

Uso de Resíduo de Vidro Temperado (RVT) na composição de argamassas

Karina de Oliveira Sant Ana^a , Rafael de Paula Gurkewicz^{a,b,c*} , Augusto Wanderlind^{a,b} ,
Aline Eyng Savi^{a,b} , Jorge Henrique Piva^{a,b} , Elaine Guglielmi Pavei Antunes^{a,b} 

^aDepartamento de Engenharia Civil, UNESC, Av. Universitária 1105, 88806-000, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

^bGPDECC, Grupo de Pesquisa em Desempenho de Estruturas e Construção Civil, UNESC, Av. Universitária 1105, 88806-000, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

^cPrograma de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, UNESC, Av. Universitária, 1105, 88806-000, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

*e-mail: rafaelgurkewicz@unesc.net

Resumo

A construção civil é responsável por um alto consumo de matérias-primas e recursos naturais. Esses fatores ocasionam diminuição da disponibilidade dos recursos, geram impactos socioeconômicos, mudanças nas paisagens e originam resíduos, prejudicando o equilíbrio do meio ambiente. Mas a indústria da construção civil também tem a capacidade de reintegrar os resíduos gerados, tanto por ela como por outra atividade econômica, reutilizando-os, como incorporando-os aos materiais de construção. Entre os diversos resíduos gerados tem-se o vidro plano, do qual 55,4% são vidros temperados, que se mantêm ano após ano como o principal produto processado não automotivo do país. Nesse contexto o estudo *visa analisar a influência da substituição de agregado miúdo natural por resíduos de vidro temperado moído (RVT) nas características físicas e propriedades mecânicas das argamassas. Os percentuais de substituição de agregado miúdo por RVT foram de 15, 30 e 45% em massa. No ensaio de absorção de água por capilaridade, exceto o traço com 15% de substituição, todos os demais traços de argamassa apresentaram menores índices para o coeficiente de capilaridade, sendo considerados adequados para utilização em argamassas de revestimento. Como resultados, nos ensaios de resistência mecânica, obtiveram-se resistências estatisticamente iguais ou superiores ao traço referência, sendo as maiores resistências obtidas com o teor de 45% de resíduo de vidro temperado moído.

Palavras-chave: Resíduo; argamassa; agregado; reciclagem; vidro temperado.

1. INTRODUÇÃO:

A construção civil é responsável por um alto consumo de matérias-primas e recursos naturais, além de ser grande geradora de resíduos [1]. Seus efeitos negativos incluem, além da diminuição da disponibilidade de recursos, os impactos socioeconômicos, mudanças na paisagem e a geração de resíduos, prejudicando o equilíbrio do meio ambiente. A indústria da construção civil consome cerca de 75% dos recursos naturais produzidos mundialmente [2]. A construção civil é a maior fonte geradora de lixo de toda sociedade, já que seus entulhos podem chegar a 70% da massa total de resíduos sólidos de uma cidade de médio a grande porte [2]. Diante desse cenário, deve-se estar

ciente de que, quando se gera uma grande quantidade de resíduos, é preciso se preocupar com a destinação dada a esses.

Além de consumir, a indústria da construção civil também tem a capacidade de absorver os resíduos gerados, tanto por ela como por outra atividade econômica, reutilizando-os, a exemplo de incorporá-los aos materiais de construção [3]. Assim, apesar de utilizar grandes quantidades de recursos naturais, a construção civil pode absorver resíduos sólidos, reduzindo impactos ambientais e custos financeiros advindos da disposição final desses resíduos, além disso, evitando a retirada demasiada de matérias-primas naturais [4]. Segundo Oliveira e Silva [5], “o setor da construção civil pode incorporar grande quantidade de resíduos, sendo a técnica de encapsulamento de resíduos em artefatos de construção uma das mais promissoras”. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar a viabilidade de incorporação dos mais diversos resíduos na construção civil, entre eles destaca-se o vidro.

A NBR 13281: 2005 [6] define a argamassa para revestimento como sendo “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. De acordo com Antunes [7] “os revestimentos têm um papel fundamental no desempenho das edificações, pois cobrem os edifícios e, conseqüentemente, são os principais responsáveis pela proteção das paredes e estruturas dos agentes ambientais de degradação”.

A areia é um dos materiais constituintes da argamassa, que ocupa a maior parte do volume em sua composição. Bauer [8] define areia como um agregado de origem natural ou obtido por trituração artificial, sua atividade química é quase nula e suas dimensões abrangem vários tamanhos. Este recurso é rico em natureza, mas limitado em quantidade. Nos últimos anos houve um aumento na extração desta matéria-prima que, por sua vez, é um recurso não renovável, ou seja, não é formada a uma proporção que possa sustentar a sua quantidade consumida [9]. Fávero [10] enfatiza que a extração de areia tem um grande impacto no meio ambiente e que a disponibilidade diminui com o tempo, assim a sua substituição por resíduos reduziria os impactos ambientais gerados no processo de sua extração, beneficiamento e industrialização.

A utilização de resíduos de vidro em vez de areia natural na composição das argamassas é viável, e o custo de reposição indica uma vantagem [11]. São os benefícios adicionais descritos por Ling et al. [12] e por Shi e Zheng [13], o menor uso de agregados naturais resultando em custo mínimo de extração, menor invasividade da extração, extensão da vida útil da jazida, menor uso de recursos naturais não renováveis, possibilitando reciclar parte do vidro, que de outra forma iria para aterros sanitários e, assim, resultando em maior sustentabilidade ao longo do ciclo de produção. Para Zhang et al. [14], “o vidro reciclado é adequado para reaproveitamento em materiais de construção devido à sua transparência óptica, inércia química, alta impermeabilidade e alta resistência intrínseca”.

Altamente durável, o vidro leva cerca de 5 mil anos para se decompor na natureza, ainda assim, ele é 100% e infinitamente reciclável, pois não perde suas características. O mercado de reciclagem de vidro trabalha com material gerado por dois setores da economia: o de embalagens e o de vidro plano, oriundo da construção civil e da indústria automobilística [15]. O Brasil produz diariamente 7530 toneladas de vidros planos, dos quais 55,4% são do vidro temperado, liderando a participação do produto em 2019, e vem se mantendo ano a ano como principal produto processado não automotivo [15].

As aplicações do vidro plano são definidas pela NBR NM 293:2004 [16] classificando-o quimicamente como sodo-cálcico obtido pelo processo de fabricação *float* ou estirado, podendo ser beneficiado e transformado em produtos, tais como o vidro temperado. Bauer [8] relata que o nome é uma analogia ao aço endurecido, pois ambos têm maior resistência durante o processo de endurecimento (têmpera), apesar de possuírem mecanismos diferentes. O autor ainda relata que o vidro temperado tem grande resistência à compressão e pouca resistência à tração por ser um material frágil, de ruptura brusca. Devido essas tensões induzidas, quando este se rompe em qualquer ponto, fragmenta-se por inteiro em pequenos pedaços, arredondados e muito menos cortantes se comparado ao vidro comum, tornando-o um vidro de segurança, pois garante a integridade física do usuário. O processo de fabricação do vidro temperado segue as determinações da NBR 14698:2001 [17], que estabelece requisitos gerais, recomendações, cuidados necessários e suas aplicações.

No entanto, pouco se emprega o vidro temperado no processo de reciclagem convencional. Por ter composição química diferente, esse tipo de vidro pode causar trincas e defeitos em vidros de embalagem, portanto é necessário o desenvolvimento de novas técnicas que viabilizem cada vez mais estes processos [18]. Autores recentes como Pires [2], Pereira [19] e Silva [20] abordam o estudo do desenvolvimento da inserção de resíduo de vidro temperado na produção de concreto convencional.

Considerando que uma grande quantidade de resíduo de vidro temperado é gerada a cada dia, e há pouca demanda para o seu reaproveitamento, existem poucos estudos sobre a substituição de agregados por resíduos de vidro temperado. Assim, o objetivo desse estudo é analisar as características físicas e propriedades mecânicas da argamassa com substituição do agregado miúdo (areia natural) por resíduo de vidro temperado (RVT).

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

A fim de avaliar o comportamento da substituição de agregado miúdo natural por resíduo de vidro temperado (RVT) em argamassas, o estudo estrutura-se em nove etapas, sendo a primeira delas, a abordagem no estudo bibliográfico. Em seguida, coletou-se o resíduo. Após coleta, o resíduo foi submetido à moagem para atender à granulometria desejada. Na sequência, na quarta etapa fez-se ensaio de composição granulométrica, massa unitária e específica do resíduo, juntamente com os mesmos procedimentos pareados para o agregado miúdo natural. Na quinta etapa efetuou-se a caracterização química do RVT. Definiu-se na sexta etapa o traço adotado como referência e seus respectivos percentuais de substituição do agregado natural, pelo RVT. A sétima etapa consistiu nos ensaios de caracterização física da argamassa no estado fresco. E a oitava etapa deu-se pela caracterização física e propriedades mecânicas no estado endurecido. Por fim, na última etapa foram analisados os dados procedendo com a avaliação dos resultados obtidos. O procedimento utilizado segue sistematizado na Fig.1.

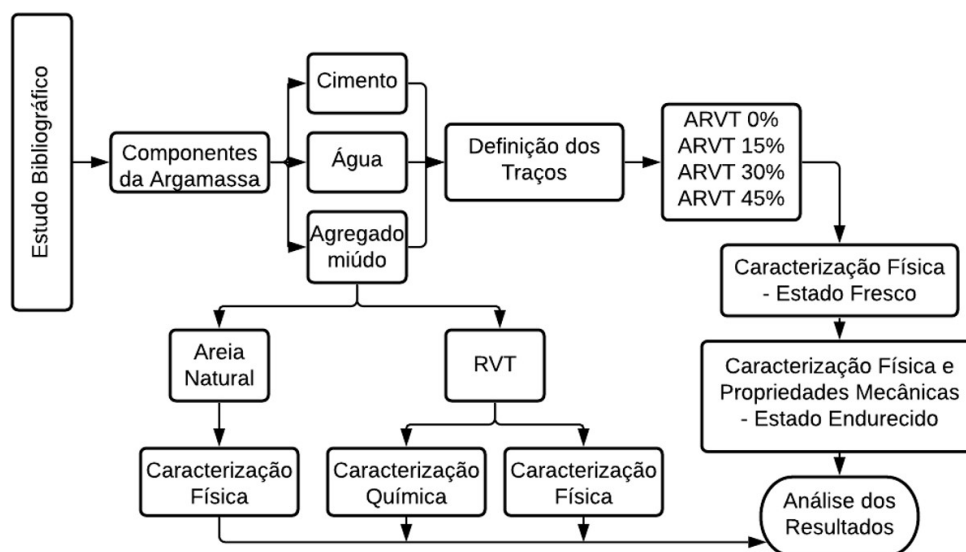


Figura 1. Fluxograma do procedimento utilizado

No Laboratório de Valorização de Resíduos (VALORA) do i.dt/UNESC, o resíduo de vidro temperado passou por moagem em moinho de martelo (Furlan MM Manchester) utilizando grelha com abertura de 3 mm para obter granulometria desejada, compreendida entre as zonas utilizáveis. Conforme cita a NBR 7211: 2022 [21], para que um material seja considerado agregado miúdo, as partículas devem ser passantes pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e estar retidos na peneira de malha 150 μm , com tolerância. Em seguida foi coletado o material passante na peneira de malha 150 μm para serem realizados ensaios de análise complementares do resíduo. Parte da amostra coletada foi destinada para análise das características químicas do RVT moído que se deu por ensaio realizado em espectrômetro de fluorescência de raios X (Panalytical Axios Max). Seguiu-se a caracterização analisando o comportamento do resíduo com os ensaios de análise termogravimétrica (TG) e análise

termodiferencial (DTA), em analisador térmico simultâneo (Netzsch STA 449 F3 Jupiter), em atmosfera de ar sintético, taxa de aquecimento de 20 °C/ min com variação de temperatura de 35 a 1100 °C.

Os ensaios realizados para caracterização do RVT foram: Análise granulométrica, determinação da massa unitária e do índice de vazios, determinação da densidade (massa específica) e da absorção de água, os quais seguiram os parâmetros estabelecidos conforme NBR 17054: 2022 [22], NBR 16972: 2021 [23] e NBR 16916: 2021 [24], nessa ordem. Para determinação da massa unitária adaptou-se o recipiente cilindro de 425 cm³ devido à quantidade disponível de resíduo coletado e moído. O resultado foi obtido pelo método C (solto) da NBR 16972: 2021 [23]. Na Fig.2(a) é mostrado o resíduo de vidro temperado logo após sua coleta e na Fig.2(b) o produto proveniente da moagem.

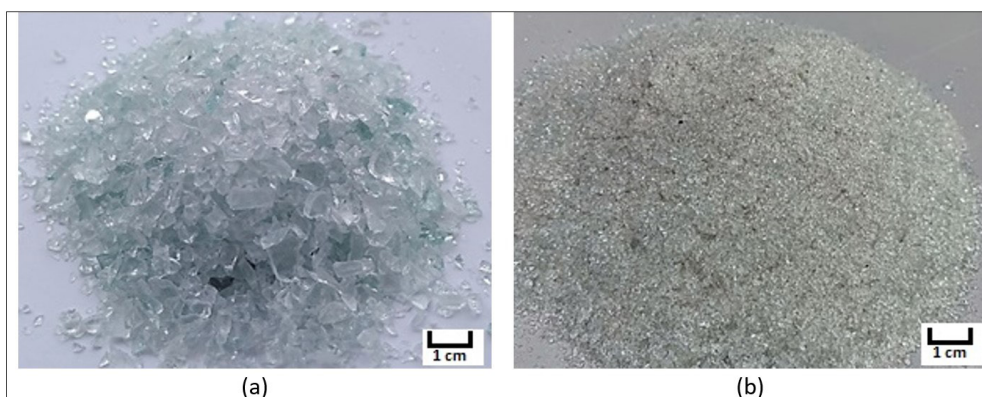


Figura 2. Resíduo de vidro temperado: (a) conforme coletado (b) produto proveniente da moagem

A análise granulométrica da areia natural se deu pela prescrição da NBR 17054: 2022 [22], enquanto a massa unitária e índices de vazios seguiram descrição da NBR 16972: 2021 [23]. A NBR 16916: 2021 [24] forneceu diretrizes para a determinação da densidade (massa específica) e da absorção de água.

O cimento Portland utilizado segue classificado como CPIV, classe 32, com massa específica de 2,8 g/cm³ conforme NBR 16697: 2018 [25]. A água utilizada por sua vez, segue os preceitos da NBR 15900-11: 2009 [26].

Com base na pesquisa realizada por Trentin et al. [27], os percentuais de substituição definidos para essa pesquisa foram 15, 30 e 45% em relação à massa do agregado miúdo. As amostras receberam codificações de acordo com a substituição do agregado natural pelo RVT, como por exemplo, ARVT15 (argamassa com substituição de resíduo de vidro temperado em 15%). O traço referência foi codificado como ARVT0 (sem inserção de resíduo de vidro temperado).

O traço referência da argamassa adotado seguiu o repassado pela NBR 7215: 2019 [28], assim como também foi adotado por Ribeiro e Santos [29], Malek et al. [30] e Almeida [31], aplicou-se como traço referência a relação 1:3 (cimento: areia) em massa, fixando a relação a/c (água/cimento) em 0,52 para todas as misturas realizadas. Importante salientar que os pesquisadores citados, analisaram a substituição do agregado por diversificados tipos de vidros. A Tabela 1 apresenta os traços codificados com sua respectiva substituição realizada a partir da massa do agregado miúdo.

Tabela 1. Especificação das misturas

Codificações das misturas	Traços em massa (cimento: areia/ RVT: a/c)
ARVT0 – REF	1: 3: 0,52
ARVT15	1: 2,55: 0,45: 0,52
ARVT30	1: 2,10: 0,9: 0,52
ARVT45	1: 1,65: 1,35: 0,52

O processo de produção das argamassas foi executado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) pertencente ao i-dt/UNESC. Inicialmente foi realizada a homogeneização do resíduo natural com sua substituição por RVT moído, e após introduzido na argamassadeira juntamente com os demais componentes da mistura, que obedeceu ao processo de mistura indicado pela NBR 13276: 2016 [32]. A Fig.3(a) mostra a homogeneização realizada para a mistura ARVT30 e a Fig.3(b) para mistura ARVT45.

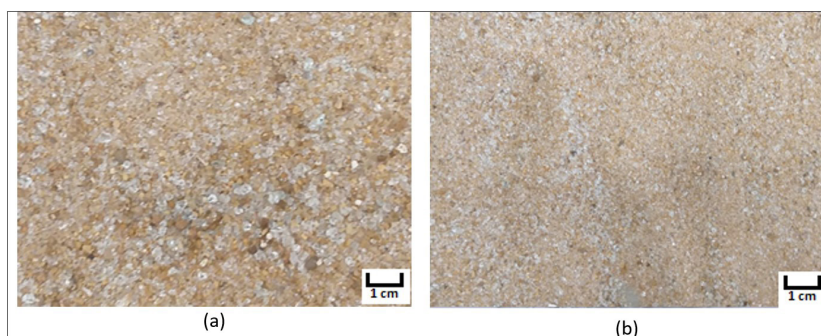


Figura 3. Agregado miúdo: Areia natural e RVT homogeneizados para mistura (a) ARVT30; e (b) ARVT45

Em estado fresco as análises foram feitas pelos ensaios de: Determinação do índice de consistência; determinação da retenção de água; determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, respeitando os procedimentos das NBR 13276: 2016 [32], NBR 13277: 2005 [33] e NBR 13278: 2005 [34], respectivamente.

Para cada traço analisado moldaram-se 6 corpos de prova prismáticos de 4 cm × 4 cm × 16 cm e 3 corpos de prova cilíndricos de 5 cm × 10 cm, conforme os preceitos das NBR 13279: 2005 [35] e NBR 7215: 2019 [28], nessa ordem, para as análises das misturas no estado endurecido passado o tempo de cura de 28 dias.

O ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade procedeu de acordo com a NBR 15259: 2005 [36], utilizando 3 corpos de prova prismáticos de cada composição de traço, que tiveram sua superfície lixada e limpa para determinação da massa inicial. Logo após foram posicionados nos recipientes de ensaio com nível de água de 5 ± 1 mm acima da face de contato com água. Foram registradas as massas após transcorridos 10 minutos e 90 minutos.

Foram utilizados 3 corpos de prova prismáticos de cada traço para ensaio de determinação da resistência à tração na flexão e resistência à compressão axial da argamassa, conforme parâmetros estabelecidos na NBR 13279: 2005 [35]. O equipamento utilizado para ensaio de tração na flexão foi uma máquina universal de ensaios (EMIC DL10000) com capacidade de carga de 100k N (10.000 kgf), enquanto para ensaio de compressão axial foi utilizada uma máquina universal de ensaios (EMIC DL30000) com capacidade de carga de 300 kN (30.000 kgf). Para este último foram usadas seis metades dos corpos de prova resultantes do ensaio de tração na flexão. A velocidade de aplicação de carga no ensaio de resistência à tração na flexão foi 50 ± 10 N/s e no ensaio de resistência à compressão axial foi de 500 ± 50 N/s.

Para determinação do módulo de elasticidade da argamassa foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos para cada composição de mistura, e foram ensaiados conforme prescreve a NBR 8522: 2021 [37]. Realizou-se os ensaios utilizando uma prensa hidráulica (EMIC PC200CS) com capacidade de carga de 2000 kN (200.000 kgf). A velocidade de aplicação de carga no ensaio do módulo de elasticidade foi $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

Os ensaios de caracterização foram realizados segundo as normas listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Ensaios realizados e suas respectivas normas

	Ensaios	Normas
Ensaios complementares de análise do RVT	Análise química	-
	Análise termogravimétrica (TG)	-
	Análise termodiferencial (DTA)	-
Caracterização física da areia natural e do RVT	Análise granulométrica	17054: 2022
	Massa unitária	NBR 16972: 2021
	Massa específica	NBR 16916: 2021
Caracterização física no estado fresco da argamassa	Índice de consistência	NBR 13276: 2016
	Retenção de água	NBR 13277: 2005
	Densidade de massa	NBR 13278: 2005
	Absorção de água por capilaridade	NBR 15259: 2005
Análise física e propriedades mecânica no estado endurecido	Tração na flexão	NBR 13279: 2005
	Compressão axial	NBR 13279: 2005
	Módulo de elasticidade estático	NBR 8522: 2021

Para a análise dos resultados obtidos realizou-se a análise de variância (ANOVA) com o intuito de verificar-se a variação entre os grupos apresentados. Neste estudo adotou-se um nível de significância de 95% para os ensaios no estado endurecido, que indica a probabilidade de 5% de erro. Quando a análise apresenta resultados estatisticamente diferentes, fez-se necessário utilizar o teste de Tukey para averiguar a disparidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Na análise da composição química, observa-se que 91,12% da composição do RVT é de sílica (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO), típicos do vidro sodo-cálcico conforme discorre Felisberto [38]. A composição química do RVT está expressa na Tabela 3, dada em óxidos.

Tabela 3. Análise da composição química do resíduo de vidro temperado em óxidos

Composição química do resíduo de vidro temperado (%)										
Elementos	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	P.F.
Teor (%)	68,87	0,03	0,65	0,76	3,93	8,93	13,32	0,14	0,23	≥ 0

É fundamental que se conheça a composição básica de um vidro [38]. De acordo com Felisberto [38] e Pokorny [39], as matérias-primas utilizadas para produção de vidros são agrupadas de acordo com suas funções, classificando-se em quatro grupos: Vitrificantes (SiO_2), fundentes (Na_2O , K_2O), estabilizantes (CaO , MgO , Al_2O_3) e outros componentes secundários. A matéria-prima básica (SiO_2) exerce função vitrificante, acompanhada de óxidos que aprimoram a qualidade do material, como na sua resistência mecânica, já que em sua maioria são óxidos fundentes, responsáveis pela vitrificação do vidro [40]. O vidro pode ser obtido a partir da sílica pura, o que resulta em um material distinto, porém requer altos custos no processo de fabricação, necessitando de fornos especiais que atinjam a temperatura de fusão da sílica de 1725 °C. Uma forma de baixar a temperatura e adicionar novas propriedades é acrescentar elementos químicos em sua formulação, como por exemplo o sódio e o cálcio que diminuem a temperatura da fusão viabilizando sua produção [39].

Na Fig.4 visualiza-se a análise termogravimétrica (TG) e termodiferencial (DTA) do RVT moído.

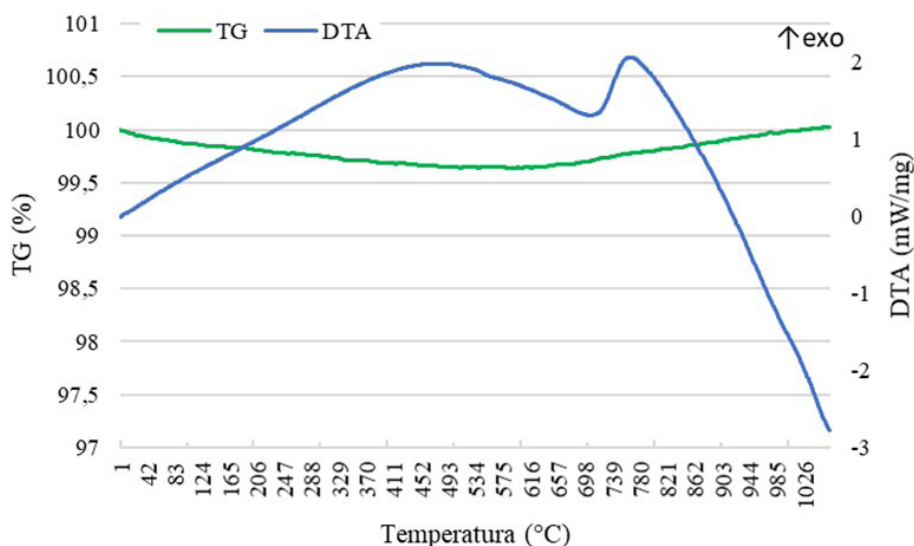


Figura 4. Análise termogravimétrica (TG) e termodiferencial (DTA)

A termogravimetria consiste em uma perda de massa da amostra, em função da temperatura a qual está sujeita. A partir desta foi possível verificar que a amostra do RVT não houve perda de massa, quando em comparação à temperatura ambiente de 35 °C e temperatura final de 1100 °C, no entanto passou por alterações de massa entre 400 °C à 800 °C. Os resultados da análise termodiferencial

mostram que o vidro apresenta transição vítrea à temperatura de 740 °C, aproximadamente, conforme pode-se visualizar na Fig.4 (banda endotérmica) [39]. Passados os 1000 °C inicia-se o processo de amolecimento do vidro. Esses pontos são importantes no processo de fabricação do vidro, relacionando às características da viscosidade em função da temperatura [38].

Os resultados obtidos da análise granulométrica para areia natural e resíduo de vidro temperado moído estão apresentados na Fig.5.

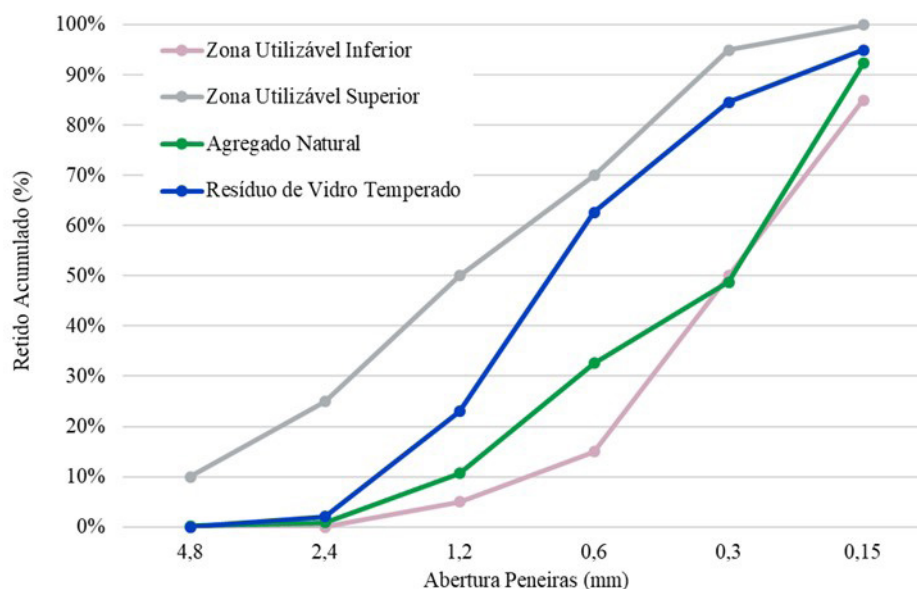


Figura 5. Análise granulométrica da areia natural e do resíduo de vidro temperado

Pela análise da Fig.5 percebe-se que a distribuição do tamanho de partículas de RVT e das partículas da areia natural oscila entre as zonas utilizáveis inferior e superior, ambas repassadas pela NBR 7211: 2022 [21]. No entanto, em comparação ao RVT, a curva mostra que o agregado natural apresenta menor percentual de partículas compreendidos entre as peneiras de abertura 0,6 e 0,3 mm. A norma ressalta a importância de a curva manter-se dentro da zona utilizável nas peneiras mais finas, o que se pode observar que ocorreu entre as peneiras 0,3 e 0,15 mm. O RVT moído apresentou melhor distribuição granulométrica quando comparado ao agregado natural utilizado, tendo em vista que sua composição se situa ao centro da zona utilizável. Conforme Ribeiro [41] "a análise granulométrica visa determinar a distribuição do tamanho de partículas de um determinado material. Essa informação é valiosa à medida que o tamanho das partículas impactará no empacotamento da mistura".

Os resultados da massa unitária, índice de vazios, massa específica, absorção de água, módulo de finura e o diâmetro máximo característico (DMC) estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização física dos agregados

Resultados	Areia natural	RVT
Massa unitária (kg/m ³)	1571,33	1344,24
Índice de vazios (%)	40,48	44,22
Massa específica (kg/m ³)	2640,00	2412,00
Absorção de água (%)	0,30	0,00
Módulo de finura	1,85	2,67
DMC (mm)	2,36	2,36

Segundo a Tabela 4 pode-se visualizar que o agregado de RVT tem menor massa específica que o agregado natural. De acordo com Neville [42], a massa específica típica das areias está entre 2600 e 2700 kg/m³ e segundo Azevedo [18] e Daminieli [43] para os vidros em geral é de 2500 kg/m³, valores próximos aos encontrados nessa pesquisa.

Verificou-se que a massa unitária do RVT é menor que a da areia natural, valor esse que pode ser justificado pelo maior índice de vazios entre as partículas no seu empacotamento e a menor massa específica dele. Já o maior volume de vazios pode estar ligado ao formato das partículas e à análise granulométrica. Conforme Neville [42], “a massa unitária depende do nível de compactação do agregado e, portanto, da granulometria e forma das partículas.” Ainda, segundo o mesmo autor, “a massa unitária depende da distribuição de dimensões das partículas do agregado.” Partículas de uma única dimensão podem ser compactadas até certo limite, mas partículas menores podem ser adicionadas aos vazios entre as maiores, aumentando assim a massa unitária. Portanto esses fatores são possíveis itens que podem justificar os resultados.

Para a determinação do índice de consistência da argamassa, verificou-se o espalhamento após a relação água/cimento ser fixada em 0,52, conforme os estudos de Ribeiro e Santos [29], Malek et al. [30] e Almeida [31]. A Tabela 5 apresenta os resultados do respectivo ensaio.

Tabela 5. Determinação do índice de consistência

Amostra	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão
ARVT0	228	228,5	225	227,17	1,893
ARVT15	240,5	243	240	241,17	1,607
ARVT30	241,5	240	243,5	241,67	1,756
ARVT45	247	245,5	245	245,83	1,041

Com o aumento na quantidade de RVT nas misturas, verificou-se um índice de consistência maior que o de referência, o que foi comprovado pela ANOVA e teste de Tukey tendo em vista que o F (76,85) foi maior que o F crítico (4,07) e o p menor que 0,05 ($p = 0,0000031$). Portanto o traço de referência apresentou diferença significativa quando comparado aos demais traços com inserção de RVT. Tal fato pode estar relacionado a menor porosidade do RVT em relação ao agregado natural, como já foi verificado no item absorção de água apresentado na Tabela 4. Devido ao RVT ser menos poroso tem-se mais água livre solta na mistura, em consequência gerando maior fluidez da argamassa. Outro item a ser elencado como atenuante do índice de consistência é a rugosidade da superfície do RVT em comparação à areia. Segundo Tittarelli et al. [44] a superfície do vidro mais lisa em comparação ao agregado natural permite uma melhor trabalhabilidade da mistura na mesma dosagem de água.

A Tabela 6 apresenta os resultados do percentual de retenção de água, densidade de massa das argamassas e o seu teor de ar incorporado.

Tabela 6. Resumo das propriedades das argamassas

Amostra	Retenção de água (%)	Densidade de massa (kg/cm^3)	Teor de ar incorporado (%)
ARVT0	95,82	2207,76	1,56
ARVT15	97,47	2168,94	2,56
ARVT30	95,91	2192,71	0,86
ARVT45	96,19	2184,47	0,55

De acordo com Kist e Martins [45] e Recena [46], a retenção de água é a capacidade da argamassa de reter água de amassamento, o que evita a sucção da base e evaporação. A retenção permite que a argamassa reaja gradualmente até que endureça, permitindo hidratação do cimento e ganho de resistência. Constata-se na NBR 13281: 2005 [6] a importância desses valores de retenção de água serem maiores que 95%. Todas as composições de argamassa com RVT, bem como o traço referência, atendem às indicações da normativa. O teor de ar incorporado é a quantidade de ar num volume de argamassa, à medida que o teor de ar cresce, maior será a quantidade de vazios e, por conseguinte menor será sua densidade de massa [47]. Desta forma constatou-se que para o ARVT15, que apresentou maior teor de ar incorporado, obteve-se a menor densidade de massa.

A Fig.6 apresenta os resultados da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.

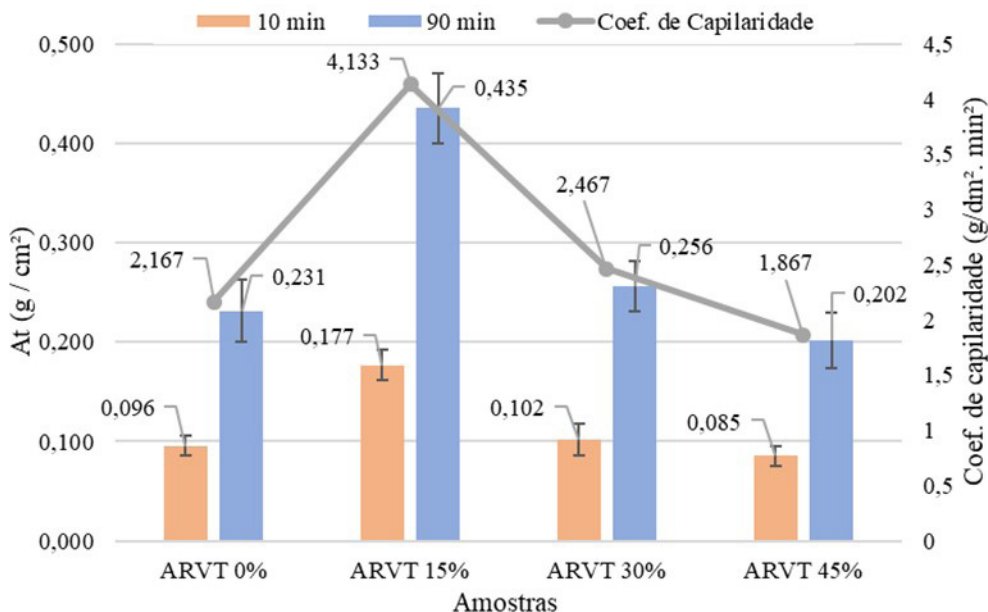


Figura 6. Determinação da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

Para os resultados obtidos, realizou-se a análise estatística por meio da ANOVA, tendo em consideração 95% de confiabilidade que o ARVT15 difere estatisticamente das demais misturas, com valor de $(p = 0,000092)$ para 10 minutos e $(p = 0,000053)$ para 90 minutos. Para ambos os tempos, e para o coeficiente de capilaridade $(p = 0,000055)$, verificou-se diferença estatística entre o ARVT15 e os outros traços. De acordo com Gauto et al. [48], a porosidade é controlada pelos seguintes fatores: formato das partículas, seleção ou heterogeneidade partícula a partícula e seu arranjo, isto é, o empacotamento entre as partículas. Como visto, o ARVT15 foi o que apresentou menor densidade de massa e maior incorporação de ar, já indicando que ele teria maior permeabilidade. Segundo Mehta e Monteiro [49], o tamanho, o volume e a continuidade dos poros em uma estrutura sólida determinam sua porosidade, determinando assim sua permeabilidade e absorção, ou seja, a quantidade de água que pode entrar nos poros permeáveis.

A Fig.7 apresenta o ensaio mencionado, sendo as amostras de todos os traços transcorridos 90 minutos. A Fig.7(a) corresponde às amostras do traço referência ARVT0, a Fig.7(b) amostras do traço ARVT15, Fig.7(c) amostras do traço ARVT30 e Fig.7(d) amostras do traço ARVT45.

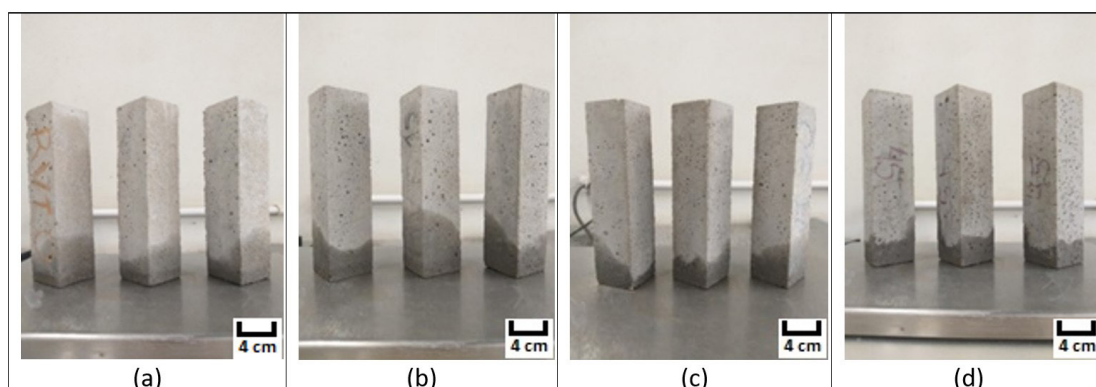


Figura 7. Determinação da absorção de água e do coeficiente de capilaridade com amostras após 90 minutos: (a) amostras ARVT0 (b) amostras ARVT15 (c) amostras ARVT30 (d) amostras ARVT45

Visualmente, conforme mostra a Fig.7, pode-se verificar pelas imagens que evidenciam os resultados obtidos no referido ensaio, onde ARVT15 são as amostras que mais absorveram água.

A Fig.8 apresenta os resultados obtidos nas propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão, compressão e módulo de elasticidade das argamassas.

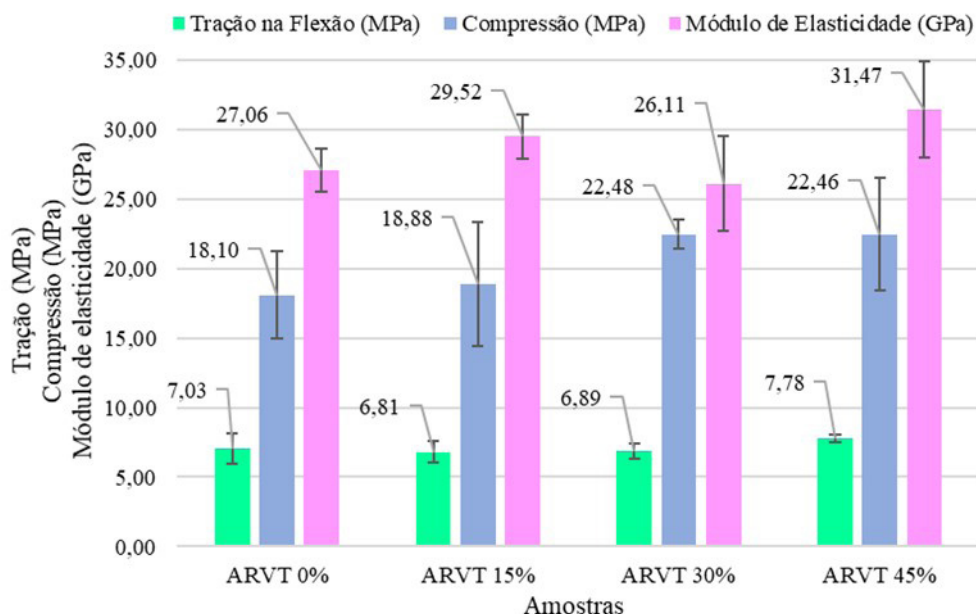


Figura 8. Propriedades mecânica das argamassas

Analisou-se os resultados obtidos para os três testes por análise de variância ANOVA de fator único, e foi constatado que as amostras não apresentam diferenças significativas entre os grupos de misturas nos resultados de tração na flexão ($p = 0,405$), compressão axial ($p = 0,0712$) e módulo de elasticidade estático ($p = 0,0709$).

Para Daminieli [43], a porosidade é uma propriedade física inversamente proporcional à resistência mecânica e durabilidade do material, podendo ser determinada por medidas físicas de absorção e massa específica aparente. Portanto, é determinado que quanto maior a porosidade, menor a densidade e maior a quantidade de vazios. Resultados esses que não estão sendo refletidos nas propriedades mecânicas em relação ao ARVT15. Tal fato pode estar relacionado à possibilidade de poros pequenos e com boa distribuição, que resultam em maior capilaridade; no entanto, não refletem na resistência da argamassa, o oposto aconteceria caso se tratasse de poros maiores e com maior conectividade. Rato [50], relata que a absorção de água por capilaridade depende de três aspectos como a dimensão, forma e a conectividade dos poros, sendo que quanto menor for a porosidade, maior serão as forças capilares.

Esses valores são coerentes com base nas características físicas obtidas entre o agregado natural e o RVT, tais como composição granulométrica, massa específica entre outros itens similares. As propriedades mecânicas de um material de matriz cimentícia estão relacionados pelos seguintes fatores: Relação água/cimento; a relação entre cimento e agregado; a granulometria, textura superficial, formato, resistência e rigidez dos agregados e sua dimensão máxima característica [51]. Desta forma, os resultados de tração na flexão, compressão axial e módulo de elasticidade estático apresentam efeitos promissores. Tanto Malek et al. [30] quanto Trentin et al. [27], obtiveram aumento significativo nas propriedades mecânicas das argamassas com substituição do agregado natural por vidro. Tais índices verificados foram os que possuíam maior percentagem por eles abordada, 20% e 50% respectivamente.

4. CONCLUSÕES:

Diante dos resultados obtidos, pode-se constatar que o RVT em comparação com a areia utilizada, possui menor massa unitária, o que se justifica pelo maior índice de vazios entre suas partículas no empacotamento decorrente do seu formato, análise granulométrica e sua menor massa específica.

Em relação ao índice de consistência, observou-se um aumento na fluidez à medida que se elevou o teor de RVT na mistura. O que pode ser comprovado pela ANOVA e teste de Tukey, de que o ARVT0 apresentou diferença significativa quando comparado aos traços com inserção do resíduo. Tal fato pode estar atrelado a menor porosidade e à rugosidade do RVT. Todas as misturas com RVT apresentaram retenção de água acima de 95%, valor que atende às prerrogativas da NBR 13281: 2005.

Quanto à absorção de água por capilaridade, o ARVT15 apresentou estatisticamente disparidade com os demais traços. Como visto, o ARVT15 foi o que apresentou menor densidade de massa e maior incorporação de ar, já indicando que ele teria maior permeabilidade.

O método estatístico adotado mostrou que não houve influência significativa na substituição do agregado natural por RVT nas propriedades mecânicas. Para os ensaios de tração na flexão, compressão axial e módulo de elasticidade, os traços com 15, 30 e 45% de inserção por vidro, são estatisticamente similares ao ARVT0.

Os dados apresentados neste artigo mostram que existe um potencial promissor para a utilização de vidros em argamassas, portanto é interessante continuar os estudos para a substituição do agregado natural pelo RVT. O estudo sugere para trabalhos futuros que sejam analisadas outras variáveis, com diversificados teores de substituição do RVT, o tamanho e formato dessas partículas, outras faixas granulométricas do agregado convencional. Testes com outros tipos de cimento e vidro, ensaiados em idades de diferentes tempos de cura. Análise das propriedades mecânicas da argamassa com submissão à altas temperaturas.

REFERÊNCIAS

- [1] Martinho P A G, 2017. Análise do comportamento de argamassas com a incorporação de pellets de madeira. Lisboa: Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Lisboa.
- [2] Pires J M R, 2018. Estudo comparativo da utilização do vidro temperado triturado na fabricação do concreto convencional. Maringá, PR: Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas Tecnológicas e Agrárias, UNICESUMAR.
- [3] Simões L J, 2013. Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto. Vitória, ES: Curso de Engenharia Civil, Construção Civil, Universidade Federal do Espírito Santo.
- [4] Lucas D, Benatti C T, 2008. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. Revista em agronegócio e meio ambiente 1, 3, 405-418.
- [5] Oliveira L T, Silva J B, Ide C N, 2007. Avaliação das propriedades físicas de corpos de prova moldados com a adição de lodo de reciclo de cromo. Congresso Brasileiro de Cerâmica.
- [6] NBR 13281, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [7] Antunes E G P, 2019. Avaliação dos efeitos da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos inteiros. Florianópolis: Curso de Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [8] Bauer L A F, 2000. Materiais de construção. v.1, 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC.
- [9] Coelho J F M, 2019. Análise do ciclo de vida de argamassa com resíduos de madeira. Lisboa: Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Lisboa.
- [10] Fávero R B, 2009. Avaliação da utilização de sucata de vidro como adição mineral frente à sílica ativa e como agregado miúdo artificial na produção de materiais à base de cimento. Porto Alegre: Curso de Engenharia Civil, UFRGS.
- [11] Ling T C, Poon C S, 2014. Feasible use of large volumes of GGBS in 100% recycled glass architectural mortar. Cement and Concrete Composites 53, 350-356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.05.012>
- [12] Ling T C, Poon C S, Wong H W, 2013. Management and recycling of waste glass in concrete products: current situations in Hong Kong. Resources, Conservation and Recycling 70, 25-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.10.006>
- [13] Shi C, Zheng K, 2007. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources, Conservation and Recycling 52, 2, 234-247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>
- [14] Zhang B, He P, Poon, C S, 2020. Improving the high temperature mechanical properties of alkali activated cement (AAC) mortars using recycled glass as aggregates. Cement and Concrete Composites 112, 103654. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103654>
- [15] ABIVIDRO, 2021. Vidro: O resíduo infinitamente reciclável. Associação Brasileira das Indústrias de Vidro. <https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/>
- [16] NBR NM 293, 2004. Terminologia de vidros planos e dos componentes acessórios a sua aplicação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] NBR 14698, 2001. Vidro temperado. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] Azevedo E A M, 2015. Revestimento decorativo monocamada pigmentado, com resíduo de vidro temperado, para aplicação em fachadas. Natal, RN: Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRN.

- [19] Pereira AH, 2016. Avaliação da utilização de vidro comum como pozolana e avaliação da utilização de sucata de vidro temperado como agregado graúdo em concretos. Campo Mourão, PR: Curso de Engenharia Civil, UTFPR.
- [20] Silva J G S, 2015. Produção de concreto cimentício com agregado de resíduos de vidro plano temperado. Campina Grande, PB: Curso de Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG.
- [21] NBR 7211, 2022. Agregados para concreto. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [22] NBR 17054, 2022. Agregados. Determinação da composição granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [23] NBR 16972, 2021. Agregados. Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [24] NBR 16916, 2021. Agregado miúdo. Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [25] NBR 16697, 2018. Cimento Portland. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [26] NBR 15900-11, 2009. Água para amassamento do concreto. Parte 11: Análise química. Determinação de açúcar solúvel em água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [27] Trentin P O, Manica J, Vanzetto S C, Marangoni B, Zaleski A, 2020. Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. *Matéria* 25, 1, e-12576. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0903>
- [28] NBR 7215, 2019. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [29] Ribeiro U G, Santos, D F, 2020. Physical-mechanical potential properties of wastes from glass lapping to produce mortar as partial replacement of the conventional aggregate. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais* 13, 1, 142-159. <http://dx.doi.org/10.1590/souzas1983-41952020000100010>
- [30] Malek M, Lasica W, Jackowski M, Kadela M, 2020. Effect of waste glass addition as a replacement for fine aggregate on properties of mortar. *Materials* 13, 14, 3189. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13143189>
- [31] Almeida G V B, 2018. Caracterização tecnológica de argamassas fabricadas com pó de vidro moído na sua constituição tendo como referência a norma técnica ABNT NBR 7215/1996. Belo Horizonte: Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- [32] NBR 13276, 2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [33] NBR 13277, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [34] NBR 13278, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [35] NBR 13279, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [36] NBR 15259, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [37] NBR 8522, 2021. Concreto endurecido. Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [38] Felisberto R, 2018. Obtenção de vitrocerâmicos a partir de lodo galvânico e vidro sodo-cálcico com caracterização de sua compatibilidade ambiental: Imobilização de contaminantes metálicos e controle das emissões gasosas durante a queima. Porto Alegre: Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS.
- [39] Pokorny A, 2006. Obtenção e caracterização de espumas vítreas a partir de resíduos de vidro sodo-cálcico e calcário dolomítico como agente espumante. Porto Alegre: Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS.
- [40] Vieira C M F, Morais A S C, Monteiro S N, Delaqua G C G, 2016. Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente. *Cerâmica* 62, 364, 376-385. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623642035>
- [41] Ribeiro D V, 2021. Princípios da ciência dos materiais cimentícios: Produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos. Curitiba: Appris.
- [42] Neville A M, 2013. Tecnologia do concreto. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman.
- [43] Daminieli B L, 2007. Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. São Paulo: Curso de Engenharia, Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [44] Tittarelli F, Giosuè C, Mobili A, 2018. Recycled glass as aggregate for architectural mortars. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 12, 1-11. <http://dx.doi.org/10.1186/s40069-018-0290-3>
- [45] Kist L, Martins D S, 2020. Verificação de falha de aderência na interface argamassa e bloco em fachadas através da termografia. Rio de Janeiro: Autografia.
- [46] Recena F A P, 2011. Conhecendo argamassa. 2ª ed. Porto Alegre: Edipucrs.
- [47] Senai, 2013. Mestre de obras. 3ª ed. São Paulo: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial.
- [48] Gauto M A, Apoluceno D M, Amaral M C, Auríquio P C, 2016. Petróleo e gás: Princípios de exploração, produção e refino. Porto Alegre: Bookman.
- [49] Mehta P K, Monteiro P J M, 1994. Concreto: Estrutura, propriedade e materiais. São Paulo: Pini.
- [50] Rato V N P M, 2006. Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. Lisboa: Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- [51] Neville A M, 2015. Propriedades do concreto. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman.