

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS SUSTENTÁVEIS BASEADOS EM VIDRO RECICLADO E MATERIAIS INOVADORES PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

RODRIGUES, Vitória Camila de Lucio¹

BASSI, Ana Lúcia²

Resumo

O cimento é um dos principais insumos na produção de concreto, representando a matéria-prima de maior relevância técnica e econômica. Contudo, sua fabricação é responsável por significativa emissão de gases poluentes, especialmente dióxido de carbono (CO₂), contribuindo para o agravamento dos impactos ambientais. Considerando esse cenário, o vidro reciclado surge como uma alternativa promissora, por apresentar características pozolânicas que permitem sua utilização como substituinte parcial do cimento. Dessa forma, esse estudo tem como objetivo investigar a influência da substituição parcial do cimento por pó de vidro em diferentes proporções, comparando o desempenho obtido com o concreto convencional. Além disso, buscou-se avaliar a inserção de outros materiais recicláveis, com vistas à inovação e à redução de custos na construção civil. Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Química e Materiais, com o propósito de analisar a resistência à compressão e a viabilidade técnica do uso de resíduos vítreos em concretos simples. A pesquisa fundamenta-se em uma metodologia qualitativa, bibliográfica e exploratória, contemplando autores como Barros (2016), Cavalcanti (2012), Giacomini (2007), Pinheiro (2007) e Sales (2014), além da consulta a artigos e periódicos científicos. Espera-se que os resultados contribuam para o avanço de soluções sustentáveis na construção civil, incentivando o aproveitamento de materiais reciclados e o desenvolvimento de produtos inovadores.

Palavras-chave: Concreto. Reciclagem. Resíduos vítreos. Sustentabilidade.

1 Introdução

Atualmente, vivemos um período marcado pelo avanço da industrialização e pelo elevado consumo dos recursos naturais. Embora tais processos proporcionem conforto e praticidade à população, também resultam em sérios impactos ambientais, como a poluição de rios e florestas, a emissão de gases

¹ Graduando em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Municipal de Franca Uni-FACEF. Endereço eletrônico: vitoriacruzio.engcivil@gmail.com.

² Professora Dra. em Ciências pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCar e Docente no Centro Universitário Municipal de Franca Uni-FACEF. Endereço eletrônico: analuciabassi@gmail.com.

poluentes e o alto consumo de energia elétrica. Entre os problemas decorrentes do crescimento industrial e urbano, destaca-se o aumento expressivo da geração de resíduos sólidos, especialmente os provenientes da produção e descarte de vidro, tanto na indústria comercial quanto na construção civil. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), a produção de resíduos vítreos tem crescido de forma contínua nas últimas décadas, refletindo o padrão de consumo da sociedade moderna.

De acordo com Dias (1994), o ser humano tem experimentado mudanças significativas em seus valores culturais, acompanhadas de profundas alterações em seu ambiente natural, o que vem comprometendo a qualidade de vida. Estima-se que o vidro descartado, oriundo de garrafas, vasilhames, vidros planos e outros produtos corresponda a aproximadamente 7,5% em peso do total de resíduos sólidos gerados mundialmente. Para efeito comparativo, dados da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) indicam que, nesse país, o consumo médio de embalagens de vidro ultrapassa 30 kg por habitante ao ano, enquanto no Brasil o valor gira em torno de 5,57 kg per capita. Essa realidade representa milhares de toneladas de resíduos vítreos descartados diariamente, configurando um desafio de natureza tanto ambiental quanto econômica para países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Diante desse cenário, o reaproveitamento do vidro tem despertado crescente interesse da comunidade científica e do setor produtivo, especialmente por seu potencial de aplicação em diferentes segmentos industriais. No campo da construção civil, estudos vêm avaliando o uso de vidro reciclado na formulação de novos produtos, buscando alternativas que aliem desempenho técnico e sustentabilidade. Ainda que a reciclagem de vidro seja um processo de retorno econômico limitado, iniciativas de reaproveitamento vêm se consolidando, como demonstram os estudos pioneiros de Brown e MacKenzie (1982), que evidenciaram resultados satisfatórios na utilização do vidro reciclado para a produção de cerâmicas industriais de alta resistência e superfícies vitrificadas. Atualmente, a aplicação de materiais vítreos reciclados na fabricação de azulejos, pisos e telhas já é uma prática adotada em diferentes contextos da construção civil.

Dessa forma, este trabalho tem como propósito investigar e desenvolver métodos que permitam o uso do vidro reciclado, moído e transformado em pó, como substituinte parcial da areia na produção de concreto. A proposta visa contribuir para a criação de um material sustentável, economicamente viável e tecnicamente eficiente, capaz de reduzir o volume de resíduos vítreos depositados em aterros sanitários, além de promover benefícios sociais, como a geração de empregos e o estímulo à economia circular.

2 Referencial teórico e trabalho correlatos

2.1 Conceitos Importantes sobre o Vidro

Petrucci (1998) define o vidro como um material complexo, obtido a partir de uma solução sólida de silicatos alcalino-terrosos em silicatos alcalinos simples e mais fusíveis. A sílica, em algumas formulações, pode ser parcialmente substituída por boro ou outros anidridos, podendo ainda conter pequenas quantidades de elementos pesados, como o chumbo.

Dessa forma, o vidro é uma substância inorgânica, homogênea e amorfa, produzida por meio do resfriamento controlado de uma massa em fusão. Suas principais propriedades incluem transparência, dureza e estabilidade química, o que o torna amplamente aplicado em diversos setores industriais. Devido à sua resistência, durabilidade e propriedades térmicas, ópticas e acústicas, o vidro permanece como um dos poucos materiais de difícil substituição, estando presente em inúmeras pesquisas voltadas ao desenvolvimento tecnológico e à melhoria da qualidade de vida humana.

Embora a origem exata do vidro seja desconhecida, há relatos históricos que atribuem sua descoberta a navegadores fenícios há mais de quatro mil anos. Registros arqueológicos, contudo, comprovam que povos antigos, como egípcios, sírios, fenícios, assírios, babilônios e gregos já produziam artefatos vítreos, sendo o processo posteriormente aperfeiçoado pelos romanos. Esses desenvolveram técnicas avançadas de lapidação, coloração, pintura, gravação e, sobretudo, o sopro do vidro,

que permitiu a criação de recipientes ocios e marcou um importante avanço na história desse material (SANVIDRO, 2016).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO, 2021), o vidro é composto essencialmente pela fusão de minerais naturais, cujas matérias-primas e proporções médias são: sílica (areia) – 70%, barrilha (carbonato de sódio) – 15%, calcário (carbonato de cálcio) – 10%, dolomita – 2%, feldspato – 2%, além de aditivos como sulfato de sódio, ferro, cobalto, cromo, selênio, magnésio e cálcio, que conferem maior resistência e características específicas à estrutura vítrea (Tabela 1).

Tabela 1 - Principais materiais primas da indústria do vidro

Principais matérias primas da indústria de vidro	
Areia	70%
Barrilha	15%
Calcário	10%
Dolomita	2%
Feldspato	2%
Aditivos	Sulfato de sódio, ferro, cobalto, cromo, selênio, magnésio, cálcio

Fonte: ABIVIDRO (2021).

De acordo com a Confederação Nacional do Ramo Químico (CNQ), as matérias-primas utilizadas na fabricação do vidro são, em sua maioria, recursos naturais abundantes e de fácil obtenção. A principal exceção é a barrilha, substância responsável por reduzir o ponto de fusão do vidro. Embora represente apenas cerca de 12% em peso da mistura total, a barrilha corresponde a aproximadamente 60% do custo dos insumos utilizados na produção, devido ao seu valor agregado.

A fabricação do vidro exige a classificação do material conforme o tipo e o segmento de aplicação, seguindo as normas técnicas vigentes que regulamentam seus processos produtivos. Segundo a norma ABNT NBR 7199:1989, o vidro é classificado de acordo com as especificações apresentadas na Tabela 2, que define suas propriedades e aplicações conforme a natureza do produto final.

De acordo com a ABRAVIDRO e a ABIVIDRO, o processo de fabricação do vidro está diretamente relacionado à finalidade de uso do produto. Dessa forma, os vidros são classificados conforme sua utilidade, abrangendo aplicações na

indústria alimentícia, construção civil, fabricação de embalagens, utensílios domésticos, entre outros segmentos essenciais ao cotidiano humano.

A indústria vidreira, portanto, é estruturada em diferentes setores produtivos, organizados de acordo com o tipo de produto fabricado. No Brasil, as principais categorias de produção concentram-se nos segmentos de vidros planos, vidros domésticos, embalagens e vidros especiais, sendo a escolha das matérias-primas e dos processos de fabricação determinada pela aplicação final do material.

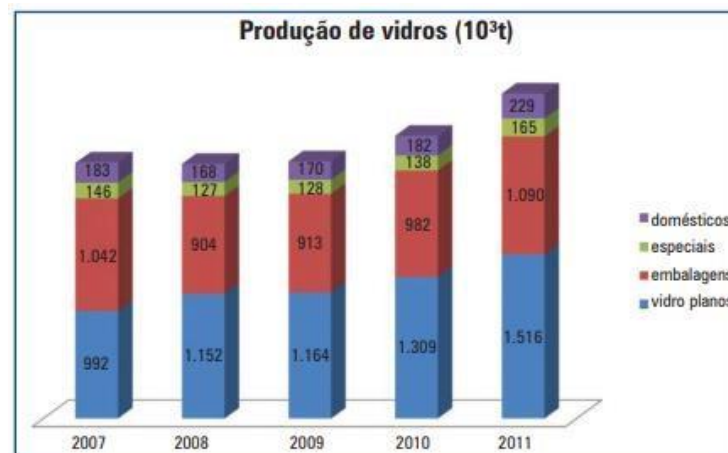
Tabela 2 – Classificação dos tipos de vidro segundo a ABNT NBR 7199:1989

Vidro – Classificação	
Quanto ao tipo	Recozido De segurança temperado De segurança laminado De segurança aramado Térmico absorvente Composto
Quanto à forma	Chapa plana Chapa curva Chapa perfilada Chapa ondulada
Quanto a transparência	Transparente Translúcido Opaco
Quanto ao acabamento de superfície	Liso Polido Impresso (fantasia) Fosco Espelhado Gravado Esmaltado Termo-refletor
Quanto à coloração	Incolor Colorido
Quanto à colocação	Caixilhos Autoportantes Mista
Quanto ao uso na construção	Envidraçamento Paredes Coberturas Concreto translúcido (lajes) Isolamento térmico

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR-7199/1989

Observa-se, ao longo dos últimos anos, um crescimento contínuo do uso do vidro na construção civil, especialmente na forma de vidros planos, empregados em fachadas, esquadrias, divisórias e revestimentos. Essa tendência reflete a busca por soluções arquitetônicas mais modernas, sustentáveis e esteticamente valorizadas, conforme ilustrado no gráfico apresentado na Figura 1.

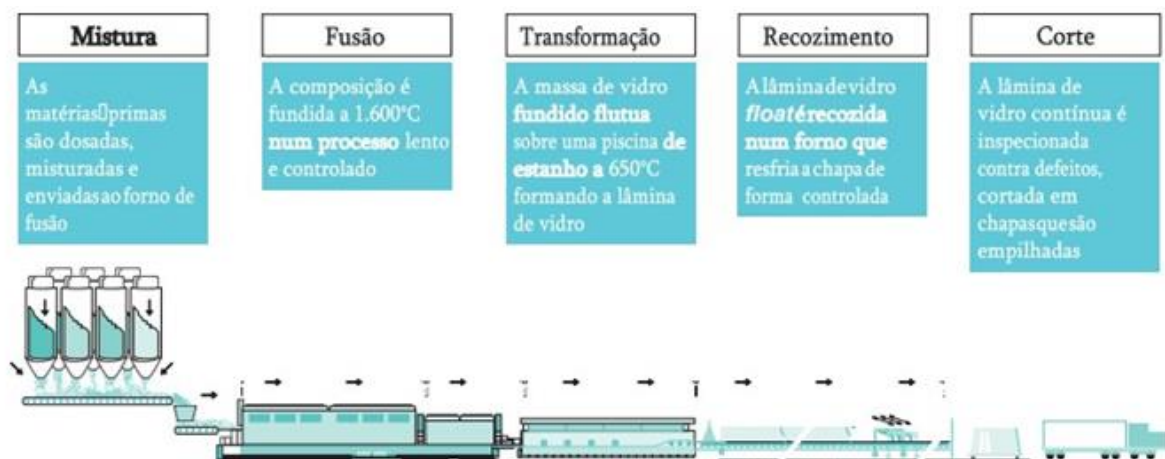
Figura 1 – Gráfico produção do vidro



Fonte: ABVIDRO, 2022.

Segundo a ABVIDRO (2022), após a classificação do vidro de acordo com sua função e aplicação, inicia-se o processo de fabricação, que compreende cinco etapas principais na cadeia produtiva. As chapas de vidro, como o float e o impresso, são produzidas pelos fabricantes e comercializadas para distribuidoras e processadoras (Figura 2).

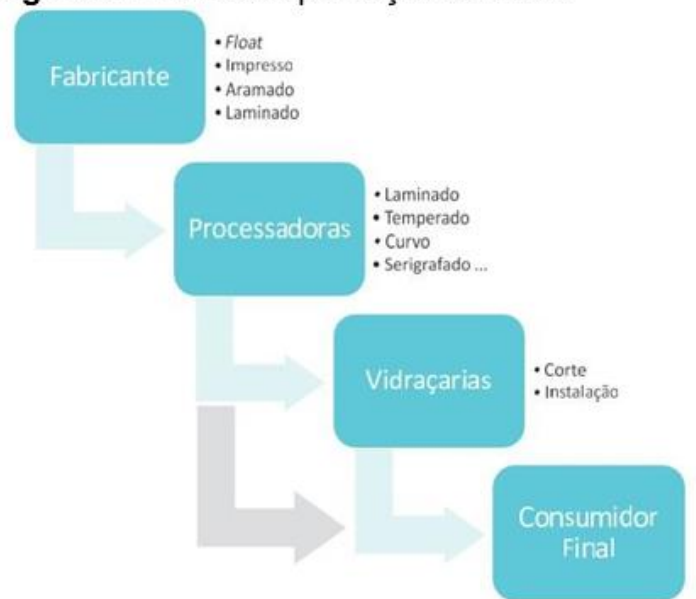
Figura 2 - Processo de fabricação do vidro



Fonte: ABVIDRO, 2022.

Nessas etapas subsequentes, o vidro é processado e transformado em diferentes formatos e produtos, adequados a variadas aplicações. Além disso, parte do vidro é disponibilizada diretamente ao consumidor final. Em muitos casos, a comercialização ocorre por meio de vidraçarias, que realizam cortes específicos e efetivam a instalação dos produtos, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Linha de produção do vidro



Fonte: ABIVIDRO, 2022.

A produção de vidro plano envolve a mistura e fusão das matérias-primas em fornos a aproximadamente 1600 °C. A massa fundida é vertida continuamente sobre um tanque de estanho líquido, onde se espalha uniformemente, formando chapas de vidro de diferentes tipos e formatos.

O uso de vidro reciclado permite substituir parte da matéria-prima mineral virgem, gerando economia de energia e água. O vidro reciclado funde-se a temperaturas mais baixas, entre 1000 e 1200 °C. De acordo com a ABIVIDRO, a inclusão de 10% de cacos de vidro na mistura reduz em 3 a 4% o consumo de energia e em 10% o uso de água, cuja média na indústria vidreira é de cerca de 1,0 m³/t. A produtividade do setor no Brasil é ligeiramente superior à da União Europeia, com 214 kg/homem/ano contra 190 kg/homem/ano.

2.2 Resíduos Sólidos

Conforme estabelecido pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resíduos sólidos são definidos como materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultantes de atividades humanas em sociedade. A PNRS estabelece diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, visando à redução da

geração e ao reaproveitamento dos materiais recicláveis. Serviços e Informações do Brasil.

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil tem apresentado crescimento contínuo. Em 2022, o país registrou a produção de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de RSU, o que corresponde a cerca de 224 mil toneladas diárias. Isso implica que cada brasileiro gerou, em média, 1,043 kg de resíduos por dia, totalizando 381 kg por ano.

Em 2025, o Brasil continua enfrentando desafios significativos na gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU). A geração per capita de resíduos manteve-se estável em torno de 382 kg por habitante ao ano, conforme dados da ABREMA. No entanto, a taxa de reciclagem permanece baixa, com apenas 4% dos resíduos sendo reciclados, e aproximadamente 32% dos municípios ainda utilizando lixões como destino final dos resíduos.

Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, implementada em 2010, ainda enfrenta desafios em sua aplicação efetiva, especialmente na implantação da coleta seletiva e na redução dos lixões, objetivos que ainda não foram plenamente alcançados em diversos estados.

2.3 Logística Reversa e Reciclagem

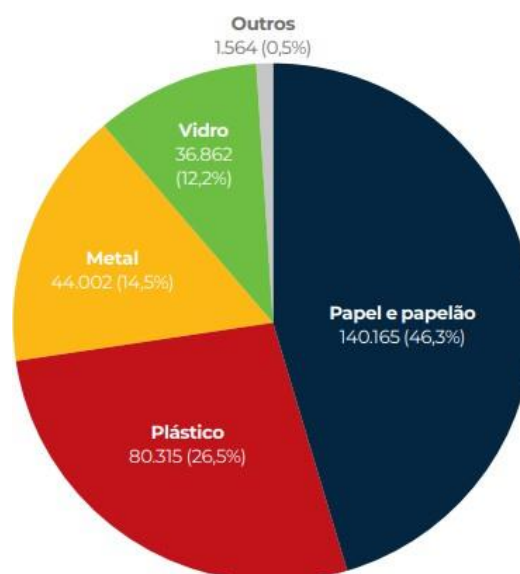
De acordo com a Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece a logística reversa como um dos instrumentos de implementação do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Desse modo, a partir deste marco legal, diversos setores passaram a ser responsáveis por desenvolver ações para a implementação de sistemas de logística reversa de produtos e embalagens pós-consumo, no intuito de priorizar seu retorno para um novo ciclo de aproveitamento.

Atualmente, para suprir necessidade de reduzir ou reciclar diversos materiais não utilizados, foi sancionado em 13 de abril de 2022 o Decreto nº 11.044 que institui o Certificado de Crédito de Reciclagem (Recicla+) no âmbito dos sistemas de logística reversa de que trata o artigo 33 da PNRS, onde o mesmo consiste em um documento comprobatório, emitido pela entidade gestora do sistema de logística

reversa em questão, da massa equivalente de produtos ou embalagens que foram efetivamente recicladas. Assim, diversas empresas no Brasil adotaram as medidas dentre os 23 programas dispostos de logística reversa, afim de suprir a necessidade de suas responsabilidades sociais perante a sociedade.

De acordo com a Central de Custódia da Logística Reversa de Embalagens, em 2021 (Figura 4), foram recuperadas cerca de 303 mil toneladas de resíduos recicláveis secos de 13 dos 23 Programas de Logística Reversa de Embalagens em Geral aderentes, dos quais 46,3% de papel e papelão, 26,5% de plástico, 14,5% de metal, 12,2% de vidro e 0,5% de outros materiais passíveis de reciclagem e não reconhecidas pelo sistema de classificação de materiais utilizado (Nomenclatura Comum do MERCOSUL - NCM).

Figura 4 - Gráfico de Resíduos Recicláveis em 2021



Fonte: Central de Custódia da Logística Reversa, 2022.

2.4 Concreto

O concreto é um material compósito, formado por cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo e ar, podendo incluir adições de cinza volante, pozolanas, sílica ativa e aditivos químicos com o objetivo de melhorar ou modificar suas propriedades básicas (Bastos, 2006).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o concreto consiste essencialmente em um meio contínuo aglomerante, no qual estão incorporadas partículas ou

fragmentos de agregados. No caso do concreto de cimento hidráulico, o aglomerante é formado pela mistura de cimento hidráulico e água, que ao hidratar-se confere resistência e coesão ao material.

O concreto é um elemento indispensável na construção civil, tendo evoluído ao longo dos séculos para atender às demandas de novas estruturas, como vias, edifícios, pontes e monumentos. Apesar das inovações tecnológicas, algumas características essenciais como resistência, durabilidade e manuseabilidade devem ser preservadas. Em função dessas propriedades, o concreto tornou-se o segundo material mais utilizado no mundo, perdendo apenas para a água, elemento fundamental à vida (Petrucchi, 1978).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), novas tecnologias têm sido desenvolvidas para tornar a aplicação do concreto mais sustentável, incluindo a transferência de conhecimento técnico e o aperfeiçoamento de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de materiais mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

2.4.1 Características e Propriedades do Concreto

O **cimento Portland** é composto principalmente pelos óxidos CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e MgO . Ao ser misturado com água, ocorre um processo de hidratação, formando compostos como $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que criam uma pasta gel que recobre os agregados, preenchendo cavidades e originando o concreto sólido (Shriver, 2008).

Para Petrucci (1998, 2005), os compostos do cimento podem ser estudados como componentes binários oxigenados como cal, sílica, alumina, óxido de ferro, magnésia, álcalis e sulfatos que, após a hidratação, formam cristais e gel. O gel instável inicialmente se desidrata e se transforma em gel estável, responsável pela maior parte da resistência mecânica do concreto.

As principais propriedades físicas do concreto incluem densidade, finura, tempo de pega, resistência e exsudação; já as propriedades químicas envolvem estabilidade, calor de hidratação, resistência a agentes agressivos e reações álcali-agregado (Petrucchi, 1998).

2.5 Cimento Portland

Segundo a ABNT NBR 5732 (1991), o cimento Portland comum é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, formado principalmente por silicatos de cálcio, com adição de sulfatos de cálcio e, opcionalmente, materiais pozzolânicos, escórias de alto-forno ou carbonatos.

O cimento é um pó fino com propriedades aglomerantes que, ao reagir com água, endurece e eleva a resistência mecânica da massa (Petrucci, 1998; ABCP).

A ABNT NBR 6118 (2003) classifica o concreto por resistência à compressão aos 28 dias, variando de C10 a C100, com concretos não estruturais (C10 e C15) e classes estruturais do grupo I (C20 a C50) e grupo II (C55 a C100).

O cimento Portland comum (CP I) é referência para os demais tipos, que se diferenciam pela proporção de clínquer, sulfatos de cálcio e adições, como escória, pozolana ou material carbonático. Por exemplo:

- CP I-S: 6–10% de material carbonático;
- CP II (E, Z, F): adições de escória, pozolana e fíler;
- CP III: 35–75% de escória;
- CP IV: 15–50% de pozolana (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação do Cimento

Classificação	Tipos
Cimento Portland comum	CP-I
Cimento Portland composto	CP-II
Cimento Portland de alto-forno	CP-III
Cimento Portland pozzolânico.	CP-IV
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP-V-ARI
Cimento Portland resistente aos sulfatos	CP-RS

Fonte: ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, 2002.

Entretanto, a ABCP destaca que o cimento CP-II-F32 como um Cimento Portland composto com fíler calcário em teor entre 6 e 10%, adequado para uso em estruturas de concreto armado, pavimentos de concreto, argamassa de chapisco, assentamento de blocos, revestimento, pisos e contrapisos, grautes, concreto protendido, pré-moldados e artefatos de concreto.

2.6 Agregados

Os agregados são materiais pétreos, de origem natural ou artificial, utilizados na fabricação de concreto e argamassas, com dimensões nominais variando de 0,075 mm a 152 mm, e inertes à ação de agentes químicos (Campos *et al.*, 2007).

Os agregados são materiais incoesivos, de atividade química praticamente nula, formados por partículas de diferentes tamanhos. Na construção civil, recebem denominações específicas conforme o tipo e aplicação: areia, brita, bica-corrida, rachão, fíler, entre outros (Bauer, 2012).

A ABNT NBR 7211 (1991, 2005) estabelece os requisitos tecnológicos para agregados miúdos (areia) e graúdos (brita), provenientes de processos naturais, e define parâmetros como:

- Dimensão máxima característica: abertura nominal da peneira na qual o agregado apresenta menos de 5% em massa retida;
- Módulo de finura: soma das porcentagens retidas em peneiras da série normal, dividida por 100.

A ABNT NBR 9935 (2003) padroniza a terminologia dos agregados, definindo como:

- Areia: agregado miúdo, natural ou artificial;
- Brita: agregado graúdo obtido por fragmentação artificial;
- Pedregulho: agregado graúdo natural, utilizado após lavagem e seleção, sem outros tratamentos.

3. Materiais e métodos

O desenvolvimento deste estudo foi realizado por meio de uma pesquisa bibliográfica-exploratória, abrangendo livros, artigos científicos, teses, normas técnicas e documentários.

Paralelamente, foram conduzidos estudos práticos no Laboratório de Química e Materiais do Centro Universitário Municipal de Franca - UniFACEF, com o objetivo de desenvolver um produto inovador que contribua para a redução da geração e acúmulo de resíduos sólidos de vidro no meio ambiente.

Os materiais empregados foram: garrafas de vidro recicladas, areia média, brita basáltica tipo 1, cimento CP II-F-32 e água.

O trabalho foi realizado em etapas, iniciando com a caracterização das matérias-primas, para determinar suas propriedades físicas, incluindo granulometria e massa específica.

4. Resultados e Discussões

Para o desenvolvimento do produto inovador, o pó de vidro foi utilizado como substituto parcial da areia na composição do concreto. Foram confeccionados corpos de prova para avaliar a resistência mecânica do concreto utilizando matéria-prima reciclada.

O vidro reciclado passou por lavagem, secagem e trituração manual com barra de alumínio e pilão (Figura 5), até atingir uma granulometria semelhante à da areia, sendo posteriormente classificado com tamanho médio de 0,6 mm.

Os percentuais de substituição do pó de vidro pela areia foram de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 75% e 100%, escolhidos para permitir uma análise detalhada da resistência mecânica do concreto e identificar a proporção ótima para o desempenho do material.

O Slump Test foi realizado conforme a NBR NM 67, com traço definido em 1:3:2:0,45 (cimento: areia: brita: água), sem a adição de aditivos para melhorar a trabalhabilidade.

Figura 5: Processo de lavagem, secagem e maceração do vidro.

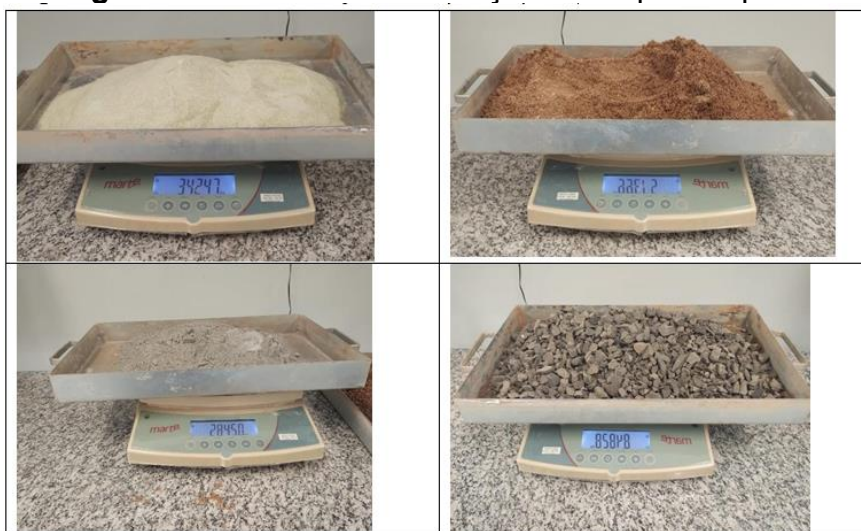


Fonte: próprio autor.

Em seguida, os corpos de prova foram confeccionados em moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, seguindo a NBR 5738 (2015), que estabelece que a dimensão mínima do corpo de prova deve ser três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado graúdo. Os moldes foram preenchidos por adensamento vibratório.

Para a preparação, cada material foi pesado em balança analítica (Figura 6) e misturado em betoneira, seguindo as proporções e granulometrias previamente estabelecidas para cada percentual de substituição.

Figura 6: Processo de fabricação de corpos de prova



Fonte: próprio autor.

Após a confecção dos corpos de prova de acordo com os percentuais de substituição e granulometria estabelecidos, eles foram curados em água saturada (Figura 7) por períodos de 7, 14, 21 e 28 dias, conforme a NBR 5738 (2008).

Figura 7: Cura e ensaio de compressão



Fonte: próprio autor.

Após o período de cura, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão, com o objetivo de determinar suas propriedades mecânicas específicas (Figura 8).

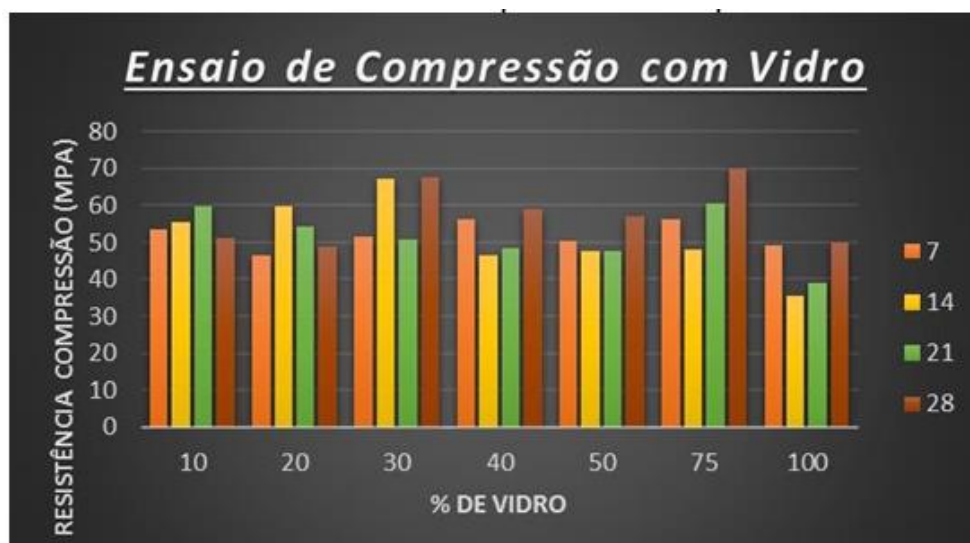
Figura 8: Corpos de prova após ensaio de compressão



Fonte: próprio autor.

Após o ensaio de compressão de cada corpo de prova, foi constatado a resistência mecânica de cada produto conforme a sua granulometria, podendo observar a tendência das médias da resistência à compressão (Tabela 4 e 5).

Tabela 4: Ensaio de compressão com pó de vidro



Fonte: próprio autor.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no ensaio de compressão para amostras contendo diferentes porcentagens de substituição por vidro, avaliadas nos períodos de cura de 7, 14, 21 e 28 dias. De modo geral, observa-se um aumento progressivo da resistência à compressão com o avanço da idade de cura, comportamento característico de materiais cimentícios devido à continuidade das reações de hidratação.

As amostras com 30% e 75% de vidro destacaram-se por apresentarem valores superiores de resistência, alcançando picos próximos a 65–70 MPa, principalmente aos 14 dias de cura. Esse resultado sugere que há uma proporção ótima de substituição, na qual a incorporação do vidro contribui para o preenchimento dos poros e para uma melhor compactação da matriz, favorecendo o ganho de resistência mecânica.

Por outro lado, as misturas com 10% e 100% de vidro apresentaram menores valores de resistência, indicando que tanto a baixa incorporação quanto a substituição total do agregado ou do material cimentício por vidro podem comprometer a integridade da matriz. No caso da substituição total, é provável que a ausência de material reativo suficiente reduza a coesão interna, enquanto percentuais muito baixos não proporcionam efeito significativo na microestrutura.

Após 28 dias, observa-se tendência de estabilização dos valores de resistência, indicando que o processo de cura atingiu um ponto de maturidade em que as reações de hidratação e o ganho de resistência se tornam menos expressivos. Assim, os resultados sugerem que a utilização de vidro em teores intermediários pode otimizar as propriedades mecânicas do material, configurando-se como uma alternativa viável para o aproveitamento de resíduos vítreos na construção civil.

Já na Tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão para o traço de referência, composto por 100% de areia como agregado fino, analisado nos períodos de cura de 7, 14, 21 e 28 dias. Observa-se um comportamento típico de ganho progressivo de resistência com o aumento do tempo de cura, o que está associado à continuidade das reações de hidratação do cimento

e à consequente formação de produtos cimentantes, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Tabela 5: Ensaio de compressão com 100% areia



Fonte: próprio autor.

No primeiro período avaliado (7 dias), a resistência apresentou valor elevado, evidenciando uma boa taxa inicial de hidratação e consolidação da matriz cimentícia. Entretanto, aos 14 dias, nota-se uma redução pontual da resistência, possivelmente associada à heterogeneidade das amostras, variações na relação água/cimento ou na distribuição granulométrica da areia.

A partir de 21 dias, verifica-se a retomada do ganho de resistência, com valores crescentes até os 28 dias, quando o material atinge aproximadamente 80 MPa. Esse comportamento indica que o processo de cura foi eficiente e que o compósito apresenta boa estabilidade estrutural após 28 dias, período convencionalmente adotado como referência para a avaliação das propriedades mecânicas de materiais à base de cimento.

De modo geral, os resultados confirmam que a mistura padrão (100% areia) apresenta desempenho satisfatório e coerente com os valores esperados para concretos de elevada densidade e boa coesão interna. Essa análise também permite estabelecer um parâmetro comparativo para os ensaios com substituições parciais por

vidro, de forma a avaliar os efeitos dessa modificação nas propriedades mecânicas do material.

A análise comparativa entre o traço de referência (100% areia) e os compósitos contendo diferentes percentuais de substituição por vidro revela variações significativas no comportamento mecânico ao longo do período de cura.

O material de referência apresentou tendência típica de ganho de resistência à compressão com o avanço da idade, atingindo aproximadamente 80 MPa aos 28 dias. Esse resultado confirma a eficiência da matriz cimentícia convencional, caracterizada por boa aderência entre o cimento e a areia, além de adequada compactação e baixa porosidade.

Em contrapartida, as amostras contendo vidro apresentaram desempenho variável conforme o percentual de substituição. Observou-se que os teores intermediários (30% e 75%) resultaram em resistências próximas ou, em alguns casos, superiores às do traço de referência, especialmente aos 14 dias de cura. Esse comportamento indica que o vidro moído pode atuar como material de enchimento (efeito *filler*), contribuindo para a redução da porosidade e para o refinamento da microestrutura, além de apresentar possível atividade pozolânica secundária.

Por outro lado, as substituições extremas (10% e 100%) resultaram em menores valores de resistência, sugerindo que tanto a baixa incorporação quanto a substituição total comprometem o equilíbrio entre a matriz cimentícia e os agregados. No caso da substituição total, a ausência de partículas minerais com rugosidade adequada e a menor aderência entre vidro e pasta de cimento tendem a reduzir a coesão interna e, conseqüentemente, a resistência mecânica.

Comparando os dois sistemas, verifica-se que a incorporação controlada de vidro pode ser benéfica, desde que mantida dentro de um limite que preserve a continuidade da matriz e o teor adequado de material reativo. Além disso, nota-se que o comportamento de ganho de resistência ao longo do tempo é semelhante em ambos os casos, com incremento mais expressivo até os 21 dias e estabilização após 28 dias.

Portanto, os resultados indicam que a substituição parcial de areia por vidro, especialmente em teores intermediários, pode ser uma alternativa tecnicamente

viável para o aproveitamento sustentável de resíduos vítreos na construção civil, sem comprometer as propriedades mecânicas do material e contribuindo para a redução do impacto ambiental associado ao descarte de vidro.

5. Considerações Finais

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão demonstram que a substituição parcial de areia por vidro influencia de maneira significativa o desempenho mecânico das amostras cimentícias. O traço de referência, composto por 100% de areia, apresentou comportamento previsível, com incremento gradual da resistência até atingir cerca de 80 MPa aos 28 dias, servindo como parâmetro de comparação.

Entre os traços modificados, observou-se que as proporções intermediárias de vidro (30% e 75%) proporcionaram os melhores resultados de resistência, indicando a existência de uma faixa ótima de substituição em que o vidro atua positivamente na densificação da matriz e na redução de porosidade. Já as substituições extremas, de 10% e 100%, resultaram em queda significativa de desempenho, possivelmente devido à menor interação entre as partículas vítreas e a pasta cimentícia.

De modo geral, os resultados evidenciam que a utilização de vidro moído como substituinte parcial de areia é tecnicamente viável, desde que aplicada em proporções adequadas. Além do bom desempenho mecânico, essa prática contribui para a valorização de resíduos vítreos e para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis, alinhados aos princípios da economia circular e da construção ecológica.

Recomenda-se, em trabalhos futuros, a investigação de ensaios complementares de durabilidade, absorção de água e análise microestrutural, de modo a aprofundar a compreensão sobre os mecanismos que regem a interação entre o vidro e a matriz cimentícia e consolidar sua aplicação em escala prática.

Referências

ABCP (2002), Boletim Técnico 106: Guia básico de utilização de cimento Portland, 7 ed, São Paulo, ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland.



ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em:
<https://abcp.org.br/cimento/> . Acesso: 26 de novembro de 2022.

ABIVIDRO. História do vidro. Disponível em:
<http://www.abividro.org.br/index.php/18>>. Acesso em 20 de setembro de 2022.

ABIVIDRO. Manual do vidro. Disponível em: [https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro Manual Tecnico-do-Vidro Plano Edificacoes.pdf](https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro_Manual_Tecnico-do-Vidro_Plano_Edificacoes.pdf)
 Acesso em: 20 de setembro de 2022.

ABIVIDRO. Vidro Segurança nas Edificações Disponível em:
https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2016/11/AF_-_ABV_Dossie_SEG_NP2.pdf
 Acesso em 23 de setembro de 2022.

ABRE. Associação Brasileira de Embalagem. Disponível em:
<http://www.abre.org.br/setor/dados-de-mercado/>. Acesso em:
 06 de janeiro de 2023.

ABNT. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. NBR 9935: Agregados: terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT. NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT. NBR NM 52: Agregado miúdo-Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. NBR NM 53: Agregado graúdo-determinação de massa específica e massa aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. NBR NM ISO 3310-1 - Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.

ABNT. NBR: 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. NBR NM 67/1996: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

ABNT. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.



ABNT. NBR 6467: Agregado – Determinação do inchamento de agregados miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações. Incorpora a Errata 1, de 25/06/2019. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR-7199: Projeto execução e aplicações de vidros na construção civil. Rio de Janeiro, 1989.

ABRAVIDRO. Disponível em: <https://abravidro.org.br/fique-por-dentro/vidro-de-a-a-z/page/3/>. Acesso em: 30 de setembro de 2022.

ABRELPE. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/> Acesso em: 25 de setembro de 2022.

A.C. M. Rodrigues, O. Peitl, “Reciclagem de vidros no Brasil: Um panorama geral”, in: El reciclado del vidrio em Iberoamérica. Madrid, CYTED (1999) p. 33-46

Agencia de Proteção Ambiental dos EUA – Disponível em: <https://www.epa.gov/> Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

Ambev. Disponível em: <https://ambev.com.br>. Acesso: 15 de dezembro de 2022.

Análise do Aproveitamento de Resíduos da Construção Civil da cidade de Campina Grande. Disponível em:

<https://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/4992/1/PDF%20-%20C3%8Dtala%20Farias%20Almeida.pdf>. Acesso em: 06 de dezembro de 2022.

Aproveitamento de Resíduos Domésticos de Vidro para Pavimentação Urbana. Disponível em: - <https://www.epa.gov/>. Acesso em: 15 de dezembro de 2022.

AKERMAN, M. Natureza, estrutura e propriedades do vidro. Centro Técnico de Elaboração de Vidros, Saint Gobain Vidros BRASIL, 2000.

Avaliação de vidro reciclado granulado como meio filtrante de herbicidas em meio aquoso. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/n3hzB3Bgx5KXM6vy9C38BCM/?lang=pt&format=pdf> Acesso em: 17 de novembro de 2022.

BASTOS, P.S. Fundamentos do concreto armado. Bauru: UNESP, 2006.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção: v.1. Livros Técnicos e Científicos, 2012.

CEBRACE. Disponível em: <http://www.cebrace.com.br/v2/cebrace>. Acesso: 05 de dezembro de 2022.

Central de Custódia de Logística Reversa. Disponível em:

<https://centraldecustodia.com.br/> . Acesso em: 11 de janeiro de 2023.

Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos – 1998.3. Disponível: <https://wwwp.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/HistoriadoConcreto.pdf> Acesso: 22 de setembro de 2022.

CNQ. Disponível em: <http://cnq.org.br/> Acesso em 28 de dezembro de 2022.

Decreto nº 11.044. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11044.htm . Acesso em 10 de janeiro de 2023.

Fundamentos de concreto armado. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Fundamentos%20CA.pdf> Acesso: 23 de novembro de 2022.

Lei 12.305/2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 20 de dezembro de 2022.

LÓPEZ, D. A. R.; DE AZEVEDO, C. A. P.; NETO, E. BARBOSA. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. Cerâmica, v. 51, p. 318-324, 2005.

Green Mining. Disponível em: <https://greenmining.com.br/> Acesso: 12 de janeiro de 2023.

Massfix – disponível em: <https://epuroevidro.com/ciclo-do-vidro/> Acesso: 12 de janeiro de 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo, Editora IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2a ed., Tradução por Salvador E. Giammuso, São Paulo: Editora Pinni, 1997, 749 p.

O uso de vidro reciclado na confecção de membranas para microfiltração. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/BJGHZLz6n7F7NR4Yn7rLhqp/?lang=pt&format=pdf> Acesso: 18 de outubro de 2022.

PETRUCCI, E. G. R. Materiais de construção. 13. Ed. São Paulo: Globo, 1998.
PETRUCCI, E. G. R. Concreto de cimento Portland. 14. Ed. São Paulo: Globo, 2005.
SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W. Química Inorgânica. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2008, 848p.

Setor Vidreiro: Inovações e Ações compensatórias ao impacto ambiental provocado pelo uso de matéria prima não renovável. Disponível em: <http://www.uniedu.sed.sc.gov.br/> Acesso em: 15 de dezembro de 2022.

Resíduos da construção civil: um panorama sobre o descarte no Brasil. Disponível



em: <https://blog.brkambiental.com.br/residuos-da-construcao-civil/> Acesso:
Viabilização de rejeitos de vidro para produção de tijolos cerâmicos – Disponível em:
<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1555> Acesso em: 20 de
outubro de 2022.

W. R. Malisch, D. E. Day, B. G. Wixson, “Use of Domestic Waste Glass for Urban Paving”. National Environmental Research Center, U.S. Environmental Protection Agency, Summary Report EPA-670/2-75-053 (1975).