas soluções 5S e 10S
Fonte: Dados da pesquisa

Os valores das resistências e os desvios padrão das amostras estão disponíveis na Tabela 4. Assim, verifica-se que o traço de referência resultou nas resistências mais elevadas após imersão nas soluções agressivas, possivelmente decorrente de sua maior vulnerabilidade aos efeitos dos sulfatos, em concordância com as observações de Zhao *et al.* (2020b). Os pesquisadores também afirmam que o acréscimo na resistência inicial do concreto pode ser atribuído ao preenchimento dos poros e fissuras no material com os produtos resultantes da corrosão. Isso resulta no aumento do peso do corpo de prova, promovendo um aumento da densidade do concreto, o que, por sua vez, contribui para o incremento da resistência nas primeiras idades.

Tabela 4: Resistências na câmara úmida e após as imersões

Traço	F_{cm} (28 dias)	F_{cm} (120 dias)	Dias em imersão	Idade real do CP (dias)	Solução 5S		Solução 10S	
	Câmara úmida	Câmara úmida			F_{cm} (MPa)	Desv. Pad.	F_{cm} (MPa)	Desv. Pad.
					(MPa)	Pad.	(MPa)	Pad.
T0	36,8	38,9	91	28 cura + 91 imersão = 119	43,1	2,8	46,5	2,4
	33,8	39,5			38,5	4,5	36,9	5,4
	33,5	37,8			39,4	3	39,7	1
	28,7	34,4			39,7	0,1	36,1	6,5
	30,6	37,7			35,6	2,8	35,4	3,4



T5	29,0	37,2	91		31,9	0,7	38	1,4
----	------	------	----	--	------	-----	----	-----

Fonte: Dados da pesquisa

Ao analisar os traços, o T4 (25%) exibiu uma notável resistência aos impactos dos produtos de corrosão ao longo do tempo. Isso pois os resultados foram muito próximos àqueles obtidos com os corpos de prova submetidos à cura em câmara úmida.

Dessa forma, constata-se que o traço T4 preservou sua capacidade de resistência ao longo do período, independentemente das condições de exposição ambiental. Nessa perspectiva, pode-se supor que o aumento de resistência constatado em concretos submetidos à ação dos sulfatos não exerceu um impacto significativo na mistura contendo uma proporção de 25% de substituição, já que se comportou de forma semelhante a amostra mantida em câmara úmida.

4 CONCLUSÕES

Em se tratando da graulometria, verificou-se que após o tratamento do resíduo, seus grãos ficaram em uma região intermediária entre o cimento e a areia. Para o slump, verificou-se que todos os concretos produzidos são adequados para utilização em elementos estruturais desde que haja o lançamento convencional do concreto.

Também, já se esperava que a resistência à compressão manifestasse uma tendência de aumento nas primeiras idades, devido à formação de produtos corrosivos. Isso foi constatado em todas as amostras examinadas. Um destaque dentre os traços avaliados recai sobre o traço T4 (25%), que evidenciou variações mínimas, independentemente da solução agressiva, culminando em valores próximos aos do mesmo traço submetido à cura em câmara úmida.

A partir desse estudo, é possível confirmar que a incorporação do resíduo de vidro em concretos como substituto parcial do cimento exibe um potencial considerável. Não somente a resistência à compressão, um dos indicadores primordiais, demonstrou uma proximidade notável em relação ao traço de referência, mas também a durabilidade desses concretos quando submetidos à imersão em soluções agressivas se revelou ainda mais promissora que a do traço convencional.

Portanto, a pequena diminuição da resistência observada ao empregar o resíduo de vidro é justificada pelos ganhos proporcionados, sobretudo no âmbito ambiental e na redução de custos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16916** Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.



_____. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

BARROS, L. M. Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado. 2016. 202 f. Dissertação (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2016.

CESAPOLUCHA, A. Estudo experimental de concreto auto-adensável utilizando areia 100% artificial e fíber calcário como substituição parcial do cimento portland. 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

GUIGNONE, C. G. DESEMPENHO DE CONCRETOS COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA LAPIDAÇÃO DO VIDRO COMO SUBSTITUTOS PARCIAIS AO CIMENTO. 2017. 268 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2017.

JSTMC 7401. Method of Test for Chemical Resistance of Concrete in Aggressive Solution; Japanese Industrial Standard: Toquio, Japão, 1999.

LIU, T. et al. Experimental investigation on the durability performances of concrete using cathode ray tube glass as fine aggregate under chloride ion penetration or sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 634-642, 2018.

SCHMALZ, R. Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

ZHAO, G. et al. Degradation of cast-in-situ concrete subjected to sulphate-chloride combined attack. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020a.

ZHAO, G. et al. Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal-external combined sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 248, 2020b.

ZHAO, G.; LI, J.; SHAO, W. Effect of mixed chlorides on the degradation and sulfate diffusion of cast-in-situ concrete due to sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 49-58, 2018.