



# **COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE TERRAS DE DIATOMÁCEAS A ALTAS TEMPERATURAS**

CAIO DE OLIVEIRA BARBOSA

Dissertação apresentada à  
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia da Construção

BRAGANÇA

2025

# **COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE TERRAS DE DIATOMÁCEAS A ALTAS TEMPERATURAS**

CAIO DE OLIVEIRA BARBOSA

Dissertação apresentada à  
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia da Construção

No âmbito da dupla diplomação com a  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por  
Prof. Dra. Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira (IPB)  
Prof. Dra. Adriana Macedo Patriota Faganello (UTFPR)

BRAGANÇA  
2025

*Dedico este trabalho a quem me ensinou,  
inspirou e apoiou na minha jornada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe, Loredana, e à minha família, pelo amor incondicional, apoio em todos os momentos e por sempre estarem ao meu lado, me dando forças para seguir em frente com confiança.

Agradeço também à minha namorada e companheira, Larissa Ayumi, por estar ao meu lado em cada etapa, oferecendo sempre compreensão, incentivo e carinho.

Às minhas orientadoras, Débora Macanjo Ferreira e Adriana Macedo Patriota Faganello, agradeço pela orientação cuidadosa, pela confiança depositada e pelo comprometimento ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Sou grato à UTFPR e ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) pela oportunidade de realizar a dupla diplomação, uma experiência que contribuiu de forma significativa para minha formação acadêmica e pessoal.

Agradeço ainda ao senhor João Pires, ao senhor Octávio Pereira e à engenheira Luísa Barreira pelo suporte técnico e atenção nos laboratórios de materiais e de resistência, fundamentais para a realização dos ensaios experimentais.

Por fim, agradeço aos meus amigos, pelo companheirismo, pelas palavras de incentivo e pela amizade constante ao longo dessa caminhada.

## RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por significativos impactos ambientais, principalmente devido à elevada emissão de CO<sub>2</sub> no processo de produção do cimento Portland e ao descarte inadequado de resíduos industriais. Nesse contexto, este trabalho investiga o comportamento em altas temperaturas de argamassas com incorporação de terra diatomácea residual (TDR), proveniente da filtração de vinhos, como alternativa sustentável para reduzir esses impactos. Foram analisadas três composições: uma de referência, uma com substituição de 15% do cimento e outra com 5% da areia por TDR, submetidas a temperaturas de 250 °C e 500 °C, com dois tipos de arrefecimento, gradual e acelerado. Avaliaram-se propriedades mecânicas como resistência à flexão, compressão e aderência. Nos ensaios de resistência à flexão em temperatura ambiente, as argamassas com substituição de cimento apresentaram ganhos de até 27,5%, enquanto as com substituição de areia alcançaram até 51,7%. Aos 250 °C, o arrefecimento acelerado proporcionou um ganho de 0,8% para as amostras com substituição de cimento e uma queda de 16% para as com substituição de areia; a 500 °C, todas as formulações apresentaram perdas significativas, com reduções de até 61,9% e 59,9%, respectivamente. Na resistência à compressão, a substituição de areia proporcionou ganho de 14,7% em temperatura ambiente, enquanto a de cimento resultou em queda de 31,4%. Aos 250 °C, no arrefecimento gradual, as formulações com substituição de areia e cimento apresentaram ganhos de 17,9% e 6,1%, respectivamente. No arrefecimento acelerado, as argamassas de referência tiveram melhor desempenho. Já a 500 °C, as argamassas com substituição de areia mantiveram ganhos de 77,9% e as com substituição de cimento 40,1%, embora a amostra de referência tenha apresentado fissuras visíveis após 24 horas. Nos ensaios de aderência, em temperatura ambiente, a substituição de areia resultou em ganho de 5,1%, enquanto a de cimento apresentou queda de 49,6%. Aos 250 °C, apenas as amostras de referência puderam ser ensaiadas, mantendo a aderência, enquanto as demais perderam completamente a aderência ainda na preparação, independentemente do tipo de arrefecimento. A 500 °C, todas as amostras perderam completamente a aderência, demonstrando falha total na interface argamassa-substrato. Os resultados evidenciam o potencial da terra diatomácea residual como adição sustentável, especialmente em termos de resistência à compressão, embora ainda existam desafios no que se refere à aderência em temperaturas elevadas.

**Palavras-chave:** Aderência, Altas Temperaturas, Argamassa, Arrefecimento, Compressão, Flexão, Resíduos, Terra Diatomácea, Vinho.

## ABSTRACT

The construction industry is responsible for significant environmental impacts, primarily due to high CO<sub>2</sub> emissions from Portland cement production and the improper disposal of industrial waste. In this context, this study investigates the high-temperature behavior of mortars incorporating residual diatomaceous earth (RDE), a byproduct from wine filtration, as a sustainable alternative to mitigate these impacts. Three mortar compositions were analyzed: a reference mixture, one with 15% cement replacement, and another with 5% sand replacement by RDE. These were subjected to temperatures of 250 °C and 500 °C, using two cooling methods: gradual and accelerated. Mechanical properties such as flexural strength, compressive strength, and bond strength were evaluated. In flexural strength tests at room temperature, mortars with cement replacement showed gains of up to 27.5%, while those with sand replacement reached 51.7%. At 250 °C, accelerated cooling resulted in a 0.8% increase for cement-replaced samples and a 16% decrease for sand-replaced ones; at 500 °C, all formulations showed significant reductions—up to 61.9% and 59.9%, respectively. In compressive strength, sand replacement yielded a 14.7% gain at room temperature, while cement replacement caused a 31.4% decrease. At 250 °C under gradual cooling, mortars with sand and cement replacement presented gains of 17.9% and 6.1%, respectively. Under accelerated cooling, reference mortars performed better. At 500 °C, mortars with sand replacement retained 77.9% gains, and those with cement replacement 40.1%, while the reference sample developed visible cracking after 24 hours. In adhesion tests at room temperature, sand replacement showed a 5.1% improvement, while cement replacement dropped by 49.6%. At 250 °C, only the reference samples retained adhesion; the others failed during preparation regardless of the cooling method. At 500 °C, all samples completely lost adhesion, indicating total failure at the mortar-substrate interface. The results demonstrate the potential of residual diatomaceous earth as a sustainable additive, particularly for improving compressive strength, although challenges remain regarding adhesion at elevated temperatures.

**Keywords:** Adhesion, High Temperatures, Mortar, Cooling, Compressive Strength, Flexural Strength, Waste, Diatomaceous Earth, Wine.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	2
1.2	ESTRUTURA DA TESE .....	2
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>4</b>
2.1	SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO .....	4
2.2	INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	6
2.2.1	Substituição Parcial dos Agregados .....	7
2.2.2	Substituição Parcial do Cimento .....	9
2.3	TERRA DIATOMÁCEA .....	11
2.4	COMPORTAMENTO DE ARGAMASSA EM ALTAS TEMPERATURAS.....	14
2.4.1	Diferentes formas de arrefecimento .....	15
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>17</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	19
3.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	22
3.2.1	Ensaio de Flexão .....	23
3.2.1.1	Preparação das argamassas.....	23
3.2.1.2	Provetes .....	25
3.2.1.3	Exposição a altas temperaturas.....	27
3.2.1.4	Ensaio .....	29
3.2.2	Ensaio de Compressão .....	30
3.2.3	Ensaio de Aderência.....	31
3.2.3.1	Substrato.....	31
3.2.3.2	Aplicação da Argamassa .....	32

3.2.3.3	Cura da argamassa.....	33
3.2.3.4	Exposição a altas temperaturas.....	34
3.2.3.5	Ensaio .....	35
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
4.1	RESISTÊNCIA A FLEXÃO .....	39
4.1.1	Temperatura de 20 °C .....	40
4.1.2	Temperatura de 250 °C .....	41
4.1.3	Temperatura de 500 °C .....	42
4.1.4	Análise comparativa de resistência à flexão .....	44
4.2	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO .....	45
4.2.1	Temperatura de 20 °C .....	45
4.2.2	Temperatura de 250 °C .....	47
4.2.3	Temperatura de 500 °C .....	48
4.2.4	Análise comparativa de resistência à compressão.....	50
4.3	ADERÊNCIA .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>56</b>
5.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	56
5.2	TRABALHOS FUTUROS .....	58
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração de dióxido de carbono na atmosfera em Mauna Loa [16] .....	5
Figura 2 - Processo de filtragem com terra diatomácea, [43].....	13
Figura 3 - Diagrama de definição do estudo.....	19
Figura 4 – (a) Cimento utilizado; (b) Secagem da areia em estufa .....	20
Figura 5 - TDR secando ao ar.....	20
Figura 6 - (a) 500g de TDR; (b) Travessas com TDR antes de ir ao forno.....	21
Figura 7 - TDR pronta para utilização.....	22
Figura 8 – (a) Forno utilizado; (b) Leitor de temperatura do forno.....	23
Figura 9 - (a) Balança digital utilizada; (b) Constituintes da argamassa.....	24
Figura 10 - Misturador no processo de amassadura .....	24
Figura 11 - (a) Amostra REF; (b) Amostra RC; (c) Amostra RA .....	25
Figura 12 - (a) Primeira etapa da moldagem do provete; (b) Segunda etapa da moldagem do provete; (c)Moldagem concluída.....	25
Figura 13 - (a) Moldagem seca; (b) Provetes desmoldados e nomeados .....	26
Figura 14 - Cura dos provetes.....	26
Figura 15 - Diagrama de provetes realizados para o ensaio de flexão/compressão .....	27
Figura 16 – (a) Provetes antes da queima; (b) Provetes depois da queima .....	28
Figura 17 - (a) Arrefecimento acelerado; (b) Amostras no arrefecimento gradual e após 2 horas de arrefecimento acelerado.....	28
Figura 18 - Provelte fissurado.....	29
Figura 19 - (a) Equipamento utilizado; (b) Ensaio em procedimento .....	29
Figura 20 - Provelte utilizada no ensaio de compressão.....	30
Figura 21 - (a) Equipamento utilizado; (b) Equipamento de fixação do provete; (c) Ensaio em andamento; (d)Monitoramento do ensaio.....	31
Figura 22 - (a) Substrato inteiro; (b) Serra circular utilizada; (c) Substrato utilizado.....	32
Figura 23 - (a) Molde para aplicação da argamassa no substrato; (b) Superfície do substrato molhada; (c) Argamassa aplicada e arrasada; (d) Altura da camada de argamassa .....	33
Figura 24 - Cura dos provetes do ensaio de aderência .....	34
Figura 25 - (a) Provetes no forno; (b) Disposição dos provetes.....	34
Figura 26 - (a) Arrefecimento gradual provetes aderência; (b) Arrefecimento acelerado provetes aderência.....	35
Figura 27 - (a) Furo dos provetes; (b) Provetes cortados .....	36

Figura 28 - Provetes e cabeças de tração limpas .....	36
Figura 29 – (a) Resina utilizada; (b) Mistura da resina; (c) Aplicação da resina no provete; (d) Cabeças de tração coladas. ....	37
Figura 30 - (a) Equipamento utilizado; (b) Provete no ensaio .....	38
Figura 31 - (a) Padrão de fratura a; (b) Padrão de fratura b; (c) Padrão de fratura c. 1 - Cabeça de tração; 2 - Camada adesiva; 3 - Argamassa; 4 - Substrato [58].....	38
Figura 32 - Gráfico de resistência média à flexão das amostras a 20 °C.....	40
Figura 33 - Gráfico de resistência média à flexão das amostras após exposição a 250 °C .....	42
Figura 34 - Gráfico de resistência média à flexão das amostras após exposição a 500 °C .....	43
Figura 35 - Gráfico de resistência média à flexão das amostras .....	44
Figura 36 - Gráfico de tensão média de compressão a 20 °C.....	46
Figura 37 - Gráfico de tensão média de compressão a 250 °C.....	48
Figura 38 - Gráfico de tensão média a compressão a 500 °C.....	49
Figura 39 - Gráfico de tensão média a compressão das amostras .....	50
Figura 40 – Provetes com perda de aderência .....	52
Figura 41 - (a) Ruptura provetes REF; (b) Ruptura provetes RC e RA; (c) Ruptura provetes REFR 250 .....	53
Figura 42 - Gráfico de tensão média de aderência .....	53
Figura 43 – (a) Provetes com perda de aderência após a imersão em água; (b) Provetes com adição de TDR após arrefecimento acelerado apresentando a perda de aderência; (c) Provetes com adição de TDR apresentando perda de aderência após 24 horas; (d) Provetes em que ocorreram a perda de aderência, inclusos os REF a 500 °C.....	55

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Traço das argamassas [6] .....	17
Tabela 2 - Traço EN 196-1 [53] .....	18
Tabela 3 - Material utilizado para 5 provetes do ensaio de aderência.....	32
Tabela 4 - Valores médios de resistência à flexão das argamassas a temperatura ambiente (20 °C) .....	40
Tabela 5 - Valores médios de resistência à flexão das argamassas a 250 °C .....	41
Tabela 6 - Valores médios de resistência à flexão das argamassas a 500 °C .....	42
Tabela 7 - Valores médios de resistência à compressão das argamassas a temperatura ambiente (20 °C) .....	46
Tabela 8 - Valores médios de resistência à compressão das argamassas a 250 °C .....	47
Tabela 9 - Valores médios de resistência à compressão das argamassas a 500 °C .....	48
Tabela 10 - Classificação das propriedades da argamassa endurecida [64] .....	51
Tabela 11 - Tensão de ruptura de aderência .....	54

## LISTA DE ABREVIACÕES

---

<b>Abreviação</b>	<b>Definição</b>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMR	Agregado Miúdo Reciclado
ARCF	agregados reciclados de concreto fração fina
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
LERM	Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais
RCD	Resíduos da construção e demolição
TD	Terra diatomácea
TDR	Terra diatomácea residual
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

## 1 INTRODUÇÃO

A argamassa é um material amplamente utilizado na construção civil, composto por uma mistura de ligante, agregados e água, cujas propriedades aglutinantes são fundamentais para diversas aplicações. Além dos componentes básicos, é comum a adição de aditivos ou materiais suplementares com o objetivo de modificar ou aprimorar determinadas características da pasta, conforme as exigências de desempenho da aplicação final [1].

Contudo, em situações extremas, como ambientes industriais agressivos ou em casos de incêndios, as argamassas convencionais podem apresentar perda significativa de desempenho, comprometendo a integridade das estruturas [2]. Soma-se a isso a preocupação ambiental associada ao cimento Portland, cujo processo de fabricação é altamente poluente. Estima-se que, para cada tonelada de cimento produzida, seja emitida aproximadamente uma tonelada de CO<sub>2</sub>, o que torna a indústria cimenteira responsável por cerca de 5 a 7% das emissões globais desse gás [3].

Diante desse cenário, torna-se evidente a importância de alternativas mais sustentáveis, como a reutilização de resíduos industriais. A terra de diatomácea residual (TDR), proveniente do processo de filtração industrial, destaca-se como uma dessas possibilidades. Após cumprir sua função como meio filtrante, a TDR apresenta vida útil limitada, sendo rapidamente saturada e, conseqüentemente, descartada. Esse descarte recorrente contribui para a geração de um passivo ambiental significativo [4].

A diatomita, matéria-prima da TDR, é uma rocha sedimentar silicosa formada pela deposição de carapaças fósseis de algas em ambientes marinhos ou lacustres. Os principais depósitos encontram-se em regiões como Santa Barbara (EUA), França, Islândia e norte da África [5]. Iniciativas como o Projeto BacchusTech- Integrated Approach for the Valorisation of Winemaking Residues, têm impulsionado pesquisas voltadas à caracterização e reutilização da TDR em materiais cimentícios. Estudos desenvolvidos por autores como Zolin [6], Miscovicz [7] e Magalhães et al. [8] indicam um potencial promissor para sua aplicação em argamassas e concretos, tendo investigado propriedades como resistência à compressão e à flexão, absorção de água, aderência e comportamento térmico.

Apesar desses avanços, ainda são escassas as investigações que abordam o comportamento de argamassas com TDR quando submetidas a elevadas temperaturas. Essa

lacuna é particularmente relevante em contextos em que a resistência térmica é um requisito essencial para a segurança e durabilidade das estruturas.

Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade de compreender o desempenho de composições cimentícias incorporando TDR sob ação térmica intensa, contribuindo para o avanço técnico-científico no campo dos materiais de construção e, simultaneamente, promovendo a sustentabilidade por meio do reaproveitamento de resíduos industriais.

## 1.1 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo contribuir para a compreensão dos efeitos da adição de terra diatomácea proveniente da filtração de vinhos em argamassas cimentícias, em colaboração com o Projeto BacchusTech. Este projeto envolve um consórcio de empresas, institutos politécnicos, parceiros internacionais e centros de pesquisa, com o propósito de desenvolver um novo processo para o reaproveitamento dos resíduos gerados pela vinificação.

A partir dessa colaboração, o trabalho procura investigar a influência das altas temperaturas no comportamento das argamassas incorporadas com terras diatomáceas residuais, adotando diferentes tipos de arrefecimentos, visando compreender como esse material pode melhorar as propriedades mecânicas das argamassas. O impacto da exposição a altas temperaturas na resistência à compressão e à flexão das argamassas será analisada bem como a sua capacidade de aderência à superfície, oferecendo uma alternativa mais sustentável e eficiente para aplicações que exigem maior resistência ao calor.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- 1 - Avaliar o desempenho a altas temperaturas das argamassas com incorporação de terra diatomácea;
- 2 – Avaliar e comparar os métodos de arrefecimento das argamassas: gradual e acelerado;
- 3 – Comparar as resistências à flexão, compressão e aderência das argamassas com TDR e as argamassas de referência.

## 1.2 ESTRUTURA DA TESE

O trabalho está dividido em 5 capítulos:

O primeiro capítulo será uma introdução o qual apresenta uma descrição do tema da tese;

O segundo capítulo é o estado da arte, abrange a revisão bibliográfica do tema abordado. Nele mostra-se a importância de diminuir o uso de cimento para o meio ambiente e para a sociedade, abordando a questão do uso de resíduos na construção, estudos que avaliam as propriedades mecânicas das argamassas e a incorporação de resíduos tanto em substituição parcial do cimento quanto em substituição parcial da areia;

O terceiro capítulo apresenta a definição dos materiais, o tratamento da terra diatomácea saturada proveniente da filtração de vinhos, a escolha das dosagens a serem estudadas, preparação dos provetes, método de aquecimento, forma que os provetes serão arrefecidos e os ensaios desenvolvidos;

O quarto capítulo é destinado para apresentação e discussão dos resultados

O quinto capítulo apresenta uma conclusão acerca dos resultados obtidos no estudo do comportamento a altas temperaturas da argamassa com incorporação de terra diatomácea residual e recomendação para futuros trabalhos.

## **2 ESTADO DA ARTE**

O mundo está em constante transformação, com grande parte dessas mudanças sendo originadas por ações humanas, o que tem gerado impactos significativos no ecossistema. É necessário compreender melhor essas mudanças para evitar efeitos negativos mais graves e, possivelmente, catastróficos [9].

A construção de novas edificações resulta em diversos impactos, ambientais, sociais e econômicos, já que grandes mudanças causadas pela construção civil afetam a sociedade devido à implantação dessas estruturas [10].

Observa-se que o impacto ambiental causado por uma nova edificação não se limita apenas ao canteiro de obras. Elementos como a extração de matérias-primas, a produção e transporte de materiais, a execução, as manutenções prediais, além da demolição e do descarte de resíduos, fazem parte de uma cadeia produtiva significativa dentro do sector [11]

Atualmente, a construção civil mantém sua operação por meio da extração de recursos naturais, o que a torna uma das principais responsáveis por impactos ambientais, resultando em áreas degradadas [12].

### **2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO**

A preocupação com questões ambientais ainda não faz parte da cultura predominante no setor da construção civil. No entanto, essa consideração tornou-se indispensável devido à crescente necessidade de utilizar os recursos naturais de forma racional [13].

Em 1987 surgiu o Relatório de Brundtland – "O Nosso Futuro Comum" – sendo apresentado uma das definições mais importantes ao nível ambiental, a definição de Desenvolvimento Sustentável. Esta é estabelecida como: "desenvolvimento que dê resposta às necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras darem resposta às delas" [14].

O conceito compartilhado de desenvolvimento sustentável surge com a ideia de que o desenvolvimento económico estaria relacionado com o equilíbrio ecológico e a qualidade de vida das populações mundiais [15].

O acúmulo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera sempre foi um problema para as alterações climáticas, e atualmente apresenta valores jamais alcançados, e tendendo a aumentar. As medições iniciais deste elemento ocorreram em 1958, em Mauna Loa (Hawaii), onde

registrava-se 280 partes por milhão (ppm)[15], sendo que no ano de 2025 estes valores chegaram a atingir os 430 ppm [16].

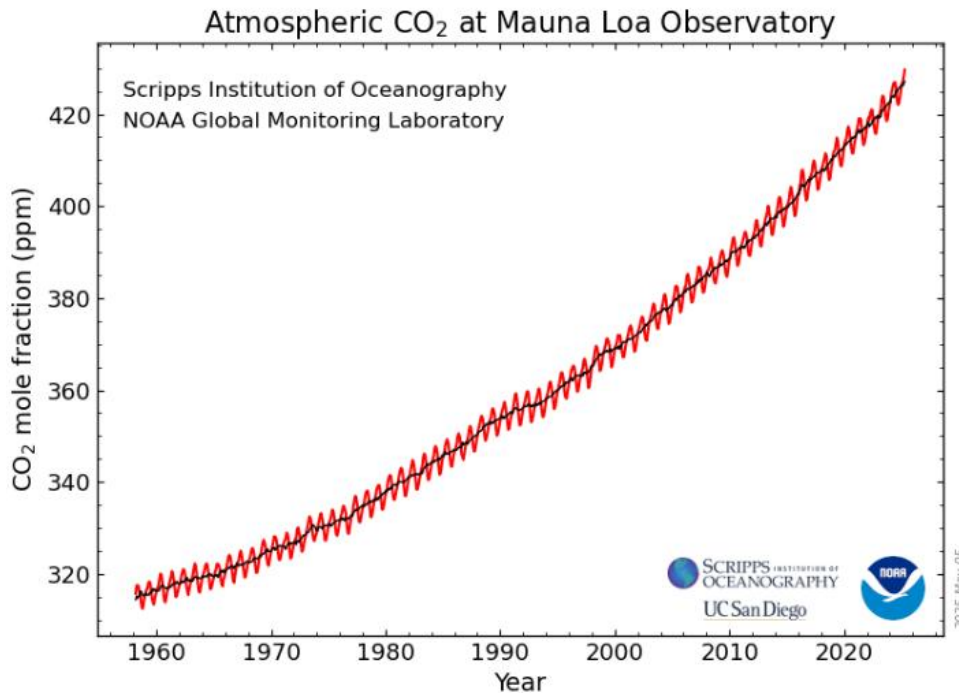


Figura 1 - Concentração de dióxido de carbono na atmosfera em Mauna Loa [16]

As mudanças climáticas impactam a biodiversidade e a capacidade regenerativa do planeta, assim como o bem-estar dos seres humanos, tratando-se da segurança hídrica e alimentar [17].

A construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento a longo prazo. Porém ela é responsável pela maioria das emissões de gases de efeito estufa em todo o globo, estima-se que seja 79% do total de emissões, sendo a maior parte associada à energia, construção e transporte. Essas emissões possuem origem em muitas etapas do ciclo de vida da infraestrutura: emissões integradas em materiais de construção como cimento e aço; a energia necessária para transportar estes materiais e trabalhadores para os locais de construção; as emissões geradas durante seu uso; o uso de equipamentos necessários para a manutenção e sua futura demolição[18].

Mesmo a construção civil causando muitos impactos ambientais ela possui grande importância social e econômica. O desenvolvimento sustentável é um desafio que precisa ser vencido a fim de evitar perdas ambientais irreversíveis às próximas gerações. Portanto deve-se inserir a sustentabilidade em todas as etapas da construção [19].

A escolha correta de materiais e tecnologias construtivas podem contribuir para melhorar o desempenho ambiental do ciclo de vida da edificação e conseqüentemente, sua sustentabilidade [15].

O consumo elevado de cimento Portland tem causado preocupações relacionadas ao seu processo produtivo, pois este possui um alto consumo energético. A indústria cimenteira demanda energia térmica na fabricação do clínquer e energia elétrica para operar outros equipamentos. Sendo que de energia térmica pode chegar a 3.300 MJ/t de clínquer produzido, enquanto a demanda de energia elétrica é estimada entre 90 e 120 kWh/t de cimento produzido [20], sendo que o volume total de cimento produzido em todo o mundo no ano de 2024 foi estimado em 4 bilhões de toneladas [21].

Na produção de cimento Portland, são geradas elevadas quantidades de CO<sub>2</sub>, sendo metade dessa emissão liberada durante a etapa de clinquerização, etapa essa que as matérias-primas são fundidas em cerca de 1500°C. A outra parte de emissões se originam da queima dos combustíveis no forno de clinquerização [3].

Além de ser muito poluente ao meio ambiente o processo de fabricação de cimento apresenta riscos para a saúde tanto dos trabalhadores quanto para a saúde pública, pois estes trabalhadores ficam expostos ao material pulverulento, o qual se difunde em todo o processo de produção, também ficam expostos as emissões de substâncias poluentes de forma contínua, se tornando um risco crônico [22].

## 2.2 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O crescimento abrupto da população mundial e o desenvolvimento das urbanizações trouxe consigo um alto desenvolvimento da indústria da construção, com isso o aumento significativo de resíduos de construção e demolição (RCD). Estima-se que em 1900 a produção mundial de resíduos sólidos, por dia, era uma quantidade inferior a 0,3 milhões de toneladas (Mt), enquanto em 2010 passou a ser maior que 3,5 Mt, tendo previsão que esta produção pode triplicar até 2100, caso não sejam adotadas medidas para reuso ou diminuição da produção de resíduos sólidos [23].

Os resíduos gerados por atividades de construção e demolição foram estabelecidos pela Resolução Conama nº 307/2002 da seguinte forma:

[...] provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais,

resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras [...] [24]

Portanto é fundamental que o setor da construção civil adote alternativas sustentáveis priorizando a diminuição do seu impacto ambiental. Uma dessas alternativas é a substituição parcial dos materiais de construção convencionais por resíduos, sejam eles de origem da própria construção civil ou não. Esse procedimento contribui para a diminuição da demanda por materiais não renováveis e reduz a pressão ambiental sobre as áreas de descarte. Podendo as argamassas se tornar uma opção viável para a incorporação de resíduos como insumo pois são materiais amplamente utilizadas na construção civil [25].

### **2.2.1 Substituição Parcial dos Agregados**

Menezes [26] estudou o uso de agregados reciclados da construção civil em argamassas, utilizando resíduos de serragem de granito (RG) e resíduos cerâmicos da construção civil (RCC), previamente separados, moídos e caracterizados por diversos ensaios físico-químicos. A atividade pozolânica foi avaliada por meio de resistência à compressão após 7 dias. Argamassas com proporção 1:3 e fator água/aglomerante de 0,48 foram preparadas com substituições parciais da cal por resíduos (25%, 35% e 50%). Os corpos de prova foram curados em imersão e ensaiados aos 7, 14, 28 e 60 dias. Os resultados mostraram ausência de atividade pozolânica, mas as misturas com 35% e 50% de substituição apresentaram aumento significativo na resistência à compressão aos 28 dias, enquanto a substituição de 25% teve desempenho similar ao da argamassa de referência.

O estudo de Phutthimethakul e Supakata [27] avaliou a viabilidade do uso de cinzas de fundo de incineração de resíduos urbanos (MIBA) e pellets de PET reciclado como substitutos parciais da areia na produção de argamassas cimentícias. Foram produzidas 15 formulações variando os teores de substituição de areia por MIBA (0–40%) e por PET (0–20%), mantendo uma razão aglomerante/agregado de 1:3 e relação água/cimento de 0,5.

Os resultados mostraram que a resistência à compressão diminui com o aumento dos teores de MIBA e PET. Ainda assim, argamassas com até 20% de substituição mostraram resistência superior a 40 MPa. A formulação com 10% de PET obteve a maior resistência (49,53 MPa), enquanto a com 40% de MIBA e 20% de PET teve a menor (24,44 MPa).

A absorção de água foi menor com 20% de MIBA e 20% de PET, indicando melhor arranjo de partículas e menor porosidade. A densidade seguiu tendência semelhante à

resistência mecânica. A análise microestrutural revelou pior aderência entre os pellets de PET e a pasta de cimento, com aumento da porosidade.

Monte Junior [28] analisou o comportamento de argamassas de revestimento com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado de concreto da fração fina (ARCF). Foram produzidas 14 argamassas variando a relação cal/cimento (0,3 a 1,7) e o teor de ARCF (15% a 85%), mantendo-se a relação ligante/agregado em 1:3. As argamassas foram caracterizadas em diferentes estados e avaliadas quanto à densidade, absorção de água, resistência mecânica, aderência e fissuração. Os resultados mostraram que o uso de ARCF reduz a densidade, mas melhora a resistência à compressão e tração na flexão. A resistência de aderência ficou dentro dos limites da NBR 13749 [29], mesmo com valores inferiores às argamassas de referência. O estudo recomenda atenção ao uso de ARCF acima de 50%, especialmente quando o acabamento for pintura, devido à maior rugosidade superficial.

Paula [30] investigou a viabilidade da substituição parcial e total da areia natural por agregados miúdos reciclados (AMR), oriundos de resíduos da construção civil, para a produção de blocos de vedação. Foram testadas proporções de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%, utilizando um traço fixo de 1:6 (cimento: agregado). Após coleta e preparo dos resíduos em Petrolina-PE, os blocos foram moldados e curados por 7, 14 e 28 dias.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão, NBR 6136 [31], absorção de água, NBR 12118 [32], e caracterizações físicas dos agregados. Os resultados mostraram que a substituição da areia por AMR não comprometeu significativamente a resistência dos blocos, embora tenha aumentado sua porosidade, o que pode afetar a durabilidade a longo prazo. Também se observou maior demanda de água nas misturas com AMR, devido à maior absorção dos agregados reciclados.

Magalhães et al. [8] exploraram o potencial da terra diatomácea residual (TDR), proveniente da indústria do vinho, como material de substituição parcial do cimento e da areia na produção de concretos, com foco em soluções mais sustentáveis e de bom desempenho a longo prazo. Para isso, a TDR foi previamente calcinada a 700 °C para remoção da matéria orgânica e utilizada em diferentes proporções: entre 5% e 10% em substituição ao cimento, e de 2,5% a 15% em substituição à areia. As argamassas foram avaliadas quanto à trabalhabilidade, densidade, absorção de água e resistência à compressão aos 7, 28, 90, 180 e 360 dias.

Os resultados demonstraram que a substituição de 10% do cimento por TDR resultou em leve redução da resistência nos primeiros dias, mas apresentou ganho de até 13% após 90

dias. Já a substituição de 5% da areia por TDR apresentou desempenho superior, com aumento de até 30% na resistência à compressão também aos 90 dias. Além disso, houve redução na densidade dos concretos devido à leveza da TDR e menor absorção de água, indicando maior impermeabilidade. A análise estatística confirmou diferenças significativas entre os traços, destacando a viabilidade da TDR como adição sustentável em composições cimentícias.

### **2.2.2 Substituição Parcial do Cimento**

Uma argamassa tradicional é composta por água, areia e cimento, sendo este último o componente que apresenta maior consumo energético e custo elevado. A função do cimento na mistura é promover a coesão dos agregados no estado fresco, garantir a aderência inicial à base do revestimento, e permitir o endurecimento da pasta. Além disso, ele é responsável por fornecer resistência mecânica à argamassa e reduzir a permeabilidade à água nos revestimentos, garantindo maior durabilidade e eficiência. [33].

Oliveira et al. [34] investigaram o uso do caulim calcinado, na forma de metacaulinita, como substituto parcial do cimento Portland em argamassas. O material foi calcinado a 700 °C, 800 °C e 900 °C por 2 horas, com duas finuras diferentes (#200 e #355), e utilizado em teores de 10%, 20%, 30% e 40% de substituição do cimento. As argamassas foram moldadas conforme a NBR 7215 [35] e curadas em água por 7, 28 e 90 dias.

Os ensaios mostraram que a substituição por caulim calcinado até 30% melhora a resistência à compressão, especialmente nas amostras calcinadas a 700 °C e 800 °C, devido à alta reatividade pozolânica da metacaulinita. Substituições acima de 30% resultaram em perda de desempenho, possivelmente pela insuficiência de hidróxido de cálcio disponível para reagir com o excesso de material pozolânico.

O estudo de Öztürk [36] avaliou a resistência ao calor de argamassas com 15% de substituição do cimento por cinza volante, escória de alto-forno moída e sílica ativa. As amostras foram expostas a 400 °C e 800 °C por 2 horas, e sua resistência à compressão foi medida antes e depois da exposição térmica. Os resultados mostraram que todas as argamassas com adições pozolânicas apresentaram maior resistência térmica em comparação à argamassa de referência, especialmente a com sílica ativa, que obteve os melhores resultados. Essa melhora foi atribuída ao comportamento pozolânico dos materiais.

Paula et al. [37] investigaram o potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material para substituir parcialmente o cimento na produção de argamassas. Inicialmente

o bagaço da cana de açúcar (BC) foi coletado e queimado em mufla em uma temperatura de 600 °C durante 6 horas e posteriormente foi ao forno em uma temperatura de 700 °C durante 3 horas para homogeneização.

Para a avaliação da influência da adição de CBC na argamassa, realizaram-se ensaios utilizando 4 amostras, 3 com adição de CBC com 10%, 20% e 30% de adição e uma amostra de referência 100% cimento, sendo avaliadas aos 7 e 28 dias, os ensaios realizados foram de endurecimento inicial e final, resistência a compressão, índice de atividade pozolânica, determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios.

Os ensaios de resistência à compressão mostraram que, aos 7 dias, a resistência diminuiu com o aumento do teor de CBC. No entanto, aos 28 dias, amostras com até 20% de substituição apresentaram desempenho semelhante ao da argamassa de referência, indicando que a reação pozolânica da CBC ocorre entre 7 e 15 dias. Devido ao seu alto teor de sílica, a CBC demonstra boa reatividade, sendo viável para substituição parcial do cimento. No entanto, teores elevados aumentam a porosidade e a absorção de água das argamassas, exigindo ajustes na relação água/cimento para controle dessas propriedades.

O estudo de Menegon et al. [38] avaliou os efeitos da substituição parcial do cimento por terra diatomácea residual, proveniente da filtragem de cervejas, nas propriedades mecânicas e térmicas de pastas cimentícias, especialmente sob carbonatação acelerada. Foram produzidas amostras com 10%, 20% e 30% de substituição, além de uma amostra de referência. A TDR passou por secagem a 105 °C e tratamento térmico a 700 °C para eliminação da matéria orgânica, seguido de peneiramento conforme a NBR 7181. Após desmolde, os corpos de prova foram expostos a 10% de CO<sub>2</sub> por 1 hora e curados por 28 dias.

Os resultados mostraram que a carbonatação acelerada aumentou significativamente a resistência à compressão, especialmente nas amostras com 20% e 30% de TDR, superando em até 67,5% aquelas sem exposição ao CO<sub>2</sub>. Ainda assim, todas as formulações com TDR apresentaram resistência inferior à da amostra de referência, indicando maior porosidade e menor formação de produtos de hidratação. Ensaios de consistência (NBR 16606) mostraram que a presença de TDR exige maior quantidade de água, confirmando sua alta porosidade. A calorimetria isotérmica indicou menor liberação de calor nas misturas com maior teor de TDR, o que pode ser benéfico para reduzir fissuração térmica em estruturas. Conclui-se que a TDR apresenta potencial como substituto parcial do cimento, contribuindo para a sustentabilidade e redução de resíduos.

### 2.3 TERRA DIATOMÁCEA

Segundo Goulart et al. [39], a terra diatomácea é um sedimento amorfo de origem silicosa, originado a partir de frústulas ou carapaças de organismos unicelulares vegetais, as algas microscópicas aquáticas, tanto marinha quanto lacustres se destacam entre esses organismos, onde são encontradas nas camadas geológicas da crosta terrestre.

As diatomáceas são minerais leves que apresentam características como baixa massa específica, estrutura leve e coloração variando entre cinza e branco, com partículas de tamanho entre 4 e 500  $\mu\text{m}$ . A composição da terra diatomácea é predominantemente de sílica opalina, embora também possam estar presentes outros elementos em menor proporção, como alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio e potássio. Além disso minerais secundários são frequentemente encontrados, incluindo argilominerais, areias quartzosas, gipsita, mica, calcita, feldspato, carbonatos de cálcio e magnésio, além de algumas impurezas como matéria orgânica. Segundo a ASTM-C168-15 [40] as terras diatomáceas são classificadas na Classe N, onde consideram como pozolanas naturais brutas ou calcinadas e seu uso é permitido como misturas no cimento.

A estrutura da terra diatomácea se caracteriza por pequenos cilindros ocos, que atuam como esponjas, permitindo a absorção de líquidos em quantidade equivalente ao seu próprio peso. Sua elevada área superficial específica, baixa densidade e estrutura porosa, semelhante a um favo de mel, explicam sua ampla aplicação em diversas áreas. Tendo como suas principais utilizações processos de filtração e clarificação da cerveja, o isolamento térmico e acústico, a adsorção de metais pesados e a produção de capacitores cerâmicos [39].

Outro uso para a Terra Diatomácea é na produção de inseticidas de acordo com Lorini et al. [41]. A preparação da terra de diatomáceas para uso comercial é feito por meio da extração, secagem e moagem do material fóssil, resultando em um pó seco, de granulometria fina, a ação da TD em inseticidas ocorre via desidratação dos insetos após o contato.

Segundo Sá [5], dependendo do tratamento industrial ao qual é submetida, que pode incluir trituração, secagem, moagem e calcinação, a diatomite dá origem a diferentes tipos de terras diatomáceas:

- Diatomáceas naturais: caracterizam-se por uma coloração acinzentada, granulometria fina e a possível presença de resíduos de matéria orgânica. Apresentam boa capacidade de clarificação e filtração, porém com baixa velocidade de escoamento.
- Diatomáceas calcinadas: possuem coloração rosada devido à presença de ferro na forma férrica ( $\text{Fe}^{3+}$ ). São obtidas por secagem, moagem e calcinação a temperaturas

entre 850°C e 950°C, resultando em um material isento de matéria orgânica e com baixa permeabilidade.

- Diatomáceas calcinadas com fundente: produzidas pela adição de um fundente, geralmente carbonato de sódio, antes da calcinação. A permeabilidade do material resultante varia conforme a temperatura de calcinação e a proporção do fundente utilizado, sendo sempre superior à das terras diatomáceas rosadas.

As terras de diatomáceas também são utilizadas como filtro para vinhos brutos, de acordo com Campaniço [42], pois são materiais inertes, insolúveis, quimicamente estáveis e altamente porosos. Devido a essas características, são amplamente utilizadas como meio filtrante, pois sua estrutura forma inúmeros canais microscópicos capazes de reter impurezas e permitir a passagem apenas de fluidos purificados.

Este processo de filtração por TD é explicado por Padilha [43], tem como premissa a formação de uma pré-camada horizontal da terra diatomácea, que irá possuir uma espessura de 1,5 mm aproximadamente, esta camada é distribuída sobre bandejas feitas em aço inoxidável ou em materiais sintéticos, que são colocados no interior do tanque, o líquido a ser filtrado é conduzido ao tanque por meio de uma bomba a qual conecta-se com a parte superior do tanque, após o líquido ingressar na bomba o mesmo irá percolar através das bandejas que possui a pré-camada de terra diatomácea, onde ocorre a retenção das matérias orgânicas que não serão utilizadas para a produção deste vinho. Finalizada a filtração, o líquido clarificado é coletado na parte inferior do tanque e direcionado para a próxima etapa do processamento, esse processo é indicado na Figura 2.

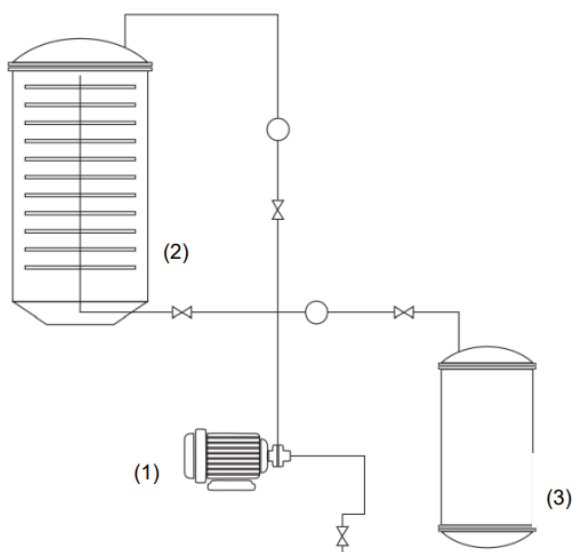


Figura 2 - Processo de filtração com terra diatomácea, [43]

(1) Bomba pneumática; (2) Tanque de Filtração com as bandejas de Terra Diatomácea; (3) Tanque pulmão, que irá receber o vinho filtrado e clarificado.

Ao ser aplicada para filtração e clarificação das cervejas e vinhos, a terra diatomácea deixa de ser útil, tornando-se um resíduo, pois ao ficar saturada com material orgânico ela não é mais útil como um material filtrante [39], tendo que se precaver quanto ao descarte, pois a longa exposição a este material pode original problemas respiratórios [44].

Devido ao seu alto teor de silício e sua morfologia favorável às reações químicas foram desenvolvidos estudos com TD proveniente das filtrações a fim dele se tornar um substituto parcial do cimento Portland, pois sua granulometria refinada e estrutura amorfa acabam por indicar uma alta reatividade, causando menores impactos ambientais associados à destinação de resíduos e à emissão de CO<sub>2</sub> [4]. Pois seu volume como resíduo é aproximadamente três vezes maior em comparação com o material antes da filtração [44].

O estudo de Sousa et al. [45] teve como objetivo caracterizar um material compósito diatomáceo natural, analisando seu comportamento térmico em altas temperaturas. Foram realizados ensaios de ATD, ATG e DTG em atmosfera de ar, com aquecimento de 25 °C a 1150 °C a uma taxa de 10 °C/min. Os resultados revelaram três picos endotérmicos significativos: aos 74,7 °C, relacionados à perda de água fisicamente adsorvida; aos 264,1 °C, atribuídos à desidratação da gibsita e à desorganização estrutural por perda de coordenação de cátions; e aos 470,5 °C, correspondentes à desidroxilação da caulinita, que resulta na formação

de metacaulinita. Esses eventos foram acompanhados por perdas de massa evidenciadas na análise termogravimétrica, confirmando importantes transformações físicas e químicas da terra diatomácea com o aumento da temperatura.

## 2.4 COMPORTAMENTO DE ARGAMASSA EM ALTAS TEMPERATURAS

Argamassa é uma mistura composta por um ou mais ligantes (orgânicos ou inorgânicos), agregados finos, água e por vezes adições ou adjuvantes. Suas propriedades são diretamente influenciadas pelos materiais utilizados e pela época de aplicação, sendo determinantes para sua funcionalidade [46].

Pode-se considerar a argamassa como uma rocha artificial, formada por partículas agregadas por um ligante, que confere forma e rigidez ao conjunto. A coesão entre os componentes ocorre pela pasta do ligante que preenche os vazios entre os agregados (cerca de 25 a 40% do volume total). Assim, a proporção e a homogeneidade da mistura são fundamentais para garantir boa plasticidade no estado fresco e resistência, rigidez e aderência após o endurecimento [46].

Os materiais de construção quando expostos a altas temperaturas podem sofrer grande influência em suas propriedades, sendo que nessas condições podem apresentar características diferentes daquelas conhecidas em temperatura ambiente, tendo degradações perceptíveis de suas propriedades mecânicas, portanto busca-se melhor compreender os materiais nestas situações, pois estes desempenham papel determinante na intensidade e propagação de um incêndio em curso [2].

Cülfik e Özturan [47] investigaram o comportamento de argamassas de alta resistência em temperaturas elevadas. As amostras foram compostas por cimento Portland, areia e adição de grafite, um material refratário, e foram expostas a temperaturas de 300 °C, 600 °C e 900 °C, sem aplicação de carga mecânica durante o aquecimento. Após o resfriamento gradual em uma taxa de 0,4 °C/min, realizaram-se ensaios mecânicos, evidenciando-se reduções significativas nas propriedades das argamassas. A resistência à compressão apresentou queda de aproximadamente 29% a partir de 300 °C e de 65% a partir de 600 °C, tornando-se desprezível após a exposição a 900 °C.

Em relação à resistência à tração na flexão, observou-se redução de 36% a 300 °C e de 87% a 600 °C. Além disso, o módulo de elasticidade estático foi reduzido em cerca de 44% a partir de 300 °C. Os autores atribuem essas perdas de desempenho, principalmente, à

incompatibilidade térmica entre os constituintes da argamassa e à degradação microestrutural da pasta, que favorece o surgimento de microfissuras internas.

Albeer e Hassan [48] analisaram o comportamento de argamassas cimentícias modificadas com adição de 2% de sílica ativa, em temperaturas de 250 °C, 450 °C, 600 °C e 900 °C. As amostras foram comparadas com uma argamassa de referência, e os ensaios de resistência à compressão foram realizados após 28 e 90 dias de cura. Os resultados indicaram que a presença de sílica ativa promoveu ganhos na resistência residual, especialmente após 90 dias, além de reduzir a formação de trincas e a perda de massa até 600 °C.

A análise microestrutural, realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura, revelou uma matriz mais densa e com menor porosidade nas argamassas com sílica ativa. Embora todas as amostras tenham apresentado degradação significativa a 900 °C, as formulações com sílica ativa mantiveram desempenho superior em comparação à argamassa de referência.

Diversos estudos indicam que o comportamento de argamassas expostas a altas temperaturas é significativamente influenciado pelo tipo de arrefecimento aplicado, seja ele acelerado ou gradual.

#### **2.4.1 Diferentes formas de arrefecimento**

A exposição de materiais de construção à ação do fogo, seguida por processos de arrefecimento, seja de gradual ou acelerado pode provocar alterações significativas em suas características físico-químicas. Entre as principais modificações observadas estão mudanças de fase, deterioração na ligação entre os componentes (como a interface agregado/cimento), perda de massa, entre outras. Tais alterações influenciam diretamente as propriedades mecânicas e a resistência química dos materiais, comprometendo seu desempenho estrutural e durabilidade [49].

Em um estudo de Aydin e Baradan [50], investigou-se o efeito de altas temperaturas (300 °C, 600 °C e 900 °C) nas propriedades mecânicas de argamassas à base de cimento contendo pedra-pomes e diferentes teores de cinza volante. Após exposição térmica por 3 horas, os corpos de prova foram resfriados ao ar ou por imersão em água. Os resultados demonstraram que a argamassa com 60% de cinza volante apresentou o melhor desempenho, sem perda de resistência à compressão quando resfriada ao ar, devido à formação de uma zona de transição interfacial reforçada e ligações cerâmicas. Contudo, todas as amostras apresentaram

significativa redução na resistência à tração na flexão, especialmente aquelas expostas ao resfriamento brusco em água.

Yuzer, Akoz e Ozturk [51] destacam em seus estudos a significativa influência do método de resfriamento sobre os resultados dos ensaios realizados em materiais expostos a altas temperaturas. Em suas análises, os autores investigaram dois procedimentos distintos de resfriamento aplicados a corpos de prova de argamassa. O primeiro consistiu em um resfriamento natural ao ar, no qual a temperatura dos corpos de prova foi reduzida gradualmente até atingir as condições ambientais. Já o segundo método envolveu o resfriamento brusco por meio da aplicação direta de jatos de água, simulando as condições extremas de um incêndio real.

Os resultados obtidos evidenciaram diferenças expressivas na resistência mecânica das argamassas. O resfriamento brusco acarretou uma redução de aproximadamente 70% na resistência à compressão, enquanto o resfriamento lento resultou em uma perda de cerca de 40%, ambos referentes à argamassa convencional. Esses dados reforçam a importância do controle das condições térmicas pós-exposição ao fogo na avaliação do desempenho residual dos materiais.

Abdulhussei, Abbas e Frayyeh [52], investiga os efeitos da exposição de argamassas cimentícias a altas temperaturas (até 700 °C) e diferentes métodos de arrefecimento (ar e água) sobre suas propriedades mecânicas. Foram produzidas argamassas com diferentes proporções de substituição da areia por tijolo cerâmico triturado e adição de superplastificante. Após cura por 28 dias, os corpos de prova foram aquecidos e arrefecidos, sendo avaliados quanto à resistência à compressão, à flexão e à densidade. Os resultados mostraram que o uso de tijolo triturado melhora o desempenho das argamassas em altas temperaturas, reduzindo as perdas de resistência, especialmente quando o resfriamento é feito ao ar. Já o resfriamento em água causou maiores danos às propriedades mecânicas. O estudo conclui que o tipo de resfriamento influencia significativamente o comportamento das argamassas condicionadas a altas temperaturas.

Portanto, torna-se fundamental analisar o impacto que o método de resfriamento pode exercer sobre o comportamento da argamassa, uma vez que esse fator influencia diretamente suas propriedades físicas e mecânicas após a exposição a elevadas temperaturas.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental apresenta os materiais utilizados e os ensaios realizados. Foram estabelecidas duas dosagens para estudo: uma com redução de cimento e outra com redução de areia. A definição do traço de referência foi baseada na norma EN 196-1 [53], a qual especifica os métodos de ensaio de cimentos para a determinação das resistências mecânicas. No caso deste trabalho seguiremos um traço pré-estabelecido na dissertação de mestrado de Zolin [6], onde foi estudado quais proporções teriam menor impacto nas propriedades mecânicas das argamassas com a substituição da areia e do cimento por TDR, onde obteve-se uma substituição de 15% do cimento por TDR, o qual a nomenclatura passa a ser RC, significando redução de cimento, e a substituição de 5% da areia por TD, sendo sua nomenclatura RA, o qual significa redução de areia. Os traços com redução de cimento (RC), redução de areia (RA) e os de referência (REF) estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Traço das argamassas [6]

Quantidade de material utilizado ensaio compressão/flexão - Conjunto com 3 provetes				
Amostra	Cimento [g]	Areia [g]	Terra Diatômácea [g]	Água [g]
REF	450	1350	-	275
RC	382,5	1350	67,5	275
RA	450	1282,5	67,5	275

Nota-se que a quantidade de água utilizada foi a mesma para todas as amostras, porém para isso ocorrer teve-se que aumentar a quantidade padrão de água estipulada pela EN 196-1 [53], onde define um traço de 1:3:0,5 (uma parte de cimento, três partes de areia e meia parte de água), como mostra a Tabela 2, para um novo traço de 1:3:0,61, pois assim a argamassa possuiria uma maior trabalhabilidade, esse novo valor foi encontrado por Zolin [6] o qual realizou o ensaio de fluidez na argamassa de referência com o novo traço e obteve uma fluidez de 113%, o que está dentro dos limites exigidos pela norma ASTM C 109/C 109M – 99 [54], o qual define um limite de  $110 \pm 5\%$ .

Tabela 2 - Traço EN 196-1 [53]

Amostra	Cimento [g]	Areia [g]	Água [g]
REF	450	1350	225

Para avaliar os efeitos de altas temperaturas em argamassas com incorporação de TDR as amostras foram expostas a temperaturas de 250 °C e 500 °C, seguindo de acordo com a ISO834-1 [55], as temperaturas selecionadas para esta pesquisa seguiu a pesquisa de Miscovicz [7], onde foi-se estudado a influência de altas temperaturas em betões com terra diatomácea residual incorporada, a taxa de aquecimento definida foi de 2 °C/min, , em sua pesquisa notou-se que com taxas de aquecimento maiores acontecia um fenômeno denominado *spalling*. Phant et al. [56] explicam que, sob exposição ao calor, o elemento está sujeito a um elevado gradiente de temperatura entre a face aquecida e seu interior ainda resfriado, o que pode provocar o deslocamento do material devido ao surgimento de tensões termomecânicas e termo-hidráulicas.

Os ensaios de resistência à flexão e compressão seguiu a EN 1015-11 [57], o ensaio de aderência foi realizado em conformidade com a BS EN 1015-12 [58]. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles das amostras de referência, permitindo uma análise do desempenho das misturas modificadas em relação à composição convencional. Foi montado um diagrama mostrado na Figura 3 para melhor visualização das etapas a serem seguidas.

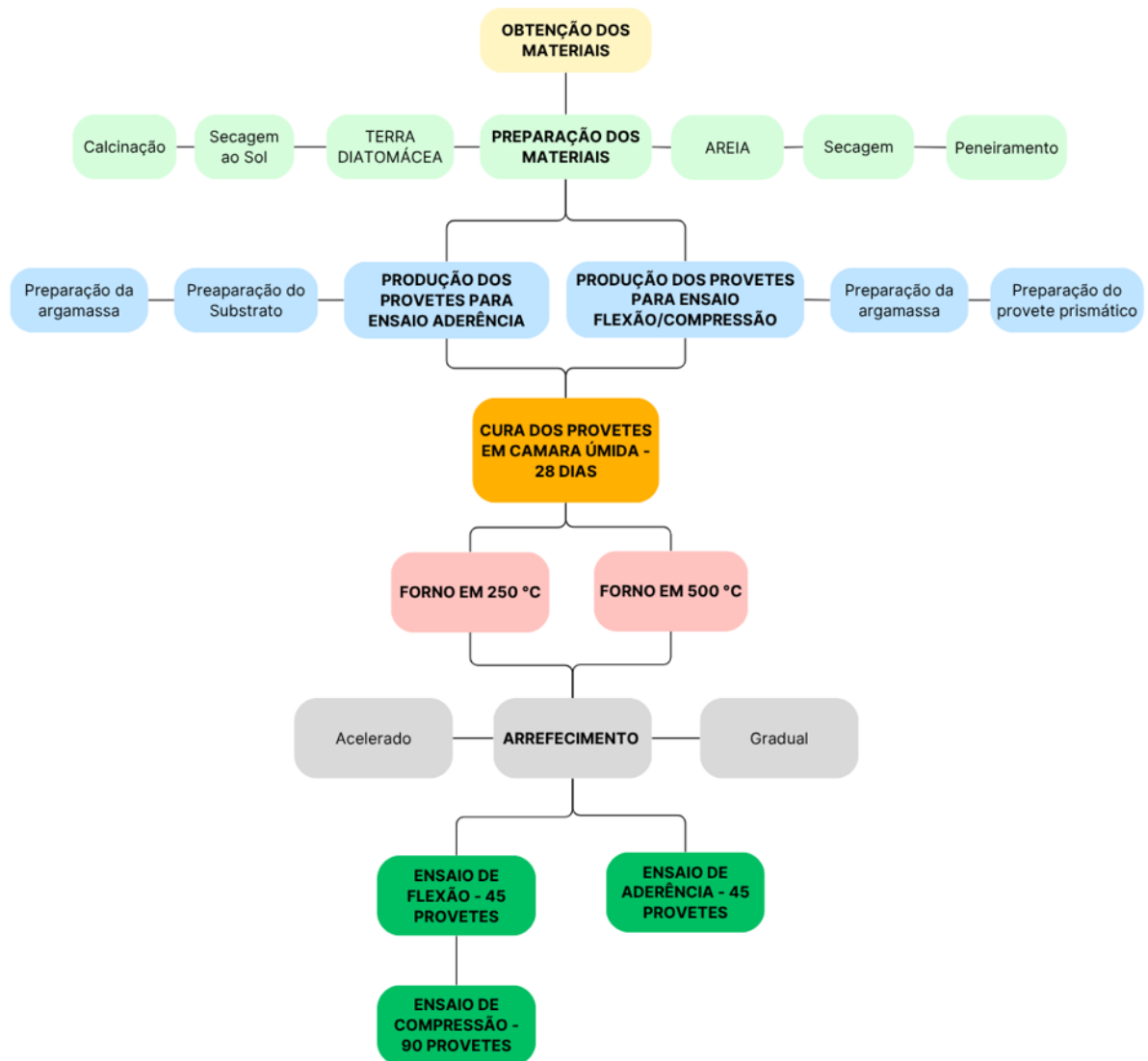


Figura 3 - Diagrama de definição do estudo

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O cimento utilizado na produção dos corpos de prova foi o cimento Portland com adição de calcário, classificado como CEM II/B-L 32,5N, Figura 4(a). A areia empregada foi a areia padrão CEN, cuja granulometria atende às especificações do Quadro 3 da norma NP EN 196-1 [53]. Antes de seu uso, essa areia foi seca em estufa a 105 °C por 24 horas, Figura 4(b), e posteriormente peneirada utilizando peneira com malha #2, conforme as orientações da norma EN 1015-1 [59], a qual estabelece que o tamanho máximo dos grãos do agregado deve ser inferior a 2 mm.



Figura 4 – (a) Cimento utilizado; (b) Secagem da areia em estufa

A terra diatomácea residual (TDR) utilizada na preparação das argamassas foi fornecida pela empresa Caves Campelo S.A., após sua utilização no processo de filtragem de vinho. Inicialmente, a TDR é recebida ainda saturada com vinho, o que exige um tratamento prévio para adequá-la às condições físicas e químicas da terra diatomácea comercial. Para isso, o material foi distribuído em tabuleiros metálicos e submetido à secagem ao ar por um período de 7 dias mostrado na Figura 5.



Figura 5 - TDR secando ao ar

Após o período de secagem de 7 dias, dá-se início à etapa de calcinação da TDR. O material é distribuído em travessas metálicas, com aproximadamente 500 gramas cada, Figura

6(a), dispostas de maneira a garantir o máximo espalhamento Figura 6(b). O aquecimento é realizado de forma gradual até atingir a temperatura de 700 °C, o que ocorre em cerca de 45 minutos. Ao atingir essa temperatura, o material é mantido no forno por 2 horas, com o objetivo de promover a completa eliminação da matéria orgânica presente.

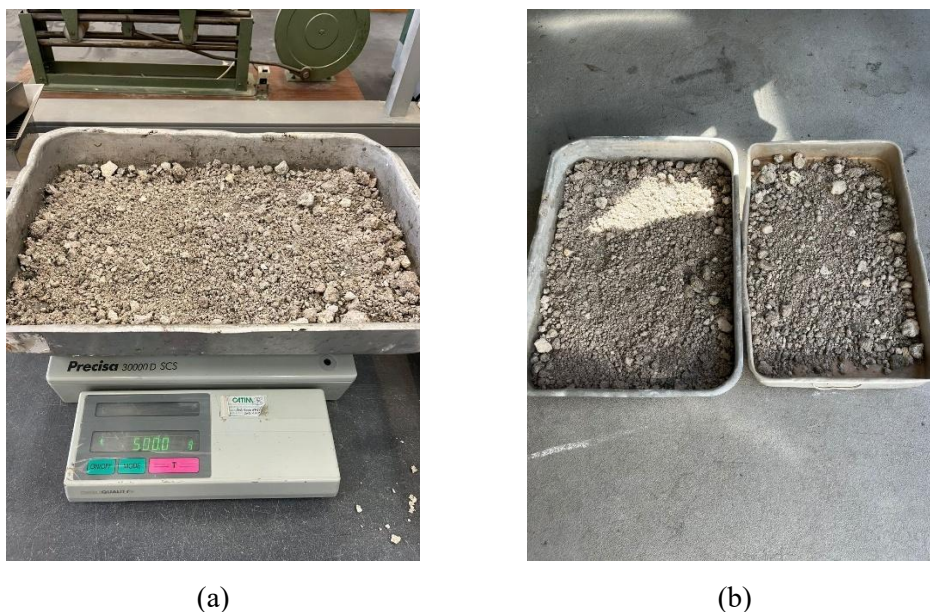


Figura 6 - (a) 500g de TDR; (b) Travessas com TDR antes de ir ao forno

A diferença de coloração entre as amostras está relacionada ao tipo de vinho filtrado durante o uso do meio filtrante. As amostras de coloração mais clara foram utilizadas na filtração de vinho verde, enquanto as de tonalidade rosada foram empregadas na filtração de vinho tinto. Apesar das pequenas variações químicas entre essas TDRs, tais diferenças não influenciam significativamente nas propriedades das pastas de argamassa após o processo de calcinação. Após essa etapa, todas as amostras adquirem uma coloração amarelada, conforme ilustrado na Figura 7.



Figura 7 - TDR pronta para utilização

### 3.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Após a definição dos traços inicia-se a preparação dos provetes e das amassaduras que serão expostas à altas temperaturas a fim de verificar suas resistências mecânicas nessa situação adversa. Vale ressaltar que o tipo de arrefecimento também influencia a resistência mecânica [50], [51], [52].

As argamassas serão sujeitas a exposições térmicas controladas em forno a 250 °C e 500 °C, demonstrado na Figura 8. A taxa de aquecimento adotada será de 2 °C por minuto, conforme previamente estabelecido. Após atingirem a temperatura-alvo, as amostras permanecerão no interior do forno por um período adicional de 2 horas, a fim de verificar a degradação que irão obter. No fim do ensaio os provetes serão sujeitos a dois métodos de arrefecimento: gradual e acelerado.

O arrefecimento gradual consiste em, ao término da exposição da argamassa à alta temperatura, mantê-la por 30 minutos no interior do forno desligado, com a porta aberta, permitindo uma redução da temperatura. Decorrido esse tempo, o recipiente contendo as argamassas é retirado do forno e mantido em ambiente de laboratório, em temperatura ambiente, por um período de 24 horas, antes da realização dos ensaios.

O arrefecimento rápido ocorre após a exposição à alta temperatura, quando os corpos de prova são inicialmente deixados por 30 minutos no forno desligado, com a porta aberta, para arrefecer. Em seguida, são imersos em um balde com água por 2 horas. Após esse período, permanecem em laboratório, à temperatura ambiente, por 24 horas antes de serem ensaiados.

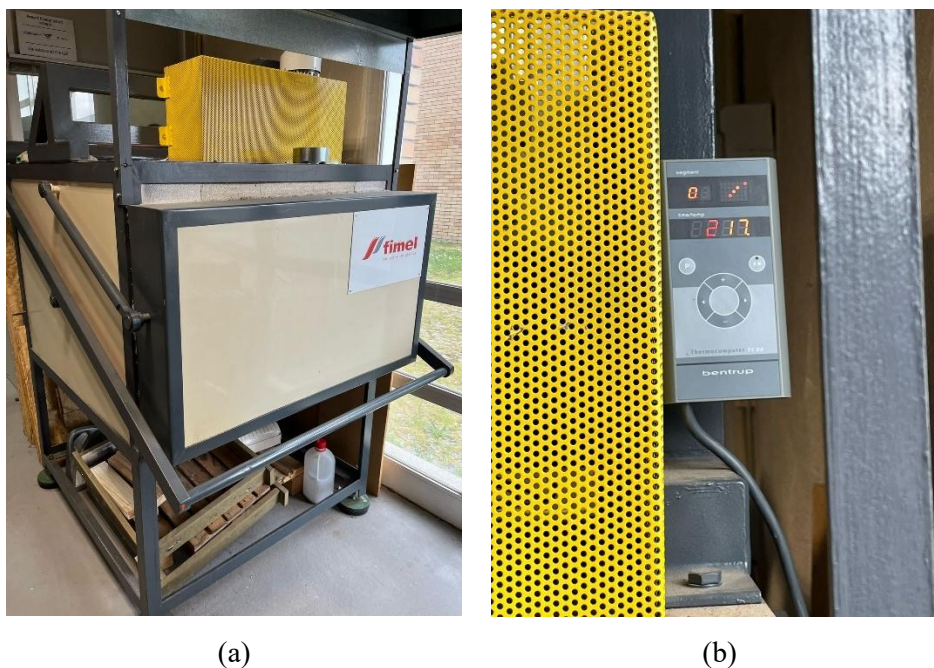


Figura 8 – (a) Forno utilizado; (b) Leitor de temperatura do forno

### 3.2.1 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão é fundamental para avaliar a ductilidade do material, sua resistência à força cisalhante, o módulo de elasticidade e a resistência à flexão. Essas propriedades são essenciais para o controle de qualidade do material e para a verificação de seu desempenho mecânico [60]. A avaliação da resistência a flexão pela norma europeia EN 1015-11 [57] é realizada por meio de um ensaio em que um carregamento em três pontos é aplicado até a ruptura dos provetes.

#### 3.2.1.1 Preparação das argamassas

As argamassas para este ensaio são preparadas de acordo com EN 1015-2 [61] e a EN 196-1 [53], inicialmente as quantidades previamente determinadas dos constituintes sólidos do traço da argamassa foram separados e pesados em uma balança digital para serem colocadas no recipiente apropriado, Figura 9.



(a)



(b)

Figura 9 - (a) Balança digital utilizada; (b) Constituintes da argamassa

Em seguida, o recipiente foi acoplado à misturadora da Figura 10, adicionou-se a água do traço e a mistura ocorreu por 90 segundos. Após breve homogeneização manual do material aderido às paredes do recipiente, a mistura foi retomada em alta velocidade por mais 60 segundos, finalizando o preparo da argamassa.



Figura 10 - Misturador no processo de amassadura

O aspecto visual das amostras REF, RC e RA após a mistura é apresentado na Figura 11. Observa-se que as amostras RC e RA apresentam aparência mais seca em comparação à REF.

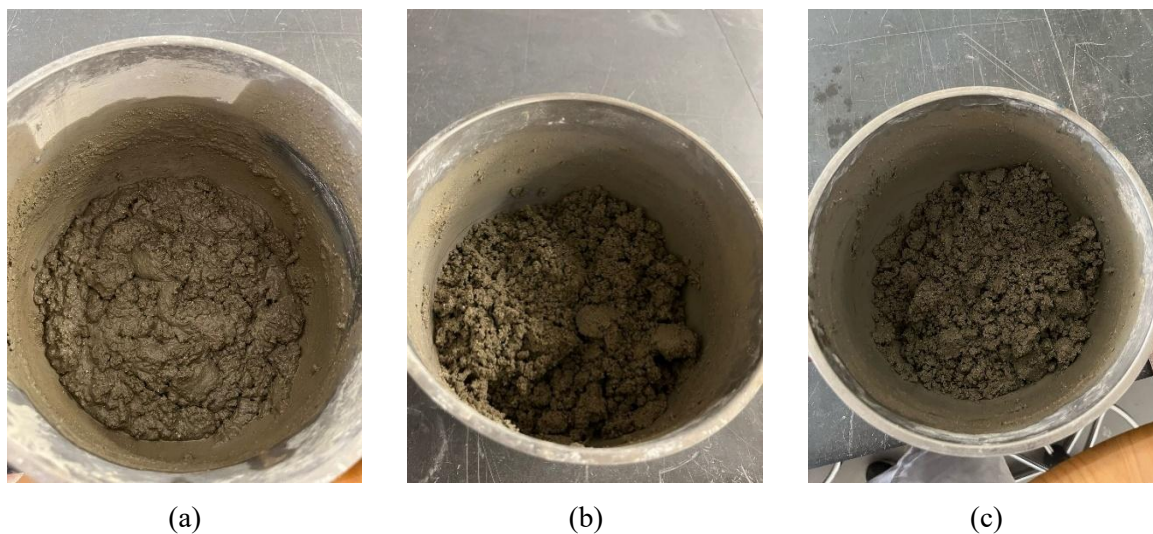


Figura 11 - (a) Amostra REF; (b) Amostra RC; (c) Amostra RA

### 3.2.1.2 Provetes

A preparação dos provetes deste ensaio seguiu a EN 196-1 [53], onde define-se provetes prismáticos nas proporções de 160 mm × 40 mm × 40 mm (comprimento × largura × altura), a argamassa é colocada nestes provetes quando o mesmo se encontra fixado na mesa do compactador e é realizada a compactação em 2 etapas, a primeira etapa coloca-se argamassa até a metade da altura do molde e realiza as 60 pancadas, Figura 12(a), a segunda etapa coloca a argamassa até o topo do molde e raspa com uma espátula a fim de garantir uniformidade na altura e realiza as últimas 60 pancadas para compactação Figura 12(b).

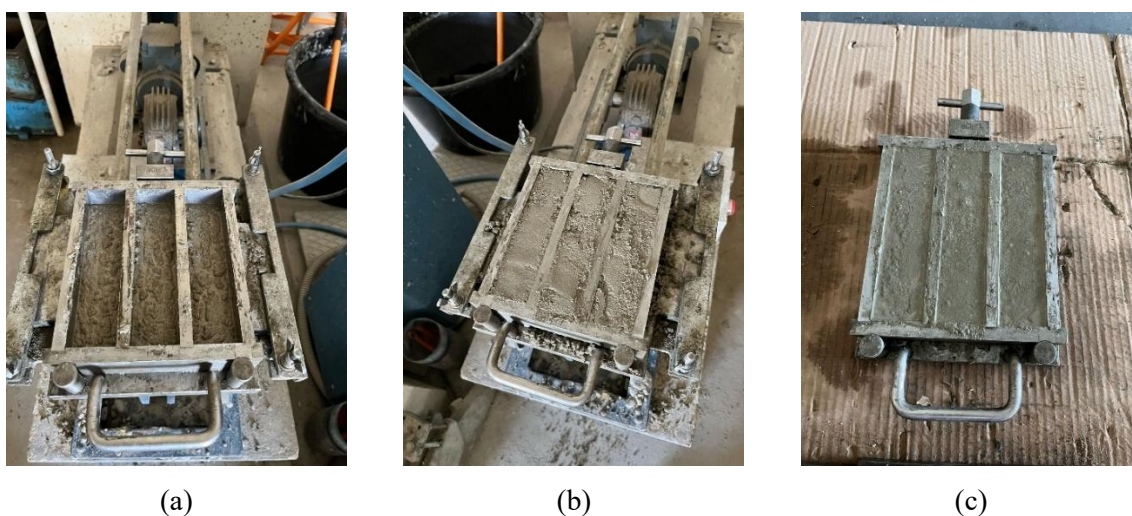


Figura 12 - (a) Primeira etapa da moldagem do provete; (b) Segunda etapa da moldagem do provete; (c) Moldagem concluída.

Os provetes foram deixados 24 horas dentro do molde em temperatura ambiente conforme ilustrado na Figura 13(a), sendo posteriormente desmoldados, como pode ser observado na Figura 13(b).

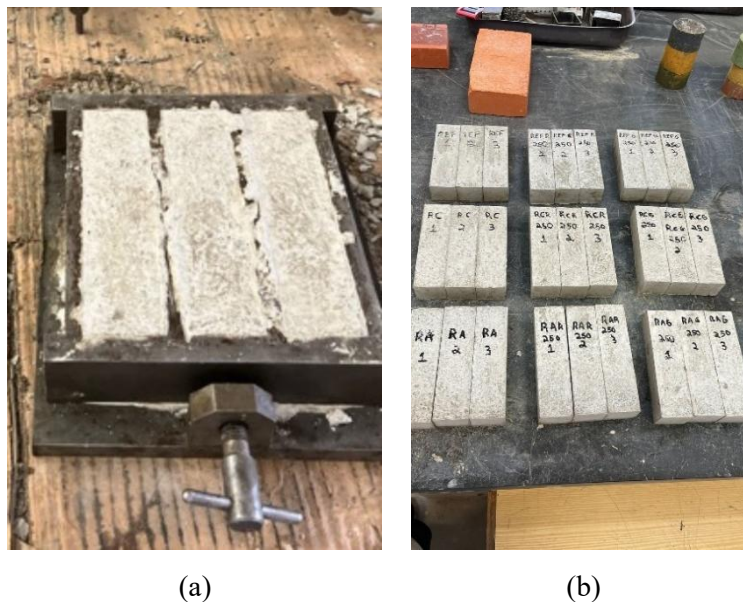


Figura 13 - (a) Moldagem seca; (b) Provetes desmoldados e nomeados

Após a desmoldagem os provetes foram encaminhados para a câmara úmida, Figura 14, em temperatura controlada de 20 °C e umidade relativa do ar de 100 % durante 28 dias para realização da cura.



Figura 14 - Cura dos provetes

No total foram produzidos 3 provetes para cada amostra, como mostra o diagrama da Figura 15, podendo assim obter uma média no valor destes.

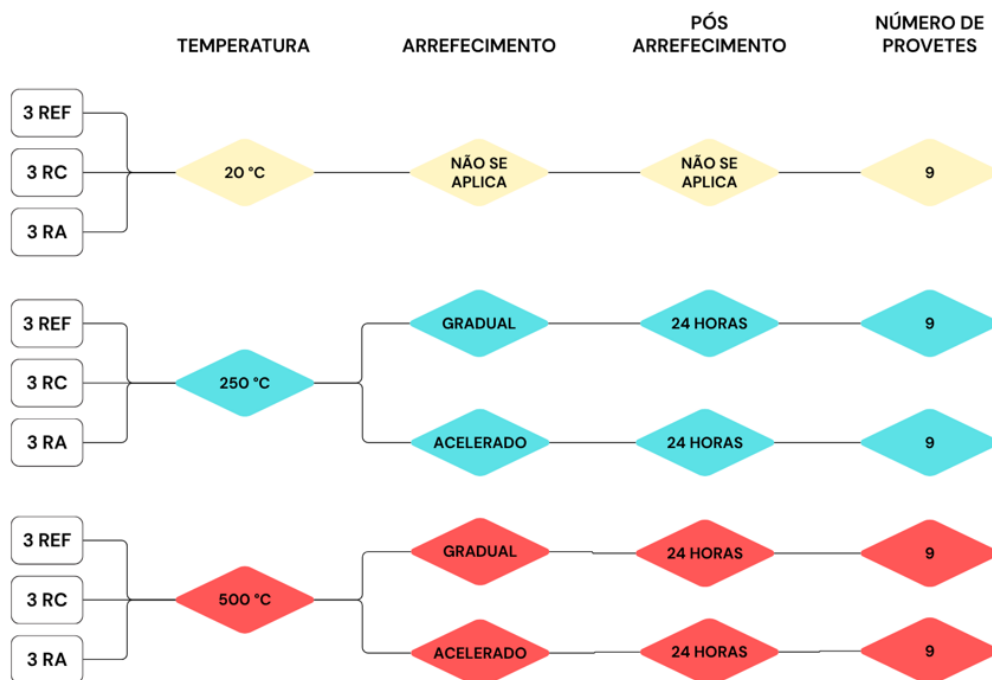


Figura 15 - Diagrama de provetes realizados para o ensaio de flexão/compressão

### 3.2.1.3 Exposição a altas temperaturas

Os provetes foram aquecidos até a temperatura de 250 °C, conforme a Figura 16 demonstra, com uma taxa de aquecimento de 2 °C por minuto, atingindo esse valor ao final de 115 minutos. Após alcançarem os 250 °C, permaneceram no forno por mais 120 minutos



Figura 16 – (a) Provetes antes da queima; (b) Provetes depois da queima

Ao fim do ensaio à altas temperaturas o forno é desligado e aberto durante 30 minutos, após esse tempo os provetes foram separados de acordo com seu tipo de arrefecimento, gradual ou acelerado, a Figura 17 demonstra os métodos de arrefecimento.

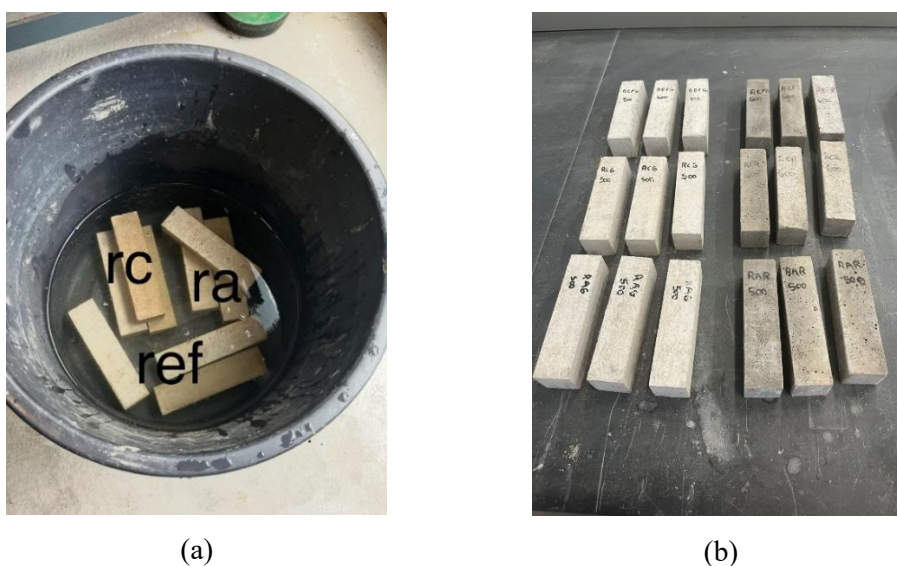


Figura 17 - (a) Arrefecimento acelerado; (b) Amostras no arrefecimento gradual e após 2 horas de arrefecimento acelerado.

Seguiu-se a mesma metodologia de exposição a altas temperaturas para os provetes destinados a 500 °C, totalizando 240 minutos até alcançar a temperatura-alvo, permanecendo no forno por mais 120 minutos após atingi-la. Em seguida, os corpos de prova foram separados conforme o tipo de arrefecimento.

Após 24 horas de arrefecimento, foi possível identificar fissuras nos provetes REF\_G 500, conforme evidenciado na Figura 18.



Figura 18 - Provette fissurado

#### 3.2.1.4 Ensaio

Para o ensaio de flexão, Figura 19, utilizou-se os provetes confeccionados e já aquecidos no forno, o método utilizado seguiu a EN 1015-11 [57], com o equipamento seguindo as diretrizes da EN 196-1 [53], utilizando o método de carga central a meio do vão,.



(a)



(b)

Figura 19 - (a) Equipamento utilizado; (b) Ensaio em procedimento

### 3.2.2 Ensaio de Compressão

De acordo com a norma europeia EN 1015-11 [57] a resistência à compressão foi determinada utilizando as metades obtidas após os ensaios de flexão, Figura 20.



Figura 20 - Provete utilizada no ensaio de compressão

Os ensaios de compressão foram realizados mediante a aplicação de uma carga uniaxial crescente até a ruptura dos corpos de prova, utilizando uma prensa equipada com um dispositivo semelhante ao descrito na norma EN 196-1 [53]. A carga foi aplicada sobre uma seção de 40 mm × 40 mm, Figura 21.



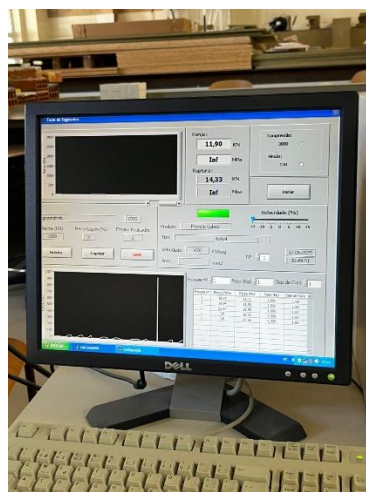
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 21 - (a) Equipamento utilizado; (b) Equipamento de fixação do provete; (c) Ensaio em andamento; (d) Monitoramento do ensaio

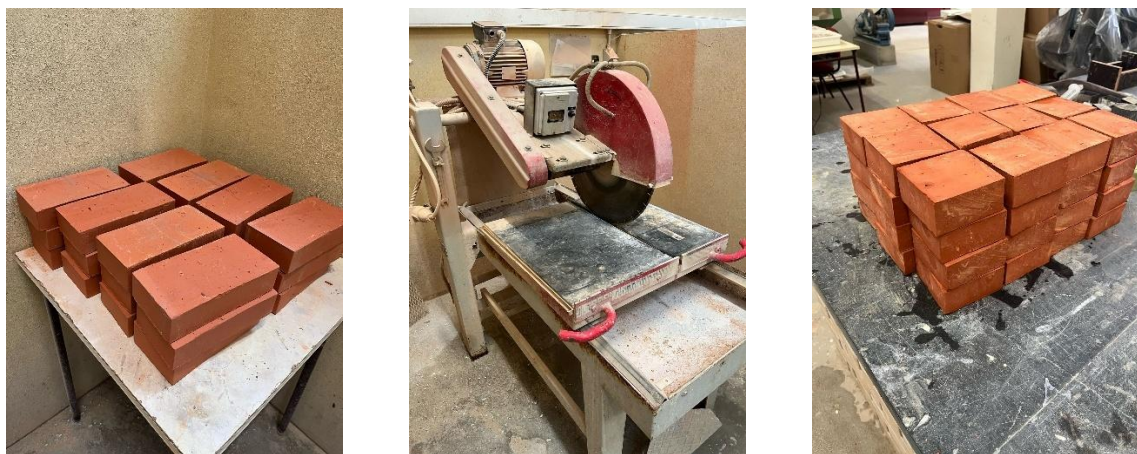
### 3.2.3 Ensaio de Aderência

De acordo com Vaz e Carasek [62], a aderência corresponde à capacidade do revestimento em resistir às tensões que atuam na interface com o substrato, sendo, portanto, uma propriedade do sistema de revestimento como um todo e não exclusivamente da argamassa. Conforme definido pela norma europeia EN 1015-12 [58], a resistência de aderência à tração é caracterizada como a maior tensão suportada quando se aplica uma carga direta e perpendicular sobre o revestimento de argamassa fixado ao substrato.

#### 3.2.3.1 Substrato

A norma BS EN1015-12 [58] retrata os tipos de substratos que se podem utilizar para o ensaio de aderência. No presente trabalho foi escolhido tijolo de barro maciço como substrato para os ensaios realizados, sendo que antes da aplicação da camada de argamassa o substrato deve estar em condição seco ao ar. Inicialmente os blocos chegaram em dimensão de 22 cm × 11 cm × 5 cm, Figura 22(a) e foram cortados ao meio utilizando uma serra circular para atingirem os tamanhos de 11 cm × 11 cm × 5 cm, visto na Figura 22(c), após o processo de corte estes foram lavados em água corrente a fim de retirar o excesso de poeira causado pela

máquina e deixadas sobre o tabuleiro do laboratório para secagem e sua futura utilização, cada substrato seria para realização de um ensaio de *pull-off*.



(a)

(b)

(c)

Figura 22 - (a) Substrato inteiro; (b) Serra circular utilizada; (c) Substrato utilizado

### 3.2.3.2 Aplicação da Argamassa

A argamassa, em seu estado fresco, deve ser aplicada sobre o substrato, respeitando as recomendações do fabricante e considerando a finalidade específica de uso. A aplicação pode ocorrer em superfícies horizontais ou verticais. Na ausência de especificações distintas, a espessura da camada de argamassa deve ser de  $(10 \pm 1)$  mm [58].

A argamassa utilizada neste ensaio seguiu o mesmo traço de 1:3:0,61 das argamassas anteriores relatada por Zolin [6] e foi colocado em uma quantidade de 5 provetes no misturador como demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 - Material utilizado para 5 provetes do ensaio de aderência

Amostra	Cimento [g]	Areia [g]	Terra Diatomácea [g]	Água [g]
REF	443,12	1329,35	0	270,79
RC	376,65	1329,35	66,47	270,79
RA	443,12	1262,88	66,47	270,79

Portanto a argamassa foi aplicada em uma superfície horizontal, observado na Figura 23, em uma espessura de  $10 \pm 1\text{mm}$ .



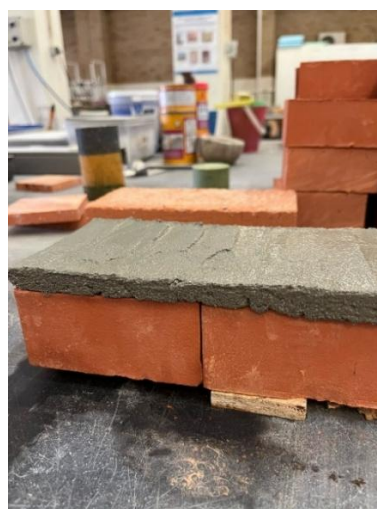
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 23 - (a) Molde para aplicação da argamassa no substrato; (b) Superfície do substrato molhada; (c) Argamassa aplicada e arrasada; (d) Altura da camada de argamassa

### 3.2.3.3 Cura da argamassa

Seguiu-se a norma BS EN 1015-12 [58] realizando-se a cura das amostras em câmara úmida conforme a Figura 24 por 28 dias. Em seguida, foram expostas ao forno e submetidas

aos ensaios de aderência para avaliação da resistência à tração perpendicular ao plano horizontal.



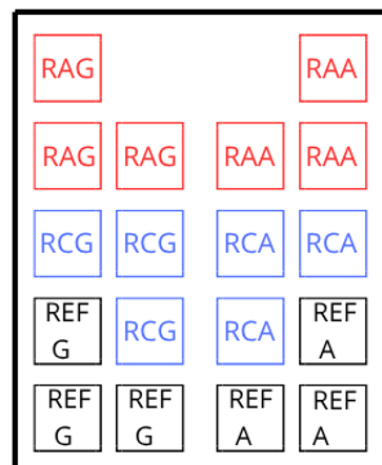
Figura 24 - Cura dos provetes do ensaio de aderência

#### 3.2.3.4 Exposição a altas temperaturas

Os provetes serão expostos a alta temperatura conforme a metodologia descrita no item 3.2.1.3, com a única alteração na forma de distribuição dentro do forno, conforme ilustrado na Figura 25.



(a)



(b)

Figura 25 - (a) Provetes no forno; (b) Disposição dos provetes

Ao término da exposição a altas temperaturas, serão adotadas duas formas de arrefecimento, seguindo a mesma metodologia do item 3.2.1.3, conforme demonstrado na Figura 26.



(a)



(b)

Figura 26 - (a) Arrefecimento gradual provetes aderência; (b) Arrefecimento acelerado provetes aderência

#### 3.2.3.5 Ensaio

De acordo com item 7.3.3 da norma BS EN 1015-12 [58], após a exposição dos corpos de prova a altas temperaturas e seu subsequente arrefecimento, procedeu-se à perfuração deles utilizando uma broca serra de furo com diâmetro interno igual a 50 mm, Figura 27(a). A profundidade de corte adotada foi de 12 mm, com o objetivo de atravessar toda a camada de argamassa e atingir 2 mm do substrato subjacente visto na Figura 27(b).

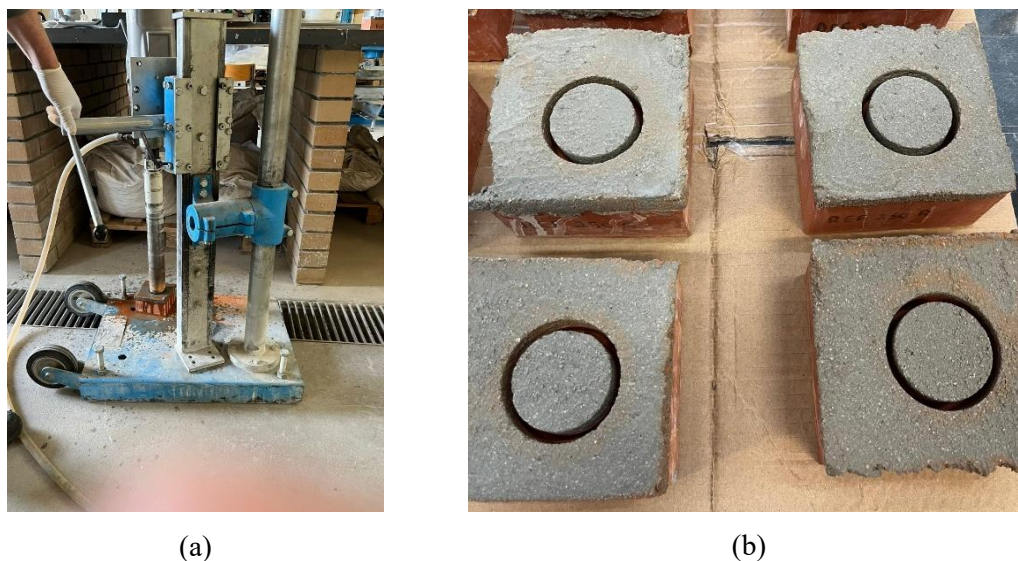


Figura 27 - (a) Furo dos provetes; (b) Provetes cortados

Após a realização dos cortes, os corpos de prova foram lavados em água corrente com o objetivo de remover o excesso de poeira. As cabeças de tração também foram cuidadosamente limpas, a fim de evitar qualquer comprometimento nos resultados do ensaio, Figura 28.



Figura 28 - Provetes e cabeças de tração limpas

A colagem das cabeças de tração nos provetes foi realizada no dia seguinte ao corte, a fim de permitir a secagem das amostras. Para esse procedimento, utilizou-se um adesivo à base de resina epóxi, conforme as recomendações da norma BS EN 1015-12 [58] e as instruções do fabricante presentes no rótulo, Figura 29.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 29 – (a) Resina utilizada; (b) Mistura da resina; (c) Aplicação da resina no provete; (d) Cabeças de tração coladas.

Após a colagem, os provetes permaneceram em temperatura ambiente por um período de 7 dias, com a finalidade de assegurar a secagem completa do adesivo. Decorrido esse tempo, foi realizado o ensaio de aderência à tração, denominado como “*pull-off*”, no qual se aplica uma carga de tração perpendicular à superfície da argamassa por meio das cabeças de tração de acordo com a Figura 30. A força foi aplicada com uma taxa de deslocamento de 1 mm/min até a ocorrência da ruptura.



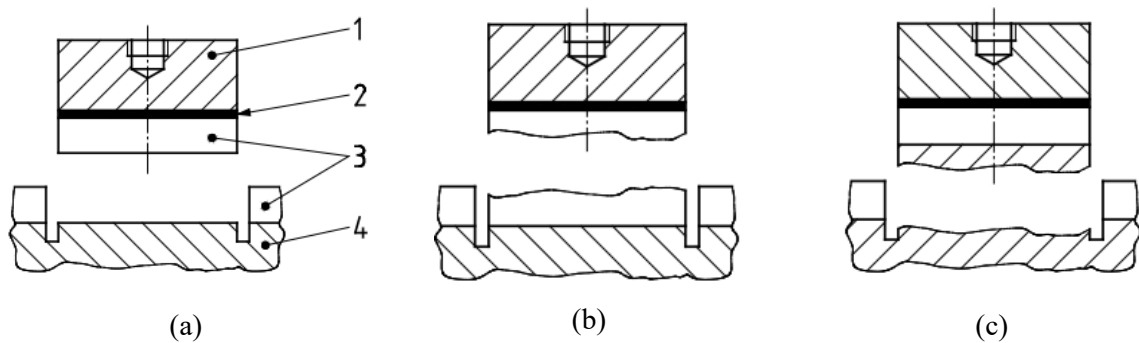
(a) (b)  
Figura 30 - (a) Equipamento utilizado; (b) Provete no ensaio

Conforme a norma BS EN 1015-12 [58], três padrões de ruptura podem ser observados durante o ensaio de aderência à tração, sendo classificados da seguinte forma:

Padrão a – Fratura por adesão: ocorre quando a ruptura se dá na interface entre a argamassa e o substrato.

Padrão b – Fratura por coesão na argamassa: a ruptura ocorre na própria argamassa. A resistência adesiva é superior ao valor obtido no ensaio.

Padrão c – Fratura por coesão no substrato: a ruptura ocorre dentro do substrato. A resistência adesiva é superior ao valor obtido no ensaio.



(a) (b) (c)  
Figura 31 - (a) Padrão de fratura a; (b) Padrão de fratura b; (c) Padrão de fratura c. 1 - Cabeça de tração; 2 - Camada adesiva; 3 - Argamassa; 4 - Substrato [58].

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados com argamassas contendo Terra Diatomácea Residual (TDR) como material substituinte parcial. O principal objetivo é avaliar o impacto da substituição de parte do cimento (RC) e da areia (RA) por TDR nas propriedades mecânicas das argamassas, como resistência à flexão, compressão e aderência à tração, após a exposição a diferentes condições térmicas.

As amostras foram submetidas a temperaturas de 20 °C (condição de referência), 250 °C e 500 °C, seguidas por dois métodos distintos de arrefecimento: gradual e acelerado. Essa abordagem permitiu observar como a presença da TDR influencia o desempenho das argamassas em situações de exposição térmica severa, simulando possíveis cenários de incêndio ou ambientes de altas temperaturas.

A seguir, os resultados obtidos são apresentados e discutidos de forma comparativa, com destaque para as diferenças de comportamento entre as misturas modificadas e a argamassa de referência em cada condição analisada.

### 4.1 RESISTÊNCIA A FLEXÃO

Os resultados de resistência à flexão apresentados ao longo deste capítulo foram obtidos por meio dos ensaios experimentais, nos quais se registrou a carga crítica de ruptura em quilonewtons (kN). Esses valores foram então convertidos para tensão, expresso em megapascal (MPa) por meio da equação 1, considerando a geometria dos provetes.

$$Rf = 1,5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (1)$$

Em que:

$Rf$  – Resistência à flexão (MPa);

$F$  – Carga de ruptura (N);

$l$  – Distância entre apoios (mm);

$b, d$  – Altura e largura da base do provete (mm).

A partir das tensões calculadas para cada um dos três provetes por condição, foi realizada a média, cujos valores finais são os que compõem as tabelas e análises descritas neste capítulo.

#### 4.1.1 Temperatura de 20 °C

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à flexão em 20 °C.

Tabela 4 - Valores médios de resistência à flexão das argamassas a temperatura ambiente (20 °C)

Provete	Temperatura (°C)	Arrefecimento	Tensão (MPa)
REF	20	-	3,09
RC	20	-	3,95
RA	20	-	4,69

A argamassa de referência (REF) teve resistência média de 3,09 MPa. A formulação RC, com 15% de substituição do cimento por TDR, mostrou leve aumento, com média de 3,94 MPa. Já a formulação RA, com 5% de substituição da areia por TDR, obteve os melhores resultados, com média de 4,69 MPa.

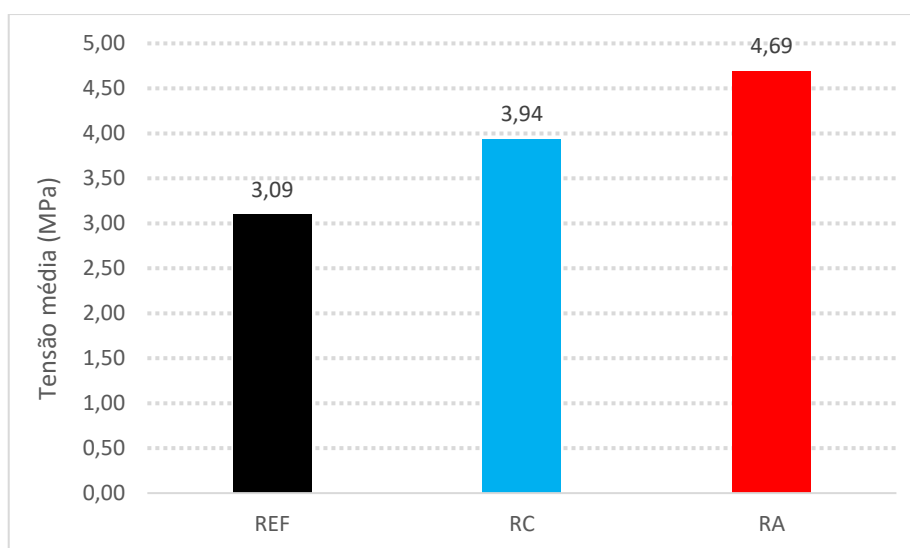


Figura 32 - Gráfico de resistência média à flexão das amostras a 20 °C

#### 4.1.2 Temperatura de 250 °C

A Tabela 5 apresenta os resultados da resistência à flexão das argamassas expostas à temperatura de 250 °C, considerando dois tipos de arrefecimento: gradual (G) e acelerado (A).

Tabela 5 - Valores médios de resistência à flexão das argamassas a 250 °C

Provete	Temperatura (°C)	Arrefecimento	Tensão (MPa)
REF_G 250	250	Gradual	3,75
RC_G 250	250	Gradual	3,38
RA_G 250	250	Gradual	4,03
REF_A 250	250	Acelerado	4,41
RC_A 250	250	Acelerado	3,97
RA_A 250	250	Acelerado	3,94

Observa-se que a argamassa de referência com arrefecimento gradual (REF\_G 250) apresentou resistência de 3,75 MPa, enquanto a mesma formulação com arrefecimento acelerado (REF\_A 250) obteve o maior valor entre todas, com 4,41 MPa. Isso indica que o arrefecimento acelerado pode ter contribuído para o aumento da resistência nesse caso.

Na formulação RC a amostra com arrefecimento gradual (RC\_G 250) apresentou o menor desempenho do conjunto (3,38 MPa), enquanto a versão com arrefecimento acelerado (RC\_A 250) obteve 3,97 MPa, evidenciando melhora com o resfriamento rápido.

Por fim, a formulação RA manteve bons resultados em ambos os tipos de arrefecimento. A amostra RA\_G 250 apresentou 4,03 MPa e a RA\_R 250, 3,94 MPa, com desempenho levemente superior no resfriamento gradual.

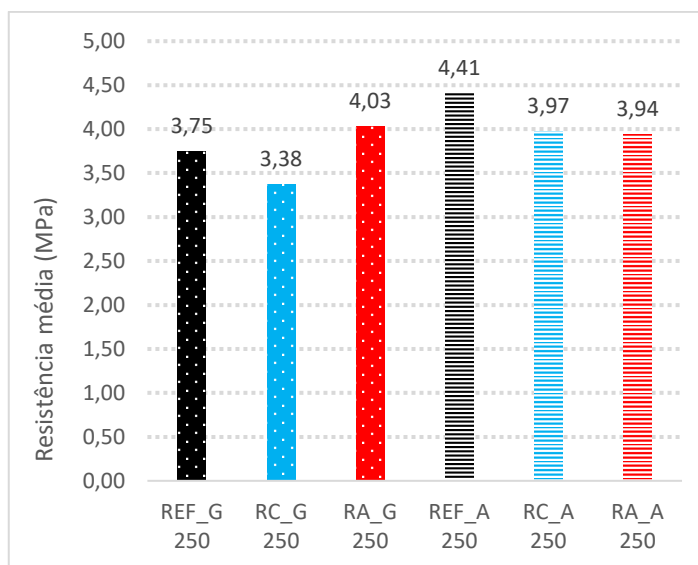


Figura 33 - Gráfico de resistência média à flexão das amostras após exposição a 250 °C

#### 4.1.3 Temperatura de 500 °C

A Tabela 6 apresenta os resultados da resistência à flexão das argamassas após exposição a temperatura de 500 °C.

Tabela 6 - Valores médios de resistência à flexão das argamassas a 500 °C

Provete	Temperatura (°C)	Arrefecimento	Tensão (MPa)
REF_G 500	500	Gradual	0,94
RC_G 500	500	Gradual	1,50
RA_G 500	500	Gradual	1,88
REF_A 500	500	Acelerado	2,72
RC_A 500	500	Acelerado	2,44
RA_A 500	500	Acelerado	2,63

Observa-se que a elevação da temperatura reduziu significativamente a resistência mecânica das formulações, especialmente naquelas submetidas ao arrefecimento gradual.

A amostra de referência submetida ao arrefecimento gradual (REF\_G 500) apresentou a menor resistência média (0,94 MPa), valor consideravelmente inferior aos das demais

formulações. Contudo, é importante destacar que essa amostra apresentou fissuração visível após as 24 horas de arrefecimento como visto na Figura 18, o que pode ter comprometido a integridade estrutural do provete e influenciado negativamente o resultado obtido.

Entre as formulações com incorporação de TDR e arrefecimento gradual, a amostra com substituição parcial da areia (RA\_G 500) apresentou a maior resistência média, atingindo 1,88 MPa, seguida pela formulação com substituição parcial do cimento (RC\_G 500), com 1,50 MPa. Ainda assim, os valores permanecem inferiores aos das amostras submetidas ao arrefecimento acelerado.

No regime de arrefecimento acelerado, os resultados foram consistentemente superiores. A amostra de referência (REF\_A 500) atingiu 2,72 MPa, enquanto as formulações com TDR apresentaram valores de 2,63 MPa (RA\_A 500) e 2,44 MPa (RC\_A 500). Em comparação às suas respectivas versões com arrefecimento gradual, os ganhos foram significativos: cerca de 75% para a formulação RA\_A 500 e 63% para RC\_A 500. Tais resultados sugerem que o arrefecimento acelerado foi mais eficiente em preservar a integridade da matriz cimentícia após o choque térmico.

Além disso, observa-se que a formulação com substituição da areia por TDR (RA\_A 500) obteve desempenho mecânico próximo ao da amostra de referência (REF\_A 500), mesmo sob condições térmicas severas, o que reforça o potencial técnico da TDR como material alternativo sustentável em composições de argamassa expostas a altas temperaturas.

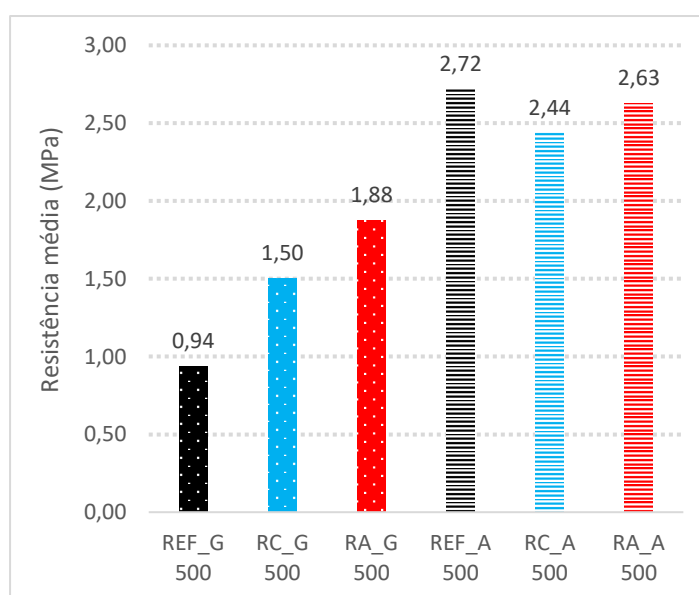


Figura 34 - Gráfico de resistência média à flexão das amostras após exposição a 500 °C

#### 4.1.4 Análise comparativa de resistência à flexão

A Figura 35 representa graficamente os valores médios de tensão de ruptura à flexão, em MPa, das diferentes formulações analisadas (REF, RC e RA) submetidas a temperaturas de 20 °C, 250 °C e 500 °C, considerando dois tipos de arrefecimento: gradual e acelerado.

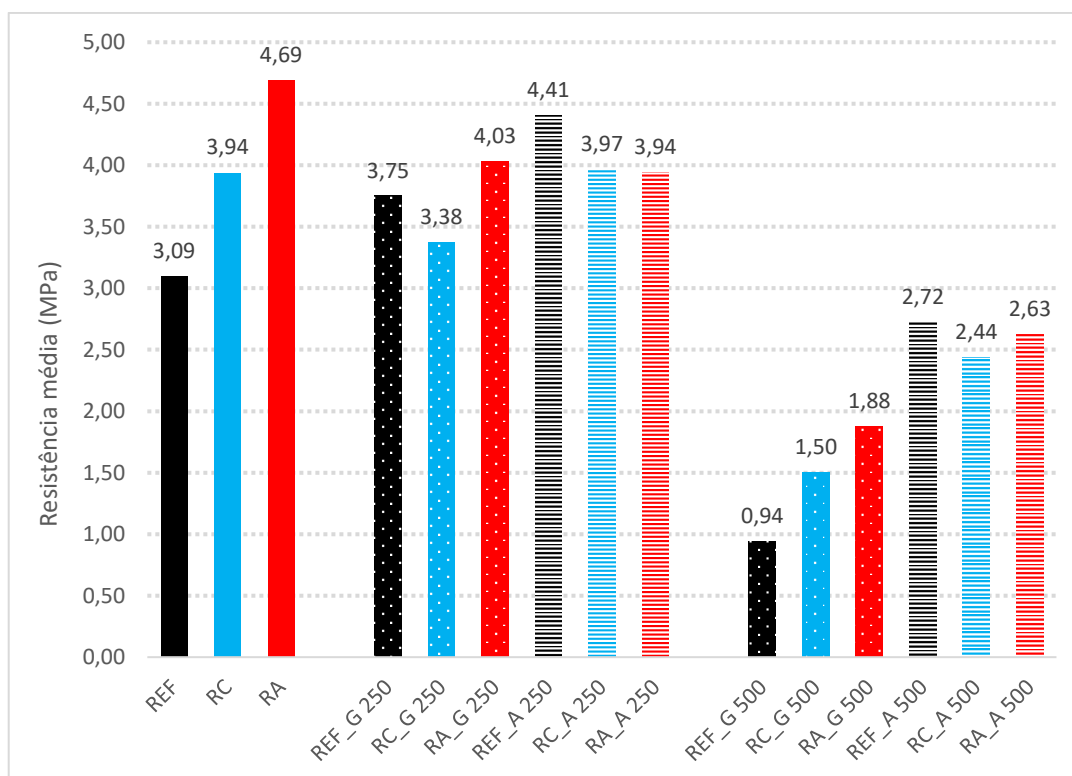


Figura 35 - Gráfico de resistência média à flexão das amostras

Observa-se que a formulação de referência (REF), a 20 °C, apresentou uma tensão média de 3,09 MPa. Após a exposição a 250 °C, houve um aumento na resistência de aproximadamente 21,4% com arrefecimento gradual e de 42,7% com arrefecimento acelerado, indicando que a elevação térmica moderada e o arrefecimento acelerado contribuíram para o ganho de resistência. No entanto, aos 500 °C, a resistência dos provetes de REF caiu drasticamente, sofreu uma redução de 69,6% no arrefecimento gradual e 12,0% no arrefecimento acelerado em relação à condição inicial, sem exposição a temperaturas elevadas. A queda mais acentuada no arrefecimento gradual pode estar associada à fissuração observada nos corpos de prova após 24 horas, conforme ilustrado na Figura 18. Braga [63] relatou que o aumento da tendência à fissuração contribuiu para a redução da resistência das argamassas.

No caso dos provetes com substituição parcial do cimento, RC, a resistência inicial foi de 3,94 MPa, valor superior ao da REF. A 250 °C observou-se uma leve redução de 14,2% com arrefecimento gradual e um aumento de 0,8% com arrefecimento acelerado em relação à temperatura ambiente. Aos 500 °C, a resistência caiu para 1,50 MPa com arrefecimento gradual e 2,44 MPa com arrefecimento acelerado.

Os provetes com substituição parcial da areia, RA, obtiveram o melhor desempenho a 20 °C, com resistência média de 4,69 MPa. Após exposição a 250 °C, manteve-se com desempenho satisfatório, contudo uma diminuição da capacidade resistente em 14,1% para arrefecimento gradual e 16,0% para arrefecimento acelerado. No entanto, a 500 °C, a queda foi mais acentuada, com uma redução de 59,9% com arrefecimento gradual e 43,9% com arrefecimento acelerado.

## 4.2 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão foram obtidos por meio dos ensaios experimentais, nos quais registrou-se a carga crítica de ruptura em quilonewtons (kN). Esses valores foram então convertidos para tensão, expressa em megapascal (MPa), por meio da equação 2, considerando a geometria dos corpos de prova.

$$R_c = \frac{F}{b \times d} \quad (2)$$

Em que:

$R_c$  – Resistência à compressão (MPa);

$F$  – Carga de ruptura (N);

$b, d$  – Altura e largura da base do provete (mm).

### 4.2.1 Temperatura de 20 °C

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão realizados a 20 °C.

Tabela 7 - Valores médios de resistência à compressão das argamassas a temperatura ambiente (20 °C)

Provete	Temperatura (°C)	Arrefecimento	Tensão (MPa)
REF	20	-	20,62
RC	20	-	14,14
RA	20	-	23,65

Aos 20 °C, observou-se que a formulação RA apresentou o melhor desempenho mecânico, com tensão média de ruptura por compressão de 23,65 MPa, representando um aumento de aproximadamente 14,7% em relação à argamassa de referência (REF), que atingiu 20,62 MPa. Por outro lado, a formulação RC apresentou uma resistência de 14,14 MPa, o que corresponde a uma redução de cerca de 31,4% em comparação com a REF.

Esses resultados indicam que determinadas substituições podem promover ganhos significativos de resistência à compressão em temperatura ambiente, enquanto outras, embora apresentem desempenho inferior, ainda mantêm valores aceitáveis.

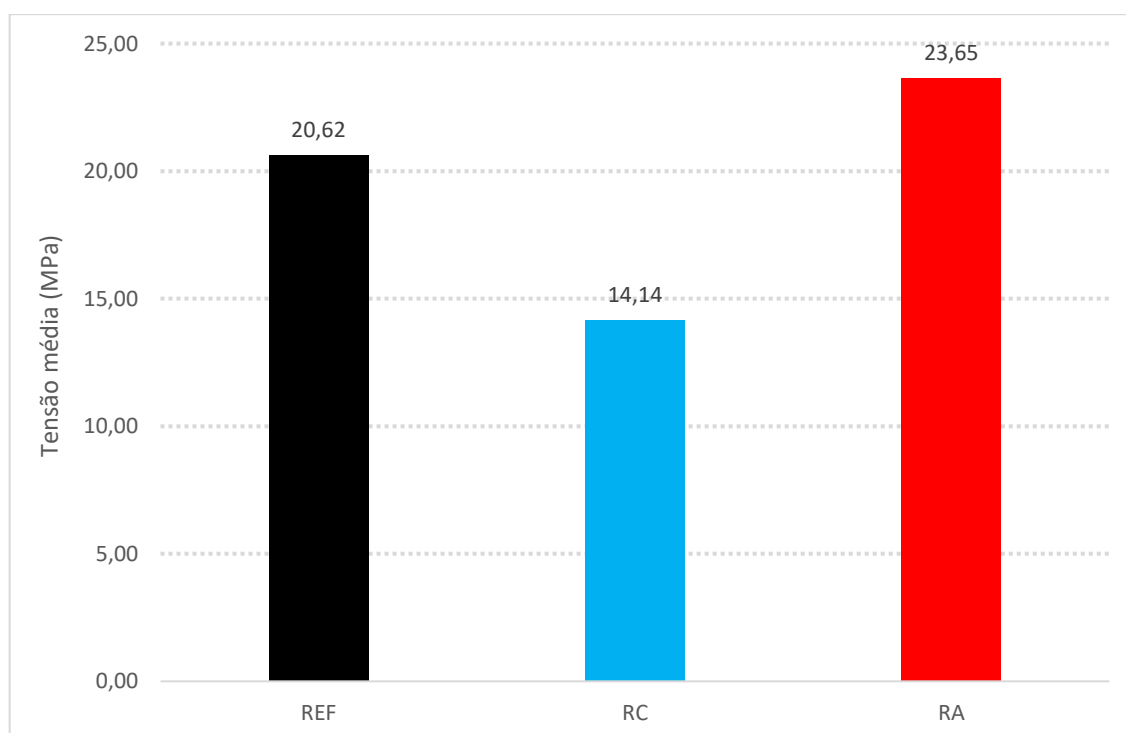


Figura 36 - Gráfico de tensão média de compressão a 20 °C

#### 4.2.2 Temperatura de 250 °C

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão realizados a 250 °C considerando dois tipos de arrefecimento.

Tabela 8 - Valores médios de resistência à compressão das argamassas a 250 °C

Provete	Temperatura (°C)	Arrefecimento	Tensão (MPa)
REF_G 250	250	Gradual	18,98
RC_G 250	250	Gradual	20,13
RA_G 250	250	Gradual	22,38
REF_A 250	250	Acelerado	22,75
RC_A 250	250	Acelerado	17,10
RA_A 250	250	Acelerado	19,96

Aos 250 °C, nota-se uma variação significativa no comportamento mecânico das argamassas em função da composição e da forma de arrefecimento. No arrefecimento gradual, a maior resistência foi registrada na composição RA\_G, com 22,38 MPa, o que representa um ganho de aproximadamente 17,9% em relação à composição de referência (REF\_G), que obteve 18,98 MPa. A composição RC\_G também superou a referência, atingindo 20,13 MPa, com um aumento de 6,1%. Esses resultados indicam que, mesmo sob aquecimento moderado, determinadas substituições podem conferir estabilidade ou até mesmo ganhos de resistência à argamassa.

No caso do arrefecimento acelerado, a composição REF\_A apresentou a maior resistência entre todas as condições, com 22,75 MPa, o que representa um aumento de 10,3% em relação a REFG. Já as composições RC\_A e RA\_A atingiram, respectivamente, 17,10 MPa e 19,96 MPa, com desempenho inferior em comparação às suas versões com arrefecimento gradual.

Esses dados sugerem que a forma de arrefecimento influencia de maneira distinta cada composição, sendo possível identificar tanto ganhos quanto perdas de desempenho mecânico, a depender da substituição aplicada e do tipo de resfriamento.

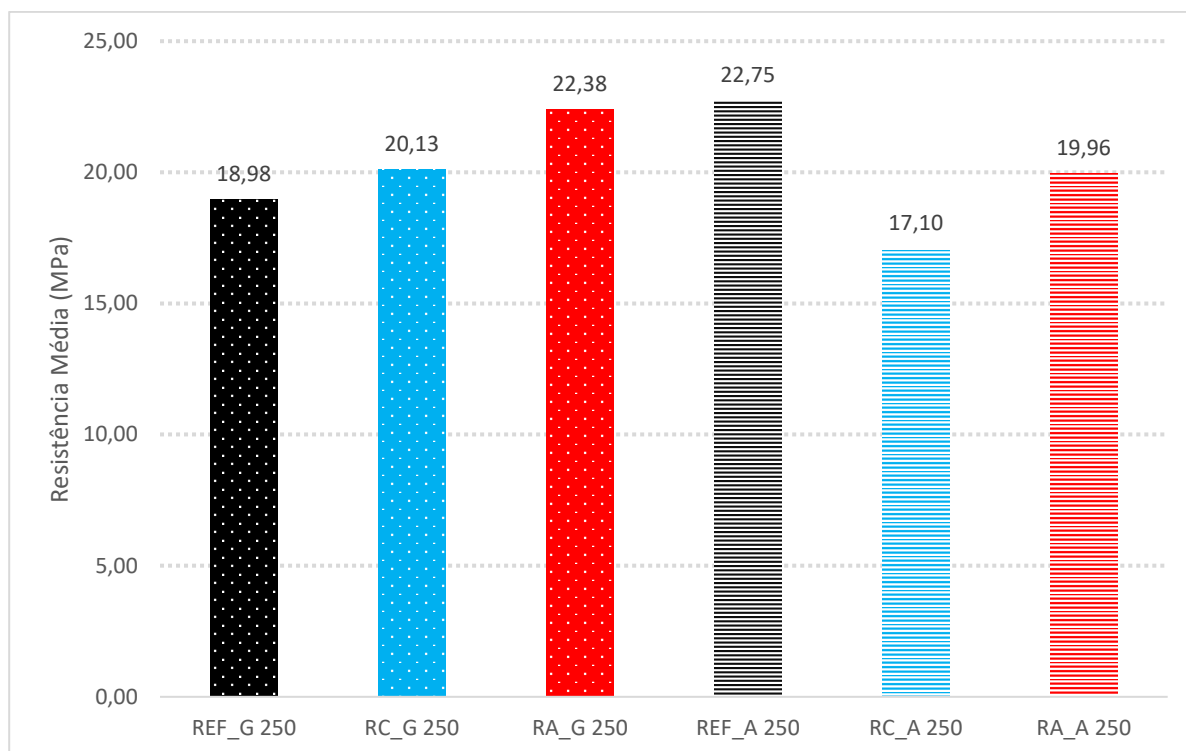


Figura 37 - Gráfico de tensão média de compressão a 250 °C

#### 4.2.3 Temperatura de 500 °C

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão realizados a 500 °C de acordo com seu tipo de arrefecimento.

Tabela 9 - Valores médios de resistência à compressão das argamassas a 500 °C

Provete	Temperatura (°C)	Arrefecimento	Tensão (MPa)
REF_G 500	500	Gradual	9,01
RC_G 500	500	Gradual	12,62
RA_G 500	500	Gradual	16,04
REF_A 500	500	Acelerado	13,67
RC_A 500	500	Acelerado	14,00
RA_A 500	500	Acelerado	16,28

A 500 °C, verificou-se uma redução expressiva na resistência à compressão em todas as composições, o que era esperado devido à degradação dos constituintes da argamassa em temperaturas elevadas. No entanto, os efeitos do tipo de substituição e da forma de arrefecimento seguiram tendências distintas. Entre os provetes submetidos ao arrefecimento gradual, a composição RA\_G apresentou o melhor desempenho, com 16,04 MPa, representando um aumento de 77,9% em relação à referência na mesma condição (REF\_G), que atingiu apenas 9,01 MPa. A composição RC\_G também superou a referência, alcançando 12,62 MPa, o que representa um acréscimo de 40,1%.

No arrefecimento acelerado, a resistência mais elevada foi registrada para a composição RA\_A, com 16,28 MPa, desempenho superior tanto à sua versão com arrefecimento gradual quanto às demais composições na mesma condição. Já a composição REF\_A atingiu 13,67 MPa, um aumento de 51,7% em relação à REF\_G, demonstrando que o arrefecimento rápido contribuiu para a mitigação da perda de resistência.

Os resultados sugerem que, mesmo sob temperaturas críticas, as substituições com Terra Diatomácea Residual (TDR), especialmente em substituição parcial da areia, mantêm-se eficazes para o desempenho mecânico da argamassa, com destaque para os efeitos positivos do arrefecimento acelerado.

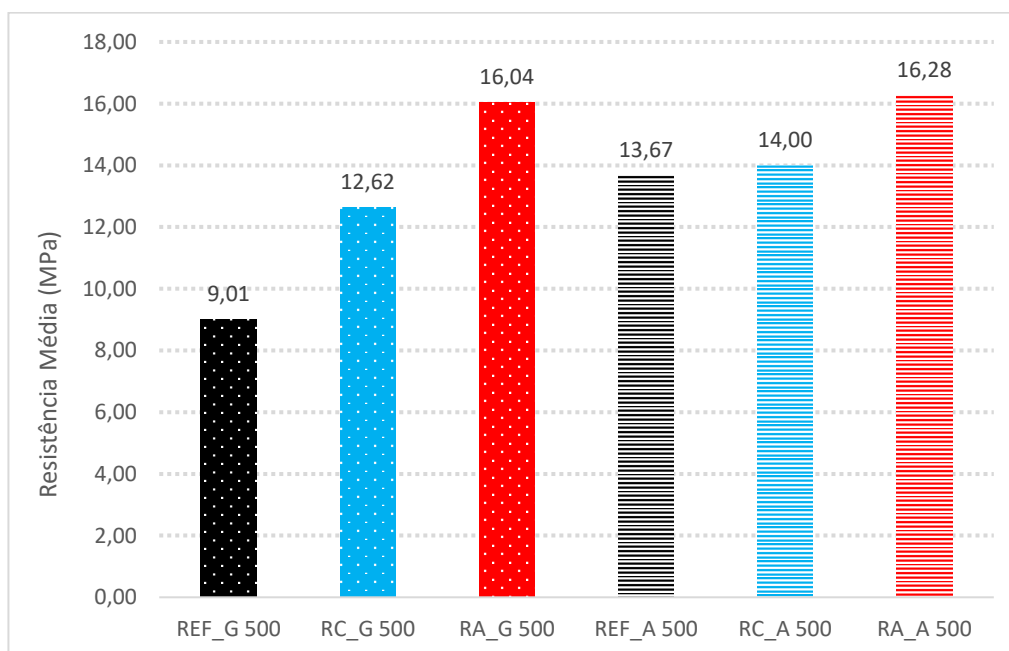


Figura 38 - Gráfico de tensão média a compressão a 500 °C

#### 4.2.4 Análise comparativa de resistência à compressão

A Figura 39 representa graficamente os valores médios de tensão de ruptura à compressão, em MPa, das diferentes formulações analisadas (REF, RC e RA) submetidas a temperaturas de 20 °C, 250 °C e 500 °C, considerando seus tipos de arrefecimento: gradual e acelerado.

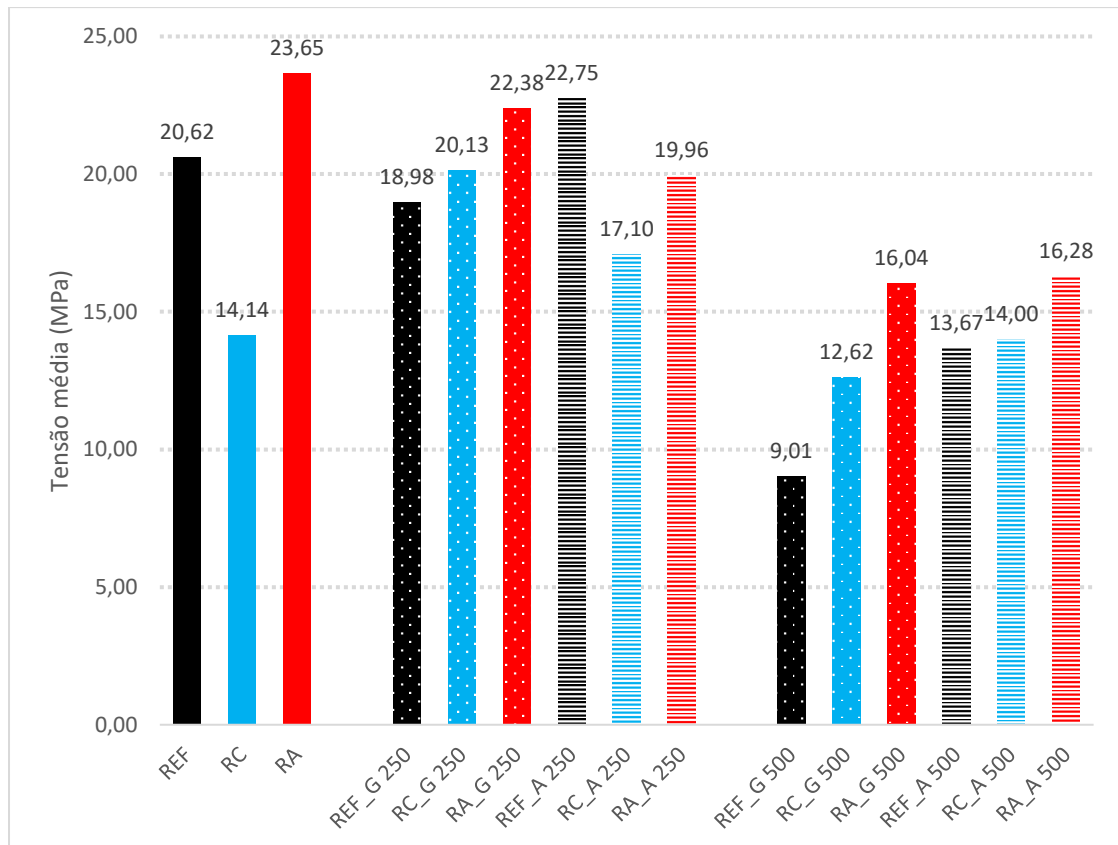


Figura 39 - Gráfico de tensão média a compressão das amostras

Observa-se que a formulação de referência (REF) a 20 °C apresentou uma resistência média de 20,62 MPa. Após a exposição a 250 °C, houve uma redução na resistência de aproximadamente 8,0% com arrefecimento gradual, enquanto com arrefecimento acelerado a resistência aumentou em torno de 10,4%, indicando que o arrefecimento rápido pode favorecer a manutenção ou até um ligeiro ganho na resistência após essa elevação térmica moderada. No entanto, aos 500 °C, a resistência da REF caiu drasticamente, apresentando uma redução de cerca de 56,3% com arrefecimento gradual e 33,7% com arrefecimento acelerado em relação à condição inicial.

No caso da amostra RC, a resistência inicial a 20 °C foi de 14,14 MPa, valor inferior ao da referência. Após exposição a 250 °C, a resistência aumentou significativamente, alcançando 20,13 MPa com arrefecimento gradual e 17,10 MPa com arrefecimento acelerado, indicando que a TDR pode contribuir para a melhoria do desempenho mecânico sob temperaturas moderadas. No entanto, a 500 °C, a resistência diminuiu para 12,62 MPa com arrefecimento gradual e 14,00 MPa com arrefecimento acelerado, representando uma redução em relação ao valor obtido a 250 °C, mas ainda apresentando desempenho próximo ao inicial a 20 °C.

A composição RA, com substituição parcial de 5% da areia por TDR, apresentou o melhor desempenho inicial, com resistência média de 23,65 MPa a 20 °C. Após a exposição a 250 °C, manteve-se com um desempenho elevado, sofrendo uma redução de 5,4% com arrefecimento gradual e 15,6% com arrefecimento acelerado. A 500 °C, a resistência da RA foi 16,04 MPa com arrefecimento gradual e 16,28 MPa com arrefecimento acelerado, o que representa uma redução de 32,1% e 31,2% respectivamente em relação à condição inicial, contudo superior aos valores das outras formulações sob a mesma condição. Isso indica que a substituição parcial da areia por TDR confere maior resistência térmica à argamassa, independentemente do tipo de arrefecimento aplicado.

De acordo com a norma EN 998-1 [64], as argamassas são classificadas em quatro classes com base em sua resistência à compressão aos 28 dias, variando de CS I a CS IV.

Tabela 10 - Classificação das propriedades da argamassa endurecida [64]

Propriedades	Categorias	Valores
Faixa de resistência à compressão aos 28 dias	CS I	0,4 N/mm <sup>2</sup> até 2,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS II	1,5 N/mm <sup>2</sup> até 5,0 N/mm <sup>2</sup>
	CS III	3,5 N/mm <sup>2</sup> até 7,5 N/mm <sup>2</sup>
	CS IV	≥ 6 N/mm <sup>2</sup>

Todas as formulações analisadas neste estudo enquadram-se na classe CS IV, demonstrando desempenho mecânico significativamente elevado em relação ao mínimo exigido.

Observou-se que a utilização desse resíduo, proveniente da filtração de vinhos, não comprometeu a resistência à compressão, pelo contrário, em algumas formulações houve

incremento nos valores obtidos, indicando o potencial da TDR como material suplementar em argamassas.

### 4.3 ADERÊNCIA

Após a exposição a altas temperaturas, observou-se a perda de aderência da camada de argamassa em relação ao substrato em todos os provetes com incorporação de TDR visualizado na Figura 40.



Figura 40 – Provetes com perda de aderência

Portanto, os resultados de resistência à aderência foram obtidos apenas para os provetes em temperatura ambiente, bem como para as amostras de referência expostas a 250 °C.

As medições de força e deslocamento foram obtidas por meio da prensa hidráulica, com base nesses dados calculou-se a tensão de ruptura de acordo com a equação 3.

$$Ra = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Em que:

$Ra$  – Resistência aderência (MPa);

$F$  – Carga de ruptura (N);

$A$  – Área do teste em forma circular (mm<sup>2</sup>).

A maioria dos provetes ensaiados apresentou o padrão de ruptura do tipo A, que é definido como uma fratura por adesão, em que a ruptura acontece na interface entre a argamassa e o substrato. No entanto, observou-se o padrão de fratura do tipo B no provete REF 3 e nos provetes REF\_A 250, observado na Figura 41(a,c), no qual a fratura ocorre na própria argamassa.

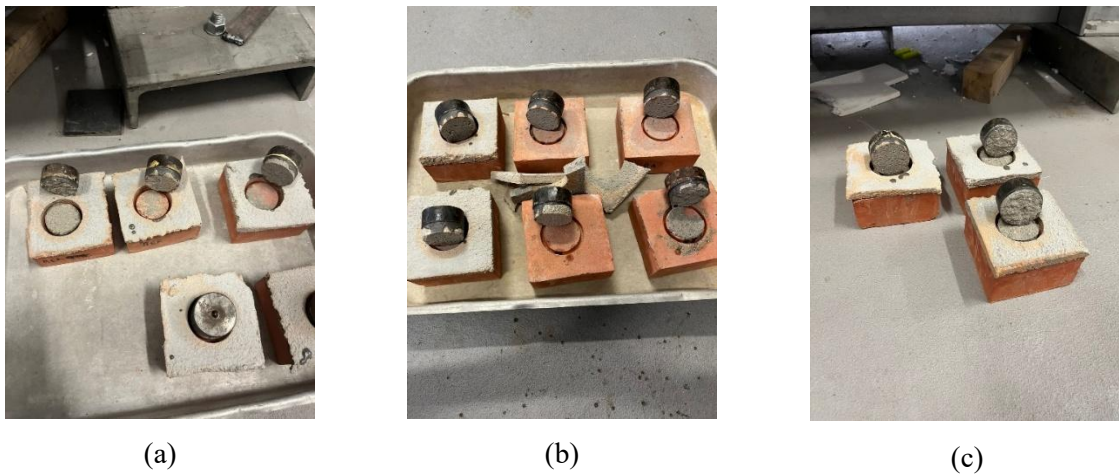


Figura 41 - (a) Ruptura provetes REF; (b) Ruptura provetes RC e RA; (c) Ruptura provetes REFR 250

Os resultados dos provetes REF 3 e RC 2 foram desconsiderados, uma vez que apresentaram valores significativamente divergentes dos demais, o que pode indicar falhas mecânicas ou problemas durante a preparação dos provetes. Os ensaios dos provetes REF\_G 250-2 e REF\_G 250-3 não foram realizados devido a uma falha na cabeça de tração.

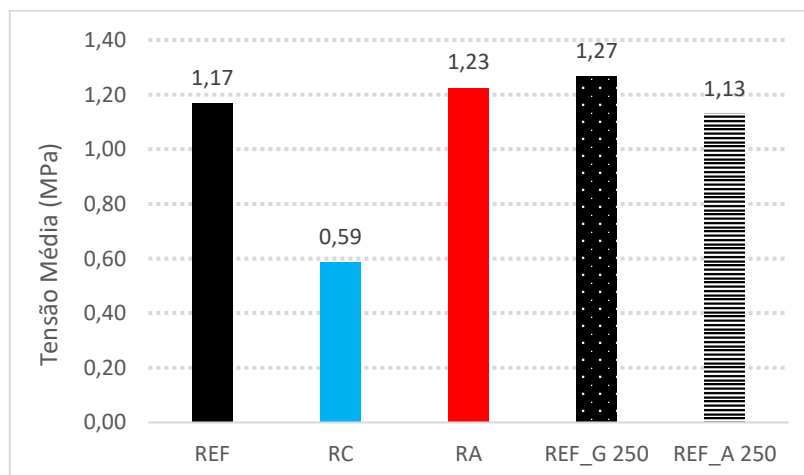


Figura 42 - Gráfico de tensão média de aderência

Tabela 11 - Tensão de ruptura de aderência

Provetes	Força (N)	Área (mm <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Tipo de Ruptura
REF 1	2690,382	1963,5	1,37	1,17	A
REF 2	412,488		0,21		B
REF 3	1902,335		0,97		A
RC 1	1611,76		0,82	0,59	A
RC 2	134,9974		0,07		A
RC 3	693,6788		0,35		A
RA 1	2357,955		1,20	1,23	A
RA 2	2692,186		1,37		A
RA 3	2168,994		1,10		A
REFG 250-1	2486,927		1,27	1,27	A
REFR 250-1	1715,759		0,87	1,13	B
REFR 250-2	3093,802		1,58		B
REFR 250-3	1841,745		0,94		B

Os resultados obtidos para a resistência à aderência indicam que a amostra RA apresentou o melhor desempenho dentre todas as formulações avaliadas em temperatura ambiente, com uma tensão média de 1,23 MPa. Esse valor representa um aumento de aproximadamente 5,1% em relação à argamassa de referência (REF), que atingiu 1,17 MPa.

Esse resultado indica que a substituição adotada promoveu uma leve melhora na aderência ao substrato. Porém, a formulação RC obteve o menor valor registrado, com 0,59 MPa, o que corresponde a uma redução de 49,6% em comparação com a REF, indicando que a substituição parcial do cimento por TDR comprometeu significativamente a aderência da argamassa.

No caso das amostras de referência expostas a 250 °C, os valores se mantiveram próximos ou até superiores ao da condição de referência a 20 °C. A amostra REF\_G 250 atingiu a maior resistência à aderência entre todas as analisadas, com 1,27 MPa, o que representa um aumento de 8,5% em relação à REF.

A amostra REF\_A 250 apresentou uma resistência de 1,13 MPa, apenas 3,4% inferior ao valor da REF, indicando que o choque térmico não afetou de maneira significativa a aderência da argamassa de referência.

Na temperatura de 500 °C, também foi registrado a perda total de aderência da argamassa com o substrato nos provetes de referência. Verificou-se ainda que o tipo de arrefecimento influenciou significativamente o comportamento dos materiais: no arrefecimento acelerado, a perda de aderência ocorreu de forma imediata após a imersão em água, enquanto no arrefecimento gradual foi observado após 24 horas, evidenciadas na Figura 43.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 43 – (a) Provetes com perda de aderência após a imersão em água; (b) Provetes com adição de TDR após arrefecimento acelerado apresentando a perda de aderência; (c) Provetes com adição de TDR apresentando perda de aderência após 24 horas; (d) Provetes em que ocorreram a perda de aderência, inclusos os REF a 500 °C

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho buscou investigar o comportamento de argamassas com incorporação de terra diatomácea residual (TDR), proveniente do processo de filtração de vinhos, em diferentes condições térmicas e métodos de arrefecimento. Observou-se que a substituição parcial de cimento e areia por TDR apresentou resultados diferenciados em termos de resistência à flexão, compressão e aderência, dependendo do tipo de ensaio, da temperatura de exposição e do tipo de arrefecimento empregado.

Em termos de resistência à flexão, verificou-se que, em temperatura ambiente (20 °C), as formulações RC e RA superaram a referência (REF), com ganhos de 27,5% e 51,7%, respectivamente. Aos 250 °C, o arrefecimento acelerado (RC\_A e RA\_A) resultou em um ganho modesto de 0,8% para a RC\_A e queda de 16% para a RA\_A. Já no arrefecimento gradual os resultados com a RA\_G manteve desempenho satisfatório, levemente superior à sua versão acelerada, a RC\_G apresenta o menor valor entre todas as formulações. Em 500 °C, todas as formulações sofreram quedas consideráveis em ambos os tipos de arrefecimento, a RC\_A apresentou queda de 61,9% e a RA\_A de 59,9%, sinalizando a degradação térmica severa dos materiais.

Na resistência à compressão, a influência dos métodos de arrefecimento também foi marcante. Em 20 °C, a RA apresentou 14,7% a mais de resistência que a REF, enquanto a RC teve redução de 31,4%. Aos 250 °C, no arrefecimento gradual, a RA\_G obteve 22,38 MPa (17,9% acima da REF) e a RC\_G chegou a 20,13 MPa (6,1% acima da REF). No arrefecimento acelerado, a REF\_A obteve o maior ganho, enquanto a RA\_A e a RC\_A mantiveram desempenho próximo, mas ligeiramente inferior ao arrefecimento gradual.

A 500 °C, a RA\_G manteve desempenho superior à REF, com 16,04 MPa (+77,9%), e a RC\_G também superou a REF com 12,62 MPa (+40,1%), evidenciando que a TDR melhora a resistência residual das argamassas mesmo sob condições críticas. Vale destacar que, apesar desses resultados em compressão, a amostra REF com arrefecimento gradual (REF\_G) apresentou fissuras visíveis após 24 horas, o que pode ter influenciado seu resultado e sugere que estruturalmente o material já estava comprometido.

Os ensaios de aderência representaram o maior desafio do estudo. Em temperatura ambiente, a RA apresentou um ganho de 5,1% em relação à REF, enquanto a RC teve queda significativa de 49,6%.

Quando expostas a 250 °C, apenas as amostras de referência (REF\_G e REF\_A) conseguiram manter a aderência substrato-argamassa e serem ensaiadas, a REF\_G teve aumento de 8,5% e a REF\_A queda de 3,4% em relação à REF a 20 °C. As amostras RC\_G e RA\_G, por sua vez, perderam completamente a aderência ao substrato ainda na etapa de preparação para o ensaio, independentemente do tipo de arrefecimento. Já a 500 °C, todas as amostras colapsaram com completa perda de aderência da argamassa com o substrato, demonstrando que essa temperatura crítica compromete a interface argamassa-substrato de todas as formulações.

A influência do tipo de arrefecimento foi particularmente evidente nos ensaios de aderência. O arrefecimento acelerado provocou a perda imediata de aderência das argamassas ao substrato quando imersas em água, enquanto o arrefecimento gradual permitiu que a aderência fosse mantida temporariamente, sendo perdida apenas após 24 horas. Esses resultados destacam a importância de considerar o tipo de arrefecimento ao avaliar a performance das argamassas em cenários críticos, como incêndios e aplicações industriais, pois o choque térmico e o modo de resfriamento podem determinar a integridade da interface de aderência.

Em termos de sustentabilidade, a TDR demonstrou-se uma alternativa viável como material complementar na substituição parcial do cimento e da areia na produção de argamassas, contribuindo para a redução do consumo de cimento Portland e para o aproveitamento de um resíduo industrial, ao mesmo tempo em que proporciona benefícios mecânicos relevantes.

Portanto, este trabalho demonstra que a TDR tem potencial para melhorar significativamente a resistência à compressão e, em alguns casos, a flexão das argamassas, mesmo após exposição a altas temperaturas. Contudo, a aderência ao substrato permanece como ponto crítico, já que as amostras RC e RA perderam completamente a aderência a 250 °C e todas as formulações colapsaram a 500 °C, independentemente do tipo de arrefecimento. Essa limitação reforça a necessidade de investigações adicionais para viabilizar o uso seguro da TDR em aplicações de revestimento, especialmente em situações no qual a integridade da interface argamassa-substrato é essencial.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados alcançados neste estudo, recomenda-se para trabalhos futuros:

Ensaio de aderência em altas temperaturas, aprimorando a metodologia de ensaio para viabilizar a avaliação da aderência em provetes submetidos a temperaturas de 250 °C e 500 °C, abrangendo diferentes tipos de substratos e formulações de argamassas.

Avaliação de viabilidade ambiental e econômica quantificando os benefícios ambientais e econômicos do uso de TDR como substituição parcial do cimento e da areia.

Expansão do estudo para temperaturas superiores a 500 °C.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. G. Margalha, “Argamassas”, Évora.
- [2] H. M. R. Coelho, “Comportamento a temperaturas elevadas de argamassas com incorporação de resíduos de fundição”, Dissertação (mestrado), Universidade do Minho Escola de Engenharia, Guimarães, 2023.
- [3] F. B. Witzke, “Propriedades de concretos estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland”, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Joinville, 2018.
- [4] M. L. F. M. Martins, M. M. Pimenta, e A. C. da S. Bezerra, “Aproveitamento de resíduos da indústria alimentícia para a produção de materiais cimentícios sustentáveis”, em *Anais do 20º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 2024*, Maceió: ANTAC, 2024, p. 10.
- [5] M. M. G. de Sá, “Universidade do Minho Escola de Engenharia”, Dissertação (Mestrado), Universidade do Minho, Braga, 2020.
- [6] R. C. Zolin, “Argamassa com incorporação de terra diatomácea residual proveniente da filtração de vinhos”, Dissertação (Mestrado), Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2023.
- [7] L. M. Miscovicz, “Comportamento do betão com incorporação de terra diatomácea residual a altas temperaturas”, Dissertação (Mestrado), Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2025.
- [8] L. J. R. Magalhães, D. M. Ferreira, e A. B. Ramos-Gavilán, “Enhancing concrete sustainability with spent diatomaceous earth from the wine industry: Long-term experimental and statistical analysis”, *Structural Concrete*, abr. 2024, doi: 10.1002/suco.202400889.
- [9] I. L. de O. Machado e V. Garrafa, “Proteção ao meio ambiente e às gerações futuras: desdobramentos e reflexões bioéticas”, *Saúde em Debate*, vol. 44, nº 124, p. 263–274, mar. 2020, doi: 10.1590/0103-1104202012419.
- [10] A. Spadotto, D. D. Nora, E. C. L. Turella, T. N. de Wergenes, e A. O. Barbisan, “Impactos ambientais causados pela construção civil”, *Unoesc & Ciência*, vol. 2, nº 2, p. 173–180, dez. 2011.
- [11] P. Moraes e C. R. de Souza, “O impacto ambiental de uma edificação”, *Revista Organização Sistêmica*, vol. 7, nº 4, 2015.
- [12] M. T. R. Neto e J. C. P. S. Leite, “Meio Ambiente e os embates da construção civil”, *Construindo*, vol. 6, nº 2, 2014.
- [13] I. M. C. B. do N. Barreto, *Gestão de resíduos na construção civil*. Aracaju: SENAI/SE; SENAI/DN; COMPETIR; SEBRAE/SE; SINDUSCON/SE, 2005.
- [14] M. D. Pinheiro, “Ambiente e Construção Sustentável”, Amadora, 2006.

- [15] S. S. S. Gouveia, “Análise do ciclo de vida de soluções de reabilitação energética de coberturas”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015. [Online]. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>
- [16] Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), “Concentração de Gases com Efeito de Estufa – Mauna Loa”. Acessado: 29 de maio de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/gases.estufa/index-mauna.jsp?var=data>
- [17] World Wildlife Fund (WWF), “Living Planet Report 2014: Species and spaces, people and places”, Gland, 2014. [Online]. Disponível em: [www.livingplanetindex.org](http://www.livingplanetindex.org)
- [18] S. Thacker *et al.*, “Infrastructure for climate action”, Copenhagen, 2021. [Online]. Disponível em: [www.unops.org](http://www.unops.org)
- [19] J. L. Calmon, D. R. Vieira, e S. M. Coutinho, “Perceptions of sustainability in civil construction projects: analysis of brazilian construction sites”, *The Journal of Modern Project Management*, p. 70–81, jan. 2014, [Online]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/274636254>
- [20] P. H. R. Borges, T. M. de F. Lourenço, A. F. S. Foureaux, e L. S. Pacheco, “Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)”, *Ambiente Construído*, vol. 14, nº 2, p. 153–168, jun. 2014, doi: 10.1590/s1678-86212014000200011.
- [21] M. Jaganmohan, “Production volume of cement worldwide from 1995 to 2024”, Statista. Acessado: 18 de junho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>
- [22] A. M. M. Santi e A. O. Sevá Filho, “Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento: casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações e possíveis generalizações”, ANPPAS, Org., Campinas: ANPPAS, maio 2004, p. 17.
- [23] Z. Y. Jia, S. Cunha, e J. Aguiar, “Influência da incorporação de resíduos de construção e demolição funcionalizados com material de mudança de fase nas propriedades mecânicas de betão”, *Centro de Território Ambiente e Construção*, nº 65, p. 16–27, 2023, [Online]. Disponível em: <https://revistas.uminho.pt/index.php/ecum>
- [24] Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), *Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002*. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2002.
- [25] A. P. S. Schiller, C. M. Paliga, e A. da S. Torres, “Revisão literária – Argamassas com incorporação dos resíduos de construção civil”, *Research, Society and Development*, vol. 11, nº 6, p. e11011628866, abr. 2022, doi: 10.33448/rsd-v11i6.28866.
- [26] R. R. Menezes, J. Farias Filho, H. S. Ferreira, G. A. Neves, e H. C. Ferreira, “Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas”, *Cerâmica*, nº 55, p. 263–270, 2009.

- [27] L. Phutthimethakul e N. Supakata, “Partial Replacement of Municipal Incinerated Bottom Ash and PET Pellets as Fine Aggregate in Cement Mortars”, *Polymers (Basel)*, vol. 14, nº 13, jul. 2022, doi: 10.3390/polym14132597.
- [28] Í. V. Monte Júnior, “Influência do agregado reciclado de concreto no comportamento de argamassas mistas para uso em revestimento”, Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- [29] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), “NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas”, Rio de Janeiro, 2013.
- [30] P. R. F. de Paula, “Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural”, Dissertação (mestrado), Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2010.
- [31] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), “NBR 6136: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural”, Rio de Janeiro, 2014.
- [32] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), “NBR 12118: Blocos Vazados de concreto simples para alvenaria”, Rio de Janeiro, abr. 2013.
- [33] M. Braga, J. de Brito, e R. Veiga, “Redução do teor de cimento em argamassas com agregados finos de betão incorporados”, *Engenharia Civil UM*, nº 41, p. 5–20, 2011.
- [34] M. P. de, Oliveira, A. F. da Nóbrega, M. S. Di Campos, e N. P. Barbosa, “Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland”, em *Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social – Brasil-NOCMAT 2004*, Pirassununga: s.n., 2004, p. 377–386.
- [35] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), “NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, fev. 2019.
- [36] M. Öztürk, “Elevated Temperature Resistance of Mortars Including Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash and Silica Fume”, *OKU Journal of The Institute of Science and Technology*, vol. 5, nº 1, p. 143–153, 2022, [Online]. Disponível em: <http://orcid.org/0000-0003-3389-4883>
- [37] M. O. de Paula, I. de F. F. Tinôco, C. de S. Rodrigues, E. N. da Silva, e C. de F. Souza, “Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 13, nº 3, p. 353–357, 2009, [Online]. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br>
- [38] R. O. Menegon e A. Neves Junior, “Estudo do uso da carbonatação acelerada em pastas de Cimento Portland usando resíduos de diatomita recuperados”, *E&S Engineering and Science*, vol. 7, nº 1, p. 15–29, abr. 2018, doi: 10.18607/es201875594.

- [39] M. R. Goulart, C. B. da Silveira, M. L. Campos, e J. A. de Almeida, “Metodologias para reutilização do resíduo de terra diatomácea, proveniente da filtração e clarificação da cerveja”, *Quim. Nova*, vol. 34, nº 4, p. 625–629, 2011.
- [40] ASTM International, “ASTM C168-15: Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. doi: 10.1520/C0618-15.
- [41] I. Lorini, F. C. Krzyzanowski, J. de B. França-Neto, A. A. Henning, e F. A. Henning, *Manejo integrado de pragas de grãos e sementes armazenadas*, Embrapa Soja. Brasília, 2015. [Online]. Disponível em: [www.embrapa.br/fale-conosco/sac/](http://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/)
- [42] Â. C. de A. Campaniço, “Caracterização da filtrabilidade do vinho em várias fases como forma de definir estratégias de acabamento”, Dissertação (Mestrado), Instituto Politécnico de Beja, Beja, 2015.
- [43] K. B. Padilha, “Análise da viabilidade técnica e econômica da aplicação do processo de separação por membranas para a filtração do vinho branco”, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.
- [44] R. A. D. de Faria, T. G. G. P. Silva, R. B. Soares, e C. G. Rodrigues, “Reutilização de terra diatomácea residual provenientes da produção de soros antiofídicos e antitóxicos”, *Revista Materia*, vol. 23, nº 4, 2018, doi: 10.1590/s1517-707620180004.0549.
- [45] G. P. Souza, M. Filgueira, R. Rosenthal, e J. N. F. Holanda, “Caracterização de material compósito diatomáceo natural”, *Cerâmica*, nº 49, p. 40–43, 2003.
- [46] J. L. M. dos S. L. de Almeida, “Argamassas tradicionais e industriais de alvenaria em edifícios”, Dissertação (mestrado), Universidade do Porto, Porto, 2010. [Online]. Disponível em: <http://www.fe.up.pt>
- [47] M. S. Cülfik e T. Özturan, “Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar”, *Cem Concr Res*, vol. 32, nº 5, p. 809–816, dez. 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00709-3.
- [48] S. J. Albeer e M. S. Hassan, “Silica Fume Modified Cement-Based Mortar Exposed to High Temperatures: Residual Strengths and Microstructure”, *Journal of Engineering*, vol. 29, nº 7, p. 18–33, jul. 2023, doi: 10.31026/j.eng.2023.07.02.
- [49] M. M. Shoaib, S. A. Ahmed, e M. M. Balaha, “Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars.”, *Cem Concr Res*, vol. 31, nº 11, p. 1533–1538, 2001.
- [50] S. Aydin e B. Baradan, “Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars.”, *Cem Concr Res*, vol. 37, nº 6, p. 988–995, 2007.
- [51] N. Yuzer, F. Akoz, e L. D. Ozturk, “Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature”, *Cem Concr Res*, vol. 34, nº 10, p. 1803–1807, 2004.

- [52] F. Abdulhussei, W. Abbas, e Q. Frayyeh, “Effect of high temperature and type of cooling on some mechanical properties of cement mortar”, em *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, mar. 2018. doi: 10.1051/mateconf/201816202010.
- [53] CEN – European Committee for Standardization, “EN 196-1: Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength”, Brussels, 2016.
- [54] ASTM International, “ASTM C109/C109M-99: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”, West Conshohocken, 1999.
- [55] International Organization for Standardization, “ISO 834-1: Fire-resistance tests —Elements of building construction — Part 1: General requirements”, Geneva, set. 1999.
- [56] L. T. Phan, T. P. McAllister, J. L. Gross, e M. J. Hurley, “NIST Technical Note 1681: Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings”, Gaithersburg, MD, nov. 2010. doi: 10.6028/NIST.TN.1681.
- [57] CEN – European Committee for Standardization, “EN 1015-11:Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”, Brussels, 2006.
- [58] BSI - British Standards Institution, “BS EN 1015-12: Methods of test for mortar for masonry. Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates”, London, 2016.
- [59] CEN – European Committee for Standardization, “EN 1015-1: Methods of test for mortar for masonry – Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)”, Brussels, 1998.
- [60] B. M. de Freitas, E. C. de Lima, U. M. M. Ribeiro, A. P. Lopes, e J. C. de Macêdo Neto, “Análise do ensaio de flexão no poliácido láctico (PLA)”, em *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC)*, Palmas: Universidade do Estado do Amazonas, 2019.
- [61] CEN – European Committee for Standardization, “EN 1015-2: Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars”, Brussels, 1998.
- [62] F. H. B. Vaz e H. Carasek, “Resistência de aderência de revestimento de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema”, *Cerâmica*, vol. 65, nº 374, p. 303–318, 2019, doi: 10.1590/0366-69132019653742508.
- [63] M. B. da C. Braga, “Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão: Efeito de fíler e pozolânico Engenharia Civil”, Dissertação (Mestrado), Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.
- [64] CEN – European Committee for Standardization, “EN 998-1: Specification for mortar for masonry-Part 1: Rendering and plastering mortar”, Brussels, 2010.

## ANEXOS

### ANEXO I – Calendário dos ensaios de flexão e compressão

Ensaio flexão/compressão - Provete Prismático (40x40x160 mm)							
Amostra	Temperatura [°C]	Arrefecimento	Data de início da amassadura	Data do desmolde	Cura antes do forno [dias]	Cura pós forno [h]	Data de realização do ensaio
REF 1	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
REF 2	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
REF 3	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
RC 1	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
RC 2	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
RC 3	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
RA 1	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
RA 2	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
RA 3	20	-	01/04/2025	03/04/2025	28	-	02/05/2025
REF_G1-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
REF_G2-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
REF_G3-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
REF_A1-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
REF_A2-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
REF_A3-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RC_G1-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RC_G2-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RC_G3-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RC_A1-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RC_A2-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RC_A3-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RA_G1-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RA_G2-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RA_G3-250	250	Gradual	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RA_A1-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RA_A2-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
RA_A3-250	250	Acelerado	01/04/2025	03/04/2025	28	24	02/05/2025
REF_G1-500	500	Gradual	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
REF_G2-500	500	Gradual	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
REF_G3-500	500	Gradual	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
REF_A1-500	500	Acelerado	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
REF_A2-500	500	Acelerado	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
REF_A3-500	500	Acelerado	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RC_G1-500	500	Gradual	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RC_G2-500	500	Gradual	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RC_G3-500	500	Gradual	03/04/2025	04/04/2025	28	24	05/05/2025

RC_A1-500	500	Acelerado	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RC_A2-500	500	Acelerado	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RC_A3-500	500	Acelerado	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RA_G1-500	500	Gradual	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RA_G2-500	500	Gradual	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RA_G3-500	500	Gradual	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RA_A1-500	500	Acelerado	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RA_A2-500	500	Acelerado	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025
RA_A3-500	500	Acelerado	03/042025	04/04/2025	28	24	05/05/2025

ANEXO II – Calendário do ensaio de aderência

Ensaio aderência -Camada de argamassa (110x110x10 mm)							
Amostra	Temperatura [°C]	Arrefecimento	Data de início da amassadura	Cura antes do forno [dias]	Cura pós forno [h]	Data de realização do ensaio ao fogo	Data de realização do ensaio aderência
REF 1	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
REF 2	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
REF 3	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
RC 1	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
RC 2	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
RC 3	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
RA 1	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
RA 2	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
RA 3	20	-	02/05/2025	28	-	-	09/06/2025
REF_G1-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	09/06/2025
REF_G2-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	09/06/2025
REF_G3-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	09/06/2025
REF_A1-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	09/06/2025
REF_A2-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	09/06/2025
REF_A3-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	09/06/2025
RC_G1-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_G2-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_G3-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_A1-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_A2-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_A3-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RA_G1-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RA_G2-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RA_G3-250	250	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RA_A1-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RA_A2-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RA_A 3-250	250	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
REF_G1-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
REF_G2-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
REF_G3-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
REF_A1-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
REF_A2-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
REF_A3-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_G1-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_G2-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_G3-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_A1-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_A2-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	
RC_A3-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025	

RA_G1-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025
RA_G2-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025
RA_G3-500	500	Gradual	02/05/2025	28	24	30/05/2025
RA_A1-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025
RA_A2-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025
RA_A3-500	500	Acelerado	02/05/2025	28	24	30/05/2025

**ANEXO III – Dados completos do ensaio de flexão**

<b>RESULTADO FLEXÃO: 20°C</b>		
<b>Amostra</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
REF 1	1,32	3,09
REF 2	1,32	3,09
REF 3	1,32	3,09
RC 1	1,56	3,66
RC 2	1,80	4,22
RC 3	1,68	3,94
RA 1	2,04	4,78
RA 2	2,16	5,06
RA 3	1,80	4,22

<b>RESULTADO FLEXÃO: 250°C</b>		
<b>Amostra</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
REF G1-250	1,56	3,66
REF G2-250	1,56	3,66
REF G3-250	1,68	3,94
REF A1-250	1,92	4,50
REF A2-250	1,92	4,50
REF A3-250	1,80	4,22
RC G1-250	1,44	3,38
RC G2-250	1,44	3,38
RC G3-250	1,44	3,38
RC A1-250	1,82	4,27
RC A2-250	1,82	4,27
RC A3-250	1,44	3,38
RA G1-250	1,56	3,66
RA G2-250	1,80	4,22
RA G3-250	1,80	4,22
RA A1-250	1,68	3,94
RA A2-250	1,68	3,94
RA A3-250	1,68	3,94

<b>RESULTADO FLEXÃO: 500°C</b>		
<b>Amostra</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
REF G1-500	0,36	0,84
REF G2-500	0,48	1,13
REF G3-500	0,36	0,84
REF A1-500	1,20	2,81
REF A2-500	1,20	2,81
REF A3-500	1,08	2,53
RC G1-500	0,60	1,41
RC G2-500	0,60	1,41
RC G3-500	0,72	1,69
RC A1-500	0,96	2,25
RC A2-500	1,08	2,53
RC A3-500	1,08	2,53
RA G1-500	0,84	1,97
RA G2-500	0,72	1,69
RA G3-500	0,84	1,97
RA A1-500	1,08	2,53
RA A2-500	1,08	2,53
RA A3-500	1,20	2,81

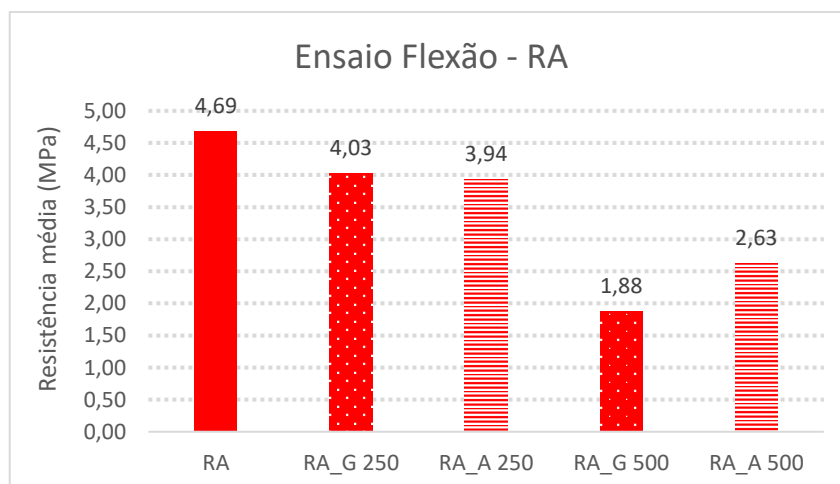
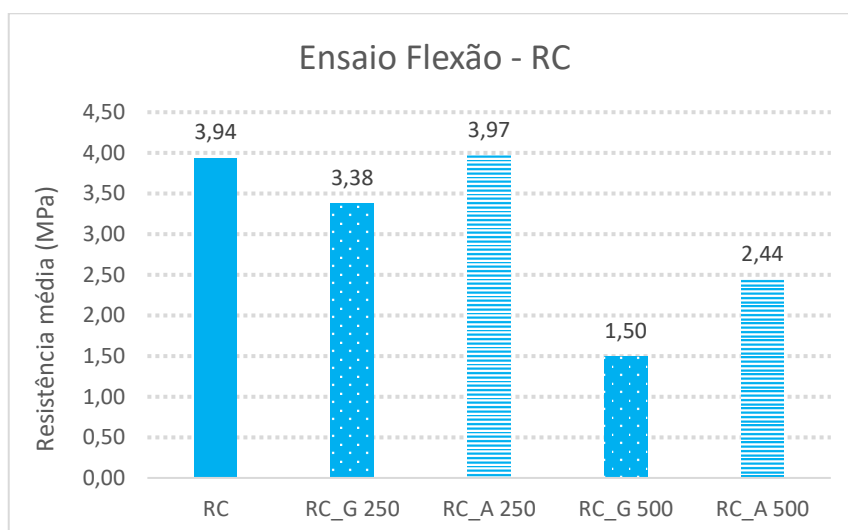
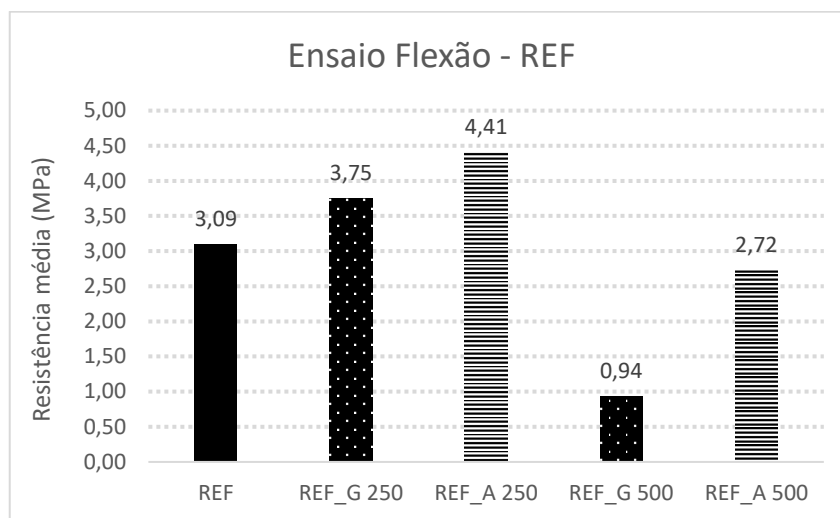
ANEXO IV – Dados completos do ensaio de compressão

<b>RESULTADO COMPRESSÃO: 20°C</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Média (kN)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
REF 1	31,12	31,27	31,20	19,50
REF 2	31,80	32,10	31,95	19,97
REF 3	35,95	35,68	35,82	22,38
RC 1	24,52	24,58	24,55	15,34
RC 2	22,32	23,05	22,69	14,18
RC 3	20,61	20,68	20,65	12,90
RA 1	38,76	39,25	39,01	24,38
RA 2	37,15	37,96	37,56	23,47
RA 3	37,06	36,88	36,97	23,11

<b>RESULTADO COMPRESSÃO: 250°C</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Média (kN)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
REF_G1-250	32,02	31,88	31,95	19,97
REF_G2-250	30,63	31,10	30,87	19,29
REF_G3-250	28,51	28,04	28,28	17,67
REF_A1-250	34,01	33,80	33,91	21,19
REF_A2-250	36,86	36,15	36,51	22,82
REF_A3-250	38,95	38,66	38,81	24,25
RC_G1-250	32,31	31,97	32,14	20,09
RC_G2-250	31,06	31,20	31,13	19,46
RC_G3-250	33,21	33,45	33,33	20,83
RC_A1-250	28,95	29,10	29,03	18,14
RC_A2-250	28,80	28,98	28,89	18,06
RC_A3-250	24,01	24,30	24,16	15,10
RA_G1-250	34,33	34,87	34,60	21,63
RA_G2-250	40,66	40,98	40,82	25,51
RA_G3-250	31,98	32,07	32,03	20,02
RA_A1-250	33,24	33,63	33,44	20,90
RA_A2-250	31,55	31,88	31,72	19,82
RA_A3-250	30,42	30,89	30,66	19,16

<b>RESULTADO COMPRESSÃO: 500°C</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Média (kN)</b>	<b>Tensão (MPa)</b>
REF_G1-500	15,34	16,16	15,75	9,84
REF_G2-500	12,91	13,14	13,03	8,14
REF_G3-500	14,33	14,60	14,47	9,04
REF_A1-500	22,95	23,28	23,12	14,45
REF_A2-500	19,73	20,18	19,96	12,47
REF_A3-500	21,96	23,12	22,54	14,09
RC_G1-500	20,91	21,25	21,08	13,18
RC_G2-500	19,87	19,68	19,78	12,36
RC_G3-500	19,44	20,03	19,74	12,33
RC_A1-500	20,62	21,09	20,86	13,03
RC_A2-500	22,75	23,15	22,95	14,34
RC_A3-500	23,14	23,68	23,41	14,63
RA_G1-500	24,85	25,10	24,98	15,61
RA_G2-500	24,40	24,80	24,60	15,38
RA_G3-500	27,14	27,68	27,41	17,13
RA_A1-500	27,04	27,33	27,19	16,99
RA_A2-500	25,84	25,10	25,47	15,92
RA_A3-500	25,77	25,16	25,47	15,92

ANEXO V – Gráfico comparativo entre amostras no ensaio de flexão



ANEXO VI – Gráfico comparativo entre amostras no ensaio de compressão

