

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Arthur Henrique Gasparete Casali

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO EM DIFERENTES
CLASSES DE CONCRETO E COM SUBSTITUIÇÃO DE VERMICULITA**

Juiz de Fora

2021

Arthur Henrique Gasparete Casali

Análise do comportamento termomecânico em diferentes classes de concreto e com substituição de vermiculita

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa De Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr^a. Thaís Mayra de Oliveira
Coorientador: Prof. Dr^a. Michèle Cristina Resende Farage

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Casali, Arthur Henrique Gasparete.

Análise do comportamento termomecânico em diferentes classes de concreto e com substituição de vermiculita/ Arthur Henrique Gasparete Casali. -- 2021.

95 f. : il.

Orientadora: Thaís Mayra de Oliveira

Coorientadora: Michèle Cristina Resende Farage

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Classes de concreto. 2. Altas Temperaturas. 3. Vermiculita. I. Oliveira, Thaís Mayra de, orient. II. Farage, Michèle Cristina Resende, coorient. III. Título.

ARTHUR HENRIQUE GASPARETE CASALI

Análise do comportamento termomecânico em diferentes classes de concreto e com substituição de vermiculita

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 14 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Thaís Mayra de Oliveira - Orientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a Dr.^a Michèle Cristina Resende Farage - Coorientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a Dr.^a Flávia de Souza Bastos

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a Dr.^a Adriana Guerra Gumieri

Universidade Federal de Minas Gerais

Juiz de Fora, 24/11/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Thais Mayra de Oliveira, Professor(a)**, em 14/12/2021, às 14:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Michele Cristina Resende Farage, Professor(a)**, em 14/12/2021, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do



Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Flavia de Souza Bastos, Professor(a)**, em 14/12/2021, às 20:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Guerra Gumieri, Usuário Externo**, em 15/12/2021, às 13:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.uffj.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **0590382** e o código CRC **C6D8126F**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus.

À minha família, meus pais Sandra e Ronaldo, e minha brilhante irmã Larissa, que me deram e dão apoio em todos os momentos, nos dias de empolgação e nos dias sem inspiração, me provem um ambiente que me impulsiona e motiva, me deram a oportunidade de seguir com meus estudos e o suporte para que eu pudesse realizar o sonho de ser mestre.

Agradeço imensamente a todas as pessoas próximas que escutam meus desabafos, minhas dores e alegrias, me fazem querer ser mais animador, mais altruísta, mais atencioso e mais amável. Querer ser mais!

Aos meus amigos Gilber Júnior e Sebastião, porque, sem eles, não seria possível, foi com nosso suor e sangue que foi feito este trabalho. Ele é nosso!

À laboratorista Romilda, meu conselheiro Nayton e companheiros de mestrado, principalmente Victor!

Às minhas escudeiras Hilma e Laura, que tanto me acalmaram em momentos de estresse e aguentaram diversos dias de mal humor.

Aos fornecedores dos materiais usados nessa pesquisa, Holcim, Pedra Sul, Sika e Quibrita: suas doações para o meio científico ficam marcadas comigo.

À CAPES, pela bolsa que me foi confiada, fundamental para a minha manutenção no programa.

A todos os professores que fizeram parte dessa jornada, em especial, minhas orientadoras Thaís e Michèle, agradeço pelos ensinamentos que estarão sempre comigo.

Por fim, mas não menos importante, à PEC e à UFJF, por todo apoio e incentivo oferecido ao longo desses anos.

RESUMO

O concreto é um material difundido e utilizado mundialmente, sobretudo devido ao seu custo relativamente baixo, à não exigência de mão de obra qualificada para a sua obtenção, além da relativa resistência ao fogo. Contudo, o comportamento deste material, quando submetido a determinadas condições de carregamento e temperatura, leva a alterações microestruturais que refletem em sua estrutura macroscópica. Estudos experimentais analisaram os danos causados pelo aumento da temperatura considerando os níveis microestrutural e macroestrutural e, sendo crescente a demanda por concretos com uma matriz cimentícia altamente densa e com um baixo volume de vazios, há um aumento da sensibilidade do material a condições térmicas extremas, tornando-o sujeito a microfissuração, ao deslocamento e à perda de capacidade de carga. Salienta-se, ainda, que pesquisas referentes à exposição de elementos de concreto a temperaturas elevadas conduzem a resultados bastante inconsistentes e, dessa forma, novas contribuições sobre o assunto são muito importantes. Nesse contexto, surge a necessidade do estudo da avaliação termomecânica de concretos com agregados leves quando comparados com concretos convencionais, ou seja, com agregados pétreos comumente utilizados nas dosagens. Pretende-se, neste trabalho, avaliar o comportamento termomecânico do concreto quando o mesmo é exposto a gradientes de temperatura elevados, considerando que incêndios chegam até a 900°C, e entender o processo de degradação dos materiais nesses casos. O trabalho é constituído de duas etapas, tendo a Etapa I como finalidade caracterizar, estudar e definir os materiais e as dosagens para cada tipo de concreto além da moldagem de corpos-de-prova a serem avaliados e ensaiados. Na Etapa II foram executados os ensaios de absorção, massa específica, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulos de elasticidade estático e velocidade de pulso ultrassônico em cada uma das amostras submetidas a diferentes temperaturas (TA (temperatura ambiente); 200; 400 e 800°C). Como conclusão e de acordo com as análises dos resultados, verificou-se que, em temperatura ambiente, o emprego da vermiculita demonstrou diferenças na porosidade e a massa específica do material, porém, com o acréscimo dos gradientes de temperatura, tais diferenças se desfazem, o que pode ser explicado pelo aumento de fissuração, perda de massa e aumento da estrutura do poro. Foi observado também que, para os parâmetros dos ensaios, pode-se concluir que a alta temperatura tem influência direta tanto nos concretos convencionais quanto nos concretos com substituição por vermiculita.

Palavras-chave: Classes de concreto. Altas temperaturas. Vermiculita.

ABSTRACT

Concrete is a widespread and used material worldwide, mainly due to its relatively low cost, the non-requirement of qualified labor to obtain it, in addition to its relative fire resistance. However, the behavior of this material, when subjected to certain conditions of loading and temperature, leads to microstructural changes that reflect on its macroscopic structure. Experimental studies have analyzed the damage caused by temperature increase considering the microstructural and macrostructural levels and, as the demand for concrete with a highly dense cementitious matrix and with a low void volume is increasing, there is an increase in the material's sensitivity to extreme thermal conditions, making it subject to microcracking, peeling and loss of load carrying capacity. It should also be noted that researches referring to the exposure of concrete elements to high temperatures lead to very inconsistent results and, therefore, new contributions on the subject are very important. In this context, there is a need to study the thermomechanical evaluation of concrete with light aggregates when compared with conventional concretes, that is, with stone aggregates commonly used in dosages. It is intended, in this work, to evaluate the thermomechanical behavior of concrete when it is exposed to high temperature gradients, considering that fires go up to 900°C, and to understand the process of degradation of materials in these cases. The work consists of two stages, Stage I with the purpose of characterizing, studying and defining the materials and dosages for each type of concrete, in addition to the molding of test bodies to be evaluated and tested. In Step II, the tests of absorption, specific mass, axial compression strength, tensile strength by diametrical compression, static modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity were performed in each of the samples subjected to different temperatures (TA (room temperature); 200; 400 and 800°C). As a conclusion and according to the analysis of the results, it was found that, at room temperature, the use of vermiculite showed differences in porosity and specific mass of the material, however, with the increase of temperature gradients, these differences disappear, which can be explained by the increase in cracking, loss of mass and increase in pore structure. It was also observed that, for the test parameters, it can be concluded that high temperature has a direct influence both on conventional concretes and on concretes with substitution by vermiculite.

Keywords: Concrete classes. High temperatures. Vermiculite.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Influência da temperatura de exposição na resistência à compressão do concreto, média dos valores obtidos. | 17 |
| Figura 2 - Influência da temperatura de exposição no módulo de elasticidade do concreto, média dos valores obtidos. | 17 |
| Figura 3 - Influência do tempo de exposição à diferentes gradientes de temperatura no concreto. | 18 |
| Figura 4 - Curvas tensão-deformação de CAD conforme norma norueguesa (HELLAND, 1988). | 22 |
| Figura 5 - Efeito de spalling visível. | 24 |
| Figura 6 - Propriedades térmicas dos concretos com agregados leves e agregados convencionais. | 26 |
| Figura 7 - Materiais usados no trabalho. | 30 |
| Figura 8 - Materiais resfriando após secos em estufa. | 32 |
| Figura 9 - Materiais pesados e devidamente separados. | 42 |
| Figura 10 - Agregado miúdo em condição saturada com superfície seca. | 43 |
| Figura 11 - Agregado graúdo em condição saturada com superfície seca. | 43 |
| Figura 12 - Mistura pronta. | 44 |
| Figura 13 - Preenchimento do molde durante ensaio. | 45 |
| Figura 14 - Medição do abatimento. | 46 |
| Figura 15 - Corpos de prova CR35 depois da moldagem. | 48 |
| Figura 16 - Corpos de prova CR35 e CS 35 na câmara úmida. | 48 |
| Figura 17 - Ensaio de velocidade do pulso ultrassônico. | 53 |
| Figura 18 - Contenco Pavitest utilizada. | 54 |
| Figura 19 - Ensaio de resistência à compressão axial. | 54 |
| Figura 20 - Ensaio de tração por compressão diametral. | 55 |
| Figura 21 - Strain Gauge colocado no corpo de prova. | 56 |
| Figura 22 - Corpo de prova posicionado na prensa. | 57 |
| Figura 23 - Corpo de prova cilíndrico do tipo CS35 destruído completamente na mufla. | 59 |
| Figura 24 - Fragmentos do corpo de prova cilíndrico do tipo CR70. | 59 |
| Figura 25 - Corpo de prova CR50 após aquecimento até 400°C. | 60 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Granulometria da areia natural..... | 35 |
| Gráfico 2 - Granulometria da areia de britagem..... | 36 |
| Gráfico 3 - Granulometria dos agregados graúdos..... | 38 |
| Gráfico 4 - Abatimento do tronco de cone. | 46 |
| Gráfico 5 - Teor de absorção de água..... | 50 |
| Gráfico 6 - Massa específica. | 51 |
| Gráfico 7 - Massa seca x Temperatura. | 61 |
| Gráfico 8 - Velocidade do pulso ultrassônico x Temperatura. | 62 |
| Gráfico 9 - Velocidade do pulso ultrassônico x Temperatura. Classe 35..... | 63 |
| Gráfico 10 - Velocidade do pulso ultrassônico x Temperatura. Classe 50..... | 64 |
| Gráfico 11 - Velocidade do pulso ultrassônico x Temperatura. Classe 70..... | 65 |
| Gráfico 12 - Resistência à compressão x Temperatura. | 66 |
| Gráfico 13 - Resistência à compressão x Temperatura. Classe 35..... | 67 |
| Gráfico 14 - Resistência à compressão x Temperatura. Classe 50..... | 68 |
| Gráfico 15 - Resistência à compressão x Temperatura. Classe 70..... | 69 |
| Gráfico 16 - Resistência a tração x Temperatura. | 70 |
| Gráfico 17 - Resistência à tração x Temperatura. Classe 35..... | 71 |
| Gráfico 18 - Resistência à tração x Temperatura. Classe 50. | 72 |
| Gráfico 19 - Resistência à tração x Temperatura. Classe 70. | 73 |
| Gráfico 20 - Módulo de elasticidade x Temperatura..... | 74 |
| Gráfico 21 - Módulo de elasticidade x Temperatura. Classe 35. | 75 |
| Gráfico 22 - Módulo de elasticidade x Temperatura. Classe 50. | 76 |
| Gráfico 23 - Módulo de elasticidade x Temperatura. Classe 70. | 76 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Caracterização da areia natural..... | 34 |
| Tabela 2 - Caracterização areia de britagem. | 35 |
| Tabela 3 - Caracterização brita 0..... | 37 |
| Tabela 4 - Caracterização brita 1..... | 38 |
| Tabela 5 - Traços com brita calcária. | 40 |
| Tabela 6 - Traços com brita basáltica..... | 41 |
| Tabela 7 - Plano de amostragem de ensaios destrutivos. | 41 |
| Tabela 8 - Informações da mistura dos concretos. | 47 |
| Tabela 9 - Média das absorções..... | 51 |
| Tabela 10 - Média das massas específicas..... | 52 |
| Tabela 11 - Média das massas secas..... | 61 |
| Tabela 12 - Média de velocidade do pulso ultrassônico..... | 62 |
| Tabela 13 - Média de velocidade do pulso ultrassônico. Classe 35. | 63 |
| Tabela 14 - Média de velocidade do pulso ultrassônico. Classe 50. | 64 |
| Tabela 15 - Média de velocidade do pulso ultrassônico. Classe 70. | 65 |
| Tabela 16 - Média das resistências à compressão. | 66 |
| Tabela 17 - Média das resistências à compressão. Classe 35..... | 67 |
| Tabela 18 - Média das resistências à compressão. Classe 50..... | 68 |
| Tabela 19 - Média das resistências à compressão. Classe 70..... | 69 |
| Tabela 20 - Média das resistências à tração. | 70 |
| Tabela 21 - Média das resistências à tração. Classe 35..... | 71 |
| Tabela 22 - Média das resistências à tração. Classe 50..... | 72 |
| Tabela 23 - Média das resistências à tração. Classe 70..... | 73 |
| Tabela 24 - Média dos módulos de elasticidade..... | 74 |
| Tabela 25 - Média dos módulos de elasticidade. Classe 35. | 75 |
| Tabela 26 - Média dos módulos de elasticidade. Classe 50. | 76 |
| Tabela 27 - Média dos módulos de elasticidade. Classe 70. | 77 |
| Tabela 28 - Resultados individuais dos CPs CR35 para ensaios não destrutivos em TA. | 86 |
| Tabela 29 - Resultados individuais dos CPs CS35 para ensaios não destrutivos em TA..... | 87 |
| Tabela 30 - Resultados individuais dos CPs CR50 para ensaios não destrutivos em TA. | 88 |
| Tabela 31 - Resultados individuais dos CPs CS50 para ensaios não destrutivos em TA..... | 89 |

| | |
|---|----|
| Tabela 32 - Resultados individuais dos CPs CR70 para ensaios não destrutivos em TA. | 90 |
| Tabela 33 - Resultados individuais dos CPs CS70 para ensaios não destrutivos em TA..... | 91 |
| Tabela 34 - Resultados individuais dos CPs CR35 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento..... | 92 |
| Tabela 35 - Resultados individuais dos CPs CS35 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento..... | 92 |
| Tabela 36 - Resultados individuais dos CPs CR50 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento..... | 93 |
| Tabela 37 - Resultados individuais dos CPs CS50 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento..... | 93 |
| Tabela 38 - Resultados individuais dos CPs CR70 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento..... | 94 |
| Tabela 39 - Resultados individuais dos CPs CS70 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento..... | 94 |
| Tabela 40 - Resultados individuais dos CPs CR35 para ensaios destrutivos..... | 95 |
| Tabela 41 - Resultados individuais dos CPs CS35 para ensaios destrutivos..... | 95 |
| Tabela 42 - Resultados individuais dos CPs CR50 para ensaios destrutivos..... | 95 |
| Tabela 43 - Resultados individuais dos CPs CS50 para ensaios destrutivos..... | 96 |
| Tabela 44 - Resultados individuais dos CPs CR70 para ensaios destrutivos..... | 96 |
| Tabela 45 - Resultados individuais dos CPs CS70 para ensaios destrutivos..... | 96 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 1.1 | OBJETIVO..... | 13 |
| 1.1.1 | Objetivos Específicos..... | 14 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO..... | 14 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 15 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 2.1 | CONCRETO CONVENCIONAL E CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO..... | 21 |
| 2.1.1 | Fenômeno de <i>Spalling</i> | 23 |
| 2.2 | CONCRETOS LEVES E ADIÇÃO DE VERMICULITA..... | 25 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 29 |
| 3.1 | COMPONENTES E MISTURAS..... | 29 |
| 3.1.1 | Ensaio de granulometria | 30 |
| 3.1.2 | Massa específica..... | 30 |
| 3.1.3 | Massa unitária | 31 |
| 3.1.4 | Teor de material pulverulento..... | 31 |
| 3.1.5 | Cimento | 32 |
| 3.1.6 | Areia natural..... | 34 |
| 3.1.7 | Areia de britagem..... | 35 |
| 3.1.8 | Agregados graúdos..... | 37 |
| 3.1.9 | Vermiculita..... | 39 |
| 3.1.10 | Sílica ativa | 39 |
| 3.1.11 | Aditivo | 39 |
| 3.1.12 | Água..... | 40 |
| 3.2 | DOSAGEM | 40 |
| 3.3 | PLANO DE AMOSTRAGEM..... | 41 |
| 3.4 | MISTURA DOS MATERIAIS | 41 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.5 | MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA..... | 47 |
| 3.6 | ANÁLISE ESTATÍSTICA..... | 49 |
| 3.7 | ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO | 50 |
| 3.8 | ENSAIOS TÉRMICOS | 52 |
| 4 | RESULTADOS E ANÁLISES | 58 |
| 4.1 | ANÁLISE VISUAL..... | 58 |
| 4.2 | PERDA DE MASSA | 61 |
| 4.3 | VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO..... | 62 |
| 4.4 | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL..... | 65 |
| 4.5 | RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL..... | 70 |
| 4.6 | MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO | 73 |
| 5 | CONCLUSÕES | 78 |
| | REFERÊNCIAS | 80 |
| | APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS | 86 |
| | APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ENSAIOS DESTRUTIVOS | 95 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente utilizado na engenharia para construção de diversos tipos de estrutura. É, tanto química quanto fisicamente, um dos mais complexos dentre os utilizados na construção civil à temperatura ambiente (Troxell; Davis; Kelly, 1968), possuindo comportamento particular diante de exposição a elevadas temperaturas, tais quais as características de um incêndio.

No cenário brasileiro, um dos mais marcantes casos envolvendo a construção civil é o do incêndio no Museu Nacional no Rio de Janeiro, em setembro de 2018. Nele, durante vinte e quatro horas, chamas destruíram quase por completo o acervo de mais de vinte milhões de arquivos de grande valia histórica, cultural e antropológica para a sociedade brasileira.

Outra ocorrência fatídica relacionada à construção civil foi a da edificação no centro de São Paulo de vinte e quatro andares que desabou também devido a um incêndio em maio de 2018, sendo que, segundo informações do corpo de bombeiros temperaturas foram alcançadas entre 600 e 700°C, e o desabamento aconteceu em torno de 1 hora e 30 minutos após o início do fogo. Nesse tempo, as pessoas presentes tiveram de evacuar por escadas de emergências de concreto para que pudessem salvar suas vidas.

Segundo dados do corpo de bombeiros a temperatura máxima atingida em um incêndio completamente desenvolvido chega a 900°C, sendo assim os equipamentos usados por eles tem que resistir a tais temperaturas, analogamente a estrutura ao seu redor também deve ser suficientemente resistente.

Em estudos experimentais são observadas as perdas de resistências mecânicas do concreto quando submetidos a elevadas temperaturas, Ergün (2013) constata que corpos de prova expostos a diferentes temperaturas (entre 100°C e 800°C) apresentam redução em sua resistência à compressão a medida que são condicionados a temperaturas maiores, e salienta que acima de 400°C esta perda é acintosa.

O concreto sofre alterações químicas internas causadas pelo acréscimo de temperatura, e aumento da pressão interna levando a mudanças irreversíveis que acarretam em redução de sua performance e podendo levar o material a sua total destruição (Drzymała, 2017).

A busca por aprimoramentos de características de materiais levou pesquisadores a desenvolverem o chamado concreto de alto desempenho, este propende a apresentar resistências mecânicas mais altas em relação a concretos convencionais e ter maior durabilidade. Este material, por possuir maior densidade e menor volume de vazios, é sujeito a pressões internas mais intensas quando exposto a altas temperaturas e, portanto, apresenta

mudança de sua coloração nessas condições, assim como redução drástica de resistência. (AKCA, 2013).

Estudos de Morales (2011) indicam que concretos leves, sendo mais porosos e com menor condução térmica, são propensos a manifestarem danos reduzidos quando comparados a concretos convencionais em situação de temperaturas elevadas.

Para a fabricação de concreto leve, é possível o emprego de vermiculita expandida, produto que aumenta a porosidade da mistura e reduzir a condutividade térmica da mesma. (UGARTE, 2008).

Rashad (2016) afirma que a vermiculita expandida exibe propriedades benéficas como redução da condução térmica, redução da densidade do material, maior resiliência, inércia química, e relativo alto ponto de fusão. O mesmo autor informa, ainda, que existe potencial para algumas desvantagens de seu uso, como a redução de resistência a compressão.

O potencial do emprego da vermiculita expandida em mistura de concreto faz com que seja necessária a busca por dados consistentes das modificações ocasionadas por seu uso e quais as diferenças do comportamento do material em relação a um concreto referência de mesma classe em situação de elevadas temperaturas.

Nesse sentido, foi observado que a avaliação do comportamento do concreto quando submetido a temperaturas elevadas tem despertado cada vez mais o interesse da comunidade científica, para obtenção de maior quantidade de dados experimentais e comparativos quanto às propriedades mecânicas de classes de concreto e do concreto com agregado leve.

1.1 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento termomecânico do concreto quando submetido a gradientes de temperatura (TA (temperatura ambiente); 200; 400 e 800°C) e verificar o processo de degradação dos materiais por meio dos ensaios de absorção, massa específica, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulos de elasticidade estático e velocidade de pulso ultrassônico em cada uma das amostras submetidas a essas variações.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para obtenção do objetivo principal, o trabalho foi constituído de duas Etapas, tendo referência os seguintes objetivos específicos:

Etapa I:

- a) caracterizar, estudar e definir os materiais e as dosagens para cada tipo de concreto;
- b) moldagem de corpos-de-prova a serem avaliados e ensaiados.

Etapa II:

- a) identificar o comportamento das classes e tipos de concreto quando submetidos a diferentes temperaturas (TA (temperatura ambiente); 200; 400 e 800°C);
- b) avaliar a influência da vermiculita nas dosagens;
- c) verificar o comportamento mecânico e físico por meio dos ensaios de absorção, massa específica, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulos de elasticidade estático e velocidade de pulso ultrassônico em cada uma das amostras submetidas a diferentes temperaturas;
- d) verificação do comportamento macroestrutural e de degradação dos corpos de prova;
- e) validação do estudo por meio de análise estatística.

1.2 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Uma das principais vantagens do concreto sobre outros materiais de construção é a boa resistência ao fogo, o que é essencial para segurança humana e de bens materiais na ocorrência de incêndios. Ao contrário da madeira e dos plásticos, o concreto não é combustível e não emite gases tóxicos quando exposto a temperaturas elevadas, além de ser capaz de conservar resistência suficiente por períodos razoavelmente longos, permitindo operações de resgate com redução do risco de colapso estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Por ser um material heterogêneo, muitos fatores controlam a resposta do concreto ao fogo e os agregados são um desses fatores, uma vez que a pasta quanto o agregado se decompõem com o calor. Para Neville (2016), as características dos mesmos são de considerável importância e podem refletir nos efeitos sofridos pelo concreto quando exposto a

elevadas temperaturas. A elevação da temperatura provoca alterações nas propriedades mecânicas do concreto, principalmente a perda de resistência à compressão, e tal perda pode colocar em risco a capacidade estrutural do concreto.

Portanto, surge a necessidade de fornecer a comunidade científica dados que possam avaliar os efeitos da exposição de diferentes concretos dosados com materiais nacionais a gradientes de temperaturas, relacionando a sua capacidade estrutural ao processo de degradação dos materiais nesses casos, por meio da análise de quais impactos a elevação da temperatura causa nas propriedades mecânicas do concreto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. Em primeiro lugar, no Capítulo 1, é feita uma breve introdução, contextualizando o tema, justificando a relevância da pesquisa e apontando seus objetivos.

No Capítulo 2, é desenvolvida uma revisão bibliográfica quanto a conceitos importantes para o entendimento do trabalho, na qual aborda-se a caracterização dos diferentes tipos de concreto analisados, suas características, vantagens e desvantagens.

O capítulo 3 indica as características dos materiais empregados, além da descrição de todos os procedimentos que foram realizados, das variáveis utilizadas e dos métodos seguidos – desde a dosagem até os ensaios normatizados que caracterizam os concretos estudados.

Já o capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios realizados na pesquisa, além de abordar algumas discussões e análises acerca dos mesmos.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais em relação ao estudo, trazendo as conclusões a respeito da viabilidade da substituição de vermiculita e o comparativo entre os resultados encontrados.

Em seguida, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para embasar a discussão feita na pesquisa.

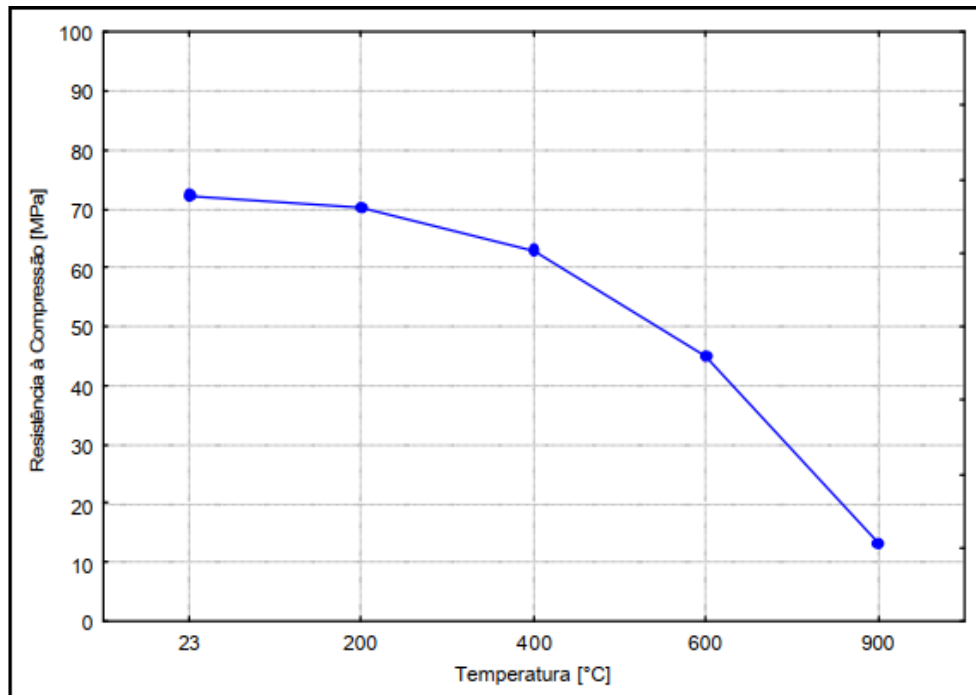
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comportamento do concreto sob temperaturas elevadas é complexo e, por vezes, as informações sobre o tema disponíveis na literatura são controversas (como será visto neste trabalho). O assunto vem despertando interesse de pesquisadores há décadas, haja vista os prejuízos econômicos causados em incêndios e, principalmente, os riscos à segurança dos usuários envolvidos, fator suscitante de estudos que relacionam a exposição a temperaturas elevadas com a degradação do material, representada por reduções nos valores das propriedades mecânicas - em particular, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.

Em 1983, Mohamedbhai realizou um estudo experimental em cubos de concreto submetidos a elevadas temperaturas (superiores a 400°C), com distintos processos de resfriamento. Para concretos expostos por uma hora após alcançarem a temperatura definida para o ensaio, encontrou intervalos de resistência residual da ordem de 77% a 85% na temperatura de 200°C, o que representa reduções significativas, e ainda maiores para concretos expostos a 400°C.

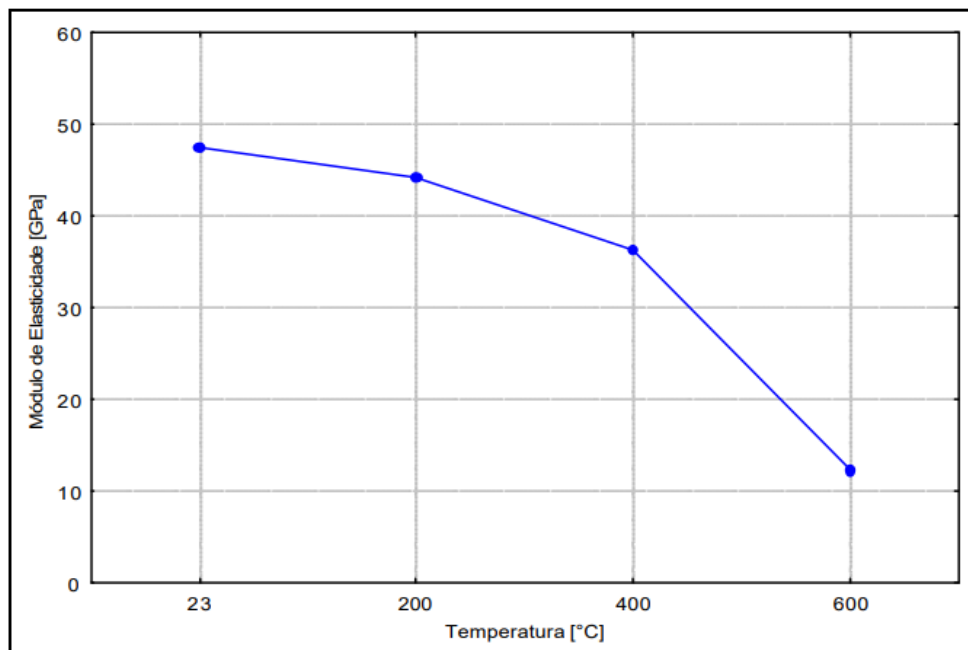
Lima (2005), em um estudo experimental envolvendo concretos moldados com diferentes proporções, agregados e adições, após submissão dos corpos de prova a diferentes temperaturas (TA, 200°C, 400°C, 600°C e 900°C), afirma que a exposição à diferente gradiente de temperatura está ligada à queda de resistência a compressão e alteração do módulo de elasticidade, além de enfatizar que tais alterações ocorrem majoritariamente em temperaturas acima de 400°C e mostrar que a queda do módulo se faz mais em seus corpos de prova expostos a 900°C, que não puderam ser aferidas devido a deterioração do corpo de prova, como observado nas Figuras 1 e 2:

Figura 1 - Influência da temperatura de exposição na resistência à compressão do concreto, média dos valores obtidos.



Fonte: Extraído de Lima (2005).

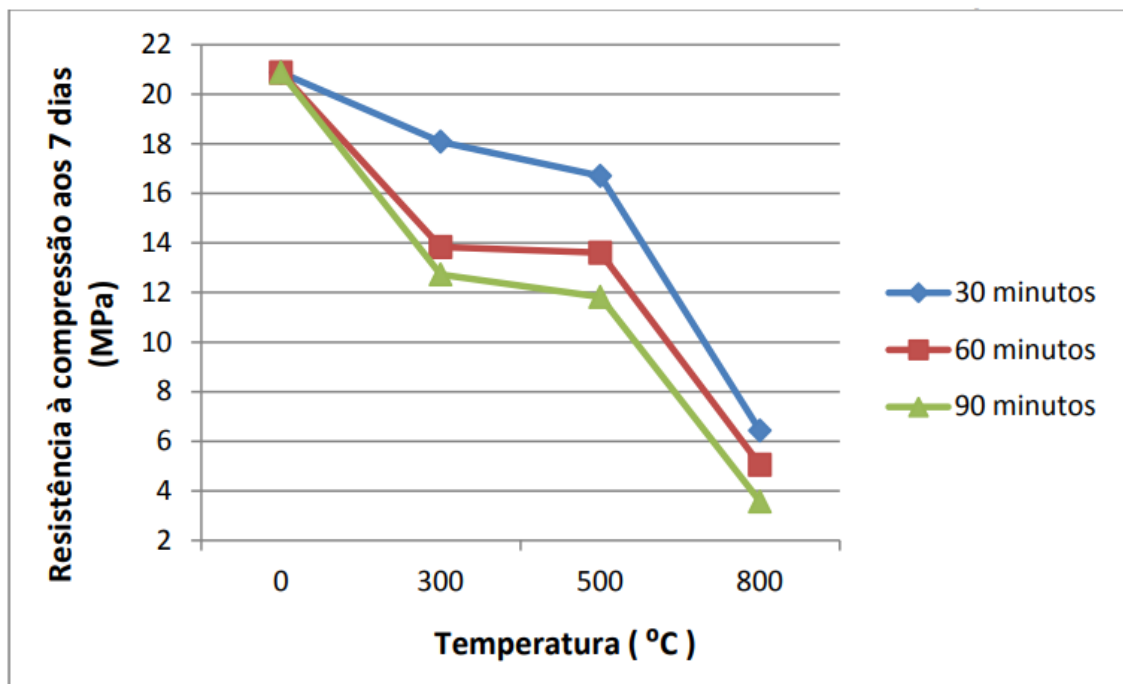
Figura 2 - Influência da temperatura de exposição no módulo de elasticidade do concreto, média dos valores obtidos.



Fonte: Extraído de Lima (2005).

Já Lorenzon (2014), que analisou corpos cilíndricos de diâmetro 10 cm e altura 30 cm, planejados para 25 Mpa, expostos a 300°C, 500°C e 800°C por 30, 60 e 90 minutos, concluiu que o tempo de exposição a tais condições tem grande influência na queda destes parâmetros ao mostrar uma perda de resistência de aproximadamente 15% diante de exposição de 30 minutos para temperaturas de 300° C, 30% para 60 minutos e 40% para 90 minutos, ou seja, perdas significativas mesmo antes de atingir a marca dos 400°C (Figura 3).

Figura 3 - Influência do tempo de exposição à diferentes gradientes de temperatura no concreto.



Fonte: Extraído de Lorenzon (2014).

Tais diferenças de conclusões podem ser atribuídas às distintas características intrínsecas entre os concretos estudados por cada autor. Por exemplo, a relação água/cimento interfere na porosidade do material, o que, por sua vez interfere na condutividade térmica do mesmo e seu comportamento quando submetido a diferentes temperaturas. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em estudo também experimental, Bodnarova (2013) constata que corpos de prova expostos a diferentes temperaturas (200°, 400°, 600° e 900°) apresentam perdas de massa e de resistência à compressão a medida que são condicionados a temperaturas maiores, sendo que em seu último estágio apresentam tais quedas de resistência superiores a 75%. Este estudo é condizente com o encontrado por Kodur em 2003.

Estruturas de concreto, mesmo com fibras de aço, também demonstram perdas de resistência à compressão a partir de 400°C em cerca de 40% e chegando a 64% a 600°C, porém a 200°C a perda de resistência é praticamente insignificante. (SADRMOMTAZI, 2020). Este autor também observa a redução de velocidade do pulso ultrassônico nessas condições.

Kakae (2017) mostra em seu estudo que corpos de prova de concreto não recobram suas propriedades após o resfriamento, sendo assim os danos causados pela temperatura (até 700°C) são permanentes e as medidas são residuais. Segundo o mesmo autor, existem perdas de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Fernandes (2018) desenvolveu um estudo de modelagem computacional no qual afirma que estruturas de concreto possuem boa resistência ao incêndio devido à baixa condutividade térmica e capacidade de combustão. Contudo, diante do aumento da temperatura, a resistência característica e o módulo de elasticidade são reduzidos e, conseqüentemente, ocorre perda de rigidez da estrutura.

Assis (2019), em estudo também usando modelagem computacional, observa que a resistência a compressão e o módulo de elasticidade sofrem quedas após exposição a altas temperaturas. Além disso, a autora faz uma relação entre dano sofrido do material com sua perda do módulo de elasticidade, e estabelece uma linearidade entre tais ocorrências. Evidencia também a perda desse módulo, sendo maior em regiões mais expostas a elevadas temperaturas, que, no caso de corpos de prova, seriam as superfícies.

Em estudo visando observar a aparência do concreto após ser expostos a temperaturas elevadas (até 1000°), Hager (2014) conclui que, a partir de 500°C, é possível observar pequenas fissuras no material e é perceptível a mudança na coloração do corpo de prova, o que se acentua a partir de 550°C devido a reações químicas.

O concreto pode ser originado de variadas proporções entre os materiais, assim como diferentes fontes e características desses elementos podem apresentar inúmeras variações de composições, e, para o desenvolvimento deste trabalho, é fundamental a consideração desses conceitos, uma vez que a composição do concreto, desde a pasta de cimento aos seus agregados, é de componentes que sofrem alterações quando expostos ao calor.

As alterações observadas nas propriedades do concreto devem-se a aspectos relacionados à microestrutura do material. Os constituintes do concreto, pasta de cimento e agregado possuem componentes que se decompõem com o calor. A permeabilidade do concreto, o tamanho do elemento e a taxa de aumento da temperatura influenciam o desenvolvimento de pressões internas geradas pelos produtos de decomposição gasosa. Atualmente, o desenvolvimento de concreto de alto desempenho, que tem baixíssima

porosidade e permeabilidade, favorece a geração de altas pressões no material, quando exposto a um incêndio (VYDRA, 2001).

A permeabilidade do concreto mede a facilidade deste material poroso em transferir fluidos sob gradientes de pressão, sendo, portanto, necessária a compreensão de que a maior permeabilidade do material acarreta em maiores áreas para alívio de pressão interna, diminuindo as perdas de resistividades.

O fluxo de fluido ocorre através de uma rede porosa que compreende a porosidade inicial do material e as fissuras induzidas por solicitações termomecânicas. A fissuração e o crescimento da porosidade, geralmente, interconectam os canais de fluxo, resultando no aumento da permeabilidade (FERREIRA, 2011). Para isso, deve-se considerar a umidade inicial e a taxa de crescimento da temperatura, uma vez que pressões internas dos produtos gasosos de decomposição, assim como a umidade presente na peça, exercem pressões internas.

Outro fator que determina a permeabilidade de um sólido é o tamanho e a continuidade dos poros na microestrutura do sólido. Resistência e permeabilidade estão estreitamente relacionadas à porosidade capilar ou à relação sólido/espço.

Alguns fenômenos importantes, relacionados à exposição a temperaturas elevadas, são observados na pasta de cimento, e ajudam na compreensão dos efeitos sobre o concreto. Segundo Komonen e Penttala (2003), para a pasta comum, observa-se um aumento do tamanho dos poros, devido à evaporação da água, para temperaturas a 50°C. Com o aumento da temperatura até 100°C, ocorre a formação de um gradiente de temperatura grande o suficiente para modificar a estrutura porosa.

Esse efeito pode ser causado pela expansão e decomposição da etringita, composto formado inicialmente da hidratação e que pode expandir em contato com a água gerada pelo aquecimento. Com o fim da secagem da pasta de cimento, seus componentes sofrem decomposição, causando mudanças na porosidade. Diante de temperaturas superiores a 400°C, o tamanho dos poros aumenta rapidamente devido à decomposição do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂); A 600°C, um novo crescimento ocorre, podendo ser causado pela porosidade do CaO formado durante a desidratação do hidróxido de cálcio. A porosidade da pasta de cimento permanece em expansão em temperaturas ainda mais altas.

Visando contribuir para a aquisição de conhecimentos nesta área de estudo tão relevante para os avanços da Engenharia, o presente trabalho consiste no desenvolvimento de um programa experimental em que serão analisados concretos convencionais, concretos de alto desempenho e concretos com substituição parcial de agregado miúdo por vermiculita. Os diferentes materiais serão expostos a temperaturas elevadas, em condições de laboratório, e a

evolução as propriedades mecânicas – módulo de elasticidade e resistência à compressão – será medida a diferentes níveis de temperatura.

Nas próximas seções, serão apresentadas informações sobre os tipos de concretos tratados neste estudo e seus paralelos com o concreto convencional.

2.1 CONCRETO CONVENCIONAL E CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O conceito de CAD é variado entre diferentes centros de pesquisa. Segundo Liborio (2002), “é um material desenvolvido cientificamente visando a atender exigências requeridas pelo proprietário ou usuário, do ponto de vista estético, estrutural, prático, portanto a trabalhabilidade se faz importante, e principalmente a durabilidade”.

De acordo com Almeida (2005), a constituição desse tipo de concreto nada mais é do que a evolução tecnológica dos concretos tradicionais: brita, areia, cimento e água, aos quais são incorporados alguns aditivos químicos e adições minerais.

Na composição do concreto, a aderência agregado-pasta de cimento exerce um papel importante para a interação entre os dois componentes. Assim, a forma e textura superficial do agregado são fatores relevantes no comportamento mecânico (TUTIKIAN, 2008).

Tais afirmações remetem aos estudos de GRATTAN-BELLEW (1996), os quais afirmam que a seleção dos agregados, principalmente os graúdos, deve ser feita com cuidado, pois, diante do aumento da resistência dos concretos, a fase agregado começa a ser a mais parte mais frágil da mistura, limitando, diversas vezes, a resistência final do compósito – sendo que esse resultado ocorre devido ao fato de a composição de 70% do concreto ser de agregados.

O uso de agregados basálticos é difundido pelo mundo, por possuir alta resistência à abrasão e menor porosidade que agregados gnáissicos seu emprego em concretos visando melhores propriedades é recomendado (AL-BAIJAT, 2008).

Para a obtenção do CAD, busca-se o aumento de densidade do conjunto – portanto, para que o objetivo seja atingido é necessária a diminuição da proporção entre água e cimento empregados, auxiliada por aditivos plastificantes ou, de preferência, superplastificantes, adições minerais, assim como a escolha de agregados com granulometria ótima, compostos de granulometria adequada para os finos e agregados graúdos de menor diâmetro máximo (ISAIA, 2011).

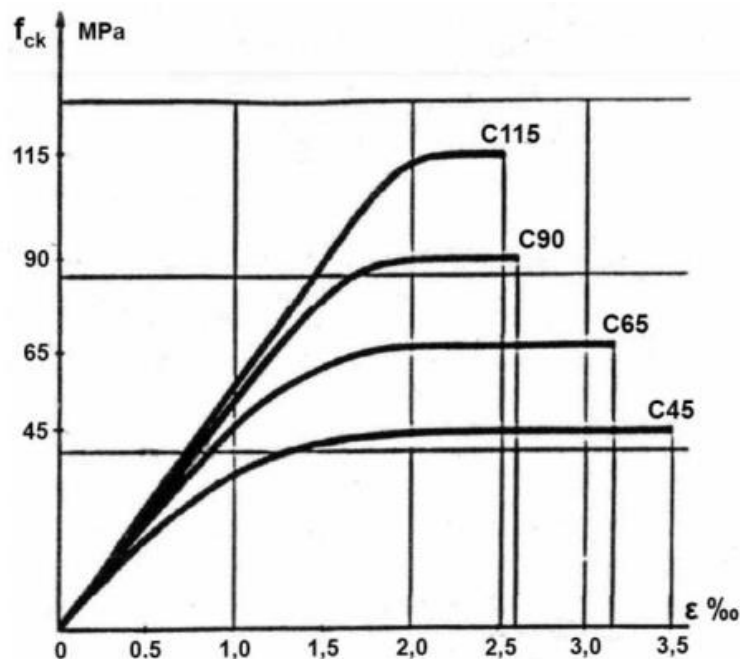
Isaia (2011) determina, ainda, que essas ações tendem à criação de microestrutura com poros de menor tamanho (refinamento das dimensões), diminuição da interconexão entre os poros (bloqueio dos canais), maior oposição à passagem de fluidos e maior aderência entre

partículas. O resultado final dessas ações simultâneas é traduzido no aumento da compacidade, da resistência mecânica, da durabilidade e, por conseguinte, do desempenho.

Uma adição mineral amplamente empregada na produção de concretos de alto desempenho é a sílica ativa. Tal material é um subproduto da indústria siderúrgica de produção de ligas de silício, e consiste em partículas de sílica amorfa esféricas e finamente divididas com diâmetro médio de 0.1µm. Essas características lhe dão a capacidade de proporcionar melhor empacotamento das partículas de cimento, aumentando a densidade final do produto, além de alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland (BARATA, 1998).

A compacidade do material pode inferir em menor módulo de elasticidade, como mostrado na Figura 4:

Figura 4 - Curvas tensão-deformação de CAD conforme norma norueguesa.



Fonte: Extraído de Isaía *et al.* (2011).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a presença de sílica ativa proporciona menor tendência à exsudação e segregação do material, atribuindo esse fato à finura das partículas que segmentam os canais de fluxo de água interno e aumentam o contato sólido-sólido.

O uso da sílica ativa é um modo confiável de se produzir concretos com níveis de resistência superiores a 80 MPa. (NEVILLE; AICTIN, 1998). A eficiência do seu uso depende de fatores como teor e forma de incorporação, relação água/cimento, tipo e dosagem de superplastificantes e condição e tempo de cura. (ISAIA, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A adição de S.A à massa de cimento não prejudica a resistência inicial e acarreta em significativo aumento da resistência à compressão entre o terceiro e vigésimo oitavo dia de cura úmida (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto endurecido é incombustível, não exala gases tóxicos e, por isso, os produtos da combustão não são prejudiciais à saúde humana, além de ser um mal condutor de calor (baixa condutividade térmica a temperatura ambiente) em relação aos metais. Ademais, os elementos estruturais de concreto apresentam uma elevada massividade se comparados aos elementos metálicos, de modo que a união dessas características confere ao cimento uma boa resistência ao fogo (CENTURIONE *et al.*, 2003).

Isaia *et al* (2011) afirma que, no meio técnico, prevalece a teoria de que as altas temperaturas são mais perigosas em Concreto de Alto Desempenho (CAD) do que em Concreto Convencional (CC), devido, principalmente, ao deslocamento que ocorre entre as camadas externas, aquecidas, e as internas, ainda resfriadas, por causa da eficiência térmica dos concretos. No CAD, por se tratar de material mais denso, o fenômeno, conhecido como *spalling*, seria agravado. Em contrapartida, no CAD, as resistências à tração do material tendem a ser superiores às do CC, que poderia absorver melhor tais solicitações. O mesmo autor conclui que efeito de altas temperaturas em concretos, de um modo geral, é prejudicial (principalmente a partir dos 300°C, mas que não é possível afirmar que o CAD possua comportamento distinto do CC diante de um incêndio).

2.1.1 Fenômeno de *Spalling*

Lima (p. 109, 2005), em sua pesquisa, conclui que “a compactidade do concreto é uma característica determinante para a ocorrência de deslocamentos explosivos (*spalling*), visto que este fenômeno só ocorreu em concretos de alta resistência”.

A Figura 5 mostra um bloco de concreto convencional deteriorado após o *spalling* ocasionado pela exposição a 750°C.

Figura 5 - Efeito de *spalling* visível.



Fonte: Extraído de Ferreira (2011).

Anderberg (1997) sintetiza suas hipóteses de possíveis causas do *spalling* em:

- a) Macroestrutura;
- b) Água livre em excesso (concretos saturados);
- c) Alta densidade (compacidade);
- d) Elevados gradientes térmicos;
- e) Distribuição não-uniforme de temperatura nas peças;
- f) Secções transversais delgadas;
- g) Altas taxas de armadura;
- h) Microestrutura;
- i) Pressão de vapor;
- j) Tensões térmicas;
- k) Transformações mineralógicas dos agregados.

Antes que ocorra o *spalling*, o concreto passa pelas seguintes fases, explicadas por Dal Pont e Ehlacher (2004), diante do aquecimento:

- a) Logo que se tem início o aquecimento, observa-se um aumento da temperatura na superfície aquecida. A umidade dentro do concreto, sob forma de água líquida e de vapor, se desloca em direção à zona fria do concreto por difusão;

- b) Quando a temperatura atinge 100°C, tem início a ebulição da água. O vapor se desloca para as zonas frias: pode-se observar a condensação. O calor latente requerido para a ebulição da água retarda o aumento da temperatura até a completa ebulição da água na porção de interesse do concreto;
- c) Simultaneamente ao descrito anteriormente, o vapor que condensa na zona fria pode se ligar ao cimento não hidratado, levando a uma nova hidratação. Nesta fase, a formação de novos CSH promove, em geral, a melhora das propriedades mecânicas do concreto;
- d) O aumento da temperatura provoca também o fenômeno da desidratação. A partir da temperatura de 105°C, as ligações químicas que formam o CSH começam a se destruir, transformando os produtos hidratados em produtos anidros e água. A água livre que é liberada no concreto vaporiza, absorvendo calor. A reação de desidratação atinge progressivamente os vários produtos hidratados que formam o concreto, de acordo com a temperatura alcançada: a partir do momento em que a temperatura aumenta, obtém-se pouco a pouco mais água livre no concreto e mais água que se vaporiza. A vaporização, sendo uma reação endotérmica, influencia o aquecimento do concreto ao retardar a propagação do calor;
- e) A água livre possui tendência de se deslocar para as zonas frias do concreto. Como o concreto – e, particularmente, o concreto de alto desempenho (CAD) – tem uma permeabilidade baixa, a água líquida e o vapor d'água não podem penetrar com rapidez nas zonas frias. Além disso, a formação de água após a desidratação é mais veloz do que a fuga da água e do vapor. O resultado da combinação desses dois efeitos é que a pressão nos poros aumenta e pode chegar a valores da ordem de algumas atmosferas. Observa-se também que o pico de pressão se desloca em direção ao lado frio do concreto, aumentando progressivamente seu valor. O aumento da pressão do gás nos poros do concreto é também a base do fenômeno do *spalling*, que causa o descolamento da camada externa do material.

2.2 CONCRETOS LEVES E ADIÇÃO DE VERMICULITA

Segundo Morales (2011), o concreto leve tende a sofrer menores danos quando exposto a elevados gradientes de temperatura, uma vez que sua condução térmica é menor e, quanto maior a permeabilidade, menor serão os riscos de explosões superficiais (*spalling*).

Narayanan e Ramamurthy (2000) mostram que concreto aerado possui uma estrutura mais homogênea se comparado ao concreto comum, além da condutividade e difusividade térmicas mais baixas. Além disso, a transferência de calor por radiação é inversamente proporcional à camada de ar (formada pela quantidade de vazios) dentro do meio. Essas propriedades fazem com que o concreto aerado sem adições seja mais resistente ao incêndio que o concreto de densidade normal.

Em seu estudo de argamassas com substituição de agregado por vermiculita, Dias *et al* (2019) afirma que, quando submetido a elevadas temperaturas, o material com a presença de vermiculita apresenta maior resistência mecânica residual, e a nível de segurança contra incêndio, mostra características funcionais de compartimentação de calor e de proteção passiva. Apesar de demonstrar menores valores de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, tal material exibe menor perda relativa com o aumento de temperatura.

A Figura 6 apresenta valores de algumas propriedades térmicas, comparando concretos com agregados leves com os que contêm agregados convencionais.

Figura 6 - Propriedades térmicas dos concretos com agregados leves e agregados convencionais.

| Propriedades | Concreto com agregados leves | Concreto com agregados convencionais |
|---|------------------------------|--------------------------------------|
| Massa específica (kg/m^3) | 1850 | 2400 |
| Resistência à compressão (MPa) | 20 - 50 | 20 - 70 |
| Calor específico ($\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$) | 0,23 | 0,22 |
| Condutividade térmica ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{K}$) | 0,58 - 0,86 | 1,4 - 2,9 |
| Difusão térmica (m^2/h) | 0,0015 | 0,0025 - 0,0079 |
| Expansão térmica ($10^{-6}/^\circ\text{C}$) | 9 | 11 |

Fonte: Holm; Bremner (2000), apud Angelin (2014).

Segundo Ugarte (2008), pode-se misturar vermiculita com cimento Portland para que se obtenha um concreto leve, detentor de alta porosidade e resistência à compressão que pode chegar a níveis satisfatórios, alcançando destaque positivo por, além disso, possuir baixa condutividade térmica.

De acordo com Reis (2002), a vermiculita é um mineral com inúmeras aplicações na construção civil, indústria de manufaturados, agricultura, horticultura e meio ambiente. Mais especificamente, pode atuar como isolante térmico, concreto leve e isolante de som, painéis e divisórias, portais a prova de fogo, agricultura hidropônica, condicionador de solos, fertilizantes, pesticidas e absorvedor de óleo, graxas e metais pesados.

A vermiculita é detentora de características peculiares, uma vez que é um material não abrasivo, inodoro, de PH essencialmente neutro, que não se decompõe e possui propriedades isolantes térmicas devido à alta temperatura de sinterização. Uma vez expandida, apresenta baixa densidade, características de isolante acústico, alta absorção de líquidos e elevada área superficial, o que lhe confere grande variedade de aplicações na construção civil – principalmente em edificações residenciais (CHAMBI; PERALTA, 2009).

Silva (2014) diz que a utilização o emprego da vermiculita na construção civil se dá quando essa se encontra em forma expandida, após ser submetida a temperaturas entre 800 e 1100°. Nesse sentido, cabe dizer que a vermiculita expandida é um mineral formado de ferro, alumínio, magnésio hidratado e lamelar e que, quando submetido a elevadas temperaturas, sofre expansão, transformando-o em flocos com ar aprisionado, dando-lhe a característica de ser termo acústico (BARROS, 2018).

O concreto produzido com substituição de areia por vermiculita expandida demonstra menor absorção de calor em relação ao concreto convencional. Nesse sentido, Silva (2014), em seu estudo, mostra que as substituições parciais de 25%, 50% e 75% de areia natural por vermiculita resultam em materiais que podem ser empregados como isolantes térmicos, devido à essa baixa absorção de calor.

A aplicação do agregado leve vermiculita na construção civil se dá com as principais finalidades da composição de concreto leve para prover isolamento térmico em lajes e paredes, proteção de impermeabilização em lajes de cobertura, aplicação como enxerto de divisórias e portas corta-fogo, forro decorativo e acústico, dentre outras funções. Esse isolamento térmico é possível devido à presença de ar na vermiculita em sua forma expandida, o que contribui para alcançarmos um melhor conforto térmico no interior das edificações (SANTOS, 2017).

Rossignolo (2009) mostra que o material também apresenta relevância econômica ao realçar seu uso em estruturas de grande porte, em que a redução para o peso próprio da construção diminuiria as solicitações, e, assim, demandando menor quantidade de armadura.

Deve-se, ademais, atentar para algumas alterações nas propriedades do concreto feito com substituição por agregados leves, sendo as mais significativas a trabalhabilidade, a resistência mecânica e o módulo de deformação, além da redução da condutividade térmica e da espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento. (ANGELIN, 2014).

Rossignolo (2009) explica a alteração da trabalhabilidade afirmando que tendo a absorção de água dos agregados grande influência na manutenção da trabalhabilidade, a faixa dos valores de abatimento dos concretos leves é, normalmente, menor que a empregada nos concretos convencionais, devido à menor escoamento do concreto contendo agregado leve

pela ação da gravidade. Em geral, o lançamento, a compactação e o acabamento do concreto de agregado leve exigem relativamente menos esforço – dessa forma, concretos leves com abatimento de 80 mm apresentam trabalhabilidade similar aos concretos convencionais com abatimento de 100 mm.

Santos (2018) mostra que a substituição parcial de areia natural por vermiculita, se feita de maneira dosada, leva a perdas de resistência relativamente pequenas, cerca de 6% na resistência à compressão quando a substituição é de 25%, ao passo que, se tal substituição é feita em 50% da areia, a resistência a compressão sofre uma perda de 66% quando comparada ao concreto de referência utilizado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando, principalmente, contribuir para o conhecimento acerca do comportamento do concreto submetido a temperaturas elevadas, foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia da UFJF um programa experimental envolvendo 312 corpos de prova cilíndricos de concreto, confeccionados com três composições distintas.

Na literatura técnica, comumente a degradação do concreto é quantificada por meio da evolução das propriedades mecânicas do material (HELENE, 1997), em particular o módulo de Young (E) e a resistência à compressão (f_c). Além disso, diversos pesquisadores propõem modelos que representam o dano empregando formulações analíticas baseadas em ajustes ou técnicas empíricas baseadas nessas grandezas, como Assis, em 2019, na UFJF. Assim, o presente estudo pretende, também, gerar dados que possam ser empregados na validação de modelos do comportamento do concreto submetido a temperaturas elevadas.

As próximas seções descrevem as composições dos materiais analisados, a caracterização mecânica e física dos componentes e misturas, assim como os métodos e equipamentos empregados no estudo

3.1 COMPONENTES E MISTURAS

Foram confeccionados concretos feitos com três tipos de misturas: concreto convencional (CC); concreto de alto desempenho (CAD) e concreto com substituição parcial da areia por vermiculita (CS).

Para caracterização física dos agregados finos e graúdos, foram obtidas, de acordo com as normas técnicas da ABNT, as seguintes propriedades: módulo de finura, dimensão máxima característica, massa específica real, massa unitária, teor de material pulverulento e absorção de água, além de gerar o gráfico de granulometria.

Empregou-se em todas as misturas deste estudo areia natural proveniente do Rio Preto, no estado de Minas Gerais. Para os traços de 35MPa e 50 MPa foram adotados areia de britagem e agregados graúdos do tipo calcária extraídos da Pedreira Pedra Sul, em Juiz de Fora/MG.

Para os traços de 70 MPa foi empregada a brita 0 de origem basáltica, adquirida de Campinas do estado de São Paulo através da pedreira Quibrita.

Os materiais usados são ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Materiais usados no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Descrevem-se a seguir os métodos de ensaio adotados para a obtenção das características físicas dos materiais utilizados na confecção dos concretos em estudo.

3.1.1 Ensaios de granulometria

A granulometria é um aspecto importante do agregado, isso se deve a sua grande influência na qualidade das argamassas e concretos, especialmente na compacidade, trabalhabilidade e resistência a esforços mecânicos (METHA; MONTEIRO, 2014). Os ensaios de granulometria foram executados seguindo a metodologia descrita pela NBR NM 248 da ABNT (2003), sendo possível, assim, deduzir a tabela granulométrica de cada material e sua classificação.

O mesmo ensaio fornece também a Dimensão Máxima Característica e Módulo de Finura, cujas definições constam na NBR 7211 da ABNT (2019), como: dimensão máxima característica a “grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa”. O módulo de finura é definido como “a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100”.

3.1.2 Massa específica

Para estudo de Massa Específica foi usado como base para agregados a NBR NM 52 da ABNT (2009) – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.

De acordo com Metha e Monteiro (2014), tal parâmetro é diretamente relacionado com a porosidade do agregado, e Neville (2016) enfatiza que o conhecimento de tal valor é necessário para a dosagem correta da mistura, uma vez que o volume de concreto produzido é influenciado diretamente pela massa específica do agregado utilizado.

3.1.3 Massa unitária

Considerando que não é possível compactar as partículas de uma mistura de modo a remover todos os vazios entre as partículas, faz-se necessário saber o volume ocupado tanto pelos agregados como por tais espaços vazios (METHA; MONTEIRO, 2014). Neville (2016) ainda diz que tal valor serve como parâmetro para transformar massa em volume ou vice-versa no cálculo de dosagem. Para determinação da massa unitária de todos os agregados, adotou-se o disposto na NBR 45 da ABNT (2006) – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

3.1.4 Teor de material pulverulento

A ABNT NBR 16973:2021 – Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem, foi usada para determinação de Material Pulverulento para todos os agregados. O conhecimento da quantidade de material com partículas minerais de dimensão inferior a 0,0075mm se faz crucial, pois o excesso desse material é prejudicial para a aderência entre agregados e a pasta de cimento, além de aumentar o consumo de água para uma mistura de mesma consistência (devido a maior superfície de contato das partículas), o que, por sua vez, prejudica diretamente a resistência mecânica e trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 2016).

De acordo com a NBR 7211 da ABNT (2019), o teor de finos de agregados empregados em concretos sujeitos a desgaste superficial não deve ser maior que 3%. Por se tratar de um estudo de viabilidade do uso do material final, tal fato deve ser considerado. Contudo, a mesma norma estabelece que, se o material pulverulento for oriundo de britagem, o limite de 3% pode ser alterado, desde que seja comprovado que o uso do agregado não prejudica as propriedades do concreto.

A Figura 8, abaixo, mostra os materiais após secagem em estufa em processo de resfriamento.

Figura 8 - Materiais resfriando após secos em estufa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, apresentam-se as propriedades medidas em cada um dos componentes dos concretos.

3.1.5 Cimento

O cimento usado neste estudo é do tipo Portland CPV ARI Plus, fabricado pela Holcim do Brasil S.A., na cidade de Barroso/MG, com resistência à compressão mínima aos 28 dias de idade de 51 MPa. Sua escolha é fundamentada em se tratar de um concreto considerado mais puro e portanto tende-se a obter melhores resultados em pesquisa contendo comparativos.

Para a caracterização do produto empregado, são apresentadas a análise física e química fornecidas pelo fabricante:

a) análise física:

- finura (superfície específica) (NBR 16372:2015) = $5155 \text{ cm}^2/\text{g}$;
- finura (resíduo na peneira #400) = 1,2%;
- tempo de Início de Pega (NBR NM 65/2003): 158 minutos;
- expansibilidade a quente (NBR 11582:2016) = 0 mm;
- resistência à compressão para as seguintes idades (NBR 7215/2019):
 - 1 Dia = 28,9 MPa;
 - 3 Dias = 38,8 MPa;

- 7 Dias = 44,6 MPa;
- 28 Dias = 51,4 MPa.

b) análise química:

- resíduo insolúvel = 0,73%;
- perda ao fogo (1000°C) = 2,45%;
- perda ao fogo (500°C) = 0,87%;
- óxido de alumínio, Al_2O_3 = 4,95%;
- dióxido de silício, SiO_2 = 21,07%;
- óxido de ferro, Fe_2O_3 = 2,86%;
- óxido de cálcio, CaO = 63,37%;
- óxido de magnésio, MgO = 3,43 %;
- óxido sulfúrico, SO_3 = 1,50%;
- dióxido de carbono, CO_2 = 0%;
- óxido de potássio, K_2O = 0,89%.

3.1.6 Areia natural

Os dados referentes à areia natural se encontram na Tabela 1:

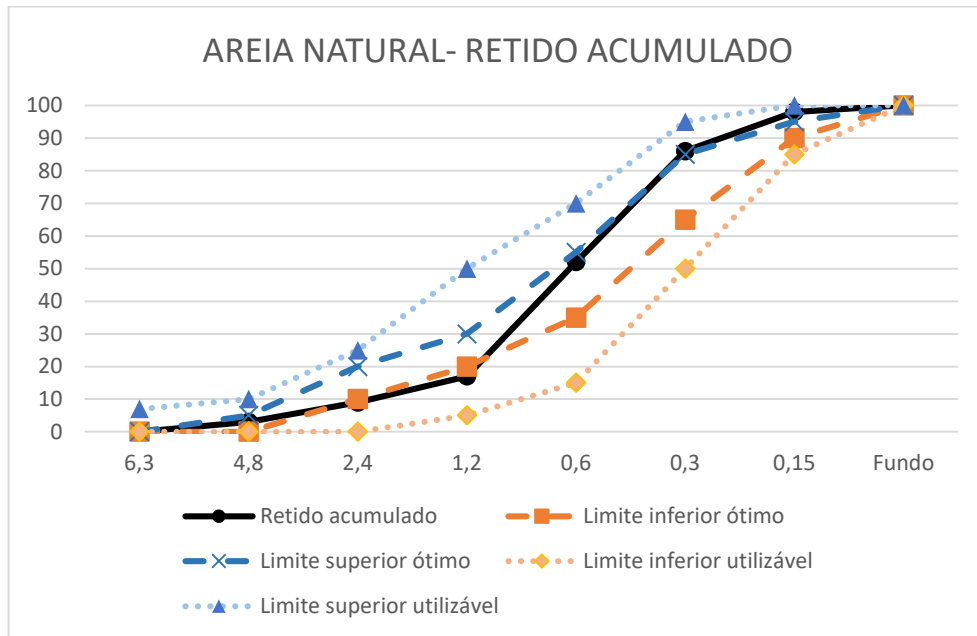
Tabela 1 - Caracterização da areia natural.

| AREIA NATURAL | | |
|--|----------|-------------|
| Análise Granulométrica (NBR NM 248:2003) | | |
| Peneiras (mm) | % Retida | % Acumulada |
| 4,8 | 2,88 | 3 |
| 2,4 | 5,74 | 9 |
| 1,2 | 8,74 | 17 |
| 0,6 | 34,26 | 52 |
| 0,3 | 34,03 | 86 |
| 0,15 | 12,28 | 98 |
| Fundo | 2,06 | 100 |
| Módulo de Finura | 2,64 | |
| Dimensão Máxima Característica (mm) | 4,80 | |
| Massa Específica Real (g/cm ³) (NBR NM 52/2009) | 2,597 | |
| Massa Unitária (g/cm ³) (NBR NM 45:2006) | 1,526 | |
| Teor de Material Pulverulento (%) (NBR NM 46:2003) | 1,92 | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 1 mostra a curva de distribuição granulométrica da areia natural adotada, confrontada com os limites inferior e superior ótimos e os limites inferior e superior utilizáveis, que foram estabelecidos pela NBR 7211 da ABNT (2019). Pode-se observar que o material usado no estudo se encontra completamente dentro dos limites utilizáveis e próximos ou dentro da considerada zona ótima.

Gráfico 1 - Granulometria da areia natural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.7 Areia de britagem

Almeida (2005) afirma que o uso da areia de britagem só traz benefícios ao meio ambiente, pois os resíduos gerados da britagem de rochas para a produção de agregados ao concreto – finos de pedra – são raramente utilizados, constituindo-se em um problema ecológico devido à dispersão destes pelo vento e pelas águas. Além disso, ressalta-se a importância econômica, pois, ao se considerar a exploração crescente das jazidas de areia natural, vê-se que tal recurso tem se esgotado em algumas regiões, tornando necessária a busca de areia natural em locais mais afastados, o que, conseqüentemente, resulta não só na elevação do custo deste material, como também na poluição do meio ambiente também devido ao transporte.

Os dados referentes a areia de britagem se encontram na Tabela 2:

Tabela 2 - Caracterização areia de britagem.

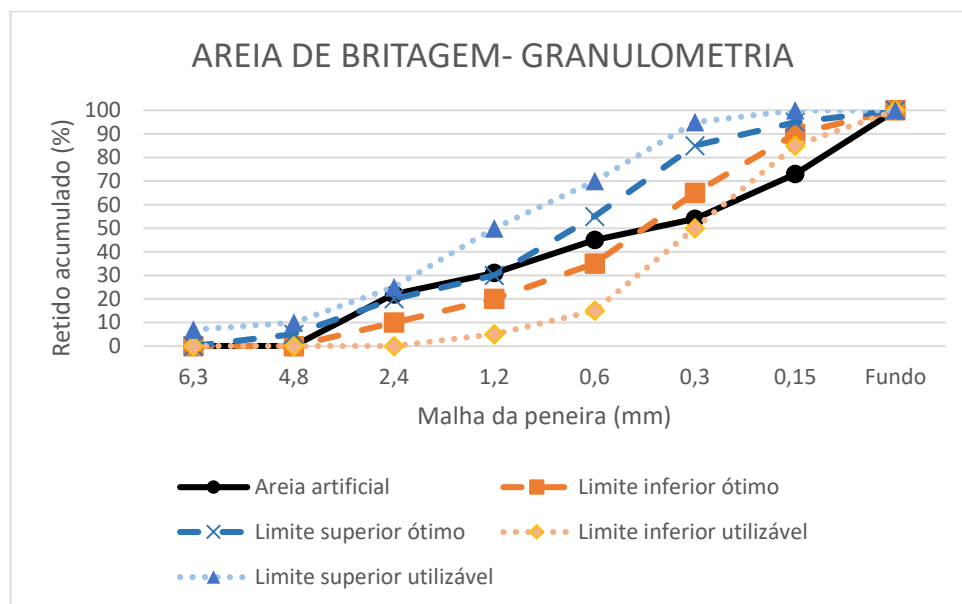
| AREIA ARTIFICIAL | | |
|-------------------------------|----------|-------------|
| Análise Granulométrica | | |
| (NBR NM 248:2003) | | |
| Peneiras (mm) | % Retida | % Acumulada |
| 4,8 | 0,00 | 0 |
| 2,4 | 21,96 | 22 |
| 1,2 | 8,98 | 31 |

| | | |
|--|-------|-----|
| 0,6 | 13,98 | 45 |
| 0,3 | 9,57 | 54 |
| 0,15 | 18,73 | 73 |
| Fundo | 26,78 | 100 |
| Módulo de Finura | 2,26 | |
| Dimensão Máxima Característica (mm) | 4,80 | |
| Massa Específica Real (g/cm ³) (NBR NM 52/2009) | 2,725 | |
| Massa Unitária (g/cm ³) (NBR NM 45:2006) | 1,777 | |
| Teor de Material Pulverulento (%) (NBR NM 46:2003) | 20,02 | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O material usado no estudo se encontra em sua maior parte dentro da zona utilizável, porém apresenta um teor de finos maior que o desejado, como apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Granulometria da areia de britagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo como respaldo a norma NBR 7211 da ABNT (2019) o uso de tal material é justificado desde que se alcancem as propriedades pretendidas para o concreto e este teor maior é usual em concretos de resistência elevado por proporcionar o efeito *filler*.

3.1.8 Agregados graúdos

A brita constitui o maior volume do concreto, tendo como funções: contribuir com grãos capazes de resistir aos esforços solicitantes, resistir ao desgaste à ação de intempéries, reduzir as variações de volume de qualquer natureza e contribuir para a redução do custo do concreto. Para tal é necessário que o material ofereça resistência à compressão simples e à tração, não seja reativo, e tenha resistência ao intemperismo; (Silva, 2016).

Os dados referentes à britas 0 e 1 se encontram nas Tabelas 3 e 4, e as curvas granulométricas são apresentadas no Gráfico 3:

Tabela 3 - Caracterização brita 0.

| BRITA 0 | | |
|--|----------------|-------------|
| Análise Granulométrica | | |
| (NBR NM 248:2003) | | |
| | BRITA 0 | |
| Peneiras (mm) | % Retida | % Acumulada |
| 19 | - | - |
| 12,5 | - | - |
| 9,5 | 9,96 | 10 |
| 6,3 | 58,97 | 69 |
| 4,8 | 26,51 | 95 |
| 2,4 | 4,33 | 100 |
| 1,2 | 0,00 | 100 |
| 0,6 | 0,00 | 100 |
| 0,3 | 0,00 | 100 |
| 0,15 | 0,00 | 100 |
| Fundo | 0,23 | 100 |
| Módulo de Finura | 6,04 | |
| Dimensão Máxima Característica (mm) | 9,50 | |
| Massa Específica Real (g/cm ³) (NBR NM 52/2009) | 2,789 | |
| Massa Unitária (g/cm ³) (NBR NM 45:2006) | 1,428 | |
| Teor de Material Pulverulento (%) (NBR NM 46:2003) | 0,25 | |
| Absorção (%) (NBR NM 53:2009) | 0,6 | |

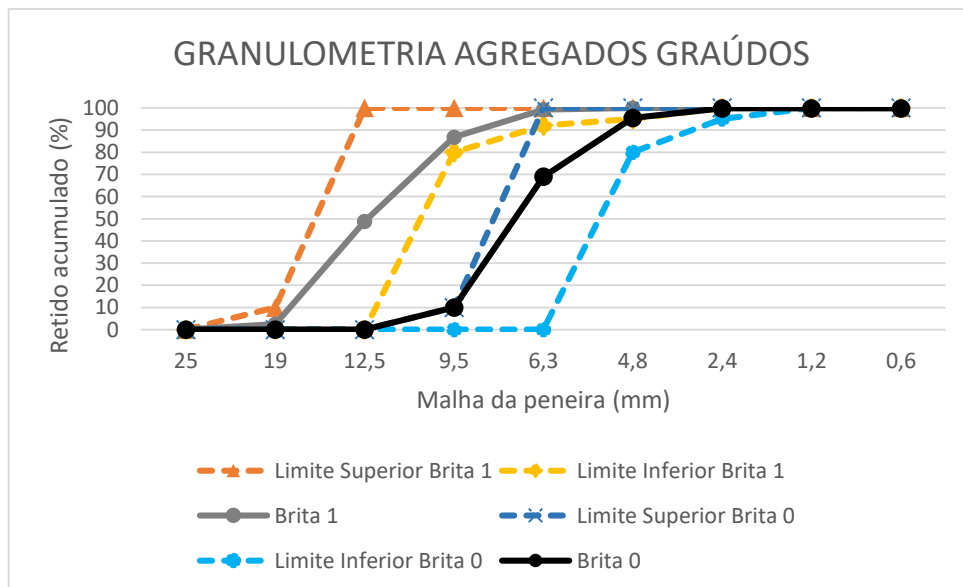
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Caracterização brita 1.

| BRITA 1 | | |
|--|----------|-------------|
| Análise Granulométrica (NBR NM 248:2003) | | |
| Peneiras (mm) | % Retida | % Acumulada |
| 19 | 2,48 | 2 |
| 12,5 | 46,30 | 49 |
| 9,5 | 37,98 | 87 |
| 6,3 | 12,41 | 99 |
| 4,8 | 0,71 | 100 |
| 2,4 | 0,00 | 100 |
| 1,2 | 0,00 | 100 |
| 0,6 | 0,00 | 100 |
| 0,3 | 0,00 | 100 |
| 0,15 | 0,00 | 100 |
| Fundo | 0,12 | 100 |
| Módulo de Finura | 6,89 | |
| Dimensão Máxima Característica (mm) | 19,00 | |
| Massa Específica Real (g/cm ³) (NBR NM 52/2009) | 2,797 | |
| Massa Unitária (g/cm ³) (NBR NM 45:2006) | 1,522 | |
| Teor de Material Pulverulento (%) (NBR NM 46:2003) | 0,30 | |
| Absorção (%) (NBR NM 53:2009) | 0,5 | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 - Granulometria dos agregados graúdos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo o estabelecido pela norma NBR 7211 da ABNT (2019), é observado que os materiais analisados se encontram totalmente entre os limites determinados, sendo assim classificados como brita 0 e 1.

3.1.9 Vermiculita

O concreto com substituição de areia por vermiculita expandida tem a tendência a menor massa específica devido à sua elevada porosidade, o que também acarreta em propriedades isolantes, tanto térmicas como acústicas. (FRANÇA, 2016).

O material foi adquirido da marca Vermiculita do Brasil, tipo Padrão Izo-Flok. O fabricante informa as propriedades físicas e químicas listadas abaixo:

a) análise física e química:

- Estado físico: sólido granulado;
- pH: neutro;
- ponto de fusão: 1350°C;
- densidade: 80 a 130 kg/m³;
- composição: Silicato Hidratado de Alumínio, Magnésio, Ferro, Cálcio, Potássio;
- não combustível.

3.1.10 Sílica ativa

Uma adição mineral amplamente empregada na produção de concretos de alto desempenho. É um subproduto da indústria siderúrgica de produção de ligas de silício, consistindo em partículas de sílica amorfa esféricas e finamente divididas com diâmetro médio de 0.1µm. Tais características lhe dão a capacidade de proporcionar melhor empacotamento das partículas de cimento, aumentando a densidade final do produto, além de alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento Portland (BARATA, 1998).

3.1.11 Aditivo

Para que se tenha um ganho de trabalhabilidade do concreto sem que seja necessário o crescimento excessivo do fator água/cimento utiliza-se um aditivo plastificante de pega normal – no caso deste trabalho, o SikaMentRM-300 e o aditivo superplastificante, também de pega normal, Sika Viscocrete 3535 CB.

3.1.12 Água

Tanto a água usada na fabricação dos corpos de prova de concreto, quanto a usada na cura dos mesmos é oriunda da rede pública de abastecimento, administrada pela Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora/MG – CESAMA.

3.2 DOSAGEM

A proporção dos materiais empregados no experimento tem elevadíssima influência sobre o resultado final, sendo assim é necessário que seja considerada para o trabalho a razão água/cimento, e a razão cimento/agregados, sendo estes parcialmente substituídos por vermiculita para a confecção do concreto leve.

A elaboração da dosagem leva em conta também a determinação de um valor de massa específica real para o concreto leve baseado nas definições da NBR 8953 (ABNT, 2015), que o classifica como concreto leve, com valores inferiores a 2000 kg/m³.

A definição de traço pode ser dada como proporção de materiais a serem misturados, em relação à quantidade de cimento, este pode ser expresso em massa ou volume.

É adotada para o presente trabalho a substituição de 25% do volume de areia por vermiculita para a fabricação de concreto com substituição para os ensaios, em relação aos concretos de referência.

As dosagens utilizadas são apresentadas, em massa, nas Tabelas 5 e 6, seguindo a nomenclatura adotada para cada concreto neste trabalho, com sua classe mostrando a resistência de projeto para temperatura ambiente - 35, 50 e 70Mpa. O concreto referência é representado pela sigla CRXX em que R indica “referencia” e XX a resistência de projeto, em MPa. De modo análogo, o concreto com vermiculita é identificado por CSXX, tendo S para representar a substituição parcial da areia.

Tabela 5 - Traços com brita calcária.

| Traço | Cimento | Areia Artificial | Areia Natural | Vermiculita | Brita 0 | Brita 1 | Fator Água / Cimento | Aditivo plastificante /super (%) |
|-------|---------|------------------|---------------|-------------|---------|---------|----------------------|----------------------------------|
| CR35 | 1 | 0,644 | 1,933 | 0,000 | 0,914 | 2,133 | 0,52 | 0,50 / 0,15 |
| CS35 | 1 | 0,644 | 1,450 | 0,083 | 0,914 | 2,133 | 0,52 | 0,50 / 0,15 |
| CR50 | 1 | 0,436 | 1,307 | 0,000 | 0,701 | 1,635 | 0,38 | 0,50 / 0,25 |
| CS50 | 1 | 0,436 | 0,980 | 0,056 | 0,701 | 1,635 | 0,38 | 0,50 / 0,25 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Traços com brita basáltica.

| Traço | Cimento | Areia Natural | Vermiculita | Brita 0 | Fator Água / Cimento | Aditivo plastificante /super (%) | Microssílica (%) |
|-------|---------|---------------|-------------|---------|----------------------|----------------------------------|------------------|
| CR70 | 1 | 1,175 | 0,000 | 1,819 | 0,40 | 0,50/0,25 | 12 |
| CS70 | 1 | 0,881 | 0,050 | 1,819 | 0,40 | 0,50/0,25 | 12 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 PLANO DE AMOSTRAGEM

O plano de amostragem consiste em apresentar todos os ensaios desenvolvidos na pesquisa além do quantitativo de corpos de prova para cada uma das classes: C35, C50 e C70, tipos de concreto: referência (R) e com substituição (S). Indica-se também a temperatura máxima à qual foram expostos os CPS: temperatura ambiente (TA), 200°C, 400°C e 800°C.

Para os ensaios de análise visual, absorção, massa específica e ultrassom, todos os corpos de prova serão analisados em temperatura ambiente e depois de submetidos a elevação de temperatura, considerando que são ensaios não destrutivos.

Para que se tenha quantidade suficiente de corpos de prova a serem submetidos a ensaios destrutivos, e com confiabilidade estatística, são moldados 52 corpos de prova de cada concreto, perfazendo um total de 312 corpos de prova, distribuídos conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Plano de amostragem de ensaios destrutivos.

| Ensaio | Temperaturas (°C) | | | |
|------------------------|-------------------|-----|-----|-----|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| Res. Compressão | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Res. Tração CD | 6 | 4 | 4 | 2 |
| Módulo de elasticidade | 5 | 5 | 5 | 5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 MISTURA DOS MATERIAIS

Não existe norma vigente no Brasil que define a metodologia para a mistura do concreto, mas autores na literatura mostram que a ordem de mistura dos materiais tem influência sobre as características do produto final (SCHAEFER *et al.*, 2006). Portanto, para que se obtenha resultados que podem ser analisados e comparados, é importante padronizar a fabricação de

todos os lotes de concreto, de modo a garantir que os resultados das análises possam ser confrontados.

Neste trabalho, foram adotados os seguintes passos para a confecção das misturas:

- a) Separação, pesagem e identificação dos materiais (Figura 9);
- b) Umedecimento de todas as ferramentas utilizadas para a moldagem incluindo a betoneira;
- c) Saturação de agregados, miúdos em reserva e graúdos na própria betoneira (Figuras 10 e 11);
- d) Adição de materiais na betoneira, em ordem: agregados graúdos, cimento, parte da água, agregados miúdos, vermiculita (quando pertinente), restante da água para obter a mistura pronta (Figura 12). Vale ressaltar que houve intervalos entre as adições de cada componente das misturas;

Figura 9 - Materiais pesados e devidamente separados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Agregado miúdo em condição saturada com superfície seca.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Agregado graúdo em condição saturada com superfície seca.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Mistura pronta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os materiais já chegam ao laboratório em sacos plásticos separados, os quais são pesados com precisão de 0,1g – para tal, empregou-se uma balança digital, com exceção do aditivo, que é medido em ml.

A pré-umidificação das ferramentas e da betoneira tem por objetivo evitar a absorção de água do traço, que poderia comprometer a estrutura do material final e, conseqüentemente, os resultados da pesquisa.

Os agregados são umidificados na condição de saturado com superfície seca (SSS), ou seja, o material tem suas partículas saturadas de água sem umedecer as partículas ao seu redor. Relevante ressaltar que as areias passam por este processo em local separado, enquanto as britas passam por esta etapa dentro da betoneira.

Após a lubrificação e umidificação, coloca-se o cimento na betoneira já com a brita e o equipamento é acionado para que o atrito entre as partículas cause destorroamento dos grãos de cimento que podem estar colados uns aos outros.

Então se adiciona parte da água do traço e, novamente, o material é misturado visando obter a nata de cimento envolvendo os agregados graúdos em totalidade. Em seguida adicionam-se os agregados miúdos, a vermiculita (nos lotes que a contém), e o restante da água,

com a ressalva de deixar cerca de um litro para controle visual final e, então, mistura-se novamente.

É feita, então, uma análise tátil-visual da mistura, para verificar a necessidade de adição de água. Esta etapa é mais lenta, com diversas pausas entre misturas adições de água em pequena quantidade para que não ocorra excesso de água no concreto.

Segundo Batezini (2013), o concreto fresco deve apresentar um aspecto brilhoso e suas partículas devem estar integralmente revestidas pela pasta de cimento. O teste tátil-visual analisa a desagregação do material ao se comprimir manualmente uma amostra da mistura, em formato próximo ao esférico, em que as partículas devem permanecer aglomeradas.

Por fim, ocorre a verificação da consistência do material, o que infere na firmeza da forma com que a substancia flui, sendo, portanto, uma propriedade diretamente associada à trabalhabilidade da mistura. Mehta e Monteiro (2014) enfatizam a relevância da trabalhabilidade do material em tecnologia de concreto, uma vez que uma mistura de concreto que não possa ser facilmente lançada ou adensada não resultará na resistência e durabilidade esperadas. Esta etapa segue a NBR 16889:2020. As Figuras 13 e 14 mostram a realização respectivamente de: preenchimento do molde e o processo de medição do abatimento do material após retirada do cone.

Figura 13 – Preenchimento do molde durante ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

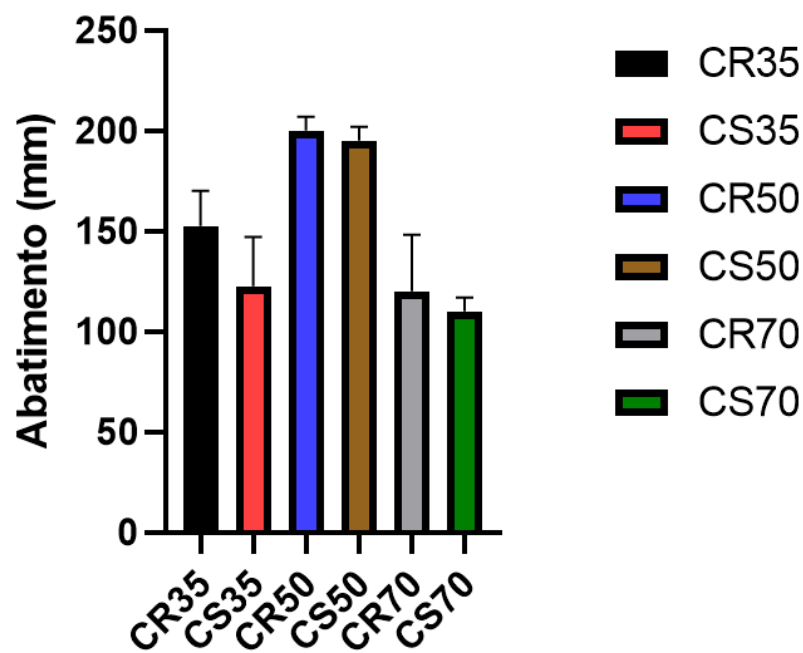
Figura 14 - Medição do abatimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio foi realizado em cada lote fabricado, sendo necessário dois lotes para cada concreto. Os resultados dos abatimentos são apresentados no Gráfico 4, e na Tabela 8 contendo informações necessárias para análise da consistência. Os abatimentos não são fixos por se tratarem de concretos diferentes.

Gráfico 4 - Abatimento do tronco de cone.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Informações da mistura dos concretos.

| | Água saturação brita (ml) | | Plastificante (mg) | | Super plastificante (mg) | | Água do traço (ml) | | Abatimento (mm) | |
|------|---------------------------|--------|--------------------|--------|--------------------------|--------|--------------------|--------|-----------------|--------|
| | Lote 1 | Lote 2 | Lote 1 | Lote 2 | Lote 1 | Lote 2 | Lote 1 | Lote 2 | Lote 1 | Lote 2 |
| CR35 | 250 | 250 | 84 | 84 | 5 | 7 | 8000 | 8000 | 165 | 140 |
| CS35 | 250 | 250 | 84 | 84 | 25 | 25 | 8750 | 8750 | 140 | 105 |
| CR50 | 350 | 350 | 110 | 110 | 29 | 29 | 8460 | 8460 | 195 | 205 |
| CS50 | 350 | 350 | 110 | 110 | 56 | 56 | 8460 | 8460 | 190 | 200 |
| CR70 | 300 | 300 | 135 | 135 | 67 | 67 | 10800 | 10800 | 100 | 140 |
| CS70 | 300 | 300 | 135 | 135 | 77 | 77 | 11200 | 11200 | 115 | 105 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

É evidenciada a influência da substituição de vermiculita quanto a trabalhabilidade, sendo necessário o uso de maior quantidade de super plastificante no concreto com vermiculita em relação ao seu concreto referência, ocorrido constante para cada classe visando obter trabalhabilidade similar, o que condiz com o dito por Rossignolo (2009). Além disso, foi necessário de uso de mais água na mistura nos casos de Classes 35 e 70.

3.5 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Com material aprovado pelo teste de abatimento pode-se moldar os corpos de prova seguindo a norma da ABNT NBR 5738:2015.

Os corpos de prova após moldados (Figura 15) são então transportados para a câmara úmida, ilustrada na Figura 16 onde permanecem pelo período de cura estipulado de 28 dias.

Figura 15 - Corpos de prova CR35 depois da moldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Corpos de prova CR35 e CS 35 na câmara úmida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para o tipo de pesquisa adotado é de extrema importância que se faça uma validação dos resultados obtidos por meio de métodos estatísticos, verificação que confere credibilidade ao estudo, apontando se os resultados são satisfatórios, ou se constam aleatoriedade ou valores inconclusivos.

Nesse trabalho foi usado a metodologia para análise de variância One-Way ANOVA, com auxílio do programa GraphPad Prism 9.2.0, e, quando necessário, o teste de Tukey para múltiplas comparações. Essas análises são utilizadas para determinar se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas) ou casuais (decorrentes da mera variabilidade amostral). O programa ainda fornece média dos resultados e gera gráficos contendo o desvio padrão.

3.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização foram executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora –UFJF, após o período de cura de 28 dias.

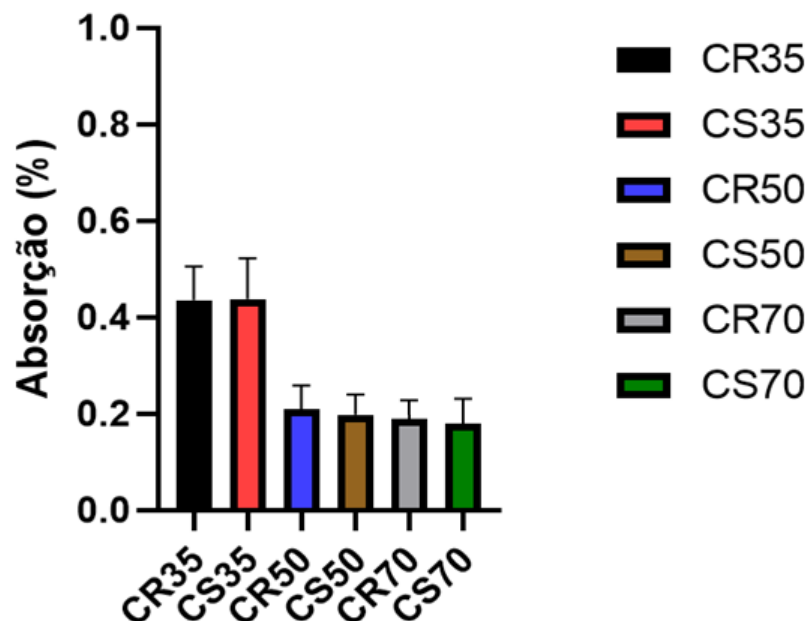
I. Verificação da absorção

A absorção de água é o processo no qual a água ocupa os poros permeáveis de um corpo sólido poroso, sendo fundamental para avaliar a qualidade do concreto, uma vez que a água é um agente deteriorante que transporta substâncias que podem causar danos ao material. Por isso, a redução do seu fluxo dentro da microestrutura do concreto é uma excelente forma de evitar um processo de deterioração, tanto no concreto quanto na sua armadura, aumentando, assim, a durabilidade (NEVILLE, 2016).

Os valores são obtidos de acordo com a ABNT NBR 9778:2005 Versão Corrigida 2:2009 - *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. O valor do resultado, expresso em %, nos mostra a massa de água presente no corpo de prova em relação ao valor da massa seca.

O resultado encontrado pode ser observado no Gráfico 5 e na Tabela 9, contendo as médias dos resultados.

Gráfico 5 - Teor de absorção de água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Média das absorções.

| Absorção | |
|----------|------|
| CR35 | 0,44 |
| CS35 | 0,44 |
| CR50 | 0,21 |
| CS50 | 0,20 |
| CR70 | 0,19 |
| CS70 | 0,18 |

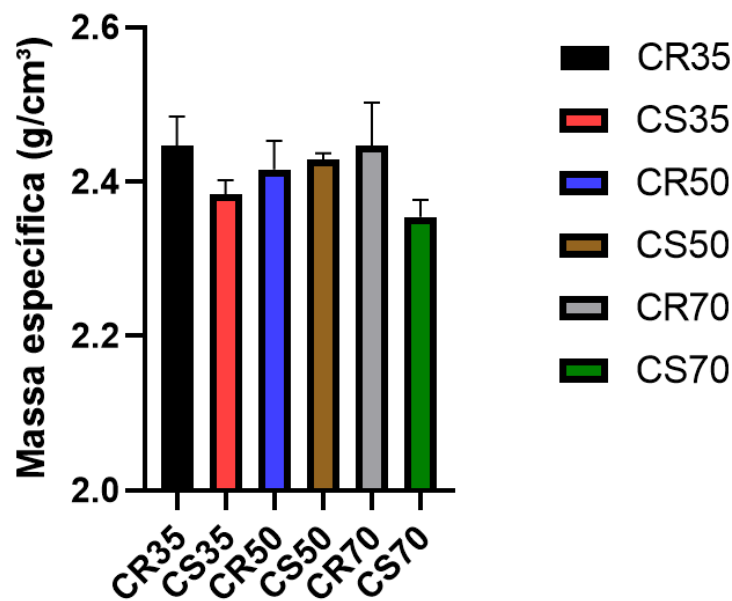
Fonte: Elaborado pelo autor.

É observado que os concretos apresentam teores de absorção similares entre concretos de mesma classe.

II. Verificação da massa específica;

Os valores são também obtidos de acordo com a ABNT NBR 9778:2005 Versão Corrigida 2:2009. Seu valor, expresso em g/cm^3 , nos mostra a massa do corpo de prova em relação ao seu volume e seu resultado é observado no Gráfico 6 e na Tabela.

Gráfico 6 - Massa específica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Média das massas específicas.

| Massa específica | |
|------------------|------|
| CR35 | 2,45 |
| CS35 | 2,38 |
| CR50 | 2,42 |
| CS50 | 2,43 |
| CR70 | 2,45 |
| CS70 | 2,35 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

É observado que apenas no concreto de classes 35 e 70 a vermiculita influenciou no valor do parâmetro em relação ao concreto referência, reduzindo a média das massas específicas dos corpos de prova.

Nenhum dos concretos se classifica como concreto leve, de acordo com Holm e Bremner (2000), *apud* Angelin (2014). Tal classificação não foi obtida em função do uso da vermiculita expandida ser como agregado miúdo e a substituição ser parcial.

3.8 ENSAIOS TÉRMICOS

Os ensaios comparativos foram, também, executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora –UFJF, após 28 dias da data de moldagem.

Os corpos de prova são submetidos à elevação de temperatura em uma mufla com velocidade de subida, controlada automaticamente pelo equipamento, de 2°C por minuto e se mantém por um período de 4 horas para sua temperatura determinada (TA, 200°C, 400°C, 800°C). A mufla é, então, desligada, e os corpos de prova são resfriados em seu interior até que seja segura sua retirada (cerca de 12 horas), e então mantidos no laboratório até que se atinja a temperatura ambiente – sendo assim, os resultados em 200°C, 400°C e 800°C são considerados residuais. Essas temperaturas foram adotadas para que se sejam observadas diferenças no comportamento em diferentes patamares visando uma temperatura em que o corpo de prova seria deteriorado.

Infelizmente devido à pandemia do COVID-19 o laboratório por diversas ocasiões teve que ser fechado, assim como o fornecimento de materiais e equipamentos foi prejudicado, sendo assim, limitações foram encontradas ao decorrer deste estudo: os corpos de prova não puderam todos serem ensaiados com 28 dias após a cura, os concretos de classe 35 tiveram seus parâmetros aferidos para temperatura ambiente com 28 dias e para demais temperaturas com mais de 120 dias.

A comparação dos materiais após o aquecimento/resfriamento consistiu na execução dos seguintes ensaios:

I. Análise visual de degradação do material após o condicionamento;

Os materiais sofrem danos causados pelo processo de aquecimento e resfriamento, esta deterioração pode ser visível, assim como no caso do efeito de spalling, o qual pode ser observado com facilidade caso ocorra.

II. Perda de massa

Este parâmetro é averiguado pela diferença de massa dos corpos de prova em estado seco em temperatura ambiente e com as massas secas dos corpos após o condicionamento.

III. Velocidade do pulso ultrassônico;

Teste que permite determinar a densidade e a homogeneidade dos CPS, de acordo com a NBR 8802 da ABNT (2019) – *Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*, em que, após devida calibração do aparelho, posiciona-se no sentido direto de transmissão os transmissores, com uso de gel acoplante, e o resultado é indicado no visor do aparelho, como ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Ensaio de velocidade do pulso ultrassônico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

IV. Resistência à compressão axial;

Este ensaio fornece parâmetro essencial para o estudo devido à magnitude da importância do seu resultado, a resistência à compressão é um dos principais fatores que levam ao uso do concreto na construção civil, e é, portanto, o tópico principal de discussão deste

presente trabalho. Este parâmetro é normalmente considerado como a propriedade mais relevante no concreto (METHA; MONTEIRO, 2014).

Para a obtenção de seu valor, segue-se a norma ABNT NBR 5739:2018 - *Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. O CP é submetido a uma prensa hidráulica (Figura 18), equipamento que exerce força gradual de compressão até o rompimento do mesmo, levando à obtenção do valor da força exercida, o qual, então, é dividido pela área da circunferência de topo do corpo de prova, inferindo assim a resistência. A Figura 19 apresenta um corpo de prova posicionado para o ensaio.

Figura 18 - Contenco Pavitest utilizada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Ensaio de resistência à compressão axial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

V. Resistência à tração por compressão diametral;

O ensaio é realizado de acordo com as diretrizes da NBR 7222/2011 – ABNT – *Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*.

O corpo de prova é posicionado no equipamento de forma que o eixo de carregamento seja o diâmetro do corpo de prova. São colocadas tiras de chapa entre os pratos da máquina e os corpos de prova. Os pratos são ajustados até exercerem compressão suficiente para manter a posição do CP e enfim a carga é aplicada continuamente até a ruptura do material (Figura 20).

Figura 20 - Ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

VI. Módulo de elasticidade;

Considerado um parâmetro intimamente relacionado com a durabilidade, seu valor aumenta conforme ocorre o aumento da resistência à compressão do concreto. Porém, tudo o que pode ser dito é que esse aumento do módulo de elasticidade do concreto é progressivamente menor do que o aumento da resistência à compressão (NEVILLE, 2016).

Para obter o valor do módulo de elasticidade, utiliza-se como referência a ABNT NBR 8522-1: 2021 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão, que propõe ensaio em 3 corpos de prova, curados em água até data de ensaio, posicionados ao centro da prensa e submetidos a sucessivos carregamentos e descarregamentos entre tensão inicial de 0,5 MPa e 30% do valor determinado previamente no ensaio de compressão axial.

Este valor é calculado a partir da inclinação de reta tangente imaginária, traçada paralela à reta secante construída com dados da curva tensão-deformação, obtida no ensaio.

Por fim o corpo de prova é submetido à ruptura por compressão axial de modo a validar o ensaio.

A Figura 21 indica o posicionamento do Strain Gauge, enquanto a Figura 22 apresenta o CP a ser testado.

Figura 21 - Strain Gauge colocado no corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Corpo de prova posicionado na prensa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados individuais de cada corpo de prova são apresentados nos Apêndices deste trabalho, as próximas sessões contêm gráficos de linha, com o desvio padrão indicado, para uma facilitada compreensão e com um “*” caso exista diferença estatística significativa entre o CR e CS, além de tabelas com as médias dos resultados.

No caso dos parâmetros velocidade do pulso ultrassônico, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático são também apresentados gráficos comparativos entre concretos de mesma classe para melhor análise dos resultados.

4.1. ANÁLISE VISUAL

Considerando que os materiais sofrem danos ao serem condicionados à temperaturas diferentes e podem apresentar o fenômeno de spalling, foi feita uma análise visual dos corpos de prova após serem retirados da estufa ou mufla.

Em 2 corpos de prova foi possível identificar a ocorrência de spalling: sendo com o concreto do tipo CS35, sob a temperatura de 478°C, e um de CR70 sob 623°C, ambos ainda dentro da mufla, estes, ao explodirem causaram um som alto em que foi possível claramente identificar o ocorrido, ver e anotar o valor da temperatura e desligar o equipamento por questão de segurança. Mesmo sendo os concretos ainda de classe 35 já apresentam altas densidades o que aumentam as tensões térmica ocasionadas também pela desidratação que começa a destruir as ligações químicas que formam o CSH, liberando a chamada água de desidroxilação que tende a se evaporar conforme observado por Ferreira (2011). A Figura 23 mostra o aspecto do corpo de prova completamente deteriorado, ainda no interior da mufla, enquanto a Figura 24 apresenta os fragmentos do material.

Figura 23 - Corpo de prova cilíndrico do tipo CS35 destruído completamente na mufla.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Fragmentos do corpo de prova cilíndrico do tipo CR70.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em todos os corpos de prova submetidos a temperaturas superiores à 400°C foram observadas pequenas fissuras na superfície, o que condiz com o estudado por Hager (2014) e é

mostrado na Figura 25. Quando o concreto é submetido ao aquecimento relativamente rápido (acima de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$), os concretos com menor relação água/cimento são mais suscetíveis à fissuração devido a sua baixa permeabilidade que limita o vapor de água escapar pelos poros. O aumento dessas fissuras que ocorrem de maneira lenta, podendo se estender à desintegração repentina do corpo de prova com desprendimento de grande quantidade de energia e total fragmentação de partes do corpo de prova e em alta velocidade, como observado anteriormente por Komonen e Pentala (2003). Outra explicação está relacionada ao coeficiente de dilatação térmica uma vez que o agregado expande sob o efeito da temperatura e a pasta de cimento se contrai gerando tensões de retração, além de a retração de tais corpos de prova na abertura da mufla e sua retirada podem originar fissuras.

Nenhum dos corpos de prova apresentou mudança na coloração durante o estudo, o que vai de encontro ao esperado pelos estudos de Akca (2013) e Hager (2014).

Figura 25 - Corpo de prova CR50 após aquecimento até 400°C .



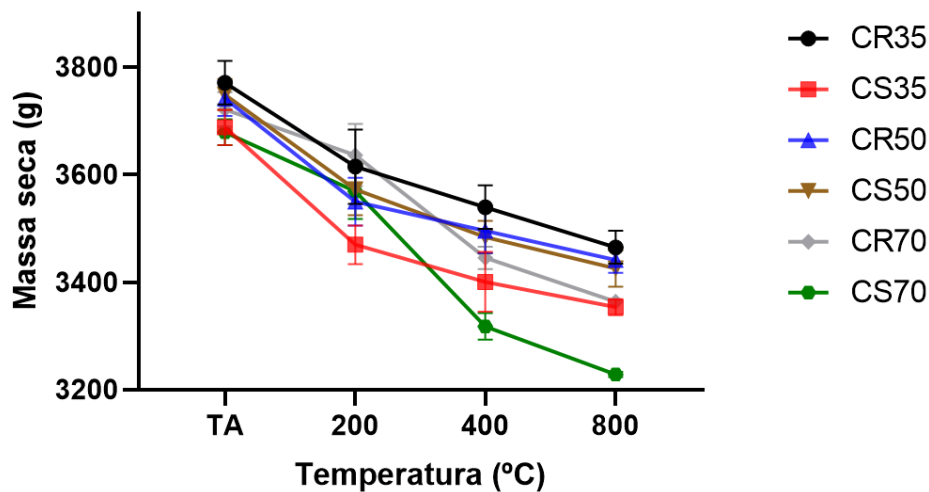
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. PERDA DE MASSA

Considerando os danos sofridos pelos materiais ao serem condicionados a diferentes gradientes de temperatura foi observada a perda de massa dos corpos de prova em comparação com os que permaneceram em temperatura ambiente. Tal fato pode ser explicado uma vez que tanto a pasta quanto os agregados se decompõem com o calor gerado pelo incremento na temperatura (BODNAROVA, 2013).

Os resultados, obtidos com 13 corpos de prova de cada tipo de concreto, após processo de aquecimento e resfriamento são mostrados no Gráfico 7 e na Tabela 11, contendo a média dos valores.

Gráfico 7 - Massa seca x Temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Média das massas secas.

| | Massa seca | | | |
|------|------------|---------|---------|---------|
| | TA | 200,00 | 400,00 | 800,00 |
| CR35 | 3770,96 | 3614,78 | 3539,45 | 3464,70 |
| CS35 | 3687,86 | 3469,70 | 3400,66 | 3353,46 |
| CR50 | 3741,57 | 3549,54 | 3495,54 | 3441,48 |
| CS50 | 3748,91 | 3572,45 | 3483,60 | 3425,53 |
| CR70 | 3721,12 | 3636,32 | 3445,11 | 3363,90 |
| CS70 | 3678,83 | 3569,22 | 3317,78 | 3228,10 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

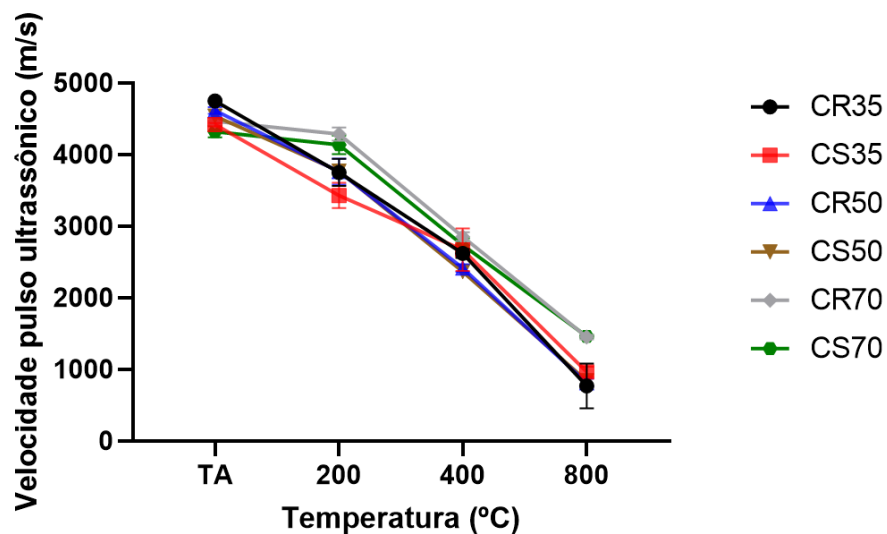
Pode ser observado que todos os concretos apresentam perdas de massa gradativamente maiores de acordo com a elevação da temperatura, implicando em maiores danos sofridos pelos

mesmos quando condicionados à maiores gradientes de temperatura, o que condiz com os resultados encontrados por Kodur (2003).

4.3. VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO

Por meio das variações da velocidade do pulso ultrassônico (VPU), é possível verificar a homogeneidade do material, a resistência do concreto, suas propriedades elásticas, a espessura de uma camada de concreto, os defeitos dos sistemas estruturais e a evolução, ao longo do tempo, de suas propriedades. Neste caso, a VPU tem a finalidade de mostrar a presença de vazios no interior do corpo de prova e seu adensamento e, como os concretos do trabalho apresentaram massas específicas similares, foi possível observar as alterações quanto do efeito da temperatura, como visto no Gráfico 8 e Tabela 12.

Gráfico 8 - Velocidade do pulso ultrassônico x Temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Média de velocidade do pulso ultrassônico.

| | Velocidade do pulso ultrassônico | | | |
|------|----------------------------------|---------|---------|--------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR35 | 4728,15 | 3749,23 | 2620 | 990 |
| CS35 | 4415,38 | 3427,69 | 2670 | 965 |
| CR50 | 4615,34 | 3762,31 | 2415,38 | 812,22 |
| CS50 | 4535,54 | 3768,46 | 2365 | 838,89 |
| CR70 | 4463,28 | 4285,38 | 2852,73 | 1450 |
| CS70 | 4318,62 | 4133,85 | 2736,64 | 1460 |

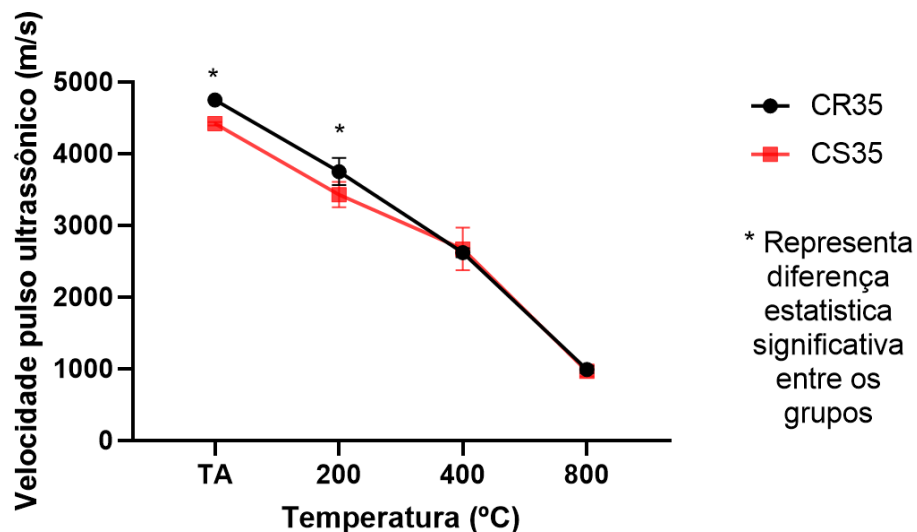
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar a tendência de queda do valor do parâmetro com o aumento da temperatura de exposição.

É notório também que os concretos de maior resistência apresentaram menor VPU em TA, porém à medida em que ocorre o acréscimo de temperatura, esses materiais apresentam os maiores valores para VPU residual, mostrando que sofreram as menores perdas percentuais do VPU, o que pode ser explicado pelo uso do agregado basáltico, o qual possui menor porosidade e é mais resistente à abrasão (segundo Al-Baijat em 2008) que ocorre no interior do corpo de prova devido à alta pressão interna causada pelo aumento de temperatura.

O Gráfico 9 apresenta a comparação direta de concretos de classe 35 e a Tabela 13 a média dos resultados.

Gráfico 9 - Velocidade do pulso ultrassônico x Temperatura. Classe 35.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 - Média de velocidade do pulso ultrassônico. Classe 35.

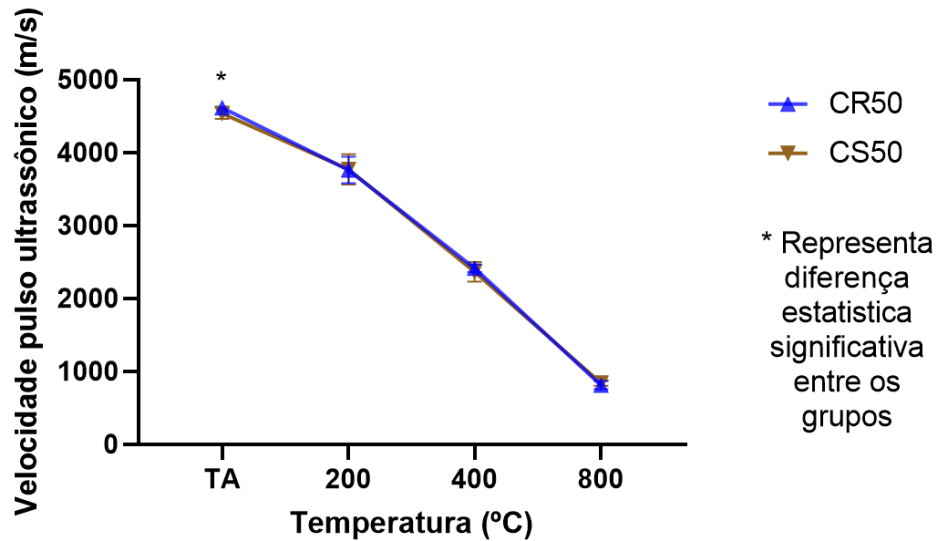
| | Velocidade do pulso ultrassônico | | | |
|------|----------------------------------|---------|------|-----|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR35 | 4728,15 | 3749,23 | 2620 | 990 |
| CS35 | 4415,38 | 3427,69 | 2670 | 965 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O concreto CR35 apresenta maiores valores do resultado para TA e 200°C em relação ao CS35, considerando que tal diferença inexiste após a elevação de temperatura a 400°C e 800°C. Assim, é perceptível que a vermiculita influenciou positivamente no resultado, pois o concreto que a contém apresenta menores perdas proporcionais (CS 78,14% e CR 79,06% a 800°C).

A comparação direta de concretos de classe 50 é exibida graficamente no Gráfico 10 e a média de seus resultados na Tabela 14.

Gráfico 10 - Velocidade do pulso ultrassônico x Temperatura. Classe 50.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Média de velocidade do pulso ultrassônico. Classe 50.

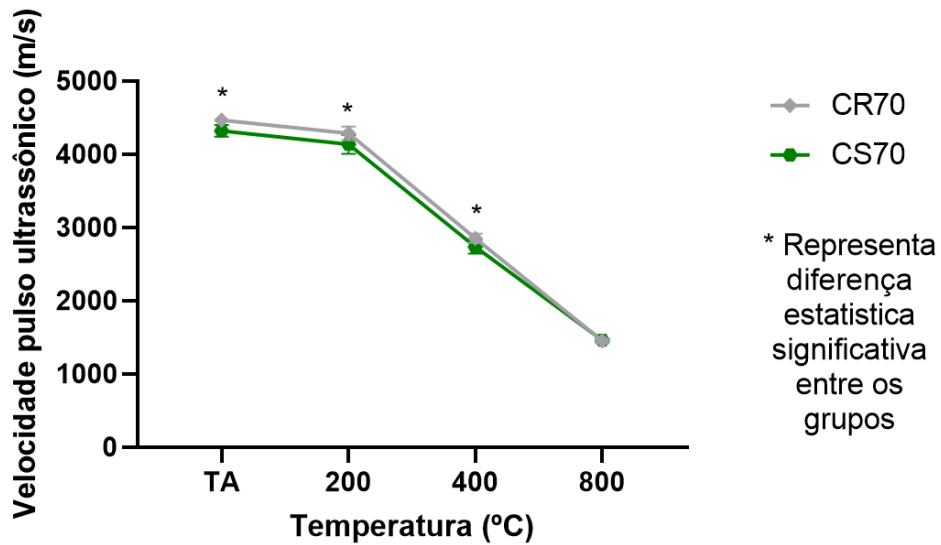
| | Velocidade do pulso ultrassônico | | | |
|------|----------------------------------|---------|---------|--------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR50 | 4615,34 | 3762,31 | 2415,38 | 812,22 |
| CS50 | 4535,54 | 3768,46 | 2365 | 838,89 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido ao concreto CS apresentar maior porosidade, durante o incremento na temperatura, as tensões internas provocadas pela água livre aprisionada, foram menores que os concretos CR (CS 81,50% e CR 82,40% a 800°C).

Por fim para os concretos de classe 70 têm-se o Gráfico 11 e Tabela 15 com seus resultados comparativos.

Gráfico 11 - Velocidade do pulso ultrassônico x Temperatura. Classe 70.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Média de velocidade do pulso ultrassônico. Classe 70.

| | Velocidade do pulso ultrassônico | | | |
|------|----------------------------------|---------|---------|------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR70 | 4463,28 | 4285,38 | 2852,73 | 1450 |
| CS70 | 4318,62 | 4133,85 | 2736,64 | 1460 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

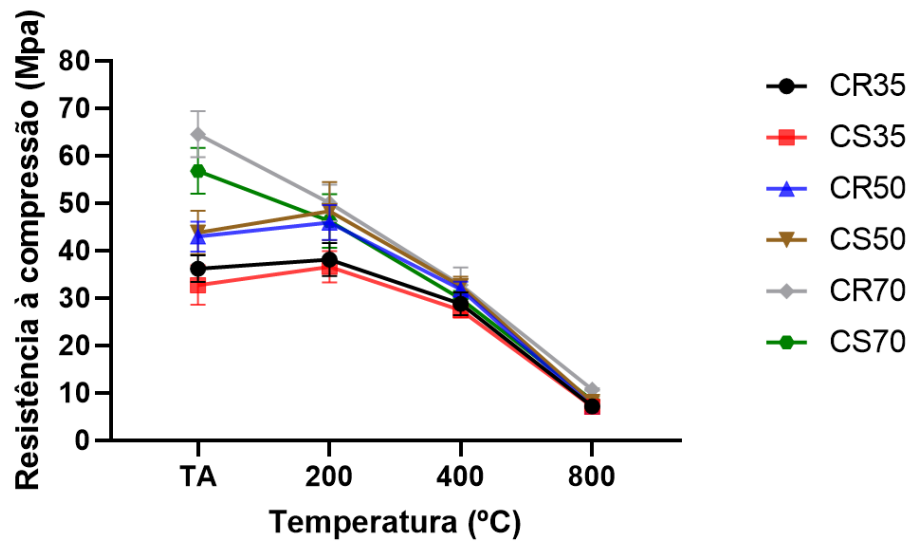
Similar às outras classes de concreto, o CR apresenta resultados superiores em temperaturas mais baixas, porém quando elevado à 800°C o CS apresenta valores similares, o que indica que a vermiculita teve efeito positivo, demonstrada pela menor perda proporcional do valor sendo CS 66,16% e CR 67,51% para tal temperatura.

4.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Para a verificação da resistência à compressão, foram realizados ensaios de resistência residual, ou seja, os corpos de prova foram submetidos ao aquecimento na mufla e sem carga, de acordo com as temperaturas definidas até que todo ele atingisse a temperatura estabelecida. Findo esse prazo, aguardou-se até que o corpo de prova alcançasse a temperatura ambiente e, então, submetido ao ensaio de resistência até sua ruptura.

Os resultados, analogamente aos de VPU, são apresentados graficamente no Gráfico 12, e na Tabela 16 contendo os valores das médias dos resultados.

Gráfico 12 - Resistência à compressão x Temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 - Média das resistências à compressão.

| | Resistência à compressão | | | |
|------|--------------------------|-------|-------|-------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR35 | 36,16 | 38,1 | 28,78 | 7,16 |
| CS35 | 32,72 | 36,6 | 27,42 | 7,13 |
| CR50 | 42,94 | 45,9 | 31,85 | 7,09 |
| CS50 | 43,8 | 48,32 | 32,5 | 8,07 |
| CR70 | 64,5 | 50,04 | 32,76 | 10,72 |
| CS70 | 56,79 | 46,21 | 29,86 | 8,46 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

É observado que a resistência a compressão no concreto com vermiculita foi reduzida significativamente em temperatura ambiente apenas no concreto de classe 70, em que a diferença entre as médias foi de 11,95% similar ao encontrado por Santos (2018).

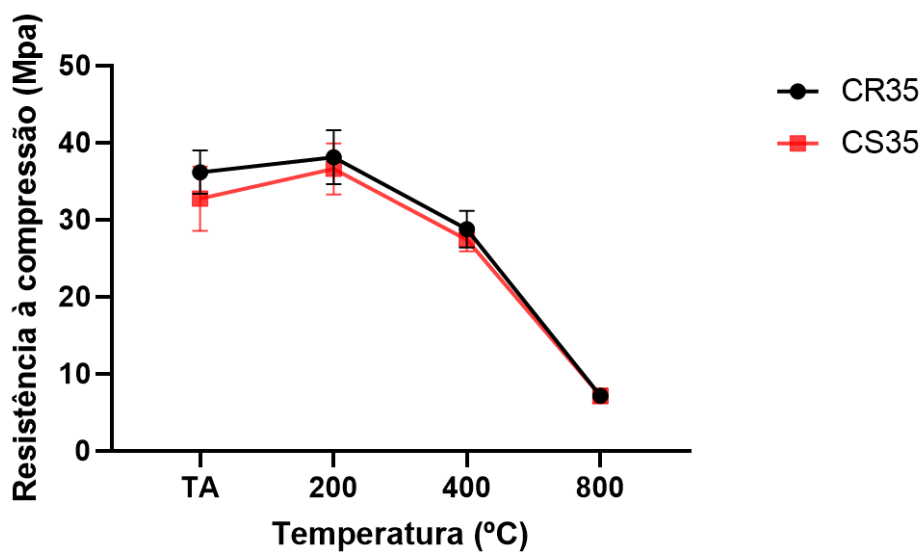
Para concretos de 35 e de 50MPa, o condicionamento à temperatura de 200°C não causou variação devido a apresentarem-se menos densos quando comprado com os concretos de 70 Mpa, sendo 22,42% para CR70 e 18,63% para CS70, apresentando maior susceptibilidade à danos por elevação de temperatura em CAD, indo de acordo com Isaia (2011).

Os materiais, quando submetidos a temperaturas de 400° e 800°C, apresentam decréscimo elevado de suas resistências à compressão, comportamento condizente com os estudos de Lima (2005), Bodnarova (2013) e Sadrmomtazi (2020), devido à desidroxilação da fase hidratada $CA(OH)_2$ e a perda de CO_2 a partir dos 600°C.

Salienta-se que todos os concretos quando submetidos a temperatura de 800°C apresentam resistências similares, demonstrando que o concreto com vermiculita apresenta menores perdas, uma vez em geral sua resistência à compressão possui valor inferior aos concretos sem substituição. Novamente explicado pelo número maior de poros que permitem uma menor tensão interna na microestrutura do corpo de prova.

A comparação direta de resultados dos concretos de classe 35 é apresentada no Gráfico 13 na Tabela 17 contendo a média dos resultados, e as de classe 50 no Gráfico 14 e Tabela 18.

Gráfico 13 - Resistência à compressão x Temperatura. Classe 35.



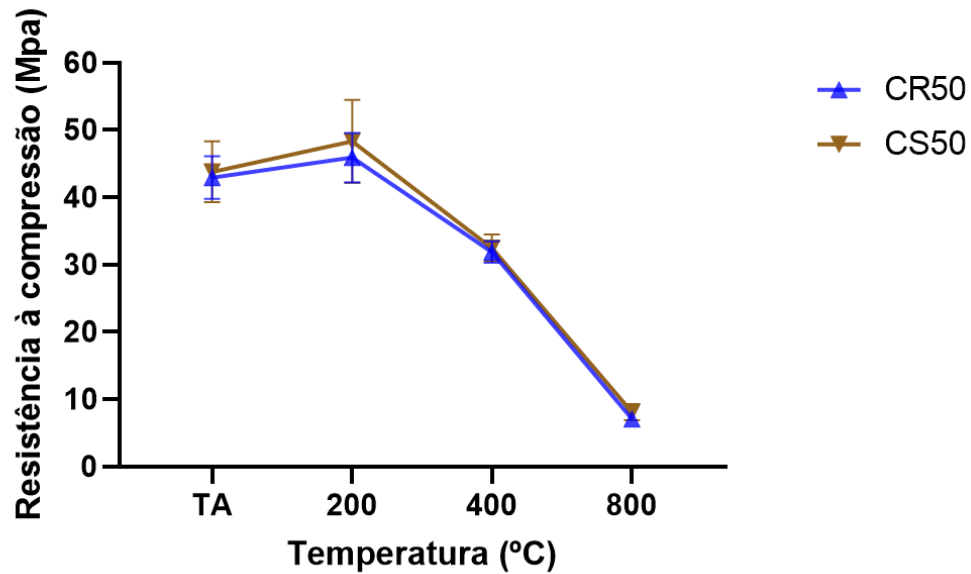
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 - Média das resistências à compressão. Classe 35.

| | Resistência à compressão | | | |
|------|--------------------------|------|-------|------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR35 | 36,16 | 38,1 | 28,78 | 7,16 |
| CS35 | 32,72 | 36,6 | 27,42 | 7,13 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14 - Resistência à compressão x Temperatura. Classe 50.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Média das resistências à compressão. Classe 50.

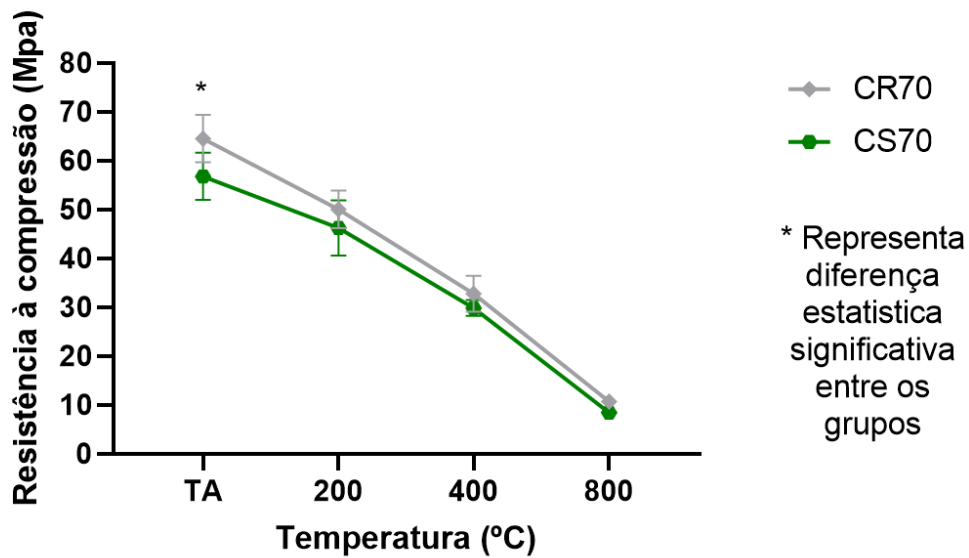
| | Resistência à compressão | | | |
|------|--------------------------|-------|-------|------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR50 | 42,94 | 45,9 | 31,85 | 7,09 |
| CS50 | 43,8 | 48,32 | 32,5 | 8,07 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que houve um aumento das médias das resistências à compressão entre as temperaturas ambiente e 200°C, para os concretos de 35 e 50 MPa. Isso pode ser explicado em função do tempo decorrido entre as análises em temperatura ambiente, uma vez que, posteriormente, houve uma interrupção dos ensaios devido ao momento de suspensão das atividades e o retorno gradual. Esse período contribuiu para um aumento da resistência em idades avançadas. Neste caso, reforça-se que os concretos de 35 e 50 MPa sofrem maior degradação em temperaturas superiores.

Para os concretos de classe 70 é apresentada a comparação direta de seus resultados no Gráfico 15 e na Tabela 19.

Gráfico 15 - Resistência à compressão x Temperatura. Classe 70.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 - Média das resistências à compressão. Classe 70.

| | Resistência à compressão | | | |
|------|--------------------------|-------|-------|-------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR70 | 64,5 | 50,04 | 32,76 | 10,72 |
| CS70 | 56,79 | 46,21 | 29,86 | 8,46 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao contrário do observado para os concretos de classe 35 e 50, todos os corpos de prova de concretos de 70 MPa apresentaram redução da resistência com o aumento da temperatura. Os motivos são que todos foram moldados e analisados em idades próximas, não havendo interrupção prolongada entre as análises de TA e os incrementos da temperatura, além de sua maior densidade ocasionando perda direta com maior geração de vapor proveniente da água livre existente na microestrutura.

Salienta-se que, em todos os concretos, a substituição parcial do agregado miúdo pela vermiculita demonstra menor perda de resistência com o aumento da temperatura em função da maior conexão interna entre os poros. Tal comportamento é análogo ao encontrado por Morales (2011).

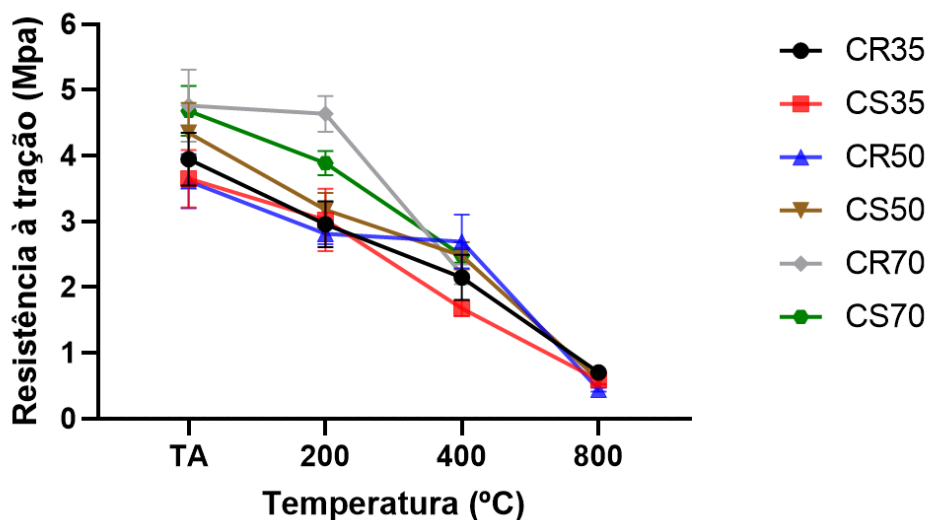
A maior queda de resistência em todas as análises ocorreu entre as temperaturas de 400°C e 800°C, sendo observada que essa pode ser considerada como a fase crítica, independente do uso ou não de agregado leve.

4.5. RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Devido ao concreto não resistir bem aos esforços de tração e de não ter adicionado nenhum tipo de material que melhorasse tal propriedade, os corpos de prova de concretos de classe 70 condicionados à 800°C se quebraram ao serem posicionados no equipamento.

Os resultados destes ensaios são apresentados no Gráfico 16, onde se encontram todos os grupos e a Tabela 20 contém os valores das médias dos resultados.

Gráfico 16 - Resistência a tração x Temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 - Média das resistências à tração.

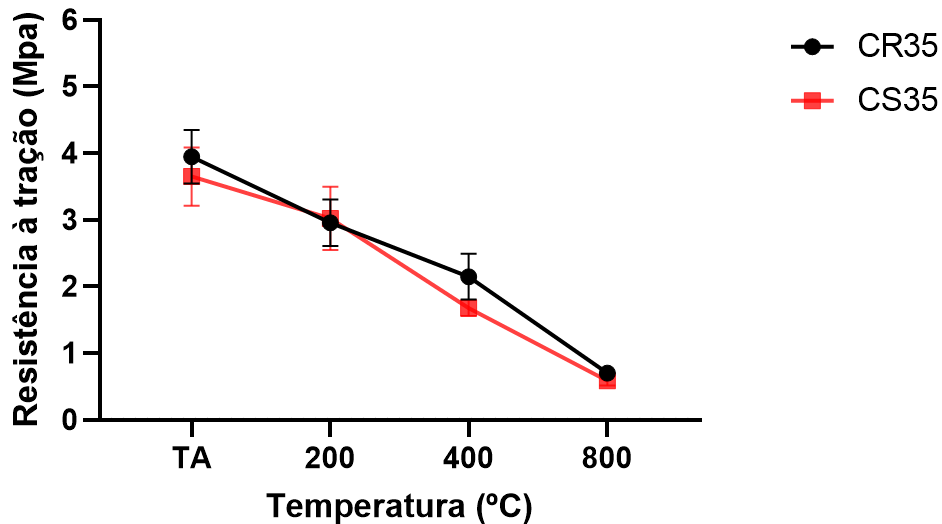
| | Resistência à tração | | | |
|------|----------------------|----------|----------|----------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR35 | 3,946248 | 2,957099 | 2,149388 | 0,701873 |
| CS35 | 3,787888 | 3,023945 | 1,676698 | 0,587282 |
| CR50 | 3,613455 | 2,81386 | 2,693963 | 0,442451 |
| CS50 | 4,349705 | 3,175142 | 2,476451 | 0,592057 |
| CR70 | 4,760325 | 4,635654 | 2,197134 | NA |
| CS70 | 4,684461 | 3,887626 | 2,481226 | NA |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com exceção do CR70 o qual não sofre queda de resistência residual a 200°C, os materiais testados exibem perda significativa de resistência à tração por compressão diametral à medida que os corpos de prova foram condicionados à maiores patamares de temperatura. Como essa propriedade do concreto está diretamente ligada a resistência à compressão, o comportamento foi similar.

Para a realização do estudo de comparação direta dos resultados de classe 35 são apresentados o Gráfico 17 e a Tabela 21.

Gráfico 17 - Resistência à tração x Temperatura. Classe 35.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 - Média das resistências à tração. Classe 35.

| | Resistência à tração | | | |
|------|----------------------|----------|----------|----------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR35 | 3,946248 | 2,957099 | 2,149388 | 0,701873 |
| CS35 | 3,787888 | 3,023945 | 1,676698 | 0,587282 |

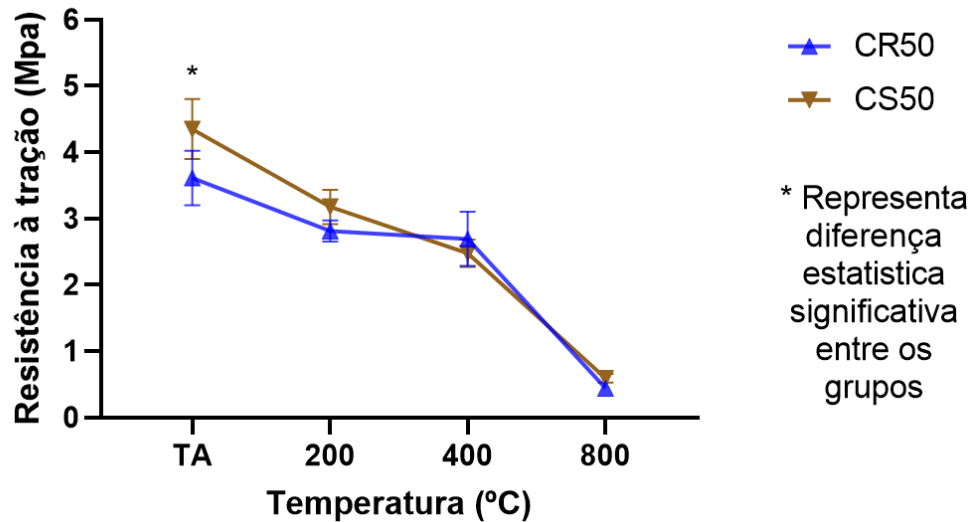
Fonte: Elaborado pelo autor.

É observado que não existe diferença significativa da resistência a tração entre os dois grupos de concreto de classe 35 para nenhuma das temperaturas estudadas.

Portanto, a substituição da vermiculita não ocasionou em nenhuma influência deste parâmetro para tais conjuntos.

O Gráfico 18 mostra a comparação direta de concretos de classe 50, e a Tabela 22 apresenta a média dos resultados.

Gráfico 18 - Resistência à tração x Temperatura. Classe 50.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 - Média das resistências à tração. Classe 50.

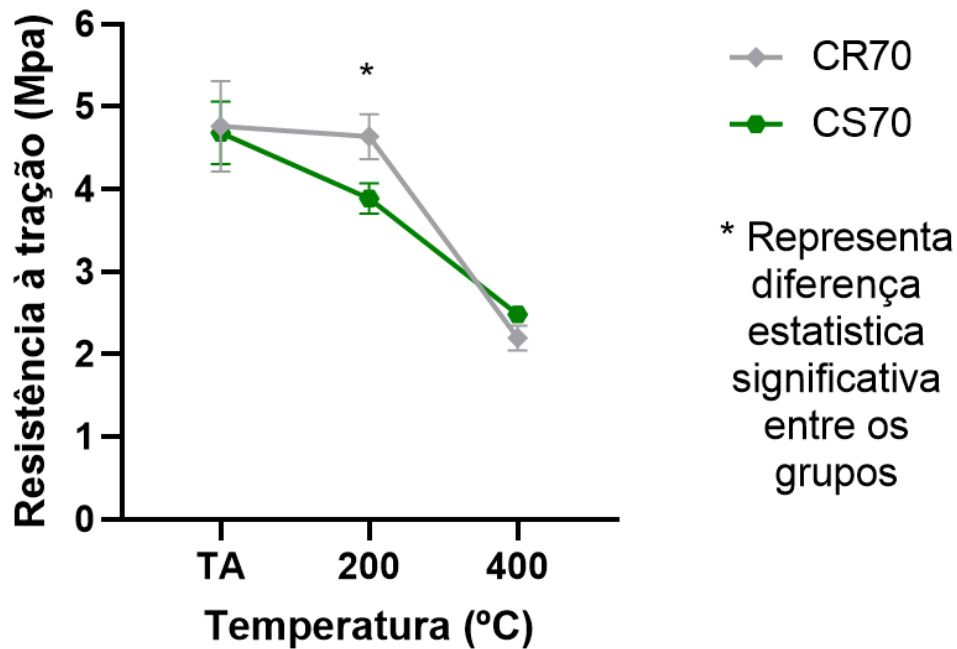
| | Resistência à tração | | | |
|------|----------------------|----------|----------|----------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR50 | 3,613455 | 2,81386 | 2,693963 | 0,442451 |
| CS50 | 4,349705 | 3,175142 | 2,476451 | 0,592057 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

É verificado que a substituição parcial por vermiculita influenciou na resistência à tração na TA, ocasionando um acréscimo deste parâmetro. Para as outras temperaturas abordadas os resultados encontrados foram similares estatisticamente – com isso, pode-se perceber que a perda de resistência à tração residual com o acréscimo de temperatura é maior para concretos com vermiculita em 200°C e 400°C e se equilibra em 800°C.

Os concretos de classe 70 têm sua comparação direta exposta no Gráfico 19 e na Tabela 23.

Gráfico 19 - Resistência à tração x Temperatura. Classe 70.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 - Média das resistências à tração. Classe 70.

| | Resistência à tração | | | |
|------|----------------------|----------|----------|-----|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR70 | 4,760325 | 4,635654 | 2,197134 | NA |
| CS70 | 4,684461 | 3,887626 | 2,481226 | NA |

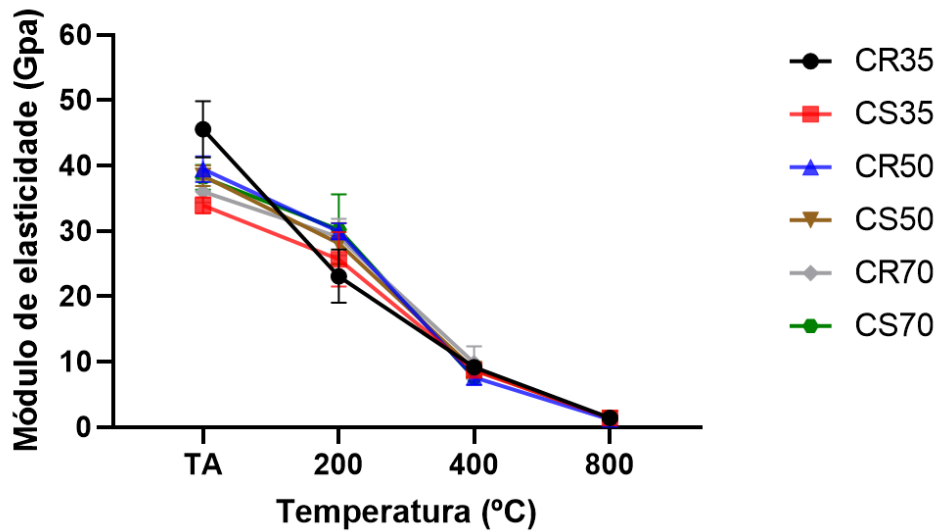
Fonte: Elaborado pelo autor.

Se comparados os materiais na temperatura de 200°C, pode-se observar significativa diferença, dado que o CR não apresenta queda do valor comparado ao seu correspondente de TA, enquanto o CS apresenta uma redução. Para ambos os materiais existe uma queda acintosa quando condicionados a 400°C, indicando ser este o ponto crítico.

4.6. MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Para o ensaio de módulo de elasticidade estático, também foi analisado o módulo residual, ou seja, após o resfriamento em temperatura ambiente dos corpos de prova submetidos a altas temperaturas. Seus resultados são apresentados no Gráfico 20 e na Tabela 24.

Gráfico 20 - Módulo de elasticidade x Temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 - Média dos módulos de elasticidade.

| | Módulo de elasticidade | | | |
|------|------------------------|-------|------|------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR35 | 45,59 | 23,08 | 9,19 | 1,42 |
| CS35 | 33,93 | 25,68 | 8,67 | 1,42 |
| CR50 | 39,45 | 29,93 | 7,64 | 1,16 |
| CS50 | 38,45 | 28,11 | 8,85 | 1,33 |
| CR70 | 36,04 | 29,09 | 9,85 | NA |
| CS70 | 38,22 | 30,25 | 7,6 | NA |

Fonte: Elaborado pelo autor.

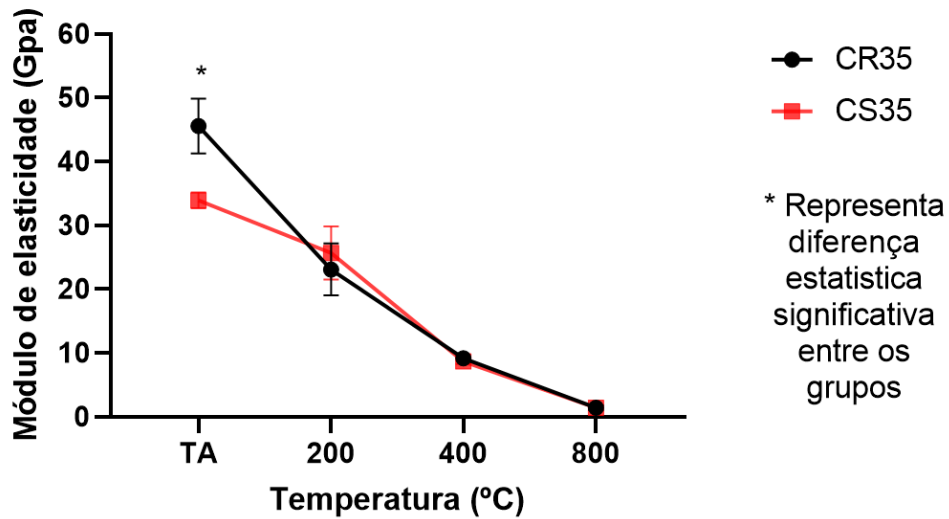
Para todas as classes e tipos de concreto foram verificados decréscimos no módulo com o aumento da temperatura. A degradação maior foi observada nos corpos de prova da classe 70, onde não foi possível a realização do ensaio completo após serem condicionados a 800°C pois se rompiam durante o procedimento. Este comportamento é condizente com o estudado por Lima (2005) e Kakae (2017).

Os resultados demonstram menor redução nos corpos de prova com vermiculita com o aumento da temperatura.

A diferença maior entre os módulos residuais ocorreu entre as temperaturas de 200°C e 400°C, diminuindo essa diferença com o aumento da temperatura e exibindo valores similares indiferente do material.

Similar às outras análises, para melhor compreensão de resultados é feita análise individual de cada classe de concreto, e essas são apresentadas nos Gráficos 21, 22 e 23 e nas Tabelas 25, 26 e 27.

Gráfico 21 - Módulo de elasticidade x Temperatura. Classe 35.



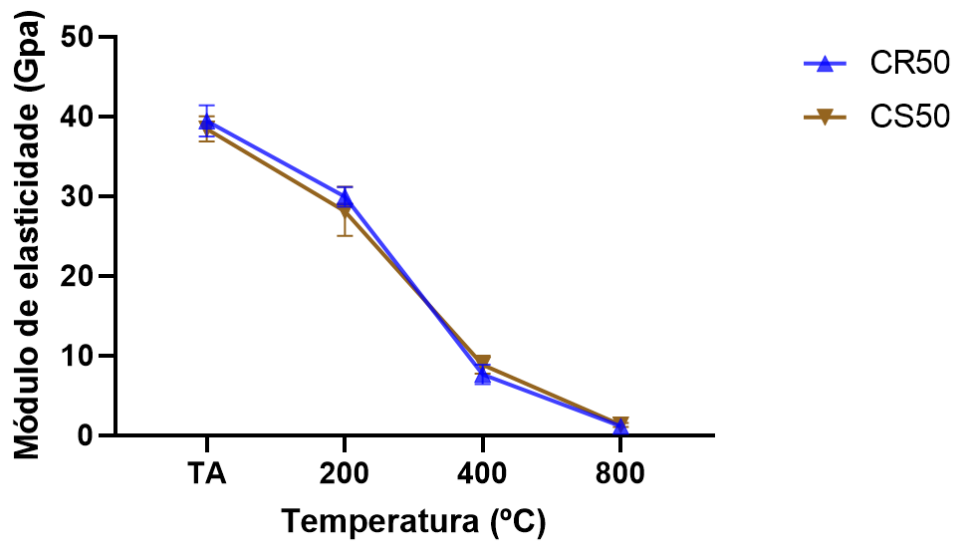
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 25 - Média dos módulos de elasticidade. Classe 35.

| | Módulo de elasticidade | | | |
|------|------------------------|-------|------|------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR35 | 45,59 | 23,08 | 9,19 | 1,42 |
| CS35 | 33,93 | 25,68 | 8,67 | 1,42 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 22 - Módulo de elasticidade x Temperatura. Classe 50.



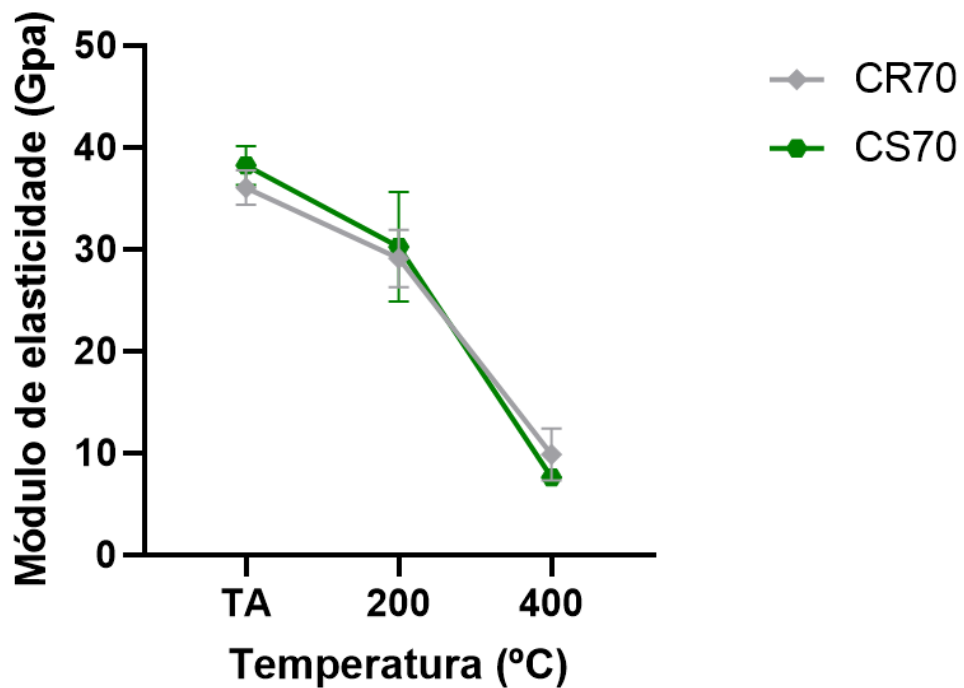
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26 - Média dos módulos de elasticidade. Classe 50.

| | Módulo de elasticidade | | | |
|------|------------------------|-------|------|------|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR50 | 39,45 | 29,93 | 7,64 | 1,16 |
| CS50 | 38,45 | 28,11 | 8,85 | 1,33 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 23 - Módulo de elasticidade x Temperatura. Classe 70.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 27 - Média dos módulos de elasticidade. Classe 70.

| | Módulo de elasticidade | | | |
|------|------------------------|-------|------|-----|
| | TA | 200 | 400 | 800 |
| CR70 | 36,04 | 29,09 | 9,85 | NA |
| CS70 | 38,22 | 30,25 | 7,6 | NA |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em todas as situações de análise dos resultados de módulo, observa-se uma redução com o aumento da temperatura independentemente do tipo e classe de resistência. Tais reduções são justificáveis devido ao volume de poros capilares que são os principais responsáveis pela porosidade da pasta de cimento endurecida e sob o efeito de altas temperaturas o seu volume tende a incrementar as pressões internas e condizem com o estudado por Vydra (2001).

Apenas no concreto de classe 35 o uso da vermiculita apresenta menor redução do valor de módulo, em TA apresenta valor mais baixo que o CR, porém essa diferença se desfaz com a elevação do gradiente de temperatura.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho visou analisar a diferença de variações em diversos parâmetros entre diferentes traços distintos de concreto, com resistências diferentes como referência e com a substituição de vermiculita. Portanto, alcançou os objetivos propostos inicialmente: comparação entre traços diferentes, além da criação de banco de dados para futuras simulações computacionais do comportamento dos mesmos.

Em relação à comparação, pôde ser observado:

- a) O concreto com vermiculita apresenta menor trabalhabilidade que o concreto convencional;
- b) De acordo com a análise visual, todos os concretos apresentam pequenas fissuras a 400°C, não houve diferença na coloração, e nem diferença visível entre os materiais de mesma classe para nenhuma temperatura;
- c) Os concretos apresentam perdas de massas gradativas com o aumento de temperatura;
- d) Existe a tendência de queda de valor de VPU com a elevação de temperatura, e concretos em que houve a substituição apresentaram menores perdas;
- e) A resistência à compressão no CS foi reduzida em temperatura ambiente apenas no concreto de classe 70, quando comparada ao CR;
- f) Apenas os concretos de classe 70 apresentam perdas de resistência a compressão à 200°C;
- g) Todos os concretos quando submetidos à 800°C apresentam resistências similares, e o emprego da vermiculita se justifica por influenciar em menores perdas proporcionais;
- h) Existe a tendência de queda do valor de resistência à tração por compressão diametral com o acréscimo de temperatura para todos os concretos estudados, e salienta-se os concretos de classe 70 que, após 800°C não suportaram ser manuseados;
- i) Todos as classes e tipos de concreto apresentam decréscimos no módulo de elasticidade com o aumento de temperatura, sendo o CR70 e CS70 após o condicionamento a 800°C se desfizeram, impossibilitando a execução do ensaio;
- j) Os resultados de ensaios de módulo de elasticidade demonstram menor redução do parâmetro em corpos de prova de concretos com vermiculita com o aumento da temperatura.

k) Portanto, pode-se comprovar a eficiência da substituição parcial da vermiculita pelo agregado miúdo na composição de diferentes classes de concreto quando submetido a altas temperaturas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Avaliação da substituição de agregado graúdo por vermiculita;
- b) Avaliação da substituição de ambas as areias por vermiculita;
- c) Analisar a diferença dos efeitos se a velocidade de elevação de temperatura fosse reduzida ($0,5^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$);

REFERÊNCIAS

- AKCA, A. H.; ZIHNIOGLU, N. O. **High performance concrete under elevated temperatures**. Construction and building materials, v. 44, p. 317-328, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257389607_High_performance_concrete_under_elevated_temperatures. Acesso em: 11 nov. 2022.
- AL-BAIJAT, H. M. **The use of basalt aggregates in concrete mixes in Jordan**. Jordan Journal of Civil Engineering, Jordan, v. 2, n. 1, p. 63-70, 2008. Disponível em: <https://jjce.just.edu.jo/issues/paper.php?p=40.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ALMEIDA, I. R. de. **Concretos de Alto Desempenho**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações. São Paulo: Ibracon, 2005. V2, Cap. 38, p. 1159-1193.
- ANDERBERG, Y. **Spalling phenomena of HPC and OC**. In: Proceeding of the International Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete, 1., 1997, Gaithersburg. Anais eletrônicos...Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1997. Disponível em: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build97/PDF/b97074.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2020.
- ANGELIN, A. F. **Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais**. 2014. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/267702>. Acesso em: 14 nov. 2020.
- ASSIS, L. S. de. **Avaliação da influência da temperatura no dano do concreto via modelagem computacional**. 2019. 73 p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/9551>. Acesso em: 24 mar. 2021
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 16889** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, p. 9, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_030_2004_es.pdf. Acesso em: 24 junho. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 16973** – Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, p. 3, 2021. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17827/material/Nbr_7211_2005.pdf. Acesso em: 24 junho. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 5738** - Versão Corrigida: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, p. 9, 2015. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_030_2004_es.pdf. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 5739** – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, p. 5, 2020. Disponível em:

http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/NBR%20NM%2067%20-%2098_aula.pdf. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 7211** – Versão Corrigida: Agregados para Concreto - Especificações. Rio de Janeiro, p. 9, 2019. Disponível em: <http://files.israel-tecnico-qualidade.webnode.com/200001171-9f525a0480/NBR%207211%20-%20Agregado%20para%20Concreto.pdf>. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 8522-1** – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 20 p, 2021. Disponível em: <https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/36375/nbr8522-concreto-determinacao-dos-modulos-estaticos-de-elasticidade-e-de-deformacao-a-compressao>. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 8802** – Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, p. 11, 2019. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/71824282/nbr-8802-1994-concreto-endurecido-determinacao-da-velocidade-de-propagacao-de-on>. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 8953** – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 3 p, 2015. Disponível em: http://www.sinduscon-es.com.br/v2/upload/2032015112422_NBR%208953%20%20Eng%20Eric%20Penedo,%20M.Sc.pdf. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 9778** – Versão Corrigida: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, p. 4, 2005. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/74640128/nbr-9778-2009-argamassa-e-concreto-endurecidos-determinacao-da-absorcao-de-agua->. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 248** – Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, p. 6, 2003. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosupload/17827/material/nbr_nm248_2003.pdf. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 45** – Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, p. 8, 2006. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/89912256/nbr-nm-45-06-agregados-determinacao-da-massa-unitaria-e-do-volume-de-vazios>. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 52** – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de

Janeiro, p. 6, 2009. Disponível em:

<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17827/material/NBR%20NM%2052%20-.pdf>. Acesso em: 24 junho. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR NM 53** –

Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, p. 8, 2009. Disponível em

http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17827/material/Nbr_nm53_2003.pdf. Acesso em: 24 junho. 2022.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim.** 1998.

Dissertação Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998. Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3178/000333389.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 5 set. 2021.

BARROS, I. M. da S. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado.** 2018. 86f. Dissertação de Mestrado - Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/25165>. Acesso em: 7 jul. 2021.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos pra áreas de veículos leves.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 133 p. 2013. Disponível em:

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072013-155819/publico/Dissertacao_Rafael_Batezin.pdf. Acesso em: 9 jul. 2021.

BODNAROVÁ, J. VÁLEK, L. SITEK, J. FOLDYNA, Effect of high temperatures on cement composite materials in concrete structures. **Acta Geodynamica et Geomaterialia**, DOI: 10.13168/AGG.2013.0017. ISSN 1214-9705. 10 (2013), pp 173-180.

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F. Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato. In: **Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica.** João Pessoa, 2003.

COELHO, A. C. **Fatores determinantes de qualidade de vida física e mental em pacientes com doença pulmonar intersticial: uma análise multifatorial.** 2009. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Medicina, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Disponível em:

<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/16359/000695147.pdf?sequence=1>. Acesso em: 4 set. 2021.

DAL PONT, S.; EHRLACHER, A. Numerical and experimental analysis of chemical dehydration, heat and mass transfers in a concrete hollow cylinder submitted to high temperatures. **International journal of heat and mass transfer**, v. 47, n. 1, p. 135-147, 2004.

- DIAS, D. M.; CALMON, J. L.; OLIVEIRA, C. de S. Argamassa de revestimento com adição de vermiculita expandida submetida a temperaturas elevadas. In: **Congreso CONPAT 2019, Tuxtla Gutiérrez**, Chiapas. 2019.
- DRZYMAŁA, T. et al. Effects of high temperature on the properties of high performance concrete (HPC). **Procedia Engineering**, v. 172, p. 256-263, 2017. DOI 10.1016/j.proeng.2017.02.108 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315368886_Effects_of_High_Temperature_on_the_Properties_of_High_Performance_Concrete_HPC Acesso em: 15 set. 2021.
- ERGÜN, A. *et al.* The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. **Fire safety journal**, v. 55, p. 160-167, 2013.
- FERNANDES, F. P. D. **Análise Numérica de Vigas Mistas de Madeira e Concreto**. 2018. 174 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/442522962/Analise-Numerica-de-Vigas-Mistas-de-Madeira-e-Concreto>. Acesso em: 19 mar. 2021.
- FERREIRA, A. P. G. **Modelagem dos fenômenos de transporte termo-hídricos em meios porosos submetidos a temperaturas elevadas**: Aplicação a uma bicamada rocha-concreto. 2011. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/3550/1/annapaulaguidaferreira.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2021.
- FRANÇA, S. C. A. *et al.* Vermiculita, mais que um mineral termo acústico. In: **Anais do IV Simpósio De Minerais Industriais Do Nordeste**, 2016, João Pessoa: Cetem, 2016. p. 126-136.
- GRATTAN-BELLEW, P. E. Microstructural Investigation of Deteriorated Portland Cement Concretes. **Construction and Building Materials**. Vol. 10. Issue 1. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, February, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0950061895000666?via%3Dihub>. Acesso em: 21 abr. 2021.
- HAGER, I. Colour change in heated concrete. **Fire Technology**, v. 50, n. 4, p. 945-958, 2014.
- HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais... Porto Alegre, RS. 1997.
- ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Cap, v. 36, 2011.
- KAKAE, N. *et al.* Physical and thermal properties of concrete subjected to high temperature. **Journal of advanced concrete technology**, v. 15, n. 6, p. 190-212, 2017.
- KODUR, V. K. R.; SULTAN, M. A. Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete. **Journal of materials in civil engineering**, v. 15, n. 2, p. 101-107, 2003.
- KOMONEN, J.; PENTTALA, V. Effects of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cement pastes. **Fire technology**, v. 39, n. 1, p. 23-34, 2003.

LIBORIO, J. B. L. . Concreto de alto desempenho. **In: Anais do Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais**, 2002, Sobral/CE.

LIMA, R. C. A. de. **Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas**. 2005. Dissertação de doutorado - Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5085/000509828.pdf?sequence=1&>

LORENZON, A. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas**. 2014. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/14446>. Acesso em: 03 set. 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. McGraw-Hill Education, 2014.

MOHAMEDBHAI, G. T. G. The residual strength of concrete subjected to elevated temperatures. **Concrete**, v. 17, n. 12, 1983. Disponível em: <https://www.worldcat.org/title/concrete-london/oclc/646276865>. Acesso em 09 nov 2021.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. P. A Ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 32, n. 1, p. 47-55, 2011.

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review. **Cement and Concrete Composites**. Vol. 22. Issue 5. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, October, 2000.

NEVILLE, Adam; AITCIN, Pierre-Claude. High performance concrete — An overview. **Materials and structures**, v. 31, n. 2, 1998. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/274544862/NEVILLE-AITCIN-1998-High-Performance-Concrete-An-Overview>. Acesso em 09 mai 2021.

PERALTA, M. M. C. **Tratamento químico de uma vermiculita visando seu uso em compósitos de polipropileno**. 2009. 64 p. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. DOI 10.11606/D.3.2009.tde-13102009-161509. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-13102009-161509/publico/dissertacao.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2021.

RASHAD, A. M. Vermiculite as a construction material—A short guide for Civil Engineer. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 53-62, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816312831>. Acesso em 09 abr 2021.

REIS, Elpídio. Vermiculita no Brasil—Situação Atual. **Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT)/Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)**, p. 1-19, 2002. Disponível em: <https://docplayer.com.br/3474370-Vermiculita-no-brasil-situacao-atual-centro-de-gestao-e-estudos-estrategicos-ciencia-tecnologia-e-inovacao.html>. Acesso em 12 jun 2021.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto Leve Estrutural: produção, propriedades, microestruturas e aplicações**. São Paulo: Ed. PINI, 2009.

SADRMOMTAZI, A.; GASHTI, S. H.; TAHMOURESI, B. Residual strength and microstructure of fiber reinforced self-compacting concrete exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 116969, 2020. Disponível em: <https://structurae.net/en/literature/journal-article/residual-strength-and-microstructure-of-fiber-reinforced-self-compacting-concrete-exposed-to-high-temperatures>. Acesso em 21 abr 2021.

SANTOS, A. D. de O. L. **Avaliação das Propriedades de Concreto Leve com substituição do Agregado miúdo convencional por Vermiculita Expandida**. 2018. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/2467/2/AnyeleDOLS_MONO.pdf. Acesso em 21 mar 2021.

SANTOS, F. A. **Estudo da variação da relação SiO₂/Al₂O₃ na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes**. 2017. 81 p. Tese de mestrado - Centro Acadêmico do Agreste do Núcleo de Tecnologia da Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/27562>. Acesso em: 5 jul. 2021.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. Final Report - Civil Engineering of National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, IA, USA, 2006.

SILVA, C. M. **Estudo de Traço para Produção de Blocos de Vedação utilizando como parte do Agregado a Vermiculita**. 2014. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Civil da Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2014. https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UCB-2_2c9740d8034e003052edb7030b291cd3. Acesso em 29 ago 2021.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. 164f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ngsilva/atuacoes/apresentacao/DISSERTACaO%20MESTRADO%20-%20NARCISO.pdf>. Acesso em 02 abr 2021.

TROXELL, G. E.; DAVIS, H. E.; KELLY, J. W. **Composition and properties of concrete**. 2ª ed. New York. 1968.

TUTIKIAN, B. F; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.. Vermiculita. IN: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 865-887.

VYDRA, V., VODÁK, F., KAPICKOVÁ, O. AND HOSKOVÁ, S., Effect of temperature on porosity of concrete for nuclear-safety structures, **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1023-1026, 2001.

APÊNDICE A – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

Tabela 28 - Resultados individuais dos CPs CR35 para ensaios não destrutivos em TA.

| ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS CR35 | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| CP | Msub | Msss | Ms | v = TA |
| 1 | 2271,3 | 3822,7 | 3803,5 | 4760 |
| 2 | 2261,6 | 3838,3 | 3821,2 | 4600 |
| 3 | 2224,5 | 3766,4 | 3749,3 | 4800 |
| 4 | 2229,9 | 3784,2 | 3766,8 | 4760 |
| 5 | 2236,8 | 3800,3 | 3782,6 | 4790 |
| 6 | 2251,9 | 3805,3 | 3788 | 4760 |
| 7 | 2268,2 | 3820,9 | 3802,4 | 4790 |
| 8 | 2307,2 | 3889,9 | 3873,1 | 4750 |
| 9 | 2232,7 | 3789,2 | 3767,8 | 4630 |
| 10 | 2274,1 | 3834,2 | 3816,8 | 4750 |
| 11 | 2264,1 | 3850,9 | 3832,2 | 4710 |
| 12 | 2216,7 | 3760,1 | 3740,4 | 4630 |
| 13 | 2253 | 3822,8 | 3805,6 | 4730 |
| 14 | 2291,9 | 3873,5 | 3854,4 | 4740 |
| 15 | 2216,4 | 3770,2 | 3753 | 4760 |
| 16 | 2259,6 | 3815,6 | 3797,4 | 4640 |
| 17 | 2210,8 | 3784,1 | 3763,2 | 4790 |
| 18 | 2213 | 3781,5 | 3763,1 | 4760 |
| 19 | 2211,8 | 3768,7 | 3749,1 | 4780 |
| 20 | 2264 | 3831,2 | 3815,2 | 4730 |
| 21 | 2214,5 | 3776,6 | 3757,4 | 4730 |
| 22 | 2263,7 | 3831,1 | 3813,7 | 4700 |
| 23 | 2260,4 | 3820 | 3801,5 | 4690 |
| 24 | 2202,8 | 3749,8 | 3731,9 | 4770 |
| 25 | 2272,8 | 3852,6 | 3835,1 | 4680 |
| 26 | 2281,4 | 3828,6 | 3809,8 | 4790 |
| 27 | 2217,4 | 3767,4 | 3749,7 | 4780 |
| 28 | 2209,7 | 3762,8 | 3745,2 | 4690 |
| 29 | 2291,4 | 3746,7 | 3728,1 | 4760 |
| 30 | 2247,9 | 3810,4 | 3794,5 | 4740 |
| 31 | 2245,4 | 3812,3 | 3796,4 | 4700 |
| 32 | 2160,1 | 3725,4 | 3709,2 | 4690 |
| 33 | 2213 | 3770,2 | 3752,1 | 4630 |
| 34 | 2157,6 | 3734,1 | 3715,8 | 4600 |
| 35 | 2201,2 | 3754,6 | 3737,7 | 4630 |
| 36 | 2225,1 | 3783,7 | 3768,3 | 4630 |
| 37 | 2221,5 | 3783,6 | 3764,6 | 4690 |
| 38 | 2215,9 | 3768,4 | 3750,1 | 4750 |
| 39 | 2207,9 | 3756,3 | 3739,1 | 4760 |
| 40 | 2198,8 | 3749,2 | 3730,1 | 4690 |
| 41 | 2183,3 | 3710,7 | 3694,9 | 4760 |
| 42 | 2241,1 | 3815 | 3796,7 | 4700 |
| 43 | 2207 | 3756,1 | 3740 | 4760 |
| 44 | 2195,5 | 3733,3 | 3638,9 | 4750 |
| 45 | 2228,4 | 3795,3 | 3716,5 | 4790 |
| 46 | 2261 | 3831,7 | 3819,3 | 4790 |
| 47 | 2193,8 | 3736,5 | 3718,9 | 4800 |
| 48 | 2212,4 | 3766,6 | 3752,2 | 4780 |
| 49 | 2181,2 | 3727,3 | 3711 | 4700 |
| 50 | 2228,6 | 3786,4 | 3769,7 | 4700 |
| 51 | 2222,2 | 3776,7 | 3758,7 | 4760 |
| 52 | 2214,5 | 3768,1 | 3749,8 | 4730 |
| 53 | 2222,4 | 3771,8 | 3756,9 | 4790 |
| 54 | 2185,3 | 3748,9 | 3733,1 | 4750 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 29 - Resultados individuais dos CPs CS35 para ensaios não destrutivos em TA.

| ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS CS35 | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| CP | Msub | Msss | Ms | v = TA |
| 1 | 2109,1 | 3745,1 | 3733,8 | 4420 |
| 2 | 2159 | 3727,1 | 3709,4 | 4390 |
| 3 | 2141,6 | 3717,7 | 3708,6 | 4430 |
| 4 | 2157,2 | 3735,1 | 3719 | 4440 |
| 5 | 2090 | 3641,4 | 3628,7 | 4400 |
| 6 | 2131,4 | 3690,2 | 3679,2 | 4440 |
| 7 | 2148,3 | 3713,5 | 3702,5 | 4420 |
| 8 | 2148,9 | 3725,4 | 3705,2 | 4390 |
| 9 | 2166,1 | 3748,6 | 3735 | 4420 |
| 10 | 2162,8 | 3742,6 | 3732,9 | 4380 |
| 11 | 2131,3 | 3695,9 | 3678,4 | 4420 |
| 12 | 2146,4 | 3715,8 | 3704,5 | 4410 |
| 13 | 2151,8 | 3720,5 | 3712,1 | 4440 |
| 14 | 2140,7 | 3691,9 | 3675,5 | 4400 |
| 15 | 2129,8 | 3694 | 3682,4 | 4390 |
| 16 | 2071,8 | 3614,2 | 3600 | 4460 |
| 17 | 2114,2 | 3633,6 | 3619,2 | 4430 |
| 18 | 2162,7 | 3738,8 | 3728,6 | 4380 |
| 19 | 2163,5 | 3730,6 | 3711,4 | 4410 |
| 20 | 2138,6 | 3721,4 | 3709,3 | 4420 |
| 21 | 2137,8 | 3710,6 | 3692,9 | 4440 |
| 22 | 2141,1 | 3692,8 | 3671,6 | 4400 |
| 23 | 2153,3 | 3725,8 | 3706 | 4410 |
| 24 | 2125,7 | 3694,8 | 3689,8 | 4430 |
| 25 | 2139,7 | 3697,5 | 3680,5 | 4420 |
| 26 | 2156,4 | 3702,7 | 3691 | 4390 |
| 27 | 2131,4 | 3691,2 | 3675,6 | 4430 |
| 28 | 2143,9 | 3712,7 | 3699,7 | 4440 |
| 29 | 2120,6 | 3664,3 | 3642,5 | 4400 |
| 30 | 2163,5 | 3736,3 | 3725,8 | 4410 |
| 31 | 2133,4 | 3688,3 | 3678,2 | 4420 |
| 32 | 2090,2 | 3611,7 | 3586,2 | 4440 |
| 33 | 2152,4 | 3717,3 | 3692,4 | 4400 |
| 34 | 2153,1 | 3713,5 | 3692,1 | 4410 |
| 35 | 2146 | 3713,4 | 3695,7 | 4430 |
| 36 | 2098,3 | 3644,4 | 3623,4 | 4420 |
| 37 | 2128,2 | 3680,2 | 3655,7 | 4390 |
| 38 | 2163,3 | 3725,9 | 3708,5 | 4420 |
| 39 | 2162,2 | 3724,4 | 3704 | 4380 |
| 40 | 2141,2 | 3695,8 | 3681 | 4420 |
| 41 | 2129,5 | 3682,1 | 3662 | 4410 |
| 42 | 2142,1 | 3680,5 | 3665,1 | 4440 |
| 43 | 2144,7 | 3708,9 | 3686 | 4400 |
| 44 | 2158,5 | 3734,6 | 3717,3 | 4390 |
| 45 | 2134,2 | 3695,4 | 3674,4 | 4460 |
| 46 | 2129,6 | 3679,7 | 3663,7 | 4430 |
| 47 | 2160,1 | 3725,1 | 3704,1 | 4380 |
| 48 | 2136,4 | 3746,3 | 3731,8 | 4410 |
| 49 | 2151,6 | 3714 | 3693,8 | 4420 |
| 50 | 2149,3 | 3703,2 | 3688,8 | 4440 |
| 51 | 2163,7 | 3732,3 | 3718,4 | 4420 |
| 52 | 2152 | 3717,9 | 3694,9 | 4410 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 30 - Resultados individuais dos CPs CR50 para ensaios não destrutivos em TA.

| ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS CR50 | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| CP | Msub | Msss | Ms | v = TA |
| 1 | 2134,3 | 3690,6 | 3677,9 | 4590 |
| 2 | 2214 | 3726,7 | 3713,9 | 4510 |
| 3 | 2144,5 | 3762,8 | 3753,7 | 4660 |
| 4 | 2203,1 | 3762,6 | 3752,7 | 4670 |
| 5 | 2178,9 | 3743,5 | 3731,3 | 4660 |
| 6 | 2122 | 3762,7 | 3753,8 | 4560 |
| 7 | 2148,2 | 3823,9 | 3812,9 | 4650 |
| 8 | 2177,5 | 3753,1 | 3743,7 | 4660 |
| 9 | 2221,3 | 3731,9 | 3720,6 | 4590 |
| 10 | 2207,1 | 3748,7 | 3738,4 | 4610 |
| 11 | 2229,4 | 3737,4 | 3730,6 | 4600 |
| 12 | 2120,3 | 3713,3 | 3707,2 | 4650 |
| 13 | 2171,4 | 3765,8 | 3756,9 | 4640 |
| 14 | 2109,2 | 3661,6 | 3655,1 | 4510 |
| 15 | 2155,8 | 3755,6 | 3744,2 | 4640 |
| 16 | 2205,7 | 3759,9 | 3751,6 | 4680 |
| 17 | 2142,6 | 3717,8 | 3708,8 | 4610 |
| 18 | 2175,2 | 3705,3 | 3700,8 | 4640 |
| 19 | 2212,3 | 3771,4 | 3757,8 | 4610 |
| 20 | 2217 | 3774,5 | 3766,9 | 4570 |
| 21 | 2184,2 | 3741,1 | 3734,4 | 4590 |
| 22 | 2190,3 | 3734,2 | 3728,3 | 4650 |
| 23 | 2172,5 | 3720,2 | 3715,4 | 4610 |
| 24 | 2229,4 | 3786,8 | 3782,8 | 4610 |
| 25 | 2185,2 | 3728,7 | 3716,4 | 4510 |
| 26 | 2207,7 | 3751,5 | 3746,8 | 4560 |
| 27 | 2212,4 | 3771,7 | 3726,1 | 4610 |
| 28 | 2193,9 | 3730,1 | 3663,1 | 4640 |
| 29 | 2174 | 3714,9 | 3711,2 | 4640 |
| 30 | 2187,8 | 3735,6 | 3730,4 | 4660 |
| 31 | 2226,1 | 3777,9 | 3772,5 | 4570 |
| 32 | 2235,2 | 3800,7 | 3796,2 | 4660 |
| 33 | 2204,6 | 3745,9 | 3740,2 | 4590 |
| 34 | 2270,6 | 3842,1 | 3836,9 | 4640 |
| 35 | 2181,8 | 3725,1 | 3715,4 | 4530 |
| 36 | 2217,5 | 3787,2 | 3779,1 | 4660 |
| 37 | 2208,2 | 3755,3 | 3749,7 | 4680 |
| 38 | 2189,2 | 3746,2 | 3741,7 | 4600 |
| 39 | 2186,1 | 3727,2 | 3721,7 | 4670 |
| 40 | 2203 | 3753,9 | 3746,3 | 4650 |
| 41 | 2191,7 | 3721,3 | 3713,8 | 4660 |
| 42 | 2183,4 | 3740,9 | 3735 | 4650 |
| 43 | 2212,1 | 3773,5 | 3764,9 | 4670 |
| 44 | 2207,8 | 3771,6 | 3764,9 | 4570 |
| 45 | 2198,1 | 3739,9 | 3734,9 | 4650 |
| 46 | 2194,7 | 3741,4 | 3735,9 | 4590 |
| 47 | 2193,4 | 3750 | 3743,9 | 4640 |
| 48 | 2178,3 | 3730,1 | 3720,8 | 4610 |
| 49 | 2241,7 | 3811,4 | 3805,5 | 4600 |
| 50 | 2151,2 | 3678,9 | 3673 | 4590 |
| 51 | 2189,9 | 3734,5 | 3724,6 | 4610 |
| 52 | 2222,8 | 3779,4 | 3773,1 | 4610 |
| 53 | 2176,1 | 3722,2 | 3713,7 | 4560 |
| 54 | 2201,5 | 3750,9 | 3741 | 4640 |
| 55 | 2216,8 | 3776,6 | 3767,3 | 4670 |
| 56 | 2227,8 | 3789,4 | 3780,1 | 4560 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31 - Resultados individuais dos CPs CS50 para ensaios não destrutivos em TA.

| ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS CS50 | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| CP | Msub | Msss | Ms | v = TA |
| 1 | 2170,4 | 3706,3 | 3698,8 | 4590 |
| 2 | 2245,7 | 3827 | 3812,7 | 4570 |
| 3 | 2216,1 | 3761,4 | 3754,5 | 4570 |
| 4 | 2174,8 | 3716,7 | 3706,9 | 4600 |
| 5 | 2203,3 | 3751,4 | 3743,8 | 4520 |
| 6 | 2206,8 | 3771,9 | 3764,1 | 4610 |
| 7 | 2201,2 | 3751,5 | 3746,1 | 4520 |
| 8 | 2178,2 | 3723,5 | 3716,2 | 4450 |
| 9 | 2211,5 | 3753,9 | 3747 | 4510 |
| 10 | 2224,5 | 3793,9 | 3786,5 | 4550 |
| 11 | 2194,1 | 3751 | 3745,9 | 4410 |
| 12 | 2176,9 | 3711,3 | 3706,2 | 4610 |
| 13 | 2177 | 3733,1 | 3728,4 | 4560 |
| 14 | 2189,1 | 3724,9 | 3717 | 4410 |
| 15 | 2238,4 | 3807,8 | 3799,6 | 4630 |
| 16 | 2205 | 3764,8 | 3758,5 | 4600 |
| 17 | 2192,5 | 3735,4 | 3727,9 | 4410 |
| 18 | 2206,6 | 3746,5 | 3742,4 | 4520 |
| 19 | 2217,1 | 3766,2 | 3761,5 | 4650 |
| 20 | 2214 | 3769,4 | 3764,9 | 4420 |
| 21 | 2212,6 | 3770,3 | 3766,9 | 4650 |
| 22 | 2209 | 3766,9 | 3760,9 | 4520 |
| 23 | 2214,8 | 3750,7 | 3744,9 | 4600 |
| 24 | 2223,5 | 3779,7 | 3770,4 | 4610 |
| 25 | 2204,9 | 3754,9 | 3749,1 | 4590 |
| 26 | 2214,7 | 3767,3 | 3756 | 4520 |
| 27 | 2164,1 | 3701,4 | 3694,2 | 4570 |
| 28 | 2224 | 3778 | 3771,9 | 4510 |
| 29 | 2175 | 3703,3 | 3696,6 | 4410 |
| 30 | 2204,7 | 3759,2 | 3751,2 | 4550 |
| 31 | 2168,2 | 3698,8 | 3693,1 | 4630 |
| 32 | 2232,1 | 3799 | 3793,3 | 4600 |
| 33 | 2227,1 | 3781,4 | 3774,7 | 4420 |
| 34 | 2209,8 | 3770,3 | 3764,2 | 4410 |
| 35 | 2186,7 | 3736,6 | 3729 | 4570 |
| 36 | 2188,6 | 3729,2 | 3720,3 | 4560 |
| 37 | 2213,9 | 3763,4 | 3753,2 | 4410 |
| 38 | 2204,8 | 3762,2 | 3755,7 | 4520 |
| 39 | 2211,6 | 3772,6 | 3764,9 | 4610 |
| 40 | 2195,5 | 3749,4 | 3743,3 | 4450 |
| 41 | 2196,8 | 3741,3 | 3732,6 | 4510 |
| 42 | 2210,4 | 3765,2 | 3757,4 | 4450 |
| 43 | 2166,8 | 3696,4 | 3690,5 | 4570 |
| 44 | 2207,6 | 3756,9 | 3749,6 | 4610 |
| 45 | 2231,9 | 3806,7 | 3799,2 | 4410 |
| 46 | 2213,7 | 3762,8 | 3753,6 | 4600 |
| 47 | 2216,6 | 3777 | 3769,3 | 4630 |
| 48 | 2230,1 | 3793,8 | 3784,4 | 4570 |
| 49 | 2225,7 | 3789,6 | 3782,3 | 4560 |
| 50 | 2201,7 | 3741,6 | 3731,6 | 4550 |
| 51 | 2206,6 | 3747,3 | 3739,1 | 4520 |
| 52 | 2175,7 | 3712 | 3702,2 | 4520 |
| 53 | 2207,3 | 3759,4 | 3750,9 | 4650 |
| 54 | 2219,7 | 3784,8 | 3776,2 | 4450 |
| 55 | 2228 | 3789,2 | 3779 | 4520 |
| 56 | 2216,2 | 3767,3 | 3758,3 | 4450 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 32 - Resultados individuais dos CPs CR70 para ensaios não destrutivos em TA.

| ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS CR70 | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| CP | Msub | Msss | Ms | v = TA |
| 1 | 2223 | 3700,7 | 3673,7 | 4450 |
| 2 | 2204,1 | 3735 | 3718,4 | 4440 |
| 3 | 2199,3 | 3721,6 | 3698 | 4460 |
| 4 | 2153,2 | 3711,7 | 3699,6 | 4440 |
| 5 | 2242,6 | 3721,1 | 3715,6 | 4410 |
| 6 | 2179,2 | 3714,6 | 3709,2 | 4450 |
| 7 | 2248,3 | 3728,9 | 3715,9 | 4440 |
| 8 | 2213,8 | 3746,4 | 3723,7 | 4490 |
| 9 | 2163,7 | 3763,2 | 3730,8 | 4410 |
| 10 | 2168,9 | 3813,9 | 3766,3 | 4550 |
| 11 | 2248,7 | 3738,2 | 3690,8 | 4610 |
| 12 | 2213,5 | 3725,1 | 3698,2 | 4440 |
| 13 | 2223,1 | 3722,4 | 3683,4 | 4450 |
| 14 | 2249,3 | 3737,3 | 3712,8 | 4490 |
| 15 | 2207 | 3772,3 | 3738,9 | 4440 |
| 16 | 2180 | 3790,5 | 3762,5 | 4490 |
| 17 | 2188,8 | 3732,9 | 3679,7 | 4440 |
| 18 | 2203,2 | 3765,9 | 3751,4 | 4480 |
| 19 | 2217,5 | 3791,1 | 3780,7 | 4610 |
| 20 | 2203,1 | 3751,9 | 3701,9 | 4440 |
| 21 | 2168,8 | 3794 | 3683,5 | 4550 |
| 22 | 2241,6 | 3737,3 | 3709,2 | 4450 |
| 23 | 2217,8 | 3755,8 | 3748,8 | 4410 |
| 24 | 2178,3 | 3752 | 3743,6 | 4430 |
| 25 | 2203,7 | 3765,7 | 3745,2 | 4450 |
| 26 | 2181 | 3704,9 | 3688,3 | 4490 |
| 27 | 2187 | 3706,8 | 3656,1 | 4440 |
| 28 | 2213,9 | 3773,4 | 3771,3 | 4450 |
| 29 | 2170,7 | 3736,8 | 3726,5 | 4450 |
| 30 | 2173,3 | 3750,3 | 3743,2 | 4410 |
| 31 | 2191,8 | 3777,9 | 3673,9 | 4470 |
| 32 | 2253,3 | 3818,7 | 3718,1 | 4490 |
| 33 | 2242,5 | 3795,5 | 3728,4 | 4410 |
| 34 | 2185,3 | 3733,2 | 3699,5 | 4450 |
| 35 | 2208,2 | 3752 | 3715,4 | 4440 |
| 36 | 2111,9 | 3751,7 | 3709,4 | 4460 |
| 37 | 2187,7 | 3745,9 | 3715,6 | 4420 |
| 38 | 2193,2 | 3741,3 | 3724,1 | 4490 |
| 39 | 2170,5 | 3718,2 | 3700,7 | 4550 |
| 40 | 2247,8 | 3805,3 | 3766,1 | 4450 |
| 41 | 2170,7 | 3713,4 | 3691 | 4410 |
| 42 | 2212,3 | 3777,4 | 3697,9 | 4440 |
| 43 | 2226 | 3786,6 | 3683,8 | 4450 |
| 44 | 2202,9 | 3757,1 | 3712,7 | 4440 |
| 45 | 2160,8 | 3682,1 | 3648,7 | 4610 |
| 46 | 2192,2 | 3736 | 3702,7 | 4440 |
| 47 | 2197,1 | 3750,3 | 3679,4 | 4410 |
| 48 | 2225,7 | 3776 | 3751,8 | 4450 |
| 49 | 2184,9 | 3733,9 | 3700,6 | 4440 |
| 50 | 2219,4 | 3767,3 | 3701,7 | 4490 |
| 51 | 2187,6 | 3701,2 | 3683,7 | 4550 |
| 52 | 2203 | 3768,4 | 3708,9 | 4450 |
| 53 | 2170,9 | 3759,1 | 3749,2 | 4410 |
| 54 | 2219 | 3782,3 | 3743,5 | 4440 |
| 55 | 2180 | 3748,9 | 3745 | 4450 |
| 56 | 2174,6 | 3775,5 | 3688,5 | 4450 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 - Resultados individuais dos CPs CS70 para ensaios não destrutivos em TA.

| ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS CS70 | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| CP | Msub | Msss | Ms | v = TA |
| 1 | 2076,5 | 3687,9 | 3683,3 | 4310 |
| 2 | 2126,2 | 3705,4 | 3701,8 | 4360 |
| 3 | 2120,4 | 3708,5 | 3697,9 | 4230 |
| 4 | 2075,3 | 3653,0 | 3647,4 | 4400 |
| 5 | 2113,7 | 3698,7 | 3690,1 | 4390 |
| 6 | 2120,0 | 3695,7 | 3691,1 | 4340 |
| 7 | 2120,2 | 3689,6 | 3686,0 | 4490 |
| 8 | 2131,8 | 3706,0 | 3695,4 | 4370 |
| 9 | 2122,6 | 3701,3 | 3695,7 | 4200 |
| 10 | 2099,9 | 3690,8 | 3682,2 | 4210 |
| 11 | 2100,3 | 3667,9 | 3663,3 | 4230 |
| 12 | 2100,7 | 3686,1 | 3682,5 | 4380 |
| 13 | 2146,1 | 3736,9 | 3726,3 | 4260 |
| 14 | 2099,1 | 3678,0 | 3672,4 | 4300 |
| 15 | 2156,2 | 3747,2 | 3738,6 | 4300 |
| 16 | 2109,4 | 3666,8 | 3662,2 | 4400 |
| 17 | 2110,5 | 3668,9 | 3665,3 | 4300 |
| 18 | 2106,6 | 3669,1 | 3658,5 | 4490 |
| 19 | 2108,8 | 3659,1 | 3653,5 | 4230 |
| 20 | 2149,3 | 3700,8 | 3692,2 | 4300 |
| 21 | 2123,1 | 3696,0 | 3691,4 | 4200 |
| 22 | 2127,3 | 3672,1 | 3668,5 | 4310 |
| 23 | 2118,9 | 3665,9 | 3655,3 | 4210 |
| 24 | 2110,7 | 3670,4 | 3664,8 | 4340 |
| 25 | 2116,5 | 3677,9 | 3669,3 | 4380 |
| 26 | 2109,4 | 3653,1 | 3648,5 | 4370 |
| 27 | 2147,6 | 3718,5 | 3714,9 | 4260 |
| 28 | 2134,8 | 3698,4 | 3687,8 | 4230 |
| 29 | 2096,2 | 3655,0 | 3649,4 | 4390 |
| 30 | 2075,0 | 3634,0 | 3625,4 | 4360 |
| 31 | 2076,7 | 3688,1 | 3683,5 | 4340 |
| 32 | 2125,9 | 3705,1 | 3701,5 | 4310 |
| 33 | 2120,8 | 3708,9 | 3698,3 | 4370 |
| 34 | 2075,2 | 3652,9 | 3647,3 | 4300 |
| 35 | 2113,5 | 3698,5 | 3689,9 | 4310 |
| 36 | 2120,2 | 3695,9 | 3691,3 | 4240 |
| 37 | 2119,9 | 3689,3 | 3685,7 | 4380 |
| 38 | 2132,2 | 3676,4 | 3665,8 | 4400 |
| 39 | 2122,5 | 3701,2 | 3695,6 | 4230 |
| 40 | 2099,7 | 3690,6 | 3682,0 | 4390 |
| 41 | 2100,5 | 3668,1 | 3663,5 | 4230 |
| 42 | 2100,4 | 3685,8 | 3682,2 | 4490 |
| 43 | 2146,5 | 3737,3 | 3726,7 | 4260 |
| 44 | 2099,0 | 3677,9 | 3672,3 | 4210 |
| 45 | 2156,0 | 3747,0 | 3738,4 | 4360 |
| 46 | 2109,6 | 3667,0 | 3662,4 | 4260 |
| 47 | 2110,2 | 3668,6 | 3665,0 | 4380 |
| 48 | 2107,0 | 3669,5 | 3658,9 | 4300 |
| 49 | 2108,7 | 3659,0 | 3653,4 | 4310 |
| 50 | 2149,1 | 3700,6 | 3692,0 | 4440 |
| 51 | 2123,3 | 3696,2 | 3691,6 | 4300 |
| 52 | 2127,0 | 3671,8 | 3668,2 | 4400 |
| 53 | 2119,3 | 3666,3 | 3655,7 | 4360 |
| 54 | 2110,6 | 3670,3 | 3664,7 | 4230 |
| 55 | 2116,3 | 3677,7 | 3669,1 | 4200 |
| 56 | 2109,6 | 3653,3 | 3648,7 | 4340 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 34 - Resultados individuais dos CPs CR35 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento.

| ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS CR35 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|
| 200°C | | | 400°C | | | 800°C | | |
| CP | Ms | v | CP | Ms | v | CP | Ms | v |
| 1 | 3686,2 | 3850 | 1 | 3618,2 | 2520 | 1 | 3484,3 | 990 |
| 2 | 3573,7 | 3980 | 2 | 3529,5 | 2670 | 2 | 3429,8 | 1020 |
| 3 | 3596,6 | 3770 | 3 | 3520,8 | 2690 | 3 | 3430,6 | 390 |
| 4 | 3532,8 | 3470 | 4 | 3539,6 | 2520 | 4 | 3452,1 | 300 |
| 5 | 3594,3 | 3610 | 5 | 3517,9 | 2610 | 5 | 3467,8 | 1040 |
| 6 | 3601,6 | 3580 | 6 | 3507,6 | 2560 | 6 | 3524,7 | 910 |
| 7 | 3614,1 | 3480 | 7 | 3525,2 | 2690 | 7 | 3458,4 | 510 |
| 8 | 3806,2 | 3920 | 8 | 3482,5 | 2610 | 8 | 3469,9 | 990 |
| 9 | 3617,2 | 3660 | 9 | 3510,1 | 2670 | | | |
| 10 | 3620,6 | 3950 | 10 | 3526,3 | 2650 | | | |
| 11 | 3571 | 3960 | 11 | 3605,6 | 2600 | | | |
| 12 | 3549,6 | 3600 | 12 | 3590,1 | 2690 | | | |
| 13 | 3628,2 | 3910 | 13 | 3539,4 | 2580 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35 - Resultados individuais dos CPs CS35 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento.

| ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS CS35 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|
| 200°C | | | 400°C | | | 800°C | | |
| CP | Ms | v | CP | Ms | v | CP | Ms | v |
| 1 | 3434,8 | 4440 | 1 | 3385,5 | 2590 | 1 | 3340,3 | 900 |
| 2 | 3485,6 | 4420 | 2 | 3389,4 | 3630 | 2 | 3366,1 | 1100 |
| 3 | 3452,1 | 4440 | 3 | 3360,7 | 2490 | 3 | 3333,4 | 990 |
| 4 | 3468,4 | 4440 | 4 | 3351 | 2680 | 4 | 3357,5 | 890 |
| 5 | 3376,5 | 4400 | 5 | 3391,2 | 2420 | 5 | 3343,1 | 1010 |
| 6 | 3488,9 | 4420 | 6 | 3313,9 | 2530 | 6 | 3379,6 | 950 |
| 7 | 3480,6 | 4390 | 7 | 3409,7 | 2650 | 7 | 3354,3 | 900 |
| 8 | 3516,5 | 4380 | 8 | 3380 | 2620 | 8 | 3353,4 | 980 |
| 9 | 3466,6 | 4390 | 9 | 3418,8 | 2690 | | | |
| 10 | 3456,5 | 4430 | 10 | 3448,8 | 2620 | | | |
| 11 | 3482,1 | 4410 | 11 | 3446,3 | 2560 | | | |
| 12 | 3508,7 | 4420 | 12 | 3373,9 | 2660 | | | |
| 13 | 3488,8 | 4420 | 13 | 3539,4 | 2570 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 36 - Resultados individuais dos CPs CR50 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento.

| ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS CR50 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|-----|
| 200°C | | | 400°C | | | 800°C | | |
| CP | Ms | v | CP | Ms | v | CP | Ms | v |
| 1 | 3621,4 | 3540 | 1 | 3466,2 | 2410 | 1 | 3433,4 | 790 |
| 2 | 3516 | 3620 | 2 | 3483,9 | 2440 | 2 | 3440,7 | 930 |
| 3 | 3521 | 3620 | 3 | 3561,8 | 2400 | 3 | 3469,8 | 780 |
| 4 | 3588,4 | 3980 | 4 | 3479,3 | 2350 | 4 | 3426,8 | 860 |
| 5 | 3545,6 | 3950 | 5 | 3433,2 | 2400 | 5 | 3419,6 | 780 |
| 6 | 3451 | 3820 | 6 | 3512,2 | 2420 | 6 | 3410,5 | 780 |
| 7 | 3513,3 | 3820 | 7 | 3575,4 | 2340 | 7 | 3434,3 | 760 |
| 8 | 3596,9 | 3890 | 8 | 3504,5 | 2470 | 8 | 3451,2 | 770 |
| 9 | 3544,4 | 3920 | 9 | 3515,1 | 2550 | 9 | 3487 | 860 |
| 10 | 3574,3 | 3600 | 10 | 3489,9 | 2420 | | | |
| 11 | 3557,3 | 3550 | 11 | 3453 | 2370 | | | |
| 12 | 3536,8 | 3580 | 12 | 3453,3 | 2430 | | | |
| 13 | 3577,6 | 4020 | 13 | 3514,2 | 2400 | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 37 - Resultados individuais dos CPs CS50 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento.

| ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS CS50 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|-----|
| 200°C | | | 400°C | | | 800°C | | |
| CP | Ms | v | CP | Ms | v | CP | Ms | v |
| 1 | 3534,6 | 3700 | 1 | 3443,6 | 2520 | 1 | 3422,5 | 870 |
| 2 | 3538,5 | 3640 | 2 | 3463,5 | 2450 | 2 | 3480 | 890 |
| 3 | 3577,8 | 3550 | 3 | 3434 | 2140 | 3 | 3422,9 | 850 |
| 4 | 3546,8 | 3960 | 4 | 3505,3 | 2190 | 4 | 3443,1 | 830 |
| 5 | 3610,9 | 3420 | 5 | 3506,3 | 2370 | 5 | 3412,3 | 870 |
| 6 | 3607,5 | 3980 | 6 | 3509,4 | 2340 | 6 | 3362,2 | 760 |
| 7 | 3615,8 | 4050 | 7 | 3504,8 | 2440 | 7 | 3404,7 | 830 |
| 8 | 3548,3 | 3570 | 8 | 3521 | 2550 | 8 | 3459,3 | 840 |
| 9 | 3538,9 | 3720 | 9 | 3483,5 | 2340 | 9 | 3422,8 | 810 |
| 10 | 3473,7 | 3580 | 10 | 3464,6 | 2310 | | | |
| 11 | 3585,2 | 3880 | | | | | | |
| 12 | 3656,2 | 3980 | | | | | | |
| 13 | 3607,6 | 3960 | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 38 - Resultados individuais dos CPs CR70 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento.

| ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS CR70 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|
| 200°C | | | 400°C | | | 800°C | | |
| CP | Ms | v | CP | Ms | v | CP | Ms | v |
| 1 | 3661,7 | 4390 | 1 | 3448,5 | 2800 | 1 | 3362 | 1420 |
| 2 | 3628,8 | 4230 | 2 | 3450,3 | 2770 | 2 | 3365,8 | 1480 |
| 3 | 3615,7 | 4310 | 3 | 3428,1 | 2780 | 3 | 3363,9 | 1450 |
| 4 | 3653,4 | 4270 | 4 | 3477,3 | 2840 | | | |
| 5 | 3615,4 | 4390 | 5 | 3443,1 | 2920 | | | |
| 6 | 3575,2 | 4070 | 6 | 3417,5 | 2880 | | | |
| 7 | 3614,3 | 4300 | 7 | 3476,7 | 2820 | | | |
| 8 | 3660,4 | 4300 | 8 | 3461,6 | 2940 | | | |
| 9 | 3681,1 | 4280 | 9 | 3433,4 | 2940 | | | |
| 10 | 3490,2 | 4210 | 10 | 3419,6 | 2850 | | | |
| 11 | 3721 | 4240 | 11 | 3440,1 | 2840 | | | |
| 12 | 3677,5 | 4440 | | | | | | |
| 13 | 3677,4 | 4280 | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 39 - Resultados individuais dos CPs CS70 para ensaios não destrutivos depois de condicionamento.

| ENSAIOS TÉRMICOS NÃO DESTRUTIVOS CS70 | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|------|-------|--------|------|-------|--------|------|
| 200°C | | | 400°C | | | 800°C | | |
| CP | Ms | v | CP | Ms | v | CP | Ms | v |
| 1 | 3586,5 | 3820 | 1 | 3291 | 2690 | 1 | 3223,5 | 1480 |
| 2 | 3629,6 | 4130 | 2 | 3311,9 | 2620 | 2 | 3232,7 | 1440 |
| 3 | 3597,9 | 4200 | 3 | 3290,3 | 2800 | 3 | 3228,1 | 1460 |
| 4 | 3657,6 | 4260 | 4 | 3309,1 | 2573 | | | |
| 5 | 3616,4 | 4220 | 5 | 3339,9 | 2860 | | | |
| 6 | 3480,1 | 4050 | 6 | 3272,6 | 2790 | | | |
| 7 | 3558,3 | 4160 | 7 | 3323,4 | 2810 | | | |
| 8 | 3511,2 | 4200 | 8 | 3346,5 | 2630 | | | |
| 9 | 3494,2 | 4060 | 9 | 3334,4 | 2810 | | | |
| 10 | 3579,9 | 4270 | 10 | 3342,3 | 2780 | | | |
| 11 | 3567,1 | 3980 | 11 | 3334,2 | 2740 | | | |
| 12 | 3553,9 | 4140 | | | | | | |
| 13 | 3567,2 | 4250 | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ENSAIOS DESTRUTIVOS

Tabela 40 - Resultados individuais dos CPs CR35 para ensaios destrutivos.

| ENSAIOS DESTRUTIVOS CR35 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TA | | | | 200°C | | | | 400°C | | | | 800°C | | | |
| CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME |
| 1 | 36,87 | 2,639 | 41,3 | 1 | 44,54 | 3,298 | 18,54 | 1 | 30,77 | 2,279 | 8,652 | 1 | 7,945 | 0,738 | 1,064 |
| 2 | 35,74 | 4,199 | 49,89 | 2 | 37,37 | 2,979 | 24,29 | 2 | 30,2 | 1,913 | 9,616 | 2 | 6,735 | 0,665 | 1,763 |
| 3 | 37,65 | 4,3 | 31,68 | 3 | 39,18 | 2,473 | 26,42 | 3 | 25,45 | 1,83 | 9,305 | 3 | 7,028 | | 1,427 |
| 4 | 31,83 | 3,409 | | 4 | 34,63 | 3,078 | | 4 | 28,67 | 2,575 | | 4 | 6,939 | | |
| 5 | 34,72 | 2,702 | | 5 | 35,97 | | | | | | | | | | |
| 6 | 40,12 | 3,877 | | 6 | 36,91 | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 41 - Resultados individuais dos CPs CS35 para ensaios destrutivos.

| ENSAIOS DESTRUTIVOS CS35 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TA | | | | 200°C | | | | 400°C | | | | 800°C | | | |
| CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME |
| 1 | 36,75 | 2,97 | 33,07 | 1 | 41,52 | 3,123 | 23,55 | 1 | 27,97 | 1,789 | 8,573 | 1 | 6,417 | 0,659 | 1,695 |
| 2 | 32,39 | 4,068 | 35,38 | 2 | 33,28 | 2,951 | 23,03 | 2 | 27,03 | 1,531 | 9,094 | 2 | 7,054 | 0,516 | 1,146 |
| 3 | 30,83 | 3,508 | 33,33 | 3 | 34,14 | 3,587 | 30,45 | 3 | 29,14 | 1,63 | 8,334 | 3 | 6,595 | | 0,493 |
| 4 | 36,73 | 3,813 | | 4 | 34,14 | 2,435 | | 4 | 25,52 | 1,757 | | 4 | 8,454 | | |
| 5 | 26,93 | 3,425 | | 5 | 37,31 | | | | | | | | | | |
| 6 | 42,67 | 4,125 | | 6 | 39,22 | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 42 - Resultados individuais dos CPs CR50 para ensaios destrutivos.

| ENSAIOS DESTRUTIVOS CR50 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TA | | | | 200°C | | | | 400°C | | | | 800°C | | | |
| CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME |
| 1 | 40,06 | 5,118 | 37,36 | 1 | 44,83 | 2,804 | 31,16 | 1 | 33,42 | 2,222 | 7,215 | 1 | 6,073 | 0,414 | 1,439 |
| 2 | 47,33 | 4,278 | 39,76 | 2 | 41,35 | 2,658 | 28,7 | 2 | 31,72 | 2,928 | 6,697 | 2 | 7,767 | 0,471 | 0,819 |
| 3 | 41,3 | 3,489 | 41,24 | 3 | 49,86 | 3,966 | 19,65 | 3 | 29,69 | 2,932 | 9,019 | 3 | 6,328 | | 1,223 |
| 4 | 43,09 | 3,638 | | 4 | 47,56 | 2,979 | | 4 | 32,58 | 1,792 | | 4 | 8,2 | | |
| 5 | | 3,492 | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | 3,17 | | | | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 43 - Resultados individuais dos CPs CS50 para ensaios destrutivos.

| ENSAIOS DESTRUTIVOS CS50 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TA | | | | 200°C | | | | 400°C | | | | 800°C | | | |
| CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME |
| 1 | 37,25 | 5,045 | 40,25 | 1 | 51,32 | 3,056 | 24,63 | 1 | 34,12 | 2,725 | 9,74 | 1 | 7,13 | 0,659 | 1,601 |
| 2 | 46,12 | 3,708 | 37,24 | 2 | 46,18 | 3,415 | 29,19 | 2 | 30,89 | 2,435 | 9,221 | 2 | 7,741 | 0,525 | 1,257 |
| 3 | 47,44 | 4,199 | 37,85 | 3 | 54,93 | 3,361 | 30,52 | 3 | 34,3 | 2,228 | 7,585 | 3 | 7,563 | | 1,124 |
| 4 | 44,37 | 4,128 | | 4 | 40,85 | 2,868 | | 4 | 30,67 | 2,518 | | 4 | 9,855 | | |
| 5 | | 4,507 | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | 4,51 | | | | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 44 - Resultados individuais dos CPs CR70 para ensaios destrutivos.

| ENSAIOS DESTRUTIVOS CR70 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| TA | | | | 200°C | | | | 400°C | | | | 800°C | | | |
| CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME |
| 1 | 70 | 5,001 | 36,43 | 1 | 54,33 | 4,784 | 32,02 | 1 | 36,49 | 2,343 | 7,518 | 1 | 10,94 | | |
| 2 | 64,15 | 3,543 | 34,21 | 2 | 52,3 | 4,319 | 26,42 | 2 | 28,35 | 2,298 | 9,465 | 2 | 10,5 | | |
| 3 | 58,29 | 5,418 | 37,49 | 3 | 46,28 | 4,803 | 28,82 | 3 | 34,94 | 2,028 | 12,56 | 3 | 10,72 | | |
| 4 | 65,57 | 4,23 | | 4 | 47,25 | 3,721 | | 4 | 31,25 | 2,12 | | | | | |
| 5 | | 6,242 | | 5 | | | | | | | | | | | |
| 6 | | 4,393 | | 6 | | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 45 - Resultados individuais dos CPs CS70 para ensaios destrutivos.

| ENSAIOS DESTRUTIVOS CS70 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| TA | | | | 200°C | | | | 400°C | | | | 800°C | | | |
| CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME | CP | Rcomp | Rtraç | ME |
| 1 | 50,74 | 5,153 | 37,68 | 1 | 38,43 | 3,721 | 24,97 | 1 | 27,81 | 2,613 | 7,483 | 1 | 8,429 | | |
| 2 | 62,58 | 5,099 | 40,33 | 2 | 47,08 | 5,118 | 35,71 | 2 | 29,42 | 2,461 | 7,708 | 2 | 8,492 | | |
| 3 | 56,47 | 4,714 | 36,65 | 3 | 52,01 | 3,855 | 30,06 | 3 | 30,56 | 2,505 | 10,64 | 3 | 8,461 | | |
| 4 | 57,37 | 4,555 | | 4 | 47,31 | 4,087 | | 4 | 31,64 | 2,346 | | | | | |
| 5 | | 4,332 | | 5 | | | | | | | | | | | |
| 6 | | 4,253 | | 6 | | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor.