



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

CAMPUS PALMAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAFAEL REBELO SIMÕES NOBRE

**OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS
EMPACOTADAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE PÓ DE VIDRO**

PALMAS

2023

RAFAEL REBELO SIMÕES NOBRE

**OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSAS EMPACOTADAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL
DE PÓ DE VIDRO**

Artigo científico apresentado como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil do Instituto
Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Dr. Adriano dos Guimarães
de Carvalho

PALMAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

N754o Nobre, Rafael Rebelo Simões
OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSAS EMPACOTADAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
PÓ DE VIDRO / Rafael Rebelo Simões Nobre. – Palmas, TO, 2023.
22 f. : il. color.

Artigo (Especialização em Engenharia Civil) – Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO,
2023.

Orientador: Dr. Adriano Dos Guimarães de Carvalho

1. Empacotamento. 2. Argamassa. 3. Pó de Vidro. I. Carvalho, Adriano
Dos Guimarães de. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e
pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a).

RAFAEL REBELO SIMÕES NOBRE

**OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS
EMPACOTADAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE PÓ DE VIDRO**

Artigo científico apresentado como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil do Instituto Federal do
Tocantins, Campus Palmas.

Aprovado em: ____ / ____ / ____.

BANCA AVALIADORA

Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho
Orientador

Dr. Gilson Marafiga Pedroso

Dr. Thiago Dias de Araújo e Silva

Dr. Antônio Rafael de Souza Bôso

OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS EMPACOTADAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE PÓ DE VIDRO

Rafael Rebelo Simões Nobre¹

Adriano dos Guimarães de Carvalho²

RESUMO

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo avaliar a influência do empacotamento das partículas granulares de materiais finos (agregado miúdo e pó de vidro), do teor de pó vidro e de água, nas propriedades de argamassas de reboco elaboradas com cimento Portland. Foram avaliadas características relativas aos materiais utilizados, além de propriedades no estado fresco e endurecido com substituição de areia natural por pó de vidro nas proporções entre 12 e 30%, e também relação água/cimento entre 0,6 a 1,0. A otimização dos experimentos ocorreu a partir da teoria vinculada ao Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR com a utilização do programa *Protimiza Experimental Design*[®]. Neste sentido foi realizado um estudo comparativo de argamassas com traço 1:6, sendo o primeiro um traço piloto com cimento, areia média e aditivo, e os demais com substituição parcial de areia por vidro moído, variando-se também a quantidade de água. Em todas as misturas aplicou-se a metodologia que emprega modelos computacionais de empacotamentos de partículas (*Elkem Materials Mixture Analyser - EMMA*[®]). As análises permitiram verificar a influência destes diversos fatores, nas características da argamassa no seu estado fresco e também no endurecido. Os resultados indicaram que a otimização dos grãos contribui de forma bastante positiva para misturas mais homogêneas, pois todas possuem certa isotropia (compressão e a tração na flexão). Observou-se materiais cimentícios com melhor performance, possibilitando menor consumo de aglomerante e mais sustentáveis pela inserção de um resíduo que, em nossa região, não é reciclado/reutilizado.

Palavras-chaves (03): Empacotamento. Argamassa. Desempenho. Pó de Vidro.

Área do conhecimento: 3.00.00.00-9 ENGENHARIA – 3.01.01.01-8 Materiais e Componentes de Construção.

ABSTRACT

The aim of this research project is to evaluate the influence of the packing of the granular particles of fine materials (fine aggregate and glass powder), the content of glass powder and water on the properties of Portland cement-based plaster mortars. Characteristics relating to the materials used were evaluated, as well as properties in the fresh and hardened state with the replacement of natural sand with glass powder in proportions between 12 and 30%, and also a water/cement ratio between 0.6 and 1.0. The experiments were optimized using the theory linked to the Rotational Central Composite Design - RCCD, using the *Protimiza Experimental Design*[®] program. A comparative study was carried out of mortars with a 1:6 mix, the first being a pilot mix with cement, medium sand and additive, and the others with partial substitution of sand with ground glass, also varying the amount of water. For all the mixtures, the methodology that uses computational particle packing models (*Elkem Materials Mixture Analyser - EMMA*[®]) was applied. The analyses made it possible to verify the influence of these various factors on the characteristics of the mortar in its fresh and hardened state. The results indicated that grain optimization makes a very positive contribution to more homogeneous mixtures, since they all have a certain isotropy (compression and flexural tensile strength). Cementitious materials with better performance were observed, making it possible to consume less binder and to make them more sustainable by using a waste product that is not recycled/reused in our region.

Keywords (03): Packing. Mortar. Performance. Glass powder.

Field of expertise: 3.00.00.00-9 ENGINEERING - 3.01.01.01-8 Construction Materials and Components.

¹ Formando em Bacharelado em Engenharia Civil pelo Campus Palmas do IFTO

² Prof^o Dr. do Colegiado do Curso de Engenharia Civil pelo Campus Palmas do IFTO

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da tecnologia tem possibilitado a produção de uma série de produtos industrializados, e em contrapartida, tem também intensificado o consumo de recursos minerais finitos. Associado a essa grande expansão produtiva, tem-se um acréscimo expressivo na quantidade de resíduos produzidos, fazendo com que milhões de toneladas destes detritos sejam gerados a cada dia em todo mundo, incluindo aí sobras de construções. A estimativa da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição – ABRECON, no Brasil são produzidos cerca de 520 kg de resíduo por habitante por ano.

Visando mitigar este problema, tem-se pesquisado soluções mais sustentáveis, buscando uma melhor destinação dos resíduos industriais, em vez de descartá-los simplesmente na natureza (lixões e aterros). Várias empresas têm implantado em seus sistemas de gestão, processos que visem minimizar a geração de rejeitos. Um dos grandes motivos dessa preocupação, está atrelado à cobrança da sociedade por atitudes mais sustentáveis aos diversos processos industriais, inclusive na construção civil.

John (2000) apresenta em seus estudos os benefícios da reciclagem, dentre os quais cita-se a redução do consumo de recursos naturais não renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados, minimização do consumo de energia para o processo de produção, e redução da poluição ao emitir menor quantidade de gás carbônico a partir da diminuição do uso do cimento Portland, dentre outros.

Geralmente, as argamassas são compostas por cal, agregado miúdo (por exemplo, areia natural), cimento Portland, podendo utilizar aditivos ou adições. Hoje, diversos materiais podem ser misturados para obter uma mistura com propriedades que atendam às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas

– ABNT. Dentre algumas possibilidades, tem-se aditivos minerais, como cal, filito, sílica, polímeros, e aditivos químicos, como plastificantes, impermeabilizantes, retardadores e aceleradores de pega. Cada um fornece propriedades únicas ao material.

Na última década, estudos têm sido realizados no contexto da substituição parcial de materiais convencionais, por resíduos gerados em diversas indústrias. Na produção de argamassa, observou-se pesquisas visando demonstrar a viabilidade de substituição de finos naturais (areia de rio) por vidro triturado/moído (OLIVEIRA *et al.*, 2012; SANTOS, 2016; OLIVEIRA, 2018), propiciando uma ótima possibilidade de destinação para o refugo de vidro.

Existem alguns desafios para se produzir argamassas com este resíduo, visto que o emprego de materiais muito finos leva a uma maior demanda de água (maior superfície específica), e por consequência uma redução das resistências e aumento da quantidade de poros. Entretanto, outros materiais suplementares, como plastificantes, podem ajudar a contornar alguns destes inconvenientes, permitindo a produção de argamassas com baixos fatores água/cimento.

Uma possibilidade de se conseguir misturas cimentícias argamassadas com resíduos, atendendo aos requisitos de performance exigida pelas normas da ABNT, poderia estar vinculado à utilização da teoria de empacotamento de partículas, o que possibilitaria, em algumas situações, também um menor consumo de cimento Portland. Isso possibilitaria, além de um produto mais sustentável, também uma redução no efeito clínquer (menor produção de gases de efeito estufa), na produção de materiais cimentícios.

Desta forma, este trabalho empregou o modelo de empacotamento desenvolvido por Alfred (CASTRO, *et al.*, 2009), aliado ao programa de modelagem *Elkem Materials Mixture Analyser (EMMA®)*, de forma a possibilitar encontrar as frações de agregado miúdo que levaram a uma melhor compacidade. Posteriormente, as frações de agregado miúdo foram substituídas por vidro moído (nas mesmas frações de tamanho de grão). Isso possibilitou a produção de argamassas que atendam as demandas de performance e sustentabilidade, para o mercado da construção civil de Palmas, TO.

Mas uma dúvida ainda persistia. Qual a quantidade de vidro e teor de água poderiam levar a misturas cimentícias adequadas ao uso na construção civil? Neste sentido, estas foram as variáveis chaves deste estudo (fator água/cimento – A/C e teor de vidro). O objetivo então foi encontrar a mistura ótima, considerando os materiais empregados, que levasse a resultados de performance adequados. O processo de otimização foi realizado a partir da teoria do Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR. Os resultados experimentais encontrados foram consolidados no programa *Protimiza Experimental Design®* e a partir daí, avaliados de forma a se obter o “traço ótimo” (em relação à resistência à compressão e tração na flexão).

2. REVISÃO TEÓRICA

Segundo Carasek (2007) argamassas de cimento Portland são muito empregadas na construção civil, tendo aplicações no assentamento de alvenarias, revestimento de paredes, muros e tetos (reboco), além de contra piso e rejuntas de revestimento de cerâmica e pedra.

Conforme a NBR 11.172 (ABNT, 1990) argamassas são uma mistura íntima e homogênea de um ou mais aglomerantes minerais, agregado miúdo, água e ocasionalmente, aditivos, em proporções adequadas a uma determinada finalidade, capacidade de endurecimento e aderência. Quanto a argamassa de revestimento de painel de alvenaria (reboco), na qual foi pesquisado neste estudo, sua principal função é a proteção da parede contra a ação do intemperismo e integrar o sistema de vedação da estrutura.

Isaia (2007) acrescenta que a argamassa de reboco pode ser executada de diferentes maneiras, e também ser composta por várias camadas, sendo as mais usuais aquelas compostas por:

O chapisco – uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento escolhido.

O emboço – cobrir, uniformizar e regularizar a base, possibilitando uma superfície que possa receber outra camada (reboco) ou até mesmo um revestimento cerâmico.

O reboco – cobrimento do emboço. Parecida com o emboço, todavia proporciona uma superfície que permite receber um revestimento decorativo do tipo pintura, constituindo-se como acabamento finalizado.

Camada única – composta por um único tipo de argamassa na qual é aplicado à base (chapisco).

Após sua cura é aplicada a camada decorativa (pintura).

As argamassas de revestimento devem possuir propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido, consideradas importantes para se garantir um bom desempenho ao longo de sua vida. Dentre algumas pode-se elencar: trabalhabilidade, consistência, plasticidade, adesão inicial, retração, aderência, permeabilidade à água, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações.

Quanto ao resíduo a ser empregado neste estudo, de acordo com Ferrari e Jorge (2010), em sua forma pura, o vidro é caracterizado como um óxido metálico super-resfriado, transparente, elevada dureza, ou seja, que não sofre alterações com o passar do tempo, além de ser também biologicamente inativo, material impermeável que pode suportar pressões de 5.800 a 10.800 Kg/cm².

Trata-se de uma substância inorgânica, homogênea e amorfa, granular (quando triturada), sem forma ou volume definido, de atividade química geralmente inerte (AMBROZEWICZ, 2013). Vale ressaltar que este material, quando descartado em lixões ou aterros sanitários, apresenta um tempo de decomposição de cerca de 1000 anos. Desta forma,

a sua utilização como material de substituição de agregados, em produtos cimentícios, pode contribuir significativamente para se proporcionar uma solução mais sustentável para o mesmo.

A teoria de empacotamento de partículas pode ser resumida como a melhor escolha para porções de materiais de diferentes tamanhos de partículas. Assim, do ponto de vista teórico, é possível obter um material em que grandes vazios sejam preenchidos com pequenas partículas até que não haja mais vazios a serem preenchidos (teoricamente, até que os vazios desapareçam completamente).

Estudos relativos a modelos de empacotamento de partículas remontam a 1892 com Féret, Andreassen e Andersen (1930) e Furnas (1931) (AIQIN *et al.*, 1997; AIQIN *et al.*, 1999; DE LARRARD e SEDRAN, 1994).

Os trabalhos de pesquisa sobre empacotamento realizados por Alfred (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009), apresentaram uma evolução nos métodos de análise de partículas empacotadas, permitindo a sua aplicação a partir de modelos computacionais mais eficientes. Alfred introduziu na modelagem, o conceito do tamanho mínimo da partícula finita, sendo o mesmo incorporado à equação de Andreassen, e também propõe uma atualização matemática da equação de distribuição do modelo desenvolvido por Furnas.

$$CPFT = \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \times 100$$

Sendo: *CPFT* a porcentagem acumulada de partículas cujo diâmetro é inferior a *D_p*; *D_p* é o diâmetro da partícula; *D_L* é o diâmetro da maior partícula na distribuição; *D_s* é o diâmetro da menor partícula na distribuição; *q* é uma constante chamada de módulo da distribuição granulométrica.

Estudos desenvolvidos por Castro e Pandolfelli (2009) realizados a partir de simulações computacionais, indicaram que valores para o módulo de distribuição granulométrica (*q*), inferiores ou iguais a 0,37, podem beneficiar a obtenção do empacotamento máximo para distribuições infinitas. Todavia, para valores acima de 0,37, sempre se observa a existência de uma porosidade residual.

Assim, para se obter uma redução no coeficiente de distribuição, deve-se estimular o aumento da proporção de finos na mistura, afetando mais a interação entre as partículas. Embora se conheça a importância da forma das partículas na teoria do empacotamento, a predição deste princípio (forma da partícula) é difícil de ser implementada, não estando

presente na fundamentação matemática na maioria dos modelos de empacotamento desenvolvidos.

Em misturas de materiais finos, pode-se observar dois efeitos opostos. No primeiro, as partículas de materiais finos preenchem os espaços vazios existentes entre os grãos maiores, atuando assim para aumentar a densidade de empacotamento da mistura. No segundo, a existência de uma grande quantidade de material fino, promove um acréscimo da área superficial do agregado. O aumento da densidade de empacotamento, implica num aumento do volume de excesso de pasta para envolver os agregados maiores (os vazios irão se reduzir). Também o aumento da área superficial, promoveria uma redução na espessura da película de pasta em torno do agregado. Neste sentido, o teor ideal de finos, deve ser tal que a densidade de empacotamento seja aumentada para um valor próximo do máximo, entretanto, esse aumento deve ser tal que a área superficial não seja aumentada excessivamente (KWAN, *et al.*, 2014).

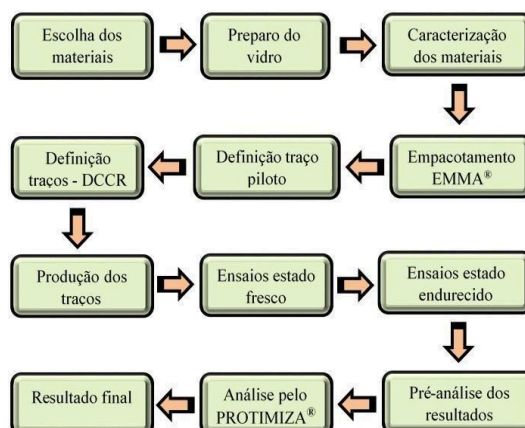
Considerando a aplicação dos métodos que busquem um melhor empacotamento de partículas, aplicados à elaboração de produtos à base de cimento Portland, pode-se dizer que tais materiais possuem propriedades mecânicas aperfeiçoadas, quando comparadas a outros que não utilizam esta teoria.

3. METODOLOGIA

A pesquisa desenvolvida utilizou-se do método experimental exploratório, pois teve o objetivo de avaliar a influência da teoria do empacotamento (*EMMA*®), teor de substituição de vidro e de água em misturas de argamassa, unindo-se também ao DCCR de forma a se otimizar os resultados de resistência à compressão e tração na flexão.

De forma geral, os trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos segundo o fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da pesquisa



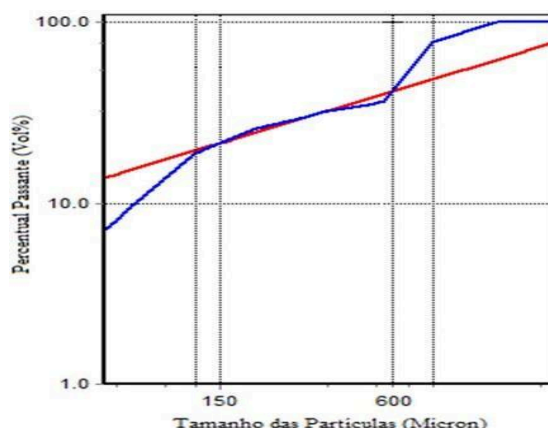
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.1 Planejamento Experimental

Os materiais utilizados neste trabalho de pesquisa foram o cimento Portland CP II – F 40 da marca Goiás, areia natural de rio nas frações 600 μm , 300 μm , 150 μm e passante na 150 μm , vidro moído nas frações 600 μm , 300 μm , 150 μm e passante na 150 μm (vidro obtido a partir da moagem de garrafas em moinho de bolas Contenco), aditivo Vedalit® e água. As frações de material granular (areia e vidro) foram separadas utilizando-se peneiras granulométricas conforme NM 3310 - 1 (ABNT, 2010).

O traço piloto utilizado no experimento foi de 1:6 (cimento:areia), A/C de 0,9, Vedalit® (teor recomendado pelo fabricante). Vale ressaltar que no piloto já foi realizado o empacotamento das partículas por meio da modelagem com o *EMMA*®. A curva de empacotamento encontrada, considerando a faixa de partículas utilizadas (600 μm a passante na 150 μm) é apresentada na Gráfico 1. O módulo de distribuição granulométrico (q) utilizado no programa foi de 0,35.

Gráfico 1 – Curva de empacotamento do traço piloto



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A otimização dos resultados mecânicos, considerando o DCCR utilizado, foi realizada a partir do programa *Protimiza Experimental Design*[®]. Desta forma, foi possível se avaliar a interação das variáveis consideradas, obtendo-se a mistura argamassada que proporcionasse a melhor performance. Visando assim, obter um grupo de procedimentos estatísticos que procuram verificar e evidenciar as inter-relações das variáveis estudadas. Esses grupos englobam as diversas combinações mínimas necessárias, para explorar todo o espaço experimental para a obtenção de resultados em dados práticos. Com isto, conseguimos de forma consistente avaliar os impactos de mais variáveis simultaneamente. E no presente trabalho, iremos avaliar as variações de relação água/cimento e % de substituição de vidro.

A ordem de confecção das misturas argamassadas foi definida a partir de sorteio, resultando na seguinte sequência: 9, 3, 8, 1, 10, 6, 2, 5, 11, 7 e 4. Os traços, logo após sua elaboração foram então submetidos ao ensaio de consistência conforme NBR 13.276 (ABNT, 2016), moldados e submetidos à cura úmida por vinte e oito dias. Após este prazo realizou-se ensaios de resistência à compressão “ y_1 ” e a tração na flexão “ y_2 ” (respostas experimentais). A moldagem e os ensaios mecânicos seguiram os critérios da NBR

13.279 (ABNT, 2005).

As demais misturas cimentícias, considerando as variações no teor de vidro “ x_1 ” e de água “ x_2 ” (variáveis dependentes), foram obtidas a partir do DCCR conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Misturas avaliadas no experimento (DCCR)

Tipo de ensaio	Nº Ensaio	Substituição Vidro (%)	Relação água/ cimento
Pontos Fatoriais	1	14,617	0,658
	2	27,383	0,658
	3	14,617	0,942
	4	27,383	0,942
Pontos Centrais	5	12	0,800
	6	30	0,800
	7	21	0,600
Pontos Axiais	8	21	1
	9	21	0,800
	10	21	0,800
	11	21	0,800

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.2 Análise dos Dados

Devido à quantidade de tratamentos e ensaios que serão realizados nesta pesquisa, foi aplicada análise de variância, por meio do modelo ANOVA (*Analysis of Variance*). A partir da significância dos fatores estudados, buscou-se elaborar dois modelos estatísticos (regressões) que representam os resultados experimentais (resistência à compressão e tração na flexão).

A ANOVA é um método estatístico que permite se fazer comparações simultâneas entre duas ou mais médias, na qual as variáveis estejam sob análise de uma distribuição normal, desta forma é possível testar hipóteses sobre médias de distintas populações.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização dos materiais

O aglomerante Portland CP II – F 40 possuía massa específica de 3,0g/cm³ e 6% de massa retida na peneira #200 (INTERCEMENT, 2022). O aditivo químico (plastificante) foi

o Vedalit (Marca Vedacit), com densidade de $1,03 \text{ g/cm}^3$, tendo como base em sua composição o resinato de sódio, recomendado 10ml por 50kg de cimento (VEDACIT, 2022).

As características encontradas para massa específica, segundo a NBR 16.916 (ABNT, 2021), das frações do agregado miúdo de areia natural de rio e vidro moído são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa específica dos agregados miúdos

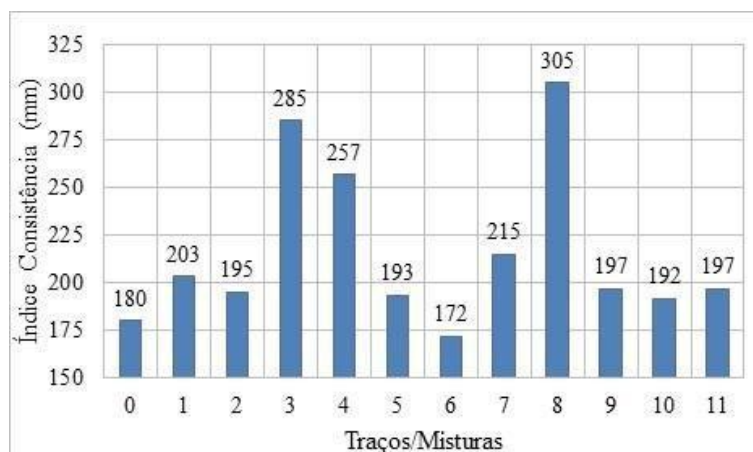
Fração	Massa Específica (g/cm^3)	
	Areia natural	Vidro moído
600 μm	2,625	2,475
300 μm	2,614	2,513
150 μm	2,628	2,497
Passante 150 μm	2,628	2,545

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2 Características no Estado Fresco

Quanto às misturas cimentícias em seu estado fresco, foi importante verificar seu comportamento em relação a consistência. Esta propriedade tem forte relação com a trabalhabilidade, visto que, ao ser lançada na parede, a argamassa precisa ser distribuída com facilidade, apresentar boa aderência, dentre outras características desejáveis. Desta forma realizou-se ensaios para a determinação do índice de consistência conforme NBR 13.276 (ABNT, 2016), cujos resultados são apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Índice de consistências das misturas



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em relação ao traço piloto (traço 0), observa-se que a adição do pó de vidro melhora a consistência. Entretanto, existe um limite para a adição de pó de vidro, ou seja, se for acrescido muito vidro, observa-se uma redução na consistência, como verificado no traço 6. Isto pode estar relacionado a uma maior necessidade de água para a mistura. Os traços 9, 10 e 11, por se tratarem de misturas com a mesma composição, precisam demonstrar resultados similares de consistência (exigência do DCCR).

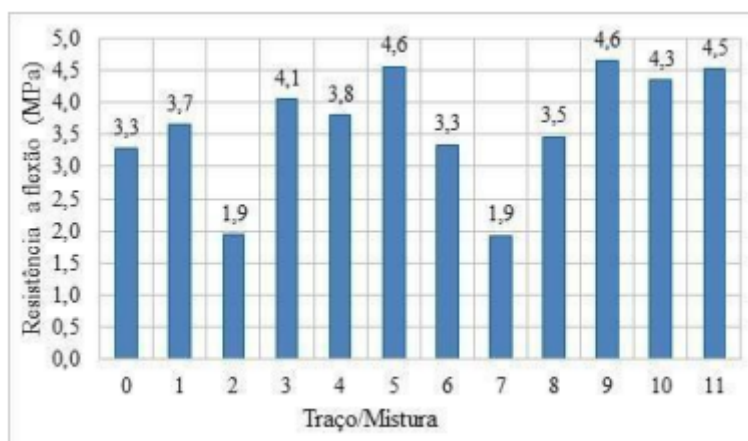
Os traços 8, 3 e 4 são os que apresentaram maiores consistências, respectivamente. As misturas 3 e 4 possuem a mesma quantidade de água, entretanto, o segundo possui uma redução de cerca de 9,8% na consistência, devido à maior presença do pó de vidro na sua composição, demonstrando uma relação direta entre vidro e água (mais vidro, maior necessidade de água).

4.3 Características no Estado Endurecido

Após vinte e oito dias de cura úmida, as amostras de argamassa endurecida foram submetidas a ensaios mecânicos (tração na flexão e compressão), conforme a NBR 13.279 (ABNT, 2005).

Os resultados de tração na flexão e compressão são apresentados nos Gráficos 3 e 4, respectivamente, a seguir:

Gráfico 3 – Resultados de tração na flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 4 – Resultados de compressão



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Observa-se que os comportamentos das resistências mecânicas, tanto de tração na flexão, quanto de compressão, apresentam distribuição dos resultados muito similares (material com certa isotropia). Os traços 2 e 7 obtiveram redução nas resistências mecânicas, motivado por alto teor de substituição de vidro e uma baixa relação água/cimento. Isto seria indicativo que para estas misturas, a quantidade de água utilizada não foi suficiente para que houvesse a hidratação de todos os grãos de cimento Portland, implicando em materiais mais porosos e com maior fragilidade.

Os demais traços possuem, em suas respectivas misturas, fatores água/cimento superiores aos traços 2 e 7. Por sua vez, os traços 7, 8, 9, 10 e 11 possuem as mesmas quantidades de materiais (exceto relação água/cimento). Dentre estas misturas, o traço 7 possui menor quantidade de água, o que resultou em menores resistências mecânicas, quando comparada aos demais (traços 8, 9, 10 e 11). Tal fato está relacionado aos teores de vidro e de água na mistura. Considerando as quantidades de materiais utilizados para estes traços, parece existir um limiar do fator água/cimento (A/C) entre 0,6 e 1,0, na qual produz um resultado ótimo para os ensaios mecânicos. Desta forma, observa-se que A/C um pouco abaixo ou acima de 0,8 implicaram em resistências à tração na flexão e compressão menores.

Se for analisado o traço 9 (maior resultado de compressão) pode-se dizer que a argamassa resultante possui enquadramento, segundo a NBR 13.281 (ABNT, 2005), classe P6 (compressão) e R6 (tração na flexão). Se for avaliado o traço 7 (menor resistência a compressão), o enquadramento muda para classe P5 (compressão) e R3 (tração na flexão). De qualquer sorte, todos atendem as exigências mínimas da ABNT, relativas aos ensaios mecânicos realizados.

4.4 Análise Estatística

Os resultados mecânicos obtidos foram inseridos no aplicativo *Protimiza Experimental Design*[®] de forma a possibilitar a construção de regressões matemáticas (modelos numéricos) dos experimentos, e desta forma, encontrar parâmetros que pudessem indicar soluções otimizadas para o trabalho de pesquisa.

A análise de variância permitiu a comparação simultânea de múltiplos grupos utilizando variáveis contínuas, e o método dessa análise é iniciado após as amostras terem médias iguais. Desta forma, a hipótese é testada pela estatística F de Snedecor. Em sequência, avaliou-se as premissas que podem ou não aceitar meios iguais. Se o F calculado for maior que o F tabelado (p -valor), ocorre uma rejeição. Os resultados encontrados podem ser observados na Tabela 3 (compressão) e Tabela 4 (tração na flexão).

Tabela 3 – Análise de variância dos experimentos (compressão)

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F cal	p-valor
Regressão	59,5	5	11,9	17,6	0,00342
Resíduos	3,4	5	0,7	***	***
Falta de Ajuste	2,2	3	0,8	1,3	0,45683
Erro Puro	1,1	2	0,6	***	***
Total	62,9	10	***	***	***

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela 4 – Análise de variância dos experimentos (tração na flexão)

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F cal	p-valor
Regressão	9,3	5	1,9	163,8	0,00002
Resíduos	0,1	5	0	***	***
Falta de Ajuste	0,0	3	3	0,0	0,91865
Erro Puro	0,0	2	0,0	***	***
Total	9,3	10	***	***	***

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para as regressões verifica-se que $F_{cal} > F_{tab}$ (p -valor), portanto, neste caso, a hipótese é rejeitada.

Pode-se concluir que, pelo menos, uma média é significativamente diferente da outra.

Além disso, essa rejeição pode ser confirmada a partir dos valores de p , também apresentados na Tabela 4 e 5. Se o valor p for maior que o nível de significância α , neste caso adotado com valor de 5%, a hipótese de igualdade será rejeitada. Os resultados indicaram que o maior p -valor encontrado foi de 3,35% (Tabela 4), para a relação $x_1 \cdot x_2$ da equação de regressão calculada para compressão, e de 0,2% (Tabela 5), para a relação x_{12} para tração na flexão.

Tabela 5 – Valores de p (compressão)

Nome	Coefficientes	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	14,01	0,47	29,52	0,00000
x_1	-1,10	0,29	-3,78	0,0129
x^2_{11}	-1,08	0,35	-3,12	0,0261
x_2	1,4	0,29	4,80	0,0049
x^2_{22}	-2,20	0,35	-6,37	0,0014
$x_1 \cdot x_2$	1,20	0,41	2,91	0,0335

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela 6 – Valores de p (tração na flexão)

Nome	Coefficientes	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Média	4,5	0,06	73,24	0,0000
x_1	-0,46	0,04	-12,35	0,0001
x^2_{11}	-0,27	0,04	-5,92	0,0020
x_2	0,56	0,04	14,85	0,0000
x^2_{22}	-0,90	0,04	-19,98	0,0000
$x_1 \cdot x_2$	0,37	0,05	6,85	0,0010

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As análises realizadas pelo *Protimiza Experimental Design*[®] proporcionaram as seguintes equações de regressão para os resultados de compressão (Equação 1) e tração na

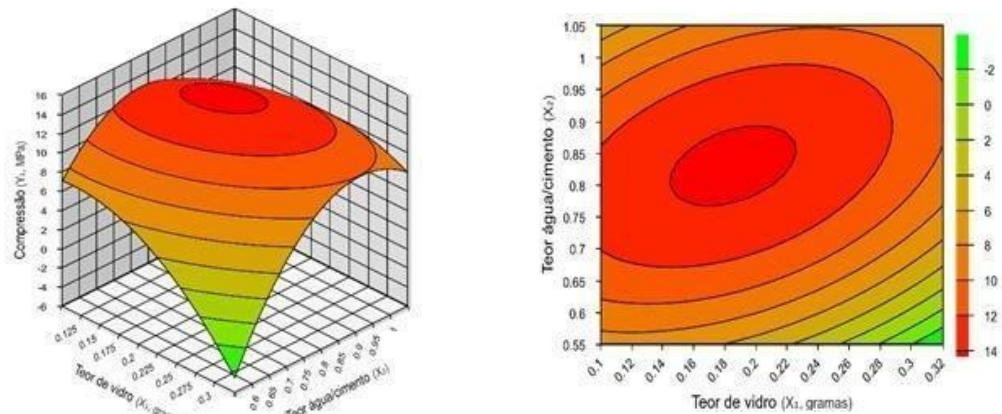
flexão (Equação 2):

$$Y_1 = 14,01 - 1,10 x_1 - 1,08 x_1^2 + 1,40 x_2 - 2,20 x_2^2 + 1,20 x_1 x_2 \quad (\text{Equação 1})$$

$$Y_2 = 4,50 - 0,46 x_1 - 0,27 x_1^2 + 0,56 x_2 - 0,90 x_2^2 + 0,37 x_1 x_2 \quad (\text{Equação 2})$$

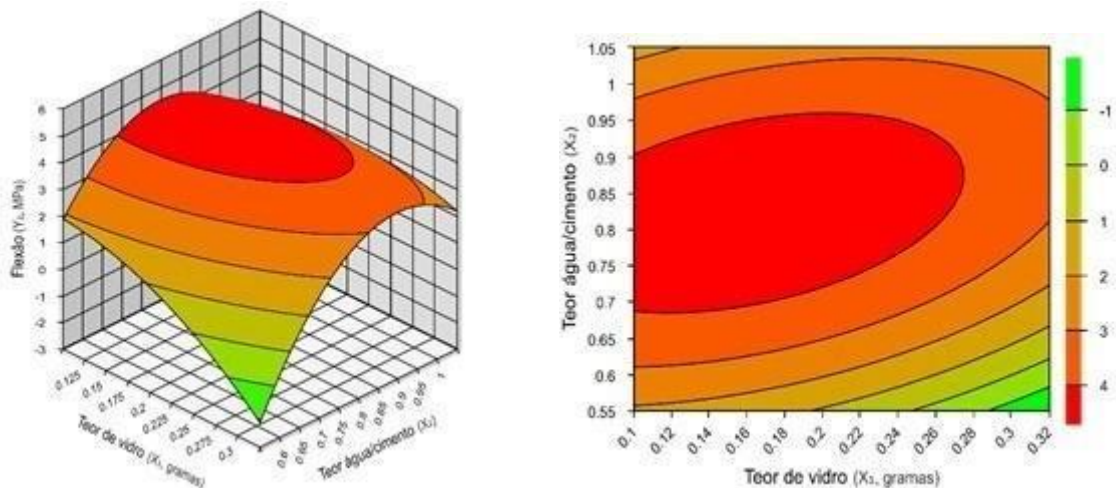
Os valores de R^2 obtidos foram de 94,62% para compressão e 99,39% para a tração na flexão, o que é bastante significativo, considerando que os experimentos tratam-se de produção de matrizes cimentícias, com o uso de resíduos na formulação (no caso o pó de vidro). Os resultados estatísticos obtidos, possibilitaram gerar superfícies de resposta na qual demonstram simultaneamente, a relação existente entre teor de vidro/teor de água/compressão (Gráficos 5a e 5b), e também a relação teor de vidro/teor de água/tração na flexão (Gráficos 6a e 6b).

Gráfico 5 – Correlação entre as variáveis à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gráfico 6 – Correlação entre as variáveis à tração na flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os resultados apresentados nos gráficos 5 e 6 indicam que os pontos ótimos, tanto para a compressão quanto para a tração na flexão, levam a um fator água/cimento próximo a 0,88. Já os teores ótimos de vidro flutuam um pouco, para compressão na faixa de 18% e para tração na flexão em torno de 16% de substituição.

Os valores máximos, considerando as interações das equações de regressão, para as variáveis Y_1 (compressão) e Y_2 (tração na flexão) foram respectivamente 13,49 e 4,26 MPa. Os valores estão bem próximos aos daqueles encontrados nos ensaios de resistência mecânica, apresentados nos Gráficos 3 e 4.

5. CONCLUSÕES

O estudo realizado demonstrou o quanto pode ser viável a produção de materiais sustentáveis, principalmente através da utilização do resíduo de vidro como agregado em potencial. Essa prática abre todo um novo horizonte de possibilidades sobre a redução do uso de recursos naturais. Além de gerar resultados significativos ao longo do tempo, uma vez que, esses resíduos seriam descartados no meio ambiente de maneira inadequada, corrobora para uma nova possibilidade de uso sustentável de agregados na construção civil.

Este trabalho possibilitou demonstrar que é perfeitamente viável a utilização de vidro moído em substituição a areia natural de rio (agregado miúdo), e ainda que o método de empacotamento de Alfred (CASTRO *et al.*, 2009), pode permitir a redução no consumo de cimento Portland, mantendo-se a performance exigida pelas normas da ABNT. Por exemplo, reduzir a resistência à compressão alterando-se a classificação da argamassa a níveis inferiores conforme estabelecido pela NBR 13.281.

O estudo contemplou a realização de diferentes combinações de misturas de materiais (fator água/ cimento e teor de substituição de vidro moído) para a produção argamassas, observando-se que, à medida que se alteraram os teores, foi possível observar o comportamento dos resultados experimentais de resistência mecânica (Gráficos 5 e 6).

As análises estatísticas pelo DCCR indicaram os caminhos a serem trilhados de forma a se obter uma mistura de materiais com resultados otimizados para as variáveis Y_1 e Y_2 . Verificou-se que teores de água/cimento, próximos a 0,88, e substituição de areia de rio por vidro moído em torno de 18%, levaram a resultados potencializados (considerando as misturas avaliadas).

Com estes resultados temos a possibilidade de reduzir os custos de produção das argamassas cimentícias, de modo que as metodologias presentes neste trabalho proporcionam uma nova maneira de pensar e agir sobre a dosagem das argamassas, e

comprovam, que podemos atender às normas vigentes de forma muito mais sustentável, e também mais econômica.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam empregados outros tipos de materiais, como por exemplo a utilização de fibras, cal, dentre outros, visando mitigar problemas de fissuração em argamassas de revestimento de painéis de alvenaria. Ainda mais, utilizar as metodologias empregadas neste trabalho, para verificar o percentual de redução do fator a/c para que a resistência solicitada em norma seja atendida, e o traço ideal contendo a substituição parcial do pó de vidro seja avaliado.

6. REFERÊNCIAS

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais da construção**: Normas, Especificações, Aplicação e Ensaio de Laboratório. 1. ed. São Paulo: Pini, 2013. 460 p.

AIQIN, W.; CHENGZHI, Z.; NINGSHENG, Z. *Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement*, **Cement Concrete Research**, 27, 5, 685-695, 1997.

AIQIN, W.; CHENGZHI, Z.; NINGSHENG, Z. *The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement*, **Cement Concrete Research**, 29, 11, 1721-1726, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 331-1 – Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 11172. **Aglomerantes de origem mineral - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1990.

_____. NBR 13276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 13279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos -**

Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13281. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

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

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIAS, G. C. (Ed.) **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais.** Ipsis Gráfica e Editora, São Paulo, 2007. Cap. 26, p. 863 - 904.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Cerâmica, **55**, 18-32, 2009.

DE LARRARD, F.; SEDRAN, T. *Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model*, **Cement Concrete Research**, 24, 6, 997-1009, 1994.

FERRARI, G.; JORGE, J. **Materiais e Tecnologias.** São Paulo, 2010. Universidade Bandeirantes. (Notas de aula).

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípio de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON, 2007, 2 v., 1712 p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição da metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. *Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete.* **Construction And Building Materials**, n. 61, p.270-277, abr. 2014.

OLIVEIRA, MARIA CLEIDE RIBEIRO DE; SILVA, ALLYSSON LEANDRO BEZERRA DA; PEREIRA, FRANCISCO FLAVIANO; COSTA, GABRIEL LOUIZ SILVA DA; MARQUES, SAMUEL APOLINÁRIO. Argamassa produzida com resíduo de vidro substituindo o agregado miúdo. Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação – VII CONNEPI. Palmas, Tocantins, 2012.

OLIVEIRA, KAIQUE FERNANDES DE. **Incorporação de resíduos de vidro em pó em argamassas de Assentamento**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Centro Universitário de Formiga, Minas Gerais, 2018.

SANTOS, DIOGO PEREIRA DOS. **Influência de resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante**. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, 2016.