UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE SOBRE O POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DO PÓ DE VIDRO PARA REDUÇÃO DA POROSIDADE E GANHO DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO

KAIO CESAR LIMA DE SOUSA

POMBAL-PB
2026

KAIO CESAR LIMA DE SOUSA

ANÁLISE SOBRE O POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DO PÓ DE VIDRO PARA REDUÇÃO DA POROSIDADE E GANHO DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Borges da Nóbrega

POMBAL – PB

2026

S725a Sousa, Kaio Cesar Lima de.

Análise sobre o potencial da utilização do pó de vidro para redução da porosidade e ganho de resistência do concreto / Kaio Cesar Lima de Sousa. – Pombal, 2026.

72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2026.

"Orientação: Prof. Dr. Raphael Borges da Nóbrega".

Referências.

1. Produção de concreto. 2. Pó de vidro - Material alternativo. 3. Absorção de água. 4. Resistência à compressão. 5. Sustentabilidade. I. Nóbrega, Raphael Borges da. II. Titulo.

CDU 691.32(043)

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Auxiliadora Costa (CRB 15/716)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

KAIO CESAR LIMA DE SOUSA

ANÁLISE SOBRE O POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DO PÓ DE VIDRO PARA REDUÇÃO DA POROSIDADE E GANHO DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso do discente KAIO CESAR LIMA DE SOUSA. **APROVADO** em 20/03/2026 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

Registre-se e publique-se.

gov.br Documento assinado digitalmente
RAPHAEL BORGES DA NOBREGA
Data: 27/03/2026 11:23:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador – Prof. Dr. Raphael Borges da Nóbrega
(UACTA/CCTA/UFCG)

gov.br Documento assinado digitalmente
FERNANDA KAROLLINE DE MEDEIROS
Data: 27/03/2026 11:51:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Membro Interno – Profa. Dra Fernanda Karolline de Medeiros
(UACTA/CCTA/UFCG)

UNIVERSIDADE FEDERAL UFERSA RURAL DO SEMI-ÁRIDO
Assinado digitalmente por EDUARDO MORAIS DE MEDEIROS:06778859466
Razão: Eu atesto a precisão e a integridade deste documento
Localização: Caraúbas/RN
Data: 2026.03.27 07:29:49-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 2025.2.0

Membro Externo – Prof. Dr. Eduardo Morais de Medeiros
(UFERSA – Campus Caraúbas)

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre comigo e ter me dado forças para vencer as batalhas diárias que foram me impostas, me concedendo paciência e luz para me guiar na vida acadêmica.

Ao meu pai, Carlos Alberto de Sousa, por todo amor, apoio e confiança que foi depositada em mim.

À minha mãe, Aldenoura Lima de Sousa, que tanto me apoiou e orou pelas minhas vitórias, sendo minha fonte inesgotável de motivação e amor.

Às minhas irmãs Karla Cynthya e Katiane Kelly que sempre me ajudaram e me apoiaram em toda minha jornada.

À minha namorada, Sarah Sousa pelo amor, apoio e toda motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raphael Borges da Nóbrega por todos os ensinamentos, conselhos, dedicação e paciência que me foi concedido.

Ao técnico de laboratório Francisco Eudes Araújo de Medeiros, por tanto ter me ajudado e repassado conhecimento para execução desta pesquisa.

À banca examinadora, pelo comprometimento, respeito e avaliação deste trabalho.

À Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar – CCTA, por toda estrutura, corpo docente e serviços disponibilizados para minha formação.

Aos meus colegas de curso, em especial à Thaysse Gizia, que me ajudou e esteve comigo do início ao fim da minha jornada acadêmica.

A todos os meus familiares que de alguma forma me apoiaram e me motivaram na minha trajetória, em especial a minha falecida tia Edina Maria de Sousa, que tanto sonhou com esse momento.

A todos que fizeram parte da minha formação que não foram aqui mencionados, mas que contribuíram para o meu desenvolvimento e crescimento durante minha jornada.

OBRIGADO!

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o potencial da utilização do pó de vidro na produção de concreto, avaliando sua influência na redução da porosidade e no ganho de resistência mecânica do material. A pesquisa foi motivada pela necessidade de alternativas sustentáveis na construção civil, considerando o reaproveitamento de resíduos e a redução do impacto ambiental associado à produção de cimento e ao descarte de vidro. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o uso de pó de vidro no concreto. Em seguida, foram caracterizados os materiais utilizados, incluindo agregados miúdo e graúdo, cimento e pó de vidro, por meio de ensaios granulométricos e determinações de propriedades físicas. Posteriormente, foram produzidos diferentes traços de concreto com teores variados de 0%, 5%, 10 % e 15 % de adição de pó de vidro, sendo avaliadas propriedades no estado fresco e endurecido, como consistência, resistência à compressão e absorção de água. O ensaio de abatimento de tronco de cone (slump test), realizado no concreto fresco para as diferentes concentrações de pó de vidro investigadas, indicou que a consistência se manteve dentro dos limites especificados. Os resultados indicaram que teores moderados de adição de pó de vidro contribuíram para melhorias no desempenho mecânico do concreto, especialmente para substituições de 5% e 10%, que apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão aos 28 dias. Em contrapartida, teores mais elevados mostraram tendência no aumento de absorção, possivelmente associada ao aumento da porosidade e alterações na matriz cimentícia. Dessa forma, conclui-se que o pó de vidro apresenta potencial de aplicação como material alternativo na produção de concreto, desde que utilizado em proporções adequadas, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis na construção civil.

Palavras-chave: Absorção de água; concreto; pó de vidro; resistência à compressão; sustentabilidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Etapas de moagem do vidro 29
Figura 2 - Amostras do agregado miúdo 31
Figura 3 - Amostras do agregado graúdo 32
Figura 4 - Corpo cilíndrico preenchido com agregado miúdo 33
Figura 5 - Agregado miúdo em condição de saturada superfície seca 35
Figura 6 - Amostra com 500g do agregado miúdo 35
Figura 7 - Frasco Erlenmeyer 36
Figura 8 - Agregado graúdo submerso 37
Figura 9- Agregado Graúdo depositado em cesto 37
Figura 10 - Frasco volumétrico 40
Figura 11 - Amostra do cimento 40
Figura 12 - Mistura dos materiais na betoneira 42
Figura 13 - Concreto fresco 42
Figura 14 - Proferição de golpes 43
Figura 15 - Medição do abatimento 44
Figura 16 - Corpos de prova moldados 44
Figura 17 – Corpos de prova submersos 45
Figura 18 - Curva granulométrica do agregado miúdo 51
Figura 19 - Curva granulométrica do agregado graúdo 53
Figura 20 - Absorção de água 56
Figura 21 - Índice de vazios 57
Figura 22 - Massa específica da amostra seca 57
Figura 23 - Massa específica da amostra saturada 58
Figura 24 - Massa específica real 58
Figura 25 - Índices de Resistência à Compressão 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais contribuições das pesquisas sobre pó de vidro no concreto 26
Tabela 2 - Propriedades do Cimento CP II F-32 27
Tabela 3 - Limites de composição granulométrica do agregado miúdo 30
Tabela 4 - Limites de composição granulométrica do agregado graúdo 31
Tabela 5 - Traço em massa para confecção de corpos de prova..... 41
Tabela 6 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia) 50
Tabela 7 - Composição granulométrica do agregado graúdo (brita)..... 52
Tabela 8 - Análises físicas dos agregados..... 54
Tabela 9 - *Slump test* 55
Tabela 10 - Ganho de Resistência em relação ao traço convencional 60

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

CP II-F-32 – Cimento Portland composto com fíler calcário, classe 32 MPa

NBR – Norma Brasileira

SNIC - Sindicato Nacional Da Indústria Do Cimento

ρ – Massa específica (g/cm³)

ρs – Massa específica do agregado seco (g/cm³)

ρsss – Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm³)

M – Massa

V – Volume (m³)

A – Absorção de água (%)

Cb – Consumo de agregado graúdo (kg/m³)

Cm – Consumo de agregado miúdo (kg/m³)

Cc – Consumo de cimento (kg/m³)

Ca – Consumo de água (L/m³)

MPa – Megapascal

GPa – Gigapascal

N - Newton

kg – Quilograma

g – Grama

m³ – Metro cúbico

mm - milímetros

L/m³ – Litro por metro cúbico

% – Porcentagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
1.1 Contextualização 12
1.2 Justificativa 13
1.3 Objetivos 14
1.3.1 Objetivo Geral 14
1.3.2 Objetivos Específicos 14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16
2.1 Agregados 16
2.1.1 Agregado miúdo 16
2.1.2 Agregado graúdo 16
2.2 Cimento Portland 16
2.2.1 Tipos de cimento 17
2.2.2 Cura do Concreto 18
2.3 Produção de cimento e impactos ambientais 19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
4. MATERIAIS E MÉTODOS 27
4.1 Materiais 27
4.1.1 Agregados 27
4.1.1.1 Agregado Miúdo 27
4.1.1.2 Agregado Graúdo 27
4.1.2 Cimento 27
4.1.3 Água 28
4.1.4 Vidro 28
4.2 Métodos 28
4.2.1 Obtenção do Pó de Vidro 28
4.2.2 Caracterização dos Materiais 29
4.2.2.1 Análise Granulométrica dos agregados miúdos e graúdos 29
4.2.2.1.1 Agregado miúdo 29
4.2.2.1.2 Agregado graúdo 31
4.2.2.2 Análise granulométrica do Vidro 32
4.2.2.3 Massa Unitária e Massa Unitária Compactada dos agregados miúdos e graúdos 33
4.2.2.4 Determinação de massa específica do agregado miúdo 34

4.2.2.5 Determinação de massa específica do agregado graúdo 36
4.2.2.6 Determinação de massa específica do vidro 39
4.2.2.7 Determinação de massa específica do cimento 39
4.2.3 Mistura e Preparo do Concreto 41
4.2.4 Caracterização do concreto no estado fresco 43
4.2.4.1 Slump Test 43
4.2.5 Moldagem dos corpos de prova 44
4.2.6 Cura dos corpos de prova 45
4.2.7 Caracterização do concreto no estado endurecido 45
4.2.7.1 Resistência à Compressão 45
4.2.7.2 Absorção de água 46
4.2.7.3 Índice de Vazios 47
4.2.7.4 Massa específica da amostra seca 48
4.2.7.5 Massa específica da amostra saturada 48
4.2.7.6 Massa específica da amostra real 48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 50
5.1 Análise Granulométrica dos agregados miúdos e graúdos 50
5.1.1 Agregado miúdo 50
5.1.2 Agregado graúdo 51
5.2 Massa Específica e Unitária 53
5.2.1 Massa específica 54
5.2.2 Massa Unitária e Massa Unitária Compactada dos agregados miúdos e graúdos 54
5.3 Análise do concreto no estado fresco 55
5.3.1 Slump Test 55
5.4 Análise do concreto no estado endurecido 56
5.4.1 Absorção de água 56
5.4.2 Resistência a compressão 59
6. CONCLUSÕES 61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62
APÊNDICES 66
Apêndice A - Dosagem do concreto 66

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O concreto é um dos materiais mais empregados na Engenharia Civil, desempenhando papel fundamental no desenvolvimento da infraestrutura urbana e industrial. Sua ampla utilização está associada, principalmente, à elevada resistência aos esforços de compressão, à durabilidade, à versatilidade de aplicação e ao custo relativamente reduzido. Em razão dessas características, o concreto é amplamente utilizado em edificações, obras de infraestrutura, pavimentação e elementos estruturais diversos, se consolidando como um material indispensável à construção civil contemporânea.

O concreto pode ser definido como um material compósito constituído por cimento, água e agregados, no qual o cimento atua como aglomerante hidráulico, promovendo a ligação entre os componentes por meio das reações de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). De acordo com Neville e Brooks (2013), a água desempenha papel fundamental no processo de hidratação do cimento, pois ativa as reações químicas do concreto e transforma o cimento em pó em uma pasta sólida e resistente. Entretanto, a relação água/cimento deve ser cuidadosamente controlada, visto que o excesso de água pode elevar a porosidade e reduzir a resistência do concreto, enquanto a sua insuficiência pode comprometer a hidratação e o desempenho mecânico do material.

O avanço das pesquisas e o desenvolvimento tecnológico na área da Engenharia Civil têm possibilitado a introdução de modificações na composição convencional do concreto, seja por meio da adição de novos materiais, ou pela substituição parcial de seus componentes. Essas modificações visam melhorar propriedades específicas do concreto, como resistência mecânica, durabilidade, redução da porosidade e desempenho em condições ambientais críticas, adequando-o às exigências técnicas e normativas dos projetos estruturais.

Paralelamente aos avanços técnicos na incorporação de materiais na construção civil, o setor enfrenta o desafio de reduzir os impactos ambientais associados ao elevado consumo de recursos naturais e da geração de resíduos sólidos. Nesse cenário, a utilização de materiais alternativos na produção do concreto se apresenta como uma estratégia viável e sustentável. A incorporação de resíduos industriais e materiais recicláveis no concreto tem se mostrado uma estratégia promissora, por contribuir para a redução de custos e do consumo de matérias-primas naturais (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Entre os materiais alternativos investigados na literatura, o pó de vidro possui o potencial de ser uma alternativa promissora para a melhoria do desempenho do concreto.

Segundo Lopes et al (2021), o vidro é um material rico em sílica amorfa possuindo um bom potencial de utilização em materiais como o concreto.

Diante desse contexto, a realização de estudos que analisem o potencial da utilização do pó de vidro na composição do concreto é de suma importância, com foco na redução da porosidade e no ganho de resistência mecânica. A investigação desse material alternativo busca contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficientes, sustentáveis e tecnicamente viáveis.

1.2 Justificativa

A evolução da Engenharia Civil está diretamente relacionada ao aprimoramento dos materiais empregados na construção, em especial do concreto, que permanece como o principal material estrutural utilizado no setor. Embora apresente vantagens como resistência à compressão, durabilidade e viabilidade econômica, o concreto convencional pode ter seu desempenho limitado em determinadas condições de exposição, sobretudo quando submetido à ação de agentes agressivos do meio ambiente, como as substâncias nocivas presentes em esgotos convencionais. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de alternativas que permitam melhorar suas propriedades e ampliar sua vida útil.

Conforme discutido por Mehta e Monteiro (2014), a utilização de adições minerais e a incorporação de materiais finos promovem alterações significativas na microestrutura do concreto, resultando em melhor empacotamento das partículas, redução da porosidade e a consequente diminuição da permeabilidade, fatores diretamente relacionados ao aumento da durabilidade do concreto.

Nesse contexto, a busca por materiais alternativos ganha destaque, especialmente diante das crescentes exigências por soluções sustentáveis na construção civil. O que torna essencial a adoção de práticas que promovam o reaproveitamento de materiais e a redução dos impactos ambientais. A substituição parcial de insumos convencionais por resíduos industriais ou recicláveis se manifesta como uma alternativa técnica e ambientalmente viável, além de contribuir para a redução de custos e para a preservação de recursos naturais.

Dentre os materiais alternativos com potencial de aplicação no concreto, o pó de vidro se destaca por suas características físicas e químicas favoráveis. O vidro é um material rico em sílica, possui comportamento inerte e tem elevado potencial de preenchimento na matriz do concreto. Esse efeito contribui para a redução da porosidade e da absorção de água, fatores diretamente relacionados à durabilidade e ao desempenho mecânico do concreto. Essa

contribuição ocorre por meio do efeito fíler que está relacionado ao preenchimento dos vazios entre as partículas do concreto pelo pó de vidro, promovendo melhor empacotamento e redução da porosidade (FELTRIN E ISAIA, 2018).

Outro aspecto relevante associado à utilização do pó de vidro é a sua contribuição ambiental. A incorporação do vidro moído no concreto representa uma alternativa eficiente para a destinação adequada desse resíduo, reduzindo o volume de material descartado em aterros sanitários e os impactos ambientais associados. Além disso, a utilização de materiais convencionais pode reduzir a extração de recursos naturais, como areia, contribuindo para a preservação ambiental. A redução no consumo de matérias-primas naturais e o aproveitamento de resíduos podem levar à diminuição dos custos de produção. Entretanto, deve-se considerar custos adicionais associados à coleta, seleção, limpeza e moagem do vidro, que podem influenciar a viabilidade econômica do processo.

Essa abordagem sobre a redução de impactos ambientais está alinhada com os objetivos propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), especificamente no que se refere a ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) que incentiva as práticas de construções sustentáveis e também a ODS 12 (Consumo e Produções Responsáveis) que promove a gestão eficiente de recursos e a redução de resíduos.

Dessa forma, este trabalho se justifica pela necessidade de investigar o potencial do pó de vidro como material alternativo na produção de concreto, com foco na redução da porosidade e no aumento da resistência mecânica. A relevância do estudo está associada à possibilidade de contribuir para o desenvolvimento de concretos mais duráveis, sustentáveis e economicamente viáveis.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar o potencial da utilização do pó de vidro na redução da porosidade e no ganho de resistência mecânica do concreto.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma caracterização granulométrica dos agregados miúdos e graúdos e do pó de vidro.
- Determinar os dados sobre massas especificas e massas unitárias.

- Verificar a consistência do concreto com adição de pó de vidro através do *Slump test*.
- Avaliar a resistência mecânica à compressão de amostras de concreto com adição de pó de vidro.
- Determinar os dados de absorção para analisar a porosidade do concreto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, a partir de estudos presentes na literatura sobre o comportamento do concreto e a incorporação de materiais alternativos, como o pó de vidro, bem como seus efeitos nas propriedades do concreto.

2.1 Agregados

Segundo BATLOUNI NETO (2016), os agregados são materiais granulares, de origem mineral e natureza inorgânica, geralmente inertes, sem tamanho e forma definidos, que têm por objetivo compor argamassas e concretos. Esses materiais representam a maior parcela do volume do concreto e exercem influência significativa em suas propriedades físicas e mecânicas, contribuindo para a resistência, durabilidade e estabilidade do material.

De acordo com a granulometria, os agregados podem ser classificados em agregados miúdos, como as areias, e agregados graúdos, como as britas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.1 Agregado miúdo

De acordo com a NBR 7211 (2022), os agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira de abertura nominal de 4,8 mm, sendo a areia (natural de rios ou artificial) o exemplo mais comum

2.1.2 Agregado graúdo

Os agregados graúdos são constituídos por materiais como brita (pedra triturada) ou pedregulhos, cujos grãos ficam retidos na peneira de 4,8 mm, apresentando diferentes faixas granulométricas. Os agregados graúdos são classificados conforme ABNT NBR 7211 (2022) e usualmente designados como brita 0, 1, 2, 3 ou 4.

Nessa nomenclatura, a menor numeração corresponde às frações de menor dimensão característica, enquanto as maiores numerações estão associadas a agregados de maior dimensão granulométrica.

2.2 Cimento Portland

Segundo a NBR 16697(2018), o Cimento Portland é definido como um ligante hidráulico essencial na composição do concreto, sendo obtido pela moagem de clínquer

Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) o cimento é composto predominantemente por clínquer, apresentando variações em suas propriedades em função da adição de outros materiais. Entre esses, destaca-se o gesso, cuja função é regular o tempo de pega; a escória de alto-forno, que contribui para o aumento da durabilidade, especialmente em ambientes com presença de sulfatos, embora, em elevadas proporções, possa reduzir a resistência mecânica; as adições pozolânicas, como a argila, que proporcionam maior impermeabilidade ao concreto; e o calcário, frequentemente utilizado em maiores quantidades com o objetivo de reduzir o custo de produção do cimento.

O cimento Portland atua como o principal aglomerante do concreto, sendo responsável pela ligação entre os agregados por meio das reações de hidratação, que promovem o desenvolvimento da resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dessa forma, o cimento desempenha um papel fundamental na produção de concreto, sendo um aglomerante altamente empregado nas obras.

2.2.1 Tipos de cimento

As características do cimento influenciam diretamente as propriedades dos concretos, podendo ser observados comportamentos diferenciados para misturas produzidas com cimentos distintos. Segundo PUGLIESI (2018) e a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), existem no Brasil vários tipos de cimento, embora todos sejam indicados para uso geral na construção civil, há diferenças entre eles.

- **Cimento CP-I ou Cimento Portland Comum:** recebe este nome porque não possui nenhum tipo de aditivo, apenas o gesso, que tem a função de retardar o início de pega do cimento para possibilitar mais tempo na aplicação. Tem alto custo e menos resistência. Sua produção é direcionada para a indústria.
- **Cimento CP-II ou Cimento Portland Composto:** assim conhecido porque tem a adição de outros materiais na sua mistura, que conferem a este cimento um menor calor de hidratação, resultando em uma menor liberação de calor quando entra em contato coma água. O CP II apresenta três variações: CP II-E, que contém adição de escória de alto-forno; CP II-Z, que possui adição de material pozolânico; e CP II-F, que apresenta adição de material carbonático (fíler).

- **Cimento CP-III ou Cimento Portland de Alto-forno:**tem em sua composição de 35% a 70% de escória de alto-forno. Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É menos poroso e mais durável.
- **Cimento CP-IV ou Cimento Portland Pozolânico:** tem em sua composição de 15% a 50% de material pozolânico. Por isso, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. Possui baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. É pouco poroso, sendo resistente à ação da água do mar e de esgotos.
- **Cimento CP-V ARI ou Cimento Portland de Alta Resistência Inicial:** em função do seu processo de fabricação, tem alta reatividade nas primeiras horas de aplicação, fazendo com que atinja resistências elevadas em um curto intervalo de tempo. Ao final dos 28 dias de cura, também atinge resistências maiores que os cimentos convencionais. É muito utilizado em obras industriais que exigem um tempo de desforma menor. É recomendado apenas para a fabricação de concretos.
- **Cimento RS ou Cimento Portland Resistente a Sulfatos:** Os materiais sulfatados estão presentes em redes de esgoto, ambientes industriais e água do mar. Sendo assim, seu uso é indicado para construções nesses ambientes.
- **Cimento Branco ou Cimento Portland Branco (CPB):** apresenta como principal característica a coloração branca, resultante do emprego de matérias-primas com baixo teor de manganês e ferro, além da utilização de caulim em substituição à argila. Existem dois tipos de cimento branco: o estrutural, indicado para fins arquitetônicos, porém com menor utilização atualmente em razão do avanço tecnológico das tintas; e o não estrutural, indicado para rejuntes de cerâmicas.
- **Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC):** este tipo de cimento tem a propriedade de retardar o desprendimento de calor em peças de grande massa de concreto, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica, devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento.

A disponibilidade dos tipos de cimento no Brasil varia entre as regiões, em função da maior disponibilidade local de matérias-primas utilizadas como adições em sua composição.

2.2.2 Cura do Concreto

Segundo a NBR 14931 (2023), a cura do concreto consiste no conjunto de procedimentos realizados após a moldagem, com o objetivo de controlar a umidade e a

temperatura do material, assegurando a continuidade das reações de hidratação do cimento e evitando a perda prematura de água da mistura.

Segundo o *American Concrete Institute* (2016), a cura do concreto envolve práticas e procedimentos destinados à manutenção da umidade e temperatura adequadas para o desenvolvimento de suas propriedades. Os métodos de cura do concreto segundo o ACI 308 (2016) podem ser classificados em:

- Cura com água: O procedimento adotado deve assegurar a manutenção de uma camada contínua de água sobre a superfície, livre de substâncias prejudiciais. Os principais métodos utilizados são por aplicação contínua de água ou imersão total do concreto, sendo considerado um dos métodos mais eficazes de cura.
- Cura por materiais seladores: Consiste em membranas ou películas aplicadas sobre o concreto com o objetivo de reduzir a evaporação da água. São amplamente utilizados devido à facilidade de aplicação e eficiência na retenção de umidade. Os compostos formadores dessa membrana são baseados em películas plásticas, papel impermeável e compostos líquidos.
- A cura em clima frio: Nessas condições, a cura deve ser acompanhada de medidas de proteção contra o congelamento, sendo necessário que o concreto deve atingir resistência mínima antes de ser exposto a baixas temperaturas.
- A cura em clima quente: Nessas condições, a evaporação da água ocorre de forma acelerada, exigindo cuidados especiais. A cura deve ser contínua, evitando ciclos de secagem e umedecimento, que podem comprometer o desempenho do concreto.
- A cura a vapor: É utilizada principalmente em elementos pré-moldados, permitindo acelerar o ganho de resistência e reduzir o tempo de produção.

Portanto, a cura do concreto é uma etapa fundamental, pois está diretamente relacionada ao desenvolvimento de suas propriedades mecânicas e à durabilidade, uma vez que garante a adequada hidratação do cimento e reduz a ocorrência de fissuras e perda de resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.3 Produção de cimento e impactos ambientais

A indústria da construção civil representa um setor de grande expressividade econômica no Brasil e no mundo, compreendendo atividades relacionadas à construção de edificações e obras de infraestrutura.

Neste sentido, a crescente preocupação com as questões ambientais, associada à limitação dos recursos naturais, tem impulsionado a busca por alternativas e práticas alinhadas

aos princípios do desenvolvimento sustentável. A sustentabilidade das atividades econômicas configura-se como um dos principais desafios enfrentados pela sociedade contemporânea (MOTA, 2011).

Dados do SNIC (2022) revelaram que a produção de cimento alcançou 63,5 milhões de toneladas, resultando em elevadas emissões de CO_2 associadas ao seu processo de fabricação, principalmente em função da queima de combustíveis fósseis e das reações químicas envolvidas.

Diante desse panorama, diferentes estudos têm buscado alternativas capazes de reduzir o impacto ambiental associado à produção de cimento e concreto. Entre as estratégias investigadas destaca-se a incorporação de materiais suplementares ou resíduos na composição do concreto, com o objetivo de reduzir o consumo de cimento Portland e avaliar a viabilidade técnica do reaproveitamento desses materiais na produção

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo estão apresentadas as principais contribuições das pesquisas reportadas na literatura que abordam a utilização de materiais como o pó de vidro no concreto, buscando reduzir o consumo de recursos naturais, minimizar impactos ambientais e apresentar alternativas economicamente viáveis.

López *et al*. (2005) avaliaram a viabilidade técnica do uso de vidro não reciclado como agregado no concreto, por meio da análise comparativa das propriedades mecânicas de concretos com e sem a incorporação desse material, visando aplicações estruturais. Foram analisadas a substituição parcial da areia por vidro moído e a adição de vidro moído à massa de areia. Os resultados demonstraram que a substituição de 5% em massa do agregado miúdo por vidro com granulometria entre 150 e 300 μm proporcionou um aumento aproximado de 60% na resistência à compressão, associado à redução da porosidade do concreto. Outras faixas granulométricas também apresentaram ganhos de resistência, embora em menor magnitude. Já a adição de vidro moído apresentou o melhor desempenho obtido com a incorporação de 5% em massa de vidro fino, resultando em um aumento de 56,6% na resistência à compressão em relação ao concreto de referência.

Nogueira (2010) investigou a reação álcali-agregado (RAA) associada ao uso de vidro no concreto. O principal objetivo do trabalho foi abordar, com base em pesquisas, o histórico da reação álcali-agregado no Brasil e no mundo, seus principais tipos, os aspectos químicos e as condições de ocorrência, bem como as medidas de prevenção, detecção e mitigação, conforme as diretrizes estabelecidas pelas normas brasileiras, visando à compreensão do problema e das estratégias para evitar sua manifestação. O autor apontou que a sílica amorfa presente no vidro possui alta reatividade, o que pode gerar reações com os álcalis do cimento, resultando em expansões e fissuras. Dessa forma, destacou a necessidade de controle da concentração de vidro e a utilização de materiais pozolânicos para reduzir a reatividade, como escória de alto-forno, sílica ativa e outros aditivos.

Gomes e Pelisser (2011) analisaram o desempenho mecânico de concretos com adição de vidro reciclado proveniente de retalhos de vidraçarias. Ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e plasticidade, foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho do concreto. Os autores concluíram que, embora tenha havido aumento das propriedades mecânicas, os ganhos de resistência não foram expressivos. No entanto, os autores evidenciaram a viabilidade do uso de vidro reciclado considerando o controle da concentração de pó de vidro e a qualidade do material.

Tinoco e Júnior (2018) realizaram uma revisão bibliográfica sobre o uso de vidro moído como substituto do agregado miúdo no concreto. O trabalho reuniu diversos estudos e analisou diferentes fatores, como a função do agregado miúdo, limitações da areia, o problema ambiental do descarte de vidro e o comportamento do vidro como agregado fino. Seu principal objetivo foi alinhar informações já obtidas em outros artigos, livros e pesquisas com o intuito de avaliar viabilidade e limitantes do uso do material no concreto. A revisão evidenciou a necessidade de aprofundamento de pesquisas sobre os parâmetros mecânicos e físicos do concreto com vidro, uma vez que os estudos analisados indicaram aumento da resistência mecânica após o endurecimento, bem como redução do índice de vazios e da permeabilidade do concreto. No entanto, as pesquisas indicaram que embora seja viável o uso do pó de vidro, sua substituição no concreto necessita que seja limitada.

Luiz *et al*. (2018) estudaram o uso de sucatas de vidro derivadas da moagem de garrafas *longneck* como agregado fino, substituindo a areia usada na produção de concreto. Os autores utilizaram traços de 0, 5, 10, 15, 20% nas proporções de adição de pó de vidro. Os melhores resultados foram obtidos com a adição de 20% de pó de vidro em massa, evidenciando o potencial de reciclagem do resíduo e a redução do descarte. De acordo com os autores, os resultados indicam que, para uma aplicação em larga escala, são necessários estudos aprofundados sobre as reações químicas, o comportamento físico dos materiais e a viabilidade econômica de todo o processo.

Santos *et al*. (2018) analisaram as propriedades mecânicas de concretos produzidos com resíduo de vidro recolhidos em vidraçarias. Foram realizados ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade em corpos de prova sem tratamento térmico e em corpos com tratamento térmico (aquecidos por 30 minutos a 600 °C). A pesquisa contou com 4 traços diferentes, porém com a mesma relação água/cimento de 0,5. Os traços continham 0%, 5%, 20% e 40% de substituição do agregado graúdo por vidro. Os autores observaram nos resultados que todos os concretos estudados apresentaram resultados acima dos 25 MPa, sendo destaque o concreto não aquecido com substituição de 5%, que teve um melhor desempenho em resistência à compressão em relação aos outros, chegando a 40,24 MPa. Levando em consideração a análise do módulo de elasticidade, os resultados evidenciaram uma redução quando comparados os concretos não aquecidos com os aquecidos. O traço com 40% de vidro, obteve o maior módulo (34,4 GPa) para concretos não aquecidos eo menor valor (15,9 GPa) para concretos aquecidos. Os autores ressaltaram que essas características tornam o vidro promissor para diversas aplicações e concluíram que todos os concretos com substituição de

brita por vidro são viáveis para aplicação estrutural, pois todos alcançaram uma resistência à compressão acima do previsto pela norma. Com relação ao módulo de elasticidade, os resultados indicam que todos os concretos com substituição que não foram aquecidos apresentaram comportamento satisfatório. Em contrapartida, quando se avaliou os concretos aquecidos, concluíram que não mantêm um comportamento aceitável para sua finalidade.

Barbosa *et al*. (2021) analisaram a substituição parcial do agregado miúdo por pó de vidro laminado coletado em vidrarias de Palmas (TO), no concreto autoadensável empregando o método de dosagem proposto por Tutikian e Dal Molin. Foram testadas proporções de 10%, 20% e 40% de substituição. Os resultados mostraram que em relação ao desempenho mecânico, todos os teores de substituição apresentaram resultados positivos, alcançando, em média os 40 MPa estabelecidos na dosagem. No entanto, o teor ótimo de substituição foi o de 20%, pois demonstrou um desempenho mecânico satisfatório, boa fluidez, coesão e viscosidade bem avaliadas, evidenciando a possível utilização em concretos de diferentes classes de resistência.

Rodrigues e Deboni (2022) analisaram a substituição parcial do agregado miúdo por pó de vidro. Para tanto, foram moldados corpos de prova com diferentes porcentagens de substituições (10%, 15%, 20% e 30%) e avaliaram a resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias. Os resultados foram satisfatórios até 20% de substituição, mostrando resultados superiores ao traço de referência. Os autores concluíram que a substituição é viável, desde que o percentual seja limitado, permitindo a obtenção de concretos com resistência satisfatória.

Morais *et al*. (2023) desenvolveram uma argamassa cimentícia com substituição parcial de cimento por pó de vidro. Nesta análise, os autores realizaram ensaios de consistência, resistência à compressão, Índice de Atividade de Resistência (IAR) e absorção de água para as argamassas. Os resultados demonstraram que o pó de vidro com 98% das partículas menores que 45 mm apresentaram atividade pozolânica e promoveram redução na consistência das argamassas. O aumento da resistência à compressão foi observado nas argamassas com pó de vidro, principalmente para substituições de 20%. A absorção de água cresceu com o aumento do teor de vidro nas argamassas endurecidas, reforçando o potencial do pó de vidro como adição mineral em argamassas e concretos.

Silva e Bonifácio (2023) investigaram o comportamento mecânico do concreto com adição de pó de vidro. O estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade da utilização de resíduo de vidro moído, proveniente do descarte no município de Ji-Paraná/RO, em substituição parcial do agregado miúdo em concreto estrutural com resistência característica de 25 MPa. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais comparando o concreto convencional, com traço

1:2,11:3,14:0,586 (cimento: areia: brita: a/c), com uma mistura contendo substituição de 50% do agregado miúdo natural por vidro moído. Os resultados da análise granulométrica indicaram que a presença do vidro moído promoveu melhoria na distribuição granulométrica da areia, resultando em uma curva granulométrica situada na zona ótima de utilização e em módulo de finura dentro dos parâmetros recomendados. Em relação ao desempenho mecânico, o concreto com adição de vidro moído não atingiu a resistência à compressão de 25,2 MPa prevista na dosagem. No entanto, o módulo de elasticidade apresentou valores compatíveis com o concreto de referência, indicando a viabilidade técnica do uso do vidro moído, com propriedades semelhantes às observadas em concretos convencionais.

Sampaio e Carvalho (2024) avaliaram o desempenho do concreto com pó de vidro e aditivo plastificante. O intuito da pesquisa foi substituir o cimento Portland do tipo CP IV 32 RS, por concentrações de pó de vidro com valores de 0%, 3%, 5% e 7%, adicionando 152 ml de aditivo plastificante para cada concentração. Os autores realizaram uma caracterização física dos agregados, como a massa unitária, curva granulométrica e massa específica. Os autores evidenciaram que todos os traços apresentaram crescimento ao longo dos dias de cura, com valores superiores a 20 MPa como exigido por normas. Além disso, os resultados mostraram que o traço de referência, contendo apenas aditivo plastificante, superou os 20 MPa exigidos em norma aos 21 dias de cura. Em contrapartida, os traços com a incorporação do pó de vidro apresentaram desempenho adequado para uso estrutural já a partir do 7º dia de cura. Os autores também retrataram que a mistura com 7% de pó de vidro foi considerada a melhor concentração, pois ao diminuir a quantidade de Cimento Portland, os corpos de prova mantiveram sua qualidade, evidenciando que a combinação do aditivo com o pó de vidro possibilitou um aumento considerável na resistência à compressão, tornando o concreto viável para aplicações estruturais.

De acordo com Vasconcelos *et al*. (2025), a utilização de pó de vidro moído como agregado na fabricação de pavers de concreto apresenta viabilidade técnica e ambiental. A pesquisa envolveu a caracterização dos materiais empregados, a produção dos pavers com adição de pó de vidro e a realização de ensaios de resistência à compressão e absorção de água. No estudo, foi utilizado cimento do tipo CP II-Z, adotando o traço 1:7 para a produção dos pavers. A incorporação do vidro moído ocorreu por meio da substituição de 10% de diferentes componentes da mistura, sendo avaliadas substituições de 10% da areia convencional, 10% do pó de brita, 10% da brita 0 e 10% do cimento por vidro moído. Os resultados obtidos foram satisfatórios tanto nas análises de resistência quanto nos ensaios de absorção de água. Esse

desempenho indica que o vidro moído pode atuar como material eficiente na composição do concreto, sem comprometer a qualidade mecânica do produto. Além disso, os autores destacam o potencial do material na produção de peças com baixa porosidade, o que contribui para a durabilidade do concreto em condições reais de uso.

De forma sumarizada, as principais contribuições das pesquisas citadas neste capítulo com relação a análises sobre o pó de vidro no concreto podem ser consultadas na **Tabela 1**.

Tabela 1- Principais contribuições das pesquisas sobre pó de vidro no concreto

Ano	Autores	Contribuições	Resultados
2005	**Lopez *et al.***	Análise de resistência ao substituir agregado miúdo por pó de vidro.	Aumento de resistência em até 56,6 %.
2010	**Nogueira**	Analisou a reação álcali agregado causada pelo vidro no concreto.	Apontou problemas e soluções para o controle das reações.
2011	**Gomes e Pelisser**	Analisaram o desempenho mecânico de concretos com adição de vidro reciclado.	Não obtiveram ganho de resistência expressivo.
2018	**Tinoco e Júnior**	Realizaram uma revisão bibliográfica sobre o uso de vidro moído como substituto do agregado miúdo no concreto.	Aumento da resistência mecânica, redução do índice de vazios.
2018	**Luiz *et al.***	Analisaram o uso de vidro da moagem de garrafas *longneck*, substituindo a areia na produção de concreto.	Os resultados mais equilibrados obtidos com a adição de 20% de pó de vidro.
2018	**Santos *et al.***	analisaram as propriedades mecânicas de concretos produzidos com resíduo de vidro.	Todos os concretos alcançaram uma resistência à compressão acima do previsto pela norma.
2021	**Barbosa *et al.***	Analisaram a substituição parcial do agregado miúdo por pó de vidro	Desempenho mecânico satisfatório, boa fluidez, coesão e viscosidade bem avaliadas.
2022	**Rodrigues e Deboni**	Analisaram a substituição parcial do agregado miúdo por pó de vidro	Resultados foram satisfatórios até 20% de substituição.
2023	**Morais *et al.***	Desenvolveram uma argamassa cimentícia com substituição parcial de cimento por pó de vidro.	Aumento de resistência a compressão e aumento na absorção de água.
2023	**Silvia e Bonifácio**	Investigaram o comportamento mecânico de concreto com adição de pó de vidro.	Não atingiu a resistência requerida.
2024	**Sampaio e Carvalho**	Avaliaram o desempenho do concreto com pó de vidro e aditivo plastificante.	Desempenho estrutural positivo já a partir do 7º dia de cura.
2025	**Vasconcelos**	Utilização de pó de vidro moído como agregado na fabricação de pavers de concreto.	Satisfatórios para resistência e absorção.

Fonte: Autor (2026)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Agregados

A seguir, são apresentadas as características e informações dos agregados utilizados na presente pesquisa.

4.1.1.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo empregado foi areia natural utilizada nas construções da região, proveniente de uma loja de material de construção do município de Pombal – PB.

4.1.1.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita 01 obtida em uma loja de materiais de construção no município de Pombal – PB.

4.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CP II F 32, fabricado pela empresa Montes Claros, comumente utilizado nas construções no município de Pombal – PB. As propriedades do cimento selecionado podem ser visualizadas na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Propriedades do Cimento CP II F-32

Propriedades	Descrição
Composição	Silicato de cálcio, alumínio e ferro, sulfato de cálcio e fíler carbonático.
Resistência	Classe 32, com alta resistência mecânica aos 28 dias.
Secagem e Pega	Rápida, proporcionando maior agilidade na execução da obra.
Trabalhabilidade	Elevada, facilitando o manuseio e a aplicação.
Cor	Geralmente mais clara, devido à adição de filer.
Versatilidade	Adequado para diversas aplicações, desde fundações até estruturas de concreto armado.

Fonte: Cimentos CSN (2026)

4.1.3 Água

A água utilizada no preparo do concreto foi proveniente da rede pública de abastecimento.

4.1.4 Vidro

O vidro empregado na composição do concreto foi obtido a partir de garrafas não retornáveis do tipo *long-neck*, geralmente utilizadas para o envase de cerveja.

4.2 Métodos

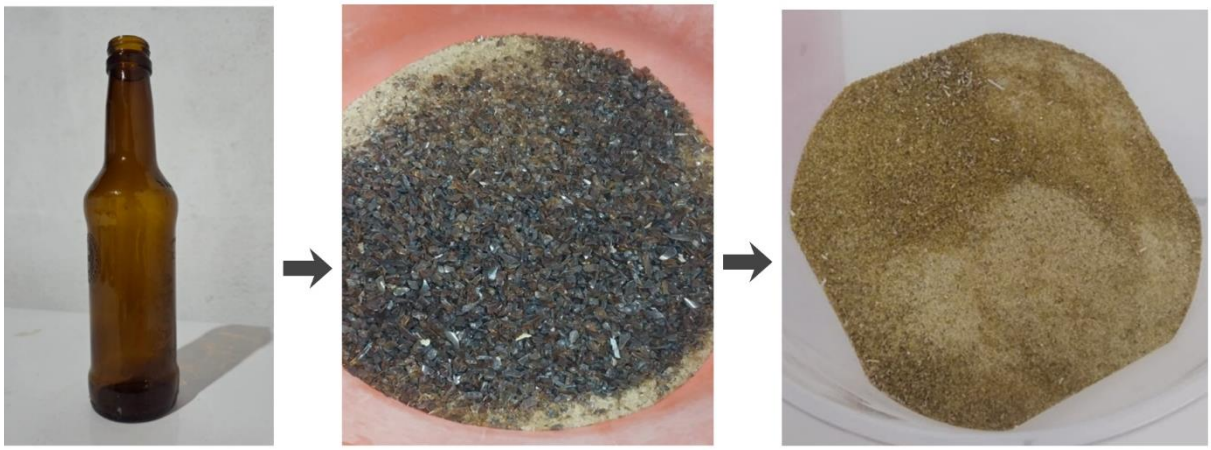
4.2.1 Obtenção do Pó de Vidro

As garrafas de vidro utilizadas na pesquisa passaram inicialmente por um processo de limpeza para remoção de impurezas e contaminantes superficiais. Primeiramente, foram retirados os rótulos das garrafas, evitando a interferência do revestimento durante a etapa de fragmentação do material. Em seguida, as garrafas foram submersas em água para a remoção das impurezas presentes em sua superfície.

Após a limpeza, as garrafas foram submetidas ao processo de fragmentação, sendo colocadas em sacos de náilon e submetidas a golpes de martelo, promovendo a redução do tamanho das partículas de vidro. Posteriormente, essas partículas foram submetidas a uma etapa adicional de fragmentação, na qual o material foi disposto em caixas de papelão e novamente submetido a golpes de martelo, possibilitando a obtenção de partículas com granulometria mais reduzida, caracterizando o pó de vidro utilizado na pesquisa.

Na **Figura 1** é possível visualizar, de forma sucinta, as etapas empregadas para obtenção do pó de vidro.

Figura 1- Etapas de moagem do vidro



Fonte: Autor (2026)

4.2.2 Caracterização dos Materiais

Toda a caracterização descrita nesta seção foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção e Processos Construtivos do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar (CCTA), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus Pombal–PB.

4.2.2.1 Análise Granulométrica dos agregados miúdos e graúdos

Para ambos os agregados, a análise granulométrica foi realizada em conformidade com a NBR 17054 (2022), que estabelece a utilização de duas amostras para a realização do ensaio.

4.2.2.1.1 Agregado miúdo

A norma em questão define que o agregado miúdo possui limites de composição granulométrica, que classificam o agregado em faixas ou zonas que avaliam a qualidade deste material, mostrado na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Limites de composição granulométrica do agregado miúdo

Faixas em relação as porcentagens retidas acumuladas				
Peneiras	**Limites Inferiores**		**Limites Superiores**	
	Zona Utilizável	**Zona Ótima**	**Zona Ótima**	**Zona Utilizável**
9.5	0	0	0	0
6.3	0	0	0	7
4.8	0	0	5	10
2.3	0	10	20	25
1.2	5	20	30	50
0.6	15	35	55	70
0.3	50	65	85	95
0.15	85	90	95	100
Fundo	100	100	100	100

Fonte: NBR 7211 (2022)

- O módulo de Finura é calculado pelo valor da soma das massas retidas acumuladas da média das duas amostras, dividido por 100.
- O diâmetro máximo é o valor da porcentagem das massas retidas acumuladas da média das duas amostras igual ou inferior ao valor de 5.

Portanto, para definir os parâmetros de granulometria da areia utilizada no estudo, a areia foi peneirada em peneira com abertura nominal de 4,8 mm, com o objetivo de remover pedregulhos e possíveis impurezas presentes no material. Em seguida, a areia peneirada foi levada à estufa, a uma temperatura de aproximadamente 105 °C, permanecendo por um período de 24 horas, a fim de eliminar a umidade presente em suas partículas. Após a secagem, foram separadas duas amostras de agregado miúdo, cada uma com massa de 500 g, conforme ilustrado na **Figura 2**.

Figura 2 - Amostras do agregado miúdo

Fonte: Autor (2026)

Após a separação das amostras, ocorreu o peneiramento das partículas nas peneiras da série normal de aberturas de 37,5 mm, 19 mm, 4,8 mm, 2,3 mm, 1,2 mm, 0,60 mm, 0,30 mm e 0,15 mm. Em seguida, foi pesada a massa dos grãos retidos em cada peneira, realizando a média entre as duas amostras. A partir da média das massas retidas nas peneiras, foi estimado as porcentagens passantes, retidas e acumuladas de cada peneira, determinando o módulo de finura, diâmetro máximo do agregado miúdo e a curva granulométrica.

4.2.2.1.2 Agregado graúdo

A classificação granulométrica do agregado graúdo também possui limites de composição granulométrica especificado pela NBR 7211 (2022) evidentes na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Limites de composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira	**Limites de Norma - NBR 7211**			
	Porcentagem em massa retida acumulada			
	9.5/25		4.75 / 12.5	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
25	0	5	-	-
19	2	15	-	-
12.5	40	65	0	5
9.5	80	100	2	15
6.3	92	100	40	65
4.8	95	100	80	100
2.4	-	-	95	100

Fonte: NBR 7211(2022)

Para a determinação da granulometria do agregado graúdo, o material foi inicialmente submetido à lavagem em água corrente, com o objetivo de realizar a limpeza e promover a redução dos chamados “finos”, que consistem em partículas muito pequenas, em forma de pó ou sujeiras que possam estar aderidas à brita. Dessa forma, foram separadas duas amostras de agregado graúdo, cada uma com massa de 5 kg, para a realização do ensaio, conforme ilustrado na **Figura 3**.

Figura 3 - Amostras do agregado graúdo

Fonte: Autor (2026)

As amostras foram submetidas à agitação em um conjunto de peneiras, permitindo que os grãos do agregado se distribuíssem conforme suas dimensões e possibilitando a determinação da massa do material retido em cada peneira.

Por fim, os resultados obtidos nesse procedimento permitiram calcular as porcentagens médias retidas, retidas acumuladas e passantes em cada peneira, bem como determinar a curva granulométrica e o módulo de finura do agregado graúdo.

4.2.2.2 Análise granulométrica do Vidro

Considerando a inexistência de normas técnicas específicas para a determinação da granulometria do vidro e a indisponibilidade, no laboratório, de peneiras apropriadas para esse material, foi adotado como critério a utilização do material passante na peneira com abertura de 600 mm e retido na peneira de 150 mm. Esse critério foi estabelecido devido à possibilidade de danificação das malhas de peneiras mais finas da série normal, em razão das características do material vítreo.

4.2.2.3 Massa Unitária e Massa Unitária Compactada dos agregados miúdos e graúdos

A determinação da massa unitária da areia e da brita foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 16972 (2021). O procedimento consistiu no preenchimento e na pesagem do recipiente, de forma individual, com os agregados miúdos (**Figura 4**), e posteriormente, com os agregados graúdos, sendo obtidas duas amostras de cada tipo de agregado. Antes do preenchimento, os agregados miúdos foram peneirados em uma peneira com abertura de 4,8 mm. Os agregados graúdos passaram pelo procedimento de exposição a água corrente, para eliminação dos finos.

Figura 4 - Corpo cilíndrico preenchido com agregado miúdo

Fonte: Autor (2026)

O procedimento foi realizado com duas amostras para cada tipo de agregado, sendo obtidos os valores necessários para a determinação da massa unitária, que foi obtida pela razão entre a média das massas das duas amostras e o volume do recipiente utilizado, indicada na **Equação (1)**:

$$\rho = \frac{\mathrm{M_{ar}} - \mathrm{M_r}}{\mathrm{V}} \tag{1}$$

Onde:

$\boldsymbol{\rho}$: é a massa unitária do agregado (kg/m³);

$\mathbf{M_{ar}}$: é a massa do recipiente com agregado (kg);

$\mathbf{M_r}$: é a massa do recipiente vazio (kg);

V: é o volume do recipiente (m³).

A NBR 16972 (2021) especifica que o resultado da massa unitária não pode ultrapassar 40 kg/m³.

A medição das massas unitárias compactadas da areia e da brita, empregados como agregados no preparo do concreto, foi realizada em conformidade com a NBR 16972 (2021). O procedimento é semelhante ao descrito na seção anterior, consistindo no preenchimento individual de um recipiente cilíndrico de volume conhecido com os agregados e, na sequência, na pesagem do conjunto para posterior determinação da massa.

A diferença em relação ao procedimento anterior consiste exclusivamente na compactação do agregado contido no recipiente cilíndrico antes da realização da pesagem. A NBR 16972 (2021) indica que a cada 1/3 do preenchimento com agregado, seja deferido 25 golpes com uma haste, uniformemente distribuídos para duas amostras.

Assim, conforme indicado pela norma, o recipiente foi preenchido em três camadas e a compactação foi efetuada mediante a aplicação de 25 golpes, uniformemente distribuídos, com o auxílio de uma haste, a cada terço do volume preenchido com o agregado. A massa unitária compactada de cada agregado foi estimada pela média aritmética das massas das duas amostras pelo volume do recipiente.

4.2.2.4 Determinação de massa específica do agregado miúdo

A medição da massa específica foi realizada de acordo com a NBR NM 52 (2009). O procedimento para a determinação da massa específica do agregado miúdo consiste, inicialmente, na obtenção da condição adequada do material para a execução completa do ensaio. Para tanto, o agregado miúdo foi posto na condição de saturado superfície seca, como mostra a **Figura 5**. Tal condição possibilita o preenchimento com água dos poros do agregado, porém se mantendo aparentemente seco na área externa.

Figura 5 - Agregado miúdo em condição de saturada superfície seca

Fonte: Autor (2026)

Após deixar o agregado na condição desejada, foram pesadas duas amostras de agregado miúdo, com massa de 500 g cada, conforme ilustrado na **Figura 6**.

Figura 6 - Amostra com 500g do agregado miúdo

Fonte: Autor (2026)

Posteriormente, cada amostra foi acondicionada em um frasco de laboratório do tipo *Erlenmeyer*, com capacidade de 500 ml, sendo então adicionado água até atingir o volume total de 500 ml no frasco, conforme apresentado na **Figura 7**.

Figura 7 - Frasco *Erlenmeyer*

Fonte: Autor (2026)

Na sequência, o conjunto passou por etapas de regularização dos vazios e período de repouso, a fim de garantir o adequado preenchimento dos poros do agregado pela água.

Diante do procedimento estabelecido, foi possível estimar a massa específica do agregado miúdo por meio da divisão da massa do agregado pelo volume do frasco menos o volume da água, conforme apresentado na **Equação (2)**:

$$D = \frac{m}{V - V_a} \tag{2}$$

Onde:

D: massa específica do agregado (g/cm³);

m: é a massa da amostra seca (g);

V: é o volume do frasco (cm³);

V_a: é o volume de água (cm³).

4.2.2.5 Determinação de massa específica do agregado graúdo

Inicialmente, duas amostras do agregado são pesadas em balança e, posteriormente, submersas em água por um período de 24 horas, como mostra na **Figura 8**.

Figura 8 - Agregado graúdo submerso

Fonte: Autor (2026)

Após esse período, as amostras são retiradas da água, secas superficialmente e pesadas, obtendo a massa na condição saturada superfície seca a partir da média de peso das amostras.

Na etapa seguinte, as amostras foram colocadas em um cesto de arame, conforme ilustrado na **Figura 9**.

Figura 9- Agregado Graúdo depositado em cesto

Fonte: Autor (2026)

Nessa condição, a **Figura 10** mostra a realização da pesagem das amostras em uma balança hidrostática, permitindo determinar a massa média das amostras submersas.

Posteriormente, as amostras são submetidas à estufa em temperatura a 105 °C por um período de 24 horas. Após a secagem completa, foi realizada uma nova pesagem, obtendo a massa seca do agregado graúdo.

Com base nos valores obtidos durante essas etapas, é possível determinar a densidade na condição seca, a densidade na condição saturada superfície seca e a absorção de água do material, as quais foram calculadas por meio da **Equação (3)**, **Equação (4)** e **Equação (5),** respectivamente.

$$\rho_s = \frac{M_a}{M_b - M_c} \quad (3)$$

Onde:

ρ_s: é a densidade do agregado na condição seca (g/cm³);

M_a: é a massa da amostra seca em estufa (g);

M_b: é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

M_c: é a massa da amostra submersa (g).

$$\rho_{sss} = \frac{M_b}{M_b - M_c} \quad (4)$$

Onde:

ρ_{sss}: é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca (g/cm³)

M_b: é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

M_c: é a massa da amostra submersa (g).

$$A = \frac{M_b - M_a}{M_a} \text{ x } 100 \quad (5)$$

Onde:

A: é a absorção de água (%);

M_b: é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

M_c: é a massa da amostra submersa (g).

4.2.2.6 Determinação de massa específica do vidro

A massa específica do vidro foi determinada com base na NBR NM 52 (2009), norma utilizada para agregados miúdos. A adoção desse procedimento foi devido ao fato de que o vidro utilizado na pesquisa apresentou uma granulometria fina, compatível com a faixa granulométrica típica dos agregados miúdos, permitindo a aplicação do mesmo método de determinação da massa específica.

A análise ocorreu a partir da pesagem de duas amostras de pó de vidro, com massa de 500g cada. Posteriormente, cada amostra foi acondicionada em um frasco de laboratório do tipo *Erlenmeyer*, com capacidade de 500 ml, sendo então adicionado água até atingir o volume total de 500 ml no frasco. Na sequência, o conjunto passou por etapas de regularização dos vazios e período de repouso, a fim de garantir o adequado preenchimento dos poros do agregado pela água.

A massa específica do vidro foi determinada pela relação entre a massa do material e o volume correspondente no frasco, conforme apresentado na **Equação (2)**:

4.2.2.7 Determinação de massa específica do cimento

A massa específica do cimento é definida como a razão entre a massa das partículas sólidas do cimento (excluindo os vazios entre os grãos e os poros internos) e o seu volume absoluto (real).

O cimento utilizado na pesquisa foi submetido ao ensaio de determinação da massa específica, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 16605 (2017). Para a realização do ensaio, foi utilizado o frasco volumétrico de *Le Chatelier*. Além disso, foi empregado um líquido que não reage quimicamente com o cimento, sendo utilizado, neste caso, o querosene, conforme ilustrado na **Figura 10**.

Figura 10 - Frasco volumétrico

Fonte: Autor (2026)

Uma amostra de 55g do cimento, conforme mostrado na **Figura 11**, foi adicionada em pequenas porções ao frasco de modo que não ocorresse a aderência do material nas paredes do frasco.

Figura 11 - Amostra do cimento

Fonte: Autor (2026)

Depois do procedimento, é feita a relação entre água e volume, para estimar a massa específica, evidente na **Equação (6)**:

$$\rho = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{V_2} - \mathrm{V_1}} \tag{6}$$

Onde:

$\boldsymbol{\rho}$: massa específica do cimento (g/cm³)

m: é a massa da amostra (g);

$\mathbf{V_1}$: é o volume inicial do frasco (cm³);

$\mathbf{V_2}$: é o volume final do frasco (cm³).

4.2.3 Mistura e Preparo do Concreto

O traço de concreto empregado neste trabalho para o preparo das amostras apresentou a proporção 1:1,48:2,63:0,49. As proporções foram determinadas por meio do método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), conforme apresentado por Curti (2020), o qual consiste em uma adaptação do método proposto pelo *American Concrete Institute* (ACI). Os cálculos e as informações utilizados para a determinação do traço estão apresentados no Apêndice A.

Com os traços definidos, o concreto foi preparado com adições de pó de vidro nos teores de 0%, 5%, 10% e 15% (teores em função do quantitativo de cimento). Portanto, foram confeccionados 4 traços de concreto, sendo o primeiro um traço controle, ou seja, com 0% de adição de pó de vidro, e posteriormente mais 3 traços com a mesma quantidade de material, mas contando com adição das porcentagens de 5%, 10% e 15% de pó de vidro respectivamente. As proporções adotadas podem ser consultadas na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Traço em massa para confecção de corpos de prova

Teor de adição de pó de vidro	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg/L)	Pó de Vidro (kg)
Traço 1 (0%)	1,0	1,48	2,63	0,49	0
Traço 2 (5%)	1,0	1,48	2,63	0, 49	0,577
Traço 3 (10%)	1,0	1,48	2,63	0, 49	1,154
Traço 4 (15%)	1,0	1,48	2,63	0, 49	1,731

Fonte: Autor (2026)

A mistura dos materiais foi realizada em conformidade com a NBR 12821 (2009). Os materiais empregados no concreto foram inseridos em uma betoneira, sendo depositado inicialmente os agregados miúdos e graúdos com 50% da água de amassamento. Em seguida,

a betoneira foi acionada por um minuto a partir da introdução da água. Após esse tempo, o funcionamento da betoneira foi interrompido e foi adicionado o cimento. Posteriormente, a betoneira foi religada e adicionado o restante da água de amassamento, conforme visto na **Figura 12**.

Figura 12 - Mistura dos materiais na betoneira

Fonte: Autor (2026)

A partir deste procedimento, a betoneira permaneceu misturando todo material por um tempo de aproximadamente 3 minutos, representado na **Figura 13**.

Figura 13 - Concreto fresco

Fonte: Autor (2026)

Após este período, ocorreu a observação da trabalhabilidade do concreto diante do teste de abatimento de tronco de cone, com o intuito de garantir a qualidade na preparação.

4.2.4 Caracterização do concreto no estado fresco

4.2.4.1 Slump Test

O *slump test* é definido pela NBR 16889 (2020), que estabelece a utilização de aparelhagem específica para sua execução, como haste de aço com comprimento entre 60 cm e 80 cm, molde metálico em formato de tronco de cone, placa de base e régua para a realização das medições. Portanto, para a realização, foi utilizado uma haste de aço com 70 centímetros de diâmetro, molde de metal adequado, placa de base e uma régua. A metodologia de ensaio consistiu em, inicialmente, preencher 1/3 do cone com o concreto e proferir 25 golpes uniformemente distribuídos com o auxílio da haste de aço, conforme visto na **Figura 14**. Posteriormente, foi proferido os mesmos 25 golpes para 2/3 do cone e para o restante do cone, respectivamente.

Figura 14 - Proferição de golpes

Fonte: Autor (2026)

Após o preenchimento e a aplicação dos golpes, o cone foi cuidadosamente retirado, em um intervalo de tempo entre 4 e 6 segundos. Após a retirada do molde, ocorreu o abatimento do concreto. Em seguida, o abatimento foi medido a partir da diferença entre a altura do molde e a altura do eixo do corpo de prova, conforme ilustrado na **Figura 15**.

Figura 15 - Medição do abatimento

Fonte: Autor (2026)

4.2.5 Moldagem dos corpos de prova

Para a realização da moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes cilíndricos com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Inicialmente, os moldes foram revestidos internamente com uma fina camada de óleo lubrificante, a fim de evitar a aderência do concreto às paredes do molde. Com o concreto preparado e realizado o *slump test* para verificação da consistência e da trabalhabilidade, foi feita a moldagem dos corpos de prova. Na **Figura 16** é possível visualizar os corpos de prova devidamente moldados.

Figura 16 - Corpos de prova moldados

Fonte: Autor (2026)

O adensamento foi realizado manualmente. Inicialmente, o molde foi preenchido até aproximadamente 50% de sua altura com concreto e, aplicando 12 golpes em seguida com uma haste metálica, distribuídos de forma uniforme. Posteriormente, o molde foi completamente preenchido com concreto e foram aplicados mais 12 golpes para promover o adensamento da mistura. Em sequência, a face superior foi raspada para garantir a planimetria, seguida de leves batidas laterais do molde para evitar possíveis vazios de ar no interior.

4.2.6 Cura dos corpos de prova

Neste estudo, foi adotado o processo de cura úmida para os corpos de prova. Inicialmente, após a moldagem, os corpos de prova permaneceram no próprio local de realização do ensaio durante um período de 24 horas, dispostos sobre uma superfície horizontal rígida e protegidos de vibrações.

Decorrido esse período, os corpos de prova foram desmoldados e transferidos para um tanque de armazenamento localizado nas proximidades do laboratório, conforme ilustrado na **Figura 17**. Nesse local, permaneceram submersos em água durante os períodos de cura estabelecidos para o ensaio, que foram de 7 e 28 dias submersos.

Figura 17 – Corpos de prova submersos

Fonte: Autor (2026)

4.2.7 Caracterização do concreto no estado endurecido

4.2.7.1 Resistência à Compressão

A análise de resistência a compressão foi realizada de acordo com a NBR 5739 (2018), visando o controle e qualidade do concreto utilizado.

O ensaio de compressão consiste na aplicação de carga axial sobre corpos de prova cilíndricos até a ruptura. A avaliação aos 7 dias permite observar o ganho inicial de resistência,

enquanto a avaliação aos 28 dias permite verificar o desenvolvimento de resistência em longo prazo, associado ao avanço da hidratação do cimento e ao efeito de adições minerais.

Toda análise de resistência à compressão axial teve início ao retirar os corpos de prova da cura e prosseguir com uma leve secagem com pano úmido das amostras. Em seguida, os corpos foram levados a máquina de ensaio, para o fornecimento dos dados de força de ruptura para cada corpo. Para garantir um controle de qualidade eficiente, cada porcentagem utilizou de três corpos, para que se tivesse uma média no resultado para cada traço.

Logo, para o cálculo da resistência foi necessário dividir a carga de ruptura fornecida pela máquina de ensaio, pela área da seção transversal do corpo de prova, onde possibilitou estimar a resistência a compressão de cada uma das porcentagens escolhidas.

A resistência a compressão foi determinada por meio da **Equação (7)**:

$$F_c = \frac{4 \, . \, F}{\pi \, . \, D^2} \tag{7}$$

Onde:

F_c: É a resistência à compressão (MPa);

F: é a força máxima alcançada (N);

D: é o diâmetro do corpo de prova (mm).

4.2.7.2 Absorção de água

A absorção de água no concreto constitui um parâmetro fundamental para a avaliação de sua porosidade, a qual influencia diretamente a durabilidade e a resistência do material à ação de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos.

O teste de absorção de água no concreto é descrito pela NBR 9778 (2009), e possui o objetivo de fornecer indicadores diretos sobre a durabilidade, porosidade e permeabilidade do material. Ele mede a quantidade de água que o concreto endurecido é capaz de absorver por capilaridade ou imersão, o que reflete a sua estrutura interna de poros. O cálculo de absorção é baseado na **Equação (8) (**NBR 9778, 2009).

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \text{ x } 100 \quad (8)$$

Onde:

A: Absorção de água (%);

M_{sat}: é a massa da amostra saturada (g);

M_s: é a massa da amostra seca (g).

Para determinação da absorção de água das amostras, os corpos de prova foram levados a uma estufa e passaram 72 horas a uma temperatura de 100 ° C. Após este período, as amostras foram retiradas da estufa e pesadas em balança de precisão para adquirir a massa seca da amostra.

A segunda etapa consistiu em imergir as amostras em água durante 72 horas. Após este período, as amostras foram retiradas, colocadas em um recipiente com água e pesadas em uma balança hidrostática, permitindo determinar as massas das amostras saturadas imersas em água.

A etapa final do ensaio consistiu na retirada das amostras da água, seguida da secagem superficial com pano úmido e da posterior pesagem, com o objetivo de determinar a massa na condição saturada após imersão. Ainda, com os dados obtidos, foi possível determinar outras características da amostra como: índice de vazios, massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real.

4.2.7.3 Índice de Vazios

A determinação do índice de vazios foi realizada conforme a NBR 9778 (2009) que estabelece a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, calculada pela **Equação (9)**:

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \text{ x } 100 \quad (9)$$

Onde:

I_v: Indice de vazios (%);

M_{sat}: é a massa da amostra saturada (g);

M_s: é a massa da amostra seca (m);

M_i: é a massa da amostra saturada imersa (g).

4.2.7.4 Massa específica da amostra seca

A determinação da massa específica da amostra seca foi realizada conforme a NBR 9778 (2009) que estabelece a relação do material seco e o volume total da amostra, calculada pela **Equação (10)**.

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (10)$$

Onde:

$\boldsymbol{\rho_s}$: é a massa específica da amostra seca (g/cm³);

$\mathbf{M_{sat}}$: é a massa da amostra seca em estufa (g);

$\mathbf{M_s}$: é a massa da amostra saturada em água (g);

$\mathbf{M_i}$**:** é a massa da amostra imersa (g).

4.2.7.5 Massa específica da amostra saturada

A determinação da massa específica da amostra saturada foi realizada conforme a NBR 9778 (2009), que estabelece a relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, calculada pela **Equação 11**(NBR 9778, 2009).

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i} \quad (11)$$

Onde:

$\boldsymbol{\rho_{sat}}$: Massa especifica da amostra saturada (g/cm³);

$\mathbf{M_{sat}}$: é a massa da amostra saturada (g);

$\mathbf{M_i}$: é a massa da amostra saturada imersa (g).

4.2.7.6 Massa específica da amostra real

A determinação da massa específica real da amostra foi realizada conforme a NBR 9778 (2009), que estabelece a relação entre a massa do material seco e o seu volume, desconsiderando os poros permeáveis, calculada pela **Equação (12)**.

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i} \quad (12)$$

Onde:

$\boldsymbol{\rho_r}$: Massa especifica real (g/cm³);

$\mathbf{M_s}$: é a massa da amostra seca (g);

$\mathbf{M_i}$: é a massa da amostra saturada imersa (g).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos durante a pesquisa, com a realização de análises físicas dos materiais empregados e ensaios mecânicos do concreto. Estudos comparativos dos resultados e análise do desempenho também são apresentados e discutidos.

5.1 Análise Granulométrica dos agregados miúdos e graúdos

A análise granulométrica foi realizada com o objetivo de estimar o tamanho dos grãos dos materiais empregados no preparo do concreto. Os resultados obtidos para os agregados miúdo e graúdo, assim como do pó de vidro utilizado, são apresentados a seguir.

5.1.1 Agregado miúdo

Na **Tabela 6** é possível visualizar os valores percentuais das massas retidas em cada peneira após o peneiramento do agregado miúdo.

Tabela 6 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia)

Média das duas amostras		
Peneiras	**Massa Retida (%)**	**Massa Retida Acumulada (%)**
9.5	0	0
6.3	0	0
4.8	0	0
2.3	4,43	4,43
1.2	9,78	14,21
0.6	40,17	54,38
0.3	35,14	89,52
0.15	8,11	97,63
Fundo	2,37	100

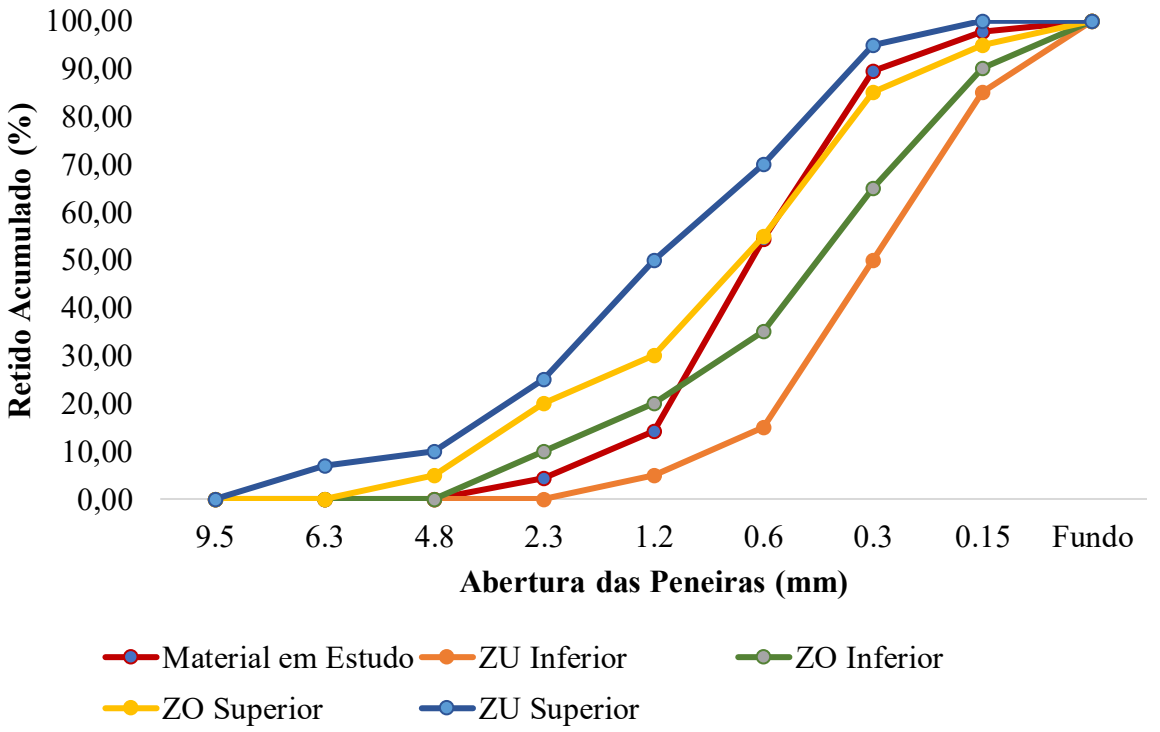
Fonte: Autor (2026)

A partir da Tabela 7, verificou-se que os maiores percentuais de massa retida ocorreram nas peneiras com malhas de 0,60 mm e 0,30 mm, implicando que o agregado miúdo apresenta predominância de partículas nessas faixas granulométricas.

Na **Figura 18**, é possível visualizar a curva granulométrica do agregado miúdo, obtida a partir dos valores percentuais de massa retida acumulada dispostos na **Tabela 7**.

Adicionalmente, a figura apresenta os limites superior e inferior, bem como as respectivas zonas ótima (ZO) e utilizável (ZU), conforme estabelecido na NBR 7211 (2022).

Figura 18 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2026)

A respectiva figura evidencia que o material estudado apresentou resultados satisfatórios compondo em geral a área referente as zonas utilizáveis do agregado, contando com uma leve presença na zona ótima com a massa retida na peneira de 0,6 mm. O diâmetro máximo do agregado miúdo foi de 2,36 mm e o módulo de finura do agregado foi no valor de 2,6 %.

5.1.2 Agregado graúdo

Na **Tabela 7** é possível visualizar os valores percentuais das massas retidas em cada peneira após o peneiramento do agregado graúdo.

Tabela 7 - Composição granulométrica do agregado graúdo (brita)

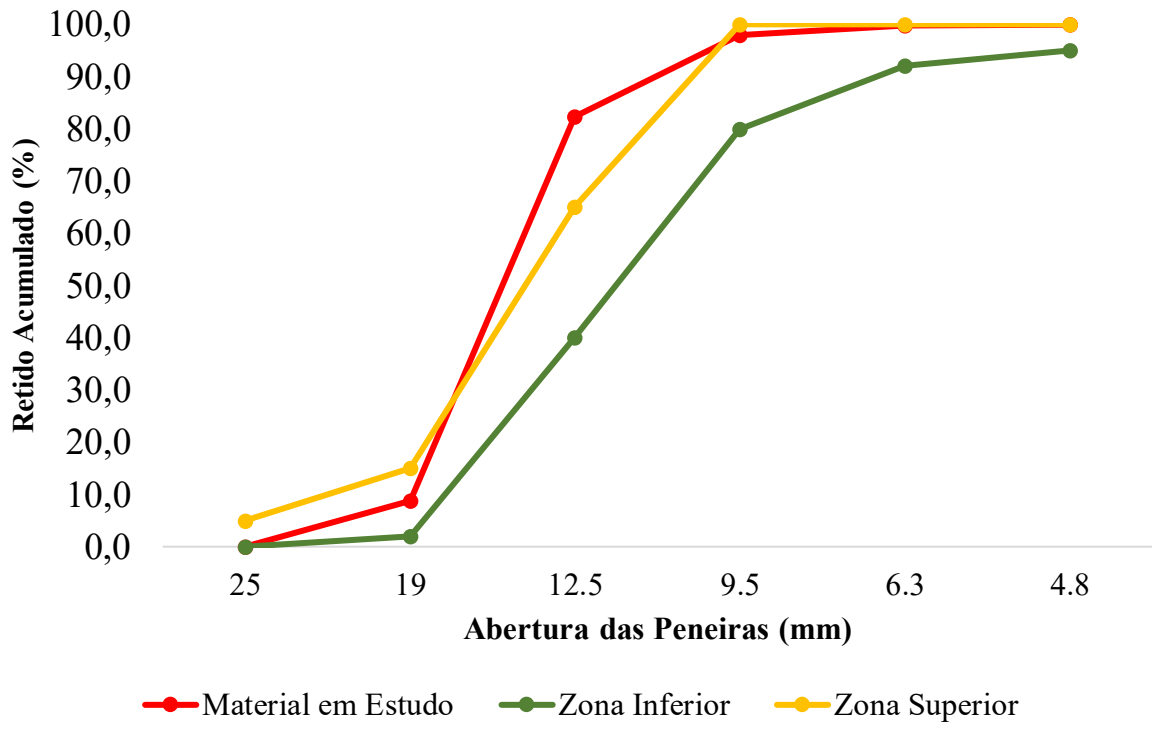
Média das duas Amostras		
Peneiras	**Massa Retida (%)**	**Massa Retida Acumulada (%)**
38	0	0
32	0	0
25	0	0
19	8,79	8,79
12.5	73,58	82,37
9.5	15,63	97,99
6.3	1,84	99,84
4.8	0,1	99,94
2.4	0,06	100
1.2	0	100
0.6	0	100
0.3	0	100
0.15	0	100
Fundo	0	100

Fonte: Autor (2026)

A partir da Tabela 8, verificou-se que o maior percentual de massa retida ocorreu na peneira com malha de 12,5 mm, evidenciando que o agregado graúdo apresenta predominância de partículas nessa faixa granulométrica.

Na **Figura 19**, é possível visualizar a curva granulométrica do agregado graúdo, obtida a partir dos valores percentuais de massa retida acumulada dispostos na **Tabela 8**. Adicionalmente, a figura estabelece os limites superiores e inferiores, conforme NBR 7211 (2022).

Figura 19 - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2026)

Quando se analisa a **Figura 19**, evidencia-se que o material estudado apresentou resultados satisfatórios em algumas massas retidas referente as zonas inferiores e superiores do agregado, contando com um desvio nas zonas especificadas na peneira de abertura de 12,5 mm, retornando para a zona elegível logo em seguida. O diâmetro máximo do agregado graúdo foi de 25 mm e o módulo de finura do agregado foi no valor de 7,07 %.

5.2 Massa Específica e Unitária

Na **Tabela 8** é possível visualizar os valores de massa específica, massa unitária e massa unitária compactada obtidos para os agregados miúdo e graúdo, pó de vidro e aglomerante.

Tabela 8 - Análises físicas dos agregados

	Agregado Miúdo (Areia)	Agregado Graúdo (Brita)	Cimento	Pó de vidro
Massa Específica (g/cm³)	2,23	-	3,10	2,11
Massa Esp. Condição Seca (g/cm³)	-	2,68	-	-
Massa Esp. Saturada Superfície Seca (g/cm³)	-	2,70	-	-
Massa Unitária (kg/m³)	1408,5	1376,5	-	-
Massa Unitária Compactada (kg/m³)	1546	1499	-	-

Fonte: Autor (2026)

5.2.1 Massa específica

A massa específica do agregado miúdo apresentou valor de 2,2372 g/cm³, situando-se dentro da faixa usual para areias naturais, o que indica um material mineral estável e adequado para aplicação em concretos convencionais.

Para o agregado graúdo, a massa específica na condição seca foi de 2,687 g/cm³, enquanto na condição saturada superfície seca (SSS) o valor foi de 2,702 g/cm³. A pequena diferença entre esses valores indica baixa absorção de água, evidenciando uma brita de boa qualidade, com estrutura interna pouco porosa.

O pó de vidro apresentou massa específica de 2,110 g/cm³. Esse valor é inferior ao normalmente observado para cimentos Portland. Esse comportamento favorece sua utilização como material complementar ou adição mineral, podendo contribuir para a redução da densidade do concreto sem comprometer, necessariamente, o desempenho mecânico.

Para o cimento, a massa específica calculada foi de 3,100 g/cm³, valor compatível com cimentos Portland comerciais e em conformidade com as exigências estabelecidas pela NBR 16605 (2017).

5.2.2 Massa Unitária e Massa Unitária Compactada dos agregados miúdos e graúdos

A massa unitária do agregado miúdo foi de 1.408,5 kg/m³, enquanto a do agregado graúdo foi de 1376,5 kg/m³. Esses valores refletem a forma, a granulometria e o grau de

empacotamento natural dos grãos. Ambos se encontram dentro dos intervalos comumente observados para agregados utilizados em concreto, indicando boa distribuição granulométrica.

Quando submetidos à compactação, os agregados apresentaram aumento da massa unitária, atingindo 1546 kg/m³ para o agregado miúdo e 1499 kg/m³ para o agregado graúdo. Esse incremento demonstra a capacidade de rearranjo dos grãos sob ação mecânica, favorecendo um melhor empacotamento. Esse comportamento é positivo, pois tende a reduzir o volume de vazios no concreto fresco, contribuindo para um melhor desempenho mecânico do concreto endurecido.

De forma geral, os resultados obtidos atenderam aos requisitos técnicos recomendados pelas normas vigentes da ABNT, em especial aquelas relacionadas à caracterização de agregados. Os valores observados indicaram que os materiais apresentaram características físicas compatíveis com o uso em concretos.

5.3 Análise do concreto no estado fresco

5.3.1 Slump Test

O teste de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*) foi realizado com o objetivo de avaliar a consistência e trabalhabilidade do concreto utilizado para confecção dos corpos de prova. Na **Tabela 9** é possível visualizar as medições obtidas para cada composição.

Tabela 9 - *Slump test*

Traço	***Slump* (9+/-3)**
Traço 1 (0%)	7 cm
Traço 2 (5%)	7 cm
Traço 3 (10%)	8 cm
Traço 4 (15%)	6 cm

Fonte: Autor (2026)

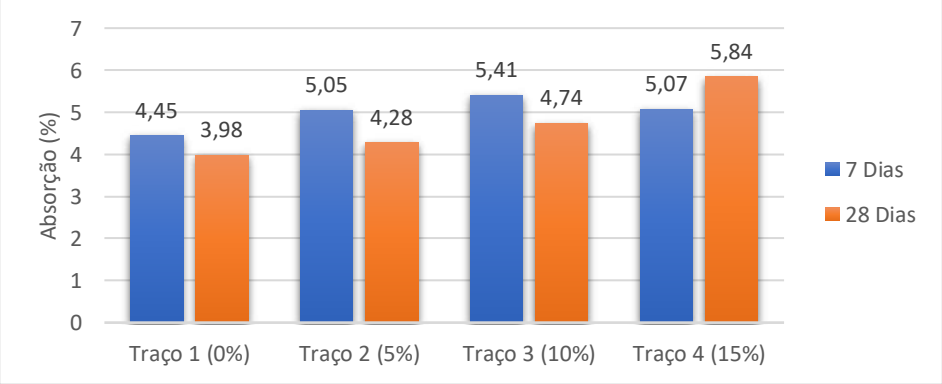
Todos os traços atenderam ao limite de consistência estabelecido, estando no intervalo de 90 ± 30 mm. Destaca, ainda, que o Traço 3 (10%) apresentou os melhores resultados de consistência entre as composições avaliadas, diante do valor ser mais próximo do valor estipulado de 9 cm. Em contrapartida, o Traço 4 apresentou valores de consistência inferiores em relação aos demais traços analisados.

5.4 Análise do concreto no estado endurecido

5.4.1 Absorção de água

Os ensaios de absorção de água foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento dos materiais quanto à sua capacidade de retenção de umidade, parâmetro diretamente relacionado à porosidade, à durabilidade e ao desempenho do concreto ao longo do tempo. Na **Figura 20** é possível visualizar os resultados obtidos no teste realizado.

Figura 20 - Absorção de água



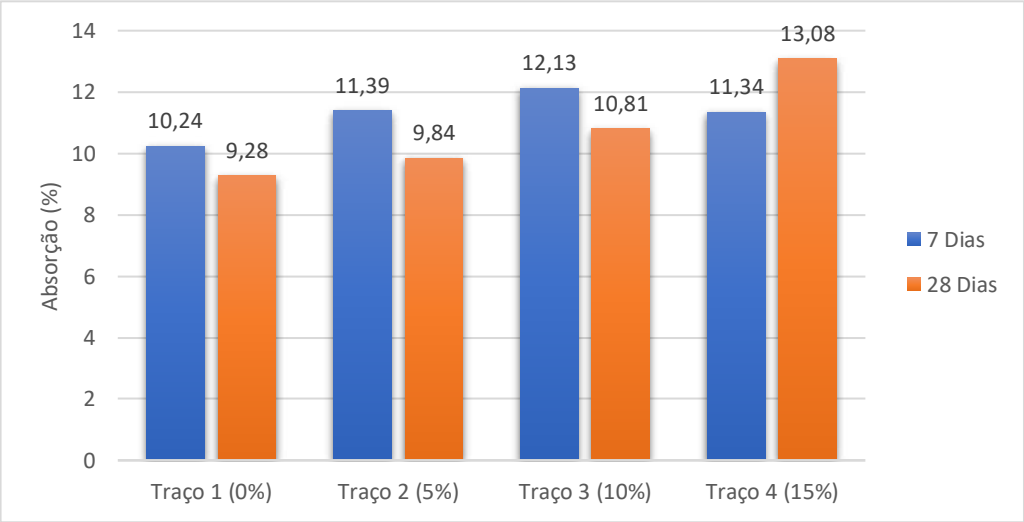
Fonte: Autor (2026)

A partir da **Figura 20**, constatou-se que os traços com adição de pó de vidro apresentaram valores superiores ao traço de referência nas idades iniciais. Contudo, para os teores de 5% e 10%, observou-se redução da absorção aos 28 dias, evidenciando um refinamento da microestrutura ao longo do tempo. Em contrapartida, o teor de 15% apresentou aumento da absorção, sugerindo maior porosidade e indicando um possível limite de substituição para manutenção da durabilidade do concreto.

O aumento da absorção observado em teores mais elevados, como 15%, também foi relatado por Morais et al. (2023), que identificaram crescimento da absorção com o aumento do teor de vidro, indicando maior porosidade.

Na **Figura 21** é possível visualizar os resultados dos testes de índices de vazios dos concretos com diferentes teores de pó de vidro, nas idades de 7 e 28 dias. Esse parâmetro está diretamente ligado à porosidade interna: quanto maior o índice de vazios, maior a quantidade de poros e, consequentemente, menor tende a ser a durabilidade.

Figura 21 - Índice de vazios

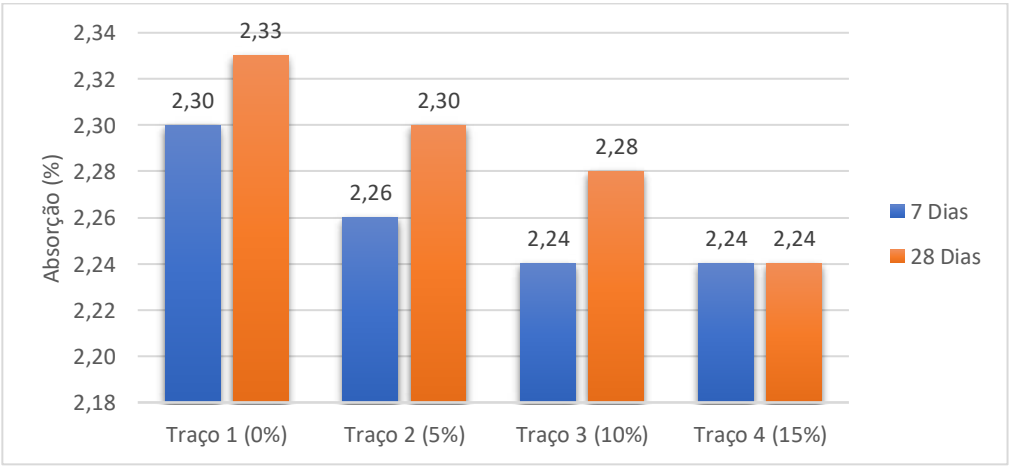


Fonte: Autor (2026)

A análise dos dados apresentados na **Figura 21** evidencia aumento do nível de índice de vazios à medida que se eleva o teor de pó de vidro nos traços avaliado. O Traço 1 (0%), sem adição, apresentou os menores valores, indicando uma microestrutura mais densa e menos permeável, resultado de um empacotamento mais eficiente dos grãos e de uma hidratação mais uniforme.

A **Figura 22** apresenta a massa específica da amostra seca (g/cm³) dos concretos com diferentes teores de pó de vidro, nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 22 - Massa específica da amostra seca



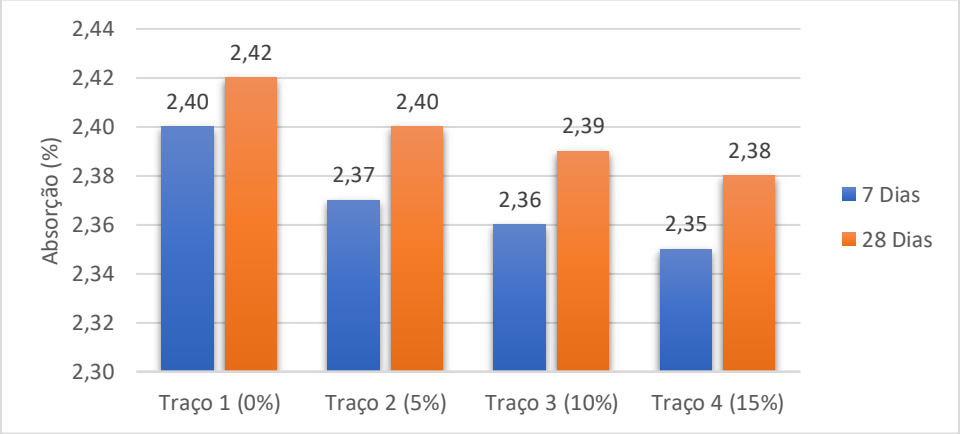
Fonte: Autor (2026)

Os resultados de massa específica da amostra seca na **Figura 22** indicam uma tendência de redução com o aumento do teor de pó de vidro. Embora os traços com 5% e 10% apresentem incremento ao longo do tempo, evidenciando certa densificação da matriz, o traço com 15%

não apresentou variação significativa, indicando maior porosidade e menor compacidade. Esses resultados corroboram os dados de absorção e índice de vazios, de modo que uma menor massa específica colabora com o aumento de índice de vazios, evidenciando que teores elevados de substituição podem comprometer a qualidade do concreto.

A **Figura 23** apresenta a massa específica da amostra saturada (g/cm³) dos concretos com diferentes teores de pó de vidro, nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 23 - Massa específica da amostra saturada

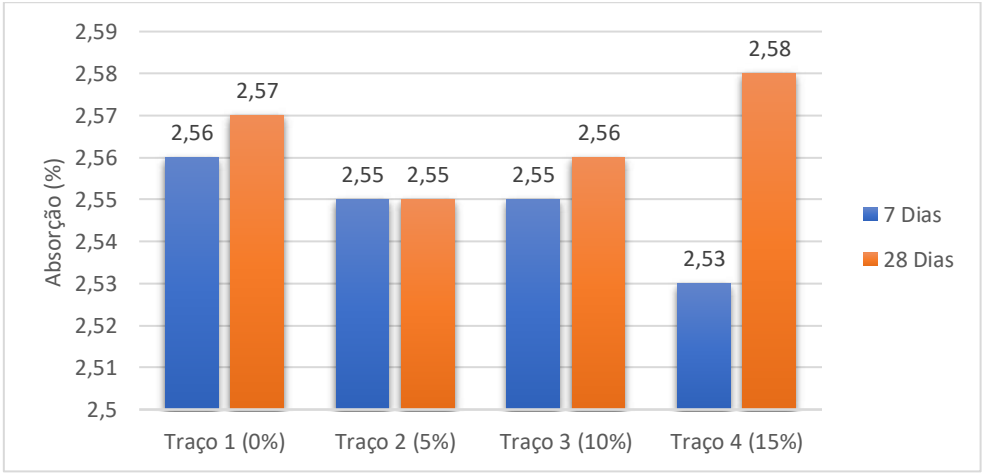


Fonte: Autor (2026)

A análise da **Figura 23** da massa específica das amostras saturadas indicou uma redução gradual da massa específica seca com o aumento do teor de pó de vidro. Esta redução indica menor densidade do concreto, associada ao aumento do volume de vazios.

A **Figura 24** apresenta a massa específica real (g/cm³) dos concretos com diferentes teores de pó de vidro, nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 24 - Massa específica real



Fonte: Autor (2026)

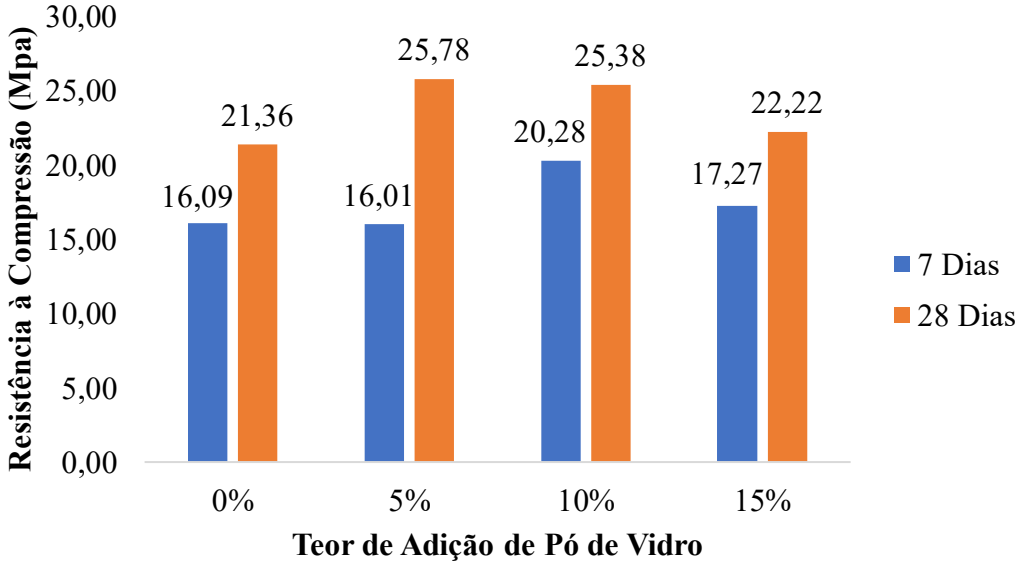
A massa específica real vista na **Figura 24** se manteve relativamente constante entre os traços, sugerindo que as variações observadas estão relacionadas principalmente à estrutura interna do concreto, e não à densidade dos materiais constituintes.

Os traços com adição de pó de vidro apresentaram maiores índices de porosidade, pois os níveis de absorção de água e índice de vazios foram evoluindo conforme o pó de vidro foi sendo acrescentado. Assim, embora o uso do pó de vidro seja tecnicamente viável, teores mais elevados tendem a aumentar a absorção de água do concreto, aspecto que deve ser considerado no processo de dosagem, especialmente quando a durabilidade do material é um fator determinante.

5.4.2 Resistência a compressão

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o comportamento do concreto sob compressão permite avaliar sua resistência e deformabilidade. Na **Figura 25** é possível visualizar uma análise comparativa entre os valores de resistência mecânica para os traços investigados aos 7 e 28 dias.

Figura 25 - Índices de Resistência à Compressão



Fonte: Autor (2026)

A **Figura 25** evidencia um aumento significativo da resistência mecânica com o avanço da idade, comportamento esperado em concretos em função da progressiva hidratação do cimento. Aos 7 dias, os valores de resistência variaram entre 16,01 MPa e 20,28 MPa, sendo o Traço 3 (10%) o que apresentou o melhor desempenho nessa idade inicial. Esse resultado indica que a adição de pó de vidro em teor intermediário contribuiu positivamente para o ganho de

resistência inicial, promovendo um melhor empacotamento das partículas e redução na quantidade de vazios no concreto. Já aos 28 dias, todos os traços apresentaram aumento de resistência, com valores variando entre 21,36 MPa e 25,78 MPa. O Traço 2 (5%) apresentou a maior resistência à compressão, seguido de forma bastante próxima pelo Traço 3 (10%), indicando que teores moderados de pó de vidro favorecem o desempenho mecânico do concreto em idades mais avançadas.

Ao realizar uma análise comparativa geral, o Traço 4 (15%) apresentou redução da resistência tanto aos 7 quanto aos 28 dias quando comparado aos teores intermediários. Esse resultado sugere que teores elevados de substituição podem comprometer a matriz cimentícia, seja pela redução do teor efetivo de cimento, seja pelo aumento da porosidade, conforme observado nos resultados de absorção e índice de vazios.

Na **Tabela 10** estão presentes os ganhos de resistência à compressão, comparando os traços com adição de pó de vidro em relação ao traço de referência (0%).

Tabela 10 - Ganho de Resistência em relação ao traço convencional

Composição (% Pó de vidro)	Idade	Percentual de Resistência (%)
(5%)	**7 dias**	- 0,5
(10%)	**7 dias**	+ 26,04
(15%)	**7 dias**	+ 7,33
(5%)	**28 dias**	+ 20,69
(10%)	**28 dias**	+ 18,82
(15%)	**28 dias**	+ 4,03

Fonte: Autor (2026)

A **Tabela 10** evidencia que o traço com 10% de pó de vidro apresentou o maior ganho de resistência aos 7 dias (+26,04%) em relação ao traço convencional. Já aos 28 dias, o melhor desempenho foi obtido com 5% de substituição (+20,69%), indicando um significativo ganho de resistência dos traços com adição de pó de vidro e evidenciando grande melhoria no desempenho do concreto.

Esses resultados corroboram com as análises de Luiz et al. (2018), que também verificaram melhorias no desempenho mecânico com a incorporação de pó de vidro, evidenciando seu potencial como material alternativo. De forma semelhante, Rodrigues e Deboni (2022) observaram que substituições de até 20% proporcionam resistências superiores ao concreto convencional, o que reforça a tendência de ganhos em teores moderados.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do pó de vidro nas propriedades do concreto, com foco nos parâmetros de absorção de água e porosidade, assim como resistência a compreensão axial, a partir de ensaios realizados em laboratório. A comparação entre os traços com adição do resíduo e o traço de referência permitiu compreender, de forma prática, os efeitos dessa incorporação no comportamento do material.

Durante os ensaios, observou-se que os concretos contendo pó de vidro apresentaram maior absorção de água em relação ao concreto convencional. Esse resultado esteve diretamente relacionado ao aumento da porosidade da matriz cimentícia, possivelmente em função da granulometria do vidro, que pode ter dificultado o preenchimento adequado dos vazios.

Os resultados indicam que, apesar da viabilidade técnica da incorporação do pó de vidro, teores mais elevados tendem a aumentar a porosidade e a absorção de água do concreto nas condições utilizadas. Esses aspectos devem ser considerados no processo de dosagem e na escolha dos componentes utilizados, especialmente quando o concreto for destinado a ambientes agressivos, nos quais a durabilidade é um fator determinante.

Os ensaios e testes realizados permitiram constatar que a adição do pó de vidro pode ser considerada viável, desde que realizada em proporções limitadas, permitindo assim, a obtenção de concretos mais resistentes. Dessa forma, o presente trabalho reforçou a importância do controle das proporções, uma vez que percentuais elevados podem reduzir o desempenho do concreto, especialmente quando comparado ao convencional. Embora a incorporação do pó de vidro seja tecnicamente viável, observa-se a existência de um teor ótimo de adição, situado entre 5% e 10%, no qual se obtém o melhor equilíbrio entre resistência mecânica e sustentabilidade do material.

Por fim, os resultados alcançados ressaltam a importância de novos estudos que considerem ajustes na granulometria, na dosagem e no tratamento do resíduo, bem como sua combinação com outros materiais pozolânicos. Desse modo, será possível melhorar o desempenho do concreto e ampliar as possibilidades de aplicação do pó de vidro na Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Guide to External Curing of Concrete (ACI 308R-16)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2016.

ARAÚJO, Daniel Lima, FELIX, Ludmylla Pires, SILVA, Leonardo costa.; SANTOS, Thiago Martins. Influência de agregados reciclados de resíduos de construção em propriedades mecânicas do concreto. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 11, n. 1, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. ABNT, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 14931: Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras – Requisitos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 16605: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. ABNT, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 16917: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção da água. ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 17054: Agregados – Determinação da Composição granulométrica – Método de ensaio. ABNT, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. ABNT, 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. ABNT, 2009.

BARBOSA, João Pedro Noleto, RIBEIRO, Fabio Henrique de Melo, COUTINHO, Roque Santos.Avaliação da influência da utilização do pó de vidro como substituição parcial ao

agregado miúdo nas propriedades do concreto autoadensável. Singular. Engenharia, Tecnologia e Gestão, vol.1 n.3(2021).

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **CSN Cimentos**. Disponível em: https://www.csn.com.br/homepage/cimentos/. Acesso em: 23 mar. 2026.

Cristina Silva Feltrin; Geraldo Cechella Isaia.Propriedades do concreto com adição de fíler calcário dolomítico. *Revista de Ciência e Inovação*, Santa Maria, v. 3, n. 1, 2018. Disponível em: https://periodicos.iffarroupilha.edu.br/index.php/cienciainovacao/article/view/182. Acesso em: 24 mar. 2026.

GOMES, Carlos Cabreira; PELISSER, Fernando. Propriedades Mecânicas do Concreto Com Adição de Vidro Reciclado. UNESC- Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2011.

Jorge Batlouni Neto.Agregados. Goiânia: Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2016. Disponível em:https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/14878/material/Agregados%202016.pdf. Acesso em: 24 mar. 2026.

KOCH, Ricardo Helmuth; SOUSA JÚNIOR, Leondiniz Gomes de. Influência da granulometria da areia natural nas propriedades do concreto e argamassas na construção civil. *Revista Novos Desafios*, v. 4, n. 2, p. 176–183, 2024.

LIOTTO, Pedro Felix; SANTANA, Genilson Pereira. O uso do vidro em concreto: revisão. *Scientia Amazonia*, v. 9, n. 2, p. C1–C12, 2020.

LODI, Victor Hugo. A corrosão das armaduras de concreto. Xanxerê, SC, 2004. Artigo técnico sobre mecanismos de corrosão em estruturas de concreto armado.

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

LOPES, Raduan Krause; PIOVESAN, Jayne Carlos; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; GRONDONA, Atilio Efrain Bica.

Partial replacement of Portland cement with industrial glass waste in mortars. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 2, 2021.

LUIZ, Ana Carolina Resende; VILELA, Daniella Silva; MARTINS, Bruno Silva; NETO, Gabriel Pinto**.** Utilização do vidro moído com agregado para produção de concreto. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA MULTIDISCIPLINAR, 1., 2018, Mineiros. Anais eletrônicos [...]. Mineiros, 2018. Disponível em:https://publicacoes.unifimes.edu.br/index.php/coloquio/article/view/410/487#:~:text=Pode%2Dse%20concluir%2C%20que%20%C3%A9,res%C3%ADduo%20e%20diminui%C3%A7%C3%A3o%20do%20descarte. Acesso em: 12 fev 2026.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.
Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MORAIS, Agnelo; DOURADO, João Batista de Oliveira Libório; LIMA, Erica Karine Alves; RESENDE, Cristiane Xavier; PAZ, Gilvan Moreira; MATOS, José Milton Elias; SANTOS, Valdeci Bosco. Argamassa cimentícia: Uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial. CERÂMICA INDUSTRIAL. REVISTA DO TÉCNICO CERÃMICO BRASILEIRO, versão online, 2022.

MOTA, J. D.; OLIVEIRA, D. F.; TRAJANO, M. F.; SANTIAGO, N. O., SILVA, A.P.A. Aproveitamento dos resíduos de granito e caulim como materiais aditivos na produção de tijolos ecológicos, Bodocongó, 2011. Disponível em: https://www.academia.edu/33062485/APROVEITAMENTO_DOS_RES%C3%8DDUOS_DE_GRANITO_E_CAULIM_COMO_MATERIAIS_ADITIVOS_NA_PRODU%C3%87%C3%83O_DE_TIJOLOS_ECOL%C3%93GICOS. Acesso em: 09 fev. 2026.

NEVILLE, Adam; BROOKS, J. J. Tecnologia do Concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOGUEIRA, Kelso Antunes. "REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: DIRETRIZES E REQUISITOS DA ABNT NBR 15577/2008". Belo Horizonte, 2010. 81 p. Monografia. (Curso de Especialização em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais.

Organização das Nações Unidas. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org. Acesso em: 23 mar. 2026.

PUGLIESI, Nataly. Cimento: diferentes tipos e aplicações. PORTAL ABCP, São Paulo, 21 fev. 2018. Disponível em: https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/. Acesso em: 19 fev. 2026.

RODRIGUES, Valentina Teichmann; DEBONI, Ricardo Luis. ARQUITETURA E ENGENHARIA CIVIL CONTEMPORÂNEA: INOVAÇÃO, TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE. 3° ed. Ponta Grossa – PR. AYA Editora, 2022.
SAMPAIO, Jullie; CARVALHO, Dellane . Desempenho do concreto com pó de vidro e aditivo plastificante. Revista Ciência e Engenharia de Desenvolvimento (RCT), v. 10, 2024. ISSN 2447-7028.

SANTOS, Catiane Nascimento; MIRANDA, Luana do Carmo; MARTINS, Alex Mizael. Análise do Desempenho de Concretos Produzidos com Vidro. Universidade do rio verde, 2019. Disponível em: https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/Análise%20do%20Desempenho%20de%20Concretos%20Produzidos%20com%20Vidro.pdf. Acesso em: 03 abr. 2025.

SILVA, Mariana Felberk de Almeida; BONIFÁCIO, Diego Rodrigues. Substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro moído no concreto: uma análise sobre a resistência à compressão axial. REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA, Vol.15, 2023.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Números do setor.

Disponível em: http://snic.org.br/numeros-do-setor.php. Acesso em: 09 abr. 2025.

TINOCO, Vinícius Navarro Varela, JÚNIOR, Francisco Alves da Silva. Revisão literária do uso de vidro moído como substituto do agregado miúdo no concreto. 2018. Trabalho de conclusão de curso (graduação) [-Curso de bacharelado em ciência e tecnologia, Universidade Federal Rural do semiárido (UFERSA),] Mossoró, 2018.

VASCONCELOS, Victor Fernando Souza; MAROTTA, Luiza Ignez Mollica; SANTOS, Gustavo Soares; GUIMARÃES JÚNIOR, Mario; MENDES, Lourival Marin; LIMA, Gilberto de Miranda. Utilização de pó de vidro na fabricação de paver de concreto. *Revista DCS*, v. 22, n. 81, p. 1–21, 2025.

APÊNDICES

Apêndice A - Dosagem do concreto

A dosagem do concreto constitui uma etapa de grande importância no desenvolvimento do trabalho, pois define as proporções entre os materiais que compõem a mistura. Nessa fase, busca-se atender às propriedades requeridas para o concreto, como resistência mecânica e trabalhabilidade, de acordo com a finalidade de aplicação do material.

O método de dosagem adotado neste trabalho foi o método ABCP (CURTI, 2020), adaptado do método do ACI (*American Concrete Institute*) para as características dos agregados utilizados no Brasil. Esse modelo apresenta uma metodologia empírica muito utilizada na dosagem de concreto, buscando praticidade na estimativa de proporções dos materiais constituintes na mistura

De acordo com a metodologia empregada, para garantir que a resistência projetada (Fck) seja alcançada, o cálculo da dosagem baseou-se na **Equação (A1)** e nas condições de utilização dispostas na **Tabela (A1)**.

$$Fcj_{28} = Fck + 1{,}65 \text{ x } sd \qquad (A1)$$

Onde:

Fcj_{28}: Resistência média do concreto aos 28 dias (**MPa**);

Fck: Resistência projetada (**MPa**);

sd: Desvio padrão definido em função de como será preparado o concreto, atendendo a condição escolhida na **Tabela (A1)**.

Tabela A1 - Condições de utilização do concreto

Condição	Sd (MPa)	Descrição
Condição A	4,0	O cimento e os agregados são medidos em massa, a água de amassamento é medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados (concreto normalmente preparado pelas empresas de serviços de concretagens).
Condição B	5,5	O cimento é medido em massa, a água de amassamento é medida em volume mediante dispositivo dosador e os agregados em volume. A umidade do agregado miúdo é determinada pelo menos três vezes ao dia. O volume do agregado miúdo é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado.
Condição C	7,0	O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume, a água de amassamento é medida em volume e a sua quantidade é corrigida em função da estimativa da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto.

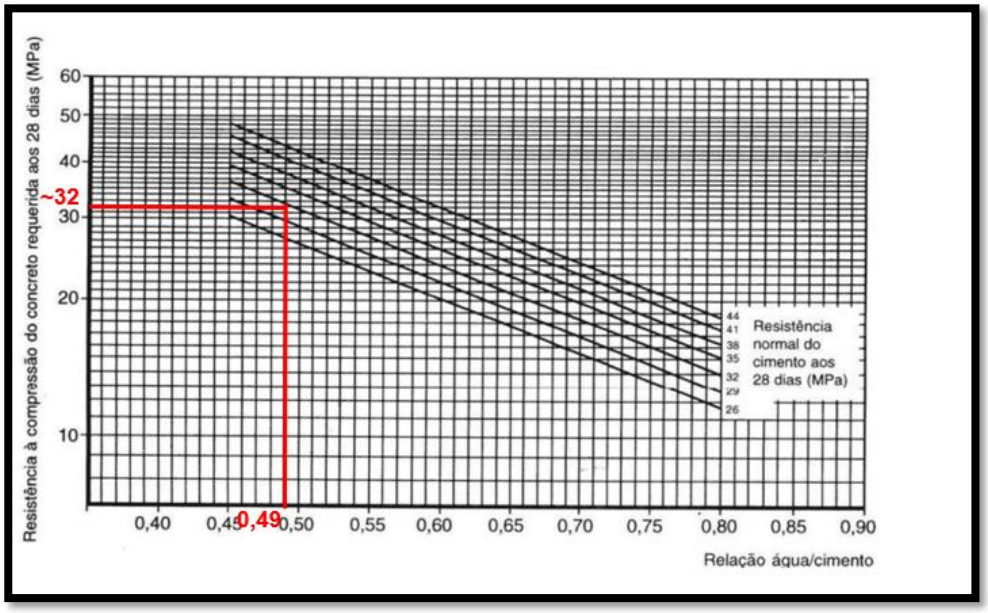
Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2020)

Considerando o valor da resistência projetada de 25MPa e o desvio padrão de 4,0, baseado na **Condição do tipo A** presente na **Tabela (A1)**, obtém-se o seguinte valor da resistência média do concreto aos 28 dias:

$$\mathrm{Fcj}_{28} = 25 + 1{,}65 \text{ x } 4 = 31{,}6 \text{ MPa}$$

Para a definição da relação água/cimento, realizou-se uma análise com base na **Tabela de Abrams**, que estabelece a correlação entre a resistência à compressão do concreto aos 28 dias e a relação água/cimento. A partir do valor da resistência média estimada para 28 dias (Fcj,28 = 31,6 MPa), determinou-se a relação água/cimento considerando a classe de resistência característica de 32 MPa. Dessa forma, obteve-se uma relação água/cimento (a/c) de 0,49, conforme apresentado na Figura A1.

Figura A1 - Relação Água/cimento



Fonte: Adaptado do original (2026)

A etapa seguinte consiste em determinar a classe e o valor do abatimento do concreto. As informações podem ser obtidas a partir da escolha da consistência desejada para o concreto presentes na **Tabela (A2)**, extraída da NBR 8953 (2015). A partir desta tabela, a classe de consistência adequada para este trabalho foi a S50 e valor de abatimento (A) utilizado foi de 90mm.

Tabela A2 - Classe de consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações Típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibro prensado ou centrifugado.
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações.
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto.
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto.
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras.

Fonte: NBR 8953 (2015)

Com a classe de consistência definida, a próxima etapa foi estimar o consumo de água na dosagem, a partir da **Tabela (A3)**. Considerando um abatimento de 90mm e que o diâmetro máximo do agregado graúdo foi de 25 mm, obtém-se o consumo de água em 200 L/m³.

Tabela A3- Consumo de água

CONSUMO DE ÁGUA APROXIMADA (L/m³)					
ABATIMENTO (mm)	**$D_{máx}$ agregado graúdo (mm)**				
	9,5	**19**	**25**	**32**	**38**
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado do original (2026)

O consumo de cimento é estimado de acordo com a divisão do consumo de água pela relação água/cimento, conforme **Equação (A2)**.

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad \text{(A2)}$$

Onde:

C_c: é o consumo de cimento (kg/m³);

C_a: é o consumo de água (L/m³);

a/c: é a relação água/cimento.

Considerando os critérios estabelecidos pelo método de dosagem, foram realizados os cálculos para a determinação do consumo de cimento, conforme apresentado a seguir.

$$C_c = \frac{200}{0{,}49} = 408{,}163\ kg/m^3$$

Para estimar o consumo dos agregados, utilizou-se a **Tabela (A4)**, que permite determinar a porcentagem do agregado graúdo seco por m³ de concreto (Vb) a partir da relação entre os valores do módulo de finura (MF) do agregado miúdo, com a dimensão máxima do agregado graúdo. O módulo de finura do agregado miúdo foi igual 2,6 e a dimensão máxima do agregado graúdo foi igual a 25. Diante disto, a porcentagem do agregado graúdo seco por m³ de concreto foi igual a 0,715.

Tabela A4 - Consumo de agregado

MF	Dimensões máximas (mm)				
	9,5	19	25	32	38
	Porcentagem de agregado graúdo (Vb)				
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	**0,715**	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6	0,465	0,59	0,615	0,64	0,665

Fonte: Autor (2026)

Com base nos dados previamente obtidos e nos critérios estabelecidos pela metodologia de dosagem adotada, foram realizados os cálculos necessários para a determinação das proporções dos materiais constituintes do concreto a seguir.

Uma vez determinada a porcentagem do agregado graúdo seco por m³ de concreto (Vb), é possível determinar o consumo do agregado graúdo a partir da **Equação (A3)**.

$$C_b = V_b \,.\, M_u \qquad \text{(A3)}$$

Onde:

C_b: consumo do agregado graúdo (kg/m³);

V_b: é a porcentagem do agregado graúdo seco por m³ de concreto;

Mu: é a massa unitária compactada do agregado graúdo (kg/m³).

Considerando os valores estabelecidos de acordo com a tabela (A4), foram realizados os cálculos para a determinação do consumo do agregado graúdo, conforme apresentado a seguir.

$$C_b = 0{,}715 \text{ x } 1499 = 1071{,}89 \text{ kg/m}^3$$

Para estimar o consumo do agregado miúdo, é necessário determinar o volume de areia (Vm), segundo a **Equação (A4)**:

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{Y_c} + \frac{C_b}{Y_b} + \frac{C_a}{Y_a}\right) \quad \text{(A4)}$$

Onde:

V_m: é o volume de areia;

C_c: é o consumo de cimento (kg/m³);

Y_c: é a massa específica do cimento (kg/m³);

C_b: é o consumo do agregado graúdo em (kg/m³);

Y_b: é a massa específica da brita em (kg/m³);

C_a: é o consumo de água (L/m³);

Y_a: é a massa específica da água em (kg/m³).

De acordo com os dados obtidos nas equações anteriores, a determinação do volume de areia está a seguir:

$$V_m = 1 - \left(\frac{408{,}163}{3100} + \frac{1071{,}89}{2687} + \frac{200}{100}\right) = 0{,}26946$$

Uma vez determinado o volume da areia, o consumo do agregado miúdo pode ser calculado a partir da **Equação (A5)**.

$$C_m = Y_m \,.\, V_m \quad \text{(A5)}$$

Onde:

C_m: é o consumo do agregado miúdo (areia) (kg/m³);

Y_m: é a massa específica da areia (kg/m³);

V_m: é o volume de areia.

A partir dos parâmetros definidos anteriormente, os cálculos necessários para a determinação do consumo do agregado miúdo estão a seguir:

$$C_m = 2237{,}2 \text{ x } 0{,}26946 = 602{,}83 \text{ kg/m}^3$$

O traço é obtido em termos de proporção, relacionando todos os dados referentes ao consumo dos materiais, conforme **Equação (A6)**:

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad \text{(A6)}$$

Onde:

C_c = Consumo de cimento (kg);

C_m = Consumo de areia (kg);

C_b = Consumo de brita (kg);

C_a = Consumo de água (L).

Diante disto, o valor do traço foi:

1: 1,48 : 2,63 : 0,49

Sendo:

- 1 kg de cimento;
- 1,48 kg de areia;
- 2,63 kg de brita;
- 0,49 litros de água

O valor do traço estabelecido é referente ao traço base da pesquisa, com 0% de pó de vidro. Este material será adicionado a mistura posteriormente em forma de porcentagens especificadas, tomando como base o valor do consumo de cimento. Na **Tabela (A5)** é possível visualizar o consumo do pó de vidro utilizado no trabalho para as concentrações de 5%, 10% e 15% em relação a quantidade de 11,54052 kg de cimento utilizado em cada traço.

Tabela (A5) - Consumo de pó de vidro

Teor de adição de pó de vidro	Quantitativo de cimento utilizado (kg)	Cálculo	Quantitativo de pó de vidro utilizado (kg)
5%	11,54052	11,54052 x 0,05	0,57703
10%		11,54052 x 0,1	1,15405
15%		11,54052 x 0,15	1,73108

Fonte: Autor (2026)