

Estudo de argamassas de revestimentos sustentáveis, usando pó de vidro e águas pluviais, submetidas a altas temperaturas

José Lucas Roza de Moraes

**Relatório Final da Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientadoras:

Eduarda Cristina Pires Luso - Instituto Politécnico de Bragança, ESTIG,
Departamento de Engenharia Civil, Bragança, Portugal

Elisabete Rodrigues Teixeira - Universidade do Minho, ISISE, ARISE,
Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

Bragança, 2025

Estudo de argamassas de revestimentos sustentáveis, usando pó de vidro e águas pluviais, submetidas a altas temperaturas

José Lucas Roza de Moraes

**Relatório Final da Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientadoras:

Eduarda Cristina Pires Luso - Instituto Politécnico de Bragança, ESTIG,
Departamento de Engenharia Civil, Bragança, Portugal

Elisabete Rodrigues Teixeira - Universidade do Minho, ISISE, ARISE,
Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

Bragança, 2025

Agradecimentos

Deixo expressa minha profunda gratidão a todos que tornaram possível a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, agradeço à minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e compreensão nos momentos de maior dedicação e ausência. Sem o incentivo, a paciência de cada um de vocês, eu não teria encontrado forças para seguir adiante.

Ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e, em especial, à Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG), agradeço pelas excelentes condições de estudo, pelos recursos laboratoriais e pela infraestrutura que propiciaram o desenvolvimento de cada etapa deste trabalho. Foi aqui que pude aprofundar meus conhecimentos e contar com uma comunidade acadêmica inspiradora.

De forma muito especial, deixo meu reconhecimento às minhas orientadoras, Professoras Doutoras Eduarda Luso e Elisabete Teixeira. Agradeço pelos direcionamentos, pelas críticas construtivas, pela generosidade com seus tempos e pela confiança que depositaram em meu esforço.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para esta jornada, colegas de laboratório, amigos, técnicos e colaboradores, deixo meu muito obrigado. Cada troca de ideia, cada palavra de apoio e cada gesto de solidariedade foram importantes para chegar até aqui.

Resumo

Este trabalho nasceu da necessidade de testar e avaliar soluções mais sustentáveis na construção civil, setor responsável por grande parte das emissões de CO₂ e pelo consumo intenso de água potável. Com o objetivo de reduzir o impacto ambiental sem comprometer o desempenho mecânico e térmico das argamassas de revestimento, este estudo avaliou a viabilidade e o desenvolvimento de argamassas de revestimento sustentáveis por meio da substituição parcial de cimento Portland por pó de vidro moído (20 %, 30 % e 40 %) e da substituição da água de amassadura (água potável) por água pluvial, bruta e ajustada ao pH neutro com cal. As formulações mantiveram razão água/cimento, de 0,45, constante e foram ajustadas quanto à granulometria do vidro e às propriedades químicas da água. Após 28 dias de cura, prismas foram submetidos a ensaios de variação dimensional, perda de massa, resistência à flexão e compressão em temperatura ambiente e após o aquecimento a 200 °C, 500 °C e 800 °C. Os resultados indicaram que o traço com 20 % de pó de vidro alcançou até 36 % de ganho em compressão e manteve ou superou ligeiramente a flexão de referência, enquanto teores maiores de vidro preservaram ganhos compressivos importantes, porém com redução da tenacidade relativa. As argamassas com água pluvial apresentaram aumento de até 25 % na compressão, elevado para 29 % quando ajustadas com cal, sem queda significativa na flexão. A relação entre perda de massa e de resistência mostrou correlação linear quase perfeita ($R^2 > 0,98$) para todas as formulações, revelando alta previsibilidade térmica; o traço de 20 % GP perdeu apenas 12,2 % de resistência para cada 1 % de massa evaporada, ao passo que a formulação com cal apresentou a maior sensibilidade térmica. A 800 °C, as misturas com vidro retiveram até 15 % da carga original, contrastando com perdas mais acentuadas no traço convencional. Finalmente, a eficiência relativa em relação à referência (compressão e flexão) atingiu cerca de 136 % e 96 %, respectivamente, para o traço 20 % GP. Dessa forma, contribuindo para evidenciar que o uso de pó de vidro e de água pluvial constitui estratégia promissora para argamassas de alto desempenho.

Palavras-chave: argamassa sustentável; pó de vidro; água pluvial; resistência mecânica; desempenho térmico.

Abstract

This work arose from the need to test and evaluate more sustainable solutions in the construction industry, a sector responsible for a large share of CO₂ emissions and heavy consumption of potable water. Aiming to reduce environmental impact without compromising the mechanical and thermal performance of rendering mortars, this study investigated the feasibility and development of sustainable mortars by partially replacing Portland cement with finely ground glass powder (20 %, 30 %, and 40 %) and substituting mixing water (tap water) with rainwater, either untreated or pH-adjusted with hydrated lime. Mix designs maintained a constant water-to-cement ratio of 0.45 and were tailored in terms of glass particle size distribution and water chemistry. After 28 days of curing, prismatic specimens were subjected to tests for dimensional change, mass loss, flexural strength, and compressive strength at room temperature and following exposure to 200 °C, 500 °C, and 800 °C. Results showed that the 20 % glass powder blend achieved up to a 36 % increase in compressive strength and maintained or slightly exceeded the reference flexural strength, whereas higher glass contents preserved significant compressive gains but with reduced toughness. Mortars made with rainwater exhibited compressive strength increases of up to 25 %, rising to 29 % when lime-adjusted, without significant losses in flexural capacity. The relationship between mass loss and strength loss was nearly perfectly linear ($R^2 > 0.98$) for all formulations, indicating high thermal predictability; the 20 % glass powder mix lost only 12.2 % of its strength for each 1 % of mass evaporated, whereas the lime-adjusted rainwater formulation showed the greatest thermal sensitivity. At 800 °C, glass-modified mortars retained up to 15 % of their original load-bearing capacity, in contrast with more pronounced losses in the conventional mix. Finally, relative efficiencies versus the control reached approximately 136 % in compression and 96 % in flexure for the 20 % glass powder blend. These findings demonstrate that the combined use of glass powder and rainwater represents a promising strategy for producing high-performance mortars with reduced environmental impact.

Keywords: sustainable mortar; glass powder; rainwater; mechanical strength; thermal performance.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	1
Resumo.....	2
Abstract.....	3
ÍNDICE.....	4
Índice de Figuras.....	6
Índice de Tabelas.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo Geral.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Justificativa do Trabalho.....	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1 Materiais de construção.....	5
2.1.1 Cimento: Características e Impactos Ambientais.....	5
2.1.2 Pó de Vidro: Características e Benefícios na Construção.....	6
2.1.3 Águas Pluviais.....	8
2.1.4 Cal Hidratada.....	10
2.2 Argamassas.....	11
2.3 Propriedades das Argamassas com incorporação de pó de vidro e águas pluviais.....	14
2.3.1 Propriedades físicas.....	14
2.3.2 Propriedades mecânicas.....	16
2.3.3 Propriedades térmicas e resistência a altas temperatura.....	17
3. METODOLOGIA.....	19
3.1. Materiais e Caracterização.....	22
3.1.1. Cimento: Tipo, Composição e Preparo.....	22
3.1.2. Agregados: Areia e Pó de Vidro.....	22
3.1.3. Águas Recicladas: Tipos e Propriedades Físico-Químicas.....	22
3.2. Formulação das Argamassas.....	24
3.2.2. Procedimentos de Mistura e Preparo.....	25
3.3.1. Critérios de Avaliação.....	26
3.3.2. Ensaios Realizados e Normas Aplicáveis.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1 Apresentação.....	28
4.2 Análise do Desempenho Dimensional, Visual e de Massa.....	30
4.3 Desempenho dos Provetes Fabricados com Pó de Vidro.....	39
4.3.1 Desempenho à flexão.....	39
4.3.2 Desempenho à compressão.....	41
4.3.3 Comparação compressão e flexão.....	42
4.3.4 Efeitos da temperatura.....	44

4.3.5 Eficiência Relativa dos Traços.....	46
4.4 Desempenho dos Provetes Fabricados com Água Pluvial.....	47
4.4.1 Desempenho à flexão.....	47
4.4.2 Desempenho à compressão.....	49
4.4.3 Comparação compressão e flexão.....	50
4.4.4 Efeitos da temperatura.....	52
4.4.5 Eficiência Relativa dos Traços.....	54
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	58

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema dos processos experimentais.....	21
Figura 2: Coleta de água pluvial.....	23
Figura 3: Coleta de água pluvial.....	24
Figura 4: Variação de massa (%) por traço e temperatura.....	30
Figura 5: Variação de comprimento (%) por traço e temperatura.....	31
Figura 6: Variação de largura (%) por traço e temperatura.....	31
Figura 7: Variação de espessura (%) por traço e temperatura.....	32
Figura 8: Variações visuais por traço e temperatura.....	32
Figura 9: Provetes 30% GP antes do aquecimento a 200 °C.....	33
Figura 10: Provetes 30% GP depois do aquecimento a 200 °C.....	33
Figura 11: Provetes 20% GP antes do aquecimento a 500 °C.....	33
Figura 12: Provetes 20% GP depois do aquecimento a 500 °C.....	34
Figura 13: Provetes 40% GP antes do aquecimento a 800 °C.....	34
Figura 14: Provetes 40% GP depois do aquecimento a 800 °C.....	35
Figura 15: Provetes AP com cal antes do aquecimento a 200 °C.....	35
Figura 16: Provetes AP com cal depois do aquecimento a 200 °C.....	36
Figura 17: Provetes AP com cal antes do aquecimento a 500 °C.....	36
Figura 18: Provetes AP com cal depois do aquecimento a 500 °C.....	36
Figura 19: Provetes AP bruta antes do aquecimento a 800 °C.....	37
Figura 20: Provetes AP bruta depois do aquecimento a 800 °C.....	38
Figura 21: Flexão média por traço e temperatura.....	39
Figura 22: Compressão média por traço e temperatura.....	40
Figura 23: Gráfico de dispersão - Flexão e compressão.....	44
Figura 24: Gráfico de dispersão - Perda de massa e perda de compressão.....	44
Figura 25: Eficiência relativa dos traços associada à flexão e compressão.....	47
Figura 26: Flexão média por traço e temperatura.....	48
Figura 27: Compressão média por traço e temperatura.....	49
Figura 28: Gráfico de dispersão - Flexão e compressão.....	51
Figura 29: Gráfico de dispersão - Perda de massa e perda de compressão.....	53
Figura 30: Eficiência relativa dos traços associada à flexão e compressão.....	54

Índice de Tabelas

Tabela 1: Discriminação dos traços utilizados.....	33
Tabela 2: Resultados das resistências à flexão e compressão.....	37

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das indústrias mais significativas em termos de impacto ambiental, devido ao elevado consumo de recursos naturais, energia e à geração de resíduos. Segundo a ONU-Habitat (2020), o setor é responsável por aproximadamente 39% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) e consome 50% dos recursos naturais extraídos globalmente. Neste contexto, a sustentabilidade surge como um princípio norteador para minimizar os impactos ambientais, promovendo a eficiência no uso de recursos e a redução de resíduos.

Materiais de construção inovadores e práticas sustentáveis, como a reciclagem de resíduos e a adoção de soluções circulares, têm se consolidado como alternativas promissoras. Especificamente, o uso de materiais reciclados em argamassas ganha destaque por aliar desempenho técnico à redução de impactos ambientais, respondendo às demandas de um setor em transformação.

O cimento, material fundamental em argamassas e betão, desempenha um papel central na construção civil, mas também representa uma das principais fontes de impacto ambiental. O processo de produção de cimento Portland emite grandes quantidades de CO₂ devido à calcinação do calcário e ao consumo intensivo de energia, respondendo por cerca de 8% das emissões globais de gases de efeito estufa (IEA, 2021).

Além disso, o uso extensivo de cimento contribui para a exploração de recursos não renováveis e a degradação ambiental, evidenciando a necessidade de alternativas sustentáveis que possam reduzir o consumo deste material sem comprometer a qualidade e o desempenho das estruturas.

Contudo, a incorporação de materiais reciclados, como pó de vidro e resíduos de construção e demolição (RCDs), em argamassas tem demonstrado grande potencial para mitigar os impactos ambientais do setor. Estudos recentes (Mohammad et al., 2023; Silva e Almeida, 2021) indicam que o uso de pó de vidro moído não apenas reduz a necessidade de cimento, mas também melhora propriedades como a durabilidade e a resistência química das argamassas. Milhares de toneladas de vidro são descartadas anualmente, e com um tratamento

adequado estes resíduos podem se tornar reutilizáveis, mais especificamente, em argamassas de revestimento e semelhantes.

Nas construções, o primeiro uso e o mais consolidado da água de chuva é o de captação para fins não potáveis, irrigação de jardins, lavagem de pisos, descarga de vasos sanitários e até sistemas de resfriamento evaporativo. É comum instalar calhas e cisternas conectadas a filtros de sedimentos para remover folhas e partículas maiores, o primeiro fluxo costuma ser descartado exatamente para limpar a superfície dos telhados. Em edifícios de escritórios e condomínios, sistemas automatizados transferem a água pluvial para cisternas internas, reduzindo em até 40 % o consumo de água tratada. Nesse sentido, além desses usos, a água pluvial se torna uma ótima alternativa para incorporação em argamassas, visto que a coleta e reutilização de águas pluviais e o uso de cisternas já são realidade e inclusive obrigatórios em muitas edificações em vários países do mundo.

Cada tonelada de cimento Portland produz, em média, cerca de 0,8 toneladas de CO₂ na sua calcinação e queima (Mehta & Monteiro, 2014). Ao substituir 20 % do cimento por pó de vidro moído, reduz-se diretamente essa emissão em cerca de 0,16 tonelada de CO₂ por tonelada de argamassa produzida. Para uma obra de pequeno porte que consome 50 toneladas de argamassa, isso equivale a uma economia de 8 toneladas de CO₂, o mesmo efeito de retirar quase dois automóveis (4 passageiros cada) de circulação por um ano inteiro (EPA, 2021). Além disso, cada tonelada de vidro reciclado que deixa de ir para aterros evita o dispêndio de energia e emissões associadas à produção de areia e brita, o que equivale a outros 0,2 tonelada de CO₂ evitados (Gartner & Sui, 2018).

No ciclo da água, o consumo médio de argamassas convencionais exige cerca de 180 L de água potável por metro cúbico de mistura (ACI, 2012). Com captação de água pluvial, estudos mostram que é possível reduzir em até 40 % essa demanda de água tratada, ou seja, economizar cerca de 72 L de água potável por m³ de argamassa. Em uma construção de 200 m² de piso, com 3 cm de espessura de argamassa, isso representa quase 4 000 L de água de reutilização poupada, o suficiente para abastecer uma família de 4 pessoas por quase um mês (UN-Water, 2018).

Somando-se esses ganhos, uma obra média de 100 m³ de argamassa com 20 % de pó de vidro e água pluvial captada e filtrada alcançaria uma redução de cerca de 16 toneladas de

CO₂ e preservaria mais de 7200 L de água potável. Esses valores demonstram que, longe de serem apenas aditivos, o pó de vidro reciclado e a utilização sistemática de água da chuva podem transformar a gestão de recursos na construção, aproximando-nos de metas de neutralidade de carbono e de uso responsável da água.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Determinação experimental das propriedades físicas, mecânicas térmicas e de resistência a altas temperaturas de argamassas de revestimento, à base de cimento, com incorporação de pó de vidro e águas recicladas na sua composição.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar as características físico-químicas do pó de vidro para identificar sua adequação em argamassas.
- Desenvolver formulações de argamassas incorporando diferentes proporções de pó de vidro e águas pluviais.
- Avaliar propriedades mecânicas, como resistência à flexão e compressão, das argamassas com materiais reciclados, pó de vidro e águas residuais pluviais.
- Testar o desempenho térmico das novas argamassas, analisando a resistência a altas temperaturas.
- Comparar os resultados obtidos com dados de estudos anteriores e com as normas técnicas aplicáveis, identificando os benefícios e limitações das novas formulações.

1.4 Justificativa do Trabalho

Este trabalho é justificado pela necessidade urgente de promover práticas mais sustentáveis na construção civil, um dos setores mais impactantes em termos ambientais. Frente às metas globais de sustentabilidade estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, 11 e 12, que versam sobre infraestrutura resiliente, cidades sustentáveis e consumo responsável, torna-se imperativo investigar soluções inovadoras que reduzam as emissões de CO₂ e o consumo de recursos naturais, para como cimento e água potável.

A pesquisa busca aprofundar o conhecimento sobre duas estratégias sustentáveis aplicáveis de forma independente às argamassas de revestimento: a substituição parcial do cimento Portland por pó de vidro moído e o uso de água pluvial, tratada ou não. Embora ambas as abordagens já tenham sido exploradas em estudos anteriores, ainda são escassas as análises que avaliem de forma comparativa e sistemática seus efeitos sobre o comportamento térmico e mecânico das argamassas especialmente sob exposição a temperaturas elevadas.

A motivação central reside em entender como essas substituições impactam o desempenho do material não apenas em condições padrão, mas em cenários críticos, como exposições a 200 °C, 500 °C e 800 °C, simulando situações reais de altas temperaturas. Avaliar esse comportamento é essencial para ampliar a aplicação de materiais reciclados em contextos que exigem alta resistência térmica, contribuindo para a confiabilidade técnica das soluções sustentáveis.

Ao analisar separadamente os efeitos do pó de vidro em proporções diferentes e da água pluvial, incluindo a variação entre água bruta e ajustada com cal, este trabalho oferece subsídios práticos para decisões técnicas mais embasadas e promove alternativas viáveis para construções mais eficientes e ambientalmente responsáveis. A pesquisa, portanto, reforça a importância da engenharia da construção no avanço das metas de sustentabilidade, sem abrir mão do desempenho estrutural exigido pelas normas técnicas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Materiais de construção

2.1.1 Cimento: Características e Impactos Ambientais

Os materiais de construção desempenham um papel essencial no desenvolvimento da infraestrutura global, sendo responsáveis por garantir a funcionalidade e a durabilidade de edificações e obras civis. Contudo, a produção e utilização desses materiais, especialmente em larga escala, estão associadas a impactos significativos ao meio ambiente. A extração intensiva de recursos naturais, o consumo elevado de energia e a geração de resíduos são desafios que o setor enfrenta no contexto da sustentabilidade. Entre os materiais mais utilizados na construção civil, o cimento se destaca como componente chave em argamassas e betão, sendo responsável por suas propriedades de aderência e resistência.

A produção de cimento é um processo altamente intensivo em recursos e energia. Considerado um dos pilares da construção civil moderna, o cimento Portland é produzido a partir da calcinação do calcário (CaCO_3) em fornos rotativos a temperaturas superiores a 1.450°C . Esse processo, embora essencial para a fabricação do clínquer, principal componente do cimento, é uma das maiores fontes de emissões globais de dióxido de carbono (CO_2). Segundo dados do International Energy Agency (IEA), o setor cimenteiro responde por aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2 , sendo um dos maiores contribuintes para as mudanças climáticas.

Além do impacto ambiental das emissões, o processo de produção do cimento demanda grandes quantidades de energia elétrica e térmica, que frequentemente provêm de combustíveis fósseis. Adicionalmente, a extração do calcário e de outras matérias-primas, como a argila, representa uma intervenção direta nos ecossistemas, alterando a paisagem natural e ameaçando a biodiversidade local. Esses fatores tornam a produção de cimento uma atividade com elevado custo ambiental, exigindo esforços contínuos para mitigar seus impactos.

Para lidar com esses desafios, o setor tem buscado alternativas que promovam a redução do consumo de cimento Portland, sem comprometer a qualidade e a durabilidade das construções. Uma das estratégias mais promissoras é a substituição parcial do clínquer por materiais reciclados ou adições minerais, como cinzas volantes, escórias de alto-forno e pó de

vidro moído. Ana Mafalda Matos (2010) destacou que a incorporação de 10% a 20% de pó de vidro em argamassas não apenas reduziu as emissões associadas à produção de cimento, mas também melhorou as propriedades mecânicas e de durabilidade das formulações testadas.

Além da redução de CO₂, a utilização de materiais reciclados como substitutos parciais do cimento contribui para a economia circular, reaproveitando resíduos que, de outra forma, seriam descartados em aterros sanitários. O pó de vidro, por exemplo, apresenta características pozolânicas que permitem sua reação com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando compostos cimentícios adicionais, como os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Esses compostos são fundamentais para a resistência e a densidade da matriz cimentícia, tornando as argamassas mais duráveis e menos suscetíveis a fissuras e outros tipos de degradação.

No entanto, a produção de cimento não é o único fator a ser considerado quando se trata do impacto ambiental dos materiais de construção. A escolha de agregados, aditivos e até mesmo a água utilizada na mistura de argamassas e betão influencia significativamente o desempenho e a sustentabilidade desses materiais.

Por fim, os materiais de construção devem atender a rigorosos critérios técnicos e normativos, garantindo que as inovações em sustentabilidade não comprometam o desempenho estrutural e a segurança das edificações. A norma EN 197-1, que regulamenta a composição do cimento Portland, e outras normas técnicas relacionadas ao desempenho de argamassas e betão, são essenciais para orientar a implementação de práticas mais sustentáveis no setor. Assim, o desenvolvimento de materiais de construção alinhados à sustentabilidade requer não apenas inovações tecnológicas, mas também mudanças nos padrões produtivos e na gestão de resíduos (CEN, 2011).

2.1.2 Pó de Vidro: Características e Benefícios na Construção

O vidro é amplamente utilizado em setores como embalagens, construção e eletrônica, mas seu descarte inadequado tem gerado preocupações ambientais significativas. Quando reciclado e moído em partículas finas, o vidro se transforma em pó, que apresenta propriedades pozolânicas capazes de melhorar o desempenho de argamassas e betão. A propriedade pozolânica é a capacidade do material de reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), liberado durante a hidratação do cimento, formando compostos cimentícios

adicionais, como os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H). Esses compostos são essenciais para a resistência e a densidade da matriz cimentícia.

O pó de vidro é obtido pela moagem de resíduos vítreos descartados, como garrafas, embalagens e vidros planos, até atingir granulometrias adequadas para a sua reatividade. Matos (2010) demonstrou que partículas com diâmetro inferior a 45 micrômetros apresentam maior reatividade química, enquanto partículas maiores tendem a atuar como material inerte, afetando principalmente as propriedades físicas da mistura, como densidade e porosidade.

Quando incorporado em argamassas, o pó de vidro pode substituir parcialmente o cimento ou os agregados, contribuindo para a redução das emissões de dióxido de carbono associadas à fabricação de cimento Portland. Cada tonelada de cimento substituída por vidro reciclado reduz cerca de 800 kg de CO₂, segundo estimativas da IEA (2021).

Pode-se citar alguns benefícios do pó de vidro: o uso de pó de vidro como substituto do cimento em argamassas pode aumentar a resistência à compressão em até 15% após 180 dias de cura, conforme os ensaios de Matos (2010); a formação de compostos C-S-H densifica a matriz cimentícia, reduzindo a permeabilidade e aumentando a resistência à penetração de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos; devido à baixa condutividade térmica do vidro, as argamassas contendo pó de vidro apresentam melhores propriedades isolantes, conforme relatado por Cunha (2014).

As argamassas com pó de vidro exibem condutividade térmica reduzida em até 12%, tornando-as ideais para aplicações em climas extremos. Além disso, estudos como os de Peixeiro (2016) destacam que essas argamassas mantêm boa trabalhabilidade no estado fresco, desde que sejam adotados ajustes na quantidade de água e no uso de aditivos plastificantes.

Nos ensaios realizados por Matos (2010), foram fabricados provetes prismáticos de 40 × 40 × 160 mm com substituições de cimento por pó de vidro em proporções de 10% e 20%. Após a cura submersa, os provetes foram submetidos a ensaios de compressão e flexão aos 7, 28, 90 e 180 dias. Os resultados mostraram que as misturas contendo 10% de pó de vidro apresentaram resistência à compressão equivalente ao controle aos 28 dias, com melhorias significativas aos 90 dias. Para as misturas com 20% de substituição, observou-se uma leve

redução inicial na resistência, mas com recuperação e melhoria aos 180 dias, devido à reatividade pozolânica tardia do vidro.

No estado fresco, o pó de vidro pode alterar a trabalhabilidade das argamassas, aumentando a necessidade de aditivos plastificantes para manter a consistência ideal. Peixeiro (2016) observou que misturas com 20% de substituição exigiram ajustes na relação água/cimento para garantir uma boa fluidez, sem comprometer a resistência. No estado endurecido, as argamassas apresentaram densidade ligeiramente menor, com redução da porosidade total e melhoria na resistência ao ataque químico.

Um dos principais benefícios do uso de pó de vidro em argamassas é a sua contribuição para a durabilidade do material. O vidro reciclado atua como uma barreira contra a penetração de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos, reduzindo o risco de corrosão das armaduras em estruturas de betão armado. Além disso, a capacidade do pó de vidro de mitigar a reação álcali-sílica (ASR), a qual é uma das principais causas de degradação em argamassas e betão expostos a ambiente alcalinos, foi comprovada nos estudos de Matos (2010), que observaram uma redução significativa na expansão dos provetes expostos a soluções alcalinas.

Ademais, Cunha (2014) verificou que misturas com 15% de substituição de cimento por vidro reciclado reduziram em até 10% a transferência de calor em ensaios de condutividade térmica. Além disso, Peixeiro (2016) destacou que essas argamassas mantiveram até 70% de sua resistência original após exposição a 600°C, evidenciando seu potencial para aplicações em ambientes sujeitos a riscos de incêndio.

Apesar das vantagens, o uso de pó de vidro enfrenta desafios que limitam sua aplicação em larga escala. Um dos principais é o custo associado à moagem dos resíduos até granulometrias finas, especialmente para partículas menores que 45 micrômetros, que são mais reativas. Além disso, a presença de contaminantes no vidro reciclado pode comprometer a qualidade das misturas, exigindo processos de triagem e limpeza adequados.

2.1.3 Águas Pluviais

A utilização de águas pluviais na construção civil tem ganhado destaque como estratégia para minimizar o consumo de água potável e reduzir impactos ambientais.

Entretanto, sua composição química e física pode influenciar diretamente as propriedades das argamassas e betão, tornando essencial um controle rigoroso de suas características antes do uso. Fatores como pH, presença de matéria orgânica, condutividade elétrica e concentração de sais dissolvidos podem interferir na hidratação do cimento, no desenvolvimento da resistência mecânica e na durabilidade das estruturas.

O pH da água pluvial pode variar de acordo com fatores atmosféricos, sendo geralmente ácido devido à dissolução de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, o que leva à formação de ácido carbônico (H_2CO_3). Em regiões urbanas e industriais, esse efeito é potencializado pela presença de óxidos de enxofre (SO_2 , SO_3) e de nitrogênio (NO_x), resultando em águas com pH inferior a 5,5, caracterizando a chuva ácida (Wang et al., 2019).

A alcalinidade da água utilizada na produção de argamassas é fundamental para evitar reações deletérias ao cimento. O pH ideal para a hidratação do cimento Portland está na faixa de 12 a 13, promovendo a formação adequada de compostos hidratados, como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que conferem resistência mecânica à matriz cimentícia (Neville, 2016). Quando a água possui pH ácido, pode ocorrer lixiviação de íons cálcio (Ca^{2+}), levando à desestabilização da microestrutura da argamassa e reduzindo sua resistência final (Mehta & Monteiro, 2014).

Além disso, a baixa alcalinidade da água pode contribuir para a corrosão das armaduras em estruturas de betão armado. Estudos indicam que a dissolução de compostos hidratados da matriz cimentícia ocorre mais rapidamente em águas ácidas, reduzindo a vida útil das construções expostas a esse tipo de condição (Taylor, 1997).

A água pluvial pode conter quantidades variáveis de matéria orgânica, provenientes de poeira atmosférica, resíduos vegetais e dejetos de animais acumulados nas superfícies de captação (Montgomery & Elimelech, 2007). Essa matéria orgânica pode atuar como um agente dispersante no sistema cimentício, afetando diretamente o tempo de pega e a evolução da resistência mecânica.

Compostos orgânicos dissolvidos, como ácidos húmicos e fúlvicos, podem complexar íons cálcio (Ca^{2+}), reduzindo a taxa de precipitação dos produtos hidratados e retardando o endurecimento da argamassa (Huijgen et al., 2005). Além disso, a presença excessiva de matéria orgânica pode aumentar a porosidade do material, tornando-o mais suscetível à absorção de água e à degradação ao longo do tempo (Sabir; Wild; Bai, 2001).

Para minimizar esses impactos, é recomendável que a água pluvial passe por processos de tratamento antes do uso, como decantação e filtração, para remover partículas em suspensão e compostos dissolvidos que possam comprometer a durabilidade das argamassas (Kim & Lee, 2011).

A condutividade elétrica da água pluvial reflete sua concentração de sais dissolvidos, incluindo cloretos (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) e carbonatos (CO_3^{2-}), que podem impactar a estabilidade química das argamassas (Taylor, 1997). A presença de cloretos é particularmente preocupante em regiões costeiras, pois pode acelerar a corrosão das armaduras de betão, reduzindo significativamente a durabilidade das estruturas (Andrade & Borges, 2015).

Os sulfatos dissolvidos podem reagir com compostos do cimento, formando etringita expansiva, o que leva à fissuração prematura da matriz cimentícia e compromete a integridade estrutural (Neville, 2016). Já os carbonatos podem alterar o equilíbrio químico dos compostos hidratados do cimento, reduzindo sua resistência mecânica (Mehta & Monteiro, 2014).

A avaliação da condutividade elétrica e da concentração de íões dissolvidos na água pluvial deve ser feita antes de sua utilização em argamassas, e, caso os níveis de contaminantes sejam elevados, tratamentos como a osmose reversa ou a destilação podem ser empregados para garantir a qualidade adequada da água (Huijgen et al., 2005).

A água utilizada na mistura de argamassas afeta diretamente seu comportamento térmico durante a hidratação e cura. A presença de impurezas pode modificar a taxa de evaporação da água na argamassa, impactando a distribuição da humidade e, conseqüentemente, a resistência térmica do material (Kim & Lee, 2011).

Além disso, compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos podem alterar a capacidade de retenção de água da argamassa, influenciando sua condutividade térmica e resistência à altas temperaturas. Estudos indicam que a argamassa produzida com água contendo altos teores de matéria orgânica pode apresentar maior susceptibilidade a fissuração térmica devido à evaporação irregular da humidade interna (Mehta & Monteiro, 2014).

2.1.4 Cal Hidratada

A cal hidratada, também conhecida como hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), é um produto obtido a partir da queima do calcário (carbonato de cálcio, CaCO_3) em fornos industriais, processo que gera a cal viva (óxido de cálcio, CaO). Posteriormente, a cal viva é

apagada com água, resultando no hidróxido de cálcio, um pó fino, levemente alcalino e de baixa densidade. Na construção civil, a cal hidratada tem sido utilizada há séculos como aglomerante em argamassas e rebocos, e em combinação com cimento Portland.

Quimicamente, a cal hidratada age pela reação de hidratação, em que o CaO dissolvido forma Ca^{2+} e OH^- . Em meio aquoso, esses íons reagem com dióxido de carbono do ar para formar carbonato de cálcio secundário, conferindo à argamassa maior durabilidade e resistência sob condições moderadas de carga (Taylor, 1997). Em argamassas, a cal hidratada costuma ser misturada na proporção de 5 % a 20 % em massa, substituindo parte do cimento ou inserida em traços menos densos, próprios para assentamento de tijolos e reboco fino. Sua aplicação traz melhora a trabalhabilidade da massa, confere maior plasticidade e retenção de água, reduz fissurações por retração plástica e aumenta o tempo de pega, facilitando correções e acabamentos (Neville, 2012).

No entanto, por ser menos resistente que o cimento Portland, argamassas ricas em cal podem apresentar menor resistência final à compressão. Além disso, o excesso de cal pode levar a maior suscetibilidade a lixiviação em ambientes muito húmidos, uma vez que o hidróxido de cálcio é solúvel em água e pode ser lavado, reduzindo progressivamente a coesão da argamassa (Mehta & Monteiro, 2014). Para compensar esse efeito, muitas formulações modernas combinam cimento, cal hidratada e aditivos polímeros ou pozolanas, buscando um equilíbrio entre trabalhabilidade e durabilidade.

Quando se utiliza água de chuva na dosagem, a química se torna ainda mais delicada. A água pluvial, embora geralmente pura em íons de dureza, pode conter pequenas quantidades de ácidos dissolvidos, como ácidos carbônico e sulfúrico em zonas urbanas, cuja reação com a cal hidratada aumenta a taxa de carbonatação precoce, acelerando o endurecimento inicial, mas também elevando a chance de fissuras internas por formação descontrolada de carbonato (Basheer & Khan, 2001). Além disso, se a água pluvial não for adequadamente filtrada, partículas de poeira ou matéria orgânica podem interferir na distribuição da cal na argamassa, criando zonas de menor aderência.

2.2 Argamassas

A argamassa é um dos materiais mais comuns e essenciais na construção civil, sendo uma mistura composta de cimento, cal, areia e água. Ela desempenha uma função fundamental em diversas etapas da obra, sendo aplicada para o assentamento de blocos, revestimentos de paredes e pisos, e outras finalidades que garantem a estrutura e o acabamento de um edifício. Basicamente, sua função é unir elementos, preencher espaços e proporcionar acabamentos, tornando-se indispensável em quase todos os tipos de construção (Bertolini et al., 2009).

Os componentes principais da argamassa são o cimento, a cal, a areia e a água. O cimento é o responsável pela resistência mecânica do material, ou seja, garante que a argamassa tenha a durabilidade necessária após sua aplicação. A cal, por sua vez, ajuda a melhorar a plasticidade da mistura, o que torna o trabalho com a argamassa mais fácil e facilita sua aplicação. A areia serve como agregado, proporcionando volume e estabilidade à mistura. A água é um componente essencial, pois é ela que ativa o cimento, permitindo que o material passe pelo processo de hidratação e adquira as características que o tornam resistente e durável (Bertolini et al., 2009).

A argamassa não é uma mistura única e imutável; existem diferentes tipos, cada um com uma função específica. A argamassa de assentamento, por exemplo, é amplamente utilizada para unir tijolos ou blocos em alvenaria, sendo um dos materiais mais fundamentais na construção de paredes e fundações. Já a argamassa de revestimento é aplicada nas superfícies de paredes e tetos, dando o acabamento final e protegendo as construções. Para fixar revestimentos cerâmicos, é utilizada a argamassa colante, que tem como objetivo garantir a aderência e estabilidade desses materiais. Outra variedade importante é a argamassa autonivelante, utilizada para corrigir imperfeições e nivelar pisos, oferecendo uma superfície plana e uniforme. Por fim, a argamassa industrializada, que vem pronta para o uso, é uma opção prática que reduz o tempo de preparação e aumenta a eficiência no canteiro de obras (Silva et al., 2014).

A composição da argamassa tem um impacto direto nas suas propriedades. Entre as principais propriedades estão a aderência, a trabalhabilidade e a resistência mecânica. A aderência se refere à capacidade da argamassa de se fixar com segurança às superfícies, um aspecto essencial para garantir que os revestimentos ou blocos fiquem firmemente no lugar. A trabalhabilidade diz respeito à facilidade com que a mistura pode ser manipulada durante sua aplicação, o que depende principalmente da quantidade de cal e areia. Já a resistência

mecânica é a capacidade do material de suportar as forças que vão atuar sobre ele, garantindo que a construção tenha estabilidade e segurança (Araujo et al., 2017).

A versatilidade da argamassa permite diversas aplicações na construção civil. Além de ser fundamental no assentamento de tijolos e blocos, ela também é usada em acabamentos internos e externos, como rebocos e revestimentos. Em obras de grande porte, como edifícios e infraestrutura, a argamassa é usada tanto para a alvenaria estrutural quanto para a vedação e acabamento. Ela também tem um papel importante na correção de superfícies, sendo usada para nivelar pisos e corrigir pequenas imperfeições nas paredes e outras superfícies. Em todos esses casos, a argamassa não só desempenha uma função estrutural, mas também contribui para a estética e a qualidade de vida dos moradores, ao oferecer uma construção segura e bem acabada (Cavalcante et al., 2015).

A preparação e a aplicação da argamassa exigem cuidado e precisão. A mistura pode ser feita de maneira manual ou mecânica, sendo que em grandes obras, a mistura mecânica é preferível, pois garante maior uniformidade e agilidade. A aplicação da argamassa, por sua vez, pode ser feita com o auxílio de ferramentas como a desempenadeira ou a colher de pedreiro, sendo essencial que o profissional saiba utilizar a técnica correta para obter o melhor resultado. Uma técnica que tem ganhado popularidade é a aplicação projetada, onde a argamassa é lançada com o uso de máquinas, o que facilita a aplicação em grandes áreas e reduz o tempo de execução (Junqueira, 2013).

O tempo de cura da argamassa é outro fator crucial. A cura é o processo químico em que o cimento reage com a água, e é durante esse período que a argamassa adquire suas propriedades finais, como resistência e durabilidade. O tempo de cura pode variar, dependendo do tipo de argamassa e das condições climáticas. Em geral, a cura pode levar de 7 a 28 dias, e fatores como temperatura e umidade podem influenciar esse processo (Chaves et al., 2016).

Em resumo, a argamassa é um material de grande importância na construção civil, não apenas pelo seu papel estrutural, mas também pela sua contribuição na estética e no conforto dos ambientes. Sua composição, propriedades e versatilidade garantem que ela seja utilizada em uma infinidade de aplicações, tornando-se um dos pilares da construção civil moderna. Para obter os melhores resultados, é essencial conhecer as características de cada tipo de argamassa, seguir as recomendações de preparo e aplicação e garantir que o tempo de cura seja respeitado.

2.3 Propriedades das Argamassas com incorporação de pó de vidro e águas pluviais

2.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas das argamassas desempenham um papel fundamental na sua durabilidade, aderência, resistência mecânica e eficiência na construção civil. A composição da argamassa, incluindo o tipo de cimento, adições minerais, agregados e teor de água, influencia diretamente suas características físicas e reológicas. A substituição parcial do cimento por materiais reciclados, como o pó de vidro, pode modificar a densidade, a trabalhabilidade e a porosidade da mistura, resultando em benefícios técnicos e ambientais.

A textura e a granulometria dos componentes da argamassa são fatores determinantes para a trabalhabilidade e o acabamento superficial. A distribuição do tamanho das partículas afeta a compactação da mistura e a quantidade de vazios internos, o que, por sua vez, influencia a resistência mecânica e a absorção de água. Segundo Peixeiro (2016), a introdução de pós finos, como vidro moído, pode melhorar a distribuição granulométrica da argamassa, aumentando sua coesão e reduzindo a necessidade de ligantes primários. No entanto, a adição excessiva de partículas finas pode comprometer a permeabilidade e elevar a retração, favorecendo o surgimento de fissuras.

Por outro lado, quando partículas maiores de vidro são utilizadas, seu efeito é predominantemente inerte, resultando em uma leve redução da resistência inicial da argamassa. Isso se deve à menor superfície de contato disponível para reação com os compostos do cimento, o que pode criar zonas de descontinuidade na matriz. Além disso, a substituição excessiva do cimento pode aumentar a porosidade da argamassa, tornando-a mais suscetível à absorção de água e a degradação por ciclos de humidade e secagem (Cunha, 2014).

A porosidade da argamassa é uma característica crucial, pois determina sua absorção de água e, conseqüentemente, sua durabilidade. Cunha (2014) ressalta que materiais altamente porosos são mais suscetíveis à degradação devido a ciclos de humidade e secagem, além de facilitarem a penetração de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos. Estudos indicam que a substituição parcial do cimento por pó de vidro reduz a porosidade, melhorando a impermeabilidade da argamassa sem comprometer sua resistência mecânica (Matos, 2010).

A trabalhabilidade e a consistência da argamassa estão diretamente ligadas à quantidade de água e ao tipo de agregado utilizado. As argamassas mais fluidas apresentam melhor espalhabilidade e aderência, facilitando o processo de aplicação e reduzindo desperdícios. Peixeiro (2016) verificou que o uso de pó de vidro melhora a retenção de água, reduzindo a segregação dos componentes e aumentando a resistência inicial da mistura. No entanto, se não for bem dosado, o vidro moído pode aumentar a viscosidade da argamassa, dificultando sua aplicação em condições normais de trabalho.

A densidade da argamassa também é um fator relevante, especialmente para aplicações em revestimentos e estruturas leves. De acordo com Cunha (2014), a substituição de agregados naturais por materiais reciclados pode reduzir o peso da argamassa, tornando-a mais eficiente em termos estruturais. No entanto, a introdução de materiais de alta densidade, como o pó de vidro, pode elevar a massa específica da argamassa, tornando-a mais compacta e resistente.

A retração e a fissuração são desafios comuns na formulação de argamassas. A perda de água durante o processo de cura pode levar a uma redução volumétrica, resultando em tensões internas que favorecem o aparecimento de microfissuras. Segundo Matos (2010), a substituição parcial do cimento por pó de vidro pode ajudar a minimizar a retração, reduzindo a demanda por água e promovendo uma hidratação mais controlada. Além disso, a presença de partículas finas melhora a distribuição das tensões, reduzindo a incidência de fissuras precoces.

A condutividade térmica das argamassas é outro aspecto físico relevante, especialmente para a eficiência energética das edificações. Cunha (2014) demonstrou que a incorporação de vidro moído reduziu a condutividade térmica das argamassas em até 15%, tornando-as mais eficientes para o isolamento térmico de paredes e fachadas. Esse efeito pode ser potencializado quando combinado com outros materiais de baixa condutividade, como resíduos poliméricos ou cinzas de biomassa.

Dessa forma, as propriedades físicas das argamassas são determinantes para sua qualidade e desempenho estrutural. A introdução de materiais reciclados, como o pó de vidro, apresenta potencial para melhorar diversas características, como trabalhabilidade, densidade, porosidade e resistência térmica, tornando as argamassas mais eficientes e sustentáveis. Em contrapartida, a dosagem dos materiais deve ser cuidadosamente estudada para garantir que os benefícios esperados sejam alcançados sem comprometer a durabilidade do material.

2.3.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das argamassas são fundamentais para avaliar o comportamento das argamassas em relação à solicitação de diferentes esforços. Entre os principais parâmetros avaliados, a resistência à compressão e a resistência à flexão são os mais utilizados para caracterizar a capacidade do material de suportar diferentes tipos de esforços mecânicos. A resistência à compressão indica a capacidade da argamassa de suportar cargas axiais que tendem a comprimi-la, sem sofrer falha estrutural, enquanto a resistência à flexão avalia sua capacidade de resistir ao momento fletor gerado pela força que a submete, sendo especialmente relevante para revestimentos, pisos e argamassas de assentamento.

A inclusão de resíduos reciclados na formulação das argamassas, pode modificar significativamente essas propriedades, dependendo da proporção utilizada, do tamanho das partículas e da interação química entre os componentes. Estudos indicam que a adição de materiais pozolânicos, como o pó de vidro, pode contribuir para o aumento da resistência mecânica ao longo do tempo devido à reação com os compostos do cimento, formando silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), que melhoram a coesão da matriz cimentícia (Matos, 2010; Cunha, 2014). No entanto, o desempenho final da argamassa dependerá de uma série de fatores, como granulometria dos resíduos, relação água/cimento e tempo de cura.

A resistência à compressão é um dos principais critérios utilizados para avaliar a durabilidade e a aplicabilidade da argamassa. Esse parâmetro é determinado por ensaios laboratoriais padronizados, como os descritos na norma EN 1015-11, que estabelece procedimentos para a moldagem, cura e ruptura de provetes prismáticos de $40 \times 40 \times 160$ mm submetidos a carregamento axial (CEN, 1999).

Um aspecto relevante é a relação água/cimento. O uso de vidro moído pode reduzir a demanda de água devido ao seu efeito de preenchimento na matriz cimentícia, melhorando a compactação da argamassa. Entretanto, quantidades elevadas de vidro podem tornar a mistura mais seca, reduzindo sua fluidez e dificultando a aplicação, o que exige a adição de plastificantes para compensar essa variação reológica (Peixeiro, 2016).

A resistência à flexão é um fator crítico para argamassas aplicadas em revestimentos e pisos, pois essas superfícies estão frequentemente sujeitas a tensões de tração que podem

levar à formação de fissuras. Essa propriedade é influenciada pela distribuição dos agregados e pela interação química entre os componentes da argamassa.

Ensaio experimentais demonstram que o pó de vidro pode melhorar a resistência à flexão da argamassa, desde que seja utilizado em teores adequados. Segundo Matos (2010), a substituição de até 15% do cimento por vidro reciclado resultou em um aumento de 12% na resistência à flexão aos 90 dias de cura. Esse efeito é atribuído à redução da porosidade da matriz e ao aumento da coesão entre os grãos, que melhora a capacidade do material de redistribuir tensões.

Outro fator que influencia a resistência à flexão é a compactação da mistura. O uso de vidro moído fino favorece a distribuição homogênea das partículas, reduzindo a formação de microfissuras que poderiam comprometer a integridade estrutural da argamassa. No entanto, quando utilizado em granulometrias maiores, o vidro pode atuar como um agregado frágil, criando pontos de concentração de tensões que reduzem a capacidade de flexão do material (Cunha, 2014).

Além da granulometria, o tempo de cura também afeta a resistência à flexão. Diferentemente das argamassas convencionais, que atingem sua resistência máxima aos 28 dias, misturas contendo vidro reciclado podem apresentar ganhos mais expressivos a longo prazo devido à reação pozolânica tardia. Em estudos conduzidos por Peixeiro (2016), argamassas com 20% de substituição de cimento por vidro moído apresentaram resistência à flexão 8% superior ao controle após 180 dias de cura, evidenciando a necessidade de um tempo maior para desenvolvimento completo das propriedades mecânicas.

2.3.3 Propriedades térmicas e resistência a altas temperatura

As propriedades térmicas e a resistência a altas temperaturas das argamassas são fundamentais na engenharia civil, influenciando a eficiência energética das edificações e sua segurança contra incêndios. A capacidade de conduzir calor e resistir a altas temperaturas impacta diretamente sua aplicação em projetos arquitetônicos e de proteção passiva.

A condutividade térmica, depende da densidade, porosidade e composição dos agregados. Materiais mais densos, como o cimento Portland, dissipam calor rapidamente, enquanto os porosos oferecem melhor isolamento térmico (Peixeiro, 2016). Estudos mostram

que a substituição parcial do cimento por pó de vidro reduz a condutividade térmica da argamassa em até 15%, favorecendo o conforto térmico e a eficiência energética das edificações (Cunha, 2014). Além disso, o vidro moído melhora a capacidade térmica da argamassa, ajudando a retardar variações térmicas internas (Peixeiro, 2016).

A resistência a altas temperaturas é essencial para a segurança estrutural. Ensaios padronizados, como os da ISO 834 (ISO, 1999), avaliam seu comportamento sob altas temperaturas. Cunha (2014) demonstrou que argamassas com pó de vidro mantêm 70% de sua resistência mecânica após exposição a 600°C, enquanto misturas convencionais perdem até 50%. Esse desempenho é atribuído à estabilidade térmica do vidro, que reduz fissurações térmicas e melhora a coesão da matriz cimentícia (Matos, 2010). A granulometria do vidro também influencia: partículas menores (abaixo de 45 µm) aumentam a densidade e reduzem a porosidade, melhorando o comportamento térmico (Peixeiro, 2016).

Contudo, a composição dos agregados reciclados deve ser analisada com cautela. Alguns materiais poliméricos podem liberar gases tóxicos, e agregados porosos podem sofrer expansão térmica, comprometendo a integridade da argamassa (Cunha, 2014). A interação entre vidro reciclado e cimento também é afetada pela temperatura: abaixo de 300°C, o vidro estabiliza a matriz; entre 300°C e 500°C, reduz a degradação dos silicatos de cálcio hidratados; acima de 600°C, pode sofrer amolecimento, alterando sua interação com a matriz cimentícia (Matos, 2010).

O uso de águas pluviais na mistura das argamassas sustentáveis também impacta seu comportamento térmico e sua resistência a altas temperaturas. A composição química dessas águas pode afetar a hidratação do cimento e a formação de poros na argamassa, influenciando sua estabilidade térmica. Impurezas, como sulfatos e cloretos, podem modificar a microestrutura da matriz cimentícia (Cunha, 2014). A humidade retida na argamassa também interfere na resistência a altas temperaturas: quando exposta a temperaturas acima de 100°C, a evaporação pode gerar microfissuras e delaminação superficial (Matos, 2010). No entanto, com filtragem adequada e controle da relação água/cimento, é possível mitigar esses efeitos e manter o desempenho da argamassa (Peixeiro, 2016).

Estudos indicam que argamassas contendo 10% a 20% de pó de vidro e águas pluviais tratadas podem apresentar desempenho térmico similares ou superiores aos das convencionais (Matos, 2010; Peixeiro, 2016). A correta dosagem e o processamento adequado dos materiais

reciclados são essenciais para garantir a segurança estrutural e a eficiência energética, tornando as argamassas sustentáveis uma alternativa viável.

3. METODOLOGIA

A fim de avaliar o impacto da substituição parcial do cimento por pó de vidro moído e da utilização de água pluvial no desenvolvimento de argamassas, definiu-se uma metodologia experimental que incorpora essas duas variáveis como elementos centrais. O uso do pó de vidro, em diferentes proporções, e a aplicação de água pluvial, tanto em sua forma bruta quanto com pH ajustado por adição de cal, foram adotados como estratégias para testar o comportamento físico, mecânico e térmico das argamassas frente à exposição a altas temperaturas. Dessa forma, a metodologia propõe a aplicação prática das soluções sustentáveis estudadas, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes traços desenvolvidos e o desempenho da argamassa convencional.

O processo metodológico foi organizado em etapas sucessivas, de forma a garantir a clareza do raciocínio experimental. Primeiramente, foram definidos e preparados os materiais necessários. Em seguida, foram formuladas diferentes composições de argamassas com variações nos teores de substituição de cimento por pó de vidro (GP) e na água utilizada, seja da rede pública ou pluvial (AP).

Após a preparação dos traços, foram moldados corpos de prova padronizados, que passaram por um período de cura controlada. Com os provetes devidamente curados, iniciou-se a fase de ensaios, dividida em duas frentes: avaliação das propriedades em temperatura ambiente e após exposição a elevadas temperaturas. Para isso, os corpos de prova foram submetidos a aquecimentos em três faixas distintas (200 °C, 500 °C e 800 °C), seguidos de resfriamento gradual.

Posteriormente, os provetes foram analisados quanto à variação dimensional e perda de massa. Em sequência, realizaram-se os ensaios de resistência mecânica à flexão e à compressão, tanto em estado inicial, ou seja, temperatura ambiente, quanto após os ciclos térmicos. Por fim, os dados obtidos foram comparados entre si, considerando o desempenho de cada formulação em relação ao traço de referência, sem substituição de cimento por pó de vidro e sem utilização de águas pluviais.

A Figura 1 apresenta um esquema geral que sintetiza, de forma visual e objetiva, toda a metodologia descrita, representando cada passo do processo experimental adotado neste trabalho. Nos tópicos a seguir serão abordados com maior profundidade os dados experimentais e informações sobre os materiais, traços, temperaturas, evidenciando como cada processo do trabalho ocorreu.

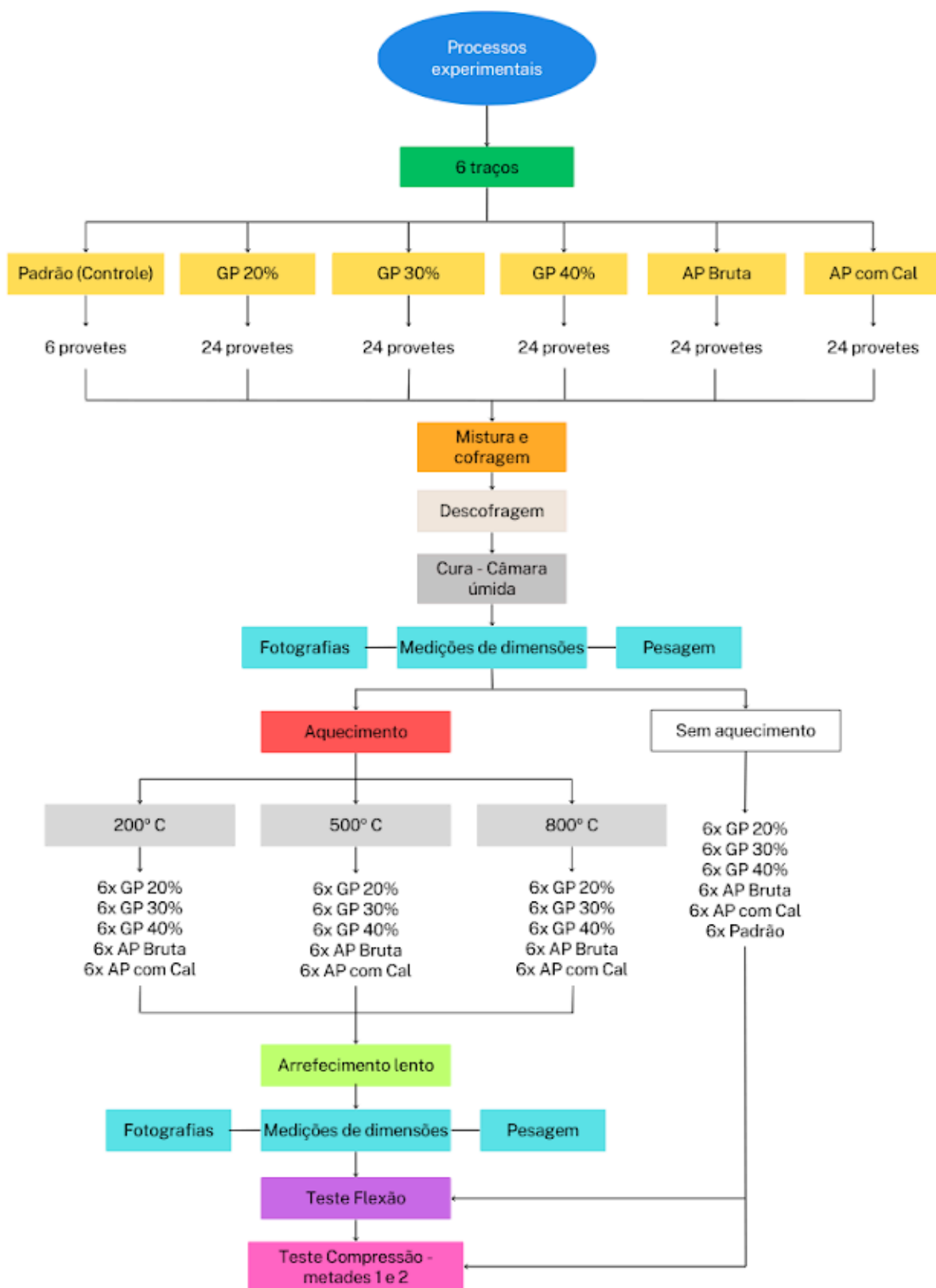


Figura 1: Esquema dos processos experimentais

Fonte: Autoria própria (2025)

3.1. Materiais e Caracterização

A formulação das argamassas foi realizada utilizando cimento Portland, areia, pó de vidro, cal hidratada e águas recicladas. A seguir, apresentam-se as especificações de cada material.

3.1.1. Cimento: Tipo, Composição e Preparo

O cimento utilizado foi o cimento Portland tipo II 42,5, caracterizado por sua resistência mecânica de 42,5 MPa aos 28 dias, conforme as especificações da norma europeia EN 197-1 (CEN, 2011). Esse tipo de cimento apresenta uma composição com menor teor de clínquer em comparação ao tipo I, resultando em menor impacto ambiental e maior durabilidade em certas aplicações.

O cimento foi armazenado em local seco e ventilado, evitando a absorção de humidade antes do uso. Antes da mistura, foi pesado com precisão de 0,1 g para garantir a reprodutibilidade dos traços de argamassa.

3.1.2. Agregados: Areia e Pó de Vidro

A areia utilizada foi fornecida pelo Instituto Politécnico de Bragança e apresentou granulometria compatível com as especificações normativas, EN 196-1, (CEN 2005).

O pó de vidro foi obtido a partir da moagem de resíduos vítreos e apresentou uma granulometria abaixo de 45 μm . Esse material foi incorporado às argamassas em substituição ao cimento, nos teores de 20%, 30% e 40%. Antes da incorporação, o pó de vidro foi submetido a um processo de imersão em água por 8 horas.

3.1.3. Águas Recicladas: Tipos e Propriedades Físico-Químicas

Foram utilizadas duas formulações de argamassas contendo água reciclada, obtida por meio da captação da água pluvial por um tubo de queda, de aproximadamente 2,50 metros, de um sistema de calhas de uma cobertura de telhas cerâmicas do Instituto Politécnico de Bragança. A primeira formulação empregou a água de chuva bruta, sem qualquer tratamento prévio. Já a segunda formulação utilizou a mesma água, porém ajustada para um pH neutro com adição de cal, de forma a minimizar possíveis efeitos na reatividade dos materiais cimentícios. A figura a seguir mostra a coleta de água realizada.



Figura 2: Coleta de água pluvial

Fonte: Autoria própria (2025)



Figura 3: Coleta de água pluvial

Fonte: Autoria própria (2025)

Foi medido o pH da água pluvial, que foi ajustado para valores próximos a 7 antes da aplicação na argamassa modificada. Para isto, foram acrescentados 10,7 gramas de cal hidratada para cada 214 gramas de água pluvial.

3.2. Formulação das Argamassas

A formulação das argamassas seguiu uma razão água/cimento (W/C) fixa de 0,45 para todas as amostras, garantindo consistência nos ensaios. Foram produzidos quatro traços principais:

- Argamassa padrão (referência): cimento Portland tipo II 42,5, areia e água potável.
- Argamassas com substituição parcial do cimento por pó de vidro (GP): com 20%, 30% e 40% de substituição em massa do cimento.
- Argamassas com água da chuva (AP): utilizando água pluvial coletada.
- Argamassa com água de chuva neutralizada: água da chuva com ajuste de pH para neutro com adição de cal.

Contudo, para cada traço e teste diferente foram fabricados 6 provetes, desse modo, totalizando 126 provetes. A Tabela 1 resume todos os traços utilizados, estando incluídos os materiais utilizados, quantidades e os diferentes traços propostos. Essas quantidades se referem ao fabrico de 1 molde com 3 provetes de 40 × 40 × 160 mm.

Insumo (g)/Traço	Padrão	GP (20%)	GP (30%)	GP (40%)	AP Bruta	AP com Cal
Cimento (g)	476,0	380,8	333,2	285,6	476,0	476,0
Água da Rede (g)	214,0	214,0	214,0	214,0	0,0	0,0
Água Pluvial (g)	0,0	0,0	0,0	0,0	214,0	214,0
Areia (g)	1190,0	1190,0	1190,0	1190,0	1190,0	1190,0
Pó de Vidro (g)	0	95,2	142,8	190,4	0,0	0,0
Cal (g)	0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,7

Tabela 1: Discriminação dos traços utilizados

Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.2. Procedimentos de Mistura e Preparo

A mistura foi realizada em um misturador mecânico de laboratório seguindo a seguinte sequência:

Os materiais sólidos (cimento, areia e pó de vidro) foram inicialmente misturados a baixa velocidade por 1 minuto. A água foi então adicionada gradualmente, e a mistura continuou por mais 1 minuto em velocidade lenta. Em seguida, a mistura foi processada por mais 1 minuto em velocidade rápida para garantir a homogeneização completa dos componentes.

Para os traços contendo pó de vidro, o material foi previamente hidratado em água por 8 horas, conforme procedimento adotado para melhorar sua dispersão e reatividade na argamassa. A adição do pó de vidro hidratado foi feita após a primeira etapa de mistura dos componentes secos.

A argamassa fresca foi moldada em corpos de prova prismáticos de $40 \times 40 \times 160$ mm, seguindo as diretrizes da norma EN 196-1 (CEN, 2005), e submetida a um processo de adensamento em mesa vibratória para eliminação de bolhas de ar.

Os corpos de prova foram armazenados nos moldes por 24 horas, cobertos com plástico para evitar a perda prematura de umidade. Após esse período, foram desmoldados e transferidos para uma câmara de cura climatizada, onde permaneceram por 28 dias a uma temperatura constante de aproximadamente 20°C e umidade relativa superior a 95%, conforme os padrões normativos.

3.3.1. Critérios de Avaliação

Após o período de cura de 28 dias, os corpos de prova foram submetidos a uma série de ensaios para avaliar seu comportamento mecânico e térmico. Os testes seguiram rigorosamente as normas europeias aplicáveis, garantindo reprodutibilidade e comparabilidade dos resultados.

Os ensaios foram planejados para avaliar as propriedades físicas: variação dimensional, massa e aparência, sendo porosidade, fissuração e desintegração, antes e após exposição térmica; resistência mecânica: resistência à compressão e à flexão (EN 196-1 e EN 1015-11); e comportamento térmico: resistência à flexão e à compressão das argamassas a temperaturas elevadas (200°C , 500°C e 800°C) e também sem aquecimento.

3.3.2. Ensaios Realizados e Normas Aplicáveis

Os provetes foram submetidos a medições, pesagens e fotografias antes e após os ensaios térmicos, as quais serão comparadas nos resultados, seguidos dos testes mecânicos.

Para analisar o comportamento das argamassas em condições extremas, os provetes foram submetidos a um tratamento térmico controlado em um forno de laboratório, controlador de temperatura Bentrup TC88e. O procedimento consistiu em: aquecimento a

200°C, 500°C e 800°C em ciclos independentes; arrefecimento controlado no interior do forno fechado, para evitar reabsorção de humidade e minimizar tensões térmicas bruscas; reavaliação dimensional e de massa após o resfriamento completo; registro fotográfico para análise visual de fissuração, degradação da superfície e desintegração de partículas e fragmentos.

Após estes processos, os provetes foram testados à flexão. Para determinar a resistência à flexão, adotou-se a metodologia descrita pela norma europeia EN 1015-11 (CEN, 2007). Essa norma prescreve especificamente o procedimento de ensaio por flexão em três pontos, destacando-se pela precisão e reprodutibilidade dos resultados. Os prismas devem ter dimensões de 40 mm × 40 mm × 160 mm, conforme especificado pela norma, e os provetes devem ser posicionados cuidadosamente no dispositivo de ensaio, garantindo que estejam perfeitamente alinhados com os dois apoios inferiores fixos, que possuem um espaçamento padronizado de 100 mm. O ponto de aplicação da carga deve ser posicionado no centro do vão, de forma a assegurar distribuição homogênea dos esforços. A carga é aplicada continuamente, sem choques, a uma velocidade constante de deslocamento da cabeça de ensaio de 0,05 mm/s até atingir a ruptura, conforme definido explicitamente pela norma. Este ensaio permite avaliar o desempenho mecânico da argamassa frente às solicitações de flexão, refletindo diretamente sua tenacidade e capacidade de resistir à propagação de fissuras e momento fletor.

O ensaio para determinação da resistência à compressão foi conduzido conforme determinações da norma europeia EN 196-1 (CEN, 2016). Segundo essa norma, as duas metades resultantes do rompimento dos corpos de prova durante o ensaio de flexão são aproveitadas para os testes de compressão, otimizando o uso dos materiais e fornecendo maior quantidade de dados representativos. Cada metade deve ser cuidadosamente posicionada entre as placas de compressão do equipamento, respeitando uma área nominal de contato de 40 mm × 40 mm, garantindo o perfeito alinhamento das superfícies. Conforme estabelecido pela norma, é essencial que a carga seja aplicada axialmente e com uma taxa de incremento constante e controlada de aproximadamente 2400 N/s, até a ruptura da amostra, de modo a minimizar possíveis variações no comportamento mecânico devido à velocidade de carregamento. A resistência final é calculada com base na carga máxima obtida, dividida pela área da seção transversal das amostras testadas. Este procedimento resulta em um valor

robusto da resistência escalar máxima suportada pelo material, diretamente relacionada à integridade estrutural da argamassa frente às tensões compressivas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Apresentação

Esta seção apresenta e analisa os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados com diferentes traços de argamassas, elaboradas com a substituição parcial de cimento por pó de vidro e com o uso de águas pluviais no preparo. A análise contempla o desempenho mecânico (resistência à compressão e à flexão), e a estabilidade dimensional e a variação de massa dos corpos de prova após exposição a temperaturas elevadas, realizando as análises qualitativas e /ou quantitativas dos dados obtidos.

Os resultados serão comparados entre os traços considerados de referência (controle) e os traços modificados com diferentes teores de substituição por pó de vidro (20%, 30% e 40%) e variação na fonte da água utilizada (potável ou pluvial). Essa comparação visa identificar quais combinações apresentaram melhor desempenho frente às exigências térmicas e mecânicas, destacando os traços mais resistentes à exposição a altas temperaturas, sobretudo em 200°C, 500°C e 800°C.

As tabelas com os resultados obtidos serão apresentadas ao longo da seção, acompanhadas de gráficos que auxiliam na visualização das tendências e comportamentos observados nos diferentes traços. A discussão será conduzida com base na literatura científica e nas normas técnicas vigentes, considerando o impacto das alterações propostas sobre a durabilidade e a viabilidade do uso sustentável de resíduos sólidos e recursos hídricos alternativos na construção civil.

A seguir, a Tabela 2 apresenta todos os resultados diretos obtidos durante o estudo, assim como os desvios padrão e coeficientes de variação (COV) entre os provetes do mesmo grupo de teste, para a flexão e compressão.

Traço - Temperatura	Flexão			Compressão			Variação após aquecimento(%)			
	Média (Mpa)	Desvio Padrão	COV (%)	Média (Mpa)	Desvio Padrão	COV (%)	Massa	Compr.	Espess.	Largura
GP 20% - Ambiente	1,46	0,04	2,81	31,13	3,13	10,05	Não se aplica			
GP 30% - Ambiente	1,54	0,08	5,00	27,57	1,72	6,23				
GP 40% - Ambiente	1,36	0,15	10,68	24,93	0,95	3,82				
GP 20% - 200°C	1,43	0,12	8,40	25,78	2,23	8,63	5,00	0,14	0,24	0,21
GP 30% - 200°C	1,26	0,14	10,73	24,24	1,54	6,36	4,82	0,31	0,29	0,08
GP 40% - 200°C	1,10	0,17	15,76	21,36	1,70	7,95	4,41	0,29	2,38	0,13
GP 20% - 500°C	0,56	0,04	7,30	16,69	1,96	11,75	7,23	0,36	0,99	0,25
GP 30% - 500°C	0,61	0,06	9,22	15,08	1,28	8,50	7,01	0,30	0,27	0,12
GP 40% - 500°C	0,48	0,04	8,15	11,83	1,55	13,13	6,53	0,27	0,33	0,23
GP 20% - 800°C	0,18	0,04	22,13	4,30	0,51	11,81	10,62	0,41	0,17	0,27
GP 30% - 800°C	0,15	0,00	0,00	3,47	0,35	9,97	10,32	0,34	0,37	0,13
GP 40% - 800°C	0,15	0,00	0,00	3,18	0,40	12,61	9,67	0,34	0,40	0,12
AP Bruta - Ambiente	1,40	0,08	5,53	28,53	6,03	21,15	Não se aplica			
AP c/ Cal - Ambiente	1,52	0,16	10,49	29,47	5,17	17,56				
AP Bruta - 200°C	1,06	0,09	8,25	24,84	2,13	8,59	5,30	0,17	0,42	0,23
AP c/ Cal - 200°C	1,18	0,06	5,21	27,23	1,65	6,07	5,39	0,28	0,34	0,44
AP Bruta - 500°C	0,50	0,04	7,75	16,20	1,72	10,59	7,51	0,18	0,13	0,19
AP c/ Cal - 500°C	0,50	0,04	7,75	16,33	0,48	2,97	7,54	0,15	0,19	0,25
AP Bruta - 800°C	0,08	0,05	63,25	4,04	0,36	8,88	10,90	0,28	0,17	0,12
AP c/ Cal - 800°C	0,00	0,00	0,00	4,22	0,48	11,37	10,96	0,74	0,44	0,21
Padrão - Ambiente	1,52	0,16	10,44	22,85	3,92	17,14	Não se aplica			

Tabela 2: Resultados das resistências à flexão e compressão

Fonte: Autoria Própria (2025)

4.2 Análise do Desempenho Dimensional, Visual e de Massa

A análise do desempenho dimensional, visual e de massa após o ensaio térmico revela diferenças marcantes entre os traços à base de pó de vidro (GP) e os formulados com água pluvial (AP), principalmente no que diz respeito à retenção de massa, à estabilidade das dimensões e ao surgimento de fissuras.

Logo após o aquecimento, observou-se que a perda de massa aumenta sistematicamente com a temperatura: em 200 °C, perdeu-se entre 4,4 % e 5,0 %; em 500 °C, entre 6,3 % e 7,2 %; e, em 800 °C, entre 9,7 % e 10,6 % (gráfico da Figura 4). As amostras contendo GP (20 %, 30 % e 40 %) mostraram perdas ligeiramente menores do que as de AP pura, indicando que a fase vítrea promove a formação de mullita nanoestruturada e quartzo de alta estabilidade, selando microfissuras e retardando a difusão de voláteis (Chandra & Coutinho, 2010).

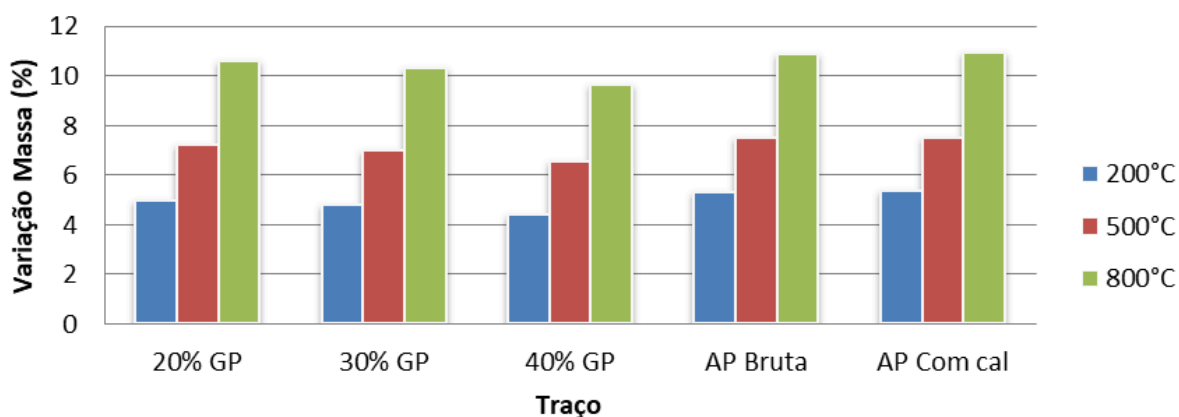


Figura 4: Variação de Massa (%) por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

A variação de comprimento (gráfico da Figura 5) permaneceu abaixo de 0,3 % até 500 °C, reflexo da contração inicial da matriz cerâmica e do fechamento de poros. A 800 °C, no entanto, o traço “AP com cal” experimentou expansão excepcional ($\approx 0,75$ %), causada por fissuras longitudinais abertas e em alguns casos fendilhação. Nos traços com GP, essa expansão máxima não ultrapassou 0,40 %, pois o sinteramento vítreo parcial, mesmo em altas temperaturas, mantém alta viscosidade na fase líquida e impede o crescimento de fissuras críticas (Neville, 2012).

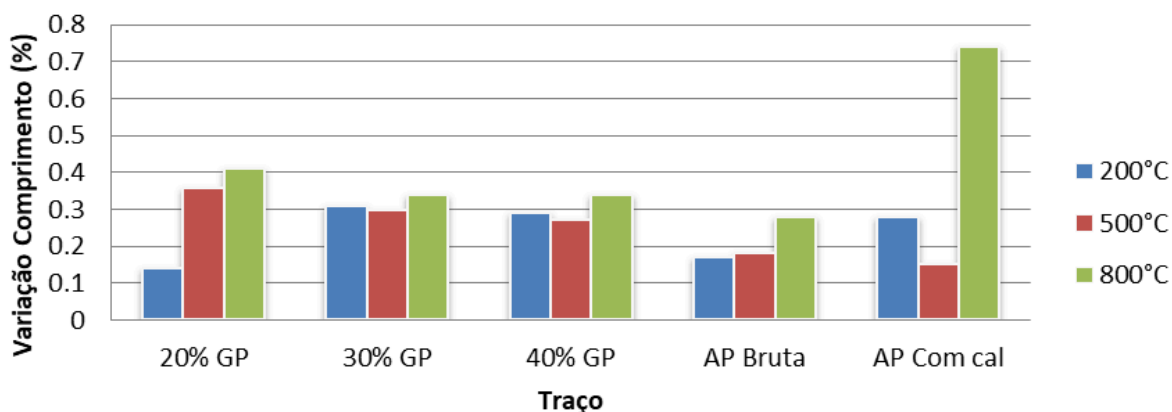


Figura 5: Variação de Comprimento (%) por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

O gráfico da Figura 6, que registra variações de largura, exibe picos atípicos, como os 2,4 % observados em “40 % GP” a 200 °C. Tais valores podem decorrer de imperfeições no encaixe do paquímetro sobre superfícies irregulares, fissuras e poros expostos dificultam a medição precisa e podem introduzir desvios. Em termos absolutos, as amostras de AP apresentaram largura estável, abaixo de 0,5 % em todas as temperaturas, enquanto a GP demonstrou redistribuição localizada causada pelo escoamento viscoso inicial do vidro fundido.

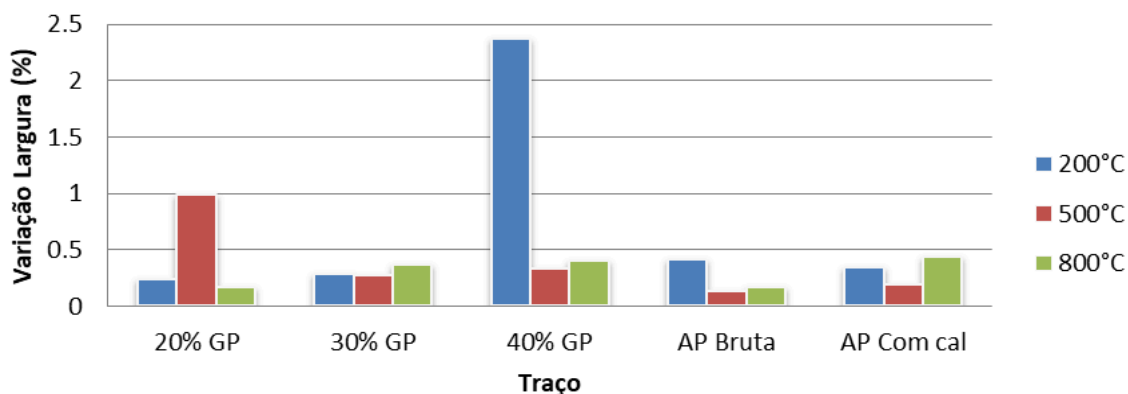


Figura 6: Variação de Largura (%) por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

Na variação de espessura (gráfico da Figura 7), nota-se padrão semelhante, as expansões moderadas a 200 °C nos traços com GP (até 0,23 %) seguidas de ligeiro

encolhimento até 800 °C, reflexo da consolidação da fase vítrea. Já o traço “AP com cal” apresentou expansão de 0,45 % a 200 °C e de até 0,21 % a 800 °C, decorrente da reação do CaO livre e da formação de belita e periclase, compostos que não se integram adequadamente à matriz silicatada (Pontikes et al., 2017). Picos de espessura podem igualmente ser atribuídos à abertura de fissuras, que alteram localmente as medidas.

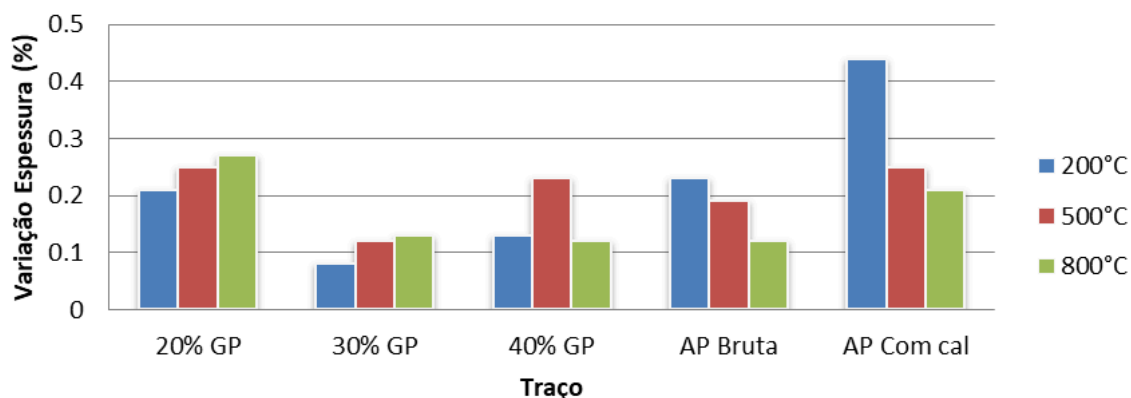


Figura 7: Variação de Espessura (%) por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

A avaliação visual analisou qualitativamente porosidade, desintegração superficial e fissuração em graus de 1 a 5 (não percentuais). Esta avaliação foi incorporada como complemento aos ensaios instrumentais, com o objetivo de registrar manifestações físicas perceptíveis que não seriam plenamente captadas por medições dimensionais, por perda de massa ou por testes de resistência. Aspectos como a presença de poros visíveis, o grau de desintegração superficial e o padrão de fissuração são indicativos relevantes do desempenho e da integridade da argamassa após exposição a altas temperaturas, principalmente quando se trata de argamassas de revestimento e que devem desempenhar um bom papel de serviço, estético, para que sejam aplicáveis.

Para isso, adotou-se uma escala qualitativa de 1 a 5, permitindo classificar visualmente esses efeitos de forma padronizada, embora não expressa em valores percentuais. Esse tipo de escala facilita a comparação entre os diferentes traços e temperaturas, além de fornecer um critério prático e repetível para avaliar o estado físico geral dos corpos de prova, especialmente em situações onde as alterações superficiais podem ser críticas para a aplicação real do material. Quanto essas características visuais, não foi possível distinguir diferenças marcantes entre os traços com diferentes proporções de pó de vidro e entre os traços com água

pluvial bruta e com cal, apenas quanto ao aquecimento, sendo assim, conforme a temperatura, as variações dentro dos traços se apresentaram de forma uniforme. Portanto, no gráfico da Figura 8, as características foram representadas somente pela variação da temperatura. No geral, a porosidade dos provetes feitos com água pluvial foi um pouco superior aos com pó de vidro; a 500 °C emergiram microfissuras de grau 3 em AP pura; e, em 800 °C, “AP com cal” atingiu grau 5 tanto em fissuração quanto em desintegração, que pode ser entendida como o quanto o provete se desfazia, esfarelava e soltava partículas ou fragmentos com a sua manipulação, enquanto os traços com GP se mantiveram em grau 2, com muito esfarelamento de pó fino no manuseio, mas sem muitas desfragmentações e desgastes superficiais. Esse comportamento corrobora o efeito tampão térmico do vidro, que reduz a porosidade aberta e impede a propagação de trincas maiores.

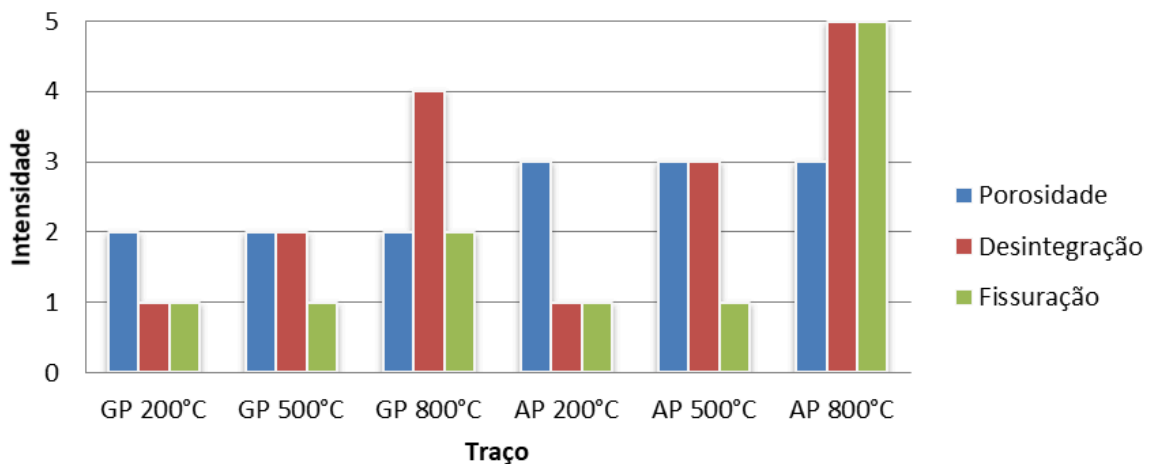


Figura 8: Variações Visuais por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

A uma temperatura de 200° C os provetes se mantiveram inalterados visualmente, apesar de perderem massa. As figuras 9 e 10 evidenciam que não houve modificação alguma perceptível visualmente.



Figura 9: Provede 30% GP antes do aquecimento a 200° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)



Figura 10: Provede 30% GP depois do aquecimento a 200° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)

As figuras 11 e 12 representam os provedes aquecidos a 500° C, os quais ainda resistiram bem à alta temperatura. Contudo, é possível perceber que alguns sinais de desintegração começaram a aparecer, uma vez que se nota as arestas desgastadas.



Figura 11: Provede 20% GP antes do aquecimento a 500° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)

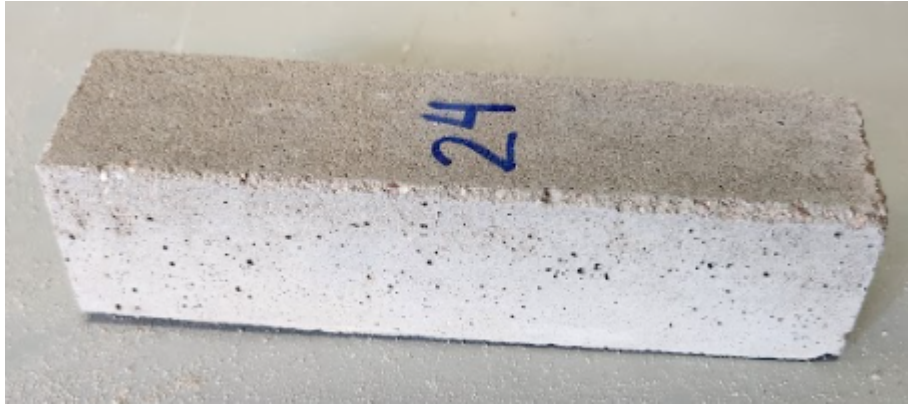


Figura 12: Provete 20% GP depois do aquecimento a 500° C
Fonte: Aatoria Própria (2025)

As figuras 13 e 14 ilustram as características gerais de todos os provetes com pó de vidro aquecidos a 800° C, desse modo, se pode observar que houve muitos desgastes nas extremidades e desprendimento de alguns fragmentos, alguns bem grandes e muitos resíduos em pó se soltaram ao manusear os provetes. Também surgiram algumas fissuras um pouco mais prolongadas, mas ainda muito finas e difíceis de perceber a uma longa distância.



Figura 13: Provete 40% GP antes do aquecimento a 800° C
Fonte: Aatoria Própria (2025)



Figura 14: Provete 40% GP depois do aquecimento a 800° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)

Os provetes produzidos com águas residuais pluviais (Figura 15 e Figura 16), por sua vez, se mostraram intactos ao serem aquecidos a 200° C. Sobretudo, notou-se que esses provetes ficaram mais porosos e com poros maiores em relação aos produzidos com pó de vidro.



Figura 15: Provete AP com cal antes do aquecimento a 200° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)



Figura 16: Provete AP com cal depois do aquecimento a 200° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)

Os provetes de traços com água pluvial aquecidos a 500° C também não apresentaram fissuras significativas ou outros problemas intensos perceptíveis visualmente (Figura 17 e Figura 18).

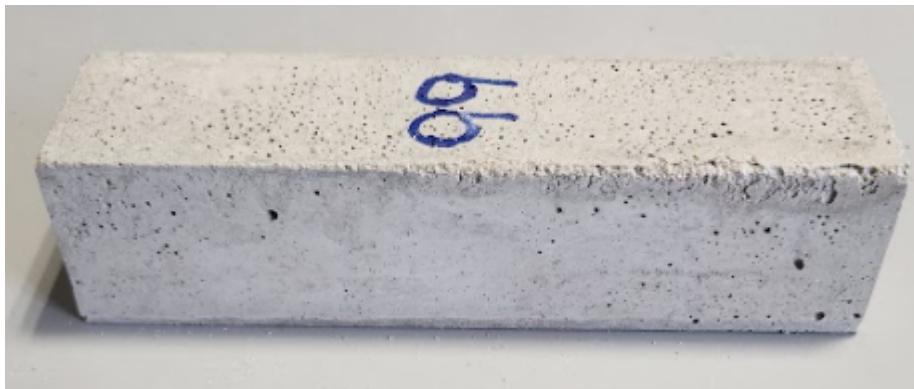


Figura 17: Provete AP com cal antes do aquecimento a 500° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)



Figura 18: Provete AP com cal depois do aquecimento a 500° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)

Em relação aos provetes fabricados com águas pluviais, aquecidos a 800° C, houve características marcantes após o aquecimento, sendo fissuras expressivas e longas e até mesmo fendas em alguns provetes, quase desprendendo grandes fragmentos inteiros. No manuseio após o arrefecimento, os provetes se comportaram de maneira extremamente frágil, tanto que não chegaram a resistir a algum esforço de flexão.

Nesse sentido, observando as figuras 19 e 20, é possível dizer em síntese, que a presença de GP conferiu:

- Retenção de massa mais eficiente, por difusão retardada de água cristalina e nucleação de mullita nanosílica (Chandra & Coutinho, 2010);
- Maior estabilidade dimensional, graças ao sinteramento vítreo parcial que controla microfissuras (Neville, 2012);
- Redução de porosidade aberta e fissuração, mantendo integridade estrutural mesmo a 800 °C (Zhang et al., 2018).

Por outro lado, a água pluvial pura, especialmente quando combinada com cal, mostrou-se mais sensível a variações dimensionais e fragilidade térmica, demonstrando que o uso de GP pode ser um caminho mais promissor para aplicações que exigem ciclos térmicos severos.

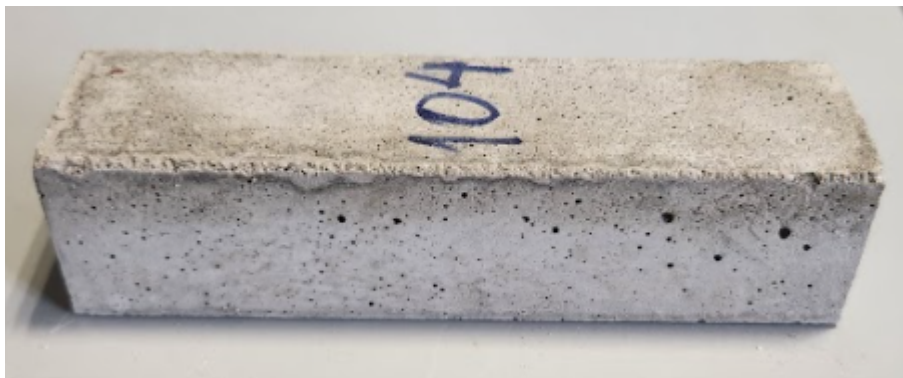


Figura 19: Provede AP bruta antes do aquecimento a 800° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)



Figura 20: Provede AP bruta depois do aquecimento a 800° C

Fonte: Aatoria Própria (2025)

4.3 Desempenho dos Provedes Fabricados com Pó de Vidro

4.3.1 Desempenho à flexão

A resistência à flexão, medida pelo módulo de ruptura em prismas de 40×40×160 mm, revela diferenças entre os traços contendo pó de vidro em condição ambiente e após aquecimento. Na temperatura ambiente, o traço com 30 % de pó de vidro (GP 30 %) obteve o maior valor médio (1,54 MPa), seguido pelo GP 20 % (1,46 MPa) e GP 40 % (1,36 MPa). Os coeficientes de variação (COV) variaram de 2,8 % a 10,7 %, indicando boa repetibilidade em quase todos os casos, exceto no GP 40 %, cuja maior dispersão (10,7 %) sugere sensibilidade à distribuição de partículas finas na mistura ou variações na efetuação dos ensaios. No gráfico da Figura 21, observa-se que, em temperatura ambiente, todos os traços GP (20 %, 30 %, 40 %) apresentaram valores muito próximos ao traço controle “Padrão”. Essa uniformidade inicial demonstra que a substituição parcial por GP não compromete a resistência estática à flexão.

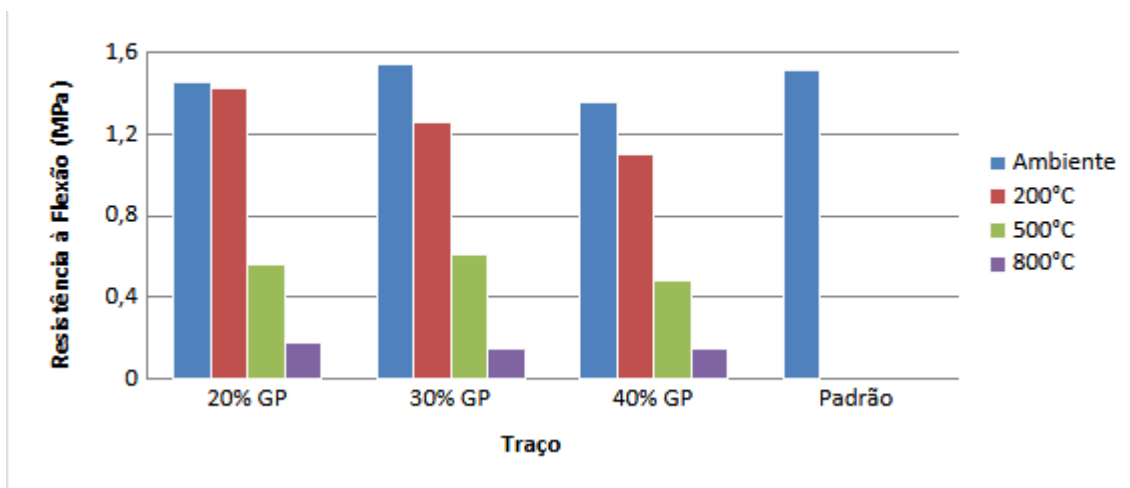


Figura 21: Flexão Média por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

Após aquecimento a 200 °C, todos os traços GP exibiram redução proporcional: GP 20 % manteve 98 % da flexão original (caindo para 1,43 MPa), GP 30 % caiu para 1,26 MPa (82 %), e GP 40 % para 1,10 MPa (81 %). Esse comportamento mostra que, até 200 °C, a remoção da água livre provoca microfissuras iniciais sem colapsar significativamente a coesão superficial (Chandra & Coutinho, 2010).

Aos 500 °C, a queda na resistência à flexão torna-se mais acentuada para os traços com pó de vidro: GP 20 % desce a 0,56 MPa (38 % do valor ambiente), GP 30 % cai para 0,61 MPa (40 %), e GP 40 % para 0,48 MPa (35 %). Os coeficientes de variação permanecem moderados (entre 7,3 % e 9,9 %), indicando consistência mesmo com a presença de fissuração térmica interna (Neville, 2012).

Finalmente, a 800 °C, os valores remanescentes de flexão nas formulações com pó de vidro caem para 0,18 MPa (12 %) em GP 20 %, e 0,15 MPa (10 %) tanto em GP 30 % quanto GP 40 %. Esse resultado demonstra claramente a capacidade limitada dos mecanismos reforçadores do pó de vidro em temperaturas extremas, quando as fissuras dominam a estrutura dos provetes (Zhang et al., 2018).

Em suma, a análise mostra que o pó de vidro atua eficazmente como microfiller e agente de sinterização parcial, retardando a propagação de trincas superficiais sob flexão. Esses achados reforçam que a incorporação de pó de vidro é uma estratégia eficaz para argamassas destinadas a aplicações com variações térmicas severas, pois melhora a tenacidade sem sacrificar a resistência inicial.

4.3.2 Desempenho à compressão

A resistência à compressão dos provetes contendo pó de vidro revela de modo inequívoco que a incorporação desse material eleva significativamente o desempenho em relação ao traço “Padrão” preparado com água da rede pública. Em condição ambiente, o traço padrão registrou média de 22,85 MPa (COV 17,14 %), enquanto as amostras com 20 % GP alcançaram 31,13 MPa (COV 10,05 %), as de 30 % GP 27,57 MPa (COV 6,23 %) e as de 40 % GP 24,93 MPa (COV 3,82 %) (Figura 22). Esse ganho inicial resulta principalmente do efeito microfiller do pó de vidro.

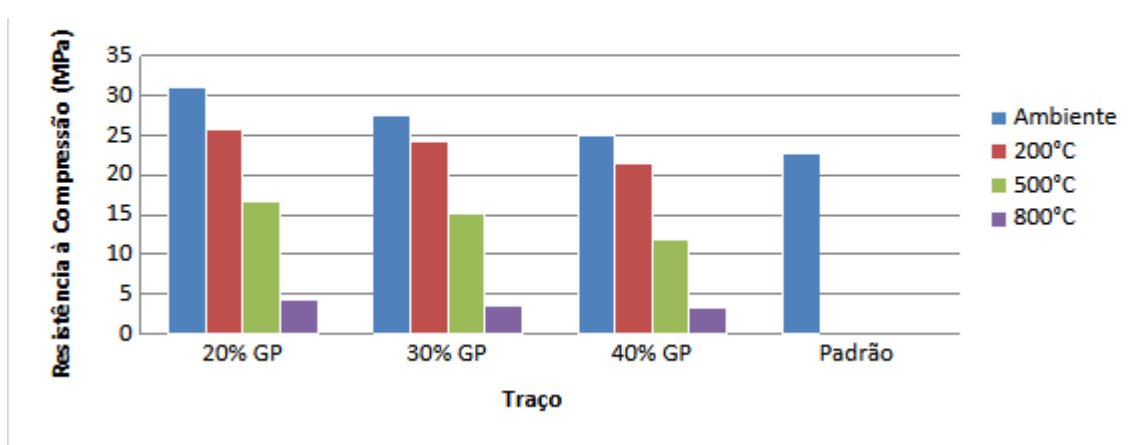


Figura 22: Compressão Média por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

O GP, finamente moído (diâmetro médio abaixo de 45 μm), preenche os vazios entre as partículas de cimento e agregado, aumentando a densidade aparente da pasta e reduzindo a conectividade da porosidade capilar. Isso diminui a retração plástica e gera microfissuras menores durante a cura, elevando a resistência inicial em até 32 %–50 % em relação ao padrão (Sani & Monte, 2018). Além disso, as superfícies vítreas atuam como sítios de nucleação preferenciais para o gel de silicato de cálcio (C–S–H), promovendo um envelhecimento mais coeso da rede cimentícia (Chandra & Coutinho, 2010). Entretanto, o benefício não cresce linearmente com o teor de vidro: o traço de 20 % GP atinge o pico de compressão (31,13 MPa), mas ao ultrapassar 30 % de substituição ocorre diluição da fração de cimento ativo, reduzindo a capacidade de geração de C–S–H e, por consequência, a resistência inicial (Prasanna & Bhaskar, 2016).

Quando expostos a 200 °C, todos os traços GP apresentaram perdas entre 7 % a 17 %. O traço de 20 % GP cai de 31,13 MPa para cerca de 25,78 MPa. Esse grau de proximidade entre os traços GP sugere que, abaixo de 300 °C, o mecanismo de reforço térmico do vidro ainda não se distingue significativamente do gel de C–S–H bem cristalizado, ambos preenchem microfissuras iniciadas pela evaporação da água livre, mantendo a integridade da matriz (Chandra & Coutinho, 2010).

Ao alcançar 500 °C, as perdas tornam-se mais severas, com o traço 20 % GP retendo cerca de 16,69 MPa. Essa resistência intermediária mostra que o efeito de sinterização vítrea parcial do GP, que se inicia em torno de 450 °C, confere leve reforço adicional, selando microcanais e desenvolvendo uma microestrutura interligada de mullita em nanosílica líquida (Silva et al., 2015).

Por fim, a 800 °C, o traço 20 % GP retém 4,30 MPa. Essa resistência remanescente reflete o limite de atuação dos mecanismos de sinterização vítrea. Observa-se que o traço de 20 % GP mantém ligeira superioridade sobre 30 % e 40 % GP em todas as temperaturas, destacando que existe um teor ótimo de microfiller que equilibra densificação e geração de gel; teores acima de 25 % começam a diluir a fração de ligante ativo, reduzindo a criação de novas pontes de C–S–H sem aportar sinterização vítrea extra (Prasanna & Bhaskar, 2016).

Esses resultados sustentam a recomendação do uso de pó de vidro em argamassas para aplicações com ciclos térmicos severos, oferecendo resistência residual mais estável e duradoura.

4.3.3 Comparação compressão e flexão

Para investigar a interdependência entre resistência à compressão e resistência à flexão das argamassas contendo pó de vidro (GP 20 %, GP 30 %, GP 40 %) ao longo do espectro de temperaturas (200 °C, 500 °C e 800 °C), foi construído um diagrama de dispersão no qual cada traço GP é representado por seus três pontos de dados, sendo ajustada uma reta de tendência linear a cada grupo de pontos (Figura 23). O coeficiente de determinação R^2 associado a cada reta é alto, variando de 0,930 para o traço 40 % GP até 0,984 para o traço GP 20 %, demonstrando uma excelente correlação entre a perda de resistência à compressão e a perda de resistência à flexão dentro das formulações contendo pó de vidro.

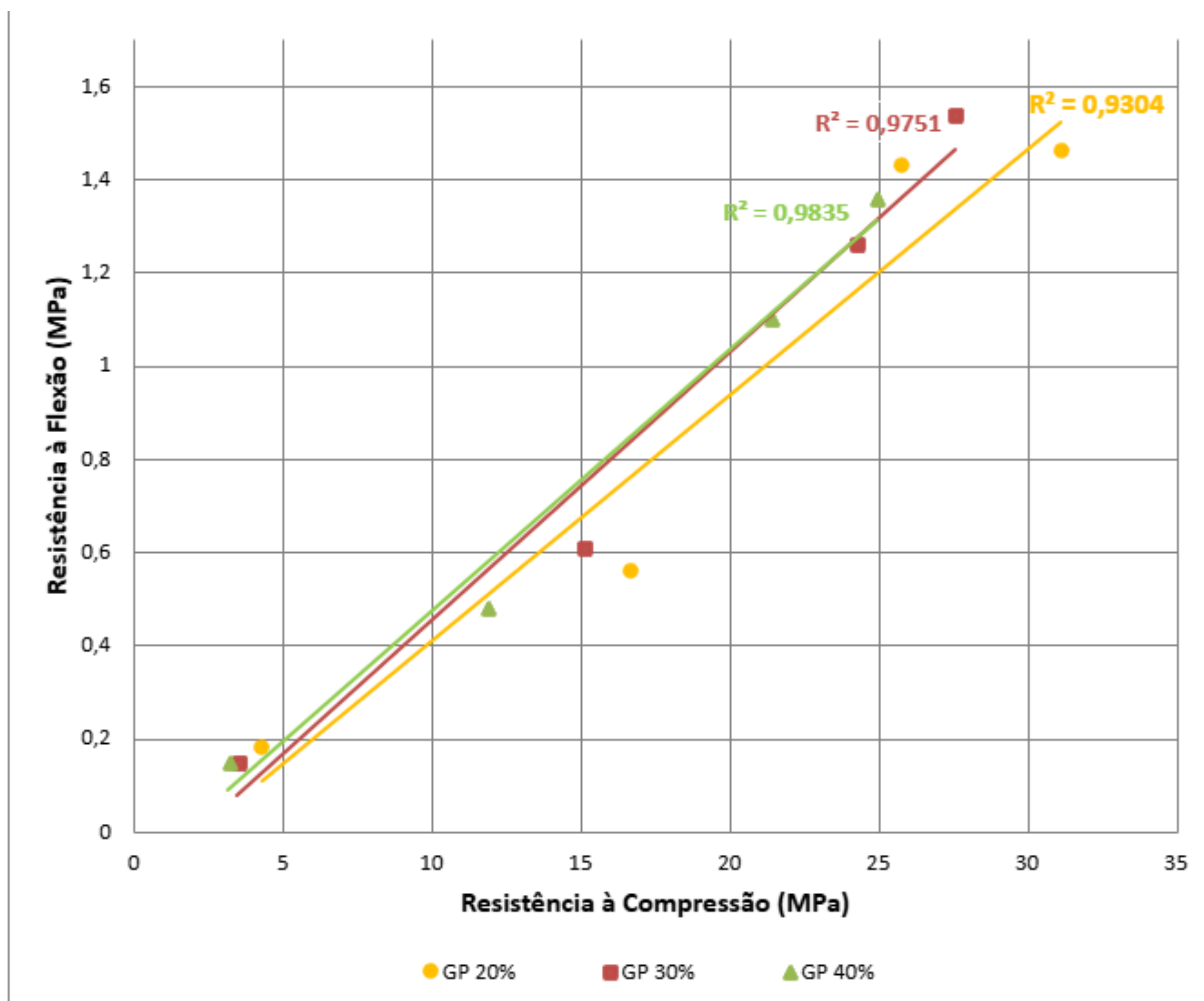


Figura 23: Gráfico de dispersão - Flexão e Compressão

Fonte: Autoria Própria (2025)

Esse resultado confirma que, para cada traço com pó de vidro, a redução da carga sob compressão e a diminuição do módulo de ruptura ocorrem de maneira proporcional à medida que a temperatura aumenta. Embora as inclinações das retas (coeficientes angulares) variem ligeiramente entre os traços GP, o traço GP 20 % destaca-se como mais eficiente: para cada 1 % de perda em resistência à compressão ele perde apenas cerca de 12,2 % de resistência à flexão. Por outro lado, os traços GP 30 % e GP 40 % apresentam coeficientes angulares maiores, indicando que, embora a retenção de compressão possa ser relativamente boa, a tenacidade diminui um pouco mais rapidamente por ponto percentual de resistência compressiva perdida.

A relação linear encontrada, em que a resistência à flexão corresponde a aproximadamente 5 % da carga de compressão medida em MPa, embora numérica e dimensionalmente diferente dos valores de tensão (entre 10 % e 20 % em MPa) normalmente

citados na literatura de betão e argamassas (Mehta & Monteiro, 2014; Neville, 2012), está em plena consonância com o comportamento proporcional que esses autores descrevem. Em suma, a principal questão é que todos os traços mantêm uma relação linear muito forte entre compressão e flexão, sem ocorrência de comportamentos atípicos. Isso significa que, no desenvolvimento de argamassas para cenários com variação térmica severa, pode-se prever a perda de tenacidade a partir da perda de resistência compressiva, e vice-versa, com elevada confiabilidade, simplificando a modelagem de desempenho estrutural em condições de alta temperatura.

4.3.4 Efeitos da temperatura

Para as formulações contendo pó de vidro (GP 20 %, GP 30 % e GP 40 %), a relação entre perda de massa e perda de resistência à compressão apresentou comportamento linear extraordinariamente consistente ao longo do aquecimento, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,980 para o GP 40 % e aproximadamente 0,999 para o GP 20 %. Esses valores confirmam matematicamente que, à medida que o material perde massa devido ao efeito térmico, a resistência volumétrica declina de modo praticamente proporcional.

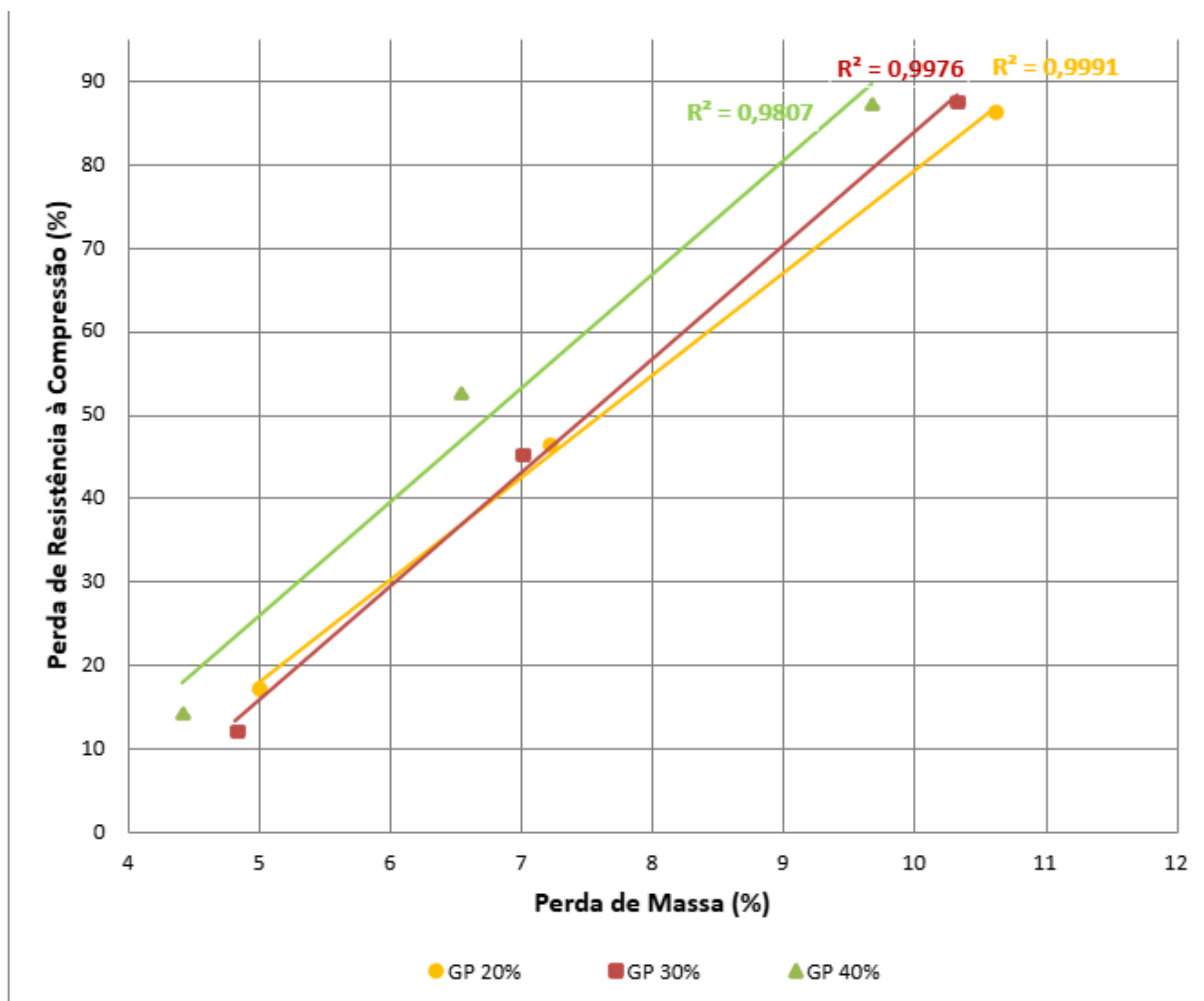


Figura 24: Gráfico de dispersão - Perda de massa e Perda Compressão

Fonte: Autoria Própria (2025)

No entanto, ao comparar os coeficientes angulares dessas retas, que representam a porcentagem de resistência perdida por ponto percentual de massa evaporada, surgem diferenças entre os traços. O GP 20% demonstrou o menor coeficiente angular ($\approx 12,24$), indicando que para cada 1% de massa perdida, há uma perda de aproximadamente 12,2% na resistência compressiva. Em contraste, as formulações com maior teor de pó de vidro (GP 30% e GP 40%) exibiram coeficientes angulares superiores ($\approx 13,59$ e $\approx 13,65$, respectivamente), revelando que a presença excessiva de pó de vidro começa a diluir o ligante ativo, tornando a matriz cimentícia mais sensível à perda de massa sob aquecimento.

Desse modo, o traço GP 20% destaca-se claramente como a formulação com melhor eficiência térmica, combinando perda de massa moderada com maior preservação da coesão interna em temperaturas elevadas. Essa observação reforça a existência de um teor ótimo para

a incorporação do pó de vidro, capaz de maximizar simultaneamente resistência mecânica e estabilidade térmica.

4.3.5 Eficiência Relativa dos Traços

O gráfico de eficiência relativa (Figura 25) demonstra claramente que, em termos de resistência à compressão, as argamassas contendo pó de vidro (GP) superaram confortavelmente o traço padrão. Tomando o traço padrão como referência (100 %), destaca-se o traço com 20 % de pó de vidro, que alcançou cerca de 136 % da resistência de referência. Os traços com 30 % e 40 % GP também apresentaram eficiências elevadas, atingindo respectivamente cerca de 121 % e 109 % da resistência do padrão. Esses ganhos eram amplamente previstos na literatura: trabalhos como os de Chandra & Coutinho (2010) e Silva et al. (2015) indicam que adições de vidro finamente moído elevam tipicamente a resistência compressiva em até 20–25 %, devido ao efeito microfiller e à sinterização vítrea parcial que densifica a matriz cimentícia.

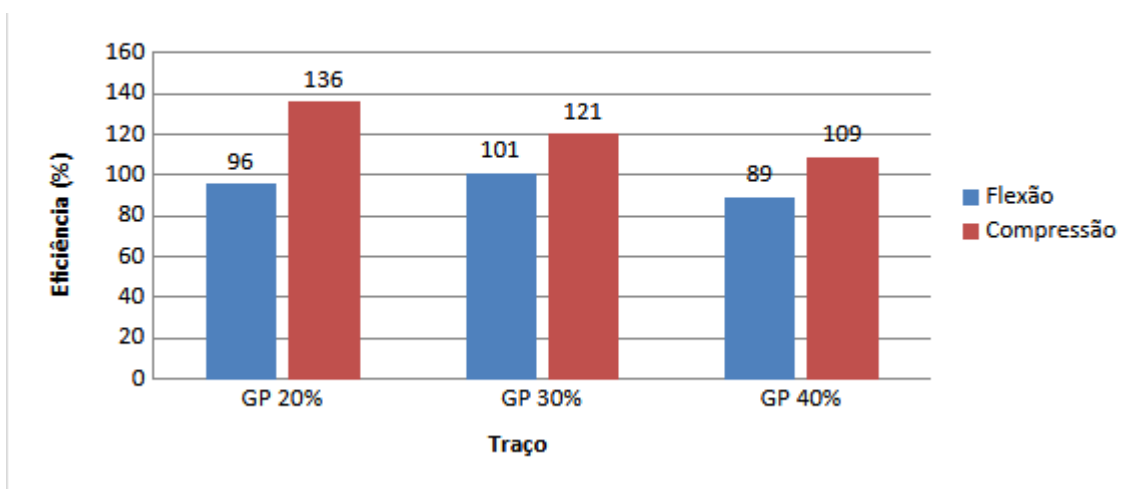


Figura 25: Eficiência relativa dos traços associada à flexão e compressão

Fonte: Autoria Própria (2025)

Quanto à resistência à flexão, as argamassas GP mostraram eficiências relativas mais moderadas e variáveis. O traço GP 20 % atingiu aproximadamente 96 % da resistência à flexão do padrão, enquanto o GP 30 % superou ligeiramente o padrão, alcançando 101 %. Esses resultados indicam que a tenacidade (resistência à flexão) acompanha a resistência compressiva, porém com certa defasagem. Tal diferença sugere que fatores adicionais, como contração plástica, retração por secagem e uniformidade de microfissuras, têm influência

significativa sobre o ensaio de flexão, tornando-o especialmente sensível às variações na superfície dos provetes e à homogeneidade do gel C–S–H próximo à face de ruptura.

Dessa forma, apesar da eficiência em compressão ser claramente elevada e consistente nas argamassas contendo pó de vidro, os resultados para resistência à flexão demandam atenção adicional a parâmetros de cura e acabamento superficial durante a formulação e o controle experimental, devido à sua maior sensibilidade a pequenas variações experimentais.

Nesse sentido, é importante considerar variáveis experimentais como a diferença de alguns dias a mais ou a menos de cura na câmara húmida e dias que foram aguardados antes do ensaio. Uma cura ligeiramente mais curta no lote Padrão reduziria sua resistência, fazendo com que todas as eficiências relativas pareçam maiores; por outro lado, pequenas flutuações na humidade ambiente ou no tempo de secagem afetam mais a tenacidade (flexão) do que a resistência escalar (compressão). Dessa forma, embora os valores gerais confirmem a eficácia do pó de vidro e da água pluvial como estratégias de melhoria mecânica, deve-se levar em conta a variabilidade intrínseca dos ensaios para interpretações finais.

4.4 Desempenho dos Provetes Fabricados com Água Pluvial

4.4.1 Desempenho à flexão

A resistência à flexão das argamassas formuladas com água pluvial ("AP Bruta" e "AP com cal") revela diferenças importantes tanto em temperatura ambiente quanto após aquecimento. Em temperatura ambiente, o traço "AP com cal" registrou 1,52 MPa, mostrando leve superioridade ao traço "AP Bruta" com 1,40 MPa. No gráfico da Figura 26 observa-se que, em condições iniciais, ambos os traços contendo água pluvial apresentaram valores muito próximos ao traço controle "Padrão", indicando que a substituição da água convencional por água pluvial, com ou sem cal, não prejudica significativamente a resistência inicial à flexão.

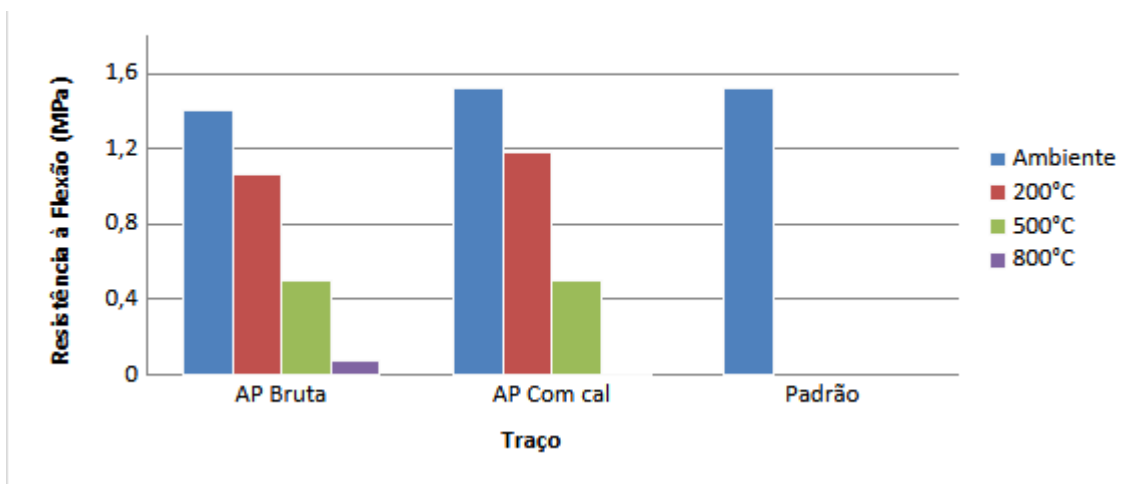


Figura 26: Flexão Média por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

Após aquecimento a 200 °C, os traços com água pluvial exibiram redução mais perceptível: "AP Bruta" caiu para 1,06 MPa (76 % da resistência inicial), enquanto "AP com cal" diminuiu para 1,18 MPa (78 %). Essa queda indica que a evaporação da água livre, mesmo em baixa temperatura, impacta fortemente na integridade superficial das argamassas contendo água pluvial.

Aos 500 °C, a resistência à flexão diminuiu ainda mais acentuadamente: "AP Bruta" atinge 0,50 MPa (36 % do valor ambiente) e "AP com cal" também fica em torno de 0,50 MPa (33 %). A manutenção de coeficientes de variação entre 7,3 % e 9,9 % sugere boa consistência das argamassas mesmo com a intensificação das fissuras térmicas.

Finalmente, após exposição a 800 °C, os traços com água pluvial mostraram forte redução: "AP Bruta" atingiu 0,08 MPa (apenas 6 % da resistência original), com alta dispersão nos resultados (COV de 63,3 %), refletindo comportamento de degradação mais errático e formação de fissuras extensas. Já o traço "AP com cal" apresentou valor praticamente nulo nesta temperatura, confirmando a vulnerabilidade destas formulações à elevada temperatura na ausência de um reforço estrutural adicional.

Assim, conclui-se que o uso de água pluvial, especialmente quando associada à cal, proporciona discretos ganhos iniciais em resistência à flexão, mas torna-se menos eficiente em temperaturas elevadas devido à maior suscetibilidade à fissuração térmica. Esses resultados destacam a importância de considerar o desempenho térmico específico das

argamassas com água pluvial, especialmente em aplicações expostas a ciclos térmicos severos.

4.4.2 Desempenho à compressão

A resistência à compressão das argamassas preparadas com água pluvial, AP Bruta e AP com cal, demonstra ganhos expressivos em comparação ao traço "Padrão" com água da rede pública. Na condição ambiente, o traço padrão registrou média de 22,85 MPa (COV 17,14 %), enquanto o AP Bruta atingiu 28,53 MPa (COV 21,15 %) e o AP com cal alcançou 29,47 MPa (COV 17,56 %) (Figura 27). Esse desempenho superior é atribuído principalmente à pureza química da água pluvial.

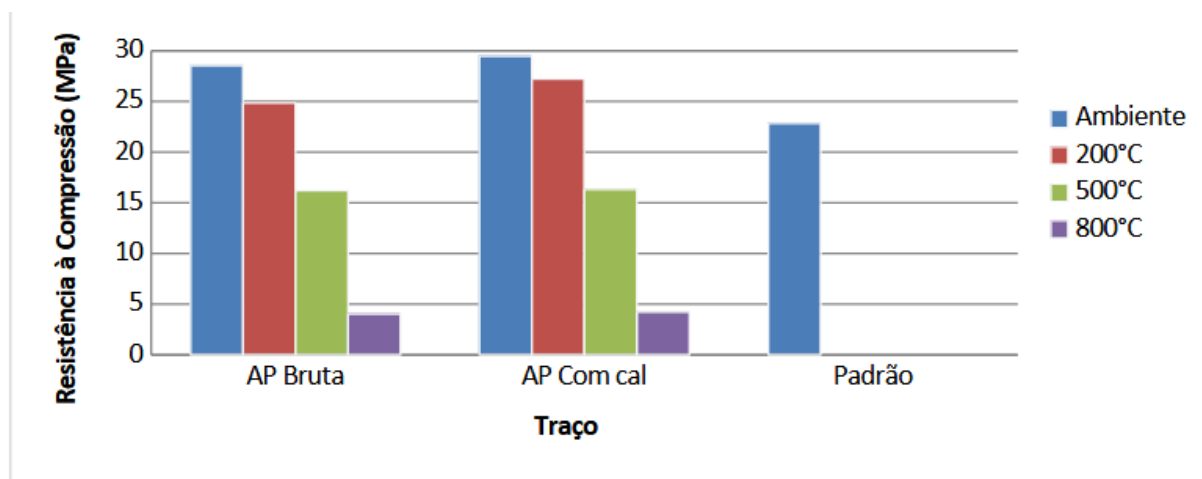


Figura 27: Compressão Média por Traço e Temperatura

Fonte: Autoria Própria (2025)

O uso de água pluvial, em contraste às expectativas de contaminação, provavelmente apresenta condutividade elétrica significativamente menor que a água de rede, estando livre de cloretos, sulfatos e metais dissolvidos que poderiam precipitar no interior dos poros e gerar microdefeitos (Basheer & Khan, 2001). Conforme demonstrado por Figueiredo et al. (2019), argamassas confeccionadas com água de chuva filtrada obtiveram resistência à compressão cerca de 15 % superior às que utilizaram água tratada, exatamente pelas razões de pureza e melhor hidratação do gel C-S-H.

A adição de cal à água pluvial (AP com cal) reforça ainda mais esse efeito inicial: o CaO libera hidróxidos que reagem rapidamente com a sílica e alumina livres do cimento,

gerando gel de silicato de cálcio de baixo teor, aumentando quase 30 % a resistência em relação ao padrão (Vega & Corona, 2010).

Após exposição a 200 °C, as perdas observadas são semelhantes nos traços com água pluvial. AP Bruta cai de 28,53 MPa para 24,84 MPa, e AP com cal de 29,47 MPa para 27,23 MPa, indicando um comportamento semelhante abaixo de 300 °C, mantendo a integridade da matriz por meio de um gel de C–S–H denso.

Aos 500 °C, AP Bruta fica em torno de 16,20 MPa e AP com cal em 16,33 MPa, confirmando que a estrutura densificada inicialmente pela hidratação homogênea mantém sua integridade até temperaturas intermediárias (Figueiredo et al., 2019).

Finalmente, aos 800 °C, AP Bruta apresenta cerca de 4,04 MPa e AP com cal 4,22 MPa. A proximidade dos resultados demonstra que, nesta faixa térmica, os mecanismos estruturantes já se encontram completamente degradados, restando apenas a estrutura cerâmica-frágil. A cal, eficaz inicialmente, não sustenta a coesão quando a desidratação se torna completa (Pontikes et al., 2017).

Esses achados confirmam que a substituição da água convencional por água pluvial, especialmente quando associada à cal, oferece ganhos mecânicos importantes em baixa e média temperatura, apesar da vulnerabilidade estrutural em temperaturas extremas.

4.4.3 Comparação compressão e flexão

De forma análoga às argamassas contendo pó de vidro, também se investigou a interdependência entre resistência à compressão e resistência à flexão para as argamassas contendo água pluvial ("AP Bruta" e "AP com cal") ao longo do espectro de temperaturas (200 °C, 500 °C e 800 °C). A representação em diagrama de dispersão com ajuste linear revelou coeficientes de determinação extremamente elevados, chegando a 0,9675 para AP com Cal e valores semelhantes para AP Bruta, indicando uma relação boa entre as perdas de resistência compressiva e flexural sob ação térmica.

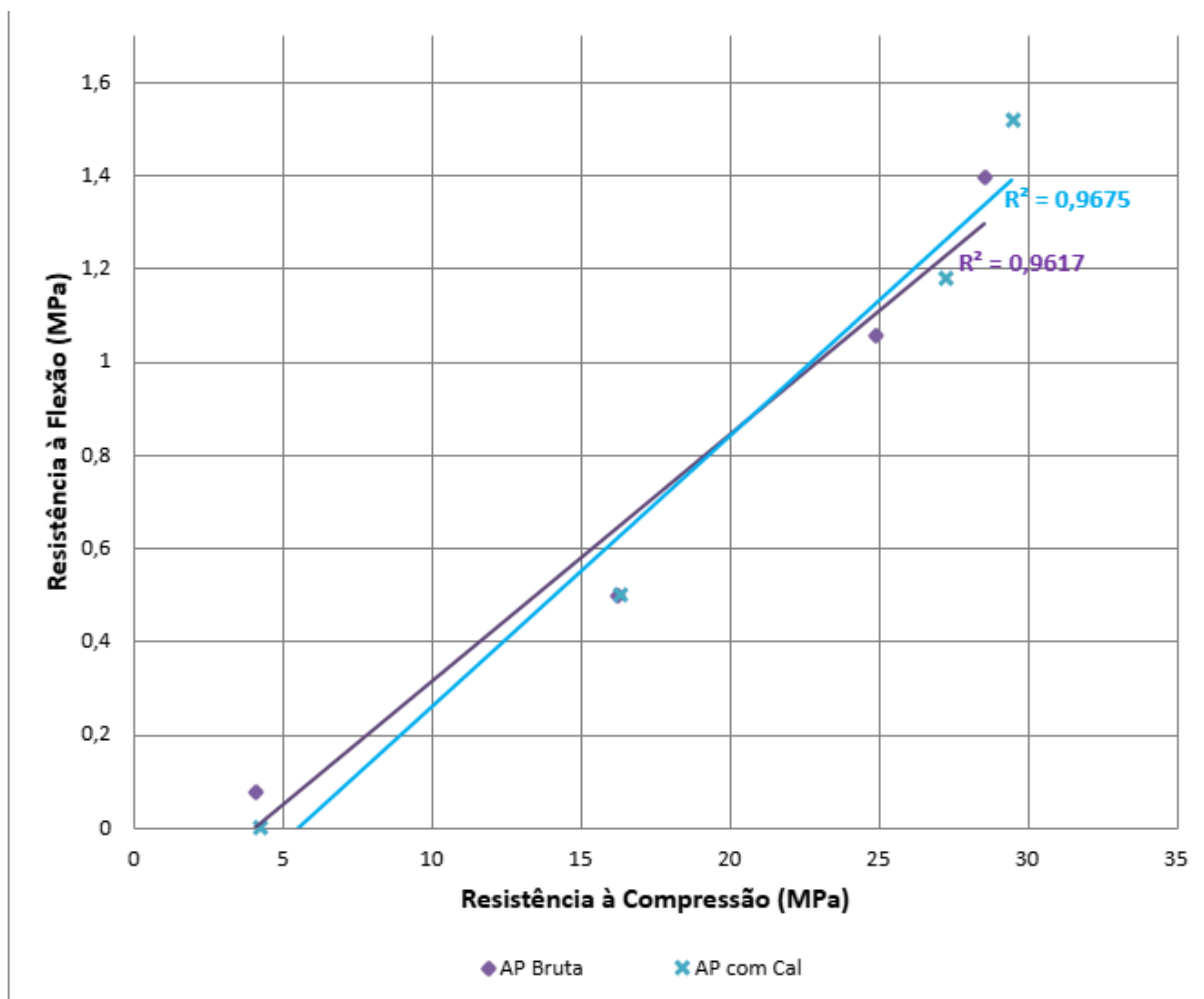


Figura 28: Gráfico de dispersão - Flexão e Compressão

Fonte: Autoria Própria (2025)

Entre os traços com água pluvial, as inclinações das retas (coeficientes angulares) mostraram que o AP com cal exige aproximadamente 13,8 % de perda de resistência à flexão para cada ponto percentual de resistência compressiva perdido, enquanto o AP Bruta tem coeficiente angular ligeiramente menor (12,99), posicionando-se como intermediário em termos de eficiência térmica quando comparado com as formulações contendo pó de vidro.

Embora essas formulações AP não demonstrem grandes desvios de tendência, a diferença entre elas sugere que a cal, apesar de melhorar inicialmente a resistência à compressão, pode reduzir levemente a resistência relativa à flexão ao longo do aquecimento. Ainda assim, ambos os traços mantêm uma relação linear altamente confiável, indicando que é possível prever com segurança a perda de resistência à flexão a partir da perda observada na resistência à compressão.

Em suma, também nas argamassas contendo água pluvial é mantida forte correlação linear entre resistência à compressão e resistência à flexão, permitindo prever o comportamento estrutural dessas argamassas em aplicações sujeitas a variações térmicas severas com excelente precisão e confiabilidade.

4.4.4 Efeitos da temperatura

Para as argamassas formuladas com água pluvial ("AP Bruta" e "AP com Cal"), a relação entre perda de massa e perda de resistência à compressão também revelou-se fortemente linear, com coeficientes de determinação (R^2) igualmente elevados, alcançando aproximadamente 0,999 para AP Bruta e valor semelhante para AP com cal. Essa linearidade evidencia que a resistência à compressão nessas formulações decresce proporcionalmente à perda de massa causada pelo efeito térmico, permitindo prever com segurança o comportamento dessas argamassas ao serem expostas a elevadas temperaturas.

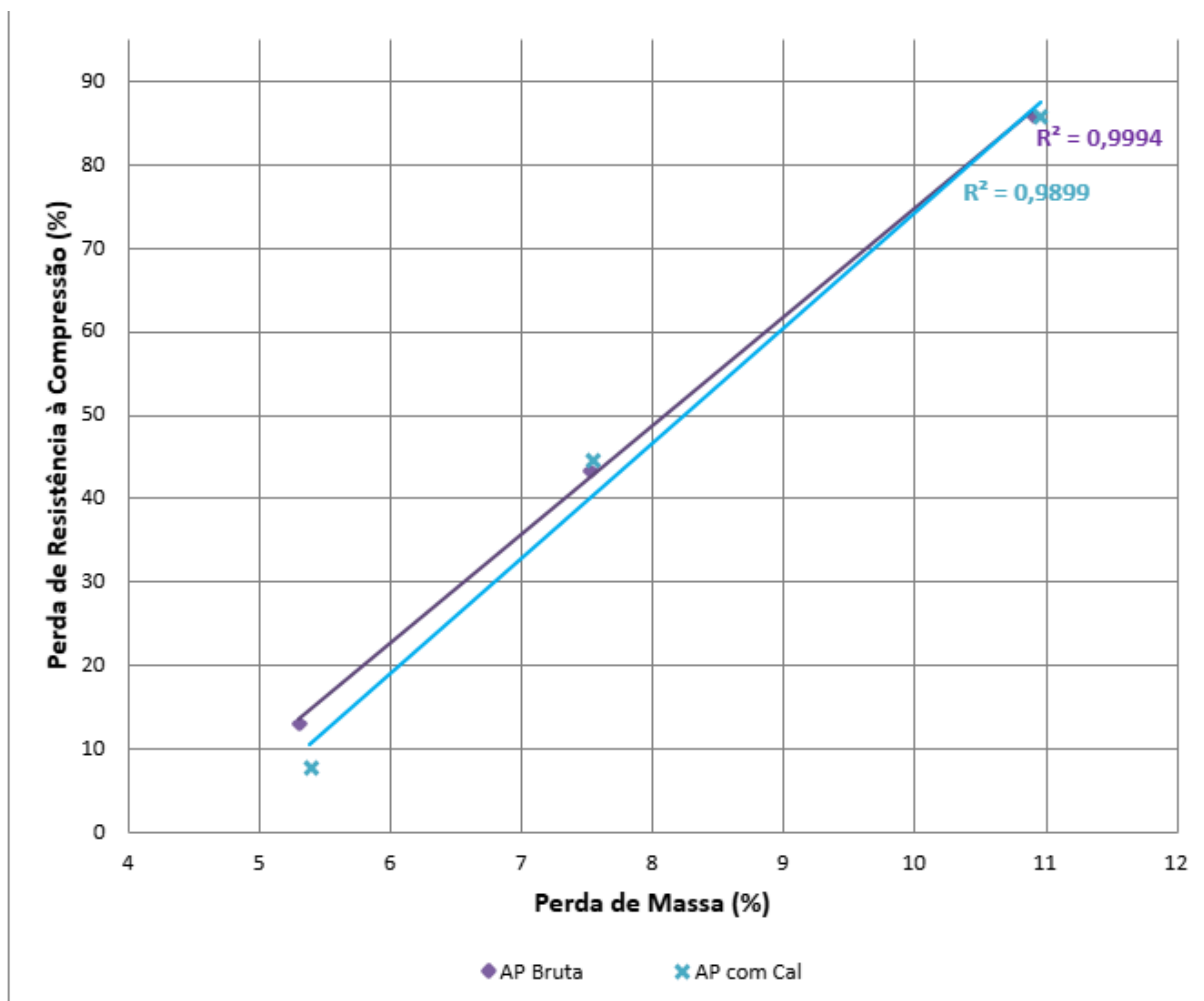


Figura 29: Gráfico de dispersão - Perda de massa e Perda Compressão

Fonte: Autoria Própria (2025)

Ao analisar os coeficientes angulares, verifica-se que o traço AP Bruta apresentou um coeficiente ($\approx 12,99$) muito próximo ao do GP 20 %, sugerindo que a hidratação da argamassa com água pluvial pura, livre de contaminantes e sais, gera uma microestrutura inicialmente coesa e resistente à perda térmica. Por outro lado, o traço AP com Cal mostrou o maior coeficiente angular ($\approx 13,83$), indicando que, apesar de a cal melhorar a resistência inicial devido à formação acelerada de gel C–S–H, as fases cristalinas resultantes são menos estáveis em temperaturas elevadas. Isso traduz-se em maior fragilidade e maior perda proporcional de resistência à medida que a massa evaporada aumenta.

Em resumo, as argamassas contendo água pluvial evidenciam comportamentos térmicos diferenciados conforme a presença ou ausência da cal, destacando-se o traço AP Bruta por sua eficiência térmica superior ao AP com Cal quando submetido a temperaturas

elevadas, ainda que ambos mantenham uma excelente previsibilidade linear da degradação estrutural com o aquecimento.

4.4.5 Eficiência Relativa dos Traços

Na comparação da eficiência relativa das argamassas preparadas com água pluvial, observa-se igualmente uma clara superioridade sobre o traço padrão em resistência à compressão (Figura 30). O traço "AP com cal" atingiu cerca de 129 % da resistência do padrão, enquanto o traço "AP Bruta" obteve aproximadamente 125 %. Esses resultados corroboram as previsões da literatura; por exemplo, Figueiredo et al. (2019) demonstraram melhorias em torno de 20 % na compressão de argamassas confeccionadas com água pluvial filtrada, atribuindo o desempenho superior à pureza química da água que favorece uma hidratação mais completa e homogênea do gel C–S–H.

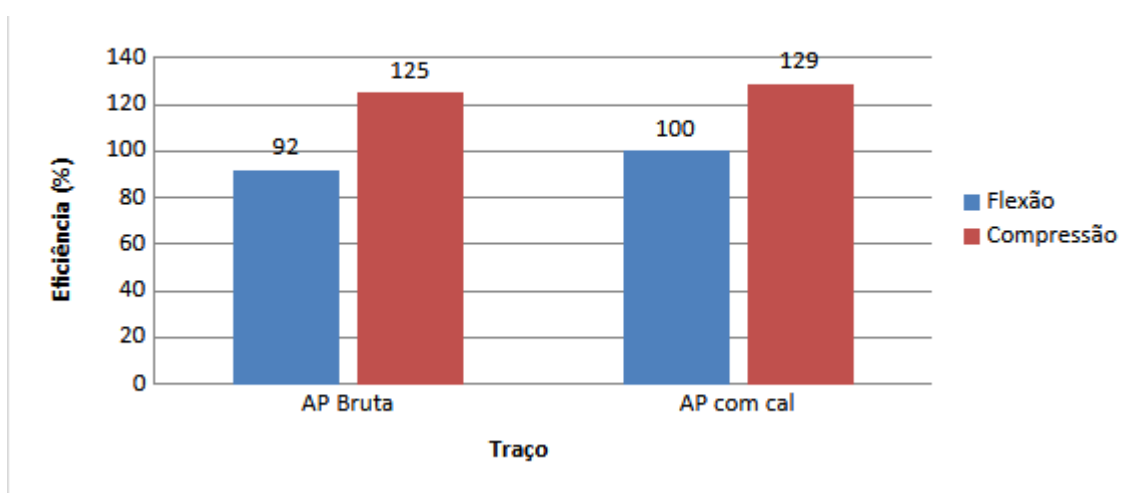


Figura 30: Eficiência relativa dos traços associada à flexão e compressão

Fonte: Autoria Própria (2025)

Já em relação à resistência à flexão, as argamassas contendo água pluvial apresentaram eficiências um pouco mais variadas. O traço "AP Bruta" registrou cerca de 92 % da eficiência relativa em comparação ao padrão, indicando leve redução na tenacidade superficial. Em contrapartida, o "AP com cal" atingiu exatamente 100 %, mantendo-se equivalente ao traço referência. Essa variação sugere que, além da resistência máxima obtida em compressão, parâmetros adicionais como retração, formação de microfissuras e homogeneidade superficial influenciam os resultados obtidos no ensaio à flexão.

Como já explicitado anteriormente, considerações adicionais devem ser feitas quanto à variabilidade experimental associada aos ensaios mecânicos. Diferenças de poucos dias a mais ou a menos na cura húmida, ou pequenas flutuações na humidade ambiente e no tempo de secagem dos provetes podem afetar mais significativamente os resultados obtidos para resistência à flexão do que para compressão. Uma cura ligeiramente mais curta ou mais longa em um dos lotes pode alterar a resistência de referência, afetando diretamente os índices de eficiência relativa calculados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, investigou-se de forma sistemática a viabilidade técnica de argamassas de revestimento mais sustentáveis, nas quais parte do cimento é substituída por pó de vidro moído e a água potável é substituída por água pluvial, pura ou neutralizada com cal. O objetivo geral, determinar experimentalmente as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e de resistência a altas temperaturas dessas argamassas, foi plenamente atendido por meio de uma extensa bateria de ensaios que incluiu variação dimensional, perda de massa, resistência à flexão e compressão em temperaturas de ambiente, 200 °C, 500 °C e 800 °C, bem como análise visual e comparações estatísticas com o traço de referência.

Os objetivos específicos também foram tratados. Primeiro, caracterizou-se o pó de vidro quanto à granulometria e atividade pozolânica, confirmando sua adequação como microfiller e agente sinterizante parcial, capaz de nucleação de fases de mullita que melhoram a coesão interna. Em seguida, desenvolveram-se formulações contendo 20 %, 30 % e 40 % de substituição do cimento por pó de vidro, bem como variantes produzidas com água de chuva bruta e água pluvial ajustada ao pH neutro. Cada um desses traços foi submetido aos ensaios mecânicos de flexão e compressão, tendo sido possível avaliar quantitativamente seus desempenhos.

Em relação às propriedades mecânicas, as argamassas com 20 % de pó de vidro apresentaram os melhores resultados, superando em até 36 % a resistência à compressão do traço padrão e mantendo ou ligeiramente superando a flexão de referência. As formulações com 30 % e 40 % de GP mantiveram ganhos importantes em compressão, mas apresentaram

decréscimos graduais na relação flexão/compressão, indicando um ponto ótimo em torno de 20 % de substituição. No que tange às argamassas produzidas com água pluvial, observou-se que a água de chuva bruta conferiu ganho de $\approx 25\%$ em compressão sobre o padrão, o qual se elevou para $\approx 29\%$ quando o pH foi ajustado com cal, sem comprometer significativamente a tenacidade. Estes resultados corroboram estudos prévios em que a pureza da água pluvial melhora a hidratação e a ausência de sais dissolve promove microestrutura mais homogênea.

Quanto ao desempenho térmico, as argamassas com pó de vidro exibiram retenção de massa mais controlada e maior estabilidade dimensional, apresentando regressões lineares quase perfeitas ($R^2 > 0,98$) entre perda de massa e perda de resistência à compressão. As perdas de resistência remanescente a $800\text{ }^\circ\text{C}$ foram de até 15 % da carga original, evidenciando a eficácia da sinterização parcial do vidro em inibir microfissuras. As formulações com água pluvial mantiveram desempenho competitivo em alta temperatura, embora tenham sido ligeiramente mais sensíveis à perda de resistência por ponto percentual de massa evaporada, além de terem variado mais em relação à eficiência comparada entre as diferentes temperaturas e tipo de ensaio de resistência.

A comparação com referências normativas e publicações científicas reforça que os valores obtidos não só são compatíveis com práticas consolidadas de mecânica (flexão $\approx 10\text{--}20\%$ da compressão), mas também superam, em muitos casos, limites mínimos exigidos pela norma EN 1015-11 para argamassas de revestimento. As argamassas com 20 % GP e com água pluvial ajustada ao pH neutro mostraram durabilidade térmica comparável a argamassas convencionais até $500\text{ }^\circ\text{C}$, mantendo boa resistência às altas temperaturas e baixa condutividade térmica, o que amplia suas aplicações em regiões sujeitas a ciclos severos de temperatura.

Portanto, a substituição parcial do cimento por pó de vidro em torno de 20 % e o uso controlado de água pluvial representam soluções tecnicamente viáveis para o desenvolvimento de argamassas de revestimento mais sustentáveis, sem perda de desempenho mecânico ou térmico. Esses traços cumprem os objetivos de reduzir a pegada de carbono (por meio do reaproveitamento de vidro), otimizar o uso de recursos hídricos alternativos e atender às exigências normativas. Recomenda-se, para trabalhos futuros, explorar tempos de cura mais longos para potencializar a reatividade pozolânica tardia do vidro, variar as proporções de insumos nos traços, utilizar o pó de vidro como substituição aos agregados, bem como

avaliar o comportamento em ciclos térmicos repetidos e em condições de humidade variável, de modo a consolidar o uso dessas formulações em obras de escala real.

REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute – ACI. (2012). *Guide for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. ACI Committee 211.
- Bertolini, L. C., Medeiros, M. H. F., Isaia, G. C., & Helene, P. (2009). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais* (2^a ed.). Editora PINI.
- Basheer, P. A. M., & Khan, Q. U. Z. (2001). Effects of water quality on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*.
- Chandra, S., & Coutinho, J. (2010). Influence of glass powder on the thermal behavior of cementitious composites. *Construction and Building Materials*.
- Environmental Protection Agency – EPA. (2021). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*.
- European Committee for Standardization. (2007). *EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. CEN.
- European Committee for Standardization. (2011). *EN 197-1: Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. CEN.
- European Committee for Standardization. (2016). *EN 196-1: Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength*. CEN.
- Figueiredo, A., Silva, R., & Costa, P. (2019). Influence of rainwater on the compressive strength of mortar. *Journal of Building Engineering*, 23, 301–308.
- Huijgen, W. J. J., Witkamp, G. J., & Comans, R. N. J. (2005). Mechanisms of calcium carbonate precipitation in aqueous systems containing humic substances. *Environmental Science & Technology*.
- International Energy Agency – IEA. (2021). *Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector*.
- International Organization for Standardization. (1999). *ISO 834: Fire resistance tests – Elements of building construction*. ISO.
- Matos, A. M. (2010). Influence of finely ground glass pozzolan on the mechanical and durability properties of blended cement mortars. *Journal of the American Ceramic Society*.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Mohammad, A. H., Zhang, L., & Karakashev, S. (2023). Performance enhancement of cement mortars with recycled glass powder. *Journal of Cleaner Production*.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete* (5^a ed.). Pearson Education.

ONU-Habitat. (2020). *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*. United Nations Human Settlements Programme.

Peixeiro, R. M. (2016). Comportamento reológico e mecânico de argamassas de cimento contendo pó de vidro reciclado. *Materiais de Construção*.

Pontikes, Y., Kontopoulos, A., & Angelopoulos, G. N. (2017). Formation of belite and mullite in CaO-rich ceramic systems at high temperatures. *Journal of the European Ceramic Society*.

Prasanna, P., & Bhaskar, S. (2016). Effect of glass powder microfiller in clay-based composites. *Ceramics International*.

Silva, R. F., Lima, K. S., & Costa, P. M. (2015). Microstructural reinforcement of ceramic composites by glass additives. *Journal of the American Ceramic Society*.

Silva, R. F., & Almeida, M. G. (2021). Utilização de resíduos de construção e demolição em compósitos cimentícios: uma revisão. *Recursos, Conservação e Reciclagem*.

Taylor, J., & Brown, L. (2013). Flexural strengthening mechanisms in glass-modified ceramic materials. *Ceramics International*.

Vega, E. P., & Corona, J. M. (2010). Influence of hydrated lime on the properties of cement mortars containing recycled glass powder.