

**COMPORTAMENTO DO BETÃO COM INCORPORAÇÃO DE TERRA
DIATOMÁCEA RESIDUAL A ALTAS TEMPERATURAS**

LUCIANE MARCELO MISCOVICZ

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 DO BETÃO COM INCORPORAÇÃO DE TERRA
DIATOMÁCEA RESIDUAL A ALTAS TEMPERATURAS**

LUCIANE MARCELO MISCOVICZ

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. Laura Silvestro (UTFPR)

Bragança

2025

*Em tua sina cruzaram-se boas estrelas.
Que te fizeram de fogo, espírito e orvalho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por conceder a oportunidade do mestrado e prover todo o necessário para até aqui eu chegar. Agradeço aos meus pais, Gilberto e Luciane, minha irmã Cristiane, meu cunhado Onassis e meus sobrinhos Gabriel e Nicolas, por serem a luz me mostrou o caminho nos dias de escuridão. Ao meu namorado, Gabriel Mello por me acompanhar neste processo e me lembrar que há sempre recompensa para a perseverança.

Agradeço profundamente às minhas orientadoras, Débora Macanjo Ferreira e Laura Silvestro por todo apoio, atenção e dedicação prestado, seus conhecimentos e conselhos foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao sr. João Pires, sr. Octávio Pereira, e a eng. Luísa Barreira agradeço por todo auxílio com os laboratórios de materiais e de resistência. Seus conhecimentos compartilhados nas longas horas de ensaio foram de grande valia para a estruturação da escrita.

Agradeço também ao IPB e à UTFPR que por meio do acordo de dupla diplomação proporcionaram uma excelente experiência de mestrado. Igualmente agradeço pela disposição de equipamentos e materiais necessários para o desenvolvimento da tese.

Aos meus queridos amigos do Brasil, Alex Machado, Patrize Oliveira, Vitoria Almeida e Wictor Sar, que mesmo com o oceano entre nós, não mediram esforços para nos mantermos a uma ligação de distância, obrigada por estarem aqui por mim.

Por fim, aos amigos brigantinos, Hellen Rodrigues, Manuela Marcolino, Malu Monteiro e Vitoria Gamarano, agradeço por tornarem esse um ano memorável e tirarem as risadas mais sinceras de mim diariamente. Vocês fizeram toda a diferença!

RESUMO

O setor da construção civil, ao desempenhar seu papel essencial na provisão de habitações e infraestruturas, enfrenta o desafio de reduzir os impactos ambientais decorrentes de suas atividades. Nesse contexto, destacam-se pesquisas voltadas à incorporação de resíduos prejudiciais ao meio ambiente como matéria-prima para betões mais sustentáveis. Um exemplo promissor é a terra diatomácea residual (TDR), subproduto gerado no processo de filtração de vinhos, cujas propriedades têm demonstrado resultados positivos na resistência mecânica de argamassas, betões e outros materiais.

Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento do betão com TDR quando submetido a diferentes patamares de temperatura (20 °C, 250 °C, 350 °C, 500 °C) por meio da exposição a diferentes regimes de arrefecimento (gradual e acelerado) e idade pós-arrefecimento (24 horas e 28 dias). O programa experimental envolveu a produção de provetes cúbicos utilizando: betão de referência (REF), TDR em substituição parcial de 10% cimento (RC) e TDR em substituição parcial de 5% de areia (RA). Estas percentagens foram definidas em estudos prévios como teores ótimos de incorporação da TDR sem alterar as propriedades físicas e mecânicas do betão.

Os resultados indicaram que a incorporação de TDR resultou em resistência estatisticamente igual em comparação ao traço de referência para a temperatura ambiente. Contudo, quando expostos a altas temperaturas as composições com TDR apresentaram maior variabilidade entre a resistência residual dos provetes, indicando maior sensibilidade do material ao aquecimento. Ademais, as composições RC e RA apresentaram redução de massa em comparação com a composição REF, mas não foi identificada relação entre esta variação e a resistência residual.

O arrefecimento em água contribuiu para a recuperação da resistência residual, com recuperação de 148% na composição REF, 139% na RC e 136% na RA após 28 dias de cura pós-aquecimento em câmara úmida em comparação com os resultados em 24h.

Quando expostos a 500 °C, os provetes contendo TDR apresentaram *explosive spalling*, possivelmente relacionada a granulometria fina do material que preenche os vazios e torna a composição mais densa. Em geral, os resultados sugerem que a TDR é um material promissor para substituição parcial do cimento e, principalmente, da areia. O bom desempenho observado está associado à composição rica em sílica da TDR, que favorece a resistência do betão.

Palavras chave: Altas Temperaturas, Arrefecimento, Betão, Terra Diatomácea Residual, Resistência Residual.

ABSTRACT

The construction sector, while playing its essential role in the provision of housing and infrastructure, faces the challenge of reducing the environmental impacts resulting from its activities. In this context, research focused on the incorporation of environmentally harmful waste as raw material for more sustainable concrete stands out. A promising example is the residual diatomaceous earth (RDT), a by-product generated in the wine filtration process, whose properties have shown positive results in the mechanical resistance of mortars, concrete and other materials.

This study aimed to evaluate the behavior of concrete with TDR when subjected to different temperature levels (20 °C, 250 °C, 350 °C, 500 °C) by exposure to different cooling regimes (gradual and accelerated) and post-cooling age (24 hours and 28 days). The experimental program involved the production of cubic test pieces using: reference concrete (REF), TDR in partial replacement of 10% cement (RC) and TDR in partial replacement of 5% sand (RA). These percentages were defined in previous studies as optimal levels of incorporation of TDR without changing the physical and mechanical properties of concrete.

The results indicated that the incorporation of TDR resulted in resistance statistically equal compared to the reference trace for room temperature. However, when exposed to high temperatures the compositions with TDR showed greater variability between the residual strength of the test pieces, indicating greater sensitivity of the material to heating. In addition, the RC and RA compositions showed a reduction of mass compared to the REF composition, but no relationship was identified between this variation and the residual resistance.

Water cooling contributed to the recovery of residual resistance, with a recovery of 148% in REF composition, 139% in CR and 136% in AR after 28 days of wet chamber post-heating cure compared to results in 24h.

When exposed to 500 °C, the test pieces containing TDR showed explosive spalling, possibly related to fine grain size of the material that fills the voids and makes the composition denser. In general, the results suggest that TDR is a promising material for partial replacement of cement and especially sand. The good performance observed is associated with the silica-rich composition of TDR, which favors the strength of concrete.

Keywords: High Temperatures, Cooling, Concrete, Residual Diatomaceous Earth, Residual Resistance.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SIGLAS	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÕES	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DA TESE	3
2 ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 BETÃO.....	4
2.1.1 Incorporação de resíduos.....	5
2.2 TERRA DIATOMÁCEA	6
2.2.1 Filtração de vinhos	8
2.2.2 Aplicação da terra diatomácea residual (TDR) na construção civil	8
2.3 COMPORTAMENTO A ALTAS TEMPERATURAS	12
2.3.1 Betão com incorporação de resíduos exposto a altas temperaturas.....	14
2.3.2 Efeito <i>explosive spalling</i> durante o aquecimento do betão	17
2.3.3 Influência do tipo de arrefecimento na resistência residual do betão	18
2.3.3.1 Efeito de choque térmico no betão.....	18
2.3.3.2 Acompanhamento da cura pós arrefecimento.....	19
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	21
3.1 ELABORAÇÃO DOS PROVETES	21
3.2 ENSAIOS	24
3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 RESULTADOS À TEMPERATURA AMBIENTE (20 °C).....	33
4.2 RESULTADOS À TEMPERATURA DE 250 °C.....	36
4.2.1 Relação entre diferentes arrefecimentos após 24 horas	38
4.2.2 Relação entre diferentes arrefecimentos após 28 dias	39
4.2.3 Relação entre diferentes idades após arrefecimento gradual.....	40
4.2.3 Relação entre diferentes idades após arrefecimento acelerado.....	41
4.3 RESULTADOS À TEMPERATURA DE 350 °C.....	42
4.3.1 Relação entre diferentes arrefecimentos após 24 horas	44

4.3.2	Relação entre diferentes arrefecimentos após 28 dias	45
4.3.3	Relação entre diferentes idades após arrefecimento gradual	46
4.3.4	Relação entre diferentes idades após arrefecimento acelerado	47
4.4	RESULTADOS À TEMPERATURA DE 500 °C	48
4.4.1	Relação entre diferentes idades após arrefecimento gradual	52
4.4.2	Relação entre diferentes idades após arrefecimento acelerado	53
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXOS	62
	ANEXO A - Valores de Resistência à Compressão	62
	ANEXO B - Acompanhamento das massas	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de composição química de materiais cimentícios suplementares com destaque para a TD (24).	7
Figura 2 - Redução progressiva da resistência residual do betão a altas temperaturas (36). ...	13
Figura 3 - Materiais utilizados para fabrico dos provetes.	21
Figura 4 - Esquema de definição do programa de estudo.	22
Figura 5 - Fabrico dos traços. (a) Pormenor da betoneira; (b) Betão misturado e mesa adensadora; (c) Provetes moldados; (d) Provetes desmoldados em cura na câmara húmida. .	23
Figura 6 - Resistência a compressão. (a) Ensaio na prensa; (b) Comando da prensa.....	24
Figura 7 - Padronização da distribuição dos provetes para aquecimento no forno. (a) Esquema da distribuição; (b) Representação de um ensaio feito.	25
Figura 8 - Pormenor do furo para inserção do termopar. (a) Vista superior; (b) Vista lateral; (c) Vista 3D.....	25
Figura 9 - Ensaio a altas temperaturas. (a) Forno de aquecimento; (b) Comando do forno; (c) Central de acompanhamento dos termopares; (d) Provetes em posição de ensaio com termopares.	26
Figura 10 - Explosive spalling. (a) Provetes que romperam no ensaio a 500 °C,R; (b) Provede desintegrado na segunda tentativa a 500 °C,R; (c) Posições de rompimento dos provetes.	27
Figura 11 - Curva de aquecimento a 250 °C para arrefecimento gradual com taxa de 5 °C/min.	28
Figura 12 - Curva de aquecimento a 500° para arrefecimento gradual com taxa de 5°C/min.	29
Figura 13 - Curva de aquecimento a 500° para arrefecimento gradual com taxa de 2°C/min.	29
Figura 14 - Arrefecimentos dos provetes. (a) Gradual com ventilação natural; (b) Acelerado com imersão em água.....	30
Figura 15 - Esquema das combinações para a análise estatística.	31
Figura 16 - Resistências à compressão em temperatura ambiente (20 °C).	33
Figura 17 – Comparação por Boxplot dos resultados da literatura com os obtidos neste estudo (8).....	34
Figura 18 - Resistência residual à compressão após exposição a 250 °C.	36
Figura 19 - Massa dos provetes expostos a 250 °C rompidos 24 horas após arrefecimento. ...	37
Figura 20 - Massa dos provetes expostos a 250 °C rompidos 28 dias após arrefecimento.....	38
Figura 21 - Resistência residual à compressão após exposição a 350 °C.	43
Figura 22 - Massa dos provetes expostos a 350 °C rompidos 24 horas após arrefecimento. ...	44

Figura 23 - Massa dos provetes expostos a 350 °C rompidos 28 dias após arrefecimento.....	44
Figura 24 - Resistência residual à compressão após exposição a 500 °C.	49
Figura 25 - Massa dos provetes expostos a 500 °C rompidos 24 horas após arrefecimento. ..	50
Figura 26 - Massa dos provetes expostos a 500 °C rompidos 28 dias após arrefecimento.....	50
Figura 22 - Fissuração dos provetes após aquecimento a 500 °C com taxa de aquecimento de 5 °C/min. (a) Referência; (b) Redução de cimento; (c) Redução de areia.	51
Figura 23 - Fissuração dos provetes após aquecimento a 500 °C com taxa de aquecimento de 2 °C/min. (a) Referência; (b) Redução de cimento; (c) Redução de areia.	51
Figura 24 - Pormenor das fissuras nos provetes do traço referência aquecidos a 500 °C com taxa de 5 °C/min. (a) Fissura máxima de 1 mm; (b) Face fissurada em linha reta; (c) Face fissurada em mapa.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrições dos cimentos investigados (32)..... 9

Tabela 2 - Relação de provetes e terras diatomáceas estudadas por (27)..... 10

Tabela 3 - Resultados preliminares de resistência à compressão para incorporações de TDR adaptado de (8). 11

Tabela 4 - Resultados finais para a resistência à compressão adaptado de (8)..... 12

Tabela 5 - Descrições gerais dos provetes produzidos por (40). 15

Tabela 6 - Possíveis causas do spalling no betão (43). 17

Tabela 7 - Quantificação de materiais para elaboração de cada traço (8)..... 22

Tabela 8 - Resultados para teste de normalidade e homogeneidade dos dados a 20 °C. 34

Tabela 9 - Resultados para análise de variância dos dados a 20 °C..... 35

Tabela 10 - Resultados obtidos para massa nos provetes a 20 °C. 35

Tabela 11 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes arrefecimentos em 24 horas. 38

Tabela 12 - Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas. . 39

Tabela 13 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes arrefecimentos em 28 dias. 39

Tabela 14 - Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas. . 40

Tabela 15 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual..... 40

Tabela 16 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual..... 41

Tabela 17 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento acelerado. 41

Tabela 18 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento acelerado..... 42

Tabela 19 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes arrefecimentos em 24 horas. 45

Tabela 20 - Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas. . 45

Tabela 21 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes arrefecimentos em 28 dias. 46

Tabela 22 - Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas. . 46

Tabela 23 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual.....	47
Tabela 24 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual.....	47
Tabela 25 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento acelerado.	48
Tabela 26 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento acelerado.....	48
Tabela 23 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual.....	53
Tabela 24 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual.....	53
Tabela 23 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual.....	54
Tabela 24 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual.....	54

LISTA DE SIGLAS

CIPD Conferência Internacional sobre População e Desenvolvimento

CO₂ Dióxido de carbono

SiO₂ Dióxido de silício

ONU Organização das Nações Unidas

TD Terra diatomácea

TDR Terra diatomácea residual

UE União Europeia

USGS United States Geological Survey

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

A preocupação com a poluição global cresce a cada ano ao redor do mundo, visto que a temperatura média da Terra está cerca de 0,8 °C superior ao registrado em 1880. As atividades antropológicas e a queima de combustíveis fósseis estão entre as principais atividades poluentes. As suas consequências incluem a destruição da camada de ozono, o aquecimento global e a elevação do nível do mar. As mudanças ambientais têm grandes impactos no ciclo de vida de animais, plantas, no solo e no bem-estar do ser humano [1].

O processo de fabrico do cimento Portland tem grande contribuição nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, sendo responsável por cerca de 8% das emissões globais. Pesquisas voltadas para encontrar alternativas que diminuam o consumo de cimento ou reduzam as emissões no fabrico são essenciais para uma melhor gestão dos gases de efeito estufa [2].

Embora a substituição do clínquer por aditivos minerais desempenhe um papel relevante, ela pode não ser suficiente para mitigar as emissões de CO₂ geradas pela produção de cimento. A otimização do uso de cimento na produção de betão apresenta uma estratégia eficaz para reduzir impactos ambientais e custos, mantendo ou aprimorando o desempenho do material. Além disso, essa abordagem está alinhada às políticas globais de neutralização de emissões de CO₂, destacando a importância de avanços e pesquisas nesse campo [3].

A extração de areia, embora seja uma atividade associada a um material natural, também apresenta sérios impactos ambientais. A demanda global por construção civil quadruplicou a produção de betão, atingindo cerca de 26 Gt/ano em 2020, promovendo a escassez de areia e a destruição do ecossistema [4]. Entre os principais problemas da extração desta matéria estão a erosão e a depreciação da qualidade do solo, frequentemente causados pela retirada indiscriminada do material. Em regiões de margens fluviais, esses impactos tornam-se ainda mais graves, com ocorrências de contaminação das águas por resíduos de óleo das máquinas utilizadas e alterações no curso e na vazão natural dos rios. Estas práticas comprometem não apenas os ecossistemas locais, mas também a sustentabilidade dos recursos a longo prazo [5].

Diante desses desafios, crescem os esforços para reduzir o consumo de cimento e areia através da substituição parcial por materiais reciclados ou alternativos, que na maioria das vezes ao serem descartados estariam poluindo o meio ambiente. Encontrar um novo destino para estes

materiais proporciona duplo benefício, ao substituir um material natural por um material que estaria degradando o meio ambiente.

Neste contexto, a terra diatomácea residual (TDR) destaca-se como uma opção promissora. Por ser rica em sílica (87-91%), a TDR apresenta características de uma pozolana natural, contribuindo positivamente para o desempenho de argamassas e betões em termos de resistência mecânica. A utilização da TDR como substituto parcial do cimento e da areia tem demonstrando a viabilidade de aliar desempenho técnico e redução de impactos ambientais no setor da construção civil [6–8].

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho insere-se no âmbito do projeto BacchusTech, que explora soluções inovadoras para o reaproveitamento de resíduos da vinificação em diversas indústrias, incluindo a construção civil. O projeto busca valorizar esses resíduos, ricos em compostos bioativos, promovendo a sustentabilidade ambiental por meio de tecnologias inovadoras e avaliando os impactos através de uma análise de ciclo de vida.

Alinhado ao projeto, trabalhos anteriores exploraram a aplicação de TDR a argamassas [6], ao betão [8] e avaliação do desempenho térmico destes materiais [7]. Dando continuidade a essas investigações, este estudo foca-se no comportamento do betão com adição de terra diatomácea residual quando submetido a altas temperaturas e em diferentes processos de arrefecimento.

Para tal, foram realizadas três composições de betão: uma de referência, outra com substituição de 10% do cimento por terra diatomácea residual, e uma terceira com substituição de 5% da areia pelo mesmo resíduo. Os provetes foram produzidos e ensaiados de acordo com a normativa NP EN 12390, que define os critérios para determinação da resistência do betão, incluindo a preparação e o armazenamento na parte 2 da norma [9] e a metodologia de ensaio a compressão descrita na parte 3 da norma [10].

Foram preparados 117 provetes no total, abrangendo diferentes composições, temperaturas, modos de arrefecimento e idades de cura pós arrefecimento. O objetivo principal é avaliar como a adição de terra diatomácea residual influencia o comportamento mecânico do betão após exposição ao fogo e subsequente processo de arrefecimento, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e sustentáveis.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 1, apresenta-se o tema de pesquisa e contextualiza-se o estudo do betão com a incorporação de resíduos, como a terra diatomácea, destacando sua relevância em aplicações que envolvem exposição a altas temperaturas.

O Capítulo 2 oferece uma revisão aprofundada do estado da arte, discutindo as propriedades e comportamento do betão, o uso de resíduos industriais como adições sustentáveis e os desafios associados à exposição a temperaturas elevadas. Este capítulo também examina fenômenos-chave, como choque térmico, *spalling*, bem como processos de arrefecimento e cura pós-aquecimento.

O Capítulo 3 descreve a abordagem experimental adotada neste estudo, incluindo a preparação de amostras de betão, as metodologias para testes de resistência a compressão, a avaliação da variação de massa e os procedimentos para aquecimento controlado, arrefecimento e avaliação da resistência residual em diferentes datas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos da campanha experimental, com foco nos efeitos de diferentes temperaturas de exposição e métodos de arrefecimento sobre a resistência residual do betão. Também explora o papel da cura pós-aquecimento na recuperação de propriedades mecânicas e compara os resultados observados com aqueles relatados na literatura.

Capítulo 5 conclui a dissertação resumindo as principais ideias obtidas da pesquisa, enfatizando suas implicações para o desempenho e durabilidade do betão em ambientes térmicos extremos. Também fornece sugestões para estudos futuros acerca da incorporação da terra diatomácea ao betão quando exposto a altas temperaturas.

2 ESTADO DA ARTE

Na Conferência Internacional sobre População e Desenvolvimento (CIPD) de 2024, a Organização das Nações Unidas (ONU) divulgou dados que apontam o aumento na expectativa de vida da população global, passando de 64,5 anos em 1994 para 73,7 anos para ambos os sexos em 2024. Ainda, divulgou uma projeção para a população mundial em 2054 com cerca de 9,9 bilhões de pessoas [11].

Com o aumento da população, tem-se a necessidade de expandir as infraestruturas dos municípios e o número de residências para atender as necessidades dos munícipes. Em Portugal há políticas públicas voltadas para a democratização do acesso a moradias, entretanto há questões que diminuem sua eficiência. Entre os paradigmas e paradoxos das políticas há a falta de residências para a demanda existente nos grandes centros urbanos [12].

2.1 BETÃO

O betão é o principal material utilizado para construir casas, edifícios, pontes e alguns tipos de pavimentos. Por consequência, o material é considerado o segundo mais consumido no mundo, estando atrás apenas da água [13]. O material resulta da combinação entre um elemento ligante (cimento), agregados finos (areia), agregados grossos (brita) e a água. A mistura pode conter aditivos ou adjuvantes a depender da necessidade de alteração das propriedades mecânicas do material [14].

A relação água/cimento na composição possui grande impacto no produto final. No estado fresco, a água melhora a trabalhabilidade e o cimento age com as propriedades ligantes. No endurecimento a água participa das reações de hidratação com os componentes silicato que conferem as resistências iniciais e a longo prazo. O excesso de água é prejudicial para o betão, uma vez que ao evaporar deixa vazios que podem comprometer a resistência e a durabilidade do material [15].

O processo de fabrico do betão, em especial do cimento, é responsável por uma significativa quantidade de emissões de gases de efeito estufa. O fabrico do cimento Portland, o principal componente do betão, envolve a calcinação do calcário, que libera grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂). Além disso, a queima de combustíveis fósseis nos fornos utilizados para aquecer as matérias-primas contribui ainda mais para a emissão de gases. Estima-se que a

indústria do cimento seja responsável por cerca de 5-8% das emissões globais de CO₂, tornando o setor um dos maiores poluidores industriais do mundo [2].

Além destas, soma-se as emissões causadas pelos veículos utilizados no transporte de materiais, processo de construção e durante a vida útil da estrutura em betão, devido a necessidade de manutenções que geralmente envolvem materiais de base cimentícia. Chegando ao fim da vida útil, a demolição da estrutura alinhada à má gestão dos resíduos contribui novamente com a poluição da atmosfera, gerando impactos ambientais [16].

Uma pesquisa realizada por Althoey et al [16] reuniu dados sobre os avanços no desenvolvimento de betão com baixas emissões de CO₂ e, igualmente, aponta as áreas que poderiam ser exploradas no desenvolvimento de alternativas ao uso de cimento. O autor separou as pesquisas sobre o betão de baixo carbono em duas grandes áreas, a de materiais e a de tecnologias. A área dos materiais aborda pesquisas voltadas para a substituição do clínquer na produção do cimento, materiais cimentícios suplementares, aglutinantes e agregados com baixo carbono; visando diminuir o consumo de cimento, água e incorporar materiais que iriam para aterros ou seriam descartados incorretamente.

Por sua vez, a área de tecnologias apresenta pesquisas sobre as diferentes metodologias de sequestro do carbono emitido durante o fabrico do cimento ou de captura da atmosfera para aplicar como aglutinante na mistura de betão, substituindo parcialmente o cimento. Algumas das metodologias apresentadas são a oxicomustão, separação direta e o looping de cálcio. O autor aponta a necessidade de pesquisas mais afundas para acompanhar o comportamento da carbonatação do betão armado utilizando tais metodologias, uma vez que o material terá o pH reduzido. Tal alternativa apresentou melhoria nas propriedades mecânicas do betão endurecido precoce, durabilidade e na microestrutura.

2.1.1 Incorporação de resíduos

Vários estudos exploraram o uso de resíduos de construção e demolição [17], subprodutos industriais [18] e outros materiais reciclados [19] como substitutos parciais para agregados tradicionais ou cimento. Essa incorporação de resíduos pode levar a uma maior resistência mecânica e à redução do teor de cimento [17]. Tais iniciativas diminuem a extração de recursos naturais, mas também reduzem as emissões de CO₂ associada à produção de cimento, além

de promoverem a reutilização de materiais que seriam descartados em aterros ou incorretamente afetando o meio ambiente [16].

A incorporação de resíduos em composições de betão e argamassas está ganhando importância no setor da construção devido aos seus benefícios ambientais e potenciais melhorias nas propriedades dos materiais. A adição de materiais residuais afeta significativamente as propriedades no estado fresco e endurecido do betão e da argamassa, incluindo consistência, resistência à compressão e durabilidade, a depender do material incorporado [18,19]. A utilização de resíduos no betão também pode trazer vantagens econômicas, já que muitos dos materiais reaproveitados têm custo inferior ao do cimento tradicional. Essa abordagem oferece uma solução tripla: diminui os custos de produção, minimiza o impacto ambiental e melhora o gerenciamento de resíduos.

A incorporação desses resíduos altera o comportamento mecânico do betão de diferentes formas. Portanto, é necessário um controle rigoroso da dosagem e da qualidade dos resíduos para garantir que as propriedades mecânicas desejadas sejam alcançadas seguindo as normativas para cada situação, evitando, assim, impactos negativos na resistência à compressão, na durabilidade ou na permeabilidade do material. A União Europeia (UE) introduziu o quadro de hierarquia de resíduos para promover a circularidade na gestão de resíduos de construção e demolição [20]. Em Portugal, os esforços de reciclagem deste resíduo estão a ganhar impulso, embora ainda falte legislação específica [21]. O país implementou planos estratégicos como o PERSU I e II para melhorar as práticas de gestão de resíduos [22]. Apesar desses esforços, ainda há desafios na quantificação precisa da geração de resíduos da construção e na melhoria da qualidade dos materiais reciclados [21]. A União Europeia (EU) continua a pressionar por uma transição para uma economia circular no setor da construção, enfatizando a redução de resíduos, o reuso e a reciclagem para minimizar o impacto ambiental e o consumo de recursos [20,22].

2.2 TERRA DIATOMÁCEA

A terra diatomácea (TD), também chamada de diatomita, é o remanescente fóssil natural de algas aquáticas unicelulares conhecidas como diatomáceas. Origina-se a partir do depósito ao longo de milhões de anos das chamadas frústulas, uma estrutura similar a concha impregnada com a sílica dissolvida na água, no leito de ambientes aquáticos, como lagos e oceanos, formando uma rocha macia. O material coletado é moído para produzir um pó sílico

extremamente fino, com uma camada filtrante de 80% da massa total [23]. Possui grande percentagem da composição em dióxido de silício (SiO_2), a variar entre 87 e 91%, onde uma parte significativa dessa sílica, entre 25 e 100%, encontra-se em forma amorfa, ou seja, sem estrutura cristalina [24]. A Figura 1 apresenta uma relação gráfica entre a principal composição de diferentes materiais utilizados como adição em bases cimentíceas, onde apresenta a TD como material similar a microsíllica e a cinza de casca de arroz em sua composição.

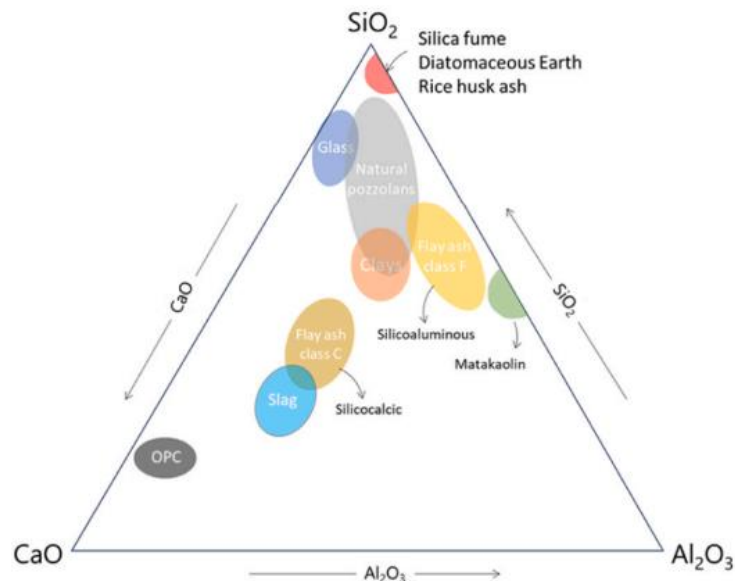


Figura 1 - Diagrama de composição química de materiais cimentícios suplementares com destaque para a TD [24].

De acordo com relatório emitido pela United States Geological Survey (USGS), em 2023 a produção mundial de TD foi estimada em mais de 2,5 milhões de toneladas. Os Estados Unidos lideraram a produção global, representando cerca de 32% do total, seguidos pela Dinamarca (17%), China (10%), Turquia (8%) e, com 4% cada, Argentina, México e Peru. A produção norte-americana totalizou cerca de 830.000 toneladas, sendo aproximadamente 50% destinadas à produção de produtos de filtração. O restante foi utilizado em aplicações diversas, incluindo absorventes, agregados leves, enchimentos e outras finalidades industriais, com menos de 1% alocado para os sectores farmacêutico e biomédico. A utilização de TD na produção de cimento foi a segunda aplicação mais relevante no mercado dos Estados Unidos [25].

A composição sílica do material, a alta porosidade (61-72%) e a baixa densidade aparente (0,51-0,69 g/cm^3), permitem uma gama de aplicações do material. As utilizações mais comuns são em setores agrícola, para pesticida natural, na indústria alimentícia, para filtração de impurezas em cervejas e vinhos, e na construção civil, para a fabricação de tijolos, materiais isolantes termoacústicos e em betões [26].

2.2.1 Filtração de vinhos

A filtração é um processo crucial no fabrico do vinho. Deve-se utilizar material que não altere quimicamente a composição química e o sabor do líquido, mas que retenha todas as impurezas presentes para garantir a qualidade e a segurança do produto final. Devido à alta porosidade, a TD torna-se um material muito propício para a filtração, sendo utilizada desde o final do século XIX. Atualmente, existem três tipos de TD utilizadas na filtração [23]:

- I. Terra natural: material esmagado e seco, com coloração acinzentada. Possui boa clarificação, porém o rendimento é baixo e pode conter material orgânico.
- II. Terra calcinada a 1000 °C: esmagada e calcinada, com coloração rosada ou avermelhada. Possui taxa de filtração satisfatória devido as partículas grossas.
- III. Terra calcinada entre 1100 °C e 1200 °C: utilização de cloreto de cálcio ou carbonato na calcinação para produzir pó mais solto com partículas maiores. As partículas grandes otimizam a filtração, porém não apresenta resultados refinados. Material final possui coloração esbranquiçada.

Após ficar saturada devido ao processo de filtração conforme descrito por Zolin [6], o material é descartado. Entretanto, a terra diatomácea residual (TDR) é um resíduo nocivo ao meio ambiente e necessita de uma correta destinação, que tem um custo associado. O avanço em pesquisas que ofereçam um meio de reutilização para este material é de grande importância tanto para a otimização do ciclo de vida do material, como para a preservação do meio ambiente e a diminuição dos custos associados a logística da destinação dos resíduos em aterros [27].

2.2.2 Aplicação da terra diatomácea residual (TDR) na construção civil

No setor da construção civil, a TDR está em pesquisa para diversas áreas, como na produção de geopolímeros [28] e na adição em pavers [29], materiais de isolamento termoacústico [30] e na substituição parcial de cimento ou areia em argamassas e betões [26], como é o caso deste trabalho.

Em pesquisa desenvolvida na Espanha, Mateo et al [31] avaliaram diferentes percentagens de incorporação de TDR na composição de blocos cerâmicos com dimensões de (30×10×60) mm. Como amostragem, foram produzidas 6 formulações de bloco cerâmico com teor e adição da TDR de 0, 1, 2, 3, 4 e 5% em relação a massa de argila, com 10 provetes para cada formulação. Após o fabrico, as amostras foram aquecidas em estufa por 10 °C/min até os 950 °C por 6 h,

logo em seguida arrefecidas em sala com temperatura e ventilação natural. Constatou-se uma redução de 6 a 12% da densidade aparente dos blocos, seguido por um aumento na absorção de água (4 a 31%) e diminuição da resistência à compressão (12 a 26%) em relação ao bloco referência. Os pesquisadores concluíram como percentual ótimo a adição de 4% de TDR na composição do bloco cerâmico [31].

Abrão, Cardoso e John [32] estudaram a incorporação da TDR em argamassas, comparando seus efeitos nas composições químicas e mineralógicas, nas características físicas, na demanda por água e superplastificante, na reatividade e nas propriedades mecânicas. O estudo foi realizado em cimentos com diferentes teores de pozolana, em comparação com um cimento de alto teor de clínquer, sem adição de TDR. A Tabela 1 apresenta um resumo referente a nomenclatura dos cimentos utilizados e suas especificações. A abreviação CP refere-se ao cimento Portland. Os números romanos representam o seu tipo, onde: I – simples, II – composto, III – de alto forno, IV – pozolânico e V ARI – de alta resistência inicial. As letras especificam a adição em: F – *filler*, E – escória e Z – pozolana.

Tabela 1 - Descrições dos cimentos investigados [32].

Código	Tipo de cimento	Descrição	Clínquer + CaSO₄ [%]	Pozolana [%]	Filler [%]	Adição de TD [%]
REF	CP V ARI	Cimento de alta resistência inicial	95 - 100	0,00	< 5	0,00
16DE	CP II Z	Cimento composto com pozolana	76 - 94	6 - 14	< 10	16,1
49DE	CP IV	Cimento pozolânico	45 - 85	15 - 50	< 5	49,2

A partir das análises, os pesquisadores chegaram as seguintes conclusões [32]:

- A presença de caulim na composição aumentou a área superficial dos grãos, levando à necessidade de mais superplastificante nos cimentos com terras diatomáceas em comparação ao cimento de alto teor de clínquer;
- A adição do superplastificante reduzir a demanda de água no teste de *flow table* dos cimentos com pozolana para atingir a consistência fixada em (240 ± 10) mm;
- Os provetes produzidos com a argamassa do cimento CP II Z tiveram uma redução de resistência à compressão maior que os produzidos com o cimento CP V ARI, mas os provetes do cimento CP IV apresentaram melhores resultados nas idades de 28 e 91 dias, fato explicado pela influência da reatividade e atividade pozolânica que se intensifica

em idades posteriores, bem como pelo menor consumo de água, o que tem impacto direto na porosidade do produto final;

- O indicador de emissão de CO₂ teve redução apenas na argamassa de cimento CP IV em comparação ao cimento CP V ARI, demonstrando que a redução das emissões de CO₂ na produção de cimento, por meio da diminuição do teor de clínquer, não está diretamente relacionada à diminuição dos impactos ambientais durante o uso do cimento. Para que a substituição por materiais complementares seja eficaz, é necessário considerar também a reatividade e a demanda de água, além das emissões de CO₂.

Rodriguez et al. [27] exploraram outra aplicação da TDR na construção civil, avaliando o comportamento mecânico e a durabilidade de tubos pré-fabricados de betão com substituição parcial do cimento por terra diatomácea calcinada, não calcinada e natural. Os ensaios realizados incluíram resistência à compressão, demanda de água, absorção de água por capilaridade, carbonatação e ataque de cloretos. Foram testados teores de substituição de 5% e 15%, utilizando TD residual proveniente da filtração de vinhos (WineD), cervejas (BeerD) e TD natural (ND), conforme apresentado na Tabela 2. Por conveniência, parte da TDR dos vinhos e toda a TDR das cervejas foram calcinadas (C) a 900 °C por 2 horas.

Tabela 2 - Relação de provetes e terras diatomáceas estudadas por [27].

Código	Tipo de TD	Percentagem [%]	Calcinada
ND-5	Natural	5	Não
ND-15	Natural	15	Não
WineD-5	Vinho	5	Não
WineD-15	Vinho	15	Não
WineD-5-C	Vinho	5	Sim
WineD-15-C	Vinho	15	Sim
BeerD-5-C	Cerveja	5	Sim
BeerD-15-C	Cerveja	15	Sim

Os ensaios indicaram que o uso de TDR não calcinada deve ser limitado a 5%, pois acima desse percentual, compromete as propriedades mecânicas do betão, exceto em ambientes não agressivos e em betões sem armadura. A adição de 15% de TD natural ou residual calcinada resultou em menor absorção de água por capilaridade, embora não tenha havido alteração na carbonatação em comparação ao traço de referência. Os resultados para o ataque de cloretos também foram promissores para os traços com altas adições. Concluiu-se que a TD, tanto

natural quanto residual, pode substituir parcialmente o cimento em betões industriais para pré-fabricados, desde que a matéria orgânica seja controlada por calcinação.

Schincaglia [8] desenvolveu um estudo abrangente para avaliar o teor ótimo de incorporação da TDR proveniente da filtração de vinhos na substituição parcial de cimento e da areia. Inicialmente foram produzidas oito composições de betão com substituição distribuídas em percentagens de redução de cimento de 5% a 10% e de redução de areia de 2,5% a 15%, além do betão de referência para avaliar o comportamento da resistência mecânica com as substituições. A Tabela 3 apresenta as composições estudadas, quantidade de material e os resultados obtidos após 28 dias de cura em câmara húmida.

Tabela 3 - Resultados preliminares de resistência à compressão para incorporações de TDR adaptado de [8].

Composição	Substituição parcial de cimento por TDR	Substituição parcial de areia por TDR	Resistência à compressão [MPa]
Referência	-	-	21,63
1	5,0%	-	21,08
2	7,5%	-	22,00
3	10,0%	-	21,90
4	-	2,5%	23,37
5	-	3,5%	26,19
6	-	5,0%	27,69
7*	-	10,0%	19,86
8**	-	15,0%	17,89

*Adição de 28% de água para melhorar a trabalhabilidade

**Adição de 42% de água para melhorar a trabalhabilidade

Após análise dos resultados preliminares da Tabela 3, o autor seguiu o programa experimental com as composições 3 e 6, das quais produziu 20 provetes para ensaiar à absorção de água por capilaridade e por imersão e à compressão aos 7, 28 e 90 dias de cura em câmara húmida. A partir destes ensaios, determinou-se que a absorção por capilaridade foi baixa, com valor máximo de variação percentual da massa igual a 0,2% nas três composições, um resultado positivo para a utilização da TDR incorporada ao betão. Por outro lado, a absorção por imersão resultou em diferentes percentuais, sendo de 3,63% para a composição referência, 1,78% para a composição 3 e 1,93% para a composição 6, ou seja, a TDR incorporada apresentou redução próxima a 50% na absorção de água por imersão.

Os resultados para os ensaios à compressão constam na Tabela 4. Observa-se o aumento de resistência ao passar dos dias em todas as composições, com destaque para as composições 3 e 6 que apresentaram ganho aproximado de 27% na resistência entre os 28 e 90 dias.

Tabela 4 - Resultados finais para a resistência à compressão adaptado de [8].

Composição	Resistência à compressão aos 7 dias [MPa]	Resistência à compressão aos 28 dias [MPa]	Resistência à compressão aos 90 dias [MPa]
Referência	16,67	20,44	23,29
3	14,55	20,61	26,23
6	17,88	24,15	30,85

A incorporação da TDR possui grandes vantagens ambientais, reduzindo as emissões de gases poluentes e o consumo de energia em 30% para uma substituição parcial de até 30% de cimento Portland de acordo com estudo desenvolvido por Li et al. [33]. O autor associou tal redução a origem natural do material pozolânico, pois requer apenas moagem leve e a disponibilidade do material na região estudada demanda um deslocamento menor no transporte. Para além destes resultados, o autor registou aumento de 41% na resistência à compressão dos provetes produzidos aos 28 dias, o que posiciona a TDR como material promissor na construção civil.

2.3 COMPORTAMENTO A ALTAS TEMPERATURAS

Entre as diversas preocupações relacionadas à vida útil do betão, a sua resistência ao fogo destaca-se como uma prioridade. O betão apresenta uma distribuição desigual de temperatura em sua estrutura, o que pode ser vantajoso em cenários de incêndio. A parte interna tende a manter temperaturas inferiores às da parte externa, que sofrerá mais danos [34]. Esta característica pode ajudar a evitar o colapso imediato, oferecendo um tempo crítico para a evacuação.

Incêndios históricos, como o do Edifício Joelma em 1974 e o incêndio do Grenfell Tower em Londres em 2017, demonstraram tragicamente a importância de uma estrutura resistente ao fogo. Nessas situações, a falha estrutural pode levar ao colapso do edifício, dificultando ou impossibilitando a fuga das pessoas em segurança. Desta forma é imprescindível que o material possua um controle de qualidade adequado para garantir a segurança nas estruturas [35].

Um estudo desenvolvido por Li, Qian e Sun [34] avaliou o comportamento do betão de alta desempenho de classe C60 para diferentes dimensões de provetes. Foram produzidos provetes cúbicos com aresta de 150 mm e com aresta de 100 mm e expostos as mesmas condições de

temperaturas nos patamares de 20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C e 1000 °C seguindo as diretrizes da norma chinesa Standard GB/T 9978-1999. O aquecimento foi interrompido assim que a temperatura ambiente no forno alcançou os patamares citados, não havendo especificação sobre a temperatura interna que os provetes alcançaram, mas sabe-se que são inferiores aos patamares. Após o aquecimento, os provetes foram mantidos no forno para um arrefecimento gradual e ensaiados a compressão em seguida de acordo com a norma chinesa Standard GBJ 81-85. Como resultados, os pesquisadores determinaram que os provetes com dimensões inferiores sofreram danos maiores quando expostos a temperaturas elevadas, perdendo cerca da metade da resistência que os provetes de aresta de 150 mm aos 1000 °C. Estes resultados foram associados pelos autores a baixa capacidade de transferência de calor no betão, que, sob mesmas condições de exposição ao fogo, causa danos maiores em provetes menores e reforçam a importância do dimensionamento e da qualidade do betão para garantir a sua resistência em cenários de incêndio.

Em revisão da literatura a cerca do comportamento do betão com incorporação de sílica, cinzas volantes e escória de alto forno exposto a altas temperaturas, Ramzi e Hajiloo [36] constataram um ligeiro aumento na resistência em temperaturas próximas a 200 °C e 300 °C. Este fenômeno é explicado pelo aquecimento das partículas de água que antes de evaporarem causam uma nova hidratação da sílica no betão, desta forma os materiais incorporados com maiores teores de sílica apresentam maiores aumentos nestes patamares de aquecimento. A partir da temperatura de 400 °C, o betão apresenta redução progressiva das propriedades mecânicas. A Figura 2 expressa o comportamento do betão em ensaios avaliados na revisão de literatura.

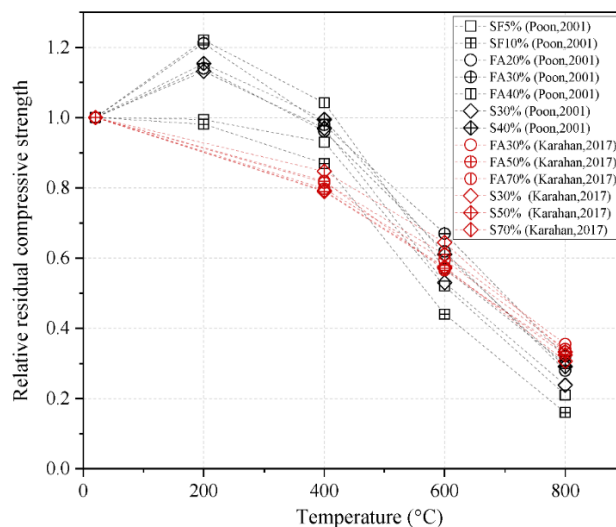


Figura 2 - Redução progressiva da resistência residual do betão a altas temperaturas [36].

Kessel et. al [37] avaliaram a influência da idade de cura do betão de alto desempenho e da temperatura de exposição sobre a resistência residual após arrefecimento gradual. A pesquisa contemplou idades de cura de 90 e 210 dias, seguidas da exposição a 200, 400, 600, 800 e 1000 °C, utilizando três provetes cilíndricos para cada condição. Por meio da análise de variância (ANOVA), os autores concluíram que a perda de massa e densidade é diretamente influenciada pela temperatura – não dependendo da idade de cura – enquanto a resistência residual é afetada por ambos os fatores. Os provetes com maior tempo de cura apresentaram melhor resistência residual em todos os casos, destacando-se que, para temperaturas superiores a 600 °C, a degradação da matriz cimentícia torna-se eminente. Os autores associam esse comportamento à atividade pozolânica, consolidada pelo maior tempo de cura dos provetes.

Os avanços em novos materiais para incorporação no betão são importantes por vários fatores já citados. Entretanto, para que um material tenha a aprovação de utilização em obras, devem ser feitos ensaios de comportamento nas mais diversas situações para assegurar que aquele material não estará comprometendo a qualidade do produto em sua vida útil.

2.3.1 Betão com incorporação de resíduos exposto a altas temperaturas

A adição de certos resíduos no betão pode influenciar significativamente sua resistência a altas temperaturas, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental. Materiais cimentícios suplementares como cinzas volantes e escória granulada de alto-forno, por exemplo, podem melhorar a resistência do betão a altas temperaturas, embora quantidades excessivas possam ter efeitos adversos [36]. Algumas destas adições também alteram a densidade do betão e a sua condutividade térmica, o que pode melhorar o isolamento térmico, uma característica importante para aplicações que envolvem exposição a altas temperaturas.

A trabalhabilidade do betão pode igualmente ser afetada pela granulometria e propriedades químicas dos resíduos incorporados, influenciando tanto a aplicação como o desempenho final do material. Além disso, adições de argila podem reduzir a resistência do betão em altas temperaturas, enquanto o óxido de alumínio pode aumentá-la [38]. Pó de mármore e areia de fundição, quando utilizados como substitutos parciais para cimento e areia fina respetivamente, não afetam significativamente o comportamento do betão até 400 °C. No entanto, a temperaturas mais elevadas, essas adições levam a uma rápida deterioração das propriedades residuais do betão, especialmente quando a substituição excede 10% [39].

Estas adições além de modificarem a microestrutura e a porosidade do betão, influenciam as fases cristalinas formadas em altas temperaturas, impactando a durabilidade do material. Desta forma, a utilização de resíduos no fabrico do betão contribui para a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de cimento Portland, mas também envolve interações complexas com a microestrutura, a densidade e as propriedades térmicas do betão que afetam o seu desempenho em ambientes de alta temperatura.

O betão e a argamassa com incorporação de terra diatomácea sofreram um crescimento no meio acadêmico em relação número de pesquisas dos últimos anos. Grande parte destas, avaliam a influência mecânica do material por meio de ensaio de resistência à compressão, absorção por imersão ou capilaridade, módulo de elasticidade, entre outros [40].

Na Indonésia, Hasan, Jamil e Saidi [41] conduziram um estudo utilizando betão de ultra alta resistência. Nesse trabalho, investigaram substituições parciais de cimento por TDR calcinada a 650 °C por 5 horas, em proporções de 5% e 10%. Para alcançar o elevado desempenho, além da areia, foi utilizado pó de minério de ferro como agregado na composição. O programa experimental incluiu ensaios de resistência à compressão, tração, flexão, durabilidade frente a ataques de cloretos e sulfatos de sódio, e resistência a temperaturas de 400 °C, 500 °C e 600 °C. Foram produzidos provetes com as dimensões e finalidades apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Descrições gerais dos provetes produzidos por [41].

Quantidade	Tipo de provete	Dimensões [mm]	Ensaio
85	Cúbico	Aresta de 100	Compressão, ataques de cloreto/sulfato, altas temperaturas
10	Cilíndrico	Altura 100 diâmetro 50	Tração por compressão diametral
10	Prismático	Altura 75 Largura 75 Comprimento 350	Flexão em quatro pontos

Para a produção dos provetes foram utilizadas TD naturais provenientes da região de Aceh Besar, Indonésia. O material foi peneirado, cozido a 100 °C por 24h e então calcinado a 650 °C durante 5h. O material resultante possuía dimensão máxima de 143 µm. A relação água/cimento (a/c) utilizada foi de 0,2 para a percentagem fixa de 1,5% de superplastificante em relação a massa de cimento.

Apesar de diminuir a trabalhabilidade do betão por conta da absorção de água pela TD, a substituição em 10% apresentou os melhores resultados nas propriedades mecânicas dos exemplares aos 28 dias de cura devido ao melhor preenchimento dos vazios com suas partículas finas e a segunda reação de hidratação que ocorre entre a sílica da TD e o hidróxido de cálcio do cimento. Os exemplares expostos a ataques de cloretos e sulfatos foram avaliados ao longo de 1, 2, 5, 7, 9 e 12 meses, quanto a perda de massa e a resistência a compressão. Os resultados obtidos mostraram que a adição da TD colaborou significativamente com a durabilidade do material mediante os agentes químicos expostos, apesar de possuir uma perda de massa maior que os exemplares sem a sua adição. Os autores associaram tal efeito as propriedades pozolânicas que a TD possui, pois, trabalhos anteriores já haviam comprovado tal desempenho.

Por outro lado, a substituição parcial em 5% apresentou melhor desempenho nos ensaios à compressão para a resistência residual aos patamares de temperatura ensaiados. A perda de massa pós aquecimento foi menor para as duas percentagens do que para o traço sem adição de TD, fato atribuído ao aumento da densidade do material que conseqüentemente terá menor quantidade de água para evaporar ao ser aquecido.

Os pesquisadores Maharani, Hasan e Saidi [42] deram continuidade ao estudo da TD como substituto parcial do cimento. Nesta nova pesquisa estudaram a aparência, perda de massa e a resistência a compressão do betão de alta resistência com teores de 0%, 0,15%, 0,30%, e 0,45% de fibra de rami incorporado e substituição parcial da massa do cimento por TD calcinada em 10% com uma relação a/c de 0,27. Foram produzidos provetes cúbicos com aresta de 50 mm com adição da fibra, sem TD, e provetes de mesmas dimensões com ambas as incorporações.

Os provetes foram submetidos a temperaturas diferentes, em patamares de 25 °C (temperatura ambiente), 400 °C, 500 °C e 600 °C durante 5h e arrefecidos em temperatura ambiente. Após os ensaios e análises, os pesquisadores constataram que os exemplares com incorporação da TD apresentaram menor quantidade de fissuras, maior perda de massa e menor perda de resistência a compressão após a exposição ao calor que os exemplares sem a incorporação. Em relação as fissuras após o aquecimento, o efeito foi observado nos exemplares expostos a 500°C e 600°C, sendo que os exemplares com a combinação da fibra e TD apresentaram menor quantidade de fissuras superficiais.

A revisão de literatura sobre o comportamento de composições cimentícias com incorporação de TDR expostas a altas temperaturas revelou uma lacuna significativa de estudos nessa área.

Essa constatação ressalta a relevância desta pesquisa, evidenciando sua contribuição para o avanço do conhecimento e para uma compreensão mais aprofundada dos efeitos das altas temperaturas em betões com TDR.

2.3.2 Efeito *explosive spalling* durante o aquecimento do betão

O efeito *spalling* no betão é um fenômeno complexo influenciado por vários fatores e com diferentes níveis de manifestação. Em uma revisão histórica da literatura, Jansson [43] apresenta a primeira aparição do tema citado em pesquisa foi em 1854, em um estudo desenvolvido por Barret, onde afirma-se que se o betão tiver pedras flint (ou chert, formado a partir de rochas sedimentares muito usado como ponta de lança na era medieval) em sua composição, estará suscetível à quebra durante o aquecimento.

Com o passar dos anos, muitas hipóteses foram levantadas e testadas a fim de entender tal comportamento do betão. Hertz [44] desenvolveu uma pesquisa onde apresenta as respectivas explicações para as diferentes manifestações do *spalling*, conforme alguns casos apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Possíveis causas do spalling no betão [44].

Causa raiz	Hipótese	Resultados obtidos
Água	Extinção do fogo por água	Os efeitos associados à aplicação de água para extinção de fogo estão relacionados ao choque térmico e não possuem influência no efeito <i>spalling</i>
	Gradientes livres de água e teor de umidade do betão	Considerada a principal razão do <i>spalling</i> , pois apenas os exemplares com certos teores de umidade sofreram do efeito. Para betões mais suscetíveis ao efeito, o ato de secar a superfície entre 20 a 30 mm diminuiu as chances de ocorrer o <i>spalling</i>
	Porosidade	Com o aumento da temperatura origina-se diferentes pressões entre poros abertos e poros fechados que contém vapor e água, quando excessiva causa o <i>spalling</i> pela ruptura da parede que separa os poros
Agregados	Expansão agregados de quartzo	Avaliaram a expansão como contribuinte para a deterioração do betão por causar microfissuras, mas não o suficiente para causar o <i>spalling</i>
	Lascas de agregados	Caracterizado pela ruptura apenas do agregado deixando pequenas crateras na superfície do betão que não comprometem sua estrutura
Aquecimento	Taxa de aquecimento	Taxas de aquecimento muito altas causam aumento demasiado das tensões internas que geram o <i>spalling</i>

Atualmente, o fenômeno é classificado de acordo com a sua extensão de dados em:

- *Aggregate spalling* - quando apenas o agregado desintegra e deixa pequenas crateras superficiais no betão;
- *Surface spalling* - descamação violenta de pedaços da superfície;
- *Corner spalling* - desintegração de pedaços em cantos, devido ao aquecimento bilateral;
- *Explosive spalling* - caracterizado pelo rompimento muito violento de grandes pedaços de betão.

Apesar de ser um fenômeno muito estudado em betões de alto desempenho por possuírem menor resistência a altas temperaturas, o *explosive spalling* pode ocorrer em betões normais com microestrutura densa [45]. O aumento na densidade diminui a porosidade do betão, construindo uma espécie de cápsula que dificultam a evaporação da água conforme é aquecida. Desta forma, o teor de umidade do provete torna-se um ponto crítico em betões densos, aumentando a probabilidade do *spalling* quando a umidade está acima de 90% [46].

2.3.3 Influência do tipo de arrefecimento na resistência residual do betão

Durante um incêndio, o betão é exposto a temperaturas extremas, que podem causar degradação nas suas propriedades mecânicas e físicas, comprometendo sua capacidade de suportar cargas. No entanto, além do impacto direto do calor, o processo de arrefecimento do betão após o incêndio desempenha um papel fundamental na preservação ou deterioração dessas propriedades [47].

Grande parte dos estudos conduzidos a avaliação da resistência residual do betão, relatam esperar o provete resfriar lentamente apenas com a ventilação e condições climáticas do laboratório, o que não ocorre em situações reais de incêndio nas estruturas. O tipo de arrefecimento - seja lento e natural ou acelerado, como a aplicação de água - pode influenciar significativamente a microestrutura do betão, afetando a ocorrência de fissuras, a redistribuição de tensões internas e a perda de coesão entre os componentes do material [47].

2.3.3.1 Efeito de choque térmico no betão

O choque térmico, resultante do arrefecimento acelerado do betão após exposição a altas temperaturas, ocorre devido às tensões térmicas geradas pela diferença de temperatura entre a superfície arrefecida e o interior do betão, levando a fissuração e, em casos mais extremos, a desagregação parcial do material. Botte e Caspeeel [47], na Bélgica, investigaram a influência do tipo de arrefecimento pós-exposição a altas temperaturas na resistência residual do betão.

Para o estudo, foram produzidos provetes cúbicos com arestas de 150 mm e provetes cilíndricos com diâmetro de 106 mm e altura de 330 mm. Esses provetes foram aquecidos em um forno a uma taxa de 1°C/min até atingirem temperaturas de 175 °C, 350 °C e 600 °C, sendo mantidos por 900 minutos nessas temperaturas antes do arrefecimento. O arrefecimento foi realizado por dois métodos: mergulho em água ou pulverização com água por 5 minutos. Após o arrefecimento, os provetes foram armazenados em câmaras húmidas, com temperatura de (20 ± 1) °C e 60% de umidade relativa, até retornarem à temperatura ambiente. No entanto, os provetes cilíndricos foram armazenados por 56 dias antes dos testes de rutura.

Os ensaios revelaram que os provetes cúbicos submetidos ao mergulho em água apresentaram uma diminuição de aproximadamente 38% na resistência à compressão em comparação com aqueles resfriados por pulverização. Contudo, essa diferença diminuiu à medida que a temperatura de aquecimento aumentava. Em contraste, os provetes cilíndricos não mostraram diferenças significativas na resistência residual entre os dois métodos de arrefecimento. Segundo os autores, isso pode ser explicado pela maior reserva de água disponível para uma nova hidratação nos provetes imersos, ao passo que os provetes pulverizados sofreram danos mais progressivos ao longo dos dias, afetando sua recuperação. Este segundo processo de hidratação que ocorre no betão após a exposição à temperaturas elevadas é chamado de reidratação.

2.3.3.2 Acompanhamento da cura pós arrefecimento

Os efeitos combinados de aquecimento, resfriamento e armazenamento podem levar a interações complexas na microestrutura do betão, potencialmente mitigando algumas das perdas de resistência esperadas. Poon et al. [48] realizaram um estudo sobre a cura pós-aquecimento de exemplares de betão em um programa experimental semelhante a outros estudos. Foram produzidos 8 provetes de betão normal e 12 de betão de alta resistência, com diferentes adições de agregados, como cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim. Esses provetes foram curados por imersão em água por 28 dias e, em seguida, armazenados em uma câmara húmida com temperatura de 20 °C e 75% de umidade relativa, simulando o clima de Hong Kong. Após 60 dias de cura, os exemplares foram aquecidos em um forno a uma taxa de 2,5 °C/min até atingir 600 °C e 800 °C, permanecendo por 1 hora nessas temperaturas.

Após o aquecimento, os provetes foram resfriados naturalmente até atingirem a temperatura ambiente e, em seguida, divididos em dois regimes de cura: imersão total em água e imersão

em água por 2 horas, seguida de armazenamento em câmara húmida (20 °C e 75% RH). Os provetes foram testados após 7, 28 e 56 dias de cura pós-aquecimento. Os resultados mostraram que as amostras com adições pozolânicas apresentaram melhor recuperação em comparação com os traços de referência. A cinza volante destacou-se, com recuperação de 30% para o betão normal e 40% para o betão de alta resistência. Segundo os autores, isso ocorre devido à reação de reidratação entre o hidróxido de cálcio e as partículas não hidratadas da cinza volante, que preenchem os capilares e reduzem a porosidade do material.

Quanto à diferença entre os métodos de arrefecimento, observou-se uma variação de 15-20%, em média, com a imersão contínua em água apresentando os melhores resultados. Isso foi atribuído à presença constante de umidade, que favorece a reidratação do betão e a recuperação parcial da resistência original. Os autores também explicaram que a degradação do betão exposto a 800 °C foi maior, uma vez que a estrutura de hidrato de silicato de cálcio, que oferece resistência ao material, começa a deteriorar após 550 °C. Assim, quando exposto até 600 °C, o betão ainda consegue recuperar sua resistência sem a necessidade de auxílio externo, como a reidratação com água.

Em uma abordagem diferente, Lin et al [49] ao comparar os arrefecimentos gradual com ventilação natural e por imersão em água durante 3 dias após aquecimento, concluiu que o arrefecimento por imersão teve melhor desempenho em recuperar a resistência do betão para os traços com relação a/c de 0,58 e 0,68, com resultados mais expressivos conforme aumenta a temperatura. O estudo acompanhou a evolução dos exemplares em 7, 30, 90 e 180 dias após o aquecimento nos patamares de 400 °C, 500 °C e 600 °C. Os resultados mostraram ainda não haver diferença significativa entre as relações a/c ensaiadas.

A compreensão do comportamento do betão sob temperaturas elevadas e durante processos de arrefecimento acelerado é essencial para melhorar a segurança e a durabilidade das estruturas expostas a condições térmicas extremas. A análise dos efeitos da incorporação de resíduos, como a terra diatomácea, contribui para expandir o conhecimento sobre as propriedades do betão e o seu comportamento a diferentes situações que venha a ser exposto durante a vida útil.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta seção descreve os materiais e a metodologia adotados para investigar a influência da incorporação de terra diatomácea residual (TDR) no betão, em substituição parcial ao cimento ou à areia. É avaliada a resistência residual após a exposição a altas temperaturas. O estudo considerou dois tipos de arrefecimento: gradual e acelerado. Os resultados obtidos para os traços com a adição de TDR foram analisados e comparados com os dados do traço de referência, a fim de avaliar os efeitos dessa incorporação no desempenho do material sob condições térmicas extremas.

3.1 ELABORAÇÃO DOS PROVETES

O fabrico dos provetes foi realizado utilizando os materiais disponíveis no laboratório de materiais de construção do Instituto Politécnico de Bragança, os quais já haviam sido caracterizados por Zolin [6] e Schincaglia [8]. Na Figura 3 são apresentados os materiais empregados, que incluem: 1 - Cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5N; 2 - Areia fina seca; 3 - Água da torneira; 4 - Brita 0; e 5 - Terra diatomácea residual fornecida pela empresa Caves Campelo e calcinada no laboratório.



Figura 3 - Materiais utilizados para fabrico dos provetes.

Prosseguindo com o estudo de traço realizado por Schincaglia [8], foram adotadas as percentagens de 10% e 5% para a substituição, respetivamente, do cimento (RC) e da areia (RA) pela terra diatomácea residual calcinada, conforme as recomendações do autor para futuras pesquisas. Além disso, foi considerado um traço de referência sem a incorporação de TDR. A Tabela 7 apresenta a quantificação dos materiais utilizados na preparação de cada traço.

Tabela 7 - Quantificação de materiais para elaboração de cada traço [8].

Traço	Cimento	Areia	Brita	TD	Água
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
REF	350,00	804,35	1010,06	0,00	218,50
RC	315,00	804,35	1010,06	35,00	218,50
RA	350,00	764,13	1010,06	40,22	218,50

Os patamares de temperatura definidos no presente trabalho, de 20 °C, 250 °C, 500 °C e 750 °C, tiveram por base a investigação desenvolvida por Hasan [41] e Maharani [42]. Esta escolha visa explorar uma faixa mais ampla de variações térmicas, permitindo uma análise mais abrangente do impacto das altas temperaturas na resistência do betão. A diferenciação nos métodos de arrefecimento, gradual e acelerado, conforme os estudos de Botte [47], Poon [48] e Lin [49] foi considerada para todos os provetes expostos a altas temperaturas, de modo a observar as variações nas propriedades do material em resposta a diferentes formas de arrefecimento. A resistência do betão foi analisada às 24 horas e aos 28 dias após o arrefecimento, gradual e acelerado. Para cada condição experimental, foram utilizados três provetes, totalizando 117 provetes. A Figura 4 apresenta um esquema detalhado que ilustra a definição do número de provetes, evidenciando a distribuição das amostras nas diferentes condições de temperatura e arrefecimento.

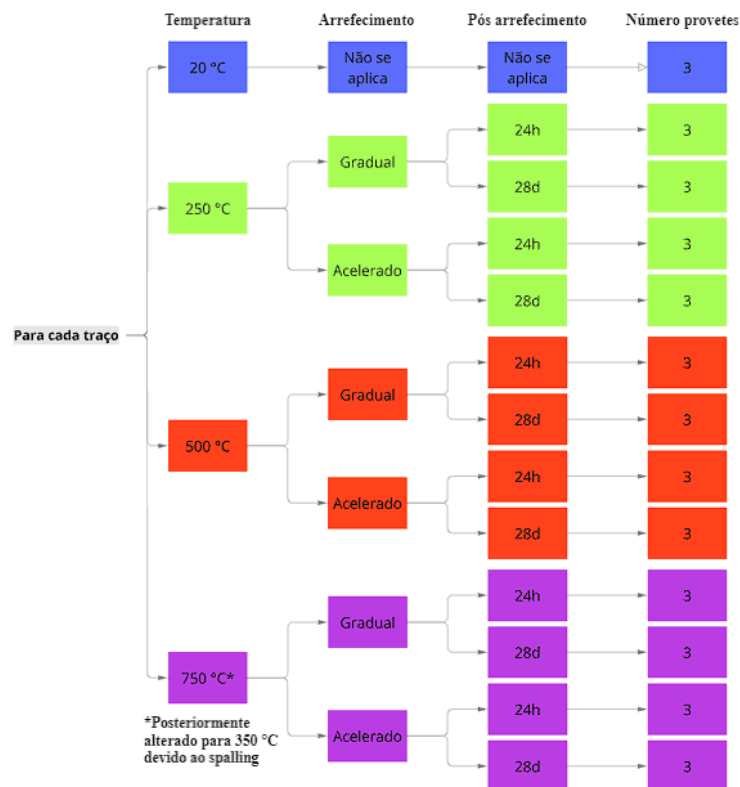


Figura 4 - Esquema de definição do programa de estudo.

Os materiais apresentados na Figura 3 foram adicionados na betoneira (Figura 5a) e misturados até alcançar uma consistência homogênea. Após a mistura, o betão foi transferido para o carrinho de mão e colocado nos moldes, um a um, sobre a mesa vibradora (Figura 5b) para garantir o adequado adensamento do material. Após a moldagem, os provetes foram deixados em local arejado, protegido de choques, e mantidos à temperatura ambiente (20 ± 5) °C até a desmoldagem, que ocorreu após 24 horas (Figura 5c). Em seguida, os provetes foram armazenados em câmara húmida, mantendo-se à temperatura ambiente (20 ± 2) °C e com umidade relativa de 100% (Figura 5d), para assegurar a cura adequada até o momento da realização dos ensaios.

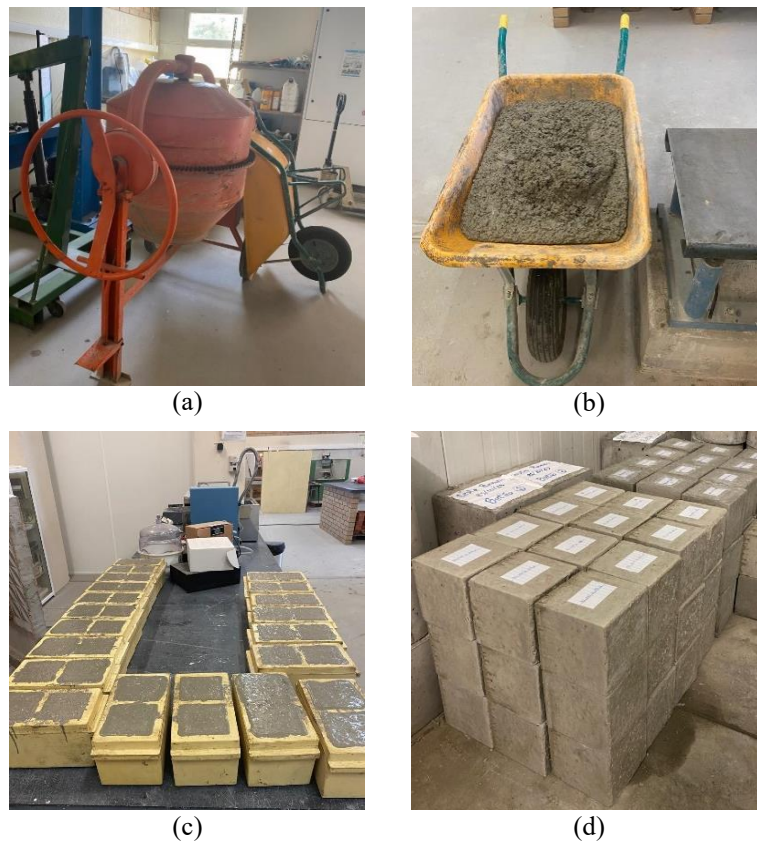


Figura 5 - Fabrico dos traços. (a) Pormenor da betoneira; (b) Betão misturado e mesa adensadora; (c) Provetes moldados; (d) Provetes desmoldados em cura na câmara húmida.

Para cada traço, foram produzidos 39 provetes cúbicos com dimensões de $(10 \times 10 \times 10)$ cm. Devido à limitação de moldes disponíveis, os traços foram produzidos em dias distintos, no entanto, todos os processos de execução seguiram rigorosamente as diretrizes estabelecidas pela norma NP EN 12390-2:2019 [9], garantindo a padronização e a qualidade dos provetes para as análises subsequentes.

3.2 ENSAIOS

A avaliação da influência da adição de TDR no betão foi realizada por meio do ensaio de resistência à compressão, após os provetes serem expostos aos diferentes patamares de temperatura e métodos de arrefecimento, conforme descrito anteriormente (Figura 4). Os ensaios seguiram as especificações estabelecidas pelas normas NP EN 12390/2019: Ensaio do betão endurecido [9,10].

Antes de cada ensaio, os provetes foram pesados para determinar sua massa inicial. Em seguida, os provetes foram submetidos ao ensaio de compressão, aplicando-se uma velocidade de carga de 13 kN/s, conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 6 - Resistência a compressão. (a) Ensaio na prensa; (b) Comando da prensa.

Seguindo a metodologia ilustrada na Figura 4, e visando uma redução no consumo de energia, os provetes foram ensaiados em grupos, organizados conforme as temperaturas (250 °C, 500 °C e 750 °C) e os tipos de arrefecimento (gradual e acelerado). Dessa forma, para cada temperatura, foram realizados dois conjuntos de ensaios: o primeiro grupo incluiu todos os provetes expostos à mesma temperatura para arrefecimento gradual, enquanto o segundo grupo consistiu nos provetes submetidos à mesma temperatura, mas com arrefecimento acelerado. A distribuição dos provetes seguiu a padronização apresentada no esquema da Figura 7 sendo aplicada de maneira consistente em todos os ensaios.

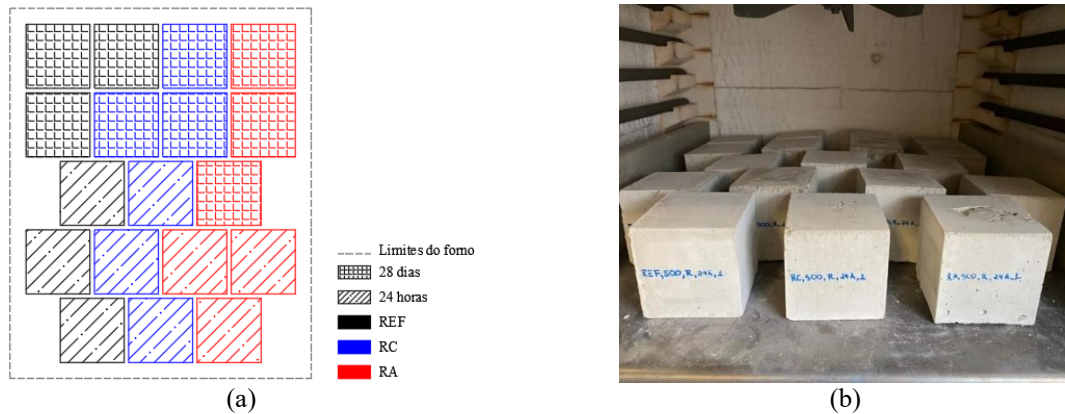


Figura 7 - Padronização da distribuição dos provetes para aquecimento no forno. (a) Esquema da distribuição; (b) Representação de um ensaio feito.

Para controle da temperatura interna nos provetes, foram feitos pequenos furos com diâmetro de 3 mm no centro de um provete de cada traço para inserir os termopares tipo K (Figura 8).

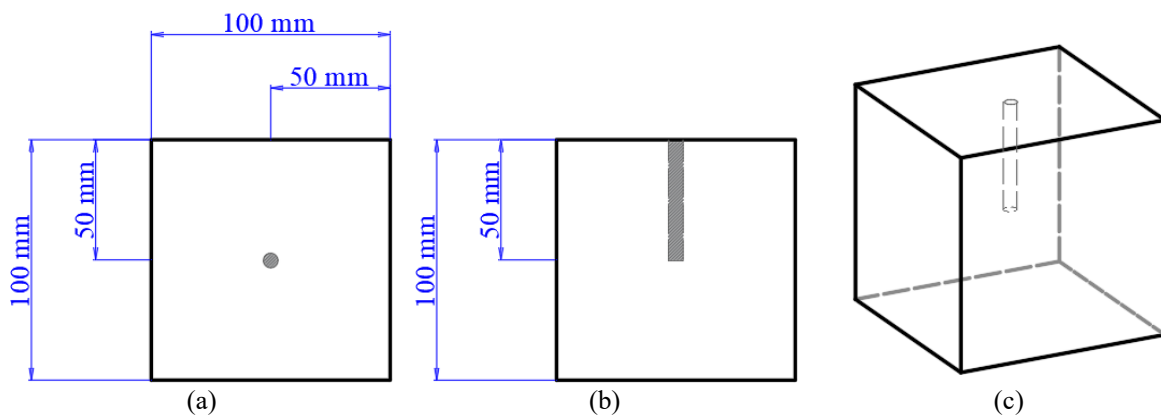


Figura 8 - Pormenor do furo para inserção do termopar. (a) Vista superior; (b) Vista lateral; (c) Vista 3D.

Para monitorar o aquecimento interno do forno, foi utilizado um termopar tipo K de controle (Figura 9d), que permitiu comparar as temperaturas internas com as fornecidas pelo leitor do próprio equipamento (Figura 9b). Devido a dificuldade em realizar os furos nos provetes, optou-se por utilizar os termopares apenas nos primeiros ensaios de cada temperatura, especificamente nos provetes que seriam submetidos a arrefecimento gradual.

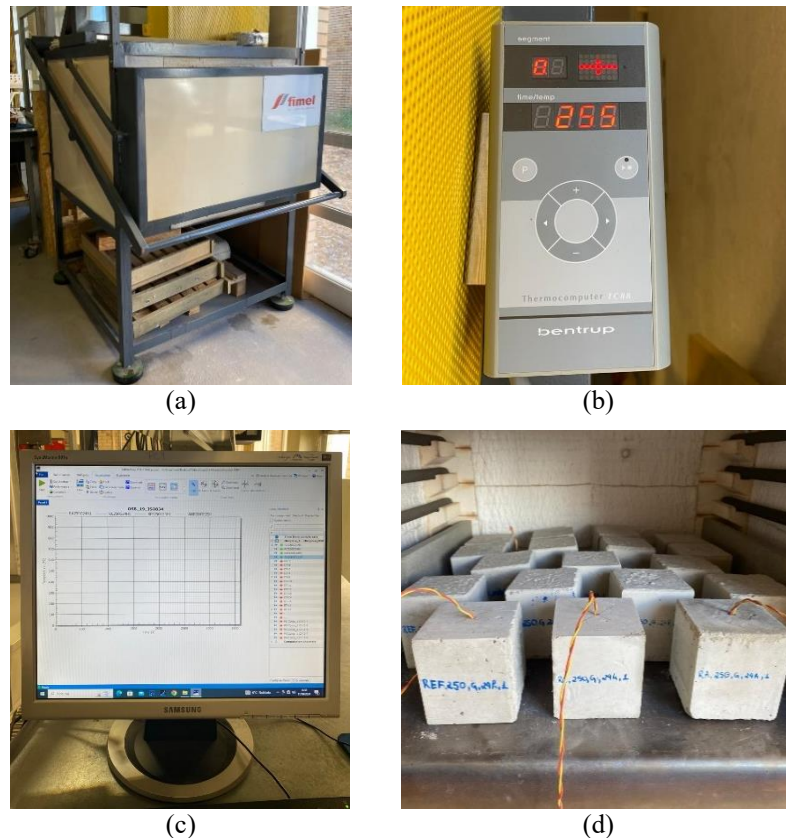


Figura 9 - Ensaio a altas temperaturas. (a) Forno de aquecimento; (b) Comando do forno; (c) Central de acompanhamento dos termopares; (d) Provetes em posição de ensaio com termopares.

A taxa de aquecimento adotada para esta pesquisa foi de $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, conforme estabelecido em estudo anterior por Fontes [51]. Os ensaios realizados para a temperatura de $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o ensaio a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ com arrefecimento gradual ocorreram conforme o esperado. No entanto, durante o segundo aquecimento a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, três provetes sofreram rotura dentro do forno (*explosive spalling*) ao atingirem $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, levando à interrupção do ensaio. O aquecimento superou o previsto, já que o forno atingiu essa temperatura em apenas 45 minutos, quando o esperado seria em torno de 66 minutos. Para verificar a possibilidade de o forno ter aquecido de maneira diferente do programado, foi realizada uma nova tentativa, sem o uso de termopares. No entanto, durante esse ensaio, um provete se desintegrou (*explosive spalling*) novamente, o que resultou na interrupção do procedimento. A Figura 10 mostra os provetes rompidos durante o aquecimento, bem como suas respectivas posições no forno.

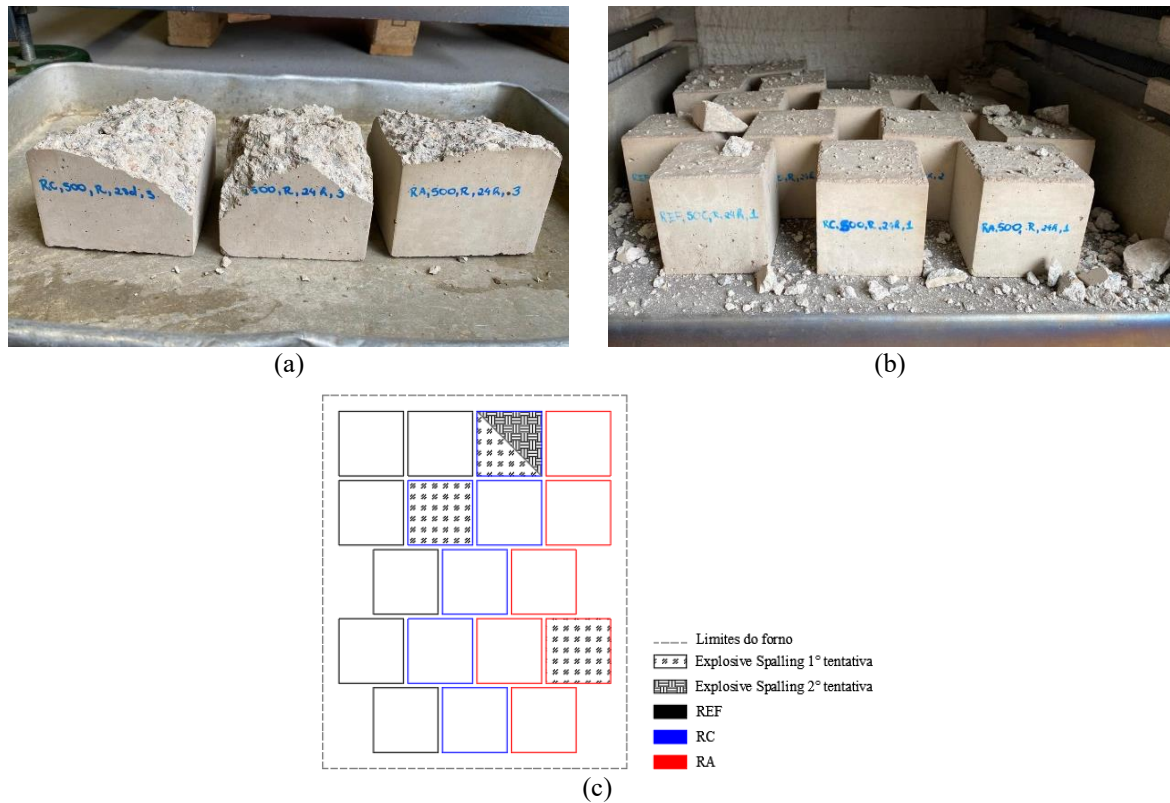


Figura 10 - Explosive spalling. (a) Provetes que romperam no ensaio a 500 °C,R; (b) Provede desintegrado na segunda tentativa a 500 °C,R; (c) Posições de rompimento dos provetes.

A introdução de terra diatomácea residual, atuando como filler devido suas partículas finas, aumentou a densidade do betão, dificultando a saída da água presente no interior dos provetes. Durante o aquecimento, a água, sem caminhos adequados para se liberar, gerou pressões internas, resultando nas explosões observadas, um fenômeno conhecido como *explosive spalling*.

Para comparar os dois tipos de arrefecimento e as temperaturas de 250 °C e 500 °C, foi realizada uma nova tentativa de aquecimento a 500 °C, reduzindo a taxa de aquecimento para 2 °C/min. Nesse ensaio, o fenômeno *explosive spalling* não foi registrado. Observou-se que, nos dias em que o *spalling* ocorreu, o clima estava chuvoso, enquanto nos dias sem *spalling* não houve precipitação.

A Figura 11 apresenta a curva de aquecimento gradual até a temperatura de 250 °C, seguida por um arrefecimento igualmente gradual. O processo de aquecimento programado no forno teve uma duração de 50 minutos, durante o qual os provetes, com diferentes composições, exibiram distintos comportamentos térmicos. Observa-se no gráfico que aos 50 min os provetes estavam com temperatura interna entre 100 °C e 150 °C e a temperatura no forno entre 250 °C e 300 °C. Após atingir a temperatura desejada, o forno foi mantido estabilizado por um período de duas

horas, até a interrupção manual do ensaio. A temperatura interna de todos os provetes atingiu os 250 °C e estabilizou após 150 min no forno. No total, a duração do ensaio foi de 170 minutos.

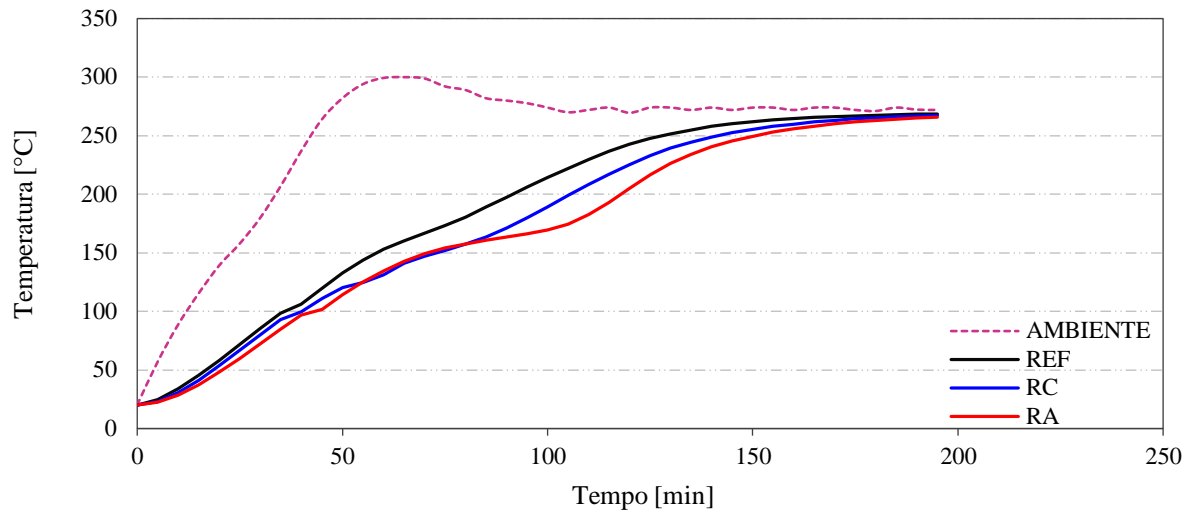


Figura 11 - Curva de aquecimento a 250 °C para arrefecimento gradual com taxa de 5 °C/min.

A Figura 12 apresenta a curva de aquecimento gradual até a temperatura de 500 °C, seguida por um arrefecimento igualmente gradual. O processo de aquecimento programado no forno teve uma duração de 100 minutos, durante o qual os provetes, com diferentes composições, exibiram comportamentos térmicos similares. Observa-se no gráfico que aos 100 min os provetes estavam com temperatura interna entre 300 °C e 350 °C e a temperatura no forno próxima aos 500 °C. Após atingir a temperatura desejada, o forno foi mantido estabilizado por um período de duas horas, até a interrupção manual do ensaio. A temperatura interna de todos os provetes atingiu os 500 °C e estabilizou após 150 min no forno. No total, a duração do ensaio foi de 220 minutos.

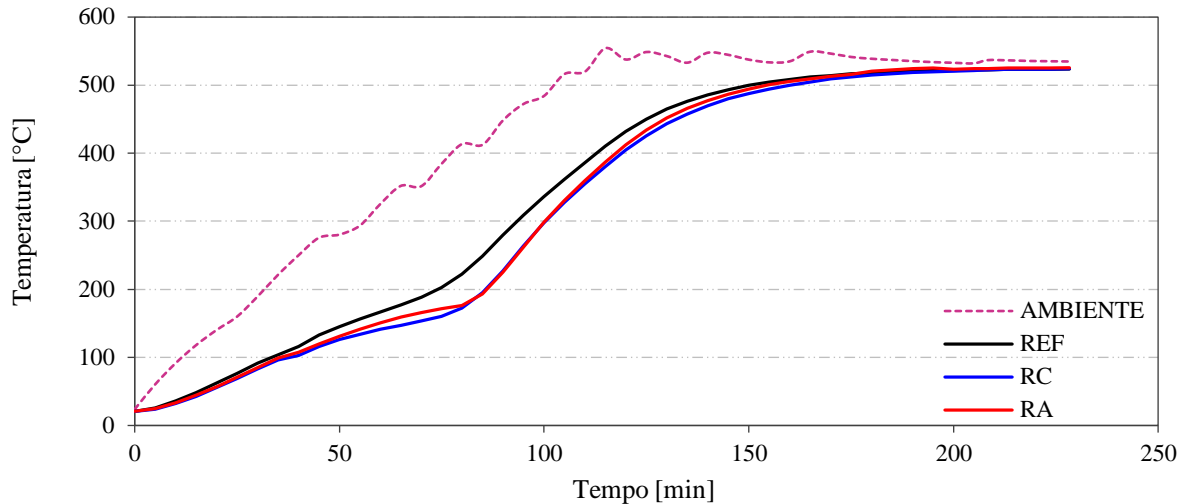


Figura 12 - Curva de aquecimento a 500° para arrefecimento gradual com taxa de 5°C/min.

A Figura 13 apresenta a curva de aquecimento gradual até a temperatura de 500 °C com taxa de aquecimento de 2 °C/min, seguida por um arrefecimento igualmente gradual. O processo de aquecimento programado no forno teve uma duração de 250 minutos, durante o qual os provetes, com diferentes composições, exibiram comportamentos térmicos similares. Observa-se no gráfico que aos 250 min os provetes estavam com temperatura interna entre 450 °C e 500 °C e a temperatura no forno próxima aos 530 °C. Após atingir a temperatura desejada, o forno foi mantido estabilizado por um período de duas horas, até a interrupção manual do ensaio. A temperatura interna de todos os provetes atingiu os 500 °C e estabilizou após 270 min no forno. No total, a duração do ensaio foi de 370 minutos.

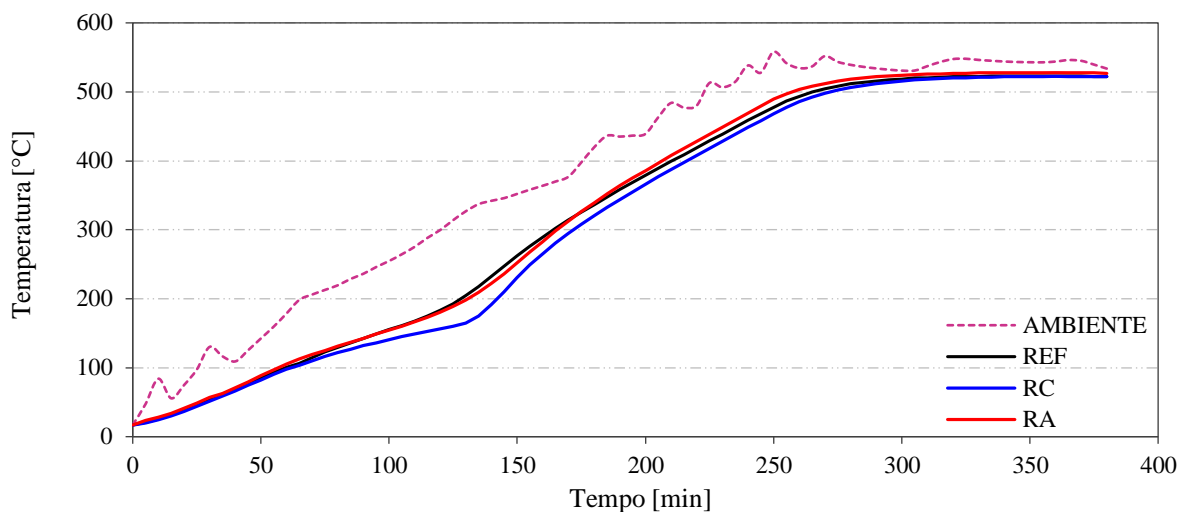


Figura 13 - Curva de aquecimento a 500° para arrefecimento gradual com taxa de 2°C/min.

Verifica-se que a temperatura interna nos provetes estabilizou no mesmo patamar ao fim dos ensaios. As leituras foram registadas a cada 5 minutos após o início do aquecimento.

Após o aquecimento, o processo de arrefecimento foi padronizado conforme os seguintes procedimentos:

- Gradual: Os provetes permaneceram por 10 minutos dentro do forno e, em seguida, foram transferidos para tabuleiros, onde permaneceram 24 horas com ventilação ambiente no laboratório (Figura 14a). Após esse período, os provetes foram pesados e seguiram para o ensaio de compressão ou retornavam para a câmara húmida por 28 dias, sendo posteriormente pesados novamente e ensaiados à compressão.
- Acelerado: Os provetes arrefeceram por 10 minutos dentro do forno e, então, foram transferidos para baldes com água à temperatura ambiente por 2 horas [48]. Em seguida, foram colocados em tabuleiros e permaneceram por 24 horas com ventilação ambiente no laboratório (Figura 14b). Após esse período, os provetes foram pesados e seguiram para o ensaio de compressão ou retornavam para a câmara húmida por 28 dias, sendo pesados novamente e ensaiados à compressão.



(a)



(b)

Figura 14 - Arrefecimentos dos provetes. (a) Gradual com ventilação natural; (b) Acelerado com imersão em água.

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foram realizadas análises estatísticas para avaliar a interação entre a resistência residual dos traços e os diferentes regimes de arrefecimento, bem como a sua evolução ao longo do tempo pós-aquecimento. Os dados foram organizados segundo a temperatura (250 °C, 350 °C e 500 °C) e distribuídos em quatro combinações, resultantes da interligação de dois períodos de ensaio (24 horas e 28 dias) com dois regimes de arrefecimento (gradual e acelerado). No caso dos traços submetidos a 500 °C, a análise concentrou-se exclusivamente nos regimes de arrefecimento, uma vez que foram submetidos a taxas de aquecimento diferenciadas (5 °C/min

para o gradual e 2 °C/min para o acelerado). A Figura 15 apresenta a distribuição destas combinações.

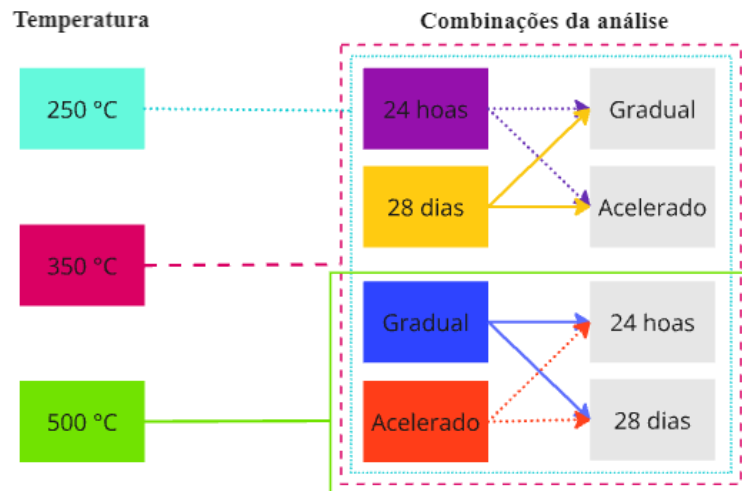


Figura 15 - Esquema das combinações para a análise estatística.

Nesta configuração, definiram-se duas vertentes de hipóteses. Na primeira, que avalia a influência do regime de arrefecimento em diferentes idades pós-arrefecimento (representadas em roxo e amarelo na Figura 15), estipulou-se que:

- $H_{0,IDADE}$: O regime de arrefecimento não tem impacto na resistência residual dos traços;
- $H_{1,IDADE}$: Pelo menos um traço apresenta uma média de resistência residual significativamente diferente entre os arrefecimentos gradual e acelerado.

Na segunda vertente, que analisa o efeito da idade do ensaio após o arrefecimento (representada em azul e vermelho na Figura 15), as hipóteses foram:

- $H_{0,ARREFECIMENTO}$: A idade de ensaio após o arrefecimento não influencia a resistência residual dos traços;
- $H_{1,ARREFECIMENTO}$: Para pelo menos um traço, a média da resistência residual difere entre os ensaios realizados a 24 horas e a 28 dias.

Inicialmente, procedeu-se à aplicação de testes que asseguram os pressupostos necessários à utilização de métodos paramétricos, cada um com uma função específica. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk avalia se os dados se distribuem de forma aproximadamente normal, garantindo que a aplicação da ANOVA, que pressupõe normalidade, seja válida. Um valor-p superior a 0,05 verifica a normalidade e inferior a 0,05 a hipótese nula é rejeitada. O teste de homogeneidade de variâncias de Levene verifica se a variância dos dados é homogênea

entre os grupos. A homogeneidade das variâncias é um pressuposto relevante para os testes paramétricos, pois assegura que as diferenças entre os grupos não são fruto de dispersões desiguais.

Por fim, a Análise de Variância (ANOVA) é aplicada para comparar as médias dos diferentes grupos. Este teste permite identificar, de forma global, se existem diferenças estatisticamente significativas entre os grupos estudados. Kessel [37] utilizou tal análise para determinar a influência entre a temperatura, a idade de cura dos provetes e a combinação dos dois fatores nas propriedades físicas de um único traço de betão de alto desempenho. Assim como neste trabalho, a análise foi desenvolvida a partir de três provetes para cada caso.

Para determinar a diferença significativa nos dados, a ANOVA avalia os seguintes parâmetros:

- Soma dos Quadrados (SQ): representa a variação dos dados em relação à média geral;
- Graus de Liberdade (gl): Refere-se ao número de valores independentes usados para calcular as estimativas;
- Média dos Quadrados (MQ): Obtida dividindo a soma dos quadrados pelo grau de liberdade correspondente;
- Estatística (F): Mede a razão entre a variabilidade explicada pelo modelo e a variabilidade residual
- Probabilidade (Valor-P): Indica a chance observar diferenças tão grandes quanto as encontradas se a hipótese nula (H_0) for verdadeira.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados do programa experimental são apresentados em quatro subtópicos. Inicialmente será discutido o efeito da incorporação da TDR nas propriedades mecânicas dos betões em temperatura ambiente. Posteriormente, serão apresentados os resultados dos betões considerando as diferentes temperaturas de aquecimento (250 °C, 350 °C e 500 °C) e, em subtópicos, a comparação entre as duas idades de pós-arrefecimento avaliadas (24 horas e 28 dias) e os dois métodos de arrefecimento (gradual e acelerado). Os valores individuais de resistência à compressão e massa para cada provete são apresentados nos Anexos A e B.

4.1 RESULTADOS À TEMPERATURA AMBIENTE (20 °C)

Para fins de comparação com o betão em condições normais, foram testados 3 provetes a temperatura ambiente para cada traço. Os valores médios de resistências à compressão estão apresentados na Figura 16. Como pode ser observado, a resistência à compressão média do traço de referência é de 20,75 MPa e de 19,96 MPa (RC) e 20,52 MPa (RA) para os traços com TDR. A redução de cimento para a incorporação da TDR possui pouco impacto na resistência à compressão pelo fato da TDR ter efeito pozolânico devido ao alto teor de sílica na sua composição, que é o principal componente de resistência mecânica no cimento [27,31,32].

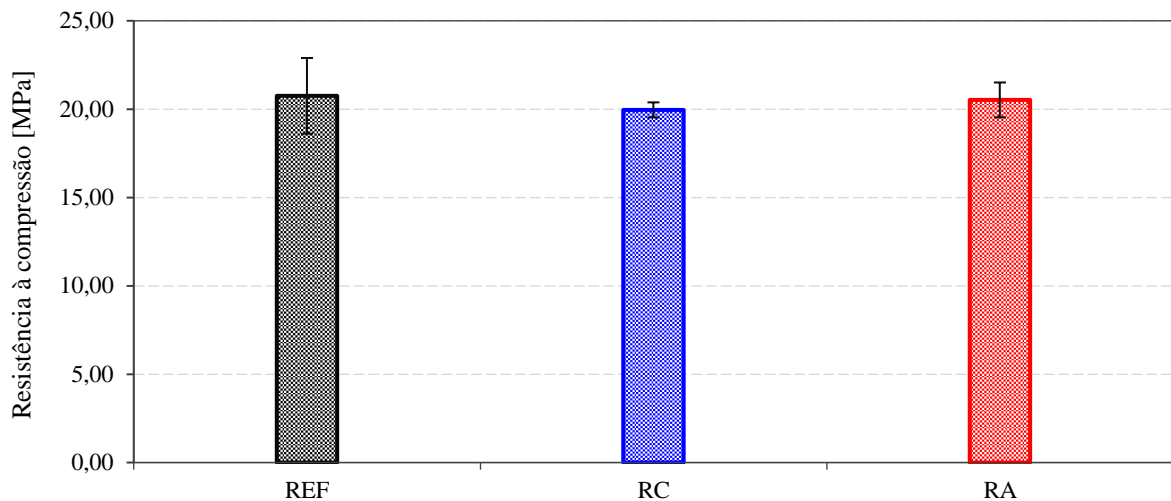


Figura 16 - Resistências à compressão em temperatura ambiente (20 °C).

A Figura 17 apresenta a comparação entre a *boxplot* obtida nos ensaios de Schincaglia [8] (TeseVS) representados em cinza, e os resultados deste estudo (TeseLM), destacados em vermelho. É importante salientar que, enquanto o referido autor avaliou 20 provetes por traço, este estudo utilizou apenas 3 provetes por traço, devido à necessidade de contemplar diversas variáveis experimentais, incluindo diferentes temperaturas, métodos de arrefecimento e tempos

de recuperação pós-exposição a altas temperaturas. Os resultados obtidos neste estudo estão em concordância com os do autor para o traço com substituição parcial do cimento (RC). No entanto, os valores observados para o traço de referência e para o traço com substituição parcial da areia (RA) apresentam discrepâncias, caracterizando-se como *outliers* em relação ao comportamento previamente documentado.

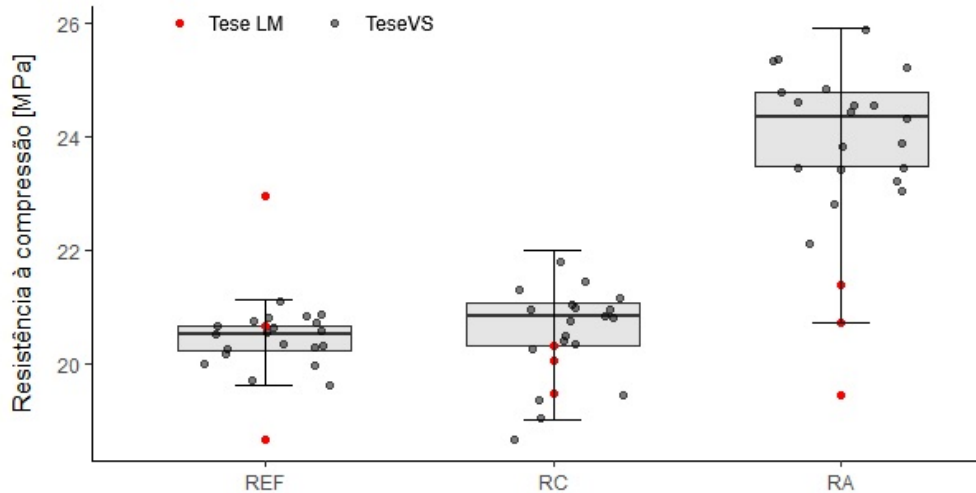


Figura 17 – Comparação por Boxplot dos resultados da literatura com os obtidos neste estudo [8].

Observa-se que os valores de resistência do traço de referência apresentam menor dispersão, enquanto os traços com substituição demonstram maior variabilidade. Essa dispersão é evidenciada pela maior distância entre a mediana e os quartis, além dos extremos (valores máximos e mínimos). Nota-se também que o traço RC exibe um *outlier* com resistência inferior à média registrada no estudo.

Para avaliar a normalidade e homogeneidade dos dados, utilizou-se exclusivamente os resultados obtidos nesta pesquisa, desconsiderando os dados de Schincaglia [8]. As análises foram conduzidas no software RStudio, empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene, e os resultados apresentados na Tabela 8 indicam que a amostra em temperatura ambiente possui distribuição normal e variância homogênea.

Tabela 8 - Resultados para teste de normalidade e homogeneidade dos dados a 20 °C.

Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
	W	Valor-p	F	Valor-p
REF	0,999	0,928		
RC	0,964	0,637	1,517	0,293
RA	0,967	0,652		

Com a confirmação da normalidade e homogeneidade dos dados (valor-p superior a 5%), procedeu-se à análise de variância (ANOVA). Os resultados, apresentados na Tabela 9, indicam que não há diferenças estatisticamente significativas entre os grupos comparados, evidenciado pelo valor-p ($p > 0,05$) que não permite a rejeição da hipótese nula. Esse dado sugere que as variações observadas nos resultados de resistência estão dentro do nível de variabilidade esperado para os ensaios.

Tabela 9 - Resultados para análise de variância dos dados a 20 °C.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Traços	1,01	2	0,50	0,26	0,78
Resíduo	11,48	6	1,91	-	-

Na Tabela 10 constam os valores médios de massa à 20 °C dos betões produzidos nesta pesquisa e, para fins comparativos, os coeficientes de variação de massa em relação ao resultados reportados por Schincaglia [8]. Inicialmente, é importante ressaltar que este parâmetro (massa) é relevante do ponto de vista de análise dos impactos de altas temperaturas na microestrutura e produtos de hidratação dos betões e, portanto, está sendo avaliado e monitorado nesse estudo. Nesse sentido, verificam-se pequenas variações nos valores médios de massa das composições RC e RA em comparação com a referência, na ordem de 0,0% a 2,0%. Desta forma e, considerando os pequenos percentuais de substituição avaliados neste estudo (até 15% em massa), tais teores não ocasionaram impactos significativos na massa dos corpos de prova produzidos.

Tabela 10 - Resultados obtidos para valores médios de massa nos provetes a 20 °C.

Traço	Massa [g]	Desvio padrão [g]	Coeficiente de variação da massa [%] *
REF	2329,83	24,61	6,17
RC	2277,37	25,95	-0,40
RA	2259,53	6,25	1,78

*Valor negativo indica massa inferior e positivo indica massa superior ao trabalho de Schincaglia [8]

Em relação à comparação com o estudo de Schincaglia [8], pelo coeficiente de variação de massa, os resultados obtidos apresentaram valores ligeiramente próximos para os traços RC e RA, com uma diferença de aproximadamente 6,0% para REF em comparação com o trabalho desenvolvido pelo referido autor. Essa variação pode ser decorrente do processo de moldagem do provete, pois, apesar de ser seguida a normativa que padroniza a maneira correta para

enchimento dos moldes, há particularidades pessoais no manuseio e enchimento dos moldes que interferem na massa final do provete.

Com base nesses resultados, foi analisado o comportamento dos provetes submetidos a diferentes patamares de temperatura, considerando as variações de massa e a resistência residual à compressão para os modos de arrefecimento gradual e acelerado, como será apresentado nos subitens a seguir do trabalho.

4.2 RESULTADOS À TEMPERATURA DE 250 °C

Na Figura 18 demonstra-se os valores de resistência à compressão em comparação com o comportamento dos provetes aquecidos a 250 °C, considerando os diferentes regimes de arrefecimento (identificados como: gradual = G, acelerado = A) e idades de ensaio. Observa-se um leve aumento na resistência residual à compressão após 24 horas de arrefecimento gradual em comparação com a resistência obtida em temperatura ambiente, de 8,43% no traço de referência (REF), 1,90% no traço com substituição parcial do cimento (RC) e 9,50% no traço com substituição parcial da areia (RA). Esse comportamento pode ser atribuído ao fenômeno de reidratação das partículas de sílica, típico do intervalo de 200 °C a 300 °C [36].

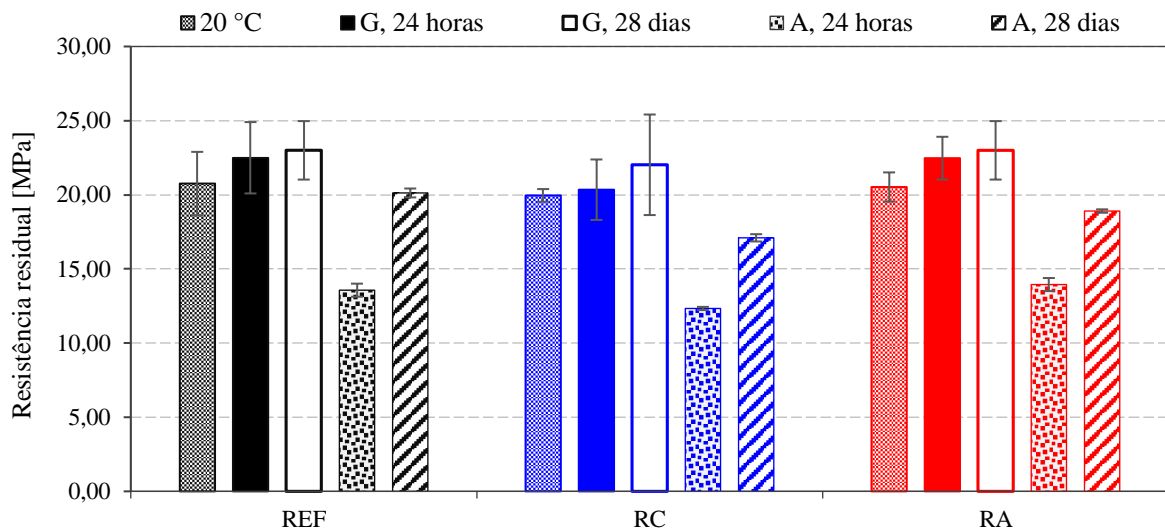


Figura 18 - Resistência residual à compressão após exposição a 250 °C.

Em todos os casos, a resistência residual dos provetes submetidos ao arrefecimento acelerado foi inferior à dos arrefecidos gradualmente. Quanto à idade de ensaio após o arrefecimento, verificou-se um ganho de resistência aos 28 dias em todos os traços, sendo que os provetes submetidos ao arrefecimento acelerado apresentaram maiores aumentos na resistência residual ao longo do tempo. O desvio padrão para o arrefecimento acelerado variou entre 0,1 e 0,5 MPa,

enquanto que, para o arrefecimento gradual, a variação situou-se entre 1,4 e 3,4 MPa. Em situações de incêndio controlado com água – onde o choque térmico provoca rápida diminuição da resistência – verifica-se a necessidade de evacuação, entretanto, a recuperação da resistência permite posteriormente reocupação da edificação mediante avaliação da estrutura.

Como demonstrado na Figura 19 e na Figura 20, os provetes arrefecidos gradualmente apresentaram maior perda de massa que os arrefecidos em água, devido à evaporação da água durante o aquecimento, que gera vazios parcialmente preenchidos na imersão para arrefecimento [pesada após 24 horas). Ao longo do tempo, com o regime de espera em câmara húmida favorecendo a reidratação, os provetes arrefecidos gradualmente recuperaram parte da massa, enquanto os arrefecidos em água continuaram a perdê-la ao fim dos 28 dias; observa-se ainda que o desvio padrão da massa variou, em geral, entre 5 e 25 g, excetuando-se a composição de referência (REF), que apresentou 32 g após 24 horas de arrefecimento acelerado.

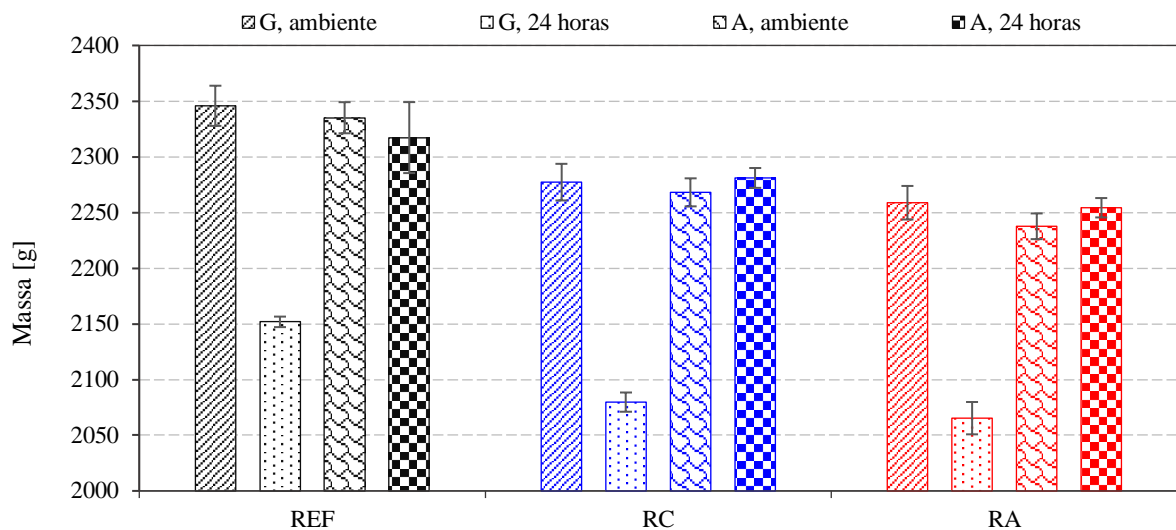


Figura 19 - Massa dos provetes expostos a 250 °C rompidos 24 horas após arrefecimento.

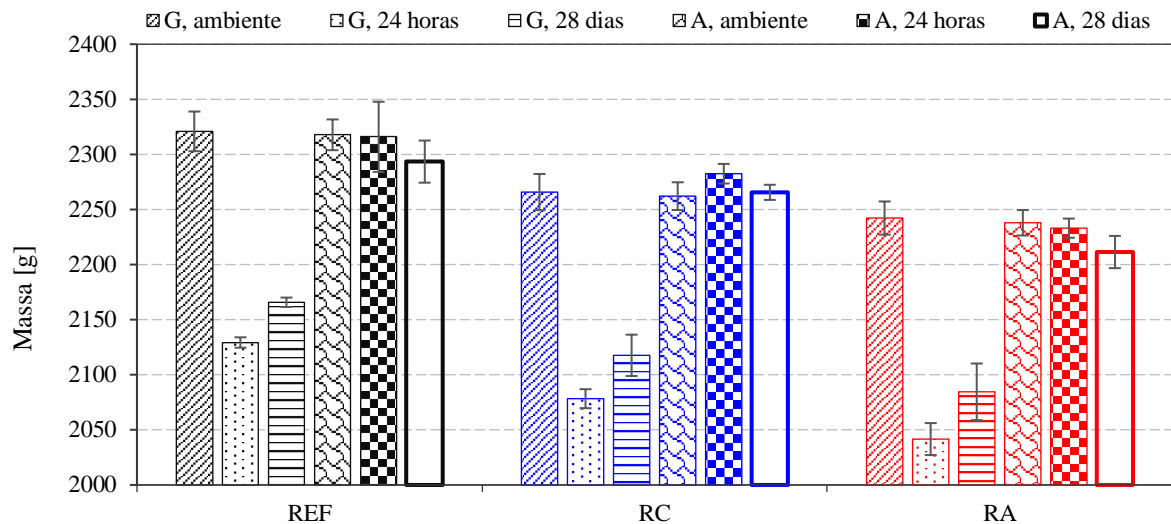


Figura 20 - Massa dos provetes expostos a 250 °C rompidos 28 dias após arrefecimento.

Após análise geral dos efeitos na massa e resistência residual dos provetes aquecidos a 250 °C, segue-se a análise da interação entre tipo de arrefecimento e resistência residual obtida nas diferentes idades pós arrefecimento conforme as combinações propostas na Figura 15.

4.2.1 Relação entre diferentes arrefecimentos após 24 horas

Diferentemente dos resultados para os provetes ensaiados em temperatura ambiente, o índice de normalidade (W) para os provetes rompidos 24 horas após a exposição a 250 °C apresentou valores próximos a 0, ou seja, estes dados se afastam da normalidade. Entretanto, como o valor-p está acima de 0,05, assume-se que a distribuição é normal. A Tabela 11 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene.

Tabela 11 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes arrefecimentos em 24 horas.

Arrefecimento	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		W	Valor-p	F	Valor-p
Gradual	REF	0,445	0,918	0,935	0,493
	RC	0,561	0,948		
	RA	0,119	0,802		
Acelerado	REF	0,875	0,996		
	RC	0,266	0,860		
	RA	0,875	0,996		

Os resultados, apresentados na Tabela 12, indicam que quando analisado isoladamente, o método de arrefecimento influencia significativamente a resistência residual após 24 horas (p

$< 0,05$), evidenciando o efeito desse fator sobre o comportamento mecânico do betão. Não há diferenças estatisticamente significativas entre os traços analisados, uma vez que o valor-p obtido ($p > 0,05$) não rejeita a hipótese nula. Isso sugere que as variações observadas na resistência residual não apresentam evidências estatísticas de distinção entre o traço de referência (REF) e os traços com incorporação de TDR (RC e RA). Além disso, a interação entre os fatores traço e tipo de arrefecimento não revelou efeitos significativos, indicando que o impacto do regime de arrefecimento sobre a resistência residual é consistente entre os diferentes traços.

Tabela 12 - Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Arrefecimento	324,20	1	324,2	156,61	$3,03 \cdot 10^{-8}$
Traço	12,80	2	6,40	3,09	0,08
Interação	0,60	2	0,30	0,15	0,85
Resíduo	24,80	12	2,10	-	-

4.2.2 Relação entre diferentes arrefecimentos após 28 dias

Com resultados próximos aos resultados para os provetes ensaiados em temperatura ambiente, o índice de normalidade (W) para os provetes rompidos 28 dias após a exposição a 250 °C apresentou valores próximos a 1, ou seja, estes dados se aproximam da normalidade. Este fator alinhado com o valor-p acima de 0,05, assume-se que a distribuição é normal. A Tabela 13 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene.

Tabela 13 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes arrefecimentos em 28 dias.

<i>Arrefecimento</i>	<i>Composição</i>	<i>Shapiro-Wilk</i>		<i>Levene</i>	
		<i>W</i>	<i>Valor-p</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Gradual	REF	0,963	0,631	1,608	0,232
	RC	0,962	0,625		
	RA	0,963	0,631		
Acelerado	REF	0,998	0,927		
	RC	0,801	0,117		
	RA	0,999	0,952		

Os resultados, apresentados na Tabela 14, indicam que para a idade de 28 dias após o arrefecimento, há diferença estatística entre os métodos de arrefecimento, ou seja, o regime escolhido possui impacto na resistência residual do betão. Não há diferenças estatisticamente significativas entre os traços, evidenciado pelo valor-p ($p > 0,05$) que não rejeita a hipótese nula. Esse dado sugere que as variações observadas nos resultados de resistência residual são estatisticamente iguais entre o traço de referência (REF) e os com incorporação da TDR (RC e RA). A combinação dos dois fatores (traço e tipo de arrefecimento) sugerem que o efeito do método de arrefecimento sobre a resistência residual é consistente entre os diferentes traços.

Tabela 14 - Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Arrefecimento	70,73	1	70,73	21,84	$2,38 \cdot 10^{-4}$
Traço	12,61	2	6,30	1,95	0,19
Interação	3,20	2	1,60	0,50	0,62
Resíduo	38,86	12	3,24	-	-

4.2.3 Relação entre diferentes idades após arrefecimento gradual

Com resultados próximos aos resultados para os provetes ensaiados em temperatura ambiente, o índice de normalidade (W) para os provetes arrefecidos gradualmente após a exposição a 250 °C apresentou valores próximos a 1, ou seja, estes dados aproximam-se da normalidade. Alinhando este fator com o valor-p acima de 0,05, permite assumir que a distribuição é normal. A Tabela 15 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene.

Tabela 15 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual.

Idade	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		W	Valor-p	F	Valor-p
24 horas	REF	0,918	0,445	0,385	0,849
	RC	0,948	0,561		
	RA	0,802	0,119		
28 dias	REF	0,997	0,895		
	RC	0,962	0,625		
	RA	0,963	0,631		

Os resultados, apresentados na Tabela 16, mostram que tempo entre os ensaios de resistência não possui diferença estatisticamente relevante na resistência residual dos traços avaliados para o arrefecimento gradual (valor-p > 0,05). Não há diferenças estatisticamente significativas entre os traços comparados, evidenciado pelo valor-p ($p > 0,05$) que não rejeita da hipótese nula. Esse dado sugere que as variações observadas nos resultados de resistência residual são estatisticamente iguais entre o traço de referência (REF) e os com incorporação da TDR (RC e RA). A combinação dos dois fatores (traço e idade pós-arrefecimento) não refutam a hipótese nula e sugerem que o efeito ao longo dos dias sobre a resistência residual é consistente entre os diferentes traços.

Tabela 16 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Idade	2,49	1	2,49	0,53	0,48
Traço	8,42	2	4,21	0,89	0,44
Interação	2,16	2	1,08	0,23	0,80
Resíduo	56,79	12	4,73	-	-

4.2.3 Relação entre diferentes idades após arrefecimento acelerado

Com resultados próximos aos resultados para os provetes ensaiados em temperatura ambiente, o índice de normalidade (W) para os provetes arrefecidos gradualmente após a exposição a 250 °C apresentou valores próximos a 1, ou seja, estes dados aproximam-se da normalidade. Alinhando este fator com o valor-p acima de 0,05, permite assumir que a distribuição é normal. A Tabela 17 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade.

Tabela 17 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento acelerado.

<i>Idade</i>	<i>Composição</i>	<i>Shapiro-Wilk</i>		<i>Levene</i>	
		<i>W</i>	<i>Valor-p</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
24 horas	REF	0,996	0,875	0,796	0,573
	RC	0,860	0,266		
	RA	0,996	0,875		
28 dias	REF	0,998	0,927		
	RC	0,801	0,117		
	RA	0,999	0,952		

Os resultados, apresentados na Tabela 18, indicam que há diferenças estatisticamente significativas para todas as análises, evidenciado pelo valor-p ($p > 0,05$). Esse dado sugere que as variações observadas nos resultados de resistência residual são estatisticamente irregulares entre as idades de ensaio após o arrefecimento acelerado, entre o traço de referência (REF) e os com incorporação da TDR (RC e RA) e que a combinação desses dois fatores causa impactos somados na resistência residual do provete - estão relacionados.

Tabela 18 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento acelerado.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Idade	132,46	1	132,46	1408,45	$8,23 \cdot 10^{-14}$
Traço	15,27	2	7,64	81,21	$1,06 \cdot 10^{-7}$
Interação	2,91	2	1,45	15,45	$4,79 \cdot 10^{-4}$
Resíduo	1,13	12	0,09	-	-

4.3 RESULTADOS À TEMPERATURA DE 350 °C

Na Figura 21 demonstra-se os valores de resistência à compressão em comparação com o comportamento dos provetes aquecidos a 350 °C, considerando os diferentes regimes de arrefecimento (identificados como: gradual = G, acelerado = A) e idades de ensaio. Observa-se um leve aumento na resistência residual à compressão, de 2,29%, no traço com substituição parcial da areia (RA) após 28 dias do arrefecimento gradual em comparação com a resistência obtida para o traço em temperatura ambiente. Esse comportamento, apesar de isolado, pode ser atribuído ao fenômeno de reidratação das partículas de sílica, típico do intervalo de 200 °C a 300 °C [36]. Estes ensaios foram interrompidos durante o aquecimento com o leitor de temperatura do forno marcava 350 °C devido ao *spalling* ocorrido, logo a temperatura interna dos provetes estava inferior a esta.

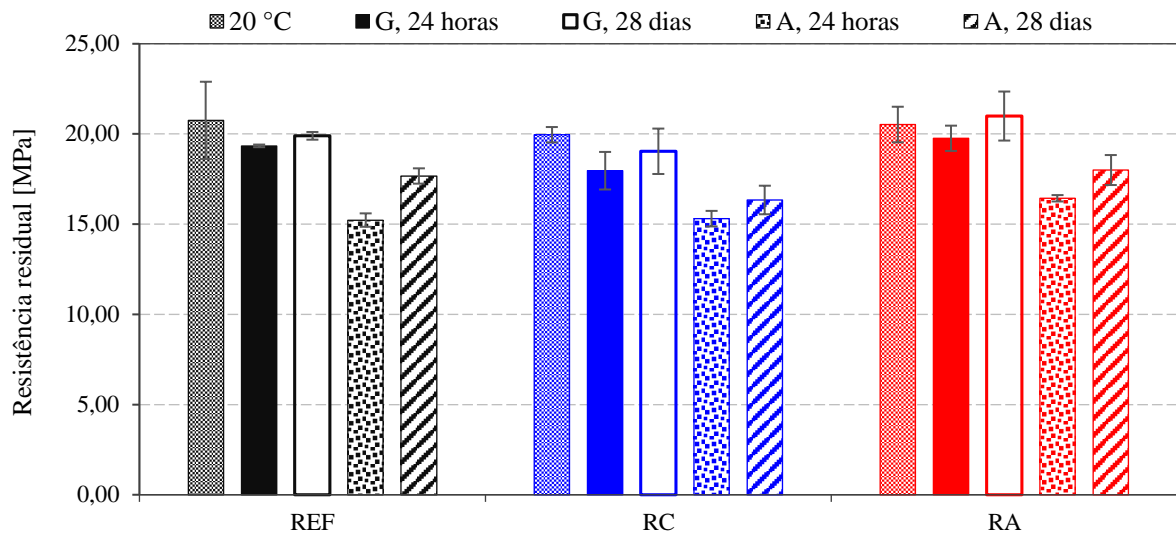


Figura 21 - Resistência residual à compressão após exposição a 350 °C.

Em todos os casos, a resistência residual dos provetes submetidos ao arrefecimento acelerado foi inferior à dos arrefecidos gradualmente. Quanto à idade de ensaio após o arrefecimento, verificou-se um ganho de resistência aos 28 dias em todos os traços, sendo que os provetes submetidos ao arrefecimento acelerado apresentaram maiores aumentos na resistência residual ao longo do tempo. O desvio padrão para o arrefecimento acelerado variou entre 0,1 e 0,8 MPa, enquanto que, para o arrefecimento gradual, a variação situou-se entre 0,1 e 1,4 MPa.

Como demonstrado na Figura 22 e na Figura 23, os provetes arrefecidos gradualmente apresentaram maior perda de massa que os arrefecidos em água, devido à evaporação da água durante o aquecimento, que gera vazios parcialmente preenchidos na imersão para arrefecimento (pesada após 24 horas). Ao longo do tempo, com o regime de espera em câmara húmida favorecendo a reidratação, os provetes arrefecidos gradualmente recuperaram parte da massa, enquanto os arrefecidos em água apresentaram massa ao fim dos 28 dias próxima a massa antes do aquecimento; observa-se ainda que o desvio padrão da massa variou, em geral, entre 1 e 28 g, com maior concentração de desvio na casa das 10 a 17 g.

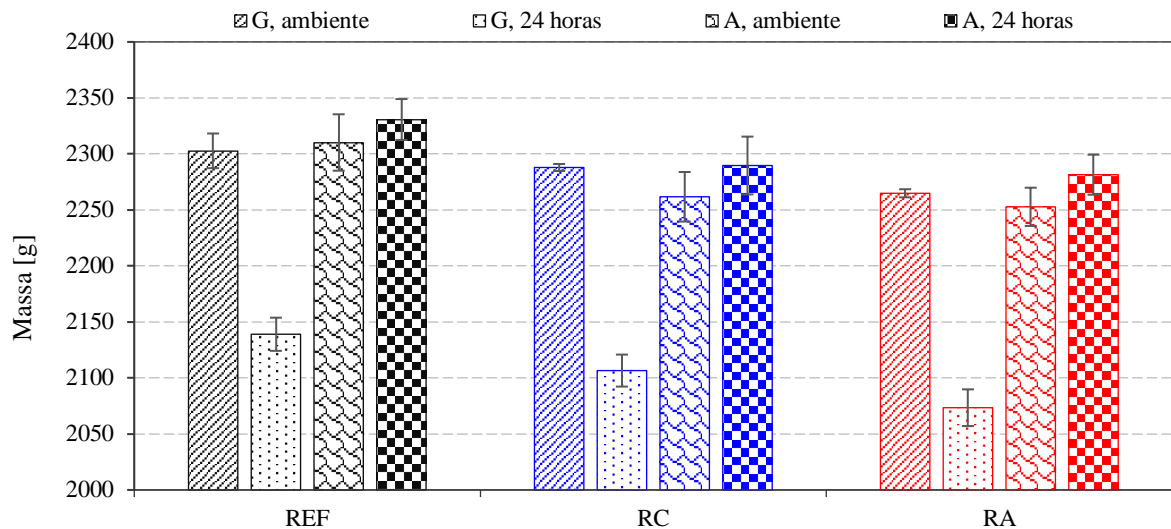


Figura 22 - Massa dos provetes expostos a 350 °C rompidos 24 horas após arrefecimento.

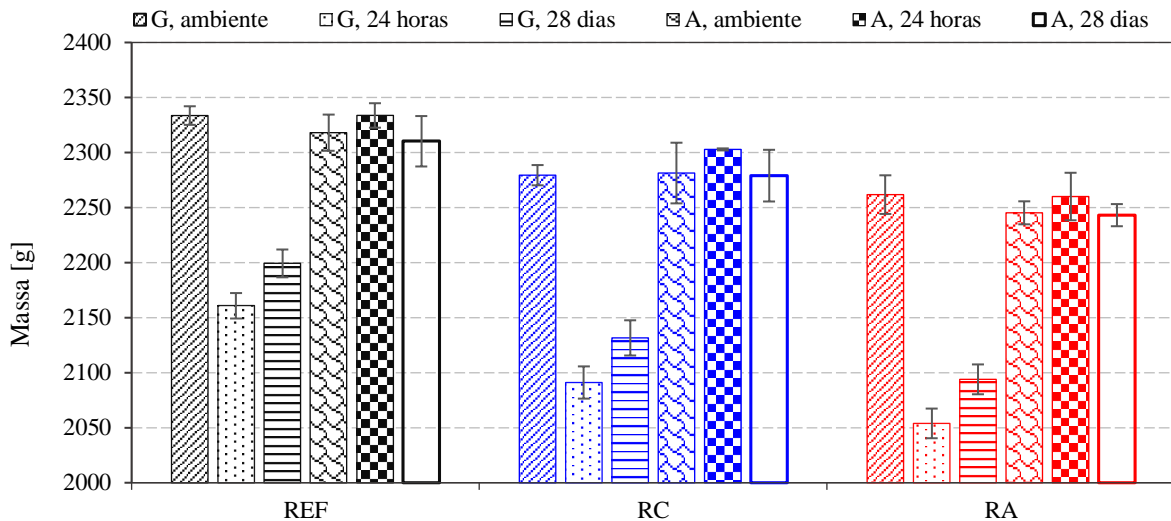


Figura 23 - Massa dos provetes expostos a 350 °C rompidos 28 dias após arrefecimento.

Após análise geral dos efeitos na massa e resistência residual dos provetes aquecidos a 350 °C, segue-se a análise da interação entre tipo de arrefecimento e resistência residual obtida nas diferentes idades pós arrefecimento conforme as combinações propostas na Figura 15.

4.3.1 Relação entre diferentes arrefecimentos após 24 horas

Diferentemente dos resultados para os provetes ensaiados em temperatura ambiente, o índice de normalidade (W) para os provetes rompidos 24 horas após a exposição a 350 °C apresentou valores próximos a 1, ou seja, estes dados se aproximam da normalidade. Entretanto, como o valor-p está acima de 0,05, assume-se que a distribuição é normal. A Tabela 19 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene. Os traços com incorporação de TDR (RC e RA) não foram avaliados no teste de

Shapiro-Wilk devido ao *spalling* ocorrido durante o aquecimento que diminuiu a quantidade de provetes para 2 por traço, sendo esta quantidade insuficiente para aplicação do método.

Tabela 19 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes arrefecimentos em 24 horas.

Arrefecimento	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		W	Valor-p	F	Valor-p
Gradual	REF	0,942	0,537	0,548	0,737
	RC	0,850	0,239		
	RA	0,872	0,301		
Acelerado	REF	0,884	0,335		
	RC	NA*	NA*		
	RA	NA*	NA*		

*NA = Não se aplica, pois, o Teste de Shapiro-Wilk exige no mínimo 3 amostras

Os resultados, apresentados na Tabela 20, indicam que há diferenças estatisticamente significativas entre os traços comparados e entre os regimes de arrefecimento, evidenciado pelo valor-p ($p < 0,05$), fato este que está alinhado com o *spalling* ocorrido apenas nos traços com incorporação da TDR. A combinação dos dois fatores (traço e tipo de arrefecimento) é estatisticamente igual em todos os casos.

Tabela 20 - Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas.

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor -p
Arrefecimento	46,24	1	46,24	126,37	$5,39 \cdot 10^{-7}$
Traço	5,86	2	2,93	8,00	$8,40 \cdot 10^{-3}$
Interação	1,43	2	0,71	1,95	0,19
Resíduo	3,66	10	0,37	-	-

4.3.2 Relação entre diferentes arrefecimentos após 28 dias

Com resultados próximos aos resultados para os provetes ensaiados em temperatura ambiente, o índice de normalidade (W) para os provetes rompidos 28 dias após a exposição a 250 °C apresentou valores próximos a 1, ou seja, estes dados se aproximam da normalidade. Este fator alinhado com o valor-p acima de 0,05, assume-se que a distribuição é normal. A Tabela 21 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene. O traço com redução de cimento (RC) não foi avaliado no teste de

Shapiro-Wilk devido ao spalling ocorrido durante o aquecimento que diminuiu a quantidade de provetes para apenas 2, sendo esta quantidade insuficiente para aplicação do método.

Tabela 21 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes arrefecimentos em 28 dias.

Arrefecimento	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		W	Valor-p	F	Valor-p
Gradual	REF	0,964	0,637	0,814	0,566
	RC	NA*	NA*		
	RA	0,922	0,461		
Acelerado	REF	0,780	0,068		
	RC	NA*	NA*		
	RA	0,902	0,393		

Os resultados, apresentados na Tabela 22, indicam que há diferenças estatisticamente significativas entre os traços comparados e entre os regimes de arrefecimento, evidenciado pelo valor-p ($p < 0,05$), fato este que está alinhado com o *spalling* ocorrido apenas nos traços com incorporação da TDR. A combinação dos dois fatores (traço e tipo de arrefecimento) é estatisticamente igual em todos os casos.

Tabela 22 - Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas.

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Arrefecimento	27,72	1	27,72	35,82	$1,35 \cdot 10^{-4}$
Traço	7,83	2	3,92	5,06	$3,03 \cdot 10^{-2}$
Interação	0,45	2	0,22	0,29	0,75
Resíduo	7,74	10	0,77	-	-

4.3.3 Relação entre diferentes idades após arrefecimento gradual

Com resultados próximos aos resultados para os provetes ensaiados em temperatura ambiente, o índice de normalidade (W) para os provetes arrefecidos gradualmente após a exposição a 350 °C apresentou valores próximos a 1, ou seja, estes dados aproximam-se da normalidade. Alinhando este fator com o valor-p acima de 0,05, permite assumir que a distribuição é normal. A Tabela 23 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene. O traço com redução de cimento (RC) para 28 dias não foi avaliado no teste de Shapiro-Wilk devido ao *spalling* ocorrido durante o aquecimento que

diminuiu a quantidade de provetes para apenas 2, sendo esta quantidade insuficiente para aplicação do método.

Tabela 23 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual.

Idade	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		W	Valor-p	F	Valor-p
24 horas	REF	0,942	0,537	0,796	0,573
	RC	0,850	0,239		
	RA	0,872	0,301		
28 dias	REF	0,964	0,637		
	RC	NA*	NA*		
	RA	0,922	0,461		

Os resultados, apresentados na Tabela 24, indicam que há diferenças estatisticamente significativas entre comparados, evidenciado pelo valor-p ($p < 0,05$) que rejeita a hipótese nula. Esse dado sugere que as variações observadas nos resultados de resistência residual são estatisticamente diferentes entre os traços. A combinação dos dois fatores (traço e tipo de arrefecimento) não possui efeito somatório, ou seja, não estão correlacionadas.

Tabela 24 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual.

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Idade	4,87	1	4,87	6,28	$2,92 \cdot 10^{-2}$
Traço	9,69	2	4,85	6,25	$1,54 \cdot 10^{-2}$
Interação	0,37	2	0,19	0,24	0,79
Resíduo	8,53	11	0,78	-	-

4.3.4 Relação entre diferentes idades após arrefecimento acelerado

Com resultados próximos aos resultados para os provetes ensaiados em temperatura ambiente, o índice de normalidade (W) para os provetes arrefecidos gradualmente após a exposição a 250 °C apresentou valores próximos a 1, ou seja, estes dados aproximam-se da normalidade. Alinhando este fator com o valor-p acima de 0,05, permite assumir que a distribuição é normal. A Tabela 25 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene. O traço com redução de cimento (RC) para as duas idades e o traço com redução de areia (RA) para 28 dias não foram avaliados no teste de Shapiro-Wilk

devido ao *spalling* ocorrido durante o aquecimento que diminuiu a quantidade de provetes para apenas 2, sendo esta quantidade insuficiente para aplicação do método.

Tabela 25 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento acelerado.

Idade	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		W	Valor-p	F	Valor-p
24 horas	REF	0,780	0,068	0,796	0,573
	RC	NA*	NA*		
	RA	0,902	0,393		
28 dias	REF	0,884	0,335		
	RC	NA*	NA*		
	RA	NA*	NA*		

Os resultados, apresentados na Tabela 26, indicam que há diferenças estatisticamente significativas para a idade de ensaio após o arrefecimento e os traços, evidenciado pelo valor-p ($p < 0,05$). Entretanto, a combinação dos dois fatores (traço e idade) apesar de próxima do limite, ainda está maior que 0,05, não sugerindo que a soma dos dois fatores tem efeito desigual na resistência residual.

Tabela 26 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento acelerado.

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Idade	11,49	1	11,49	45,71	$8,26 \cdot 10^{-5}$
Traço	5,74	2	2,87	11,41	$3,40 \cdot 10^{-5}$
Interação	2,09	2	1,04	4,15	0,053
Resíduo	2,26	9	0,25	-	-

4.4 RESULTADOS À TEMPERATURA DE 500 °C

Na Figura 18 demonstra-se os valores de resistência à compressão em comparação com o comportamento dos provetes aquecidos a 500 °C, considerando os diferentes regimes de arrefecimento (identificados como: gradual = G, acelerado = A) e idades de ensaio. Observa-se que para os dois métodos de arrefecimento houve redução de resistência residual em 24 horas, com maior redução para o arrefecimento acelerado. Entretanto, aos 28 dias os provetes arrefecidos gradualmente continuaram a perder resistência enquanto os provetes arrefecidos em água recuperaram a resistência observada antes do aquecimento, chegando a ganhar resistência

no caso dos provetes de referência (REF) e dos com substituição parcial da areia por TDR (RA). Ressalta-se que os provetes foram submetidos a ensaios de aquecimento em grupos, conforme o método adotado. Nos ensaios a 500 °C, os provetes foram expostos a taxas de aquecimento distintas – 5 °C/min para o aquecimento gradual e 2 °C/min para o aquecimento acelerado. Essa diferença na curva de aquecimento pode influenciar o comportamento da resistência residual do betão, pois taxas de aquecimento mais brandas proporcionam um tempo maior para o desenvolvimento das reações químicas e para a evaporação da água presente na matriz. O comportamento apresentado para o arrefecimento gradual está alinhado com estudos prévios, que indicam que a degradação progressiva do betão em temperaturas extremas resulta, principalmente, da desidratação irreversível dos compostos hidratados, como o hidróxido de cálcio, e do aumento das microfissuras internas [34,36]. Tais alterações comprometem a integridade estrutural do material, limitando sua capacidade de recuperação mesmo após períodos prolongados de cura em ambientes húmidos.

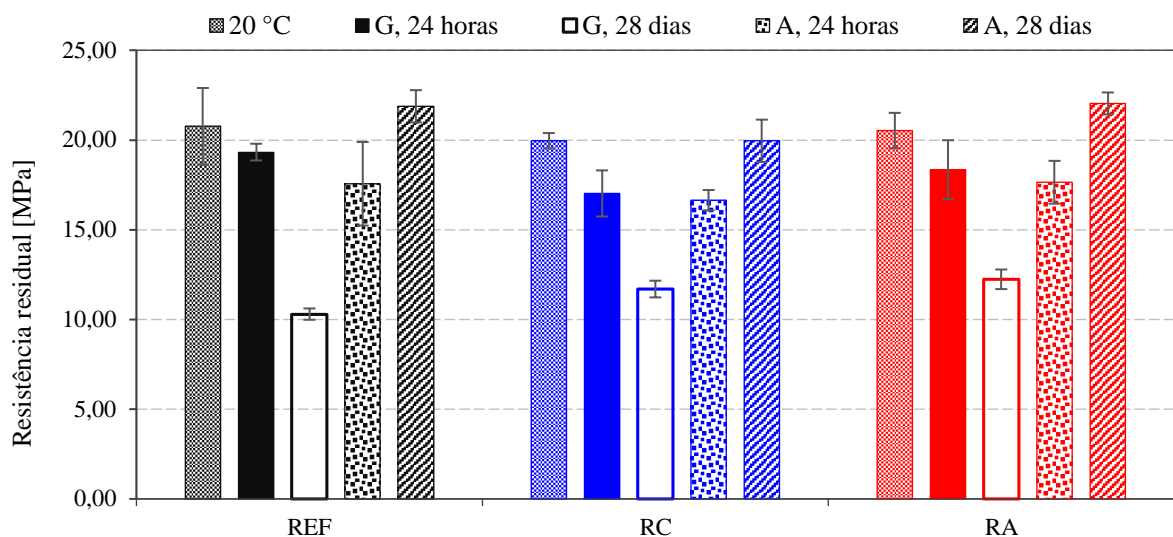


Figura 24 - Resistência residual à compressão após exposição a 500 °C.

O desvio padrão para o arrefecimento acelerado variou entre 1 e 2,3 MPa, enquanto que, para o arrefecimento gradual, a variação situou-se entre 0,3 e 1,7 MPa. Em situações de incêndio, a taxa de aquecimento é elevada e descontrolada, portanto o arrefecimento gradual pode ser um problema sério com o passar do tempo visto que a tendência é de perda progressiva da resistência residual. Como a taxa de aquecimento para o arrefecimento acelerado foi reduzida, são necessários maiores estudos para determinar o comportamento da resistência residual ao longo do tempo.

Como demonstrado na Figura 19 e na Figura 20, os provetes arrefecidos gradualmente apresentaram maior perda de massa que os arrefecidos em água, devido à evaporação da água

durante o aquecimento, que gera vazios parcialmente preenchidos na imersão para arrefecimento (pesada após 24 horas). Ao longo do tempo, com o regime de espera em câmara húmida favorecendo a reidratação, os provetes arrefecidos gradualmente recuperaram parte da massa, enquanto os arrefecidos em água continuaram a perdê-la ao fim dos 28 dias; observa-se ainda que o desvio padrão da massa variou, em geral, entre 3 e 30 g, com maior concentração de desvio entre 10 e 20 g.

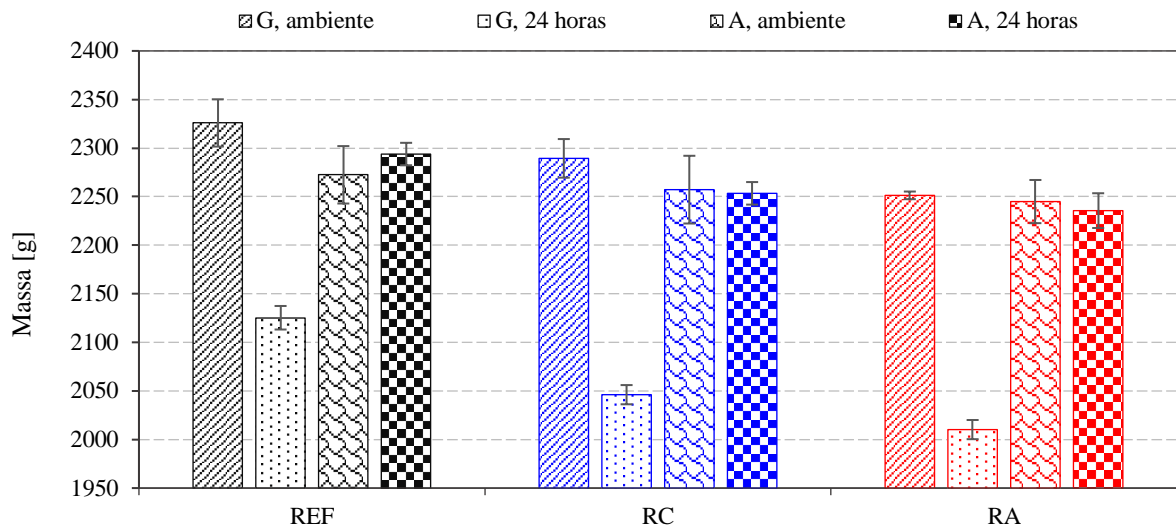


Figura 25 - Massa dos provetes expostos a 500 °C rompidos 24 horas após arrefecimento.

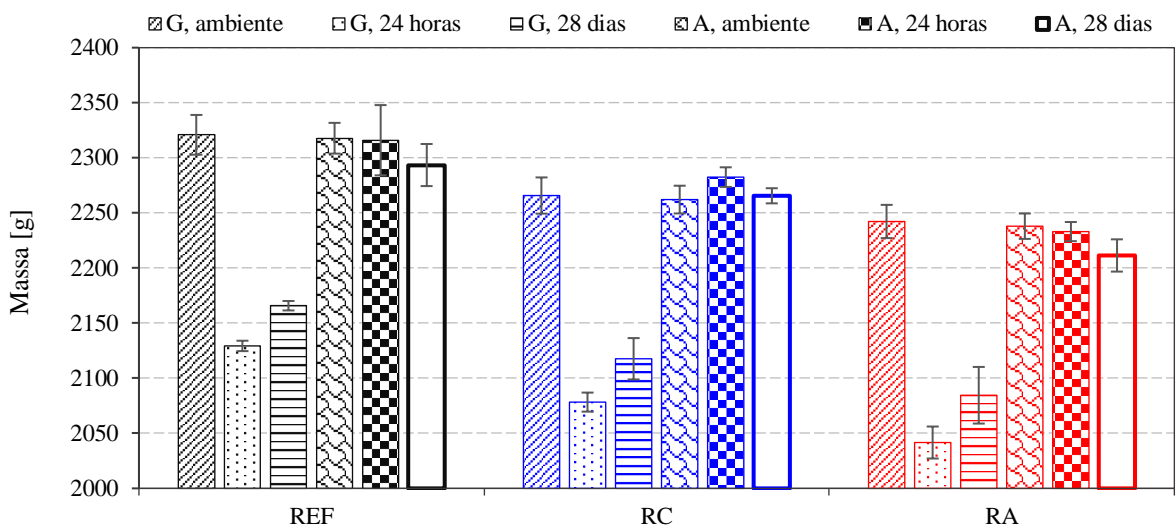


Figura 26 - Massa dos provetes expostos a 500 °C rompidos 28 dias após arrefecimento.

Outra observação feita nos provetes ensaios a 500 °C foi a presença de fissuras visíveis distribuídas em todas as suas faces após o aquecimento, independentemente do traço, (Figura 27 e Figura 28). Essas fissuras são características típicas da resposta do betão ao estresse térmico, que surgem devido à dilatação diferencial entre os seus constituintes durante o aquecimento, especialmente a pasta cimentícia e os agregados. Quando expostos a temperaturas

elevadas, o betão sofre um aumento diferencial no volume de seus componentes, gerando tensões de tração internas que ao superarem a resistência a tração do betão resultam em fissurações [42]. Este comportamento é amplificado nas altas temperaturas, como demonstrado nos provetes a 500 °C, e apresenta maiores danos conforme a temperatura de exposição cresce. Comportamento similar também foi observado por Maharani, Hasan e Saidi [42] ao avaliarem a resistência a altas temperaturas de betão de alto desempenho com incorporação de fibras e TDR para as temperaturas de 500 °C e 600 °C.

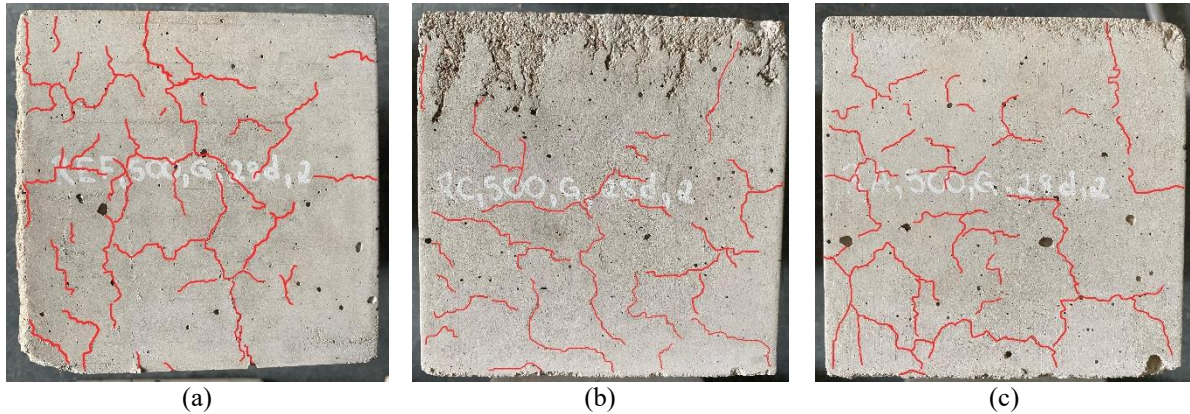


Figura 27 - Fissuração dos provetes após aquecimento a 500 °C com taxa de aquecimento de 5 °C/min. (a) Referência; (b) Redução de cimento; (c) Redução de areia.

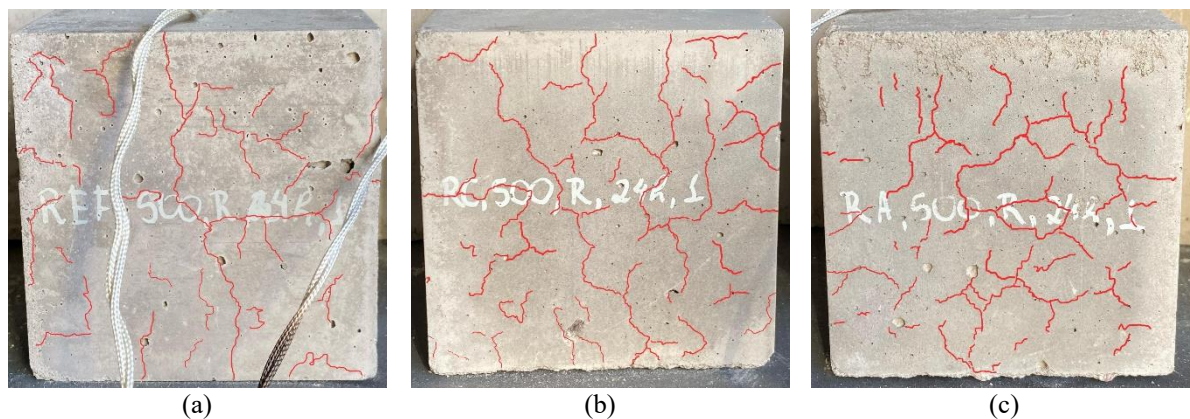


Figura 28 - Fissuração dos provetes após aquecimento a 500 °C com taxa de aquecimento de 2 °C/min. (a) Referência; (b) Redução de cimento; (c) Redução de areia.

Adicionalmente, todos os provetes expostos a uma taxa de aquecimento reduzida de 2 °C/min (Figura 28) apresentaram um padrão de fissuração semelhante ao observado nos provetes com adição de TDR com taxa de aquecimento de 5 °C/min (Figura 27), evidenciando a relação entre a taxa de aquecimento e o comportamento térmico do material. Essa observação reforça a importância da taxa de aquecimento no comportamento térmico do betão, uma vez que taxas mais lentas favorecem uma redistribuição gradual das tensões internas. Esse processo ajuda a

mitigar os danos causados por choques térmicos, reduzindo a propagação das fissuras e aumentando a estabilidade do material [42].

Os maiores danos foram observados no aquecimento a 500 °C, com uma taxa de 5 °C/min. Ao fim dos 28 dias em cura pós aquecimentos, os provetes apresentaram a formação de fissuras com espessura aproximada de 1 mm nos três provetes do traço de referência (Figura 29). Em comparação com os provetes de referência, os provetes com incorporação de TDR exibiram uma maior quantidade de fissuras distribuídas em formato de mapa em todas as faces, sem predominância de espessuras. Esse comportamento pode ser atribuído à influência das partículas de sílica amorfa na redistribuição das tensões térmicas, o que sugere que a incorporação de TDR contribui positivamente para a coesão do betão [41,42].

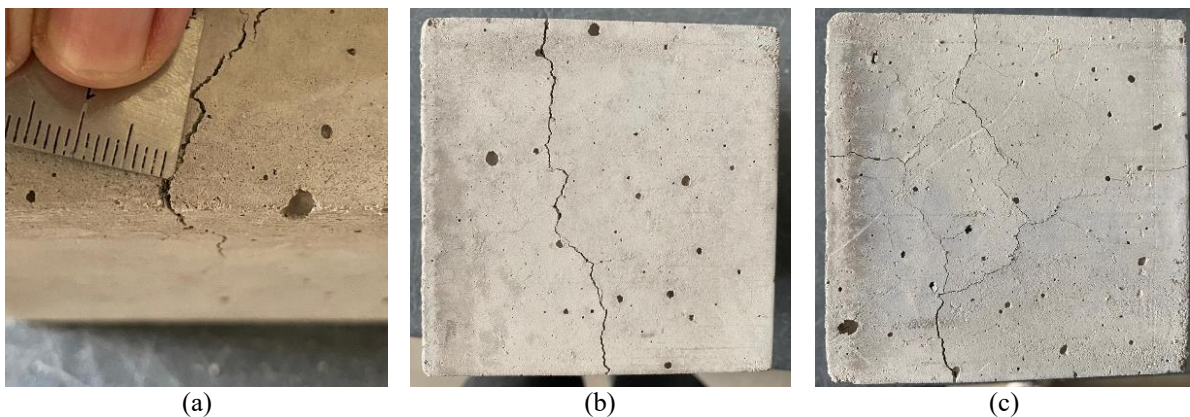


Figura 29 - Pormenor das fissuras nos provetes do traço referência aquecidos a 500 °C com taxa de 5 °C/min.
(a) Fissura máxima de 1 mm; (b) Face fissurada em linha reta; (c) Face fissurada em mapa.

Após análise geral dos efeitos na massa e resistência residual dos provetes aquecidos a 250 °C, segue-se a análise da interação entre tipo de arrefecimento e resistência residual obtida nas diferentes idades pós arrefecimento conforme as combinações propostas na Figura 15.

4.4.1 Relação entre diferentes idades após arrefecimento gradual

O índice de normalidade (W) para os provetes arrefecidos gradualmente após a exposição a 500 °C apresentou valores distintos entre 0 e 1, ou seja, o impacto do aquecimento foi irregular entre os provetes de cada traço. Alinhando este fator com o valor-p acima de 0,05, permite assumir que a distribuição é normal. A Tabela 27 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene.

Tabela 27 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual.

Idade	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		W	Valor-p	F	Valor-p
24 horas	REF	0,691	0,974	0,714	0,625
	RC	0,465	0,924		
	RA	0,376	0,897		
28 dias	REF	0,614	0,960		
	RC	0,206	0,837		
	RA	0,949	0,999		

Os resultados, apresentados na Tabela 28, indicam que há diferenças estatisticamente significativas entre a idade após o aquecimento e o traço, evidenciado pelo valor-p ($p < 0,05$) que rejeita a hipótese nula. Esse dado sugere que as variações observadas nos resultados de resistência residual são estatisticamente desiguais entre o traço de referência (REF) e os com incorporação da TDR (RC e RA), bem como a idade de ensaio à compressão. A combinação dos dois fatores (traço e idade) não refutam a hipótese nula, mas está muito próxima ao limite de 0,05 pré-estabelecido.

Tabela 28 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual.

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Idade	11,49	1	11,49	45,71	8,26.10-5
Traço	5,74	2	2,87	11,41	3,40.10-3
Interação	2,09	2	1,04	4,15	0,053
Resíduo	2,26	9	0,25	-	-

4.4.2 Relação entre diferentes idades após arrefecimento acelerado

O índice de normalidade (W) para os provetes arrefecidos em água após a exposição a 500 °C apresentou valores próximos a 1, ou seja, a distribuição dos dados se aproxima da normalidade. Alinhando este fator com o valor-p acima de 0,05, permite assumir que a distribuição é normal. A Tabela 29 apresenta os resultados positivos para normalidade e homogeneidade empregando os testes de Shapiro-Wilk e Levene.

Tabela 29 - Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual.

Idade	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		W	Valor-p	F	Valor-p
24 horas	REF	0,864	0,280	0,481	0,784
	RC	0,794	0,101		
	RA	0,938	0,519		
28 dias	REF	0,856	0,256		
	RC	0,978	0,713		
	RA	0,750	0*		

*Valor nulo pois duas resistências são iguais, assim o R entende como apenas um valor, mesmo que sejam dois valores iguais

Os resultados, apresentados na Tabela 30, indicam que há diferenças estatisticamente significativas entre a idade após o aquecimento e o traço, evidenciado pelo valor-p ($p < 0,05$) que rejeita a hipótese nula. Esse dado sugere que as variações observadas nos resultados de resistência residual são estatisticamente desiguais entre o traço de referência (REF) e os com incorporação da TDR (RC e RA), bem como a idade de ensaio à compressão. A combinação dos dois fatores (traço e idade) não refutam a hipótese nula, mas está muito próxima ao limite de 0,05 pré-estabelecido. Estes resultados foram os mesmos dos obtidos para o arrefecimento gradual anteriormente apresentados.

Tabela 30 - Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual.

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Idade	11,49	1	11,49	45,71	$8,26 \cdot 10^{-5}$
Traço	5,74	2	2,87	11,41	$3,40 \cdot 10^{-3}$
Interação	2,09	2	1,04	4,15	0,053
Resíduo	2,26	9	0,25	-	-

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação avaliou o comportamento do betão com incorporação de terra diatomácea residual (TDR), proveniente do resíduo da filtração de vinhos, em relação às suas propriedades mecânicas após exposição a altas temperaturas. Dando continuidade às investigações realizadas no Instituto Politécnico de Bragança sobre a utilização desse material, a TDR devidamente calcinada mostrou-se uma alternativa promissora para a redução do consumo de cimento e areia, contribuindo para a produção de betão mais sustentável.

O programa experimental abrangeu três diferentes composições de betão, a composição de referência, a com redução de 10% de cimento e adição de 10% de TDR e a com redução de 5% de areia e adição de 5% de TDR. Para avaliar o comportamento dos betões a altas temperaturas, foram aferidas a massa antes e após o aquecimento, ensaiados a compressão e avaliado o aparecimento de fissuras.

Nos ensaios realizados, a substituição parcial do cimento em 10% ou da areia em 5% por TDR resultou em uma resistência à compressão ligeiramente inferior ao betão de referência em condições de temperatura ambiente. A redução foi de 4% para o material com substituição de cimento e de 2% para o material com substituição de areia, comportamento similar ao obtido por Schincaglia [8] nos traços de referência e redução de cimento, mas distinto para redução de areia no qual houve aumento de 18% na resistência.

Os provetes aquecidos a 250 °C apresentaram de 8,43% no traço de referência (REF), 1,90% no traço com substituição parcial do cimento (RC) e 9,50% no traço com substituição parcial da areia (RA) na resistência residual após 24h do arrefecimento gradual, fato observado na literatura devido a nova reação de hidratação que ocorre no betão. A resistência residual após 28 dias em câmara húmida aumentou em ambos os arrefecimentos quando comparada a resistência residual após 24 horas do arrefecimento, apresentando maiores ganhos para os provetes arrefecidos em água. Este comportamento foi igualmente observado para as temperaturas de 350 °C e 500 °C, com exceção dos provetes aquecidos a 500 °C e arrefecidos gradualmente que apresentaram perda de resistência progressiva.

A incorporação de TDR, devido à sua granulometria fina, tornou a estrutura do betão mais densa, reduzindo a quantidade de poros disponíveis para a saída de vapor d'água. Essa característica resultou em *explosive spalling* em duas tentativas de aquecimento a 500 °C, limitando a temperatura máxima no forno a 350 °C, fato este que levou a readequação do

programa experimental com a retirada do ensaio a 750 °C, inserção da temperatura de 350 °C e mudança para taxa de aquecimento inicial de 5 para 2 °C/min. Este fenômeno pode ter influenciado os resultados de variação de massa e resistência, uma vez que apenas duas amostras foram utilizadas para o cálculo das médias nesses casos.

Os provetes da composição referência expostos a 500 °C com a taxa de aquecimento de 5 °C/min com arrefecimento gradual, apesar de completarem o ensaio sem ocorrência de *spalling*, apresentaram integridade física comprometida nos provetes da composição referência após 28 dias do aquecimento com fissuras de até 1 mm em todas as faces dos três provetes. Os provetes do mesmo ensaio com TDR apresentaram superfície com fissuras finas características de provetes expostos à mesma temperatura devido à alta degradação da matriz cimentícia.

Em geral, o arrefecimento acelerado contribuiu para a recuperação da resistência residual do betão, independentemente do traço. Esse comportamento pode ser atribuído à maior disponibilidade de água no interior dos provetes durante o período de cura pós-aquecimento, o que favorece significativamente as reações de reidratação. Essas reações contribuem para a formação de novos produtos hidratados, como o gel C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que desempenha um papel crucial na melhoria da coesão da matriz cimentícia. Esse processo, além de reduzir a porosidade, compensa parcialmente os danos microestruturais causados pela exposição ao calor [48,49]. Assim, o arrefecimento em água demonstrou ser uma estratégia mais vantajosa para recuperação estrutural a longo prazo nas condições analisadas, promovendo uma recuperação eficiente da resistência do betão e evidenciando o potencial dessa abordagem em cenários onde o desempenho residual é crítico.

A análise estatística, apesar de não poder ser usada para comprovar fatos de maneira exclusiva devido a quantidade pequena de amostras, foi útil para nortear os efeitos causados pelo arrefecimento e o tempo entre ensaios de resistência residual. O software RStudio complementou a análise gráfica para dedução da relação entre o traço, método de arrefecimento e a idade de ensaio pós arrefecimento.

Pelos resultados obtidos neste ensaio, a incorporação da TDR mostrou-se um material promissor para a redução do consumo de cimento e areia na produção de betão, sendo necessário ensaios mais abrangentes que permitam identificar uma solução viável para o *spalling* e para redução da trabalhabilidade que o material causa na mistura. Para aprofundar o

entendimento do comportamento da TDR em composições de betão, sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliação do comportamento sob diferentes taxas de aquecimento;
- Investigação do teor crítico de umidade para aquecimento em altas temperaturas;
- Acompanhamento da recuperação da resistência em maiores intervalos de tempo de cura pós-arrefecimento com maior quantidade de provetes;
- Expansão do estudo para temperaturas superiores a 600 °C;
- Desenvolvimento de novas composições com adição de fibras e redução da relação água/cimento;
- Análise da viabilidade económica da utilização da TDR no betão.

REFERÊNCIAS

- [1] Kabir M, Habiba U, Farooqi ZUR. Current Scenario of Environmental Pollution & Its Solution by Plantation In Changing Climate. *Journal of Sustainability Perspectives*. 2021. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:237950520>
- [2] Kajaste R, Hurme M. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*. 2016;112:4041–52.
- [3] Chandar SP, Santhosh R. Partial replacement of cement with alternative cementitious material in the production of concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252339116>
- [4] Watari T, Cao Z, Serrenho AC, Cullen JM. Growing role of concrete in sand and climate crises. *iScience*. 2023;26. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:258425682>
- [5] Lelles LC de, Silva E, Griffith JJ, Martins SV. Perfil ambiental qualitativo da extração de areia em cursos d’água. *Revista Árvore*. maio de 2005;29(3):439–44.
- [6] Zolin RC. Argamassa com incorporação de terra diatomácea residual proveniente da filtração de vinhos. Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2023; Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/28606>
- [7] Meira AG de A. Analysis of the thermal performance of mortars with diatomaceous earth. Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2024. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/30128>
- [8] Schincaglia VT. Concrete blocks with incorporation of diatomaceous earth. Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/25866>
- [9] NP EN 12390-2:2019. Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura de provetes para ensaios de resistência mecânica. 2019.
- [10] NP EN 12390-3:2019. Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes. 2019.
- [11] ONU. População mundial chegará a 9,9 bilhões em 2054 [Internet]. *ONU News*. 2024 [citado 23 de maio de 2024]. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2024/04/1830966>
- [12] Viegas SL. Acesso à habitação por todos e para todos? Paradigmas e paradoxos da actualidade portuguesa. *Forum Sociológico*. 2019;(34):71–80.
- [13] Rupp RF, Dear R de, Ghisi E. Field study of mixed-mode office buildings in Southern Brazil using an adaptive thermal comfort framework. *Energy and Buildings*. 2018;158:1475–86.
- [14] Nepomuceno MCS. Estudo da composição de betões. Dissertação de Mestrado - Universidade da Beira Interior. 1999. Disponível em:

<https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/5394/1/Nepomuceno%2c%20M.-Estudo%20da%20composi%2c%20a7%2c%20a3o%20de%20bet%2c%20b5es%2c%20PAPCC%2c%20UBI%2c%201999.pdf>

- [15] Carminho FJTH. Resistência do betão à compressão em cubos VS cilindros. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciência e Tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/38627/1/Determinacao%20da%20resistencia%20in%20situ%20do%20betao.pdf>
- [16] Althoey F, Ansari WS, Sufian M, Deifalla AF. Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment. *Developments in the Built Environment*. 2023;16:100284.
- [17] Jesus S, Pederneiras CM, Farinha CB, Brito J de, Veiga R. Reduction of the Cement Content by Incorporation of Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Rendering Mortars. *Infrastructures*. 2021. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234110674>
- [18] Guzmán AM, Maldonado NG, Affranchino G. Comprehensive Evaluation for Mortars and Concretes Incorporating Wastes. *Reusable and Sustainable Building Materials in Modern Architecture*. 2019. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139866779>
- [19] Brahami Y, Saeidi A, Fiset M, Ba K. The Effects of the Type and Quantity of Recycled Materials on Physical and Mechanical Properties of Concrete and Mortar: A Review. *Sustainability*. 202. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253467041>
- [20] Zhang C, Hu M, Maio FPD, Sprecher B, Yang X, Tukker A. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *The Science of the total environment*. 2021;803:149892.
- [21] Coelho A, Brito J. *Construction and Demolition Waste Management in Portugal*. 2007.
- [22] Ribeiro A, Castro F, Macedo M, Carvalho J. *Waste management in Portugal and Europe: an overview of the past, present and future*. 2011.
- [23] Ribéreau-Gayon P, Glories Y, Maujean A, Dubourdieu D. *Handbook of Enology, Volume 2: The Chemistry of Wine - Stabilization and Treatments*. Wiley; 2006. (Handbook of Enology). Disponível em: <https://books.google.pt/books?id=a03C-aFy2jsC>
- [24] Ferreira RLS, Pinto L, Nóbrega AF, Carneiro AMP. Diatomaceous earth: A review of its characteristics and effects on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*. 2024;421:135711.
- [25] Mineral commodity summaries 2024. Reston, VA; 2024 p. 212. (Mineral Commodity Summaries). Report No.: 2024. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2024>

- [26] Lutynski M, Sakiewicz P, Lutyńska S. Characterization of Diatomaceous Earth and Halloysite Resources of Poland. *Minerals*. 2019;9:670.
- [27] Rodriguez C, Miñano I, Costa C, Pujante P, Benito F. Properties of Precast Concrete Using Food Industry-Filtered Recycled Diatoms. *Sustainability*. 2021;13:3137.
- [28] Font A, Soriano L, Reig L, Tashima MM, Borrachero MV, Monzó J, et al. Use of residual diatomaceous earth as a silica source in geopolymer production. *Materials Letters*. 2018;223:10–3.
- [29] Figueira APR. Produção de pavimentos intertravados contendo resíduo de filtro de cervejaria. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2021. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/5575>
- [30] Lee MG, Huang Y, Shih YF, Wang WC, Wang YC, Wang YX, et al. Mechanical and thermal insulation performance of waste diatomite cement mortar. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;25:4739–48.
- [31] Mateo S, Cuevas M, La Rubia García MD, Eliche-Quesada D. Preliminary study of the use of spent diatomaceous earth from the brewing industry in clay matrix bricks. *Advances in Applied Ceramics*. 2016;116:1–7.
- [32] Abrão PCRA, Cardoso FA, John VM. Evaluation of Portland pozzolan blended cements containing diatomaceous earth. *Cerâmica*. 2019;65:75–86.
- [33] Li J, Zhang W, Li C, Monteiro PJM. Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2019;223:662–79.
- [34] Li M, Sun W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*. 2004;34:1001–5.
- [35] Tuğla R, Demirel B, Yazıcıoğlu S, Ay S. Determination of Mechanical Properties of the Concrete Affected by High Temperature by Destructive and Non-Destructive Test Methods. *TJST*. 2019;14(2):91–9.
- [36] Ramzi S, Hajiloo H. The Effects of Supplementary Cementitious Materials (SCMs) on the Residual Mechanical Properties of Concrete after Exposure to High Temperatures - Review. *Buildings*. 2022. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:255680898>
- [37] Kessel O, Bennia A, Bravo Hidalgo D, Abderraouf Belkadi A, Lyes Kamel Khouadjia M. Experimental investigation of High-Performance Concrete subjected to high temperatures. *Revista Ingeniería de Construcción*. 2023;38:114–26.
- [38] Корзанов ВС, Красновских МП. Влияние термического воздействия на прочность бетона. 2020. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234619688>
- [39] Tiwary AK, Singh S, Kumar R, Chohan JS, Sharma S, Singh J, et al. Effects of Elevated Temperature on the Residual Behavior of Concrete Containing Marble Dust

- and Foundry Sand. *Materials*. 2022;15. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:248956055>
- [40] Kipsanai JJ, Wambua PM, Namango SS, Amziane S. A Review on the Incorporation of Diatomaceous Earth as a Geopolymer-Based Concrete Building Resource. *Materials*. 2022;15(20). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/20/7130>
- [41] Hasan M, Jamil M, Saidi T. Mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete with calcined diatomaceous earth as cement replacement. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023;32(1):20220272.
- [42] Maharani EA, Hasan M, Saidi T. The resistance of high-strength concrete with ramie fiber using diatomaceous earth to high temperatures. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532301773X>
- [43] Jansson, R. Fire spalling of concrete – A historical overview. *MATEC Web of Conferences*. 2013;6:01001.
- [44] Hertz KD. Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*. 2003;38(2):103–16.
- [45] Jansson R. Material properties related to fire spalling of concrete. *Dissertação de Licenciatura - Lund University*. 2008. Disponível em: <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/3617053/1480982.pdf>
- [46] Kirchhof L, Cattelan Antochaves de Lima R, Argenton M, Silva Filho LC. Análise da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em amostras de concreto expostas a elevadas temperaturas. 2011. Conference: 53.º Congresso Brasileiro do Concreto.
- [47] Botte W, Caspee R. Post-cooling properties of concrete exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2017;92:142–50.
- [48] Poon CS, Azhar S, Anson M, Wong YL. Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing. *Cement and Concrete Research*. 2001;31(9):1307–18.
- [49] Lin Y, Hsiao C, Yang H, Lin YF. The effect of post-fire-curing on strength–velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength. *Fire Safety Journal*. 1 de maio de 2011;46(4):178–85.
- [50] Fontes LFP. Comportamento Físico e Mecânico de Blocos de Granito Submetidos a Altas Temperaturas. *Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança*, Bragança, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/23731>.

ANEXOS

ANEXO A - Valores de Resistência à Compressão

20 °C					
Traço	Resistência [MPa]			Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
	1	2	3		
REF	20,66	18,66	22,94	20,75	2,14
RC	20,33	19,49	20,05	19,96	0,43
RA	19,45	20,73	21,39	20,52	0,99

250 °C							
Arrefecimento	Idade	Traço	Resistência [MPa]			Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	25,20	20,59	21,70	22,50	2,41
		RC	22,06	18,09	20,88	20,34	2,04
		RA	21,73	24,13	21,55	22,47	1,44
	28 dias	REF	21,56	22,46	23,55	22,52	1,00
		RC	21,26	25,73	19,08	22,02	3,39
		RA	22,56	25,15	21,28	23,00	1,97
Acelerado	24 horas	REF	13,99	13,60	13,11	13,57	0,44
		RC	12,38	12,21	12,41	12,33	0,11
		RA	13,98	14,37	13,49	13,95	0,44
	28 dias	REF	20,43	20,11	19,83	20,12	0,30
		RC	16,94	16,97	17,38	17,10	0,25
		RA	18,79	19,02	18,90	18,90	0,12

350 °C

Arrefecimento	Idade	Traço	Resistência [MPa]			Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	19,32	19,42	19,28	19,34	0,07
		RC	18,43	18,69	16,77	17,96	1,04
		RA	20,56	19,47	19,25	19,76	0,70
	28 dias	REF	19,85	20,13	19,71	19,90	0,21
		RC	19,93	18,15	spalling	19,04	1,26
		RA	21,43	22,08	19,47	20,99	1,36
Acelerado	24 horas	REF	15,65	14,95	15,08	15,23	0,37
		RC	15,00	15,61	spalling	15,31	0,43
		RA	16,31	16,56	spalling	16,44	0,18
	28 dias	REF	18,16	17,41	17,44	17,67	0,42
		RC	16,90	15,78	spalling	16,34	0,79
		RA	18,94	17,70	17,36	18,00	0,83

500 °C

Arrefecimento	Idade	Traço	Resistência [MPa]			Média [MPa]	Desvio Padrão [MPa]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	19,74	18,82	19,41	19,32	0,47
		RC	18,05	17,43	15,58	17,02	1,29
		RA	20,20	17,10	17,74	18,35	1,64
	28 dias	REF	10,37	9,95	10,57	10,30	0,32
		RC	11,16	12,04	11,91	11,69	0,46
		RA	12,22	12,79	11,70	12,24	0,55
Acelerado	24 horas	REF	20,22	15,89	16,57	17,56	2,33
		RC	15,99	16,94	17,00	16,64	0,57
		RA	17,30	16,66	18,97	17,64	1,19
	28 dias	REF	20,85	22,51	22,27	21,88	0,90
		RC	19,75	18,89	21,22	19,95	1,18
		RA	21,68	21,68	22,74	22,03	0,61

ANEXO B - Acompanhamento das massas

250 °C - Antes do aquecimento							
Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	2349,80	2326,10	2361,50	2345,80	18,04
		RC	2261,50	2294,30	2276,00	2277,27	16,44
		RA	2271,90	2242,30	2262,10	2258,77	15,08
	28 dias	REF	2340,60	2316,80	2305,30	2320,90	18,00
		RC	2250,90	2263,10	2283,40	2265,80	16,42
		RA	2254,10	2244,40	222820	2242,23	13,09
Acelerado	24 horas	REF	2339,80	2319,40	2346,10	2335,10	13,96
		RC	2279,80	2254,80	2296,70	2268,10	12,58
		RA	2250,90	2232,10	2229,90	2237,63	11,54
	28 dias	REF	2301,00	2331,80	2320,60	2317,80	15,59
		RC	2268,50	2266,90	2251,00	2262,13	9,67
		RA	2252,10	2229,90	2231,90	2237,97	12,28

250 °C – 24 horas após o arrefecimento							
Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	2156,90	2147,60	2150,90	2151,80	4,71
		RC	2070,70	2087,90	2080,60	2079,73	8,63
		RA	2054,00	2081,70	2060,30	2065,33	14,52
	28 dias	REF	2133,00	2125,80	2129,10	2129,30	3,60
		RC	2061,80	2099,80	2073,30	2078,30	19,49
		RA	2066,60	2042,50	2015,80	2041,63	25,41
Acelerado	24 horas	REF	2343,50	2281,80	2326,50	2317,27	31,87
		RC	2281,50	2271,90	2289,70	2281,03	8,91
		RA	2264,30	2249,60	2248,90	2254,27	8,70
	28 dias	REF	2297,20	2321,90	2328,90	2316,00	16,65
		RC	2289,00	2286,30	2272,20	2282,50	9,02
		RA	2237,40	2229,90	2231,90	2233,07	3,88

250 °C – 28 dias após o arrefecimento

Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	28 dias	REF	2169,20	2161,00	2167,20	2165,80	4,28
		RC	2101,40	2138,20	2113,30	2117,63	18,78
		RA	2110,20	2084,60	2058,80	2084,53	25,70
Acelerado	28 dias	REF	2271,90	2300,20	2308,30	2293,47	19,11
		RC	2272,90	2264,50	2259,30	2265,57	6,86
		RA	2195,60	2224,50	2214,10	2211,40	14,64

350 °C – Antes do aquecimento

Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	2306,70	2285,70	2315,90	2302,77	15,48
		RC	2285,90	2286,30	2291,50	2287,90	3,12
		RA	2265,70	2268,00	2260,90	2264,87	3,62
	28 dias	REF	2341,00	2324,40	2335,40	2333,60	8,45
		RC	2281,50	2287,40	2269,40	2279,43	9,18
		RA	2241,80	2268,80	2274,70	2261,77	17,54
Acelerado	24 horas	REF	2316,70	2282,40	2331,50	2310,20	25,19
		RC	2236,20	2275,20	2273,80	2261,73	22,12
		RA	2272,10	2246,50	2239,70	2252,77	17,08
	28 dias	REF	2299,70	2322,90	2331,50	2318,03	16,45
		RC	2262,60	2268,50	2313,00	2281,37	27,55
		RA	2257,10	2241,20	2237,40	2245,23	10,45

350 °C – 24 horas após o arrefecimento

Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	2153,00	2123,50	2140,50	2139,00	14,81
		RC	2121,60	2104,90	2093,20	2106,57	14,27
		RA	2088,00	2076,60	2055,70	2073,43	16,38
	28 dias	REF	2174,10	2153,40	2154,80	2160,77	11,57
		RC	2101,40	2080,70	spalling	2091,05	14,64
		RA	2041,60	2068,30	2051,80	2053,90	13,47
Acelerado	24 horas	REF	2337,30	2310,10	2344,80	2330,73	18,26
		RC	2271,40	2307,90	spalling	2289,65	25,81
		RA	2294,10	2268,80	spalling	2281,45	17,89
	28 dias	REF	2321,10	2342,10	2337,90	2333,70	11,11
		RC	2303,50	2302,20	spalling	2302,85	0,92
		RA	2279,10	2264,40	2236,60	2260,03	21,58

350 °C – 28 dias após o arrefecimento

Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	28 dias	REF	2213,80	2190,90	2193,10	2199,27	12,63
		RC	2142,90	2120,30	spalling	2131,60	15,98
		RA	2081,70	2108,50	2091,60	2093,93	13,55
Acelerado	28 dias	REF	2283,80	2322,50	2324,40	2310,23	22,91
		RC	2262,40	2295,60	spalling	2279,00	23,48
		RA	2253,00	2243,40	2232,90	2243,10	10,05

500 °C – Antes do aquecimento

Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	2297,90	2342,30	2337,40	2325,87	24,34
		RC	2301,80	2266,50	2299,90	2289,40	19,85
		RA	2249,60	2248,50	2255,80	2251,30	3,94
	28 dias	REF	2299,80	2339,80	2315,30	2318,30	20,17
		RC	2274,80	2270,90	2313,30	2286,33	23,44
		RA	2245,80	2254,80	2254,20	2251,60	5,03

500 °C – Antes do aquecimento

Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	24 horas	REF	2114,00	2138,10	2123,90	2125,33	12,11
		RC	2049,50	2053,90	2035,00	2046,13	9,89
		RA	2017,60	2014,00	1999,00	2010,20	9,87
	28 dias	REF	2097,80	2127,20	2099,70	2108,23	16,45
		RC	2059,10	2047,40	2068,90	2058,47	10,76
		RA	2011,80	2019,80	1998,50	2010,03	10,76

Acelerado

24 horas

28 dias

REF

RC

RA

REF

RC

RA

2283,50

2252,10

2244,40

2308,70

2270,70

2230,00

2291,70

2242,50

2247,40

2281,60

2275,40

2229,50

2306,30

2265,60

2215,00

2318,80

2241,60

2216,00

2293,83

2253,40

2235,60

2303,03

2262,57

2225,17

11,55

11,60

17,90

19,24

18,31

7,94

500 °C – 28 dias após o arrefecimento

Arrefecimento	Idade	Traço	Massa [g]			Média [g]	Desvio Padrão [g]
			1	2	3		
Gradual	28 dias	REF	2138,40	2167,90	2144,20	2150,17	15,63
		RC	2096,80	2085,80	2110,40	2097,67	12,32
		RA	2053,80	2062,30	2043,60	2053,23	9,36
Acelerado	28 dias	REF	2281,10	2262,30	2303,60	2282,33	20,68
		RC	2264,80	2269,40	2241,90	2258,70	14,73
		RA	2230,30	2230,00	2225,10	2228,47	2,92