



# ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO AGLOMERANTE NO CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO POR RESÍDUOS DA LAMINAÇÃO DE VIDRO

Bárbara Andrade Bueno<sup>1</sup>, Daniel Garla Pismel<sup>2</sup>, Maria Luísa Oliveira Haas<sup>2</sup>, Sílvia Paula Sossai Altoé<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Acadêmica do Curso de Engenharia Civil, Campus Sede, Universidade Estadual e Maringá. Voluntária PIC-UEM. ra131071@uem.br

<sup>2</sup>Engenheiro Civil egresso do Curso de Engenharia Civil, Campus Sede, Universidade Estadual de Maringá. Voluntário PIC-UEM. ra109818@uem.br

<sup>3</sup>Acadêmica do Curso de Engenharia Civil, Campus Sede, Universidade Estadual de Maringá. Voluntária PIC-UEM. ra131080@uem.br

<sup>4</sup>Docente-Orientadora, Doutora, Departamento de Engenharia Civil, Campus Sede, Universidade Estadual de Maringá. spsaltoe@uem.br

## RESUMO

A produção de cimento Portland é uma das principais fontes de emissão de CO<sub>2</sub> na indústria da construção civil, tornando imperativa a busca por aglomerantes alternativos. Este estudo investiga o potencial técnico do pó de vidro (PDV), um resíduo gerado no processo de laminação industrial, como substituto parcial do cimento em concretos de alto desempenho (CAD). Foram produzidos e ensaiados concretos com teores de 0% (referência), 10%, 20% e 30% de substituição. Os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias demonstraram que a adição do resíduo é altamente viável. O teor de 10% de substituição apresentou um desempenho ótimo, com um ganho de resistência em relação ao traço de referência, atingindo um pico de 110 MPa. Os traços com 20% e 30% também mantiveram características de alta resistência, com picos de 90,1 MPa e 108,4 MPa, respectivamente. Contudo, o teor de 30% apresentou elevada dispersão estatística, sugerindo a necessidade de estudos adicionais para garantir a sua homogeneidade. Conclui-se que o pó de vidro residual possui elevado potencial como material cimentício suplementar, oferecendo um duplo benefício: a valorização de um passivo ambiental e a produção de um compósito cimentício de elevada performance mecânica.

**PALAVRAS-CHAVE:** atividade pozolânica; materiais cimentícios suplementares; propriedades mecânicas; reciclagem de pó de vidro; sustentabilidade na construção.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil busca constantemente por soluções que aliam alta performance e sustentabilidade. No centro desta discussão encontra-se a produção de cimento Portland, o principal aglomerante do concreto e o segundo material mais consumido no mundo depois da água. O processo de fabricação do cimento é intensivo em recursos e energia, sendo responsável por uma parcela significativa do impacto ambiental do setor. Além das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC) atingiram aproximadamente 58,23 milhões de toneladas no Brasil em 2024 para uma produção de 64,7 milhões de toneladas de cimento, a indústria também demanda um elevado consumo energético para aquecer seus fornos a mais de 1450 °C e promove a extração extensiva de recursos naturais não renováveis, como o calcário e a argila.

Neste cenário, a busca por materiais de construção que aliem alta performance e baixo impacto ambiental tornou-se uma diretriz para a pesquisa e inovação.

O Concreto de Alto Desempenho (CAD), por exemplo, representa um avanço tecnológico notável. Conforme definido pela *U.S. Federal Highway Administration* (FHWA, 1998), o CAD não se caracteriza apenas por sua elevada resistência à compressão, mas por um conjunto de propriedades otimizadas que garantem maior durabilidade e uma vida útil prolongada às estruturas. Sua aplicação em elementos estruturais esbeltos, como pilares de edifícios altos, ou em obras de arte especiais, como pontes de grandes vãos,



demonstra seu potencial para criar estruturas mais eficientes e com menor consumo de material.

Uma das estratégias mais eficazes para aprimorar o desempenho do concreto e mitigar seu impacto ambiental é a utilização de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS). Estes materiais, muitas vezes resíduos ou subprodutos de outras indústrias, são adicionados ao concreto para substituir parcialmente o cimento Portland. Sua contribuição se manifesta principalmente através de dois mecanismos: o efeito físico ou filler, no qual suas partículas finas preenchem os vazios da matriz cimentícia, aumentando sua compacidade e reduzindo a permeabilidade; e a atividade pozolânica, uma reação química em que a sílica ou alumina amorfa do MCS reage com o hidróxido de cálcio, um subproduto da hidratação do cimento, para formar compostos cimentícios secundários, que contribuem para o ganho de resistência e durabilidade a longo prazo.

Dentre os diversos resíduos industriais estudados, o pó de vidro (PDV) proveniente de processos de beneficiamento tem se mostrado uma alternativa promissora. Composto majoritariamente por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) em estado amorfo, o vidro, quando moído a uma finura adequada, exibe notável atividade pozolânica. A literatura recente corrobora este potencial; Silva et al. (2022), por exemplo, demonstraram que a reatividade do pó de vidro é diretamente proporcional à sua finura, enquanto Chen & Wang (2021) observaram que diferentes tipos de vidro podem influenciar as propriedades do concreto no estado fresco. O presente estudo se insere nesta linha de pesquisa, focando em um resíduo específico e pouco explorado: o pó gerado no processo de laminação de vidro. Este resíduo, atualmente destinado em grande parte a aterros controlados, representa tanto um passivo ambiental para a indústria vidreira quanto uma oportunidade para a construção civil.

O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização de resíduos vítreos como substituto parcial do cimento em concretos. Através de um estudo experimental, serão analisadas as propriedades mecânicas e durabilidade dos concretos produzidos com diferentes proporções de resíduos vítreos. Os resultados obtidos permitirão avaliar a potencial aplicação desta prática na construção civil, contribuindo para o desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis e economicamente viáveis.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 MATERIAIS

Para a realização a confecção dos corpos de prova utilizou-se o cimento CP V-ARI premium da marca Holcim. Para a composição do agregado miúdo foi utilizada areia muito fina da empresa Mineração Jundu. O pó de vidro era proveniente da laminação de vidro e foi seco na estufa a  $105^\circ\text{C}$  e moído no moinho de barras. A água proveniente da rede pública de abastecimento de Maringá (SANEPAR). Ilustra-se na tabela abaixo os traços de concreto utilizados nos corpos de prova a serem ensaiados.

**Tabela 1:** Traços utilizados na realização do experimento

Relação de Massa				
Material	Traço Piloto	Traço 10%	Traço 20%	Traço 30%
Cimento ARI	1	1	1	1
Areia	1,42	1,58	1,78	2,03



Água	0,24	0,27	0,30	0,34
Superplastificante	0,01	0,011	0,013	0,015
PDV	0	0,1	0,2	0,3
Fator água/cimento	0,24	0,26	0,30	0,34

Fonte: Autores, 2025.

## 2.2 MÉTODOS

### 2.2.1 Caracterização dos agregados

Foram realizadas análises com o objetivo de adquirir informações dos materiais utilizados, as quais foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção, no Bloco P-02, nas Universidade Estadual de Maringá. As informações obtidas no ensaio foram densidade específica dos referidos agregados, densidade em massa unitária e distribuição granulométrica. As normas utilizadas para realizar a obtenção da curva granulométrica da areia foi a norma NBR 17054 (ABNT, 2022). Para a massa unitária, utilizou-se os preceitos estabelecidos na norma NBR 16972 (ABNT, 2021). Na determinação da massa específica do agregado miúdo, utilizou-se o que é estabelecido na NBR 16916 (ABNT, 2021). A caracterização e a análise do cimento foram fundamentadas nas especificações técnicas fornecidas pelo fabricante, complementadas por dados granulométricos consolidados na literatura.

### 2.2.2 Coleta e preparo do Pó de Vidro

Para a obtenção do resíduo de vidro neste estudo é necessário, em primeira instância entender como ocorre o processo para a obtenção do material. No caso desse estudo o resíduo utilizado é derivado da operação de laminação de placas de vidro temperado, a qual é realizada por meio da aplicação de jatos de água. Esse procedimento resulta em uma mistura de resíduo pulverulento e água, o qual possui aparência semelhante a de lama de argila branca, sendo então encaminhado para o processo de tratamento de efluentes internos na empresa. Depois do material é encaminhado para a decantação e densificação nos funis com a adição de polímeros. Após passar por esse processo 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.



**Figura 1:** Funis de decantação  
Fonte: Autores, 2025.

Depois de passar por esse processo o material foi encaminhado para o Laboratório de Materiais de Construção, onde ele foi disposto em bandejas, a fim de ser seco. Posteriormente, colocou-se o material em estufa a 105°C para que pudesse ser retirado todo o excesso de água. Em seguida, o material seco foi colocado em um moedor de barras para que ele tomasse forma pulverulenta. Por fim, passou-se o material na peneira de 4,8 mm e armazenou-se em sacos plásticos.

### **2.2.3 Dosagem e moldagem dos corpos de prova**

Em primeiro lugar, foi realizado o cálculo da dosagem de concreto, definiu-se a quantidade de materiais utilizados para a realização do ensaio. Após isso, realizou-se a moldagem dos corpos de prova, com os traços descritos na Tabela 1. Durante a realização da mistura na argamassadeira foi colocado o superplastificante, porém percebeu-se que o super plastificante não demonstrou realizar a atividade esperada, por isso, adicionou-se em quantidade duplicada do material.

Moldaram-se os corpos de prova de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2018, e para que pudesse ser feito o ensaio de rompimento na prensa fornecida pela Universidade, a dimensão do corpo de prova utilizado foi  $\varnothing 5\text{cm}$  e altura de 10 cm. Após as moldagens todos os corpos de prova foram colocados na câmara úmida para garantir a cura do concreto e lá foram mantidos até as idades de ruptura. Depois de 28 dias foram realizados ensaios de resistência a compressão. Os ensaios de resistência a compressão foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2018.



### 3 RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais demonstrou que o agregado miúdo apresentou uma curva granulométrica na fronteira inferior da zona ótima recomendada para concretos, uma condição resultante de sua prévia peneiração para a remoção de contaminantes orgânicos. Nesta mesma etapa de análise, verificou-se que a massa específica do resíduo vítreo é de aproximadamente 50% daquela correspondente ao cimento. Os dados completos desta caracterização, que incluem os parâmetros relevantes da areia, estão compilados na Tabela 2.

A análise comparativa da distribuição granulométrica dos materiais, ilustrada na Figura 3, revela a posição distinta do pó de vidro (PDV) no conjunto. Suas partículas possuem uma finura intermediária, com a curva de distribuição se posicionando entre a do agregado miúdo e a do aglomerante cimentício. Apesar dessa posição intermediária, a distribuição do PDV demonstra maior afinidade com a curva do cimento CP-V do que com a da areia.

Esta análise corrobora a observação de que o cimento empregado é um material pulverulento mais fino que o resíduo de vidro utilizado no estudo. É pertinente esclarecer que, para fins de comparação, a curva granulométrica do cimento CP-V-ARI foi referenciada a partir dos dados publicados na pesquisa conduzida por Cesapolucha (2016), que efetuou a referida análise.

**Tabela 2:** Parâmetros dos materiais

Parâmetro	Areia	Resíduo	Cimento
Massa Unitária [g/cm <sup>3</sup> ]	2,658	2,52	3,12
Massa Específica [g/cm <sup>3</sup> ]	1,52	0,66	1,18
Diâmetro máximo	1,18	-	-
Módulo de Finura	1,57	-	-

Fonte: Autores, 2025.

#### 3.2 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO APÓS 28 DIAS

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados aos 28 dias de idade, conforme preconizado pela norma ABNT NBR 5739:2018. Os valores médios obtidos para cada traço, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação, estão consolidados na Tabela 3. A análise destes resultados permite uma avaliação inicial da viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro (PDV).

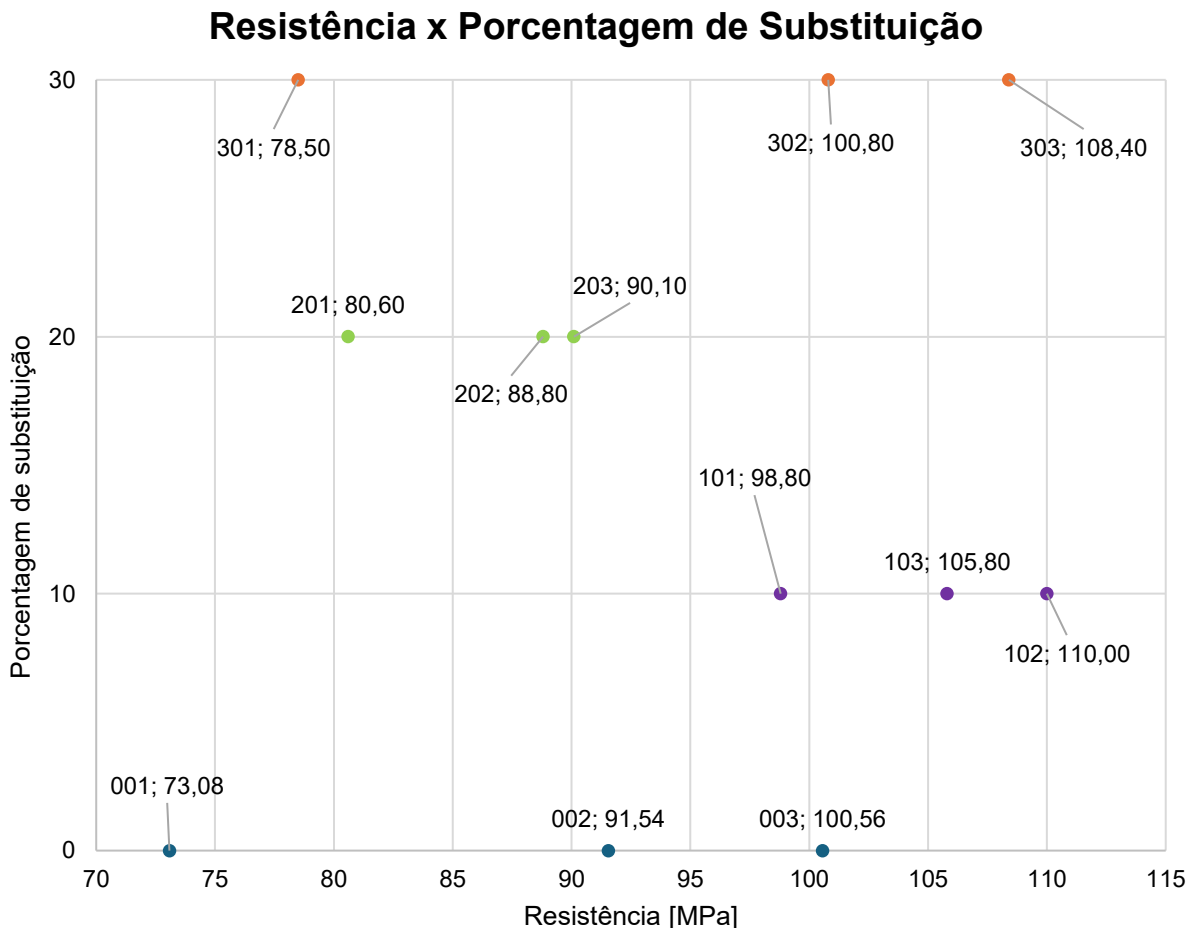
**Tabela 3:** Resultados Obtidos

Corpo de prova	Porcentagem de substituição	28 dias		
		Resistência	Ótimo	Coeficiente de variação
001	0	73,08	100,6	14



002	0	91,54		
003	0	100,56		
101	10	98,8		
102	10	110	110	5,4
103	10	105,8		
201	20	80,6		
202	20	88,8	90,1	5,95
203	20	90,1		
301	30	78,5		
302	30	100,8	108,4	16,2
303	30	108,4		

Fonte: Autores, 2025.



**Gráfico 1:** Resistência x Porcentagem de Substituição

Fonte: Autores, 2025

Do ponto de vista da engenharia de estruturas, o Traço Piloto estabelece um patamar de alto desempenho, com quase 100 MPa. Este tipo de concreto é especificado para elementos estruturais esbeltos e submetidos a altas cargas, como pilares de edifícios altos (*high-rises*) e obras de arte especiais.



O resultado mais significativo para a aplicação imediata é o do Traço com 10% de substituição, que não apenas atingiu, mas superou o desempenho do concreto de referência, alcançando 110,0 MPa. No ponto de vista da engenharia civil, isso significa que é possível especificar um concreto mais sustentável sem qualquer sacrifício de performance.

Os traços com 20% e 30% de substituição, embora apresentem uma redução no pico de resistência para 90,1 MPa e 108,4 MPa, respectivamente, continuam sendo classificados como concretos de alto desempenho. Para o teor de 30%, o Gráfico 1 exibe um valor ótimo elevado de 108,4 MPa, o que, à primeira vista, parece contradizer a tendência de queda. Uma resistência característica de projeto derivada desses valores ainda seria superior a 70 MPa. Esta faixa de resistência é perfeitamente adequada para a grande maioria das aplicações de CAD, como lajes protendidas, elementos pré-moldados e a infraestrutura de edifícios comerciais e residenciais. A decisão de usar um traço com maior teor de substituição passa a ser uma análise de engenharia de custos e sustentabilidade. Por isso, é passível de verificação o uso do CAD com substituição de PDV, porém é necessário avaliar o impacto que será causado na obra e sua relação com custo potencialmente menor e um impacto ambiental significativamente reduzido.

A análise aos 28 dias captura principalmente o efeito físico (fíler) do PDV. A atividade pozolânica do vidro — sua capacidade de reagir quimicamente com subprodutos da hidratação do cimento para formar compostos resistentes — é um processo mais lento.

Portanto, é esperado que os traços com PDV, especialmente os de 20% e 30%, continuem a desenvolver resistência em idades mais avançadas (56, 91 dias ou mais), podendo, eventualmente, igualar ou até superar os valores do traço de referência a longo prazo. O valor ótimo aqui apresentado reflete o potencial em uma idade específica, mas a contribuição total do PDV se manifesta ao longo do tempo.

A observação de que foi necessário aumentar a dosagem do aditivo superplastificante é uma informação crucial, no entanto, precisa-se de mais estudos para a chegar a um veredito. Na prática a adição de supreplastificante indica que a trabalhabilidade (*slump*) do concreto com PDV possa ser mais sensível.

O principal benefício de engenharia do uso do PDV é a sustentabilidade. A substituição de 30% do cimento por um resíduo industrial representa uma redução direta de aproximadamente 30% nas emissões de CO<sub>2</sub> associadas ao aglomerante para aquele volume de concreto. Para uma obra de grande porte, isso se traduz em toneladas de CO<sub>2</sub> que deixam de ser emitidas, um fator cada vez mais valorizado em certificações de sustentabilidade.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo se propôs a avaliar a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro (PDV), um resíduo da indústria de laminação, na produção de concreto de alto desempenho (CAD). A partir dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, foi possível extrair conclusões relevantes. Por isso, em primeiro lugar, pode-se concluir que a utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento é tecnicamente viável, produzindo concretos com resistências compatíveis com a classificação de alto desempenho.

Além disso, o teor de 10% de substituição demonstrou ser o ponto ótimo para a idade de 28 dias, resultando em um ganho de resistência em relação ao traço de referência e atingindo um pico de 110,0 MPa. Isso indica um potencial para otimizar projetos que demandam altíssima resistência, ao mesmo tempo que se utiliza um material mais sustentável.



Os teores de 20% e 30% de substituição, embora tenham apresentado resistências inferiores ao teor de 10%, ainda se mostraram robustos, com picos de 90,1 MPa e 108,4 MPa, respectivamente. No entanto, o traço com 30% de PDV apresentou elevada variabilidade nos resultados (coeficiente de variação de 16,2%), o que representa um risco do ponto de vista da segurança estrutural e indica que esta dosagem necessita de maior investigação para garantir sua homogeneidade e confiabilidade.

A incorporação do PDV impacta diretamente a trabalhabilidade da mistura, exigindo possivelmente um maior consumo de aditivo superplastificante para manter a consistência, um fator que deve ser considerado na análise de custos.

O trabalho confirma o duplo benefício do pó de vidro: como uma solução ambientalmente correta, por valorizar um resíduo e reduzir o consumo de cimento; e como um material tecnicamente competente, capaz de contribuir para as propriedades mecânicas do concreto. Para a completa validação de seu uso na construção civil, recomenda-se a continuidade da pesquisa, com foco no comportamento a longo prazo e na análise de durabilidade.

## REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregados — Determinação da massa específica e da massa específica aparente do agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

CESAPOLUCHA, L. F. **Estudo da durabilidade de concretos autoadensáveis com diferentes tipos de adições minerais**. 2016. 193 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PISMEL, D. G. **Análise do comportamento do Concreto de Alto Desempenho quando submetido a altas temperaturas**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2023.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Números da Indústria**. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-industria.php>. Acesso em: 7 ago. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Federal Highway Administration. **HPC Bridges, Building Bridges for the 21st Century**. Washington, D.C.: FHWA, 1998. (Publication No. FHWA-SA-98-084).