

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura**

Vanessa Pasinatto

**Avaliação da influência da mineralogia do agregado graúdo no
comportamento do concreto submetido a altas temperaturas**

Porto Alegre
2024

VANESSA PASINATTO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA DO
AGREGADO GRAÚDO NO COMPORTAMENTO DO
CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD. pela University of Leeds, UK
Orientador

Prof. Ângela Gaio Graeff
PhD. pela University of Sheffield, UK
Coorientador

Porto Alegre
2024

VANESSA PASINATTO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA DO
AGREGADO GRAÚDO NO COMPORTAMENTO DO
CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Tecnologia dos Materiais e Sistemas Construtivos, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2024.

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD. pela University of Leeds, UK
Orientador

Prof. Ângela Gaio Graeff
PhD. pela University of Sheffield, UK
Coorientador

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Mônica Regina Garcez (UFRGS)
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Rogério Cattelan Antochaves (UFSM)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Jacinto Manuel Antunes Almeida (PUCRS)
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho a todos que acreditaram nele e que
contribuíram para que se torna-se realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre esteve presente em minha vida.

A minha família, em especial aos meus pais, Joel Pedro Pasinato e Adriana Czarnobay Pasinato, pela base, educação e dedicação constante. Agradeço também a minha irmã, Cássia Pasinato, minha melhor amiga, por todo carinho e parceria. Amo vocês!

Ao meu orientador, Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, e à minha coorientadora, Ângela Gaio Graeff, dedico meu agradecimento por todo conhecimento compartilhado, pela dedicação e paciência durante a orientação deste trabalho.

Agradeço aos professores Mônica Regina Garcez, Rogério Cattelan Antochaves de Lima e Jacinto Manuel Antunes de Almeida, que generosamente contribuíram para este trabalho por meio da banca de qualificação e da banca examinadora.

Agradeço à família LEME. Aos colegas que contribuíram para a pesquisa, Alessandro Simas Franchetto e Luiz Henrique Tirado, meu agradecimento sincero. Destaco o reconhecimento especial ao Lucas Reginato pelo valioso conhecimento compartilhado e pela assistência na condução dos ensaios. Além disso, expresso meu agradecimento ao Edgar Wallace Pereira Lucas e ao José Orvandır pelo apoio no laboratório.

Agradeço à equipe do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER/UFRGS) pela realização dos ensaios de DRX, em especial à Dr^a Márcia Machado.

Agradeço às empresas que doaram materiais para realização da pesquisa: GCP Applied Technologies, agradecimento à Danila Ferraz; e Mineração Monego, agradecimento ao Flávio Raposo.

Quero expressar meu agradecimento ao Fábio Schäfer, meu colega de trabalho, pela constante disposição em ajudar e por compartilhar todo o conhecimento necessário, contribuindo de maneira fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço as minhas colegas de trabalho e amigas, Amanda Espindola Silveira, Brenda Ribas Sobé e Jenifer Sutil que, ao longo de todo o período, demonstraram compreensão e estiveram ao meu lado, oferecendo apoio.

As minhas amigas, Bruna Maggioni e Luiza Mezzomo Donatti, agradeço por estarem sempre comigo e por me incentivarem, transmitindo confiança de que tudo daria certo.

RESUMO

PASINATTO, V. **Avaliação da influência da mineralogia do agregado graúdo no comportamento do concreto submetido a altas temperaturas.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

Os agregados compõem mais da metade do volume do concreto, e suas características influenciam diretamente nas propriedades do mesmo. O efeito da temperatura no agregado varia de acordo com a sua composição mineralógica. Por esta razão, quando exposto a altas temperaturas, a deterioração do concreto é atribuída, essencialmente, a mudanças físico-químicas na pasta de cimento, alterações nas propriedades dos agregados e incompatibilidade térmica entre ambos. De um modo geral, as normativas vigentes apresentam prescrições do comportamento residual do concreto após exposição a altas temperaturas, mas, em virtude dos avanços na ciência, vê-se a necessidade de explorar o desempenho mecânico de outros materiais e outras classes de concreto, avaliando a correlação entre a reação dos materiais e da estrutura em situação de incêndio. Neste contexto, este trabalho verificou a influência de três diferentes mineralogias do agregado graúdo no comportamento mecânico residual do concreto submetido a altas temperaturas. Foram produzidos concretos com diferentes mineralogias de agregados graúdos, optou-se por utilizar amostras de granito, basalto e calcário, devido a sua incidência no estado do Rio Grande do Sul. Utilizaram-se dois traços de concreto, para avaliar o comportamento em diferentes resistências. O traço e a relação água/cimento do concreto permaneceram constantes, variando apenas o tipo de agregado graúdo utilizado. Os corpos de prova foram expostos a altas temperaturas (300 °C, 600 °C e 900 °C), a taxa de aquecimento adotada foi de 1 °C/min. Foram realizadas avaliações da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e da difração de Raios-X (DRX). Os resultados mostram que o tipo de mineralogia do agregado graúdo tem influência significativa sobre o comportamento residual do concreto após exposição a altas temperaturas, ratificando a importância de as normatizações vigentes contemplarem uma maior variedade de tipos de concreto e mineralogias de agregado em suas prescrições.

Palavras-chave: concreto, mineralogia, agregado graúdo, altas temperaturas.

ABSTRACT

PASINATTO, V. **Evaluation of the influence of coarse aggregate mineralogy on the behavior of concrete subjected to high temperatures.** 2024. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

Aggregates compose more than half of the concrete volume, and their characteristics directly influence its properties. The effect of temperature on the aggregate changes according to its mineralogical composition. For this reason, when exposed to high temperatures, the concrete deterioration is essentially attributed to physicochemical changes in the cement paste, alterations in the properties of the aggregates and thermal incompatibility between both. In general, current regulations present prescriptions for the residual behavior of concrete after exposure to high temperatures, but, due to advances in science, there is a need to explore the mechanical performance of other materials and other classes of concrete, assessing the correlation between the reaction of materials and structure in a fire situation. In this context, this study verified the influence of three different mineralogies of coarse aggregate on the residual mechanical behavior of concrete subjected to high temperatures. Concretes were produced with different coarse aggregates mineralogies, owing to their incidence in the state of Rio Grande do Sul. The mix and the water to cement ratio of the concrete remained constant, varying only the type of coarse aggregate used. The specimens were exposed to high temperatures (300 °C, 600 °C and 900 °C), the heating rate adopted was 1 °C/min. Evaluations were carried out for compressive strength, elasticity modulus, and X-ray diffraction (XRD). The results show that the type of coarse aggregate mineralogy has a significant influence on the residual behavior of the concrete after exposure to high temperatures, confirming the importance of current standards to include in their prescriptions a greater variety of types of concrete and aggregate mineralogy.

Keywords: concrete, mineralogy, coarse aggregate, high temperatures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	17
Figura 2 - Mapa da produção mineral no Rio Grande do Sul	20
Figura 3 - Fluxograma genérico de uma usina de cominuição de rocha compacta para produção de agregado.....	23
Figura 4 - Tipos de formato dos agregados	24
Figura 5 – Fator de redução da resistência do concreto silicoso em função da temperatura....	26
Figura 6 – Estabilidade térmica e transformações físico-químicas de alguns tipos de agregados em função do aumento da temperatura.....	28
Figura 7 – Expansão térmica do agregado de calcário dolomítico e basalto.....	29
Figura 8 – Incompatibilidade térmica entre agregados e pasta de cimento hidratada.....	30
Figura 9 – Fatores de redução da resistência a compressão em função do aumento da temperatura de exposição do concreto – revisão.....	35
Figura 10 – Fatores de redução do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura de exposição do concreto – revisão.....	36
Figura 11 – Esquema do programa experimental.....	40
Figura 12 – Fluxograma da estratégia de pesquisa, contendo as variáveis controláveis.....	41
Figura 13 – Tipos de mineralogias de agregados graúdos selecionados para o estudo.....	42
Figura 14 – Curva granulométricas da areia média.....	44
Figura 15 – Lâminas delgadas das rochas utilizadas neste trabalho.....	47
Figura 16 – Forno elétrico empregado para o aquecimento das amostras.....	49
Figura 17 – Ensaio do módulo de elasticidade	52
Figura 18 – Imagem macroscópica e microscópica da amostra de basalto	55
Figura 19 – Imagem macroscópica e microscópica da amostra de granito	56
Figura 20 – Imagem macroscópica e microscópica da amostra de calcário.....	57
Figura 21 – Curva granulométrica da amostra de agregado graúdo de basalto.....	58
Figura 22 – Curva granulométrica da amostra de agregado graúdo de granito.....	59
Figura 23 – Curva granulométrica da amostra de agregado graúdo de calcário	60
Figura 24 – Comparativo das curvas granulométricas das amostras de agregado graúdo	61
Figura 25 – Ruptura média dos corpos de prova à compressão 28 dias.....	64
Figura 26 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” na resistência à compressão.....	65
Figura 27 – Influência da interação “temperatura de exposição x traço x mineralogia do agregado graúdo” na resistência à compressão	66
Figura 28 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no fator de redução da resistência à compressão.....	69

Figura 29 – Influência da interação “temperatura de exposição x traço x mineralogia do agregado graúdo” no fator de redução da resistência à compressão	70
Figura 30 – Comparativo com dados da literatura dos fatores de redução da resistência a compressão em função do aumento da temperatura de exposição do concreto	72
Figura 31 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no fator de redução da resistência à compressão.....	74
Figura 32 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no fator de redução da resistência à compressão.....	75
Figura 33 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no fator de redução do módulo de elasticidade	76
Figura 34 – Influência da interação “temperatura de exposição x traço x mineralogia do agregado graúdo” no fator de redução do módulo de elasticidade.....	78
Figura 35 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no módulo de elasticidade	80
Figura 36 – Influência da interação “temperatura de exposição x traço x mineralogia do agregado graúdo” no módulo de elasticidade.....	81
Figura 37 – Comparativo com dados da literatura dos fatores de redução do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura de exposição do concreto	83
Figura 38 – Comparativo da influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo” no fator de redução do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do traço I.....	84
Figura 39 – Comparativo da influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo” no fator de redução do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do traço II	84
Figura 40 – Comparativo de todos os resultados do fator de redução obtidos neste trabalho para resistência à compressão e módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura.....	85
Figura 41 – DRX realizado no concreto com agregado de basalto e traço I aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H.....	87
Figura 42 – DRX realizado no concreto com agregado de basalto e traço II aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H.....	87
Figura 43 – DRX realizado no concreto com agregado de granito e traço I aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H.....	88
Figura 44 – DRX realizado no concreto com agregado de granito e traço II aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H.....	89
Figura 45 – DRX realizado no concreto com agregado de calcário e traço I aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H.....	90

Figura 46 – DRX realizado no concreto com agregado de calcário e traço II aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H.....	90
Figura 47 – Concretos produzidos com amostras de agregado silicoso e calcário submetido a temperatura de 900 °C.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de redução da resistência em função da temperatura	27
Tabela 2 - Características do spalling nos agregados	31
Tabela 3 - Trabalhos desenvolvidos no LEME sobre concreto submetido a altas temperaturas	37
Tabela 4 - Mineralogia, nomenclatura das amostras e localização das jazidas	43
Tabela 5 - Granulometria da areia média	43
Tabela 6 – Características Químicas do CP V-ARI RS Votoran	44
Tabela 7 – Características Físicas do CP V-ARI RS Votoran.....	45
Tabela 8 – Características Mecânicas do CP V-ARI RS Votoran.....	45
Tabela 9 - Ensaio de caracterização dos agregados graúdos e suas respectivas normas	46
Tabela 10 – Traços definidos para utilização neste trabalho.....	48
Tabela 11 – Tempos de aquecimento e homogeneização das temperaturas.....	50
Tabela 12 – Estratégia experimental compressão uniaxial.....	51
Tabela 13 – Granulometria da amostra de agregado graúdo de basalto.....	58
Tabela 14 – Granulometria da amostra de agregado graúdo de granito.....	59
Tabela 15 – Granulometria da amostra de agregado graúdo de calcário.....	60
Tabela 16 – Índice de forma das amostras de agregado graúdo	62
Tabela 17 – Densidade e absorção de água das amostras de agregado graúdo	62
Tabela 18 – Massa unitária e índice de vazios das amostras de agregado graúdo	63
Tabela 19 – Análise ANOVA para a resistência à compressão	67
Tabela 20 – Fatores de redução da resistência em função da temperatura.....	68
Tabela 21 – Análise ANOVA para o fator de redução resistência à compressão	71
Tabela 22 – Prescrições normativas dos fatores de redução da resistência em função da temperatura.....	74
Tabela 23 – Análise ANOVA para o módulo de elasticidade.....	79
Tabela 24 – Fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura.....	80
Tabela 25 – Análise ANOVA para o fator de redução módulo de elasticidade.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANM: Agência Nacional de Mineração
- CMM: Centro de Microscopia e Microanálise da UFRGS
- DEPLAN: Departamento de Planejamento do Rio Grande do Sul
- DNPM: Departamento de Nacional de Produção Mineral
- DRX: Difração de raio X
- EE: Escola de Engenharia
- EUROCODE: European Committee for Standardisation
- LACER: Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS
- LAPMA: Laboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados da UFRGS
- LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS
- LVDT: Linear Variable Differential Transformers
- NBR: Norma Brasileira
- PPGCI: Programa de Pós-Graduação Construção e Infraestrutura
- RILEM: The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
- UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- VSI: Vertical Shaft Impact

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.3	LIMITAÇÕES.....	16
1.4	DELINEAMENTO DA PESQUISA	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	MINERAÇÃO DE BRITA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL..	19
2.1.1	Basalto	20
2.1.2	Granito	21
2.1.3	Calcário	21
2.2	PRODUÇÃO DE BRITA PARA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	21
2.3	INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO NO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS.....	25
2.4	TRABALHOS REALIZADOS RECETEMENTE AVALIANDO A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS GRAÚDOS EM CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS	32
2.5	ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO LEME/UFRGS SOBRE CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS.....	37
3	METODOLOGIA	40
3.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	41
3.2	MATERIAIS EMPREGADOS.....	42
3.2.1	Agregado graúdo	42
3.2.2	Areia média.....	43
3.2.3	Cimento	44
3.2.4	Aditivo superplastificante.....	45
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS.....	46
3.4	PROCEDIMENTOS DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA.....	47
3.4.1	Definição dos traços	48
3.4.2	Moldagem e cura dos corpos de prova.....	48

3.5	EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS	49
3.6	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	50
3.6.1	Compressão uniaxial.....	51
3.6.2	Módulo de elasticidade	51
3.6.3	Difração de Raios X (DRX)	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS	54
4.1.1	Análise Petrográfica.....	54
4.1.1.1	Basalto	54
4.1.1.2	Granito	55
4.1.1.3	Calcário	56
4.1.2	Composição granulométrica	57
4.1.2.1	Basalto	57
4.1.2.2	Granito	58
4.1.2.3	Calcário	59
4.1.2.4	Comparativo das curvas granulométricas das amostras de agregado graúdo	61
4.1.3	Índice de forma.....	62
4.1.4	Densidade e absorção de água.....	62
4.1.5	Massa unitária e índice de vazios.....	63
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	63
4.2.1	Compressão uniaxial.....	63
4.2.1.1	Resistência à compressão.....	63
4.2.1.2	Fator de redução da resistência à compressão	68
4.2.1.3	Resultados experimentais da resistência à compressão x prescrições normativas	73
4.2.2	Módulo de elasticidade	76
4.2.2.1	Módulo de elasticidade	76
4.2.2.2	Fator de redução do módulo de elasticidade.....	79
4.2.3	Resistência a compressão x Módulo de elasticidade	83
4.2.4	Difração de Raios X (DRX)	86
4.2.5	Análise Visual	92
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5.1	CONCLUSÕES.....	94
5.2	SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS	97

APÊNDICE A - Imagens dos corpos de prova produzidos com agregado graúdo de basalto após exposição a altas temperaturas.....	100
APÊNDICE B - Imagens dos corpos de prova produzidos com agregado graúdo de granito após exposição a altas temperaturas.....	102
APÊNDICE C - Imagens dos corpos de prova produzidos com agregado graúdo de calcário após exposição a altas temperaturas	104

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o contexto e a justificativa do tema proposta, os objetivos, as limitações e o delineamento da pesquisa. Além de uma breve descrição da estrutura da dissertação que será apresentada nos próximos capítulos.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

No Brasil, o segundo item mais expressivo da produção mineral é a rocha britada, atingindo no ano de 2015 a marca de 430.836.327 toneladas. No país, as rochas utilizadas para produção de brita são 64% granitóides, 30% basálticas, 4% calcárias e 2% outras (DNPM, 2018). No entanto, a origem geológica do agregado não é uma questão de escolha, mas sim, de disponibilidade da região.

Segundo mapas elaborados pelo Departamento de Planejamento (DEPLAN) e publicados no Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2021), na região sul do Brasil predomina ocorrências de rochas basálticas, encontradas em todo Planalto Meridional, localizado ao norte do estado. No Escudo Cristalino, situado na região central e sul do estado, é possível encontrar rochas graníticas, ao passo que os calcários podem ser, ocasionalmente, identificados na Depressão Central ou nas áreas periféricas do próprio Escudo.

Os agregados compõem mais da metade do volume do concreto, e suas características influenciam diretamente nas propriedades do mesmo. Quando exposto a altas temperaturas, a deterioração do concreto é atribuída essencialmente a três fatores: mudanças físico-químicas na pasta de cimento, alterações nas propriedades dos agregados e incompatibilidade térmica entre ambos (FERNANDES *et al.*, 2017).

O aumento da temperatura resulta na diminuição do módulo de elasticidade e da resistência característica dos materiais constituintes nos elementos de concreto, acarretando prejuízos na rigidez desses elementos (COSTA, 2011). Quando submetido a elevadas temperaturas, a resistência à compressão do concreto decresce em função do aumento da temperatura. A maioria dos concretos sofre uma redução da resistência em temperaturas acima de 300 °C, mas

esse comportamento depende muito dos materiais utilizados na mistura, como o tipo de agregado (KHOURY, 2000).

A influência do agregado nestas situações varia de acordo com a sua composição. Um “bom” agregado, do ponto de vista das altas temperaturas, necessita ter um baixo coeficiente de deformação térmica, ausência de deformação residual após o resfriamento, estabilidade térmica e uma estrutura monomineral da rocha que constitui o agregado (GAWESKA, 2004).

Conforme estudos já realizados anteriormente, em função da expansão térmica dos agregados, a diminuição da resistência à compressão dos concretos de agregados calcários ocorre em temperaturas mais elevadas em comparação com os concretos de agregados silicosos (XING *et al.*, 2011). Além disso, o concreto com agregado calcário oferece melhor resistência à fragmentação do que o concreto de agregado de silício, pois, o calor específico do concreto com agregado calcário, acima de 600 °C de temperatura, é geralmente muito maior do que o do concreto com agregado silicoso (KODUR; CHENG; WANG, 2003).

Estruturas de concreto armado são conhecidas por ter um bom comportamento quando submetidas à situação de incêndio, sendo raros os casos de colapso. Entretanto, em muitos casos, dependendo da magnitude do incêndio e dos danos causados, faz-se necessária uma análise das propriedades do material para a tomada de decisões quanto à possível terapia para a estrutura. Testes para avaliar as propriedades mecânicas, como resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade, são necessários para compreender o comportamento mecânico residual do concreto após o ciclo de aquecimento e resfriamento. O processo de decisão, que envolve a possível demolição da estrutura ou recuperação dos elementos danificados, necessita considerar, juntamente com outros fatores relevantes, a avaliação da capacidade portante residual da estrutural. Por isso, são de extrema importância estudos voltados à análise das propriedades do material após exposição a altas temperaturas, para nortear a tomada de decisões.

A NBR 15200 (ABNT, 2012) estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e a forma de demonstrar o seu atendimento, conforme requisitos de resistência ao fogo estabelecidos na NBR 14432 (ABNT, 2001). Embora a NBR 15200 (ABNT, 2012) esteja em fase de atualização, a última versão da norma ainda é muito limitada, pois seu escopo abrange somente concretos convencionais com agregados silicosos. A mesma

referencia o Eurocode 2 – Part 1.2. (European Committee for Standardisation, 2004), indicando que seja consultada a norma europeia para diferentes classes de concreto e mineralogias de agregados.

De um modo geral, a norma brasileira serve para concretos utilizados no cotidiano, mas, em virtude dos avanços em ciência, vê-se a necessidade de explorar o comportamento de outros materiais e outras classes de concreto, avaliando a correlação entre comportamento dos materiais e da estrutura em situação de incêndio.

Com o intuito de contribuir para o entendimento da correlação entre o comportamento dos materiais em relação ao aumento da temperatura, neste trabalho foi realizada uma avaliação experimental de concretos produzidos com diferentes mineralogias de agregados graúdos, submetidos ao ensaio de exposição a altas temperaturas com o auxílio de um forno elétrico, visando uma comparação entre o comportamento mecânico residual, em termos de resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Objetivo geral da pesquisa:

O objetivo principal deste trabalho é estudar a influência de três diferentes mineralogias de agregado graúdo nas propriedades mecânicas residuais do concreto submetido a altas temperaturas.

Objetivos específicos da pesquisa:

- caracterizar as três amostras de agregados graúdos utilizadas neste trabalho, visando identificar a mineralogia das rochas;
- avaliar a influência de diferentes mineralogias de agregados graúdos em dois traços de concreto submetidos a altas temperaturas;
- verificar se o aumento da temperatura de exposição exerce influência na microestrutura dos concretos produzidos neste trabalho.

1.3 LIMITAÇÕES

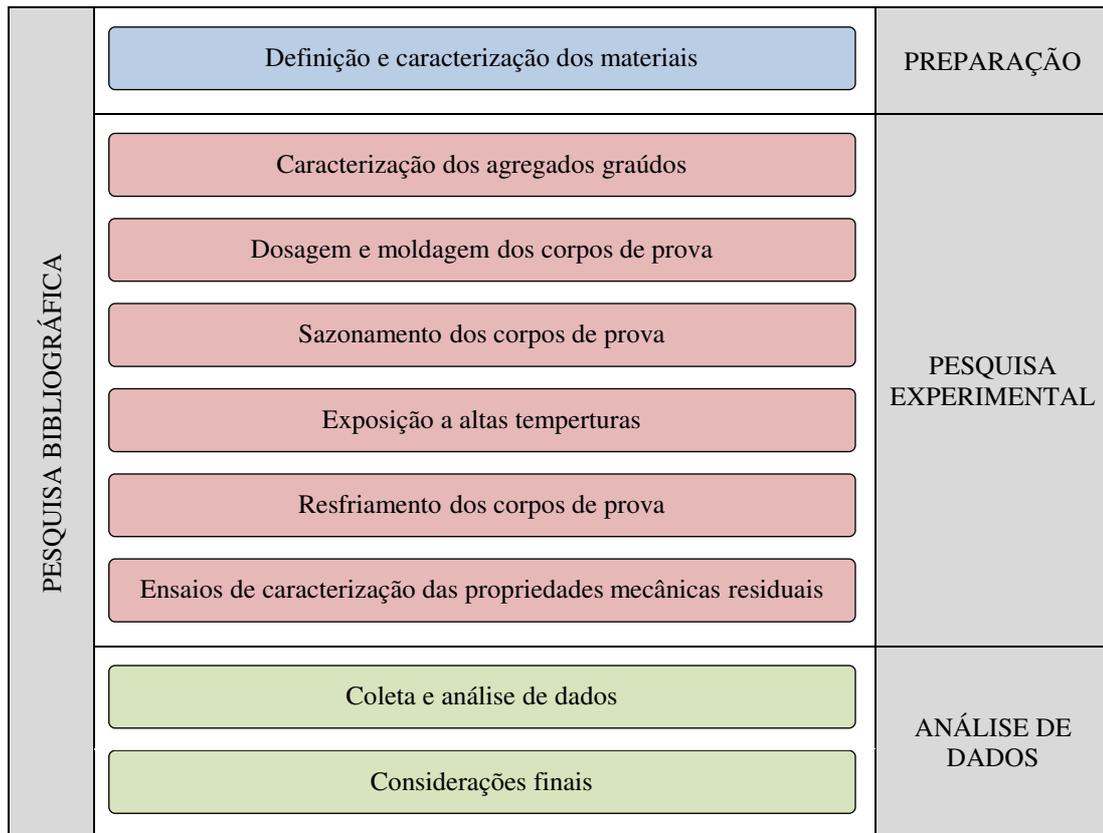
Diante da diversidade de tipos de mineralogias de agregados graúdos e as inúmeras condições possíveis de exposição a altas temperaturas, é importante ressaltar algumas limitações deste trabalho:

- a utilização de somente três mineralogias de agregado graúdo, são elas: basalto, granito e calcário;
- a utilização de somente uma amostra para cada tipo de mineralogia do agregado graúdo;
- a utilização de dois traços de concreto, para avaliar o comportamento mecânico residual em diferentes resistências;
- após o aquecimento, por falta de equipamentos que possibilitassem um resfriamento controlado, os corpos de prova foram resfriados ao ar;
- avaliação das propriedades mecânicas residuais do concreto após exposição a altas temperaturas, somente em termos de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade.

1.4 DELINEAMENTO DA PESQUISA

O desenvolvimento deste trabalho seguiu as fases apresentadas no fluxograma da Figura 1, proporcionando uma visualização aprimorada das etapas que constituem a pesquisa e promovendo uma compreensão global do trabalho.

Figura 1 - Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: elaborado pela autora.

A etapa da pesquisa bibliográfica foi mantida durante a execução de todo o trabalho, como forma de respaldo às etapas executadas e buscando sempre na literatura o contexto em que o tema da pesquisa se encontra no Brasil e no mundo.

Primeiramente, foi definido um planejamento experimental, contendo as variáveis controláveis e de resposta deste trabalho. Nesta etapa foram determinadas as definições da pesquisa e a organização das atividades experimentais.

Após a pesquisa experimental definida, iniciaram as etapas de caracterização dos materiais, definição dos traços dos concretos e moldagem dos corpos de prova. Após a concretagem, visando à estabilização da umidade interna dos corpos de prova, os mesmos foram armazenados por um período de sazonalização antes dos ensaios de altas temperaturas.

Após o período de sazonalização, com a utilização de fornos elétricos, os corpos de prova passaram por um ensaio de exposição a temperaturas elevadas, para simulação de uma situação de incêndio. Após o aquecimento, os corpos de prova foram resfriados ao ar. Na sequência,

foram realizadas análises de resistência residual dos concretos, pelo ensaio de compressão uniaxial e módulo de elasticidade.

Após a realização dos ensaios, os resultados obtidos foram organizados, analisados de forma geral e comparados entre si. A fim de avaliar a significância das resistências a compressão, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para experimento fatorial com 3 fatores. Com isso, buscou-se observar e explicar a tendência do comportamento mecânico dos concretos submetidos a elevadas temperaturas, de forma a entender a influência de diferentes mineralogias de agregados graúdos no comportamento mecânico residual destes concretos. A partir destes dados, foram escritas as considerações finais, que visam responder a questão de pesquisa e aos objetivos; além de confirmar ou não as hipóteses, apresentando as principais respostas obtidas no trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo contém uma revisão sobre os principais assuntos pertinentes ao tema da pesquisa. Inicialmente, será realizada uma abordagem sucinta sobre a mineração de brita e os tipos de mineralogias de rochas utilizadas para produção de agregado graúdo no estado do Rio Grande do Sul. Além disso, será descrito o processo de produção de brita para construção civil e como este pode influenciar na forma dos grãos. Ainda, de forma a posicionar o trabalho dentro do âmbito das altas temperaturas, serão discutidas as influências que o agregado graúdo e sua mineralogia podem exercer no concreto submetido a elevadas temperaturas.

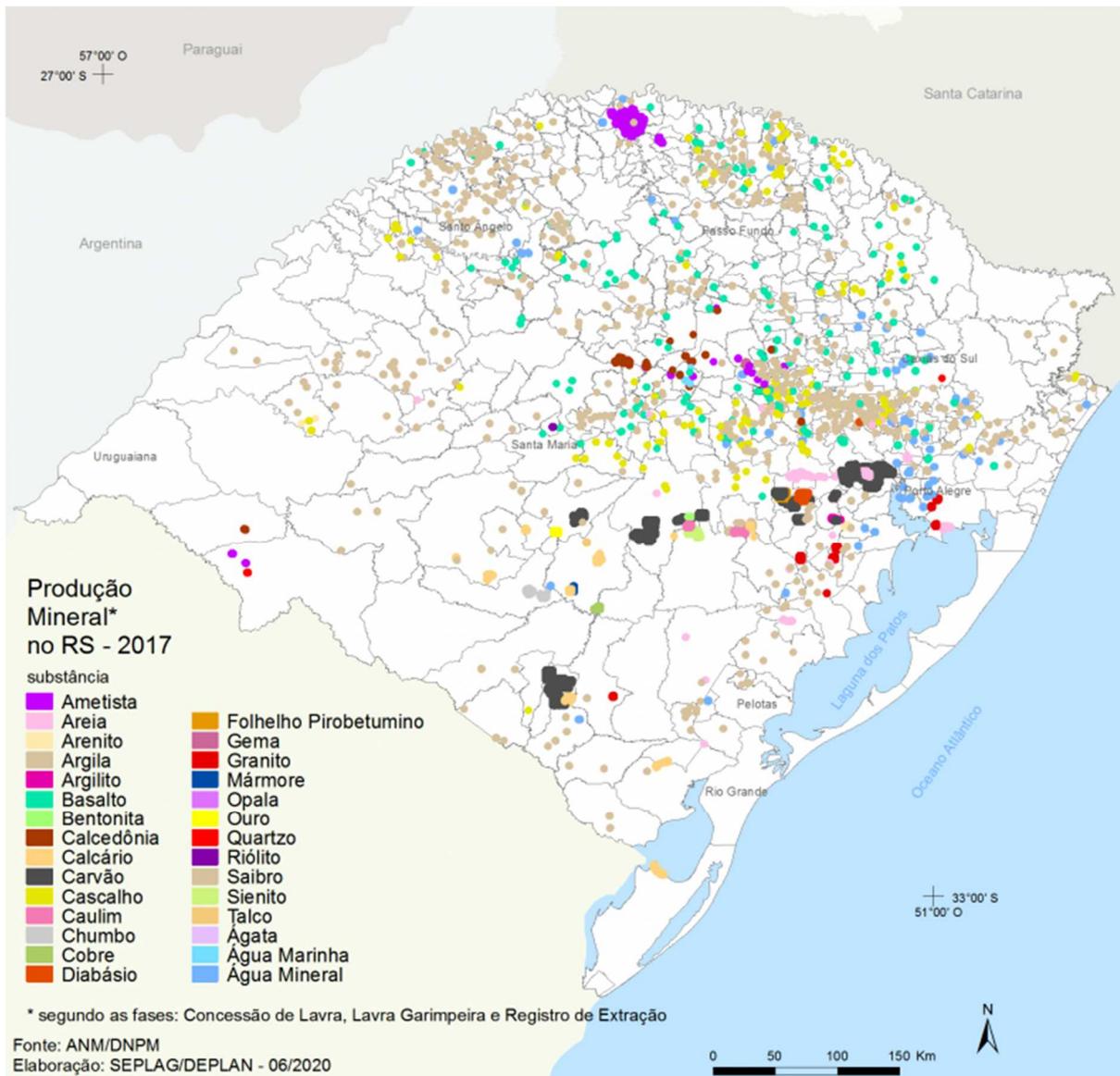
2.1 MINERAÇÃO DE BRITA NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Na indústria da construção civil, o agregado graúdo é conhecido como brita ou pedra britada, sendo o produto do processo de cominuição das rochas. No Brasil, a rocha britada corresponde ao segundo item mais expressivo da produção mineral, atingindo a marca de 430.836.327 toneladas no ano de 2015 (DNPM, 2018).

Brita é um termo utilizado para denominar fragmentos de rochas duras, originários de processos de beneficiamento através de desmonte por explosivos, britagem e peneiramento, extraídos de maciços rochosos. De acordo com o Cadastro Nacional de Produtores de Brita - DNPM (2018), no Brasil, os tipos de rochas utilizadas para produção de brita são: 64% de rochas plutônicas (granito, gnaisse, gabros e outras), 30% de rochas vulcânicas (basalto, riolito, diabásio), 4% de rochas calcárias e 2% outras.

No estado do Rio Grande do Sul, predominam ocorrências de rochas basálticas, estendendo-se ao norte do estado, por toda a região do Planalto Sul-rio-grandense. Já as rochas graníticas e metamórficas são encontradas no Escudo Cristalino, situado nas regiões central e sul do estado. Os calcários, por sua vez, podem ser eventualmente identificados na Depressão Central ou nas bordas do Escudo. A Figura 2 apresenta um mapa que ilustra a localização da produção mineral no Rio Grande do Sul, com base em dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

Figura 2 - Mapa da produção mineral no Rio Grande do Sul



Fonte: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul (2021).

Por tais razões, considerando as atuais utilizações na produção do concreto, foram selecionados para estudo os agregados graúdos constituídos de basaltos, granitos e calcários. A seguir é apresentada uma síntese das principais características destas mineralogias de rochas para a confecção de britas.

2.1.1 Basalto

O basalto é uma rocha ígnea ou magmática que se forma a partir da consolidação rápida do magma em superfície, conhecida como rocha ígnea vulcânica. Composta, principalmente, por plagioclásio e minerais ferro-magnesianos, como anfibólios, olivinas e piroxênios, o basalto é

classificado como uma rocha máfica devido à sua coloração escura. Na classificação das rochas ígneas, é considerado uma rocha básica vulcânica (ALMEIDA; DA LUZ, 2012). Embora apresente boas propriedades físicas e mecânicas para uso como pedra britada, pode conter características indesejáveis, como fragmentos achatados e angulosos nas frações mais finas (LA SERNA; REZENDE, 2011).

2.1.2 Granito

Os granitos são rochas ígneas ou magmáticas formadas pela consolidação lenta do magma em profundidade, conhecida como rocha ígnea plutônica. São rochas plutônicas ácidas constituídas por cristais de feldspatos potássicos, plagioclásio, quartzo e mica. Devido à sua formação em grandes profundidades, os granitos apresentam uma ampla variedade de granulação e cores (QUEIROZ, 2016). Essas rochas são altamente adequadas para uso como pedra britada, pois possuem resistência mecânica relativamente alta e baixa alterabilidade (LA SERNA; REZENDE, 2011).

2.1.3 Calcário

Os calcários podem ter origem metamórfica ou sedimentar, sendo sua composição mineralógica predominantemente calcítica (cálcio) ou, secundariamente, dolomítica (magnésio). Quando de origem sedimentar, formam-se pela consolidação de sedimentos resultantes da ação do intemperismo, erosão e transporte de uma rocha preexistente. Já os calcários de origem metamórfica podem se formar a partir de rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas preexistentes, submetidas a novas condições de pressão e temperatura. Essas rochas metamórficas são mecanicamente mais resistentes, mas sua dureza é inferior à dos silicatos. Os calcários apresentam boas propriedades como pedra britada para concreto hidráulico, embora sua baixa dureza os torne inadequados para uso como revestimento betuminoso em rodovias (LA SERNA; REZENDE, 2011).

2.2 PRODUÇÃO DE BRITA PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Na maior parte do Brasil, os recursos para produção deste material são abundantes e sua escala de produção tem como base a demanda do mercado. Por ter uma ampla e diversificada utilização na indústria da construção civil, que vai desde concreto, pavimentação, obras civis (ferrovias, túneis, barragens), e obras de infraestrutura (saneamento básico), suas especificações

variam conforme a sua finalidade (TANNO; SINTONI, 2003). Para sua comercialização, estes são produzidos em diferentes faixas granulométricas nominais, gerando uma grande gama de produtos.

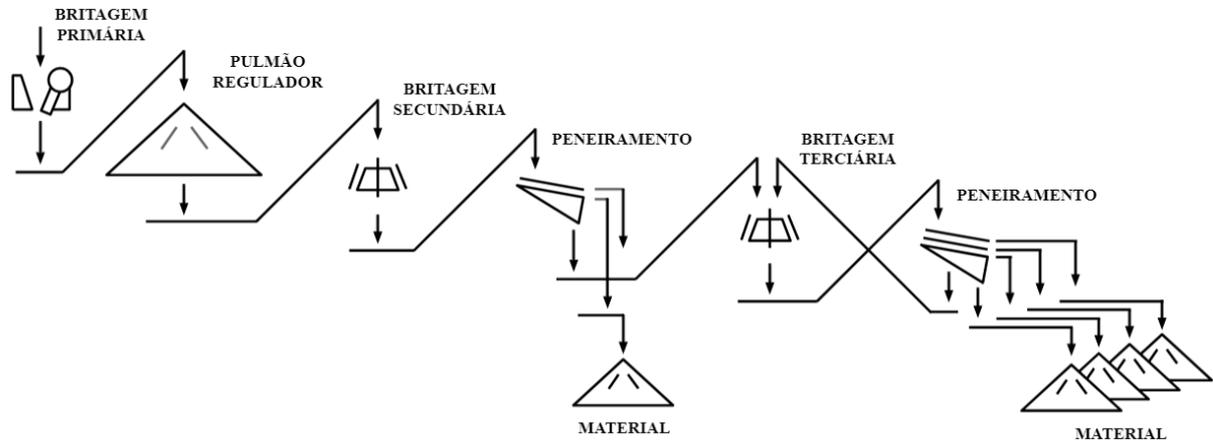
O processo de beneficiamento de rochas engloba um conjunto de técnicas e procedimentos com o objetivo de reduzir um sólido de tamanho específico em fragmentos menores. De acordo com Luz e Sampaio (2012), uma unidade industrial destinada ao beneficiamento de rochas tem a finalidade de alterar o tamanho das partículas, sua forma e distribuição granulométrica, visando sua aplicação como agregado na construção civil.

Os circuitos de produção de pedra britada, a partir de rochas compactas, são compostos, principalmente, por equipamentos de britagem, peneiramento, classificação, transportador de correia, entre outros. A etapa inicial do processo de beneficiamento ocorre durante as atividades de lavra, no qual a rocha é desmontada por meio de explosivos, resultando em blocos de diversos tamanhos adequados para alimentar os equipamentos de britagem (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

O segundo estágio da fragmentação ocorre na unidade de britagem. Nesta etapa, são utilizados equipamentos capazes de suportar os esforços elevados exigidos na fragmentação das rochas compactas. A primeira etapa do processo, também denominado britagem primária, inicia no britador de mandíbula. Após, o material pré-britado é armazenado em um pulmão regulador que alimenta um britador secundário do tipo cônico. Finalizada a segunda etapa, o material é transportado para o peneiramento, onde já ocorre a separação de uma parte do produto de britagem.

O fluxograma do processo de produção dos agregados depende muito da planta de mineração. Em uma planta típica de mineração da brita, os fragmentos de rocha ainda passam por um britador cônico terciário, que fornece o produto final da etapa da britagem. A Figura 3 apresenta um fluxograma genérico do processo de produção dos agregados.

Figura 3 - Fluxograma genérico de uma usina de cominuição de rocha compacta para produção de agregado



Fonte: elaborado pela autora.

Os produtores podem exercer algum controle nas características dos agregados durante o processamento. No caso da forma dos grãos, estes podem variar tanto pela origem mineralógica da rocha-mãe quanto pelo processo de produção da brita. Para melhoramento da forma dos grãos, uma britagem quaternária pode ser adicionada ao processo.

O britador de impacto de eixo vertical (VSI), conhecido como Barmac, por ser semi-autógeno, apresenta uma condição peculiar de britagem. Com um rotor central que gira em alta velocidade, os grãos são arremessados pela força centrífuga para as laterais do equipamento. Este processo provoca uma redução das partículas devido ao choque de rocha contra rocha, produzindo um material que apresenta característica mais cúbica do que lamelares.

O índice de forma da brita influencia diretamente nas características do material ao qual ela está inserida. Conforme a NBR 7809 (ABNT, 2019), índice de forma é a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe.

Segundo estudos realizados por Silva e Geyer (2018), considerando concretos de mesma resistência, agregados com elevado índice de forma cúbica podem levar a uma menor consumo de cimento por metro cúbico de concreto, quando comparados com agregados de formato mais lamelares.

Duas amostras de agregado de origem basáltica são apresentadas na Figura 4 (a) e (b), uma com grãos em um formato mais lamelar e outra com grãos em um formato mais cúbico, respectivamente.

Figura 4 - Tipos de formato dos agregados



Fonte: fotos da autora.

A primeira amostra (Figura 4 (a)), a rocha passou somente pelo britador tipo cônico, utilizado nas britagens secundárias e terciárias. Esse método de britagem ocorre através da compressão da rocha, e a fratura das partículas segue planos preferenciais influenciados pela constituição mineralógica. Esse processo pode resultar na produção de agregados com uma forma menos adequada para a fabricação de concretos.

Já na segunda amostra (Figura 4 (b)), a rocha passou pelo processo de britagem quaternária com britador de eixo vertical. Este tipo de britagem proporciona uma melhoria da forma dos grãos, resultando em britas com um índice de forma mais cúbico. Muitas centrais dosadoras de concreto selecionam seus fornecedores de agregados graúdos levando em consideração não apenas o preço e o tipo de rocha, mas também o tipo de britador. Isso ocorre porque o tipo de britador pode influenciar positivamente na conformação do material, resultando em reduções significativas nos custos das misturas e no consumo de cimento.

2.3 INFLUÊNCIA DO AGREGADO GRAÚDO NO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

O aumento da temperatura do concreto, decorrente da atuação térmica devido a situações de incêndio, por exemplo, causa modificação à micro e macroestrutura do mesmo. Mehta e Monteiro (2014) alertam que é desafiador realizar uma análise precisa do comportamento do concreto exposto a altas temperaturas devido à interação complexa de diversos fatores.

Neville (2015) salienta que as variações no comportamento do concreto durante o aquecimento podem ser explicadas pelas alterações nas tensões envolvidas e nas condições de umidade do material. Além disso, o desempenho mecânico do concreto está sujeito aos períodos de exposição a temperaturas elevadas e às características dos agregados presentes na mistura.

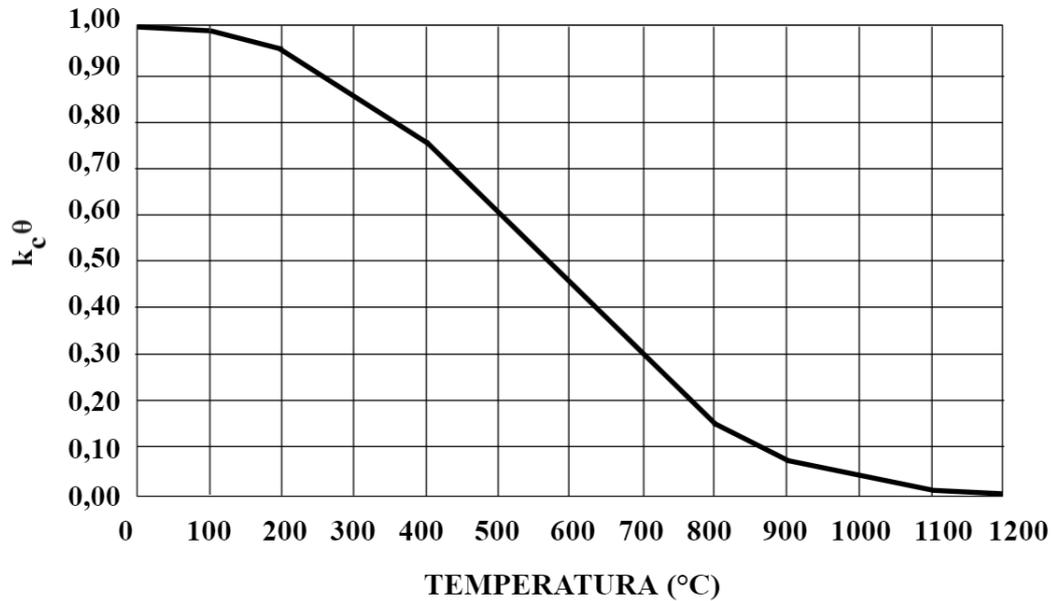
Para Lima (2005), a composição do concreto é um fator crucial a ser considerado, pois tanto a pasta de cimento quanto o agregado consistem em componentes que se decompõem, em maior ou menor grau, quando expostos ao calor. As mudanças nas propriedades macroestruturais do concreto são, principalmente, causadas pelas transformações microestruturais na pasta de cimento e nos agregados. Isso ocorre porque são os materiais constituintes do concreto que se decompõem devido ao aquecimento.

No Brasil, a NBR 15200 (ABNT, 2012) estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e a forma de demonstrar o seu atendimento, conforme requisitos de resistência ao fogo estabelecidos na NBR 14432 (ABNT, 2001).

Baseada na correlação entre comportamento dos materiais e da estrutura em situação de incêndio, a última atualização da NBR 15200 (ABNT, 2012) aplica-se somente a estruturas de concreto normais, identificadas por massa específica seca entre 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³, do grupo I de resistência conforme classificação da NBR 8953 (ABNT, 2015), e misturas preparadas, predominantemente, e com agregados silicosos.

A maioria dos concretos sofre uma redução da resistência, mas esse comportamento depende do tipo de agregado e do cimento utilizado na mistura (KHOURY, 2000). Quando submetido a elevadas temperaturas a resistência à compressão do concreto decresce em função do aumento da temperatura. Este comportamento pode ser observado no gráfico da NBR 15200 (ABNT, 2012) que traça o fator de redução da resistência do concreto silicoso em função da temperatura, apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Fator de redução da resistência do concreto silicoso em função da temperatura



Fonte: NBR 15200 (ABNT, 2012).

Para concretos preparados com outras mineralogias de agregados ou massas específicas diferentes dos apresentados na norma brasileira, a mesma indica consultar o Eurocode 2 – Part 1.2 (European Committee for Standardisation, 2004). Considerando materiais de origem silicosa e calcária, a norma da Comunidade Europeia apresenta o fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura para os dois tipos de mineralogia do agregado graúdo. A Tabela 1 apresenta os dados referentes ao fator de redução da resistência para concretos produzidos com agregados silicosos e calcários, compilados das duas normas.

Tabela 1 - Fatores de redução da resistência em função da temperatura

Temperatura (°C)	Fator de Redução da Resistência	
	Agregado Silicoso	Agregado Calcário
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,60	0,74
600	0,45	0,60
700	0,30	0,43
800	0,15	0,27
900	0,08	0,15
1000	0,04	0,06
1100	0,01	0,02
1200	0,00	0,00

Fonte: adaptado NBR 15200 (ABNT,2012) e Eurocode 2 – Part 1.2 (2004).

Os agregados compõem de 60 a 80% do volume do concreto, e as mudanças em suas propriedades durante o aquecimento podem ter um impacto substancial no coeficiente de dilatação térmica, na condutividade térmica e em outras propriedades do concreto (GRATTAN-BELLEW, 1996).

A influência da temperatura sobre o agregado é dependente da sua composição. Alguns autores afirmam que a diminuição da resistência à compressão dos concretos de agregados calcários ocorre em temperaturas mais elevadas em comparação com os concretos de agregados silicosos. Isso, geralmente, é atribuído à maior expansão térmica dos agregados silicosos e ao aumento do volume devido à transição de fase (a 573 °C) do quartzo- α para quartzo- β (XING *et al.*, 2011).

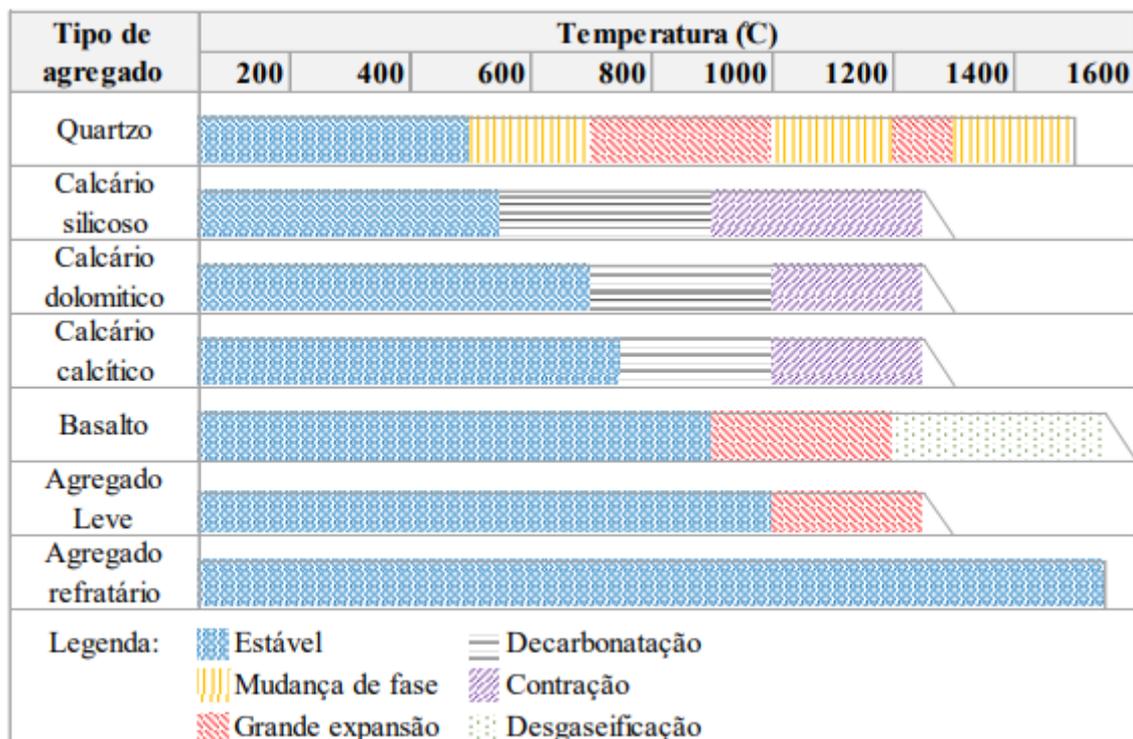
O calor específico do concreto com agregado calcário, acima de 600 °C de temperatura, é, geralmente, muito maior do que o do concreto com agregado agregados silicoso. Este calor

específico é aproximadamente dez vezes o calor necessário para produzir o mesmo aumento de temperatura no concreto de agregados silicosos (KODUR; CHENG; WANG, 2003).

Por este motivo, Kodur (2000) afirma que o concreto com agregado calcário oferece melhor resistência à fragmentação do que o concreto de agregado de silício. Pois, quanto maior o calor específico, menor será a expansão térmica do concreto de agregado de calcário em temperaturas mais elevadas, contribui para essa resistência à fragmentação

Por outro lado, a Figura 6 adaptada de Khoury (1995) apresenta o comportamento de alguns tipos de agregados em termos de estabilidade térmica e transformações físico-químicas que ocorrem durante o aumento da temperatura. Quando comparados, os agregados de basalto apresentam uma maior estabilidade térmica que os agregados de calcários, sejam estes silicosos, dolomíticos ou calcíticos, chegando a 900 °C sem alterações significativas.

Figura 6 – Estabilidade térmica e transformações físico-químicas de alguns tipos de agregados em função do aumento da temperatura



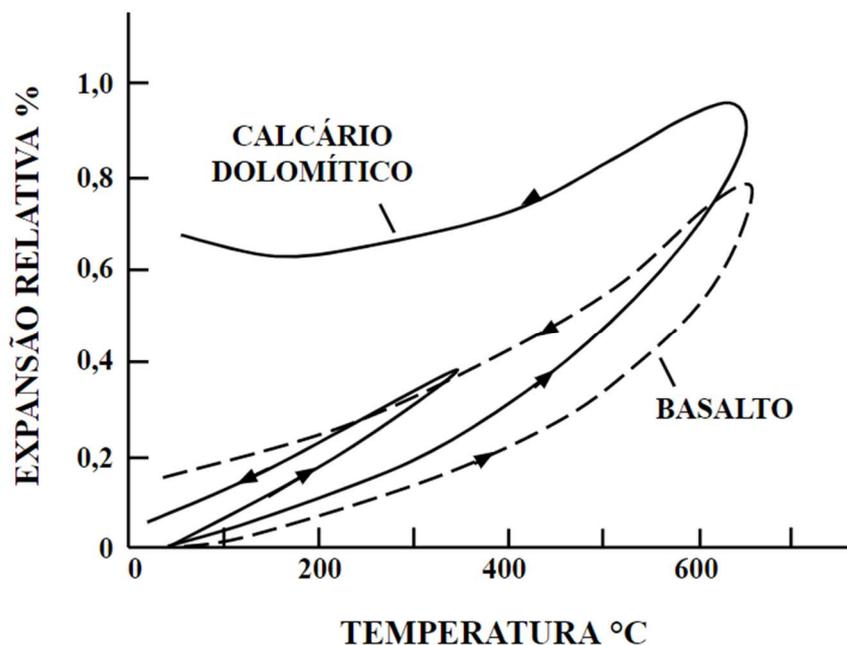
Fonte: adaptado de Khoury (1995), *apud* Sollero (2019).

Vale apontar que, conforme já observado por Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021), o Eurocode 2 – Part 1.2 (European Committee for Standardisation, 2004) não especifica se o concreto

calcário a que se refere usa agregados calcários classificados como silicioso, dolomítico ou calcário. Nota-se que, como mostra na Figura 6, os três tipos de agregados calcários possuem diferença significativa no seu comportamento térmico.

Khoury (1984) constatou que a expansão térmica do calcário dolomítico é marcadamente superior à do basalto e atinge valores que implicam em dano considerável ao concreto. Este comportamento está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Expansão térmica do agregado de calcário dolomítico e basalto



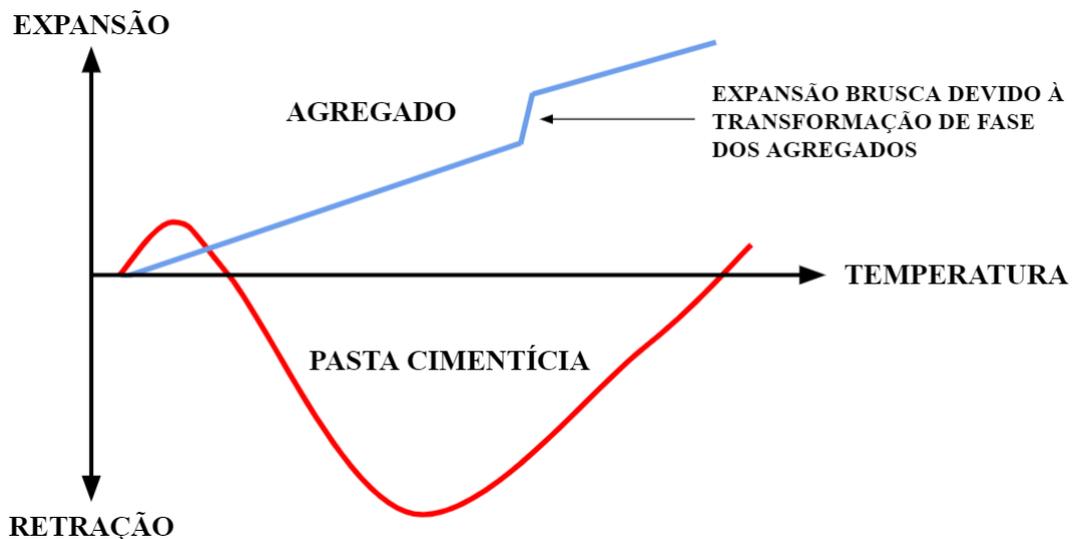
Fonte: adaptado de Khoury (1984).

Fernandes *et al.* (2017), afirma que em temperaturas maiores que 600 °C as rochas calcárias tornam-se instáveis devido à transformação de carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (cal - CaO) e dióxido de carbono (CO_2). Annerel e Terwe (2009) acreditam que os carbonatos que se decompõem durante o aquecimento se reidratam durante o resfriamento, e que essa reação de reidratação gera um aumento de 44% do seu volume.

Quando o concreto é exposto a elevadas temperaturas, a sua deterioração é atribuída, essencialmente, a três fatores: alterações físico-químicas na pasta de cimento, nos agregados e a incompatibilidade térmica entre ambos. O aumento da temperatura no concreto resulta em uma expansão térmica diferencial entre o agregado e a matriz cimentícia. Isso ocorre porque,

durante o aquecimento, a pasta experimenta um processo significativo de retração devido à desidratação, enquanto os agregados passam por um processo de expansão. Comportamento que pode ser observado na Figura 8. Esse fenômeno resulta na formação de fissuras, que se iniciam, principalmente, na zona de transição devido à sua maior suscetibilidade, podendo, conseqüentemente, dar origem a um processo de deslocamento (FERNANDES *et al.*, 2017).

Figura 8 – Incompatibilidade térmica entre agregados e pasta de cimento hidratada



Fonte: Fernandes *et al.* (2017).

O spalling – normalmente traduzido como “deslocamento” – é o lascamento, explosivo ou não, de camadas ou pedaços superficiais de concreto de um elemento estrutural, quando exposto a elevadas temperaturas ou aumento rápido da mesma (FU; LY, 2011).

Segundo Malhotra (1982), o spalling (explosivo) é causado pelo desenvolvimento de alta pressão de vapor nos poros, acompanhado pela formação de fissuras no interior do concreto paralelas à superfície, sob certas condições de tensão, ocorrendo o deslocamento explosivo da superfície do concreto. Esse tipo de fragmentação ocorre em sua maior parte entre 250 °C e 400 °C, níveis que são comumente alcançados em condições de incêndio (KALIFA; MENNETEAU; QUENARD, 2000).

Os lascamentos explosivos estão relacionados com o comportamento da pasta de cimento, isso geralmente é causado pela ação combinada da pressão dos poros e do estresse térmico interno causado por gradientes de temperatura (BUCHANAN, 2001). Em alguns casos, o spalling é

consequência da mineralogia do agregado ou da concentração de tensões térmicas surgidas durante o aquecimento (COSTA; FIQUEIREDO; SILVA, 2002).

O fenômeno de spalling nos agregados refere-se à deterioração dos agregados localizados na superfície do concreto, resultando em rompimentos acompanhados por estalos audíveis. A velocidade de aquecimento e o coeficiente de dilatação térmica dos agregados graúdos são os parâmetros que exercem maior influência nesse tipo de fenômeno (LIMA, 2005). Na Tabela 2 são apresentadas, de forma resumida, as características de um spalling nos agregados.

Tabela 2 - Características do spalling nos agregados

Spalling	Tempo (min)	Natureza	Som	Dano	Influência
					- Taxa de aquecimento
					- Expansão Térmica do agregado
Agregado	7 a 30	Intenso	Estalo	Superficial	- Tamanho do agregado
					- Difusão térmica do agregado
					- Umidade

Fonte: adaptado de Khoury, 2000.

Conforme destacado por Lima (2005), embora haja uma variedade de resultados contraditórios entre diferentes autores em relação à influência do tipo de agregado no spalling, uma conclusão geral pode ser formulada: o fenômeno tende a ser menos pronunciado quando o concreto é composto por agregados de baixo coeficiente de dilatação térmica.

Segundo observações feitas por Mindeguia *et al.* (2012), evidentemente, a natureza do agregado afeta o comportamento do concreto em altas temperaturas. Isto é, principalmente, devido à incompatibilidade de alta tensão térmica entre a pasta de cimento endurecida e os agregados. Esta divergência cria danos significativos, responsáveis por mudanças nas propriedades de transferência de massa, propriedades mecânicas e comportamento em termo higroscópico no material.

De forma geral, o desempenho térmico do concreto será otimizado quando os agregados apresentarem um coeficiente de dilatação térmica reduzido e uma granulometria adequada.

Além disso, o concreto deve ser bem compactado, ter baixa condutividade térmica, baixa umidade e alta resistência à tração. Esses fatores, conforme mencionados por Lima (2005), contribuirão para uma melhor resistência do concreto às condições de calor. Um “bom” agregado, do ponto de vista das altas temperaturas, necessita ter um baixo coeficiente de deformação térmica, ausência de deformação residual após o resfriamento, estabilidade térmica, e uma estrutura monomineral da rocha que constitui o agregado (GAWESKA, 2004).

2.4 TRABALHOS REALIZADOS RECETEMENTE AVALIANDO A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE AGREGADOS GRAÚDOS EM CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

Nas últimas décadas, estudos voltados à avaliação das propriedades mecânicas do concreto exposto a altas temperaturas vêm sendo desenvolvidos. Mas, por se tratar de um assunto de alta complexidade, nota-se que os resultados apresentados por diversos autores possuem alta variabilidade. Isso se dá pelo fato de que qualquer mudança nos parâmetros do traço do concreto ou dos materiais utilizados pode afetar drasticamente seu comportamento.

Segundo Khoury (2000), um dos parâmetros que, provavelmente, tem maior influência no desempenho mecânico do concreto em altas temperaturas é a seleção e caracterização do agregado graúdo. Entretanto, são poucos os estudos voltados a avaliação da influência de diferentes tipos de agregados em concretos expostos a altas temperaturas.

Recentemente, Veiga (2022), realizou um trabalho de pesquisa de mestrado avaliando a influência dos agregados graúdos de diferentes mineralogias (basalto, granito e calcário), do estado do Paraná, na resistência à compressão do concreto quando submetido a temperaturas elevadas. Os corpos de prova foram submetidos a 4 diferentes faixas de temperatura, 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C, e mantidos no patamar de temperatura por 60 minutos.

Os resultados mostraram que, em termos de resistência à compressão, na temperatura de 800 °C o concreto produzido com basalto apresentou resultados 6 pontos percentuais superiores ao granito. Além disso, observou-se que na temperatura de 200 °C o concreto produzido com agregado graúdo calcário apresentou ganho de resistência à temperatura de 0,01%, já os produzidos com basalto e granito apresentaram perdas de 0,01% e 0,08%, respectivamente.

Os resultados mostraram que o concreto confeccionado com basalto apresentou resultados 6 pontos percentuais superiores ao granito na temperatura a 800 °C. O agregado calcário apresentou ganho de resistência a temperatura de 200 °C de 0,01%, já os demais apresentaram perdas de 0,01% e 0,08% para o basalto e o granito, respectivamente, na resistência à compressão.

Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021) publicaram um artigo em que é avaliada a influência do agregado graúdo na resistência mecânica residual do concreto exposto a altas temperaturas. O programa experimental deste estudo avaliou três tipos de agregado graúdo, sendo eles basalto, granito e calcário, do estado de São Paulo. Além disso, foram avaliados sete tipos de mistura de concreto de alta resistência e três misturas de concreto normal. Os concretos foram expostos até a temperatura de 900 °C e a taxa de aquecimento e resfriamento foi de 1 °C/min, onde a temperatura máxima foi mantida durante 60 min. Foram realizados ensaios de determinação da resistência à compressão, resistência à tração indireta e módulo de elasticidade para caracterização dos corpos de prova e avaliação do comportamento residual do concreto após exposição a altas temperaturas.

Em termos de resistência à compressão residual, os concretos com agregados silicosos (granito e basalto) apresentaram desempenho mecânico superior ao concreto com agregado de calcário dolomítico. Algumas divergências em relação as normas vigentes foram apontadas, indicando que seu uso poderia ir contra a segurança, o que evidencia a inadequação da aplicação de fatores de redução em determinados casos.

Referente ao módulo de elasticidade, verificou-se que este foi mais afetado com o aumento da temperatura do que a resistência à compressão residual. Além disso, em todas as temperaturas avaliadas, o módulo de elasticidade residual do concreto com agregado graúdo de calcário dolomítico foi inferior ao módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado graúdo de granito e basalto. Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021) explicam que tal comportamento se deve à influência das suas características e estrutura interna da rocha.

No estado do Rio Grande do Sul, Minatto (2018) realizou um trabalho analisando agregados de basalto, granito e calcário da região. Os concretos foram submetidos a três temperaturas de aquecimento: 200 °C, 400 °C e 600 °C, bem como, dois tipos de resfriamento: lento (temperatura ambiente) e brusco (aspersão de água).

Dos três agregados examinados, observaram-se perdas de resistência semelhantes para ambos os métodos de resfriamento a temperaturas de 200 °C e 400 °C. No entanto, a 600 °C, houve uma disparidade significativa nos resultados, especialmente, para o granito e o calcário. Entre os agregados testados a 600 °C, o calcário registrou a maior perda de resistência (54,8%), seguido pelo basalto (44,5%) e pelo granito (41,1%).

Masood *et al.* (2018) avaliaram o efeito da utilização de agregados graúdos de quartzito, granito e basalto nas propriedades residuais do concreto em temperaturas elevadas. Foram avaliadas três misturas de concreto. A taxa de aquecimento foi de 3 °C/min, e os patamares de temperatura foram 200 °C, 400 °C e 600 °C. Foram realizados ensaios de velocidade do pulso ultrassônico e resistência à compressão para caracterização dos corpos de prova e avaliação do comportamento residual do concreto após exposição a altas temperaturas.

Observou-se que o concreto produzido com agregado de quartzito apresentou uma maior resistência à compressão, em temperatura ambiente, do que os concretos produzidos com granito e basalto. Referente à resistência a compressão residual após exposição a elevadas temperaturas, o concreto de agregado quartzito manteve-se superior, seguido pelo concreto de agregado de granito e por último o concreto com agregado de basalto.

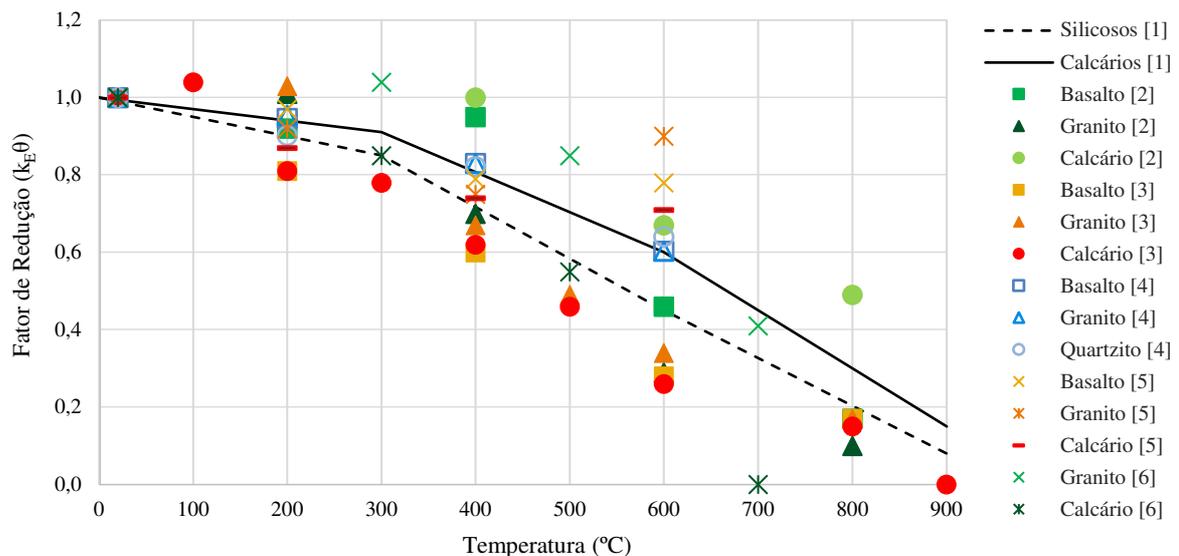
Santos e Rodrigues (2014) realizaram um estudo voltado às propriedades mecânicas residuais de concretos produzidos com agregados calcários e graníticos após o incêndio. O estudo considerou diferentes níveis de carregamento (0,3fcd e 0,7fcd), diferentes processos de resfriamento (resfriamento ao ar e por jato de água) e variações das temperaturas máximas de exposição do concreto (20 °C, 300 °C, 500 °C e 700 °C). As propriedades avaliadas foram a resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em uma prensa de 600 kN de capacidade e um forno acoplado para aquecer os corpos de prova durante o ensaio. As amostras foram, primeiramente, carregadas até o nível requerido e então a temperatura foi aumentada a uma taxa de 38 °C/min até o patamar de temperatura desejado. A carga inicial aplicada foi mantida constante durante todo o processo de aquecimento/resfriamento. Já para o ensaio de módulo de elasticidade, os processos de aquecimento e resfriamento foram semelhantes aos anteriores, mas os corpos de prova não foram submetidos a carregamento durante o aquecimento/resfriamento, e foram testados logo após o aquecimento e resfriamento.

Ainda sobre o mesmo estudo desenvolvido por Santos e Rodrigues (2014), para o nível de carregamento de 0,3fcd, o concreto produzido com agregado calcário apresentou maior redução de resistência do que o concreto de agregado granito. Para o nível de carregamento de 0,7fcd, ambos os concretos sofreram grandes reduções na resistência à compressão residual com o aumento da temperatura de exposição. Já o módulo de elasticidade residual, apresentou uma diminuição semelhante com a temperatura de exposição, independentemente do tipo de agregado ou do processo de resfriamento utilizado.

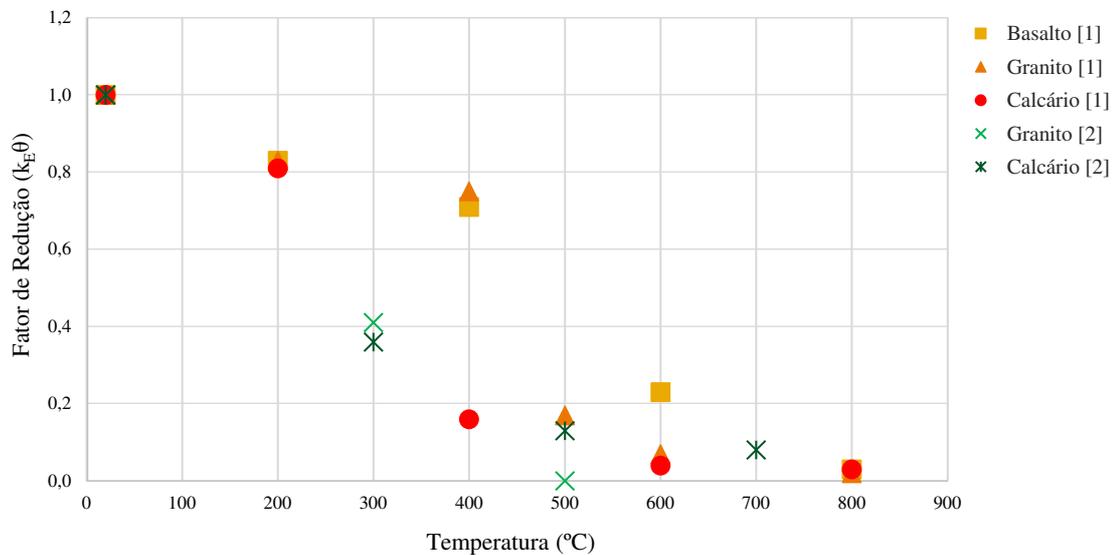
Compilando os dados apresentados nos três trabalhos mencionados neste item, as Figuras 9 e 10 ilustram os gráficos com os dados de fator de redução, em função da temperatura, da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, respectivamente.

Figura 9 – Fatores de redução da resistência a compressão em função do aumento da temperatura de exposição do concreto – revisão



Fonte: elaborado pela autora, onde [1] NBR 15200 (2012) e Eurocode 2 - Part 1.2 (2004), [2] Veiga (2022), [3] Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021), [4] Masood *et al.* (2018), [5] Minatto (2018) e [6] Santos e Rodrigues (2014).

Figura 10 – Fatores de redução do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura de exposição do concreto – revisão



Fonte: elaborado pela autora, onde [1] Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021) e [2] Santos e Rodrigues (2014).

Em relação aos tipos de agregados mais utilizados em estudos voltados à avaliação do concreto em altas temperaturas, Shahraki *et al.* (2022) elaboraram uma revisão de artigos publicados depois de 1990. Esta revisão levou em consideração artigos sobre a resistência à compressão residual do concreto após exposição a altas temperaturas. A base de dados recolhida mostra que a maioria das pesquisas existentes se concentram no concreto com agregado graúdo silicoso, apresentando dados limitados para concretos utilizando agregados calcários. O conjunto de dados coletado inclui 1.240 pontos, cerca de 87% dos dados considerados nesta revisão utilizavam agregado graúdo silicoso e somente 13% agregados graúdos calcários. Os dados de resistência à compressão residual coletados neste estudo foram comparados com as especificações normativas do Eurocode 2 – Part 1.2 (European Committee for Standardisation, 2004). Verificou-se que a resistência à compressão residual, para ambos os tipos de agregados, apresenta grande variação em seus resultados, para diferentes tipos de temperatura.

2.5 ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO LEME/UFRGS SOBRE CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

Há mais de duas décadas, várias pesquisas, voltadas à área de concretos submetidos a altas temperaturas, vêm sendo desenvolvidas no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS). O conhecimento voltado às propriedades do concreto após exposição a altas temperaturas são de extrema importância para a conscientização sobre a gravidade dos danos que podem ser causados durante um incêndio.

Os trabalhos já desenvolvidos no LEME/UFRGS sobre concretos submetidos a altas temperaturas estão apresentados no Tabela 3.

Tabela 3 - Trabalhos desenvolvidos no LEME sobre concreto submetido a altas temperaturas

Ano	Autor	Nível	Título
2001	Lima, R. C. A.	Dissertação de Mestrado	Investigação dos efeitos de temperaturas elevadas em reforços estruturais com tecidos de fibra de carbono
2005	Lima, R. C. A.	Tese de Doutorado	Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas
2006	Wendt, S. C.	Dissertação de Mestrado	Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica
2008	Caetano, L. F.	Dissertação de Mestrado	Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas
2010	Kirchhof, L. D.	Tese de Doutorado	Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas
2011	Ruschel, F.	Dissertação de Mestrado	Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado: aplicação ao caso Shopping Total em Porto Alegre - RS
2013	Scotton, J. A.	Trabalho de Conclusão de Curso	Comportamento aderência-concreto em situações não usuais: efeito de altas temperaturas

2014	Souza, L. A. A.	Tese de Doutorado	Comportamento do concreto frente à condição de altas temperaturas: Análise das propriedades mecânicas residuais
2015	Farias, V. P.	Trabalho de Conclusão de Curso	Pilares de concreto armado com armaduras corroídas submetidos a altas temperaturas: Capacidade portante pós deterioração
2017	Almeida, J. M. A.	Tese de Doutorado	Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz
2018	Biazetto, B. R.	Trabalho de Conclusão de Curso	Análise experimental da porosidade e das propriedades mecânicas do concreto submetido à fadiga térmica
2018	Bidinotto, G. B.	Trabalho de Conclusão de Curso	Análise experimental de capacidade de carga residual e spalling em pilares de concreto armado com concretos de diferentes classes de resistência em situação de incêndio
2018	Marques, D. B.	Trabalho de Conclusão de Curso	Reforço de pilares de concreto armado expostos a altas temperaturas com a utilização de tecido de fibra de carbono
2018	Nunes, J. L. S.	Trabalho de Conclusão de Curso	Análise experimental da influência da técnica de resfriamento, tipo e período de cura em elementos de concreto submetidos a altas temperaturas
2019	Padilha, W. F. L.	Trabalho de Conclusão de Curso	Análise experimental do desempenho mecânico e de durabilidade de concreto estrutural com resíduos de polipropileno e cinza de casca de arroz sem controle de queima exposto a elevadas temperaturas
2019	Perin, P. I. P.	Trabalho de Conclusão de Curso	Influência da resistência à compressão no spalling explosivo em concretos de alta resistência em situação de incêndio
2019	Ferreira, M. W.	Dissertação de Mestrado	Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em concreto armado a altas temperaturas
2022	Franchetto, A. S.	Dissertação de Mestrado	Investigação das características físicas e propriedades residuais de concretos autoadensáveis expostos a altas temperaturas

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 3 pode ser utilizada como base para entender o que já foi estudado sobre concreto submetidos a altas temperaturas no LEME/UFRGS, assim podendo compreender quais lacunas de conhecimento ainda precisam ser exploradas.

3 METODOLOGIA

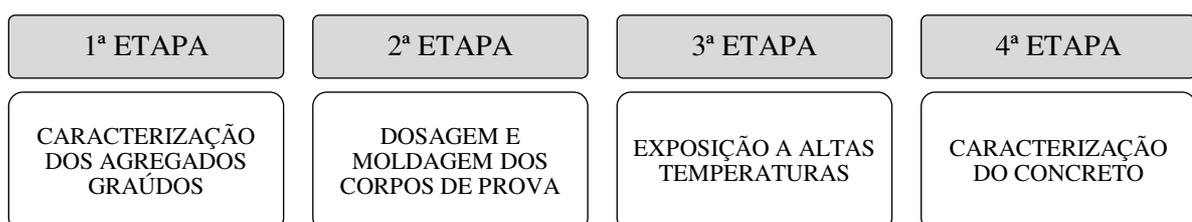
Este capítulo apresenta as bases do programa experimental para que seja atingido o objetivo principal do trabalho. São descritos os materiais empregados e suas características, os ensaios de caracterização dos agregados graúdos, o processo de moldagem dos corpos de prova, e os ensaios de caracterização do comportamento residual do concreto submetido a elevadas temperaturas. Além disso, será apresentada a estratégia de pesquisa adotada.

O programa experimental é dividido em quatro etapas. A primeira etapa apresenta os ensaios de caracterização macro e microestrutural dos agregados graúdos de diferentes mineralogias. Já a segunda etapa, compreende a dosagem e moldagem dos corpos de prova utilizando dois traços diferentes.

A terceira etapa é destinada ao processo de exposição dos corpos de prova a temperaturas elevadas. Esse procedimento foi realizado no Laboratório de Ensaio e Modelo Estruturais (LEME) da UFRGS em fornos elétricos com grande capacidade de aquecimento, a fim de simular uma situação real de incêndio.

Por fim, a quarta etapa é destinada à realização dos ensaios de caracterização mecânica do concreto, antes e após a exposição a altas temperaturas. Foram realizados ensaios de resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade dos corpos de prova cilíndricos, além do ensaio de difração de raio X (DRX) para análise microestrutura do concreto. Para facilitar a visualização do programa experimental, a Figura 11 apresenta esquematicamente todas as etapas do programa.

Figura 11 – Esquema do programa experimental



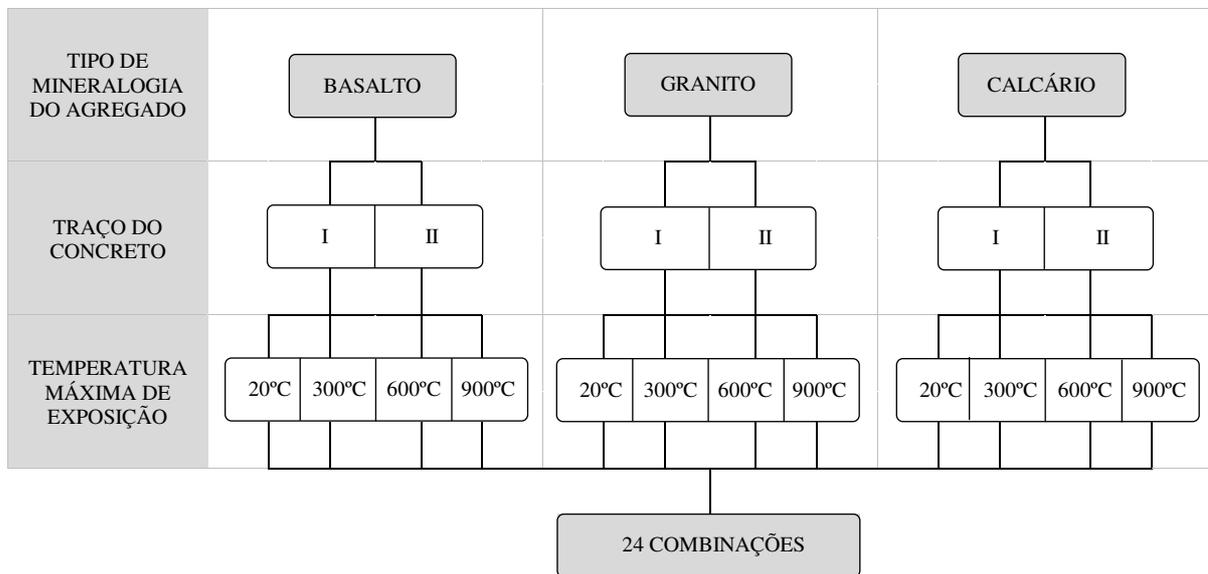
Fonte: elaborado pela autora.

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

De acordo com os objetivos do trabalho, foram definidas as variáveis controláveis do programa experimental, de forma que se possa avaliar sua influência nas variáveis de resposta, principalmente, em relação ao comportamento dos concretos produzidos com diferentes tipos de mineralogia de agregados graúdos, do ponto de vista de resistência residual após exposição a temperaturas elevadas.

A estratégia de pesquisa foi pensada tendo como princípio a utilização de três diferentes mineralogias de agregados graúdos (basalto, granito e calcário). Além disso, foram avaliados dois traços de concreto de resistências diferentes (35 MPa e 50 MPa). Estes traços foram ensaiados em três temperaturas máximas de exposição (300 °C, 600 °C e 900 °C), além da temperatura ambiente (20 °C). As variáveis controláveis apresentadas totalizam 24 combinações. Para facilitar a visualização, a estratégia de pesquisa e suas variáveis controláveis estão ilustradas no fluxograma da Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma da estratégia de pesquisa, contendo as variáveis controláveis



Fonte: elaborado pela autora.

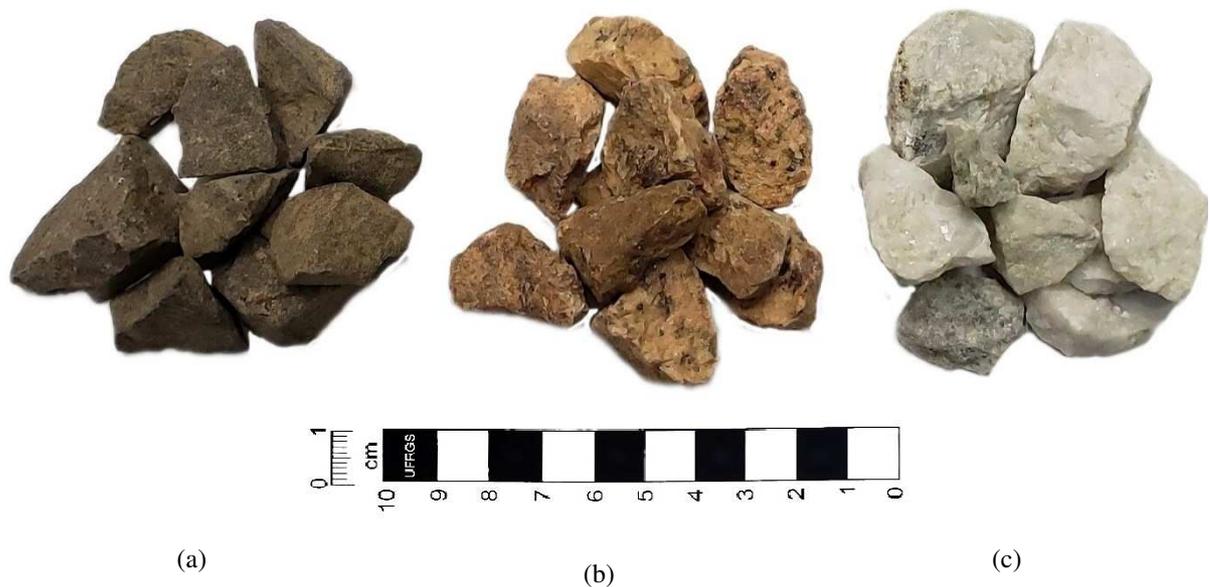
3.2 MATERIAIS EMPREGADOS

Neste item são apresentados os materiais empregados para confecção dos corpos de prova de concreto utilizados na pesquisa.

3.2.1 Agregado graúdo

Os agregados graúdos utilizados neste trabalho são de três tipos de mineralogias diferentes: basalto, granito e calcário, apresentados na Figura 13 (a), (b) e (c), respectivamente.

Figura 13 – Tipos de mineralogias de agregados graúdos selecionados para o estudo



Fonte: fotos da autora.

Todas as amostras foram coletadas em jazidas de mineradoras do estado do Rio Grande do Sul. O Tabela 4 apresenta as três mineralogias estudadas, nomenclatura utilizada para identificação dos agregados e município no qual está localizada cada jazida.

Tabela 4 - Mineralogia, nomenclatura das amostras e localização das jazidas

Mineralogia	Nomenclatura Adotada	Localização
Basalto	B	Montenegro
Granito	G	Porto Alegre
Calcário	C	Bagé

Fonte: elaborado pela autora.

A caracterização completa do agregado graúdo foi realizada seguinte os ensaios e critérios apresentados no item 3.3.

3.2.2 Areia média

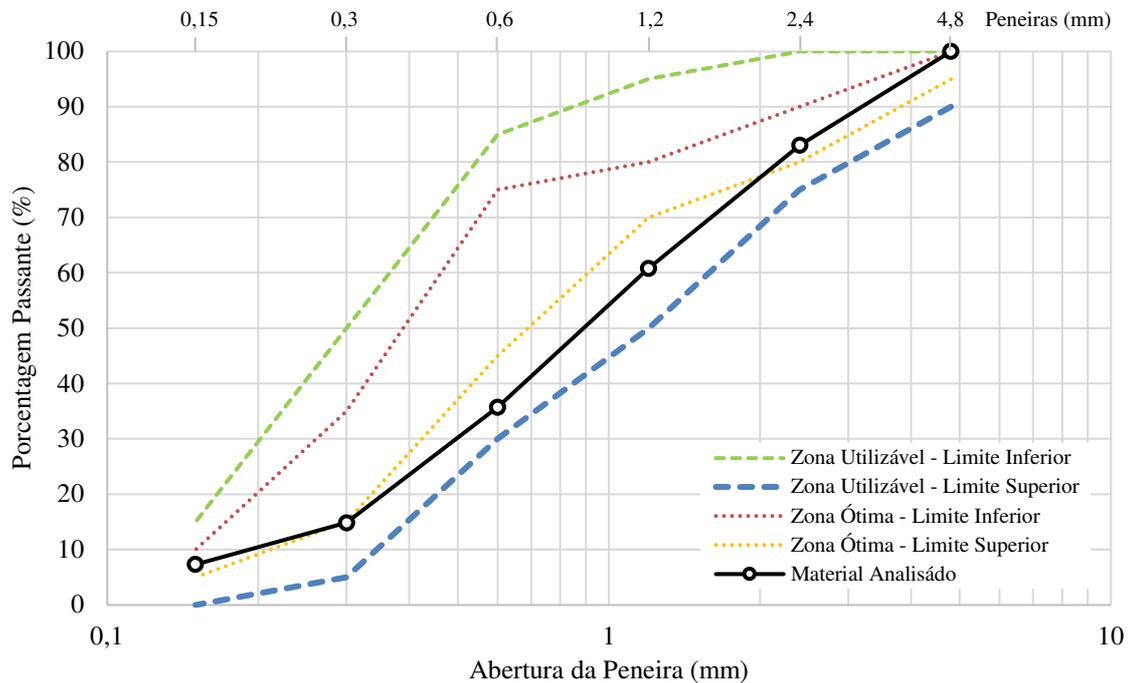
A areia média utilizada é de origem natural oriunda de jazida da cidade de Porto Alegre / RS. A Tabela 5 descreve suas características granulométricas de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) seguida da sua curva granulométrica representada na Figura 14, com os limites de zonas estabelecidas pela norma.

Tabela 5 - Granulometria da areia média

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	5,82	0,00
2,4	16,97	16,97
1,2	22,22	39,19
0,6	25,11	64,30
0,3	20,85	85,15
0,15	7,55	92,70
Fundo	1,48	94,18
TOTAL	100,00	-
	Módulo de finura	2,68
	Dimensão máxima característica (mm)	4,80

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 14 – Curva granulométricas da areia média



Fonte: elaborado pela autora.

3.2.3 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho consiste em um cimento Portland de alta resistência inicial, classificado como CP V-ARI RS fabricado pela empresa Votorantim. As características químicas, físicas e mecânicas deste cimento estão apresentadas nas Tabelas 6, 7 e 8, respectivamente.

Tabela 6 – Características Químicas do CP V-ARI RS Votoran

Descrição	Limite Normativo	Média
Perda ao Foto (%)	≤6,5	4,5
MgO (%)	N/A	5,8
SO ₃ (%)	≤4,5	2,9
Resíduo Insolúveis (%)	N/A	10,1

Fonte: adaptado de VOTORANTIM (2022).

Tabela 7 – Características Físicas do CP V-ARI RS Votoran

Descrição	Limite Normativo	Média
Finura #200 (%)	≤6,0	0,0
Finura #325 (%)	N/A	0,4
Blaine (cm ² /g)	≥3000	5045
Densidade (g/cm ³)	N/A	3,00
Água de consistência (%)	N/A	30,04
Início Pega (min)	≥60	229
Fim Pega (min)	≤600	269
Expansão a quente (mm)	≤5,0	0,0

Fonte: adaptado de VOTORANTIM (2022).

Tabela 8 – Características Mecânicas do CP V-ARI RS Votoran

Descrição	Limite Normativo	Média
Resistência compressão 1 dia (MPa)	≥11,0	24,4
Resistência compressão 3 dias (MPa)	≥24,0	34,5
Resistência compressão 7 dias (MPa)	≥34,0	39,9
Resistência compressão 28 dias (MPa)	-*	47,4

Fonte: adaptado de VOTORANTIM (2022).

3.2.4 Aditivo superplastificante

Os traços dos dois tipos de concreto foram fixados para os três tipos de mineralogia de agregados graúdos, em função disso, optou-se por utilizar um aditivo químico para melhorar a trabalhabilidade dos traços de concreto. O uso do aditivo vem de modo a permitir trabalhabilidades adequadas para a moldagem de elementos sem que a relação água/cimento do concreto seja alterada. O aditivo utilizado é o Clarena MR 4350 da fabricante GCP. Este é um aditivo formulado com produtos químicos exclusivos, a tecnologia CLARENA® ajuda a tratar problemas de comportamento reológico, fluidez e problemas com argilas devido aos agregados utilizados no concreto.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

Neste item é apresentada uma descrição dos ensaios de caracterização das amostras de agregados graúdos dos três tipos de mineralogia estudados neste trabalho. Para tanto, foi definida uma seleção de ensaios necessários com base na NBR 7211 (ABNT, 2009). A Tabela 9 apresenta os procedimentos que serão realizados e suas respectivas normas.

Tabela 9 - Ensaios de caracterização dos agregados graúdos e suas respectivas normas

Ensaios de Caracterização	Normas
Análise petrográfica do agregado	-
Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248/2003
Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro	NBR 7809/2019
Determinação da densidade e da absorção de água	NBR 16917/2021
Determinação da massa unitária e do índice de vazios	NBR 16972/2021

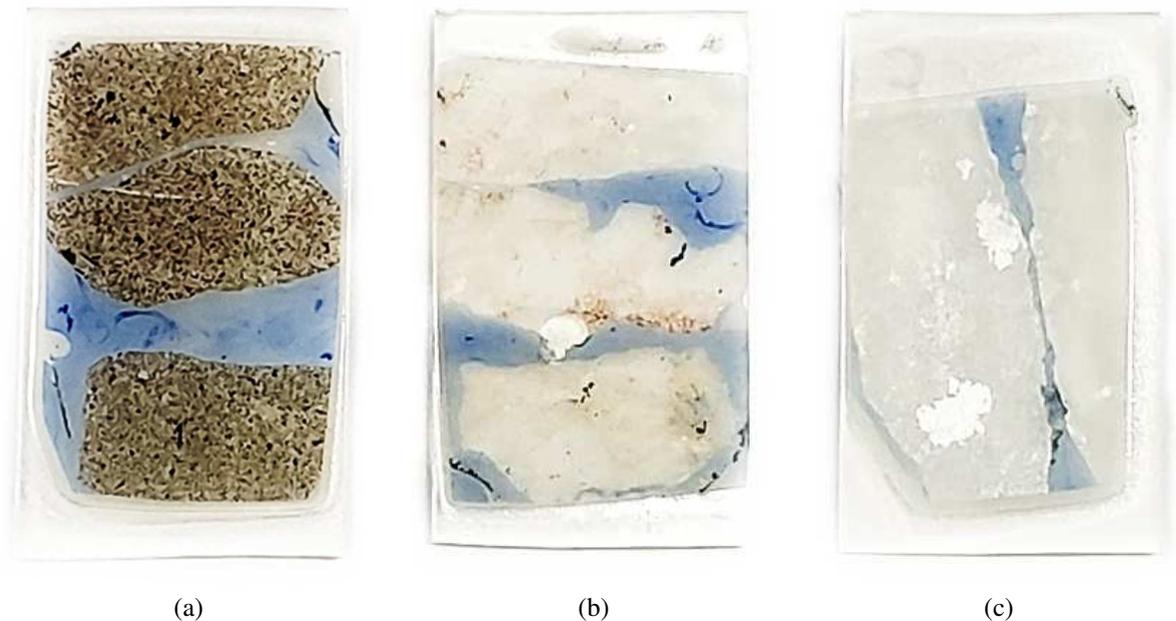
Fonte: elaborado pela autora.

A fim de confirmar a mineralogia dos agregados graúdos utilizados neste trabalho, foram realizadas análises petrográficas das amostras. A petrografia óptica permite a identificação, descrição e interpretações acerca da assembleia mineralógica constituinte das rochas, bem como, a observação das principais texturas e estruturas em microescala. Estas informações são a base para a caracterização e classificação petrográfica de uma rocha. Isso permite a correlação, ou então o estabelecimento de diferenças entre as rochas, baseado em suas características petrográficas (cf. Klein e Dutrow, 2007; Deer *et al.* 2013).

As análises petrográficas foram realizadas em parceria com o Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq) do Instituto de Geociências (IGeo) da UFRGS. Para a realização desta etapa, foi utilizado um microscópio petrográfico modelo Leica DMLP, com objetivas de 2,5x, 5x, 10x, 20x e 50x de aumento, equipado com câmera LeicaDC300F, e uma lupa binocular equipada com sistema de luz polarizada, modelo Leica MZ125, em aumento de 1,6x, com câmera digital acoplada, modelo Canon PowerShot S50.

Para análise das amostras de rocha, foram confeccionadas lâminas delgadas de 24x48 mm para cada tipo de mineralogia de rocha utilizada neste trabalho. A Figura 15 (a), (b) e (c) mostra as lâminas delgadas de basalto, granito e calcário, respectivamente.

Figura 15 – Lâminas delgadas das rochas utilizadas neste trabalho



Fonte: fotos da autora.

Os demais ensaios de caracterização das três amostras de agregado graúdo utilizadas neste trabalho seguiram as prescrições das normas apresentadas na Tabela 6.

3.4 PROCEDIMENTOS DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

Definidos os materiais a serem utilizados, iniciou-se o programa experimental. Neste item estão descritos os procedimentos utilizados para preparação dos corpos de prova que foram ensaiados posteriormente, desde a escolha dos traços a serem utilizados, concretagem e moldagem dos corpos de prova.

3.4.1 Definição dos traços

Foram definidos dois traços para confecção dos corpos de prova, denominados Traço I e II, com resistência médias de 35 MPa e 50 MPa aos 28 dias, respectivamente. Estes traços foram utilizados como padrão para os ensaios com os três tipos de mineralogia de agregados, para minimização das interferências de variáveis do concreto e uma análise mais direta e comparativa. Os traços utilizados foram baseados em estudos já realizados anteriormente no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME). A Tabela 10 apresenta os traços dos concretos empregados no trabalho.

Tabela 10 – Traços definidos para utilização neste trabalho

	Cimento	Areia	Brita	Relação a/c
Traço I	1	3,42	4,08	0,56
Traço II	1	2,12	2,88	0,42

Quando necessário, foi utilizado aditivo superplastificante para ajustar a trabalhabilidade.

Fonte: elaborado pela autora.

3.4.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os concretos empregados na moldagem dos corpos de prova foram preparados em laboratório, com auxílio de uma betoneira de 400 litros. A moldagem e cura dos corpos de prova seguiram as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Foram moldados corpos de prova cilíndricos 100x200 mm, adensados em duas camadas, em mesa vibratória. Após o término da concretagem, foi realizada a medição da consistência do concreto através do ensaio de abatimento de tronco de cone (comumente referido como slump test), conforme NBR 16889 (ABNT, 2020).

No dia seguinte ao da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e curados em câmara úmida por 7 dias, à temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar superior a 95%. Concluído o período estipulado para a cura úmida, os corpos de prova foram armazenados por 63 dias em câmara climatizada, a uma temperatura de 23 ± 2 °C e umidade de 50%, visando a estabilização da umidade interna dos corpos de prova a fim de evitar o spalling no concreto.

3.5 EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS

Terminando esse período de cura e sazonalização de 70 dias, os corpos de prova foram submetidos à ação das altas temperaturas, estabelecidas de acordo com a literatura especializada, de 300 °C, 600 °C e 900 °C. Para exposição dos corpos de prova a temperaturas elevadas, foi utilizado um forno elétrico industrial Sanchis computadorizado com grande capacidade de aquecimento, a fim de simular uma situação real de incêndio. Com aquecimento por resistências nas paredes internas, o forno utilizado possui a capacidade de alcançar temperaturas de até 1340 °C e potência de 12 kW/h. A Figura 16 mostra o forno elétrico utilizado para aquecimento das amostras.

Figura 16 – Forno elétrico empregado para o aquecimento das amostras



Fonte: fotos da autora.

A tendência atual para determinar a resistência residual em corpos de prova de concreto é utilizar taxas de aquecimento baixas, convergindo com as recomendações da RILEM 129-MHT (2004). Essa recomenda uma taxa de aquecimento de 1 °C/min para corpos de prova de concreto com diâmetro 100 mm. Em concordância com a RILEM 129-MHT e a fim de mitigar ao máximo a questão de spalling no concreto, foi adotada uma taxa de aquecimento de 1 °C/min.

Os tempos de aquecimento e homogeneização da temperatura foram baseados no trabalho de Franchetto (2022), também desenvolvido no LEME/UFRGS. Franchetto (2022) realizou a calibragem dos tempos de aquecimento com a inserção de termopares em tubos de cobre na

parte interna do corpo de prova. Foram realizadas simulações de aquecimento para coleta dos dados das temperaturas do forno e no interior dos corpos de prova para determinação das taxas de aquecimento.

Os tempos de aquecimento foram determinados partindo de uma temperatura padrão de 20 °C e com base na taxa de aquecimento determinada. Para o tempo de homogeneização, levou-se em consideração os dados obtidos nos termopares. Os tempos foram determinados tendo como objetivo a homogeneização da temperatura no interior dos corpos de prova para analisar os efeitos térmicos sobre o material como um todo. Os tempos de aquecimento e homogeneização adotados para cada temperatura estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Tempos de aquecimento e homogeneização das temperaturas

Tempo (minutos)	Temperaturas		
	300 °C	600 °C	900 °C
Tempo de aquecimento	300	600	900
Tempo de homogeneização	450	300	60
Tempo total	750	900	960

Fonte: elaborado pela autora.

Ao fim do período de aquecimento e homogeneização, o forno foi desligado e os corpos de prova foram retirados do forno e reservados novamente na câmara climatizada, a uma temperatura de $23^{\circ} \pm 2$ °C e umidade de 50%, para sofrer resfriamento natural até o momento do ensaio. Este cuidado foi tomado a fim de padronizar as condições de resfriamento e evitar distorções nos resultados.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Neste item são descritos os diversos ensaios empregados na pesquisa. A combinação dos experimentos selecionados para integrar o programa experimental visa avaliar o comportamento residual do concreto após exposição a altas temperaturas, para posterior análise das variáveis de pesquisa.

3.6.1 Compressão uniaxial

O procedimento de ensaio foi baseado na NBR 5739 (ABNT, 2007). Para realização do ensaio foi utilizada uma prensa hidráulica Shimadzu monitorada por computador, com capacidade de 2000 kN. A determinação da resistência a compressão uniaxial foi realizada 28 e 70 dias após a concretagem, e a resistência residual foi medida 24 horas após o aquecimento. A Tabela 12 apresenta estratégia experimental para este ensaio.

Tabela 12 – Estratégia experimental compressão uniaxial

Dimensões do corpo de prova	100x200 mm
Idade de ruptura	28 e 70 dias
Amostras ensaiadas	2 para cada traço/agregado/temperatura

Fonte: elaborado pela autora.

3.6.2 Módulo de elasticidade

A metodologia para determinação do módulo de Young foi baseada na NBR 8522 (ABNT, 2017). O método define as tensões que devem ser aplicadas aos corpos de prova e o tempo em que o carregamento deve ser mantido, além da velocidade de sua aplicação.

O ensaio foi realizado 24 horas após a exposição a altas temperaturas dos concretos. Foram ensaiados três corpos de prova para cada traço, agregado e temperatura. As tensões foram aplicadas aos corpos de prova pela prensa Shimadzu e os deslocamentos foram medidos por intermédio de transdutores de deslocamento linear (LVDTs - Linear Variable Differential Transformers) conforme mostra a Figura 17. As medições de carga e de deformação específica foram registradas pelo software Catman Easy.

Figura 17 – Ensaio do módulo de elasticidade



Fonte: fotos da autora.

3.6.3 Difração de Raios X (DRX)

Além dos ensaios de resistência uniaxial e módulo de elasticidade residual, também foi realizado ensaio de difração de raios X (DRX). Este é um ensaio complementar, utilizado de forma qualitativa para identificação das fases cristalinas que compõem os concretos analisados neste trabalho.

O DRX é uma técnica aplicada para determinar a estrutura atômica e molecular de um cristal cerâmico, na qual os átomos cristalinos fazem com que um feixe de raios X incidentes difratem em muitas direções específicas. A fim de monitorar as modificações da microestrutura do concreto com o aumento da temperatura, foi realizado o ensaio de difração de raios X em

parceria com o Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Escola de Engenharia da UFRGS.

A preparação das amostras para caracterização do concreto foi obtida com material passante em peneira 0,045 mm (#325 mesh). As amostras foram lidas em difratômetro de raios X, marca Phillips, modelo X'Pert MDP (tubo de Raios X com radiação Cu $K\alpha$). Os dados obtidos foram tratados com auxílio de software X'Pert High Score Plus através das bases de dados Inorganic Crystal Structure Database (ICSD).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a cada experimento desenvolvido, bem como, sua análise e interpretação. Os dados são apresentados e discutidos, de modo a subsidiar as conclusões da pesquisa, apresentadas no capítulo final deste trabalho.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS

A caracterização das amostras de agregados graúdos dos três tipos de mineralogia estudados neste trabalho está apresentada e dividida por propriedades do agregado coletada nos ensaios: petrografia, composição granulométrica, índice de forma, densidade e absorção de água, e por fim, massa unitária e índice de vazios.

4.1.1 Análise Petrográfica

Para melhor entendimento do resultado da análise petrográfica realizada em parceria com o Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq) do Instituto de Geociências (IGeo) da UFRGS, este tópico foi dividido em três subtópicos, basalto, granito e calcário.

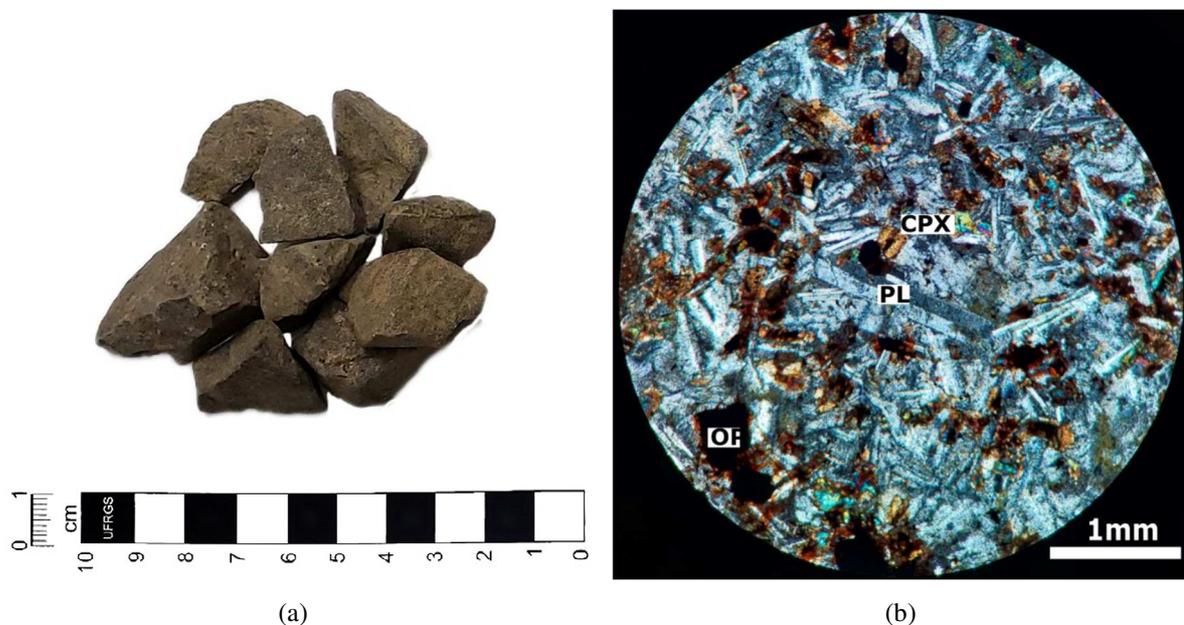
4.1.1.1 Basalto

Rocha vulcânica de coloração cinzenta, textura afanítica e raros fenocristais de até 0,2 mm, prismáticos, brancos e euédricos. Ao microscópio a rocha apresenta textura intergranular fina, com tamanho médio de grão em torno de 0,1 mm, onde no espaço intersticial entre prismas de plagioclásio alojam-se glóbulos de clinopiroxênio (possivelmente augita). Subordinadamente, está presente à textura intersertal onde nos interstícios ocorre material microcristalino de cor castanho avermelhada, e com menor frequência, os cristais de clinopiroxênio englobam os prismas de plagioclásio caracterizando as texturas ofítica e subofítica. Os cristais de plagioclásio são prismáticos a tabulares alongados, subédricos. Apresentam macla polissintética do tipo albita e albita - periclina. Os grãos têm contornos geralmente irregulares, mostrando feições de corrosão, porém, de modo geral os cristais de plagioclásio estão preservados de alteração e por vezes zonados. O clinopiroxênio são subédricos a anédricos

ocorrendo por vezes como agregados. Os minerais opacos (Fe-Ti) têm formas irregulares que mostram um acentuado processo de corrosão pela matriz resultando na predominância de cristais com formas subangulares e arredondadas, com contornos lobados, onde as reentrâncias são preenchidas por cristais de clinopiroxênio e plagioclásio. Por fim, pode-se classificar a rocha como vulcânica do tipo basalto.

As Figuras 18 (a) e (b) apresentam, respectivamente, a imagem macroscópica da rocha e a fotomicrografia (nicóis cruzados) mostrando aspectos microscópicos da rocha basáltica (Pl = plagioclásio, Op= Opaco, CPX = clinopiroxênio).

Figura 18 – Imagem macroscópica e microscópica da amostra de basalto



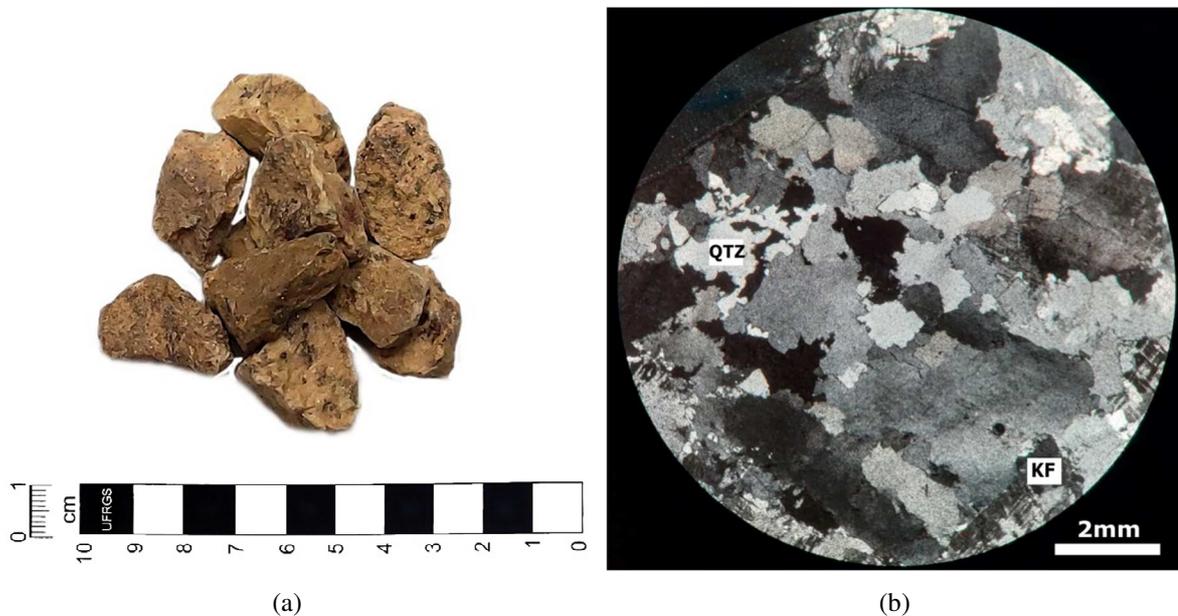
Fonte: fotos da autora.

4.1.1.2 Granito

Rocha plutônica de coloração rosada e textura equigranular média. Ao microscópio a rocha apresenta textura equigranular, com cristais em torno de 2 a 4 mm, textura alotriomórfica, com contatos difusos entre os minerais e predomínio de quartzo, e feldspato alcalino, em geral apresentando macla do microclínio e, por vezes, com pertitas do tipo tartan. O plagioclásio é subordinado, em geral com 1 mm, anédrico e com macla polissintética. Por fim, pode-se classificar a rocha como plutônica do tipo granito.

As Figuras 19 (a) e (b) apresentam, respectivamente, a imagem macroscópica da rocha e a fotomicrografia (nicóis cruzados) mostrando aspectos microscópicos da rocha plutônica (Qtz= Quartzo, KF= feldspato alcalino).

Figura 19 – Imagem macroscópica e microscópica da amostra de granito



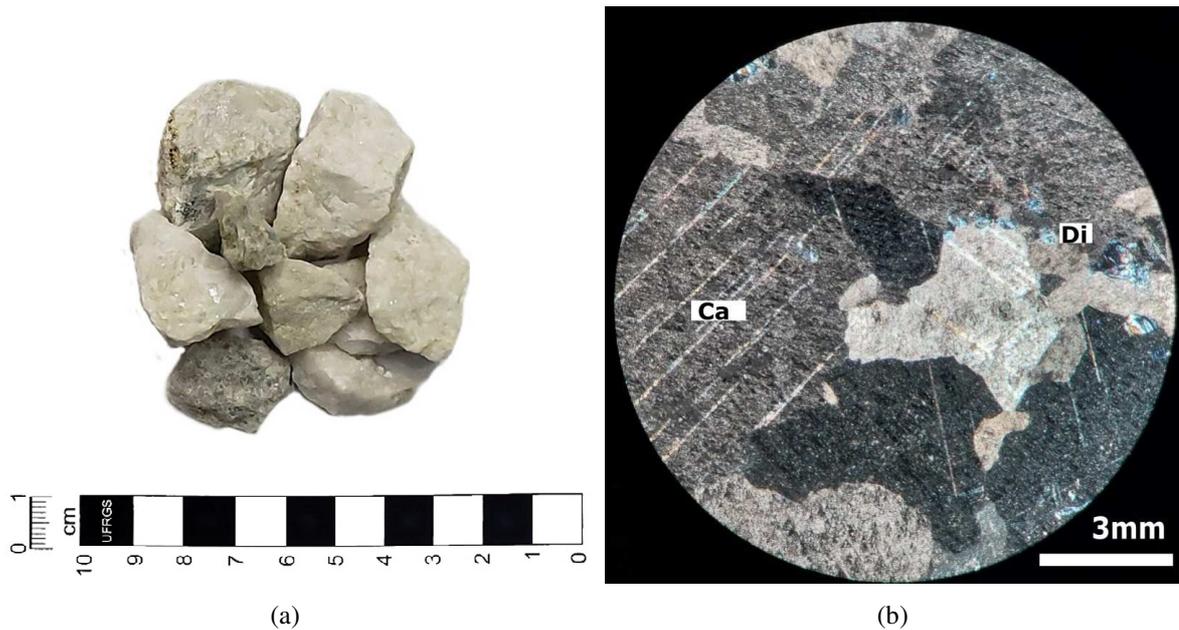
Fonte: fotos da autora.

4.1.1.3 Calcário

Rocha calcária metamórfica de coloração branca e textura granoblástica grossa. Ao microscópio a rocha apresenta textura granoblástica com calcita e dolomita como minerais principais, estrutura maciça e raros níveis descontínuos que contém olivina serpentinizada e diopsídio e minerais micáceos (flogopita). Rocha de alto grau metamórfico, com protólito carbonático e composição dominante dolomítica. Por fim, pode-se classificar a rocha como metamórfica do tipo mármore.

As Figuras 20 (a) e (b) apresentam, respectivamente, a imagem macroscópica da rocha e a fotomicrografia (nicóis cruzados) mostrando aspectos microscópicos da rocha metamórfica (Ca= Calcita, Di= diopsídio).

Figura 20 – Imagem macroscópica e microscópica da amostra de calcário



Fonte: fotos da autora.

4.1.2 Composição granulométrica

Para melhor entendimento dos resultados das composições granulométricas das amostras dos agregados utilizados neste trabalho, realizadas segundo ensaio normatizado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Este tópico foi dividido em três subtópicos levando em consideração a mineralogia do agregado graúdo (basalto, granito e calcário) e um quarto subtópico em que é apresentada uma análise comparativa da curva granulométrica dos três agregados.

4.1.2.1 Basalto

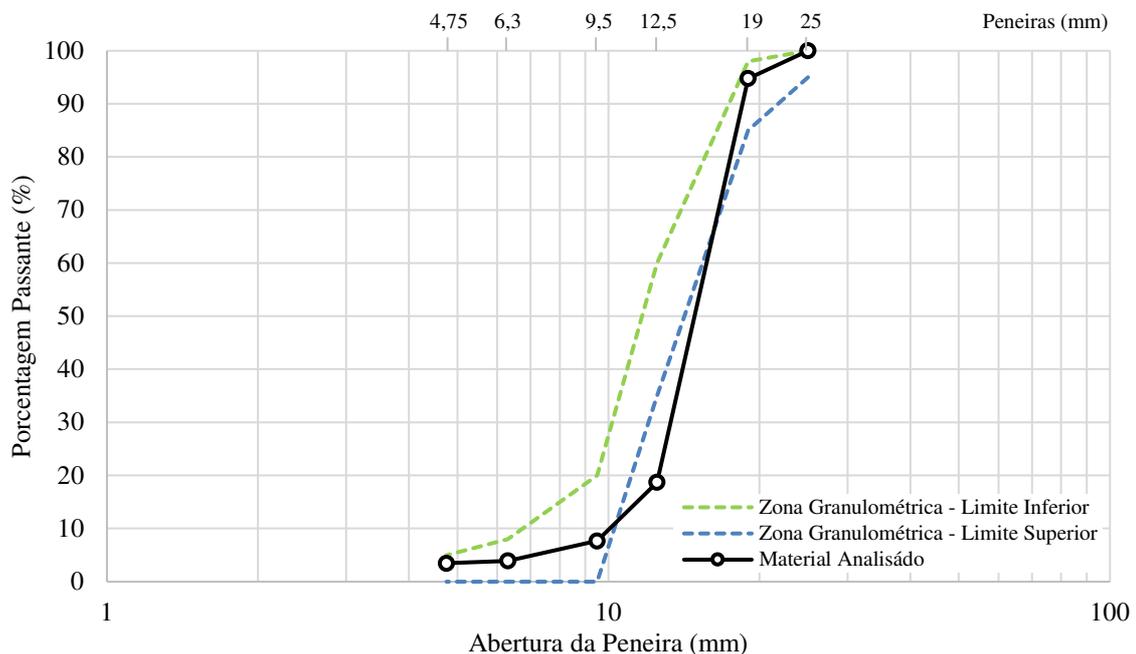
A composição granulométrica da amostra de agregado graúdo de basalto está apresentada na Tabela 13, e a curva granulométrica é representada na Figura 21, em conjunto com os limites inferiores e superiores de zona estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 13 – Granulometria da amostra de agregado graúdo de basalto

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
25	0,00	0,00
19	5,25	5,25
12,5	76,06	81,32
9,5	11,02	92,34
6,3	3,76	96,10
4,75	0,44	96,54
Fundo	3,46	100,00
TOTAL	100,00	-
Módulo de finura		2,94
Dimensão máxima característica (mm)		25,00

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 21 – Curva granulométrica da amostra de agregado graúdo de basalto



Fonte: elaborado pela autora.

4.1.2.2 Granito

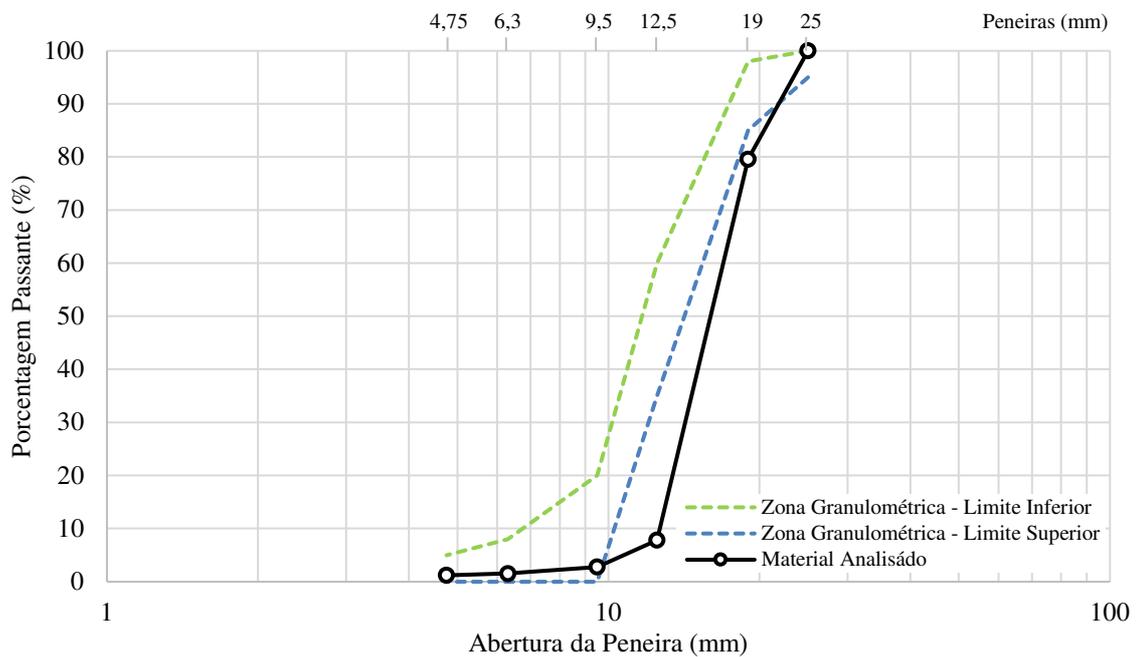
A composição granulométrica da amostra de agregado graúdo de granito está apresentada na Tabela 14, e sua curva granulométrica é representada na Figura 22, em conjunto com os limites inferiores e superiores de zona estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 14 – Granulometria da amostra de agregado graúdo de granito

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
25	0,00	0,00
19	20,43	20,43
12,5	71,75	92,18
9,5	5,06	97,25
6,3	1,23	98,48
4,75	0,29	98,77
Fundo	1,23	100,00
TOTAL	100,00	-
Módulo de finura		3,16
Dimensão máxima característica (mm)		25,00

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 22 – Curva granulométrica da amostra de agregado graúdo de granito



Fonte: elaborado pela autora.

4.1.2.3 Calcário

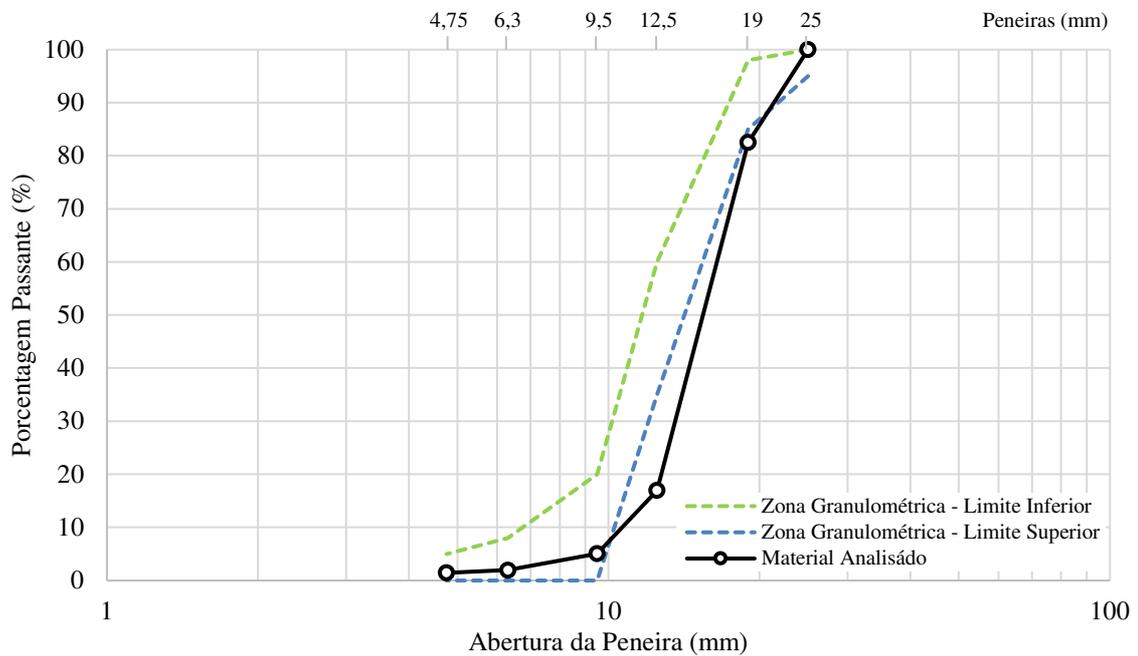
A composição granulométrica da amostra de agregado graúdo de calcário está apresentada na Tabela 15, e sua curva granulométrica é representada na Figura 23, em conjunto com os limites inferiores e superiores de zona estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 15 – Granulometria da amostra de agregado graúdo de calcário

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
25	0,00	0,00
19	17,52	17,52
12,5	65,52	83,04
9,5	11,91	94,94
6,3	3,11	98,06
4,75	0,52	98,58
Fundo	1,42	100,00
TOTAL	100,00	-
Módulo de finura		3,11
Dimensão máxima característica (mm)		25,00

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 23 – Curva granulométrica da amostra de agregado graúdo de calcário

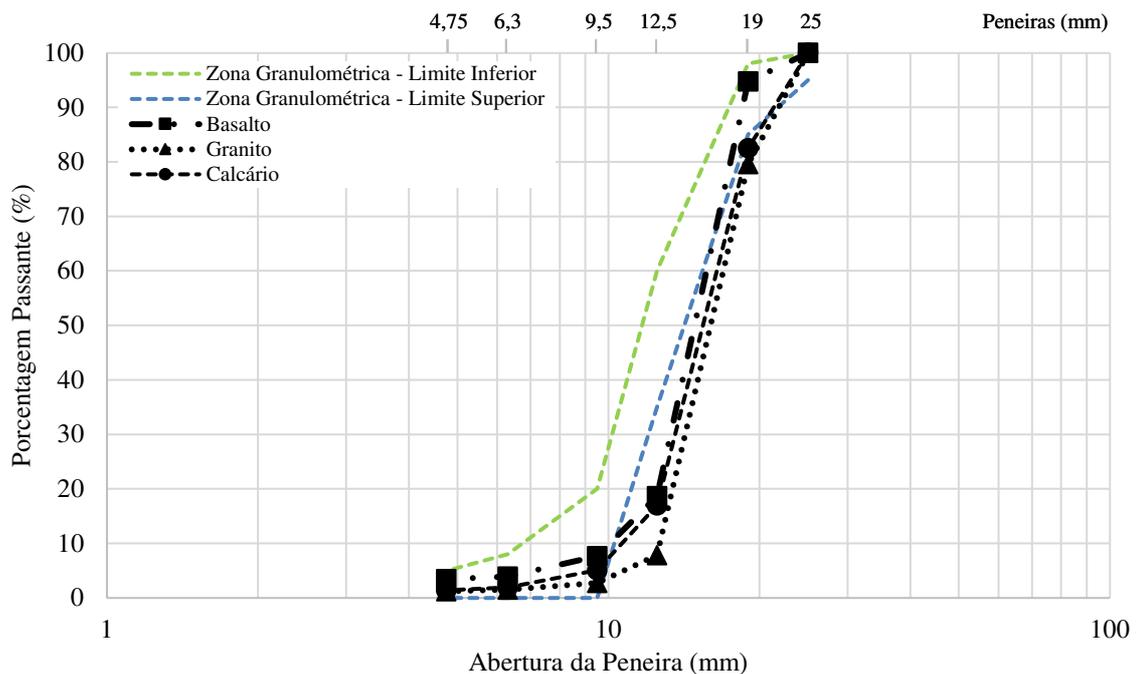


Fonte: elaborado pela autora.

4.1.2.4 Comparativo das curvas granulométricas das amostras de agregado graúdo

A fim de comparar as composições granulométricas, a Figura 24 apresenta um gráfico compilado das três curvas granulométricas das amostras de agregado graúdo de basalto, granito e calcário, utilizadas neste trabalho.

Figura 24 – Comparativo das curvas granulométricas das amostras de agregado graúdo



Fonte: elaborado pela autora.

Comparando as três curvas granulométricas, pode-se identificar que a amostra de granito foi o que apresentou mais finos em sua composição, e as amostras de basalto apresentaram uma granulometria mais grossa.

Analisando os dados das curvas granulométricas e comparando com a zona estabelecidas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), notou-se que os três tipos de agregado ficaram abaixo do limite inferior para a peneira 12,5 mm. Também foi observado que os agregados de granito e calcário ficaram abaixo do limite inferior na peneira de abertura 19 mm.

Entende-se que a inadequação na granulometria do agregado graúdo, ao ficar abaixo do limite inferior das zonas granulométricas estabelecidas, pode comprometer a trabalhabilidade,

resistência mecânica e durabilidade do concreto. Contudo, optou-se por manter a granulometria das amostras de agregado coletadas, visando avaliar os materiais provenientes das jazidas.

4.1.3 Índice de forma

Os índices de forma obtidos por meio do ensaio normatizado apresentaram, para todas as mineralogias das amostras de agregados utilizados nessa pesquisa, resultados inferiores a três (3), como é estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2022), para que o agregado possa ser utilizado na produção de concreto. A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos no ensaio de determinação do índice de forma dos três agregados graúdos de mineralogias diferentes.

Tabela 16 – Índice de forma das amostras de agregado graúdo

Mineralogia	I	NBR 7211
Basalto	2,98	
Granito	2,34	I < 3
Calcário	2,83	
I	Índice de forma do agregado	

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.4 Densidade e absorção de água

Os resultados da densidade e absorção de água das amostras de agregado graúdo obtidos por meio do ensaio normatizado estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Densidade e absorção de água das amostras de agregado graúdo

Mineralogia	ρ_s	ρ_{sss}	Abs
Basalto	2,75	2,80	1,81
Granito	2,55	2,56	0,67
Calcário	2,72	2,75	0,96
ρ_s	Densidade do agregado na condição seca (g/cm^3)		
ρ_{sss}	Densidade do agregado na condição saturada superfície seca (g/cm^3)		
Abs	Absorção de água (%)		

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.5 Massa unitária e índice de vazios

Os resultados de massa unitária e índice de vazios em condição solta e compactada das amostras de agregado graúdo, obtidos por meio do ensaio normatizado então apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Massa unitária e índice de vazios das amostras de agregado graúdo

Mineralogia	Condição Solta		Condição Compactada	
	ρ_{ap}	Ev (%)	ρ_{ap}	Ev (%)
Basalto	1.399,73	99,95	1.507,62	99,94
Granito	1.456,43	99,94	1.562,19	99,94
Calcário	1.412,29	99,95	1.522,44	99,94
ρ_{ap}	Massa unitária do agregado (kg/m ³)			
Ev	Índice de vazios nos agregados (%)			

Fonte: elaborado pela autora.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

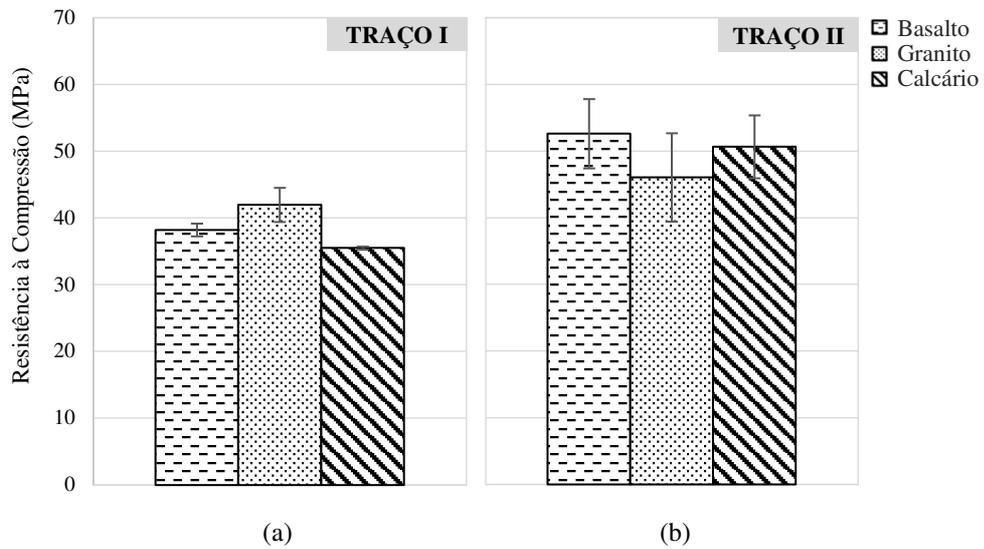
Esta fase da pesquisa consiste na caracterização dos concretos produzidos para desenvolvimento deste trabalho. A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e difração de raios X (DRX) para os concretos produzidos com diferentes amostras de mineralogias de agregado graúdo, antes e depois da exposição a altas temperaturas.

4.2.1 Compressão uniaxial

4.2.1.1 Resistência à compressão

Primeiramente, para compreender melhor as características dos concretos produzidos com os três tipos de amostras de mineralogia de agregado graúdo deste trabalho, foi realizada uma análise da resistência à compressão dos corpos de prova na idade de 28 dias. As resistências médias à compressão obtidas e os desvios padrão calculados para cada tipo de mineralogia utilizada são apresentados na Figura 25, para os dois tipos de traço utilizados na pesquisa.

Figura 25 – Ruptura média dos corpos de prova à compressão 28 dias

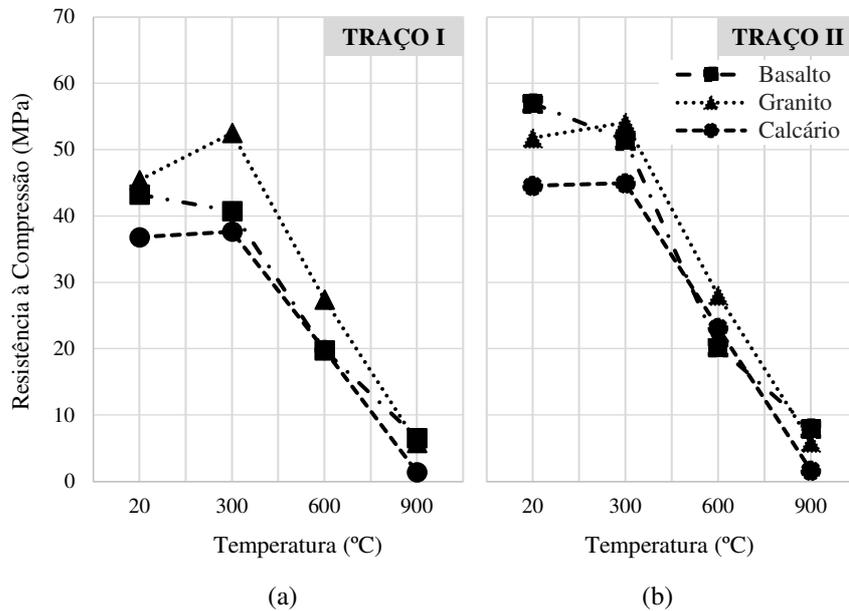


Fonte: elaborado pela autora.

Para os três tipos de mineralogia do agregado foram utilizados os mesmos traços do concreto. Conseqüentemente, em função dos agregados terem características diferentes, foram encontradas resistências diferentes aos 28 dias. Para o traço I, os concretos produzidos com a amostra de agregado basáltico alcançaram resistência média à compressão de 38,20 MPa, já os concretos com as amostras de agregado de granito e calcário obtiveram resistência média de 41,96 MPa e 35,49 MPa, respectivamente. Para o traço II, os concretos produzidos com as amostras de agregado basáltico, granítico e calcário alcançaram resistências médias de 52,61 MPa, 46,05 MPa e 50,65 MPa, respectivamente. Avaliando o desvio padrão, os concretos produzidos com o traço I tiveram um menor desvio padrão em comparação com o traço II. Esse comportamento se deve, provavelmente, ao fato de que concretos de maior resistência tendem a ser mais sensíveis as alterações das proporções e tipos de materiais utilizados na mistura.

Após o período de sazonalidade, os corpos de prova foram submetidos à ação das altas temperaturas e foram realizados ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova para determinação da resistência residual. Os resultados de resistência à compressão residual média estão ilustrados na Figura 26 que apresenta as curvas com os resultados de resistência à compressão residual média dos concretos produzidos com os dois diferentes traços.

Figura 26 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” na resistência à compressão



Fonte: elaborado pela autora.

Comparando os três tipos de mineralogia do agregado, para o traço I, os concretos produzidos com as amostras de agregado de basalto e calcário tiveram um comportamento semelhante, apresentando uma redução da resistência com o aumento da temperatura. Por outro lado, os concretos produzidos com a amostra de agregado de granito tiveram um aumento de 18,8% da resistência em 300 °C.

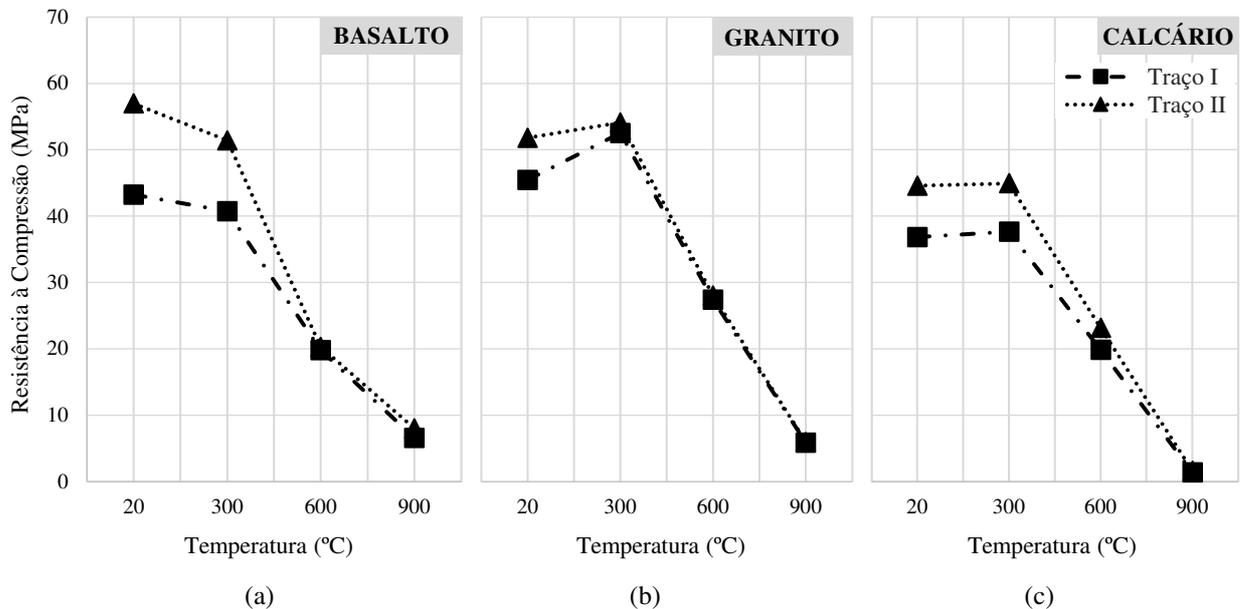
Para o traço II, os concretos produzidos com os três tipos de amostras de agregados graúdos apresentaram uma maior variabilidade da resistência a temperatura ambiente (20 °C), esse comportamento acaba dificultando a comparação entre eles. O concreto com amostra de agregado de basalto foi o que apresentou maior sensibilidade ao traço, sofrendo uma maior variabilidade da resistência. Este, aos 600 °C, chegou a uma redução de 66,9% da resistência, comparando com os resultados obtidos a 300 °C. Esse comportamento, provavelmente, deve estar associado a algum ruído experimental, pois não foram observadas semelhanças na literatura.

Já os concretos do traço II produzidos com amostras de agregado de granito e calcário tiveram comportamento semelhante entre eles, apresentando um aumento da resistência aos 300 °C de 5,8% e 3,0%, respectivamente. Fato similar de aumento de resistência com o aumento da temperatura foi encontrado por diversos autores na literatura.

Para Almeida (2017), os dados coletados mostraram redução da resistência com o aumento da temperatura, exceto para o patamar de 400 °C, em que ocorreu aumento da resistência relativamente a 200 °C, devido a hidratação tardia do concreto provocada pela ação térmica. Conforme Masood *et al.* (2018) foi observado em temperaturas próximas a 400 °C que as partículas de cimento continuam se hidratando, gerando hidrato de silicato de cálcio (C-S-H).

A Figura 27 apresenta as curvas com os resultados dos concretos produzidos com amostras de agregado graúdo de basalto, granito e calcário.

Figura 27 – Influência da interação “temperatura de exposição x traço x mineralogia do agregado graúdo” na resistência à compressão



Fonte: elaborado pela autora.

Comparando os traços produzidos com a amostra de agregado graúdo de basalto, os dois sofreram diminuição da resistência com o aumento da temperatura. Além disso, notou-se que aos 600 °C a resistência do traço II produzido com agregado basáltico chegou a ser 21,0% inferior a obtida do traço I, sendo que, na temperatura ambiente (20 °C), esta é 36,8% superior. Conforme comentando anteriormente, os resultados obtidos para o traço II de basalto possivelmente devem estar associados a algum ruído experimental, por não terem semelhanças com os dados da literatura.

Já os concretos produzidos com a amostra de agregado granítico tiveram um comportamento semelhante para os dois traços, sofrendo um aumento da resistência em 300 °C e, após isso, diminuição da mesma com o aumento da temperatura. Esse comportamento da resistência residual dos concretos produzidos com agregado de granito aos 300 °C também foi observado por outros autores. Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021) e Santos e Rodrigues (2014) identificaram um pequeno aumento da resistência de 3% aos 200 °C e 4% aos 300 °C, respectivamente.

Para os concretos produzidos com a amostra de agregado calcário, o traço I sofreu diminuição da resistência com o aumento da temperatura, o mesmo ocorre para o traço II, exceto na temperatura de 300 °C em que esse tem um aumento de 3,0% comparado resistência a temperatura ambiente (20 °C).

A fim de avaliar a significância das resistências a compressão, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para experimento fatorial com 3 fatores. A relação entre as variáveis foi considerada, estatisticamente, significativa para valores de probabilidade menores que 0,05, representando um intervalo de confiança de 95%. Na Tabela 19 são apresentados os resultados obtidos na análise ANOVA.

Tabela 19 – Análise ANOVA para a resistência à compressão

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade	SIG
Mineralogia (A)	1.183,05	2,00	591,52	146,86	0,0000%	S
Traço (B)	598,09	1,00	598,09	148,49	0,0000%	S
Temperatura (C)	37.050,56	3,00	12.350,19	3.066,14	0,0000%	S
A x B	98,48	2,00	49,24	12,22	0,0019%	S
A x C	575,75	6,00	95,96	23,82	0,0000%	S
B x C	384,80	3,00	128,27	31,84	0,0000%	S
A x B x C	99,41	6,00	16,57	4,11	0,1020%	S
Erro	386,68	96,00	4,03			
Total	40.376,82	119,00				

Fonte: elaborado pela autora.

Todos os fatores controláveis influenciaram significativamente na resistência à compressão do concreto, por ordem de significância apresentaram maior influência: temperatura (C), mineralogia (A), traço (B), interação (A x C), interação (B x C), interação (A x B) e interação (A x B x C). Como esperado, o fator com maior influência na redução da resistência a compressão é a temperatura de exposição. Cabe salientar que a mineralogia do agregado graúdo foi o segundo fator de maior importância na análise de variância.

4.2.1.2 Fator de redução da resistência à compressão

Os resultados dos fatores de redução da resistência à compressão em função do aumento da temperatura então apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Fatores de redução da resistência em função da temperatura

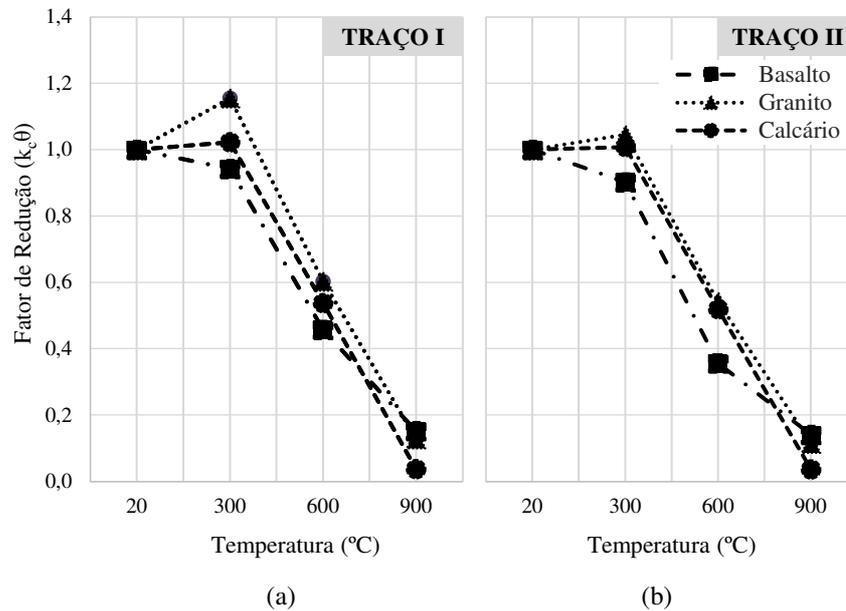
Temperatura (°C)	Basalto		Granito		Calcário	
	Traço I	Traço II	Traço I	Traço II	Traço I	Traço II
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
300	0,97	0,89	1,19 *	1,06 *	0,95	1,03 *
600	0,51	0,30	0,59	0,54	0,54	0,53
900	0,15	0,12	0,12	0,10	0,04	0,04

* Nestes casos, trata-se de um fator de majoração da resistência em função da temperatura.

Fonte: elaborado pela autora.

As curvas com os resultados dos concretos produzidos com os dois diferentes traços então traçadas na Figura 28.

Figura 28 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no fator de redução da resistência à compressão



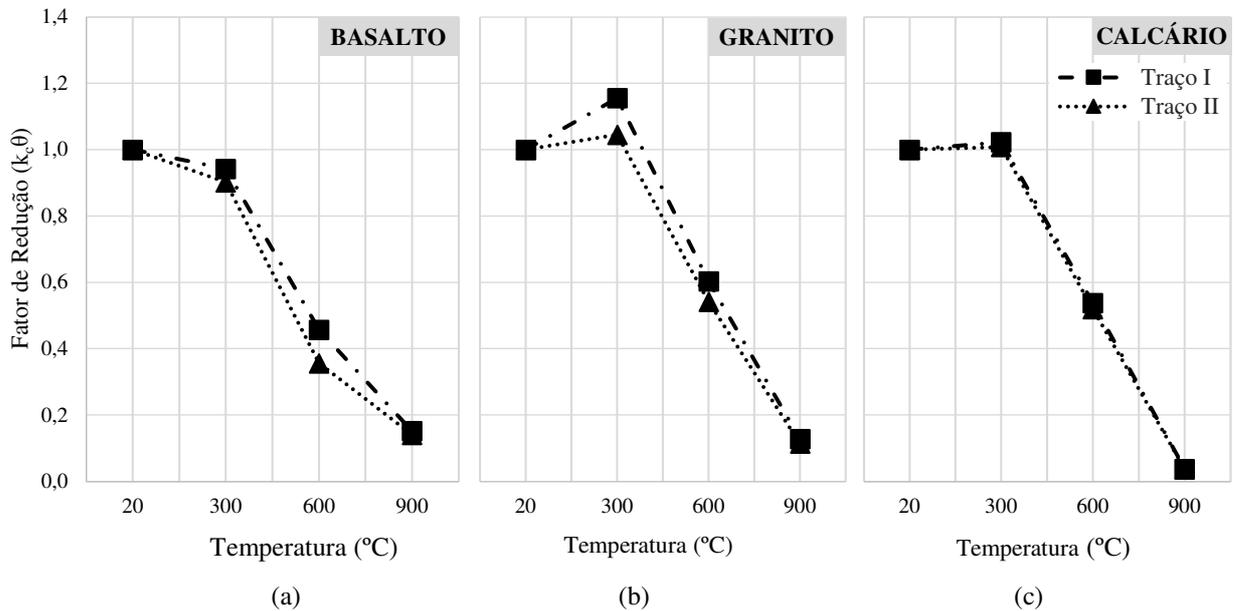
Fonte: elaborado pela autora.

Comparando os três tipos de mineralogia do agregado, para o traço I, os concretos produzidos com amostras de agregado de basalto e calcário tiveram um comportamento semelhante, diferindo-se somente em 900 °C, em que o fator de redução da resistência dos concretos produzidos com agregado calcário foi a mais baixa, chegando a 0,04. Por outro lado, o concreto produzido com agregado granítico teve um aumento da resistência em 300 °C que chegou a um fator de 1,19.

Para o traço II, os concretos com agregado de granito e calcário tiveram comportamento semelhante entre eles. Os resultados para os fatores de redução mostram um aumento da resistência em 300 °C, chegando ao fator de 1,06 e 1,03, e uma diminuição da resistência aos 600 °C, resultado no fator de 0,54 e 0,53. Já os concretos produzidos com agregado basalto, tiveram um comportamento bem diferente, apresentando maior diminuição da resistência que resultou em fator de redução de 0,89 a 300 °C e 0,30 a 600 °C.

A Figura 29 apresenta as curvas com os fatores de redução da resistência à compressão dos concretos produzidos com amostras de agregado graúdo de basalto, granito e calcário.

Figura 29 – Influência da interação “temperatura de exposição x traço x mineralogia do agregado graúdo” no fator de redução da resistência à compressão



Fonte: elaborado pela autora.

Comparando os traços produzidos com agregado graúdo de basalto, o traço II teve um fator de redução relativamente maior que o traço I entre as temperaturas de 300 °C e 600 °C. Além disso, vale ressaltar que em comparação com a totalidade dos resultados, o fator de redução da resistência à compressão do traço II de basalto foi a maior em 600 °C, chegando a 0,30 da resistência inicial.

Para os concretos produzidos com agregado de granito, vale apontar o aumento de resistência que os dois traços apresentaram em 300 °C, conforme já analisado anteriormente, chegando a um fator de 1,19 para o traço I e 1,06 para o traço II. Nesta mesma temperatura, os concretos produzidos com agregado de calcário tiveram comportamento distintos, o Traço I teve uma diminuição da resistência e o traço II um aumento, resultando em fatores de 0,95 e 1,03, respectivamente.

Com o objetivo de avaliar a significância das resistências a compressão, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para experimento fatorial com 3 fatores. A relação entre as variáveis foi considerada, estatisticamente, significativa para valores de probabilidade menores que 0,05, representando um intervalo de confiança de 95%. Na Tabela 21 são apresentados os resultados obtidos na análise ANOVA.

Tabela 21 – Análise ANOVA para o fator de redução resistência à compressão

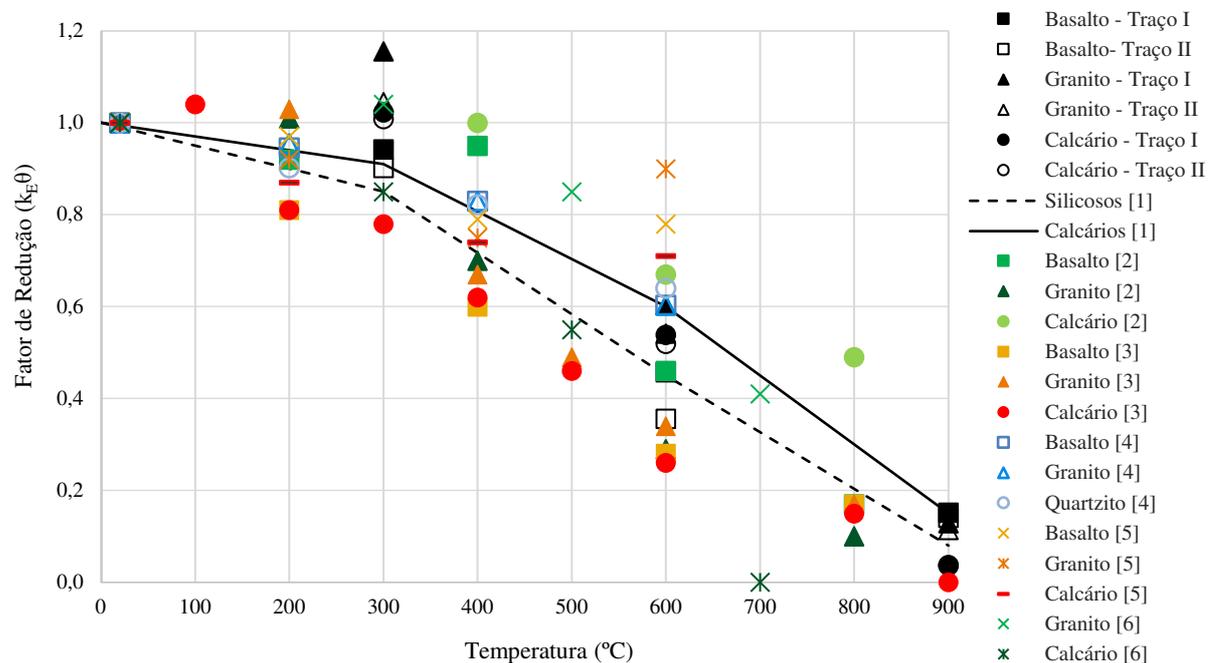
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade	SIG
Mineralogia (A)	0,13	2,00	0,07	34,40	0,0000%	S
Traço (B)	0,03	1,00	0,03	15,21	0,0178%	S
Temperatura (C)	17,30	3,00	5,77	3.008,88	0,0000%	S
A x B	0,01	2,00	0,00	2,08	13,0686%	N
A x C	0,24	6,00	0,04	20,88	0,0000%	S
B x C	0,02	3,00	0,01	3,81	1,2533%	S
A x B x C	0,01	6,00	0,00	1,15	34,1223%	N
Erro	0,18	96,00	0,00			
Total	17,92	119,00				

Fonte: elaborado pela autora.

Os seguintes fatores controláveis apresentaram influência significativa no fator de redução da resistência à compressão do concreto, por ordem de significância: temperatura (C), interação (A x C), mineralogia (A), traço (B) e interação (B x C). As interações (A x B) e interação (A x B x C) apresentaram resultados não significativos em relação ao fator de redução.

A fim de comparar os resultados deste trabalho e os dados coletados da literatura, a Figura 30 apresenta um gráfico compilado com os fatores de redução da resistência a compressão do Eurocode 2 – Part 1.2 (European Committee for Standardisation, 2004), Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021), Masood *et al.* (2018) e Santos e Rodrigues (2014).

Figura 30 – Comparativo com dados da literatura dos fatores de redução da resistência a compressão em função do aumento da temperatura de exposição do concreto



Fonte: elaborado pela autora, onde [1] NBR 15200 (2012) e Eurocode 2 - Part 1.2 (2004), [2] Veiga (2022), [3] Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021), [4] Masood *et al.* (2018), [5] Minatto (2018) e [6] Santos e Rodrigues (2014).

Referente aos dados coletados por Veiga (2022), observou-se que os concretos produzidos com agregado de basalto tiveram um comportamento semelhante os obtidos neste trabalho. Já para os concretos produzidos com agregado de granito, observou-se um fator de redução inferior aos 600 °C, acarretando em uma menor resistência a compressão residual. Em relação aos concretos com agregado calcário, estes tiveram um comportamento superior ao observado neste trabalho, chegando a ter um aumento de 21% da sua resistência na temperatura de 200 °C, e chegando a 800 °C com um fator de redução de 0,49.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os dados coletados por Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021), observou-se que em todas as temperaturas, os fatores de redução da resistência à compressão, para todas a mineralogias avaliadas, apresentaram um maior valor. Isso mostra que os dados coletados neste trabalho apresentaram uma menor redução na resistência à compressão do concreto em função do aumento da temperatura, em comparação com os dados obtidos pelos autores.

Em relação aos dados de Masood *et al.* (2018), observou-se que o fator de redução da resistência à compressão do concreto com agregado de quartzito apresenta um valor maior em todas as temperaturas, seguida do concreto com agregado de granito e basalto. Nota-se que os fatores de redução da resistência à compressão, para os três tipos de mineralogia, apresentaram uma menor dispersão em comparação com os resultados coletados neste trabalho para concretos produzidos com agregados de basalto, granito e calcário. Além disso, na temperatura de 600 °C, os fatores de redução para os concretos de agregado de basalto tiveram uma menor redução da resistência residual, em comparação com os resultados obtidos neste trabalho para a mesma mineralogia de agregado.

Outro trabalho desenvolvido com agregados graúdos do estado do Rio Grande do Sul foi de Minatto (2018). Comparando os resultados do autor com os obtidos neste trabalho, notou-se que na temperatura de 600 °C, os concretos tiveram um comportamento superior, para todas as mineralogias. Cabe salientar o aumento da resistência residual sofrido pelos concretos produzidos com agregado de granito na temperatura de 600 °C, comportamento que não foi observado em nenhum outro trabalho.

Com base nos dados compilados por Santos e Rodrigues (2014), constatou-se que os concretos fabricados com agregados de calcário demonstraram um desempenho inferior em comparação com os resultados deste estudo, sendo bem inferior ao apresentado no Eurocode 2 - Part 1.2 (2004). Por outro lado, os concretos produzidos com agregado de granito exibiram um comportamento similar aos resultados alcançados neste trabalho, superando as especificações da NBR 15200 (2012) e do Eurocode 2 - Part 1.2 (2004).

4.2.1.3 Resultados experimentais da resistência à compressão x prescrições normativas
A Tabela 22 apresenta os dados compilados dos fatores de redução da resistência do concreto em função da temperatura fornecidos pela NBR 15200 (ABNT, 2012) e pelo Eurocode 2 – Part 1.2 (European Committee for Standardisation, 2004), que foram utilizados como parâmetro na análise comparativa entre os fatores obtidos dos concretos avaliados neste programa experimental.

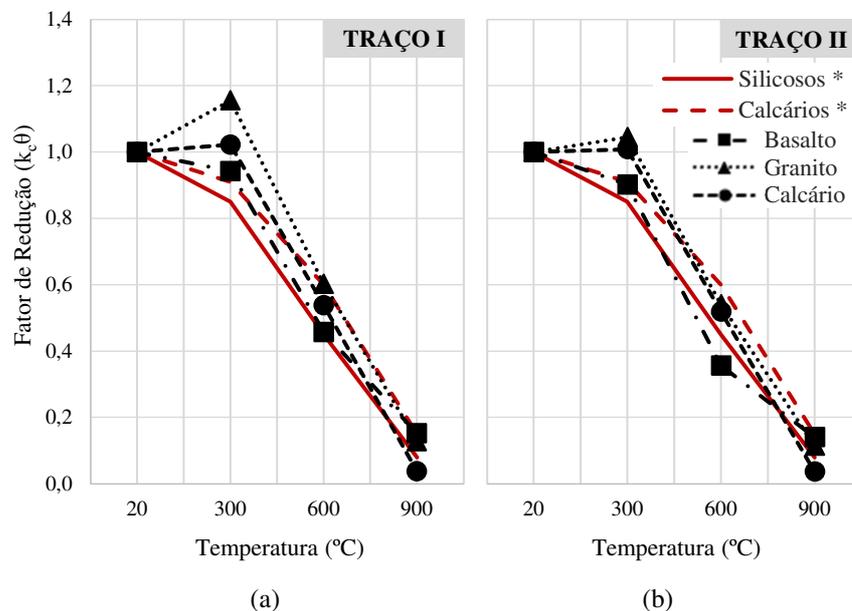
Tabela 22 – Prescrições normativas dos fatores de redução da resistência em função da temperatura

Temperatura (°C)	Fator de Redução da Resistência	
	Agregado Silicoso	Agregado Calcário
20	1,00	1,00
300	0,85	0,91
600	0,45	0,60
900	0,08	0,15

Fonte: adaptado NBR 15200 (ABNT, 2012) e Eurocode 2 – Part 1.2 (2004).

Uma análise comparativa é apresentada na Figura 31 que mostra as curvas com os resultados dos concretos produzidos com os dois diferentes traços. Cabe salientar que estes fatores de redução apresentados nos gráficos derivam das médias de resistência à compressão obtidas nos ensaios experimentais.

Figura 31 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no fator de redução da resistência à compressão



* Prescrições normativas NBR 15200 (ABNT, 2012) e Eurocode 2 – Part 1.2 (2004).

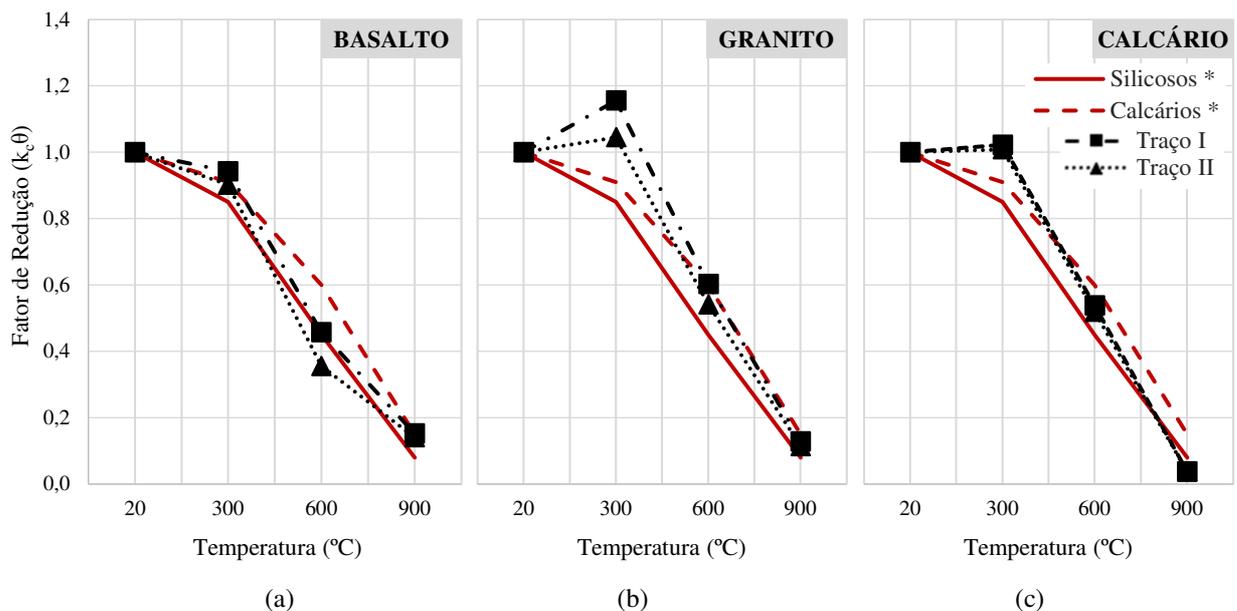
Fonte: elaborado pela autora.

Para o traço I, os três tipos de amostra de agregado tiveram uma menor diminuição do fator de redução aos 300 °C em comparação com as prescrições normativas. Além disso, vale salientar o aumento de resistência que apresentaram os concretos produzidos com a amostra de agregado granítico. Nas demais temperaturas, as amostras de agregados silicosos (basalto e granito) apresentaram comportamento superior ao descrito pelas normas, mas mantendo-se inferior ao traço para os agregados calcários.

Analisando o traço II, em 300 °C, somente o concreto produzido com amostra de basalto apresentou um comportamento semelhante as prescrições normativas. Os concretos com as amostras de agregado de granito e calcário tiveram um aumento na sua resistência, comportamento que não é prescrito na norma. Já aos 600 °C, os concretos produzidos com as amostras de granito e calcário tiveram um comportamento semelhante ao das normas, e os com amostra de basalto apresentaram um comportamento muito inferior.

A Figura 32 apresenta as curvas da análise comparativa entre os parâmetros normativos e os resultados dos concretos produzidos com as amostras de agregado graúdo de basalto, granito e calcário.

Figura 32 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no fator de redução da resistência à compressão



*Prescrições normativas NBR 15200 (ABNT, 2012) e Eurocode 2 – Part 1.2 (2004).

Fonte: elaborado pela autora.

Ao analisar cada amostra de agregado separadamente, pode-se observar que para os concretos produzidos com a amostra de agregado basáltico o traço I apresentou um comportamento superior ao das prescrições normativas, e o traço II teve um comportamento inferior somente aos 600 °C.

Analisando o comportamento dos concretos produzidos com a amostra de agregado granítico, os dois traços de concreto apresentaram comportamento superior ao das normativas para agregados silicosos, e tiveram um aumento significativo da sua resistência aos 300 °C.

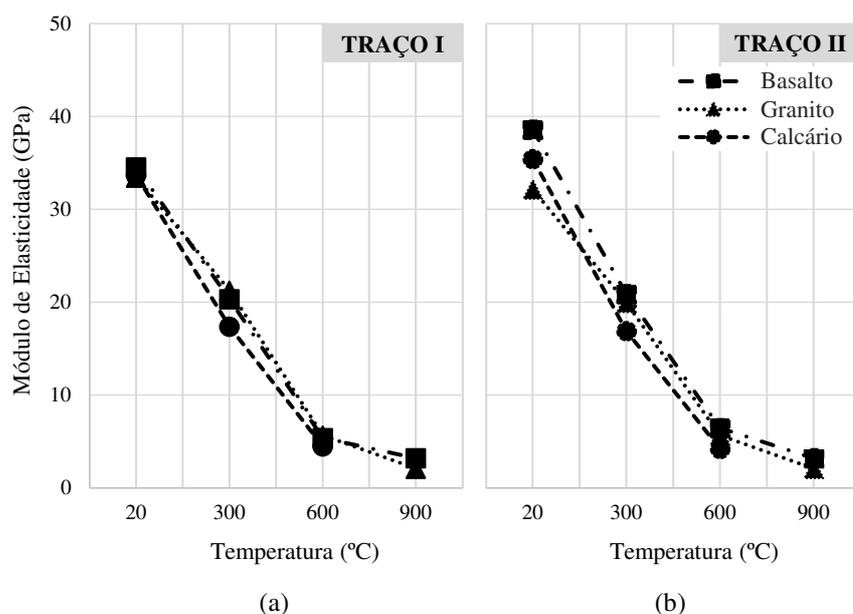
Por último, o comparativo dos concretos produzidos com agregado calcário em relação às prescrições normativas mostrou um comportamento superior aos 300 °C e inferior em 600 °C e 900 °C.

4.2.2 Módulo de elasticidade

4.2.2.1 Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade residual média estão ilustrados na Figura 33 que apresenta as curvas com os resultados dos concretos produzidos com os dois diferentes traços.

Figura 33 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no fator de redução do módulo de elasticidade



Fonte: elaborado pela autora.

Analisando os resultados para o traço I, os concretos produzidos com agregado silicosos (basalto e granito) tiveram comportamento semelhante na diminuição do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura de exposição. Os concretos produzidos com agregado de calcário tiveram uma diminuição mais acentuada do módulo de elasticidade em 300 °C, mas em compensação, em 600 °C, este apresentou módulo semelhante aos concretos com amostra de agregado de basalto e granito.

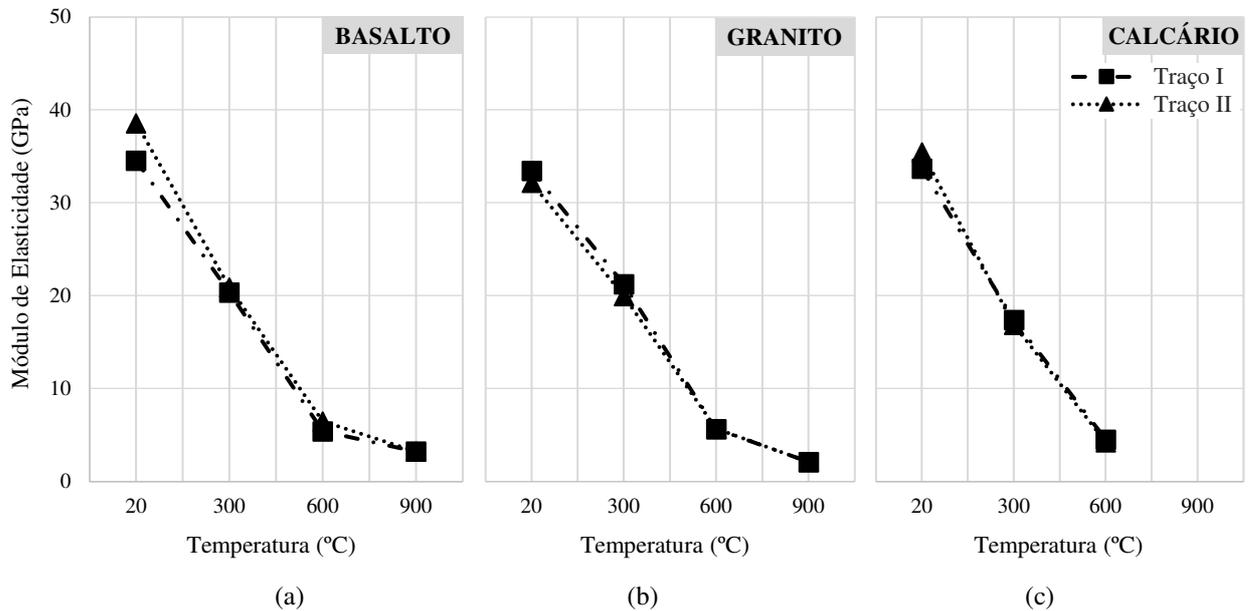
Para o traço II, como já analisado, anteriormente, nos resultados de resistência à compressão, os concretos produzidos com os três tipos de amostras de agregados graúdos apresentaram uma maior variabilidade da resistência na temperatura ambiente (20 °C). Esta variação de resistência à compressão acaba refletindo diretamente no módulo de elasticidade e dificultando a comparação entre os três tipos de mineralogia de agregado graúdo. Apesar disso, pode-se notar que os concretos produzidos com as amostras de granito sofreram uma redução do módulo de elasticidade menos acentuada do que os concretos produzidos com amostras de agregado de basalto e calcário.

Após exposição a altas temperaturas, os concretos produzidos com agregados silicosos apresentaram um comportamento semelhante e superior aos produzidos com agregado calcário. Isso também foi observado por Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021), em que os concretos com agregados calcários apresentaram, entre 300 °C e 400 °C, aceleração em sua degradação. O módulo de elasticidade residual do concreto calcário foi inferior ao módulo de elasticidade dos concretos granítico e basáltico em todas as temperaturas avaliadas. Por outro lado, Santos e Rodrigues (2014), apontam que independentemente do tipo de agregado, o módulo de elasticidade residual apresentou decréscimo semelhante em função do aumento da temperatura de exposição.

Vale apontar que, por estarem muito deteriorados, não foi possível realizar ensaio de módulo de elasticidade nos concretos produzidos com a amostra de agregado calcário após exposição a 900 °C, para os dois traços de concreto utilizados neste trabalho. Este comportamento foi melhor detalhado e explicado no capítulo 4.2.5.

A Figura 34 apresenta as curvas com os resultados de módulo de elasticidade residual médio dos concretos produzidos com agregado graúdo de basalto, granito e calcário.

Figura 34 – Influência da interação “temperatura de exposição x traço x mineralogia do agregado graúdo” no fator de redução do módulo de elasticidade



Fonte: elaborado pela autora.

Analisando os resultados para cada amostra de agregado, pode-se notar que para as amostras de basalto e calcário, o traço II inicia com um maior módulo de elasticidade à temperatura ambiente em relação ao traço I, mas com o aumento de temperatura, estes se igualam. Para os concretos produzidos com amostra de granito, o traço I apresentou um módulo de elasticidade maior que o traço II em temperatura ambiente, e após exposição a altas temperaturas este converge em encontro ao traço II.

A fim de avaliar a significância das resistências a compressão, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para experimento fatorial com 3 fatores. A relação entre as variáveis foi considerada, estatisticamente, significativa para valores de probabilidade menores que 0,05, representando um intervalo de confiança de 95%. Na Tabela 23 são apresentados os resultados obtidos na análise ANOVA.

Tabela 23 – Análise ANOVA para o módulo de elasticidade

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade	SIG
Mineralogia (A)	79,01	2,00	39,51	116,84	0,0000%	S
Traço (B)	2,04	1,00	2,04	6,05	1,7575%	S
Temperatura (C)	12.131,00	3,00	4.043,67	11.959,67	0,0000%	S
A x B	12,66	2,00	6,33	18,73	0,0001%	S
A x C	52,20	6,00	8,70	25,73	0,0000%	S
B x C	9,12	3,00	3,04	8,99	0,0078%	S
A x B x C	12,76	6,00	2,13	6,29	0,0063%	S
Erro	16,23	48,00	0,34			
Total	12.315,04	71,00				

Fonte: elaborado pela autora.

Todos os fatores controláveis influenciaram significativamente no módulo de elasticidade do concreto, por ordem de significância apresentaram maior influência: temperatura (C), mineralogia (A), interação (A x C), interação (A x B), interação (A x B x C), interação (B x C) e traço (B). Nessa análise, pode-se observar que a temperatura de exposição e a mineralogia do agregado graúdo são os fatores de maior significância, e o traço do concreto apresentou uma menor significância.

4.2.2.2 Fator de redução do módulo de elasticidade

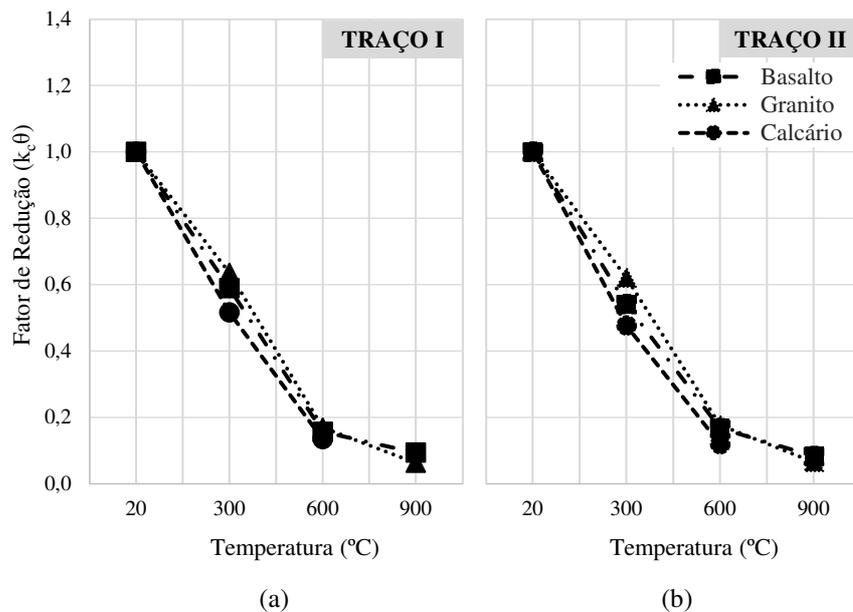
Os resultados dos fatores de redução do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura então apresentados na Tabela 24. As curvas com os resultados dos concretos produzidos com os dois diferentes traços estão traçadas na Figura 35.

Tabela 24 – Fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura

Temperatura (°C)	Basalto		Granito		Calcário	
	Traço I	Traço II	Traço I	Traço II	Traço I	Traço II
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
300	0,59	0,54	0,64	0,62	0,52	0,48
600	0,16	0,17	0,17	0,18	0,13	0,12
900	0,09	0,08	0,06	0,07	-	-

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 35 – Influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo x traço” no módulo de elasticidade



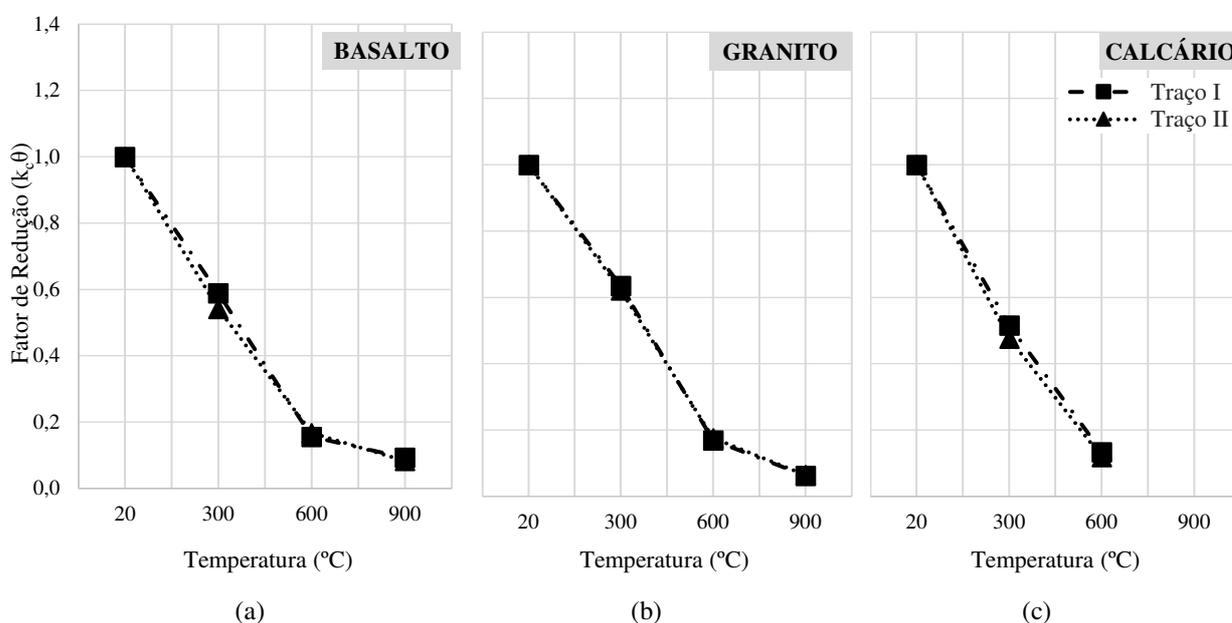
Fonte: elaborado pela autora.

Fazendo uma comparação entre as amostras de diferentes tipos de mineralogia, tanto para o traço I quando para o traço II, estes apresentaram diferença, principalmente, na temperatura de 300 °C. O granito apresentou um maior fator de redução, seguido do basalto e, após, o calcário. Isso significa que os concretos produzidos com a amostra de agregado graúdo de granito tiveram uma menor redução do módulo de elasticidade aos 300 °C em comparação com o basalto e o calcário.

Sollero, Moreno Júnior e Costa (2021) verificaram em seus resultados que o módulo de elasticidade dos concretos produzidos com basalto sofreu uma redução menor do que os produzidos com agregado de granito. Os concretos produzidos com calcário apresentaram uma redução maior que ambos, indo em concordância com os resultados obtidos neste trabalho.

A Figura 36 apresenta as curvas com os dois fatores de redução do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com as amostras de agregado graúdo de basalto, granito e calcário.

Figura 36 – Influência da interação “temperatura de exposição x traço x mineralogia do agregado graúdo” no módulo de elasticidade



Fonte: elaborado pela autora.

Falando em termos de fator de redução, o módulo de elasticidade dos concretos produzidos neste trabalho se comportou de modo semelhante em função do aumento da temperatura, comparando os dois traços produzidos com a mesma mineralogia de agregado.

A fim de avaliar a significância das resistências a compressão, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) para experimento fatorial com 3 fatores. A relação entre as variáveis foi considerada, estatisticamente, significativa para valores de probabilidade menores que 0,05, representando um intervalo de confiança de 95%. Na Tabela 25 são apresentados os resultados obtidos na análise ANOVA.

Tabela 25 – Análise ANOVA para o fator de redução módulo de elasticidade

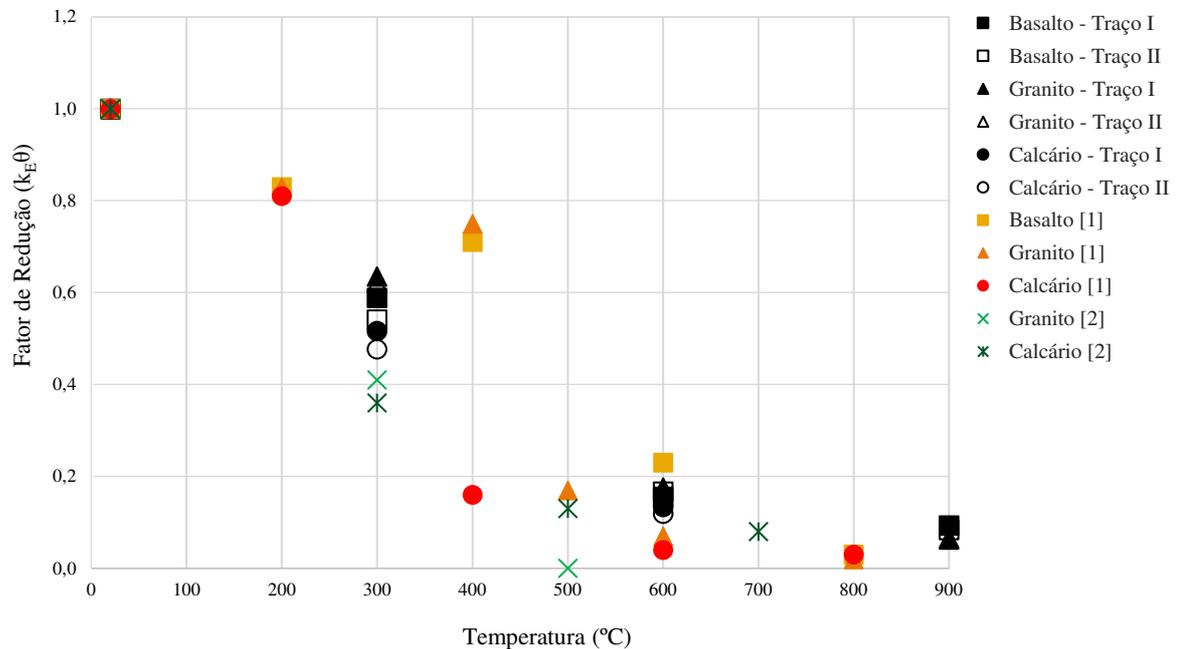
Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade	SIG
Mineralogia (A)	0,05	2,00	0,02	83,86	0,0000%	S
Traço (B)	0,00	1,00	0,00	4,73	3,4613%	S
Temperatura (C)	10,12	3,00	3,37	11.557,17	0,0000%	S
A x B	0,00	2,00	0,00	0,91	40,8396%	N
A x C	0,04	6,00	0,01	20,08	0,0000%	S
B x C	0,00	3,00	0,00	4,31	0,9024%	S
A x B x C	0,00	6,00	0,00	0,61	71,7315%	N
Erro	0,01	48,00	0,00			
Total	10,23	71,00				

Fonte: elaborado pela autora.

Os seguintes fatores controláveis apresentaram influência significativa no fator de redução do módulo de elasticidade do concreto, por ordem de significância: temperatura (C), mineralogia (A), interação (A x C), interação (B x C) e traço (B). As interações (A x B) e interação (A x B x C) apresentaram resultados não significativos em relação ao fator de redução. Tal como na análise de ANOVA da resistência à compressão, a temperatura de exposição também foi o fator mais significativo para o fator do módulo de elasticidade.

A Figura 37 apresenta um gráfico compilado dos resultados de módulo de elasticidade deste trabalho e os dados coletados da literatura, de Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021) e Santos e Rodrigues (2014).

Figura 37 – Comparativo com dados da literatura dos fatores de redução do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura de exposição do concreto



Fonte: elaborado pela autora, onde [1] Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021) e [2] Santos e Rodrigues (2014).

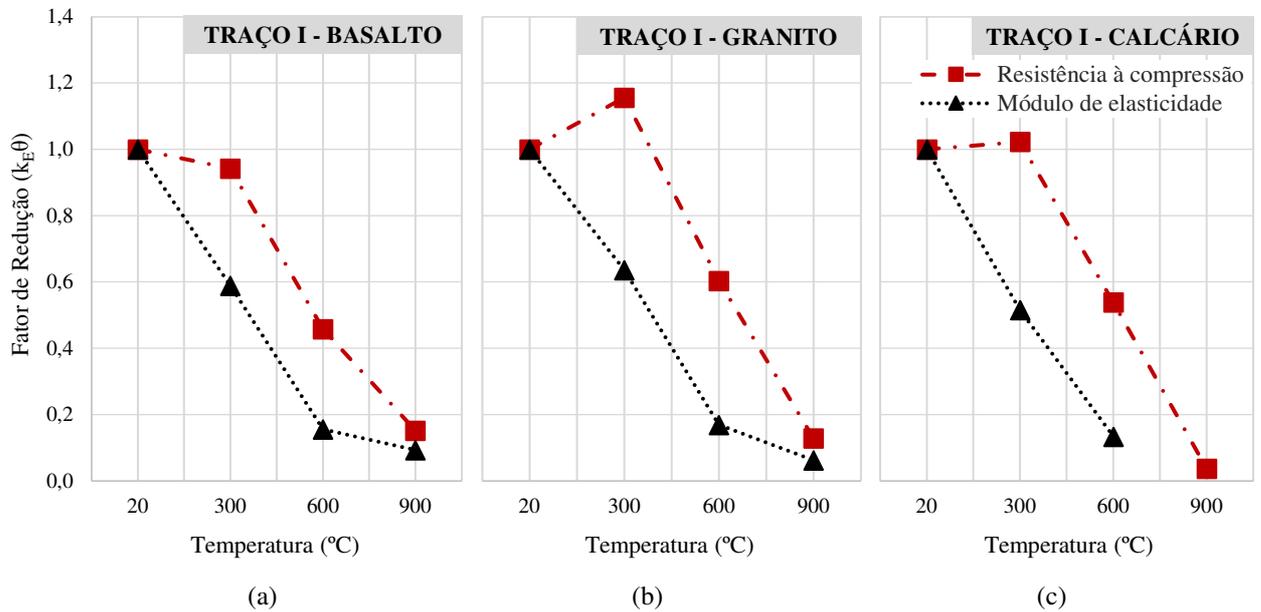
Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os dados coletados por Sollero, Moreno Júnio e Costa (2021), pode-se observar que para todas as temperaturas até 600 °C, os concretos com agregado de basalto, apresentaram comportamento superior aos resultados obtidos neste trabalho. Já os concretos produzidos com agregado calcário, após 200 °C, apresentaram um fator de redução menor, consequentemente, resultando em uma maior redução no módulo de elasticidade.

Referente aos dados coletados por Santos e Rodrigues (2014), observou-se que em todas as temperaturas, os fatores de redução do módulo de elasticidade, para todas as mineralogias avaliadas, apresentaram um maior valor. Isso mostra que os dados coletados neste trabalho apresentaram uma menor redução no módulo de elasticidade do concreto em função do aumento da temperatura, em comparação com os dados obtidos pelos autores.

4.2.3 Resistência a compressão x Módulo de elasticidade

Uma análise comparativa das curvas do fator de redução da resistência a compressão e do módulo de elasticidade em função da temperatura do traço I é apresentada na Figura 38.

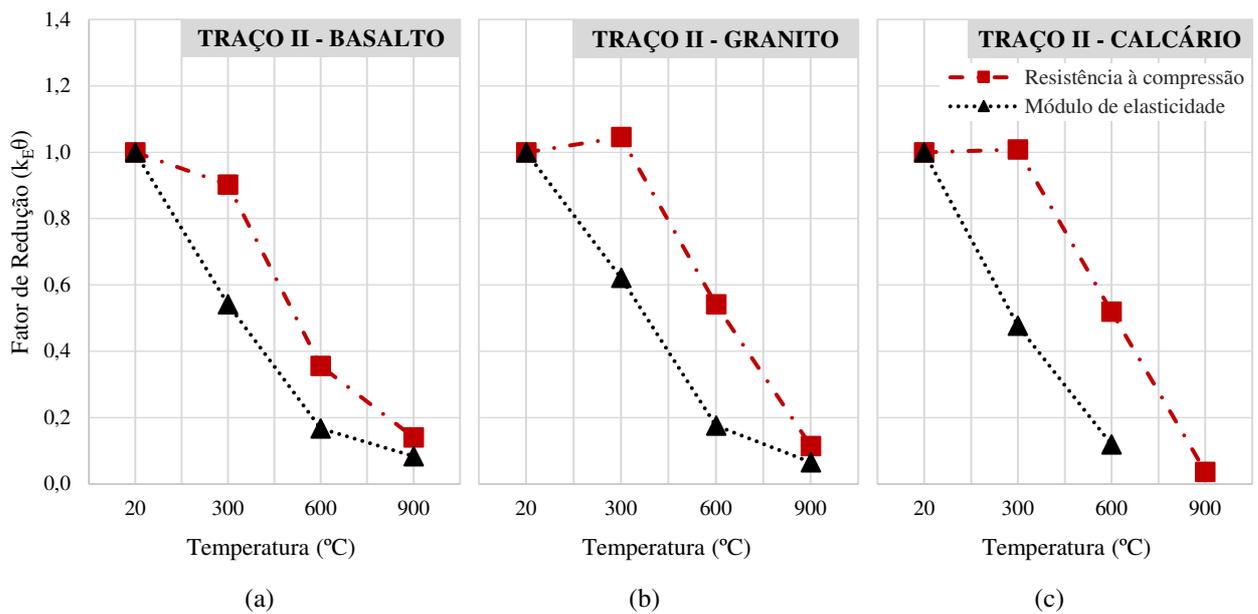
Figura 38 – Comparativo da influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo” no fator de redução do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do traço I



Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 39 apresenta as curvas da análise comparativa do traço II, para os resultados das amostras de agregado graúdo de basalto, granito e calcário.

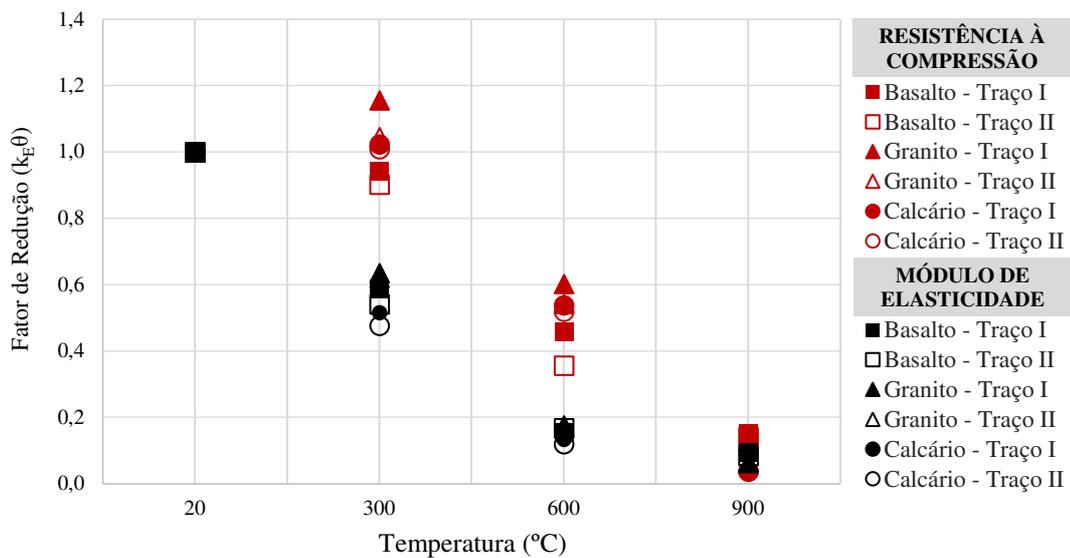
Figura 39 – Comparativo da influência da interação “temperatura de exposição x mineralogia do agregado graúdo” no fator de redução do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do traço II



Fonte: elaborado pela autora.

Para uma análise geral dos traços e das mineralogias de agregados graúdos deste trabalho, a Figura 40 apresenta todos os resultados de fator de redução da resistência à compressão e módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura de exposição do concreto, obtidos neste trabalho.

Figura 40 – Comparativo de todos os resultados do fator de redução obtidos neste trabalho para resistência à compressão e módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura.



Fonte: elaborado pela autora.

Para os dois traços analisados nesse trabalho, as curvas da resistência à compressão e módulo de elasticidade em função da temperatura de exposição apresentam uma tendência de redução com o aumento da temperatura. Observando os gráficos traçados, nota-se que os fatores de redução destas propriedades diferem entre si, sendo que os valores de módulo de elasticidade apresentam uma redução mais acentuada do que os fatores obtidos para resistência a compressão.

Um dos fatores determinante para a redução do módulo de elasticidade do concreto são a presença de vazios e fissuras na interface entre a pasta de cimento e os agregados. Segundo Mehta e Monteiro (2014), o módulo de elasticidade do concreto é mais sensível a elevadas temperaturas do que a resistência à compressão, devido a microfissuração na zona de transição causada pelo aumento de temperatura.

Na literatura, nota-se que o módulo de elasticidade do concreto exposto a altas temperaturas é menos estudado do que a variação da resistência à compressão. Além disso, as normativas vigentes, não apresentam fatores de redução para o módulo de elasticidade do concreto em função do aumento da temperatura. Contudo, como destaca Almeida (2017), o Eurocode 2 – Part 1.2 (2004) apresenta valores que relacionam a tensão e a deformação do concreto com o aumento da temperatura.

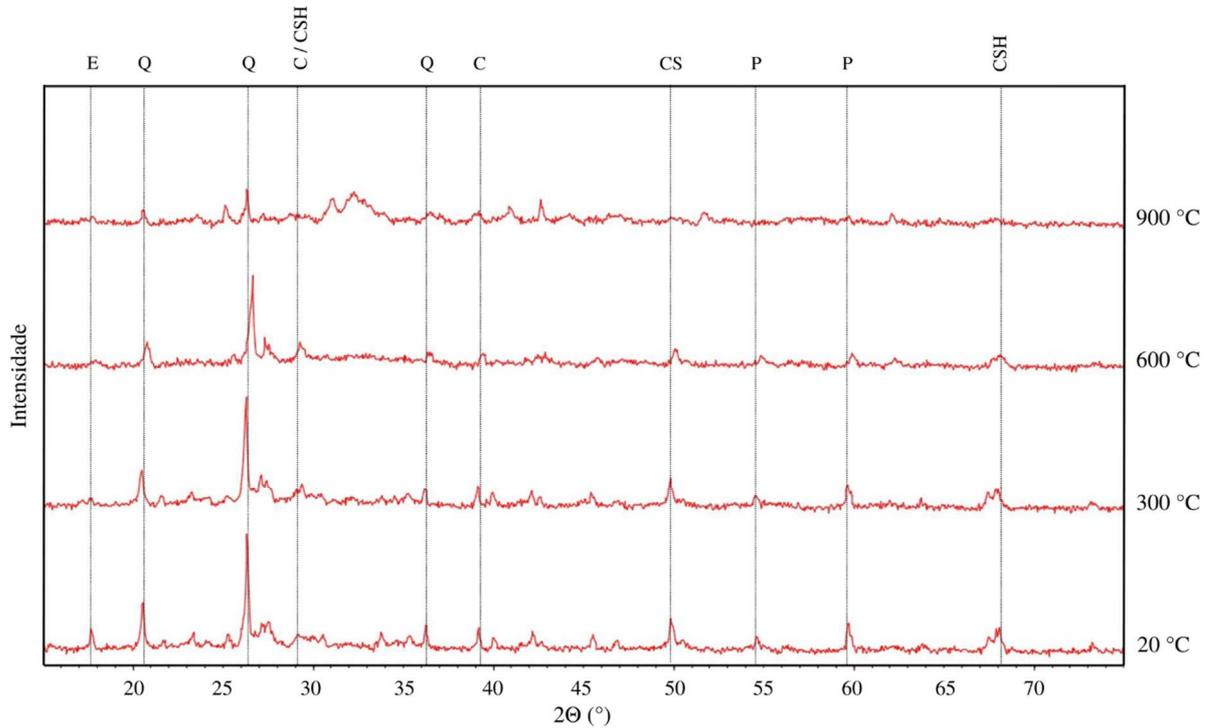
4.2.4 Difração de Raios X (DRX)

Neste item são apresentados os resultados das alterações na estrutura cristalina dos concretos produzidos neste trabalho com diferentes tipos de mineralogia de agregados graúdo, após exposição a altas temperaturas. As análises de DRX foram realizadas com base na identificação dos picos cristalinos em cada temperatura de exposição comparando as principais alterações decorrentes do aumento da temperatura.

Utilizando as fichas de padrões difratométricos, do Inorganic Crystal Structure Database (ICSD), 155395, 191851, 29886, 136894, 254353 e 73404, procurou-se identificar os picos correspondentes à etringita (E), portlandita (P), quartzo (Q), calcita (C), silicatos de cálcio (CS) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), respectivamente. Com base na literatura, e de forma a minimizar o ruído associado à sobreposição de picos, foram adotados estes compostos na análise comparativa como indicadores qualitativos do grau de degradação térmico dos concretos.

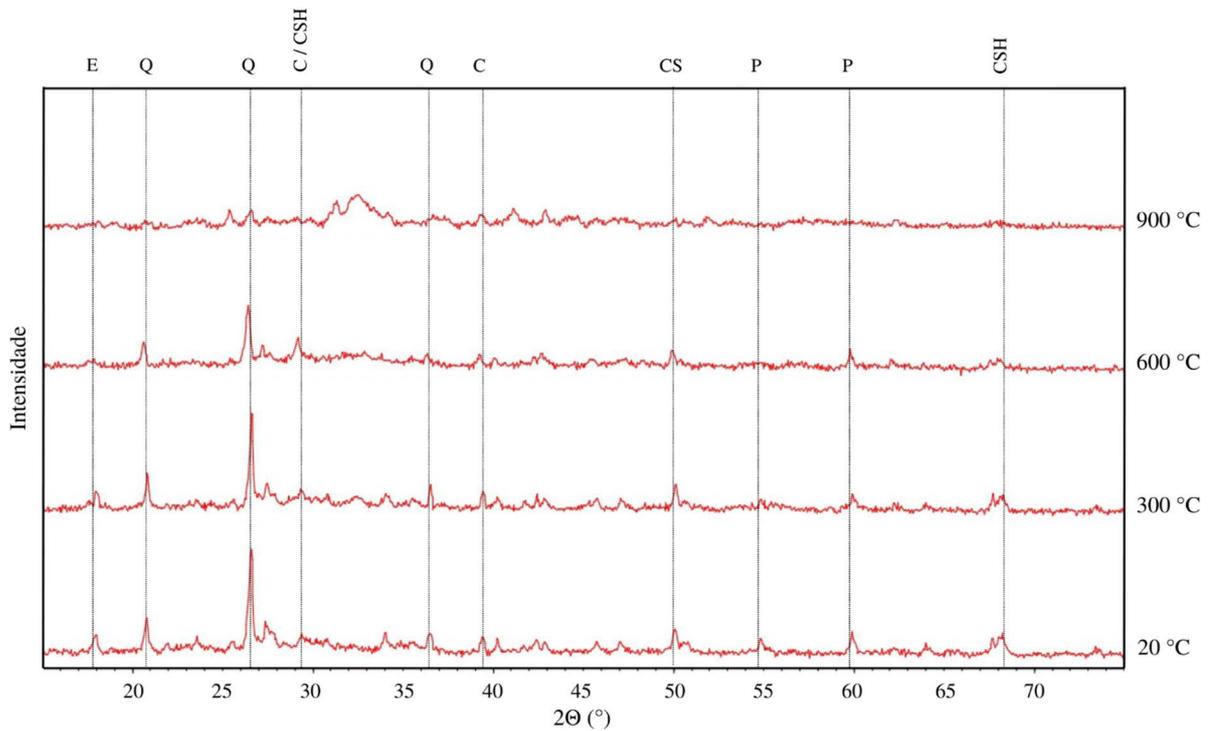
As Figura 41 e 42 mostram, através da análise de DRX, a influência que o aumento da temperatura causa nas alterações cristalinas dos concretos produzidos com as amostras de agregado de basalto, para o traço I e traço II, respectivamente.

Figura 41 – DRX realizado no concreto com agregado de basalto e traço I aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 42 – DRX realizado no concreto com agregado de basalto e traço II aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H

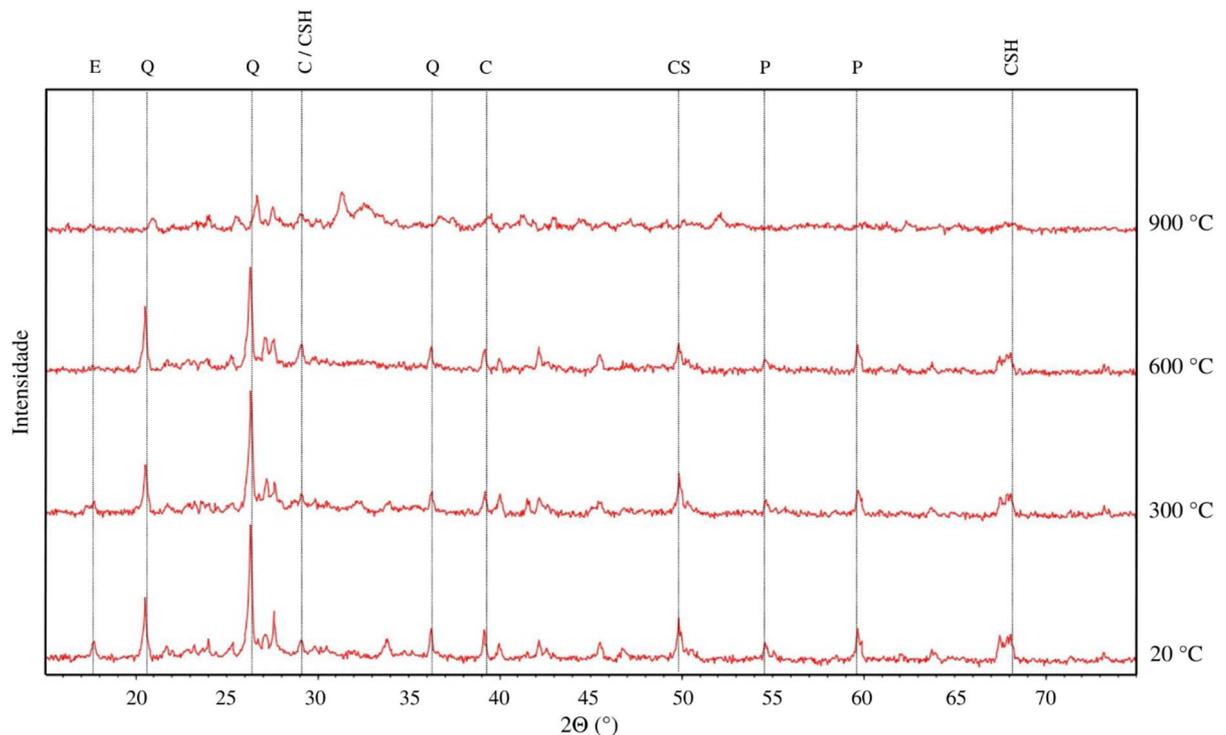


Fonte: elaborado pela autora.

Na análise de DRX realizadas nos concretos produzidos com a amostra de agregado de basalto, foram identificadas a temperatura ambiente picos cristalinos correspondentes a quartzo (Q), associados à presença de partículas de agregado, picos de etringita (E), portlandita (P), calcita (C), silicatos de cálcio (CS) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Após exposição a 300 °C, foi possível observar a diminuição da intensidade dos picos de etringita (E), mostrando o início da decomposição destes cristais. Em 600 °C ocorreu a decomposição quase total da portlandita, e o aumento significativo do pico correspondente a calcita e C-S-H, devido à carbonatação do Ca resultante da decomposição da portlandita. A partir de 600 °C a degradação do gel de C-S-H se acentua prosseguindo até a destruição completa do gel aproximadamente em 900 °C.

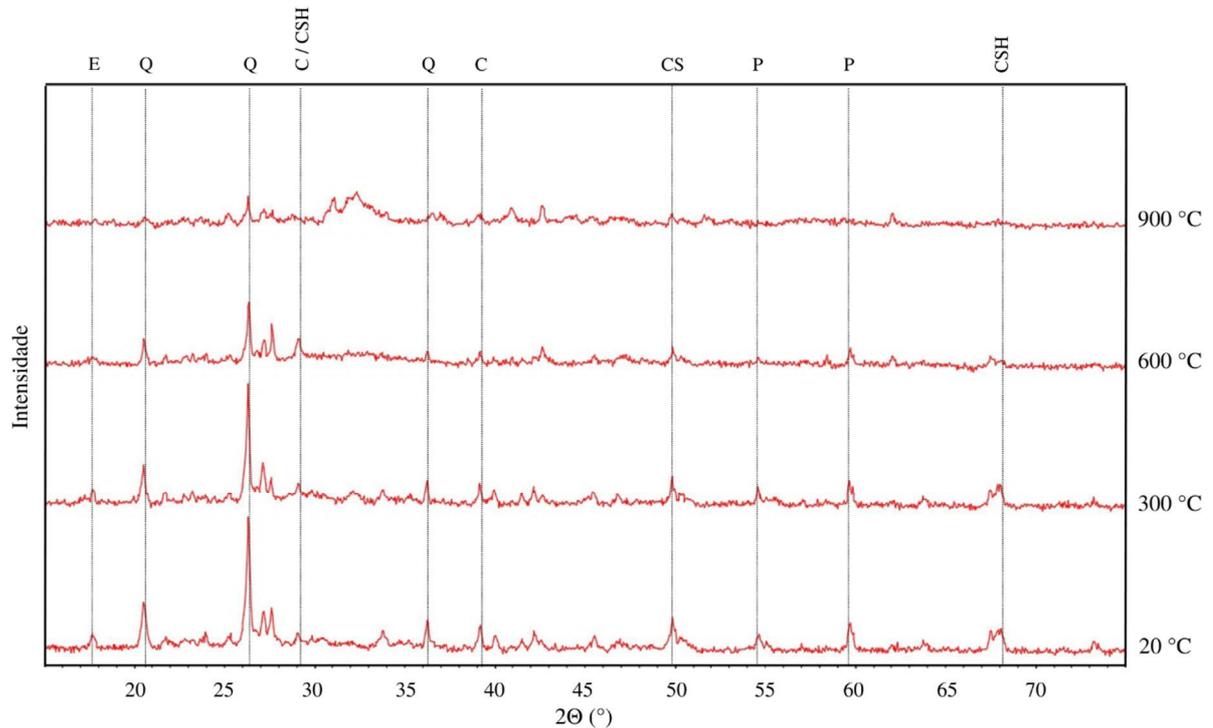
As Figuras 43 e 44 mostram, através da análise de DRX, a influência do aquecimento nas alterações cristalinas dos concretos produzidos com as amostras de agregado de granito, para o traço I e traço II, respectivamente.

Figura 43 – DRX realizado no concreto com agregado de granito e traço I aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 44 – DRX realizado no concreto com agregado de granito e traço II aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H



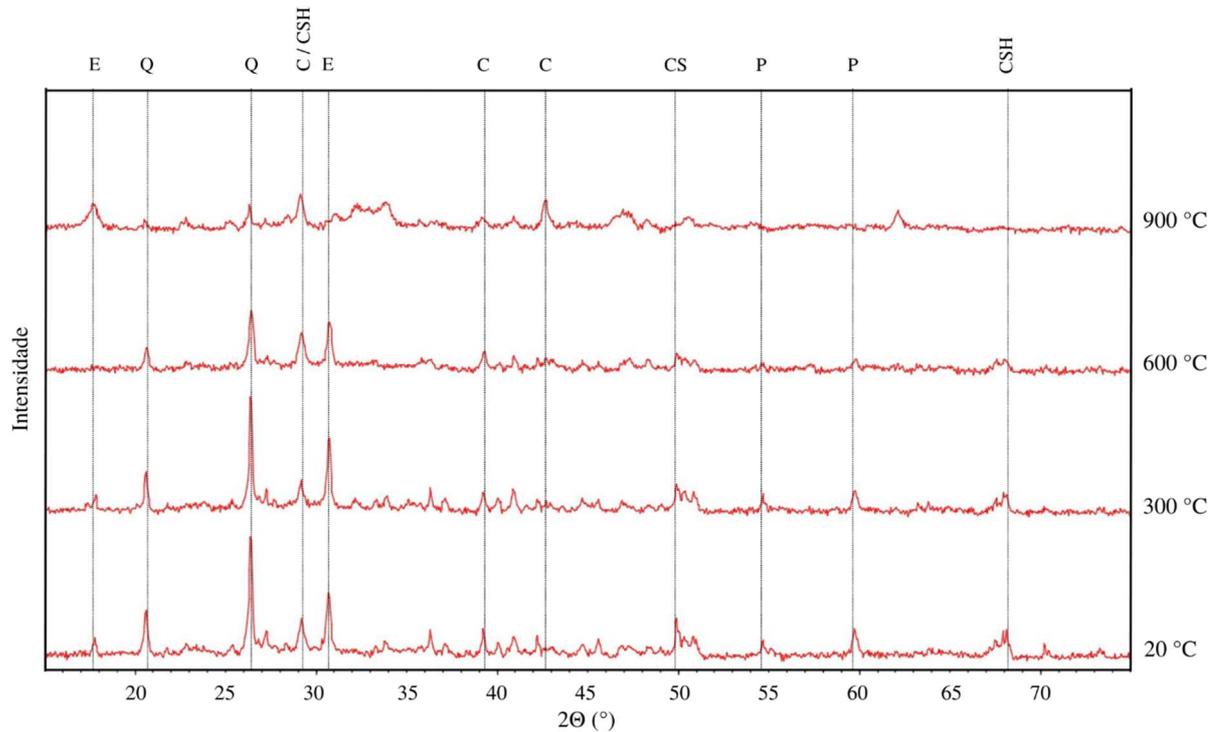
Fonte: elaborado pela autora.

Ao realizar a análise de DRX dos concretos produzidos com a amostra de agregado de granito, identificou-se uma semelhança nos picos cristalinos encontrados nos concretos produzidos com a amostra de agregado de basalto analisadas anteriormente. Na temperatura ambiente foram identificados picos cristalinos correspondentes a quartzo (Q), etringita (E), portlandita (P), calcita (C), silicatos de cálcio (CS) e silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

Com o aumento da temperatura, foram identificadas alterações na intensidade dos picos de etringita, portlandita, calcita e C-S-H. Já em 300 °C, pode-se identificar o início da decomposição dos cristais de etringita (E). Após exposição a 600 °C, a intensidade dos picos de portlandita diminuiu consideravelmente, indicando a decomposição avançada do Ca. Observou-se também redução significativa do pico de C-S-H, o que indica que terá ocorrido decomposição deste composto. E aos 900 °C, nota-se a ausência de picos destes quatro cristais, indicando que estes compostos se decompuseram totalmente nesta temperatura.

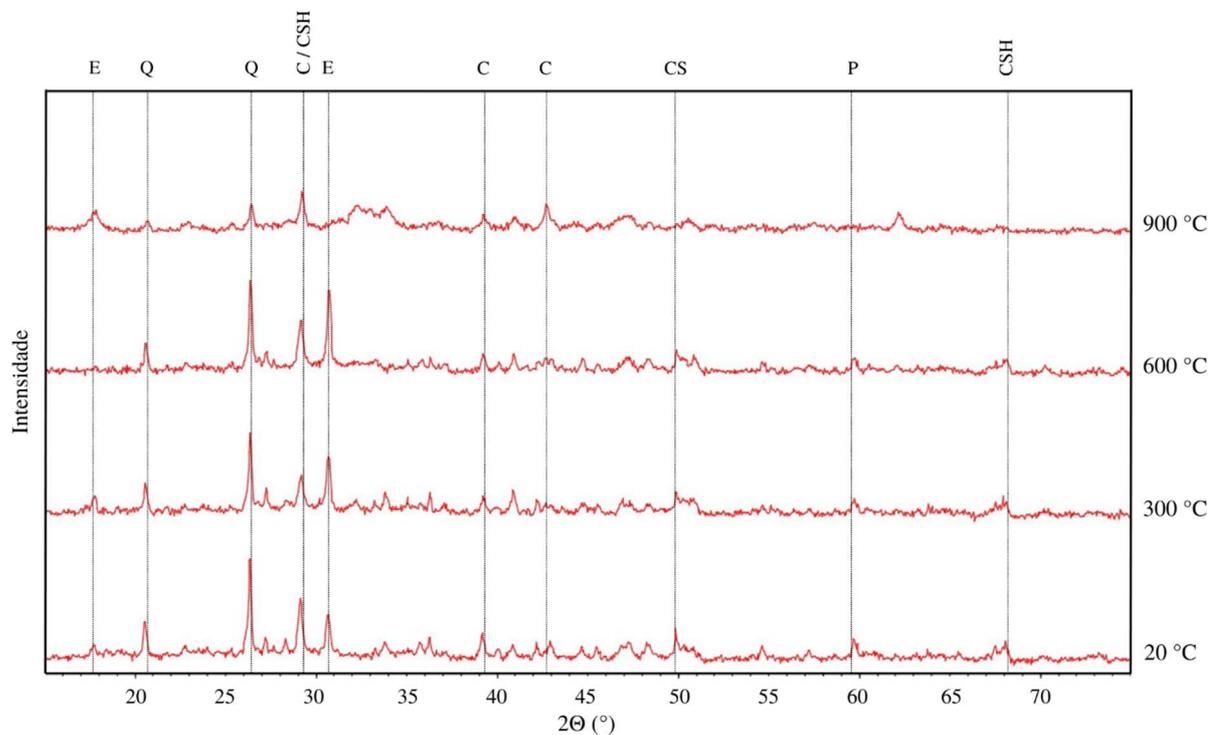
As Figuras 45 e 46 mostram, através da análise de DRX, a influência do aquecimento nas alterações cristalinas dos concretos produzidos com as amostras de agregado de calcário, para o traço I e traço II, respectivamente.

Figura 45 – DRX realizado no concreto com agregado de calcário e traço I aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 46 – DRX realizado no concreto com agregado de calcário e traço II aquecido até 900 °C, onde E=Etringita, P=Portlandita, Q= Quartzo, C=Calcita, CS=Silicatos de cálcio e CSH=C-S-H



Fonte: elaborado pela autora.

É possível observar que após a exposição a 300 °C alguns picos de cristais como etringita (E) e portlandita (P) começam a diminuir devido à decomposição em função do aumento da temperatura. Em 600 °C ocorreu a decomposição quase total da portlandita, e o aumento significativo do pico correspondente a calcita e C-S-H, devido à carbonatação do Ca resultante da decomposição da portlandita.

A partir de 600 °C, a degradação do gel de C-S-H se acentua prosseguindo até a destruição completa do gel aproximadamente em 900 °C. Além disso, após exposição a 900 °C, pode-se notar o aumento na intensidade do pico de etringita (E), que havia desaparecido a 600 °C, e a formação de um novo pico de calcita (C), esse fenômeno pode ser explicado devido a reidratação destes compostos após o resfriamento do concreto.

Após a análise microestrutural por difração de raios X dos concretos produzidos neste trabalho com amostras de agregado de basalto, granito e calcário, pode-se verificar que o aumento da temperatura causa transformações químicas nos produtos da hidratação da pasta de cimento, principalmente em termos de redução da portlandita, que pode ser utilizada como indicador do dano e evolução de temperatura de exposição. Além disso, notou-se uma semelhança nos difratogramas dos concretos produzidos com agregados silicosos (basalto e granito), em termos de identificação dos picos cristalinos e degradação dos componentes com o aumento da temperatura.

Com um comportamento um pouco distinto, os concretos produzidos com agregado calcário apresentaram um aumento e formação de picos de etringita e calcita a temperatura de 900 °C, provavelmente proveniente da reidratação destes componentes. Esse comportamento talvez explica a deterioração destes concretos após exposição a 900 °C, pois a reação de reidratação gera um aumento de volume nos carbonatos.

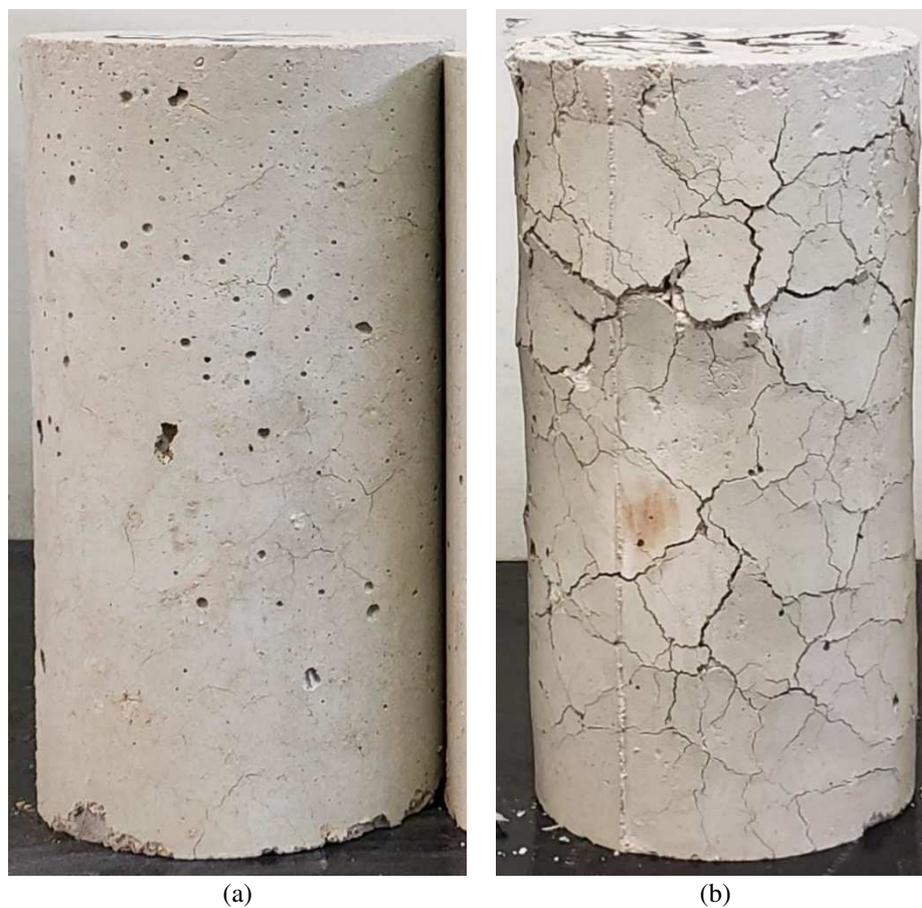
De modo geral, analisando os difratogramas dos três tipos de mineralogia de agregado, pode-se dizer que a redução brusca da resistência à compressão e do módulo de elasticidade até 600 °C pode estar associada, entre outros fatores, à desidratação da portlandita e à decomposição dos silicatos de cálcio.

4.2.5 Análise Visual

As amostras ensaiadas no programa experimental não apresentaram lascamento explosivo, isso, provavelmente deve-se ao baixo teor de umidade das amostras, que foram armazenadas por 63 dias em câmara climatizada, e a baixa taxa de aumento de temperatura fixada em 1 °C/min. As imagens dos copos de prova deste experimento nas temperaturas de 20 °C (ambiente), 300 °C, 600 °C e 900 °C podem ser visualizadas nos Apêndices A, B e C.

Muitos autores mostram que concretos produzidos com agregados silicosos têm um comportamento pior do que os concretos produzidos com agregados calcários, o que vai em concordância as prescrições normativas do Eurocode 2 – Part 1.2 (European Committee for Standardisation, 2004). No entanto, os resultados obtidos neste trabalho, para as amostras de três diferentes mineralogias, não evidenciam um melhor comportamento dos agregados calcários em relação aos agregados silicosos.

Figura 47 – Concretos produzidos com amostras de agregado silicoso e calcário submetido a temperatura de 900 °C



Fonte: elaborado pelo autor.

Após serem submetidos à temperatura de 900 °C, pode-se notar diferença visual entre os corpos de prova produzidos com agregados silicosos e calcários. Detalhes da fissuração pós exposição a 900 °C podem ser observados na Figura 47 (a) e (b) que apresenta um exemplar do concreto produzido com a amostra de agregado silicoso e com a amostra de agregado calcário, respectivamente.

Pode-se notar que os corpos de prova dos concretos produzidos com as amostras de agregados silicosos (basalto e granito), após exposição a 900 °C, sofreram algumas fissurações visíveis na superfície dos corpos de prova, provavelmente, decorrente à incompatibilidade térmica entre pasta e agregados.

Durante o aquecimento, a pasta sofre um intenso processo de retração devido à desidratação, enquanto os agregados sofrem um processo de expansão, resultando em fissuras que surgem, inicialmente, na zona de transição em razão da sua maior fragilidade (FERNANDES *et al.*, 2017). Com base em inspeção visual, Masood *et al.* (2018) verificaram que o desenvolvimento de microfissuras aumenta e se torna mais difundido com o aumento da temperatura.

Por outro lado, os concretos produzidos com a amostra de agregado calcário, após o aquecimento, encontravam-se íntegros com microfissuras na superfície, mas após o resfriamento e em contato com o ar, apresentaram grande fissuração e desagregação. Este comportamento pode ser explicado devido a descarbonatação (eliminação do dióxido de carbono) provocada pela alta temperatura.

Segundo a literatura, as rochas carbonáticas, como o calcário, tornam-se instáveis em temperaturas maiores que 600 °C devido à transformação de carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (cal - CaO) e dióxido de carbono (CO_2). Além disso, os carbonatos, que se decompõem liberando dióxido de carbono durante o aquecimento, reidratam-se durante o resfriamento. Acredita-se que esta reação de reidratação (aumento de 44% no volume) cause “spalling pós-resfriamento” em concretos produzidos com agregados graúdos calcários (ANNEREL E TAERWE, 2009). As fissuras nos corpos de prova estudados são, portanto, o efeito combinado da incompatibilidade térmica e da degradação da matriz cimentícia durante e após o aquecimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, baseadas na análise dos resultados experimentais. Além disso, são fornecidas sugestões para investigações futuras, visando dar sequência à linha de pesquisa e contribuir para o progresso do conhecimento na área.

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste programa experimental, para as variáveis e condições de ensaio, puderam-se obter as conclusões listadas a seguir:

As amostras de agregado graúdo utilizadas neste trabalho foram analisadas e classificadas com base na NBR 7211 (ABNT, 2009). A mineralogia das amostras foi confirmada por meio de análise petrográfica, em que foi possível identificar as características das rochas e classificar os três tipos de amostras utilizadas no programa experimental deste trabalho como basalto, granito e calcário.

Este trabalho permitiu compreender melhor a influência das características mineralógicas dos agregados graúdos no comportamento residual do concreto após exposição a altas temperaturas. Os ensaios realizados ao longo deste trabalho mostraram que os agregados graúdos de basalto, granito e calcário possuem influência distintas no comportamento do concreto frente as altas temperaturas. Mas, independentemente, dos tipos de mineralogia de agregado graúdo, o concreto sob efeito das altas temperaturas sofrem alterações consideráveis, tanto em suas características macroestruturais quanto microestruturais.

Em relação ao traço do concreto, os dois traços utilizados no programa experimental apresentaram redução significativa em suas propriedades em função do aumento da temperatura de exposição. Cabe apontar que o traço II apresentou uma maior variabilidade dos resultados, dificultando a comparação entre os concretos produzidos com as amostras dos três tipos de mineralogia do agregado graúdo. A amostra de agregado graúdo de basalto foi a que se comportou mais sensível ao traço, apresentando um traço II com grande variabilidade.

Relacionando os resultados obtidos na pesquisa com os fatores de redução da resistência à compressão, prescritos pela NBR 15200 (ABNT, 2004) e Eurocode 2 – Part 1.2 (European Committee for Standardisation, 2004), conclui-se que, para as amostras de agregados graúdos analisadas neste trabalho, as curvas dos fatores de redução não vão em concordância com as prescrições normativas. Os resultados obtidos neste trabalho não evidenciam um melhor comportamento dos agregados calcários em relação aos agregados silicosos, comportamento que é apresentado no Eurocode 2.

Salienta-se que os fatores de redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade diferem entre si, sendo que os valores de módulo começam a apresentar maior ordem de grandeza em temperaturas mais baixas, apresentando uma redução mais acentuada do que a observada na resistência à compressão.

Os resultados da análise microestrutural por difração de raios X permitiram identificar a degradação dos elementos presentes no concreto sob exposição as altas temperaturas. Verificou-se que as alterações microestruturais estão diretamente ligadas com as características do concreto, materiais utilizados e aumento da temperatura de exposição. A temperatura provoca alterações químicas nos produtos da hidratação na pasta de cimento hidratada, sendo a redução da portlandita uma transformação significativa. Essa diminuição da portlandita pode ser empregada como indicador dos danos e da variação de temperatura em um elemento estrutural.

Cabe lembrar que estas conclusões são derivadas da análise dos resultados deste trabalho, em que foi avaliada a influência da mineralogia do agregado graúdo no concreto submetido a elevadas temperaturas, limitando-se somente ao estudo de uma amostra, de jazidas localizadas no Estado do Rio Grande do Sul, para cada tipo de mineralogia. Portanto, estes resultados devem ser confirmados e avaliados por estudos adicionais, investigando uma maior gama de amostragem de agregados graúdos para cada tipo de mineralogia.

Finalizando, pode-se dizer que os resultados obtidos neste trabalho mostram que o tipo de mineralogia do agregado graúdo tem influência significativa sobre o comportamento residual do concreto após exposição a altas temperaturas. Estes resultados ratificam a importância de as normatizações vigentes contemplarem critérios para estimativa das propriedades residuais de

concretos produzido com diferentes tipos de mineralogia de agregado graúdo para avaliação das condições de segurança de uma estrutura sinistrado.

5.2 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Explorar o comportamento de agregados que não são rotineiramente utilizados, como agregados de resíduos de construção e demolição (RCD), agregados leves, agregados de resíduos de plástico, entre outros.

Investigar o impacto da distribuição granulométricas dos agregados graúdos na resposta térmica do concreto. Alterações na granulometria podem ter impactos significativos no comportamento do material sob altas temperaturas.

Realizar uma análise microestrutural dos agregados após a exposição a altas temperaturas. Visando analisar as possíveis alterações nas características microscópicas do agregado induzidas pelo calor.

Submeter os concretos a uma variedade mais ampla de temperaturas e gerando curvas com maior número de pontos. Possibilitando identificar com maior precisão as alterações que a temperatura causa nos concretos.

Utilizar diferentes métodos de resfriamento do concreto, analisando se o método de resfriamento tem influência na resistência residual do concreto para diferentes tipos de agregado graúdo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. M. A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2017.
- ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B. (Eds.). **Manual de agregados para a construção civil**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.
- ANNEREL, E.; TAERWE, L. **Revealing the temperature history in concrete after fire exposure by microscopic analysis**. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 12, 2009, p. 1239-1249.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 7389-2**: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 2: Agregado graúdo. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- _____. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.
- BUCHANAN, A. H. **Fire engineering design guide**. Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, 2001.
- COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A.D.; SILVA, V.P. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU'2002 –Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002. 15p. 1 CD-ROM2
- COSTA, P. R. S. **Manifestações patológicas nas estruturas de concreto sujeitas a altas temperaturas**. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. 2013. **An Introduction to the Rock-forming Minerals**. 3rd ed. London: Mineralogical Society. 498pp.

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. **Cadastro Nacional de Produtores de Brita 2015**. Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento da Mineração – Brasília: DNPM, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire**. 2004.

FERNANDES, B.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. **Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise**. Revista IBRACON, Volume 10, Nº 4. 2017.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. (2010). **Cominuição**. In: Tratamento de Minérios, Adão B. Luz, João A. Sampaio e Silvia C. França (Editores), Capítulo 4, p. 143-210, CETEM, 2010.

FRANCHETTO, A. S. **Investigação das características físicas e propriedades residuais de concretos autoadensáveis expostos a altas temperaturas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

FU, Y.; LI, L. **Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures**. Materials and Structures. Nº 44, p. 361–376, 2011.

GAWESKA, I. H. **Thermal behavior of high performance concretes at high temperature - evolution of mechanical properties**. Doctorate Thesis. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.

GRATTAN-BELLEW, P. E. **Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes**. Construction and Building Materials, Great Britain, v. 10, p. 3-16, February, 1996.

KALIFA, P. MENNETEAU D.F., QUENARD D. **Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures**. In: Cement and Concrete Research, Volume 30, Nº 12, p. 1915-1927, 2000.

KHOURY GA. **Effect of fire on concrete and concrete structures**. Progress in Structural Engineering and Materials, Volume 10, Nº 4, p. 429–447, 2000.

KLEIN, C.; DUTROW, B. 2007. **Manual of Mineral Science**, 23rd ed. New York: Willey. 716 pp.

KODUR V. K. R., CHENG F.P., WANG T.C. **Effect of strength and fiber reinforcement on the fire resistance of high strength concrete columns**. ASCE, J Struct Eng; 129, Volume 2: p.1–22, 2003.

KODUR V. K. R. **Spalling in high strength concrete exposed to fire concerns, causes, critical parameters and cures**. In: Proceedings: ASCE Structures Congress, 1-8, Philadelphia, USA, 2000.

LA SERNA; H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2011. Disponível em: <http://www.anepac.org.br>.

LIMA, R.C.A. **Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A. **Operação de beneficiamento de rochas**. Manual de agregados para a construção civil. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012.

MALHOTRA, H. L. **Design of fire-resisting structures**. Chapman & Hall, 1982.

MASOOD, A. et al. **Effect of elevated temperature on the residual properties of quartzite, granite and basalt aggregate concrete**. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, v. 99, p. 485-494, 2018.

- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. M. **Concreto** Microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 2014.
- MINDEGUIA, J. C., PIMIENTA, P., CARRÉ, H., LA BORDERIE, C. **On the influence of aggregate nature on concrete behaviour at high temperature**. In: Journal of Environmental and Civil Engineering, Volume 16, p. 236–253, European, 2012.
- MINATTO, R. M. **Análise da influência do agregado graúdo na resistência à compressão do concreto após exposição a altas temperaturas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade FEEVALE. Novo Hamburgo, RS, 2018.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2015. Tradução de Salvador E. Giammusso.
- QUEIROZ, R. C. **Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil**. São Carlos: RiMa, 2009.
- RILEM Technical Committee. **RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures**. 2004.
- SANTOS, C. C.; RODRIGUES, J. P. C. **Residual mechanical properties of calcareous and granite aggregate concretes after fire**. Magazine of concrete research, v. 66, n. 16, p. 845-857, 2014.
- SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, GOVERNANÇA E GESTÃO (RS). **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. Departamento de Planejamento Governamental. – 6. Ed. – Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental, 2021.
- SHAHRAKI, Marzieh et al. **Residual compressive strength of concrete after exposure to high temperatures: A review and probabilistic models**. Fire Safety Journal, p. 103698, 2022
- SILVA, D. A.; GEYER, A. L. B. **Influência da Forma do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 12, Vol. 05, pp. 67- 82, 2018.
- SOLLERO, M. B. S. **Propriedades mecânicas residuais do concreto em situação de incêndio**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2019.
- SOLLERO, M. B. S.; MORENO JR., A. L.; COSTA, C. N. **Residual mechanical strength of concrete exposed to high temperatures–international standardization and influence of coarse aggregates**. Construction and Building Materials, v. 287, p. 122843, 2021.
- TANNO, L. C.; SINTONI, A. **Mineração e município: bases para o planejamento e gestão dos recursos minerais**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2003.
- VEIGA, B. P. **Influência dos agregados graúdos na resistência à compressão do concreto quando submetido a temperaturas elevadas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UTFPR, Curitiba.
- XING, Z.; BEAUCOUR, A. L.; HEBERT, R.; NOUMOWE, A.; LEDSERT, B. **Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature**. University of Cergy - Pontoise, France, 2011.

**APÊNDICE A - Imagens dos corpos de prova produzidos com agregado
graúdo de basalto após exposição a altas temperaturas**

**B25 – 20°C****B25 – 300°C****B25 – 600°C****B25 – 900°C****B45 – 20°C****B45 – 300°C****B45 – 600°C****B45 – 900°C**

**APÊNDICE B - Imagens dos corpos de prova produzidos com agregado
gráudo de granito após exposição a altas temperaturas**

**G25 – 20°C****G25 – 300°C****G25 – 600°C****G25 – 900°C****G45 – 20°C****G45 – 300°C****G45 – 600°C****G45 – 900°C**

**APÊNDICE C - Imagens dos corpos de prova produzidos com agregado
graúdo de calcário após exposição a altas temperaturas**

**C25 – 20°C****C25 – 300°C****C25 – 600°C****C25 – 900°C****C45 – 20°C****C45 – 300°C****C45 – 600°C****C45 – 900°C**