

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO PAREDES VEIGA

**INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DO CONCRETO QUANDO SUBMETIDO A TEMPERATURAS
ELEVADAS**

CURITIBA

2022

BRUNO PAREDES VEIGA

**INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO DO CONCRETO QUANDO SUBMETIDO A TEMPERATURAS
ELEVADAS**

**INFLUENCE OF COARSE AGGREGATES ON COMPRESSION RESISTANCE OF
CONCRETE WHEN SUBJECT TO HIGH TEMPERATURES**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Matoski.

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba**



BRUNO PAREDES VEIGA

**INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS GRAÚDOS NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO
QUANDO SUBMETIDO A TEMPERATURAS ELEVADAS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 22 de Agosto de 2022

Dr. Adalberto Matoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Rodrigo Cezar Kanning, Doutorado - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (Ifpr)

Dr. Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/11/2022.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Professor Doutor Adalberto Matoski, que calorosamente aceitou o árduo trabalho de me orientar e que graças a ele tive a oportunidade de realizar este trabalho. Agradeço igualmente aos Professores Doutores Arthur Medeiros e Wellington Mazer, pelas palavras duras, porém extremamente necessárias durante a banca de qualificação, que com toda certeza garantiram uma melhor qualidade nesta pesquisa. Agradeço a CAPES pela bolsa de estudos recebida, sem qual não conseguiria me manter durante esse período, e igualmente ou até mais agradeço à Professora Doutora Karina Querne de Carvalho Passig e ao Professor Doutor João Abdalla Filho pelo trabalho na coordenação do PPGEAC, no período que estive vinculado.

Agradeço ao Felipe Perreto, por me auxiliar na execução dos ensaios e também por ouvir minhas lamúrias. E por falar em lamúrias também agradeço aos colegas Rosangela, Marly.

Também agradeço a minha família, por serem compreensivos pelas minhas ausências. Em especial a minha vó leda, a meus pais. Minha tia e madrinha Perola e ao tio Roberto, por terem me dado abrigo quando precisei. Agradeço aos amigos, em especial Moises, Lauana e Victor, por contribuírem para a realização deste mestrado.

Mas novamente volto a agradecer meus pais, William e Indianara, pelo esforço, dedicação e sacrifícios ao longo desses quase 33 anos.

Agradeço minha esposa Luciana, pelo apoio incondicional nas minhas escolhas, pelo companheirismo e por todo amor que é dado.

Por fim agradeço a todos que estiveram comigo nessa trajetória.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Temendo ter sua obra vulgarizada
A esconde dos olhos do mundo
Em seu baú lá no fundo ela é guardada
Longe dos olhos de algum avaliador
Que venha a quebrar seu inestimável
valor
(FORMIGA, Victor)

RESUMO

O presente trabalho visa analisar a influência dos agregados graúdos, conforme sua composição mineralógica, na resistência à compressão do concreto, em situações de alta temperatura. Para a verificação de hipóteses e desenvolvimento de conclusões, foram produzidos corpos de prova, com diferentes agregados graúdos de origem mineralógica diversos, sendo utilizados agregados de granito, basalto e calcário, devido a sua incidência na região, em que foi desenvolvida a pesquisa. O traço e a relação água/cimento do concreto foram mantidos constantes, variando apenas o tipo de agregado graúdo utilizado. Após o período de 28 dias, os corpos de prova moldados foram submetidos a 4 diferentes faixas de temperatura, 200°C, 400°C, 600°C e 800°C, conforme prática utilizada em pesquisas usadas como referência. Os corpos de prova foram aquecidos sem aplicação de carga e submetidos a temperaturas por 60 minutos. Os ensaios determinaram: a resistência à compressão residual do concreto, a taxa de expansão e a absorção de água. O concreto confeccionado com basalto apresentou resultados 6 pontos percentuais superiores ao granito na temperatura a 800°C. O agregado calcário apresentou ganho de resistência a temperatura de 200°C de 0,01%, já os demais apresentaram perdas de 0,01% e 0,08% para o basalto e o granito respectivamente na resistência à compressão.

Palavras-chave: concreto; temperatura; agregado.

ABSTRACT

The present work aims to analyze the influence of coarse aggregates, according to their composition to their concrete composition, in high temperature parts. For a selection of hypotheses and development of conclusions, the concrete was made with aggregates of different degrees of origin, being used coarse aggregates of granite, basalt and limestone, due to their availability in the region, in which it was developed the research. The amount/cement of the concrete and the quantity of aggregates only varied the coarse aggregate utilized. After a period of 28 days, the molded specimens were subject at 4 different temperature ranges, 200°C, 400°C, 600°C and 800°C, according to practices used in referential studies, for 60 minutes. The experiments determined: the residual compression resistance of the concrete, expansion rate and water absorption. Concrete using with basalt showed 6 percentage points higher than granite at 800°C. The limestone aggregate showed a resistance gain of 0.01% at a temperature of 200°C, while the others showed losses of 0.01% and 0.08% for basalt and granite, respectively. for basalt and granite respectively at their compressive strength.

Keywords: concrete; temperature; aggregate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Representação esquemática dos poros capilares..... | 19 |
| Figura 2 - Representação da estrutura da água dentro do concreto..... | 20 |
| Figura 3 - Condutividade Térmica em relação a temperatura. | 21 |
| Figura 4- Comparação visual sobre o formato das partículas. | 24 |
| Figura 5 - Coeficiente de dilatação térmica dos minerais em ($10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$)..... | 25 |
| Figura 6 - Coeficiente de expansão térmica em função da temperatura, conforme o tipo de agregado..... | 27 |
| Figura 7 - Potencial mineral e minas em produção | 29 |
| Figura 8- Sequência esquemática das reações de C_3S (A) e de $\text{C}_3\text{S}+\text{C}_3\text{A}+\text{gesso}$ (B) | 33 |
| Figura 9 - Pressão nos poros..... | 37 |
| Figura 10 - Curvas de temperatura x tempo..... | 39 |
| Figura 11 - Faixas de temperatura e agregados utilizados. | 42 |
| Figura 12 - Granulometria dos Agregados..... | 44 |
| Figura 13 - Resistência Residual dos corpos de prova analisados. | 53 |
| Figura 14 - Fator de redução $f_c, \theta / f_{ck}$ | 54 |
| Figura 15 - Gráfico de dispersão da resistência à compressão | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química do cimento utilizado | 43 |
| Tabela 2 - Demais informações sobre o agregado graúdo..... | 44 |
| Tabela 3 - Discriminação das quantidades de corpos de prova para um agregado..... | 46 |
| Tabela 4 - Resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados..... | 51 |
| Tabela 5 - ANOVA fator único..... | 56 |
| Tabela 6 - Variação das medidas, conforme a temperatura | 58 |
| Tabela 7 - Ensaio de Absorção de água, índice de vazio e massas específicas. | 60 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----------|
| Quadro 1 - Condutividade térmica do concreto | 22 |
| Quadro 2 - Características dos tipos de cimento..... | 30 |
| Quadro 3 - Efeitos no concreto por faixa de temperatura | 34 |
| Quadro 4 - Quantidades Totais de corpos de prova por ensaio..... | 46 |
| Quadro 5 - Traço Utilizado..... | 47 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| A/C | Relação água/cimento |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AQC | Água quimicamente combinada |
| CP | Cimento Portland |
| C-S-H | Silicatos de Cálcio Hidratados |
| NBR | Normas Brasileiras |
| RMC | Região Metropolitana de Curitiba |
| TRF | Tempo de Resistência ao Fogo |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |

SUMÁRIO

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | Objetivos | 14 |
| 1.2 | Delimitação da Pesquisa | 14 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 15 |
| 2.1 | Concreto | 15 |
| 2.1.1 | Resistência mecânica..... | 16 |
| 2.1.2 | Cura..... | 17 |
| 2.1.3 | Porosidade | 18 |
| 2.1.4 | Propriedades Térmicas | 21 |
| 2.1.5 | Agregados | 23 |
| 2.1.6 | Cimento Portland..... | 29 |
| 2.2 | Temperaturas Elevadas | 34 |
| 2.3 | Mecanismos de Transferência de Calor | 36 |
| 2.4 | Normativas referentes as temperaturas | 38 |
| 2.5 | Estudos sobre o tema | 39 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 42 |
| 3.1 | Materiais | 43 |
| 3.1.1 | Água | 43 |
| 3.1.2 | Cimento..... | 43 |
| 3.1.3 | Agregados | 43 |
| 3.1.4 | Moldagem..... | 45 |
| 3.2 | Ensaio | 47 |
| 3.2.1 | Resistencia à Compressão..... | 48 |
| 3.2.2 | Dimensões dos corpos de prova | 49 |
| 3.2.3 | Absorção de água | 49 |
| 4 | APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS | 51 |
| 4.1 | Ensaio de resistência à compressão | 51 |
| 4.2 | Dimensões dos corpos de prova | 58 |
| 4.3 | Absorção de água | 60 |
| 5 | CONCLUSÕES | 62 |
| | REFERÊNCIAS | 63 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto, quando submetido a temperaturas elevadas, sofre alterações químicas e físicas na sua composição, como a desidratação do cimento e o aumento de poros e tais eventos podem reduzir drasticamente as propriedades mecânicas do elemento estrutural (GAWIN; PESAVENTO; SCHREFLER, 2003). Somado a essas alterações o risco de destacamento do concreto, *spalling*, gera danos à estrutura, gerando uma redução da seção do concreto.

Diante disso as normativas definem a resistência ao fogo de uma edificação, que, conforme o EUROCODE 2 (2004a), pode ser descrita como a capacidade de suportar as cargas durante uma situação de incêndio, por um período específico. As estruturas devem manter as suas capacidades de carga por tempo suficiente, para que seja garantida a segurança dos ocupantes, permitindo uma evacuação segura.

Outro processo decorrente do aquecimento a altas temperatura é o *spalling*, um fenômeno que consiste no destacamento de uma seção superficial do concreto, acarretando uma diminuição de sua seção transversal e a uma possível exposição do elemento armado. Esse destacamento ocorre devido a tensões térmicas e ao aumento da pressão dos poros, com concretos de alta performance sendo sujeito a esse efeito devido a sua baixa permeabilidade (GAWIN; PESAVENTO; SCHREFLER, 2003; FELICETTI; MONTE; PIMENTA, 2017).

Assim, os agregados apresentam um papel importante no comportamento do concreto, quando exposto a altas temperaturas, visto que os agregados correspondem a grande parte do volume total do concreto. Suas características químicas e físicas são determinantes para a predição das alterações no concreto (WU et al., 2001; VIERO, 2010; HAGER et al., 2015; SOLLERO, 2019).

Apesar disso, as normativas, tanto nacionais como internacionais, não apresentam ferramentas suficientes para auxiliar nos diferentes tipos de agregado, em especial quanto a sua origem mineralógica, uma vez que as normativas apresentam atributos simplistas para a classificação dos agregados, dividindo estes em apenas duas classificações, de origem silicosa e origem calcária (EUROCODE 2, 2004a; HAGER et al., 2015; ROBERT; COLINA, 2009; SOLLERO; MORENO JUNIOR; COSTA, 2021).

Desta forma vários estudos são conduzidos visando determinar a influência dos agregados na resistência a altas temperaturas, tanto com experimentação

laboratorial como com a elaboração de modelos matemáticos, como os trabalhos produzidos por Gawin; Pesavento; Schrefler. (2003), Kodur; Dwaikat. (2008), Millard e Pimenta (2019).

De forma sucinta, a elevação da temperatura inicia o processo de dessecação do concreto, que consiste na evaporação da sua água livre, presente nos poros, acarretando uma transferência de massa dentro do concreto. Desta forma, a água livre, migra da superfície quente para o interior do concreto com temperaturas baixas, causando um aumento dos poros, bem como o aumento da pressão interna (MILLARD; PIMENTA, 2019; SOLLERO, 2019).

Continuando com a elevação de temperatura, o concreto começa a sofrer o processo de desidratação, que consiste na perda da água quimicamente combinada, a AQC, desfazendo os cristais de C-S-H (Silicatos de Cálcio Hidratados), sendo significativa em temperaturas acima de 105°C, e afetando o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 a partir de uma temperatura de 500°C, produzindo CaO e H_2O , resultando em uma perda de massa da pasta de concreto, além de diminuir a sua resistência mecânica. Com a água agora livre, o mesmo processo de transferência de massa ocorre (MILLARD; PIMENTA, 2019). E, apesar da transformação do hidróxido de cálcio influir na massa do concreto, a resistência do concreto está conectada, de modo direto, ao C-S-H.

1.1 Contextualização

Segundo a Global Concrete Report (2021), o Brasil é o sétimo maior produtor de concreto no mundo, com uma produção em 2020 estimada em 115 Mm^3/ano . E dada a sua elevada utilização, é necessário conhecer a resposta do concreto as mais diferentes situações.

Apesar de pequena as chances de ruína em uma edificação, a exposição das estruturas a situações de incêndio, têm efeitos desastrosos, tanto financeiros quanto sociais. A exemplo, o edifício Wilton Paes de Almeida, no centro de São Paulo, no ano de 2018, que como conta Amore (2018) era um edifício pertencente ao Governo Federal, abandonado há anos e estava ocupado por movimentos sociais. Após um incêndio, a edificação acabou sofrendo ruína, deixando várias pessoas desabrigadas e acarretando grande prejuízo ao erário público.

Mesmo quando técnicas de recuperação são realizadas, como a reidratação do concreto, a recuperação da resistência não ocorre em sua totalidade e, conforme

Souza (2005), ainda que a estrutura seja recuperada, essa técnica está sobre a influência do tipo de agregado utilizado, no concreto.

A técnica para realizar a reidratação consiste na realização da cura do concreto novamente. Em experimentos que os corpos de prova foram submetidos a temperaturas elevadas e ao processo de cura novamente, Yim; Park e Jun (2019) constataram que apenas com umidades relativas altas ocorrem mudanças químicas, como a reidratação ou carbonatação, porém, a resistência mecânica à tração do concreto pouco foi recuperada.

Além de não recuperar totalmente os danos causados ao concreto, a realização de uma nova cura aos elementos de concreto expostos a altas temperaturas se mostra desafiadora na prática, em especial para o controle de umidade de uma grande área. Por isso a necessidade de manter um aprimoramento constante nas técnicas e nos materiais usados na construção é importante para diminuir os danos causados por acidentes, além de obter resultados melhores com a utilização dos materiais disponíveis na região para a confecção do concreto.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral determinar a influência do agregado no comportamento do concreto quando submetido a temperaturas elevadas.

São objetivos específicos:

- a) determinar a influência dos agregados graúdos na resistência residual do concreto, quando submetido a temperaturas elevadas;
- b) determinar os efeitos dos agregados na expansibilidade do concreto sob efeito da temperatura.

1.2 Delimitação da Pesquisa

A pesquisa desenvolvida tem como foco o estudo da influência dos agregados na resistência ao fogo do concreto, desconsiderando os efeitos oriundo do carregamento, geometria e da armadura do concreto.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão abordados conceitos sobre o concreto e seus constituintes, além dos efeitos térmicos causados no concreto, passando pelos mecanismos de transferência de calor, com uma abordagem dos estudos atuais sobre o tema.

2.1 Concreto

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil (GLOBAL, 2021), sendo composto basicamente por cimento, água e agregados, para formar um material trabalhável que tem como suas principais características a alta resistência à compressão, a durabilidade e a resistência a efeitos térmicos (DU; YANG; TAN, 2021). Ainda sobre a sua composição, os concretos podem ter diferentes composições com a adição de diferentes materiais (TAYLOR, 1990).

Com uma visão diferente Mehta e Monteiro (2001), definem essas adições como materiais diferentes dos agregados, cimento e água, que são adicionados imediatamente após ou durante a mistura.

Ressalta-se que a composição do concreto, apesar de aparentemente simples, tem uma grande gama de combinações possíveis, sejam estas por questões logísticas, técnicas ou até mesmo financeiras (HEWLETT, 2006).

O funcionamento do material consiste na hidratação do cimento, que, em contato com a água, forma cristais de C-S-H (Silicatos de Cálcio Hidratados). Tais cristais concedem a resistência ao concreto. Por sua vez, os agregados, sendo envoltos por esses cristais, preenchem espaços vazios formados, criando, assim, um material teoricamente homogêneo (FUSCO, 2003).

Apesar de a mistura agregados/cimento conseguir preencher boa parte dos vazios, o concreto ainda apresenta poros, sejam microbolhas de ar ou vazios capilares criados pela água, prejudicando a resistência e a durabilidade do concreto, sendo também um fator importante no seu comportamento quando submetido a temperaturas elevadas (DI LUZIO, 2009). Durante o aquecimento, o concreto sofre ações tanto químicas quanto térmicas, causando mudanças na sua estrutura interna, as principais consequências são a desidratação do cimento e o desenvolvimento de

fissuras, causando uma diminuição considerável das suas propriedades mecânicas (GAWIN; PESAVENTO; SCHREFLER., 2003).

Conforme Felicetti, Monte e Pimenta (2017), os elementos de concreto sofrem elevados gradientes térmicos (devido sua baixa difusividade térmica) e aumento da pressão interna (dado o preenchimento dos poros com vapor d'água). Sendo que a pressão interna é a principal causadora da transferência de massa, levando a superfície do elemento a secar e a umidade evaporada a migrar, em partes, em direção ao centro da peça, que ainda está com temperaturas baixas, criando uma camada quase saturada de água, desenvolvendo pico de pressão.

2.1.1 Resistência mecânica

A principal característica do concreto corresponde a sua resistência aos esforços solicitantes, em especial à de compressão, visto que sua resistência à cisalhamento é estimada como 10% da compressão e, para flexão, este valor chega a 15% da maior resistência (VU, 2020). Assim, a função estrutural do concreto consiste em resistir às forças de compressão, sendo complementada para as demais por outros materiais, como por exemplo o aço.

Para a determinação da sua resistência à compressão devem ser realizados ensaios de corpos de prova, conforme as normativas apresentadas na NBR 5738 (ABNT, 2015a) e NBR 5739 (ABNT, 2018a), referentes a moldagem e rompimento, respectivamente, de modo que a resistência característica à compressão corresponda ao valor obtido aos 28 dias após o preparo da mistura, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para fins estruturais, a classificação do concreto se dá conforme a resistência à compressão, estando dividida em dois grupos:

- a) Grupo I: C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50;
- b) Grupo II: C55, C60, C70, C80, C90, C100;

Com a resistência característica à compressão sendo igual ao valor apresentado na nomenclatura, expresso em MPa. Ainda vale ressaltar que concretos com classe de resistência inferiores a C20, não são considerados para fins estruturais, conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015).

Além das resistências à compressão, outra importante característica do concreto é o módulo de elasticidade, que estabelece a medida de rigidez de um material. Essa característica é influenciada pela composição química, microestrutura, além dos defeitos como poros e trincas do concreto. É de vital importância para a determinação do desempenho das estruturas (ALMEIDA, 2012).

A principal influência nos valores do módulo de elasticidade é dependente dos agregados, tanto pela formação das zonas de transições interfaciais, quanto pelas suas próprias características, como porosidade. Ao ser submetido a temperaturas elevadas, além do aumento da porosidade, a degradação termoquímica do concreto também contribui para a diminuição do módulo de elasticidade da peça (SOUZA, 2005; SOLLERO, 2019).

2.1.2 Cura

O termo cura é utilizado tanto para descrever o processo de hidratação do concreto, como para descrever os processos para a manutenção da umidade e temperatura do concreto.

O termo “cura” é frequentemente usado para descrever o processo pelo qual o concreto de cimento hidráulico matura e desenvolve propriedades endurecidas pelo tempo como resultado da contínua hidratação do cimento na presença de calor e água suficientes... O termo “cura” também é usado para descrever a ação tomada para manter a umidade e temperatura de uma mistura fresca de concreto permitindo a hidratação do cimento hidráulico... (ACI, 2008, tradução livre).

As diversas técnicas de cura do concreto devem ser avaliadas a cada situação, considerando fatores climáticos, técnicos e econômicos. Um processo de cura mal realizado acarreta a fissuração, diminuição da resistência, além de um aumento na porosidade da peça, diminuindo a sua durabilidade e capacidade de serviço (TAYLOR, 1990). Segundo Mehta e Monteiro (2001), um concreto que recebeu um processo de cura adequado, goza de um tempo de vida longo sob os variados ambientes.

Um dos fatores que influenciam a resistência do concreto é a cura, utilizada para garantir a máxima hidratação do cimento além da diminuição dos efeitos da retração da peça. Segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004), a cura deve acontecer até o

momento em que o concreto atinja uma resistência à compressão de 15 Mpa. Essa adição de água no concreto, já confeccionado e moldado, combate a evaporação nas idades iniciais, mantendo o concreto saturado durante o início da sua hidratação, momento na qual o calor gerado pela hidratação é elevado.

Conforme a ACI 308 (ACI, 2008), os processos de cura são divididos entre processos baseados em aplicação de água como: imersão, aspergimento, uso de materiais absorventes, uso de areia, uso palha ou feno. E processos baseados na retenção de umidade, como a utilização de: filmes plásticos, papel reforçado, componentes formadores de membrana, e compostos baseados em óleo de linhaça.

Quanto ao uso de filmes plásticos, as recomendações incluem o uso de diferentes cores (transparente, branco e preto) conforme a exposição a luz solar da peça de concreto a ser “curada”, devido a variação de temperatura. Recomenda-se o uso de plástico preto para condições climáticas frias, visto que esta cor apresenta uma retenção de temperatura maior que as demais. Porém, quando o concreto não está exposto à luz solar a coloração do filme não influencia na temperatura do concreto (ACI, 2008).

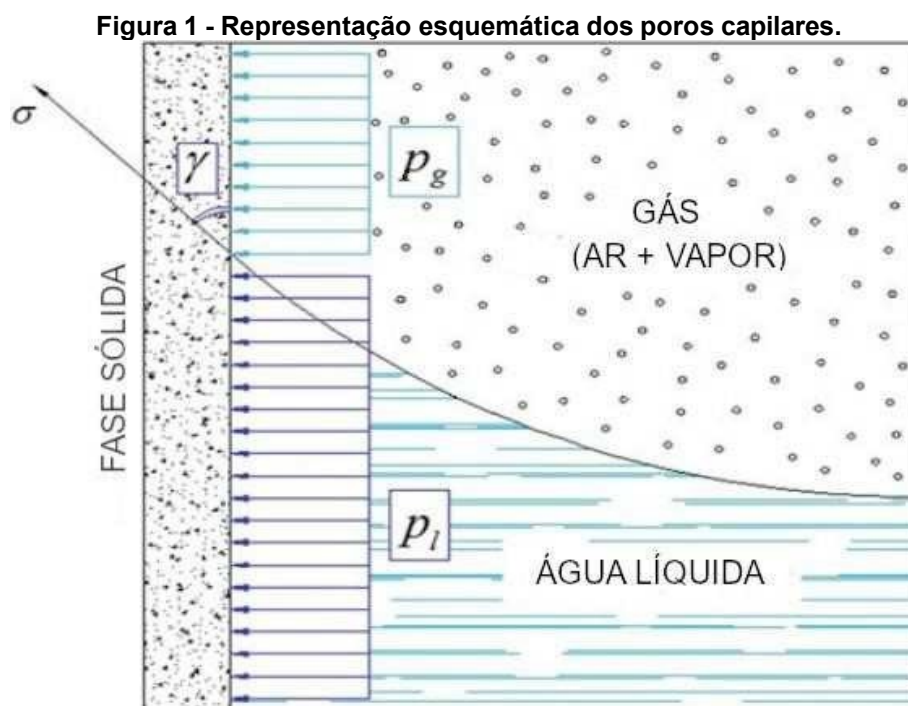
2.1.3 Porosidade

A porosidade do concreto corresponde a espaços entre os grãos, ocupados por microbolhas de ar e água, causadas principalmente pela diferença granulométrica dos materiais constituintes e da concretagem não adequada.

O concreto é considerado um meio multifases em que os vazios do esqueleto sólido podem ser combinação de fases líquidas e gasosas. No caso específico os fluidos preenchendo o espaço dos poros são o ar úmido (uma mistura de ar seco com vapor), água capilar, e água fisicamente absorvida. A água quimicamente combinada é considerada como parte do esqueleto sólido até ser liberado durante o aquecimento. (MILLARD; PIMENTA, 2019, tradução livre)

A existência desses poros nas zonas de transição interfacial, região em que o concreto e o agregado se encontram, diminui a resistência do concreto, visto que estes poros não realizam uma transmissão eficiente da carga (MILLARD; PIMENTA, 2019). Tais poros além de diminuir a resistência do concreto, facilitam a ação de agentes agressivos no concreto, reduzindo a sua durabilidade.

Quando o concreto é aquecido, a interface da tensão superficial da água gera uma divisão entre as fases líquidas e gasosas, o que pode gerar uma descontinuidade na pressão exercida pelos fluidos, com o aumento de temperatura a pressão capilar aumenta, elevando a pressão interna, iniciando a transferência de calor, representada na Figura 1 (MILLARD; PIMENTA, 2019).



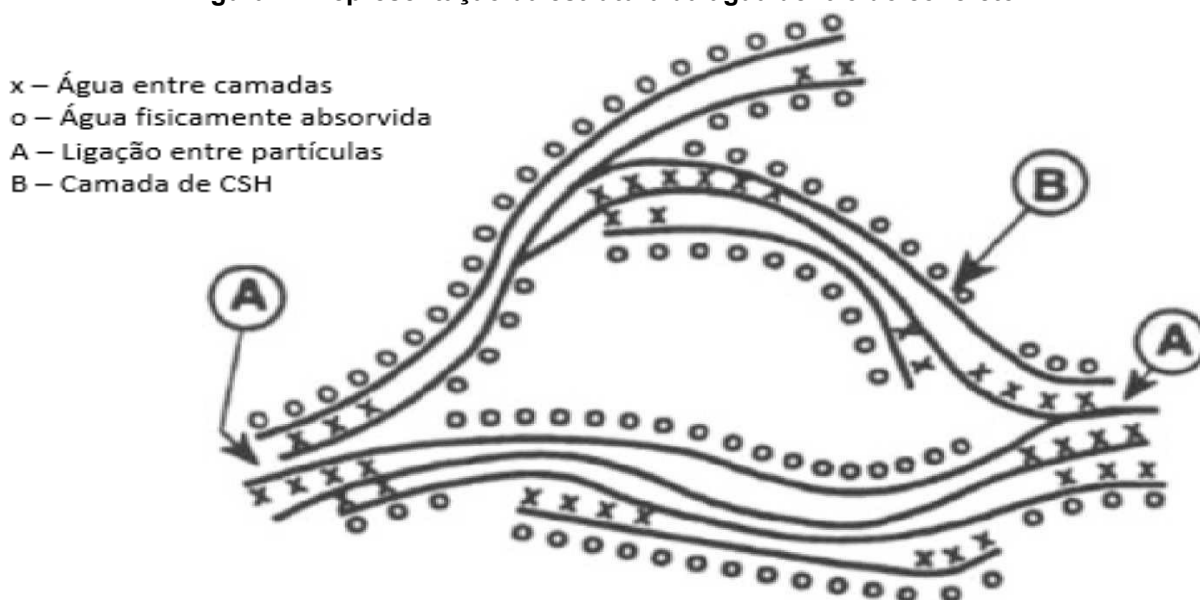
Fonte: MILLARD; PIMENTA, 2019.

Ao atingir determinada temperatura, o concreto começa a perder água, através de seus poros na forma de vapor d'água, influenciando também na variação volumétrica do concreto. Quando os poros não existem de forma suficiente para comportar o aumento de pressão, como por exemplo em concretos de alto desempenho, essa pressão interna gerada pela água tende a criar fissuras e *spalling*, traduzido como lascamento (SOLLERO, 2019). A perda de água aumenta a porosidade do concreto e, em idades iniciais, prejudica a hidratação do cimento.

Spalling, é na sua forma mais geral, definido como a quebra, violenta ou não violenta, de pedaços (ou camadas) de concreto da superfície de um elemento estrutural quando este é exposto a elevações de temperatura (GAWIN; PESAVENTO; SCHREFLER., 2003, tradução livre).

A água contida dentro do concreto pode ser dividida pelo estado em que se encontra: combinada ou livre. Também pode ser classificada pela posição dentro da mistura: capilar, fisicamente absorvida e entre camadas. Ambas as distinções estão caracterizadas na Figura 2, abaixo. Com exceção da água quimicamente combinada (AQC), todos os demais estados da água no concreto evaporam a temperaturas de 105°C, visto que a AQC é considerada como parte integrante do esqueleto sólido do material. A evaporação da água livre, seja em estado líquido ou gasoso, é denominada dessecação. A desidratação corresponde as mudanças químicas no concreto, liberando a água quimicamente combinada.

Figura 2 - Representação da estrutura da água dentro do concreto.



Fonte: MILLARD; PIMENTA, 2019.

As mudanças físicas e químicas no concreto, acarretam uma mudança na distribuição dos poros, bem como na porosidade total do material, de forma não linear. Até 300°C a porosidade tem um incremento pequeno, comparado com a perda de massa. Já aos 600°C, o aumento da porosidade supera a perda de massa devido a formação de microfissuras (MILLARD; PIMENTA, 2019).

Além disso, também pode ocorrer o fenômeno de *spalling*, em que uma parte do concreto se destaca do elemento principal, diminuindo a área de concreto, muitas vezes expondo a armadura, e tem como uma de suas principais causas o aumento da pressão dos poros e a restrição da dilatação térmica (GAWIN; PESAVENTO; SCHREFLER, 2003; FELICETTI; MONTE; PIMENTA, 2017).

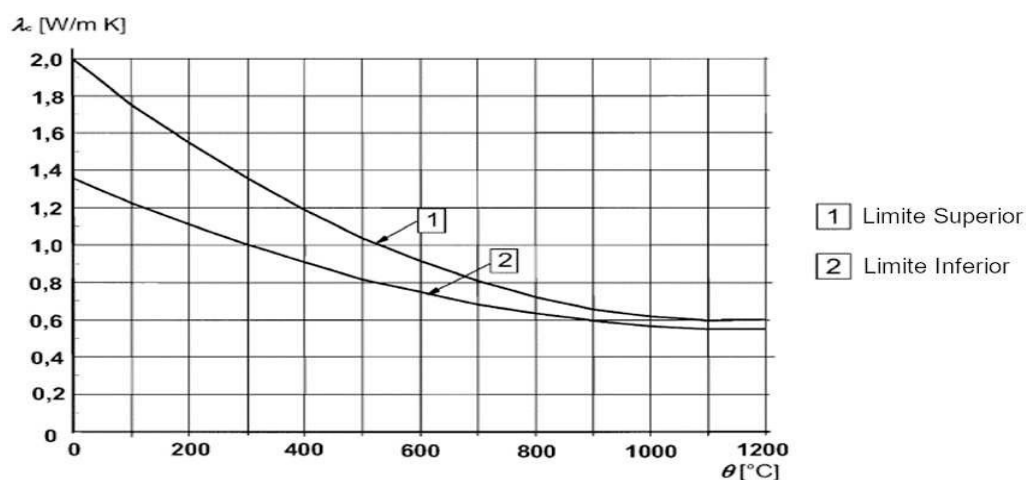
O fenômeno de *spalling* pode ter efeitos graves na resistência ao fogo da peça, devido a remoção de concreto expondo a parte central do elemento e armadura diretamente a temperatura reduzindo de forma significativa as propriedades mecânicas do aço (SHEN et al., 2020). Alguns métodos podem ser adotados para reduzir o risco, como: concreto com permeabilidade elevada, adição de fibras de polipropileno, adoção de uma camada de material altamente poroso (GAWIN; PESAVENTO; SCHREFLER., 2003).

2.1.4 Propriedades Térmicas

Em geral o concreto apresenta grande resistência a temperaturas elevadas, devido a sua baixa condutividade térmica (DU; YANG; TAN, 2021). No concreto a transferência de temperatura ocorre com a transferência de energia de uma partícula à outra por elétrons livres e pela vibração das moléculas (MALIK; BHATTACHARYYA; BARAI, 2021).

A condutividade térmica do concreto, com o aumento de temperatura, sofre uma redução significativa (PHAM et al., 2020). Tal decaimento pode ser atribuído a evaporação da água, aumento da porosidade, as mudanças químicas no C-S-H e a formação de microfissuras, que acarretam a uma variação na densidade do concreto. Além disso o tipo de agregado também exerce influência sobre a capacidade térmica. Essa variação pode ser observada conforme a Figura 3.

Figura 3 - Condutividade Térmica em relação a temperatura.



Fonte: EUROCODE 2 (2004a)

Os limites apresentados na Figura 3 podem ser descritos pelas equações 1 e 2, com valores da temperatura variando de $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda = 2 - 0,2451 \left(\frac{T}{100}\right) + 0,0107 \left(\frac{T}{100}\right)^2 \quad (\text{Limite Superior}) \quad (1)$$

$$\lambda = 1,36 - 0,136 \left(\frac{T}{100}\right) + 0,0057 \left(\frac{T}{100}\right)^2 \quad (\text{Limite Inferior}) \quad (2)$$

O concreto, apesar de ser um material não refratário, é um compósito não inflamável e com boa resistência ao fogo, tendo como o principal fator para isso, a sua capacidade térmica (HEWLETT,2006). A NBR 15220 (ABNT, 2003a) apresenta alguns valores de condutividade térmica de alguns materiais, com alguns tipos de concreto sendo especificados, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Condutividade térmica do concreto.

| Material | Condutividade Térmica λ (W/(m.K)) |
|--|---|
| Concreto com agregados de pedra | |
| Normal | 1,75 |
| Cavernoso | 1,40 |
| Concreto com pozolana ou escória expandida | |
| Com finos | 0,52 |

Fonte: Adaptada de NBR 15220 (ABNT, 2003a).

A capacidade térmica representa a quantidade de calor necessário por unidade de massa para mudar a temperatura do material em 1°C . Assim como a condutividade térmica, esse valor muda conforme a temperatura do concreto, devido as diversas modificações no material, tanto físicas como químicas.

A umidade do concreto também representa um fator importante, principalmente a temperaturas abaixo de 200°C , com concretos apresentando valores de capacidade térmica próximas ao dobro das obtidas em concretos secos em fornos (MILLARD; PIMENTA, 2019).

Por sua vez a dilatação térmica ou coeficiente de expansão térmica, corresponde à expansão ou retração do material conforme a variação de temperatura. Sendo um dos fatores que contribuem para a deterioração do concreto, pois a segregação entre a pasta de cimento e os agregados, visto que os coeficientes de dilatação térmica dos materiais que compõem o concreto diferem entre si, facilitando essa variação volumétrica local. Esse coeficiente pode ser calculado por meio da

soma ponderada dos valores da expansão térmica individual de cada um dos componentes do concreto, sendo que o valor da dilatação térmica, no material final, está diretamente ligado ao tipo de agregado, em especial o agregado graúdo devido ao seu volume elevado na confecção do concreto.

Com isso para se obter as características desejadas no concreto é necessário fazer uma avaliação sobre os seus principais constituintes: agregados (miúdo e graúdo); água; e o cimento.

2.1.5 Agregados

Os agregados como componentes do concreto podem ser divididos em duas classificações, graúdos e miúdos, dependendo da sua granulometria. Os agregados miúdos são agregados “cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvados os limites estabelecidos”, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009). Já os agregados graúdos são os que passam pela peneira de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm. Nesse tema, a NBR 7211 determina:

Os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto. (ABNT, 2009)

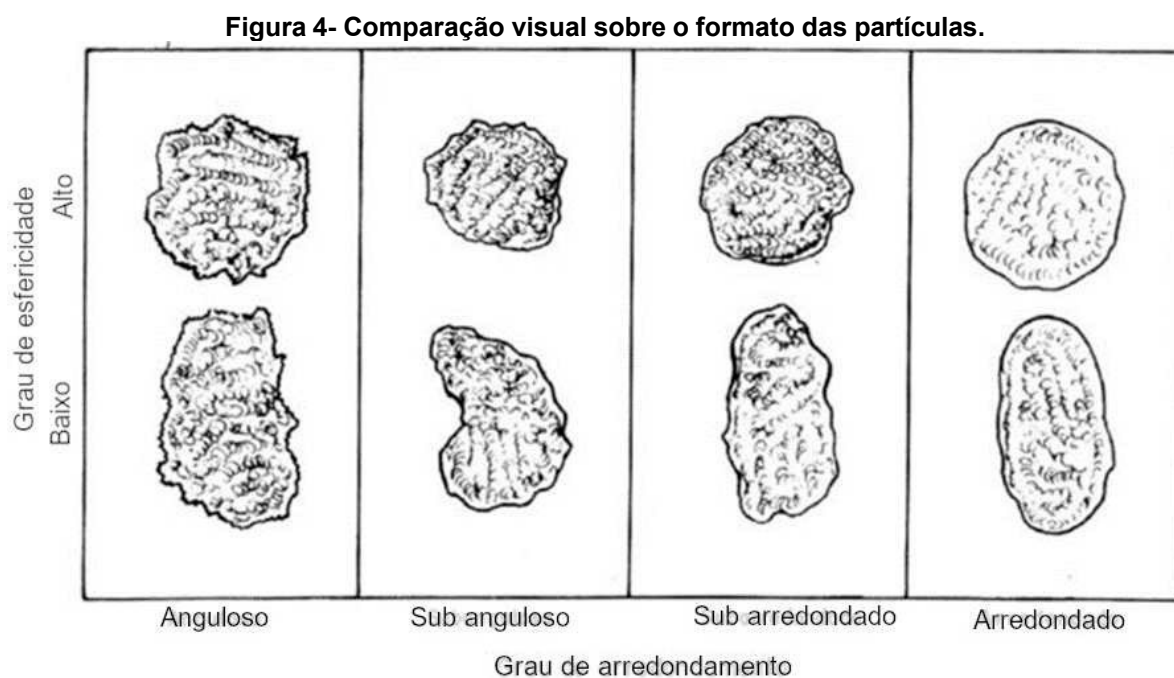
A distribuição granulométrica do agregado é dada em percentuais individuais ou acumulados retidos em peneiras da série normal ou intermediária. A avaliação desses dados é feita tendo como referências a dimensão máxima característica e o módulo de finura. A dimensão máxima característica está relacionada à distribuição granulométrica do agregado, que teve uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% em massa. Já o módulo de finura, também relacionado às porcentagens retidas acumuladas, desta vez nas peneiras da série normal, de modo que com a soma destas porcentagens dividida por 100 se obtém o módulo de finura, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Assim a utilização de agregados com uma correta composição granulométrica, não apenas influencia na trabalhabilidade do concreto, como também

na diminuição de vazios e por consequência, melhorando a sua durabilidade à ação de agente agressivos.

Apesar destas vantagens da utilização de agregados para a redução de vazios, o uso de materiais pulverulentos, oriundos do próprio agregado, definido como partículas com dimensões inferiores a 0,075 mm, é limitado conforme a forma de obtenção deste material, natural ou por meio de britagem. Essas partículas podem realizar um melhor envolvimento do grão com a areia, contudo este material fino pode formar uma película, impedindo que estes se espalhem no concreto (VIERO, 2010).

Outro fator importante é a morfologia dos agregados, que pode afetar tanto a trabalhabilidade, quanto a sua resistência do concreto. Os dois principais parâmetros a respeito do formato do agregado são a “esfericidade” e o “arredondamento” (HEWLETT, 2006), exemplificados na Figura 4.



Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009)

Conforme Silva e Geyer (2018), agregados com um grau de esfericidade baixo e com um grau de arredondamento anguloso necessitam de um consumo maior de cimento para atingir a mesma resistência que um agregado com forma cúbica ou alongada, visto que os agregados de forma cúbica geram uma melhor aderência entre a pasta e o agregado.

O agregado, em especial o miúdo, tem papel importante na resistência do concreto. Ao reduzir a quantidade de vazios da mistura, gera um material mais denso

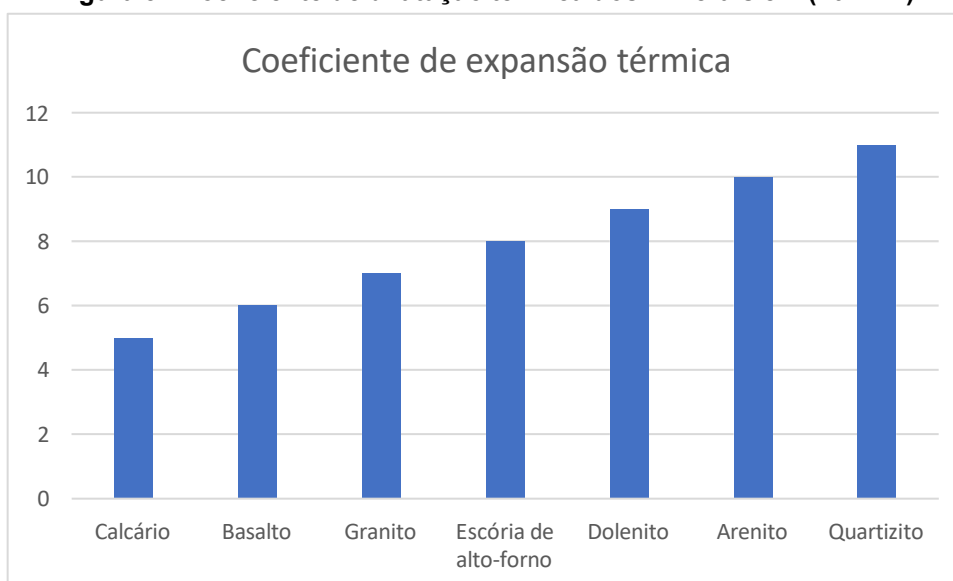
e menos poroso, agindo, de acordo com Hewlett (2006), para diminuir as chances de fissuras, com o agregado miúdo exercendo um papel de regulador da contração da pasta de cimento, dissipando a tensão de retração do concreto. Apesar de, em geral, o agregado não ser reativo, em alguns casos pode ocorrer a reação álcali-agregado, conforme Fournier e Bérubé (2000).

Outra característica regida pelos agregados, refere-se às capacidades térmicas do concreto, visto que são os principais constituintes do concreto, entre 70% e 80% do seu volume total (SOUZA, 2005; SOLLERO, 2019), controlando tanto a deformação térmica, quanto a condutividade térmica da mistura. A compatibilização entre as propriedades térmicas é um fator importante para misturas em concreto que tem como função resistir a elevadas temperaturas, seja na sua resistência ao fogo, ou mesmo em pavimentos expostos (HEWLETT, 2006).

Sobre os efeitos térmicos em pavimentos de concreto o comportamento térmico do agregado é uma das características importantes, pois acarreta a sua alteração volumétrica, resultando em fissuras transversais (MUKHOPADHYAY; NEEKHRA; ZOLLINGER, 2020).

Os coeficientes de dilatação térmica dos agregados comumente utilizados para a confecção do concreto estão entre $5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ à $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, conforme a Figura 5.

Figura 5 - Coeficiente de dilatação térmica dos minerais em ($10^{-6}\text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).



Fonte: Adaptado de SOUZA, 2005

Dentre os principais parâmetros que afetam o comportamento dos agregados, em especial os graúdos, sob efeito de uma temperatura elevada, podem-se citar: as diferentes composições mineralógicas e químicas, textura, graduação e quantidade de água absorvida (MALIK; BHATTACHARYYA; BARAI, 2021).

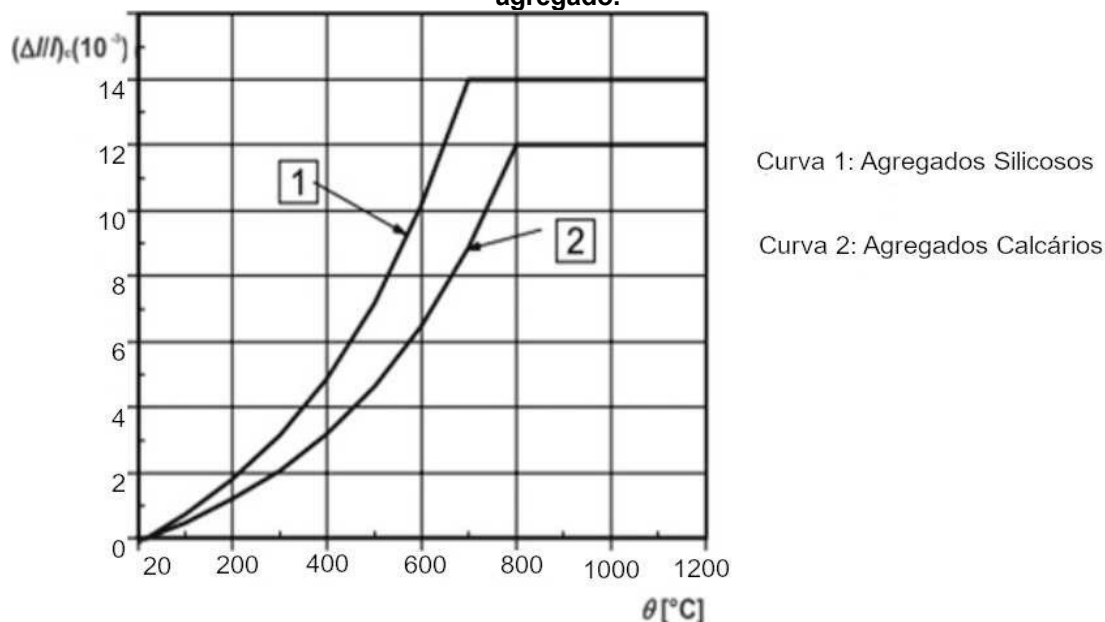
As composições mineralógicas dos agregados, possuem uma influência significativa em concretos de alta performance, segundo Wu et al. (2001), os agregados, em comparação com o concreto normal, possuem uma alta resistência e seu potencial não chega a ser utilizado. Assim a influência do tipo de agregado apenas é sentida de forma significativa, na resistência de concretos de alta performance, onde as fissuras causadas pelo carregamento chegam até o agregado fazendo uso de sua resistência.

Vários autores (HAGER et al.,2015; ROBERT; COLINA, 2009; SOLLERO; MORENO JUNIOR; COSTA.,2021) criticam a divisão feita nas normativas, como por exemplo o EUROCODE 2 (2004a), entre duas classificações, calcários e silicosos, pois além de não compreenderem todos os tipos de agregados. Acarretando classificações diferentes dependendo do autor pesquisado e mesmo dentro desta classificação alguns tipos de agregados, possuem comportamentos diversos dos demais.

Apesar dessa crítica, agregados de base silicosa, em geral, tem um comportamento pior do que os de base calcário, quando submetidos a temperaturas elevadas. Comportamento geralmente atribuído a uma expansão térmica dos agregados silicosos e a um aumento de volume durante a mudança de fase, por volta de 573°C (XING et al., 2011).

Além da variação da expansão térmica entre agregados, também ocorre uma variação da expansibilidade do agregado, conforme o aumento da temperatura demonstrado na Figura 6. Desse modo, a contribuição do agregado, no comportamento do concreto quando submetido a elevadas temperaturas é uma variável em função da temperatura.

Figura 6 - Coeficiente de expansão térmica em função da temperatura, conforme o tipo de agregado.



Fonte: EUROCODE 2 (2004a)

Os agregados, por serem materiais porosos, absorvem água e isto influencia na zona de transição interfacial, segundo Beshr, Almusallam e Maslehuddin (2003), agregados com uma alta absorção de água eliminam a acumulação de água nas proximidades dos agregados gerando uma zona de transição interfacial densa, sendo está a parte propensa a ruptura, em concretos normais.

Com o aumento da temperatura a porosidade do concreto tende a aumentar, conforme o agregado empregado na mistura, conforme mostra Hager et al. (2015), analisando concretos de alta resistência, mantendo o traço, variando apenas o tipo de agregado graúdo utilizado os valores iniciais do tamanho dos poros para todas as amostras, medidas por intrusão de mercúrio foram próximos de 0,05 e com o aumento da temperatura diferenças entre as amostras foram evidenciadas.

Assim é possível notar a influência dos agregados na porosidade do concreto, conforme sua origem mineralógica. No caso da dolomita, a variação entre as temperaturas de 600 e 800°C, apresentando um aumento significativo atingindo um valor de 0,27, apresentou um salto diferente dos demais agregados utilizados, conforme os autores, devido ao aquecimento, o volume total dos poros aumentou de modo similar para todos os três concretos, explicando a similaridade obtidas nos demais ensaios mecânicos (HAGER et al., 2015).

Já para concretos convencionais, as diferenças dos agregados são importantes na faixa de temperatura de 300 a 600°C, em que as diferenças de comportamento do concreto ocorrem devido aos agregados, conforme Xing et al. (2011), em experimento com três agregados diferentes:

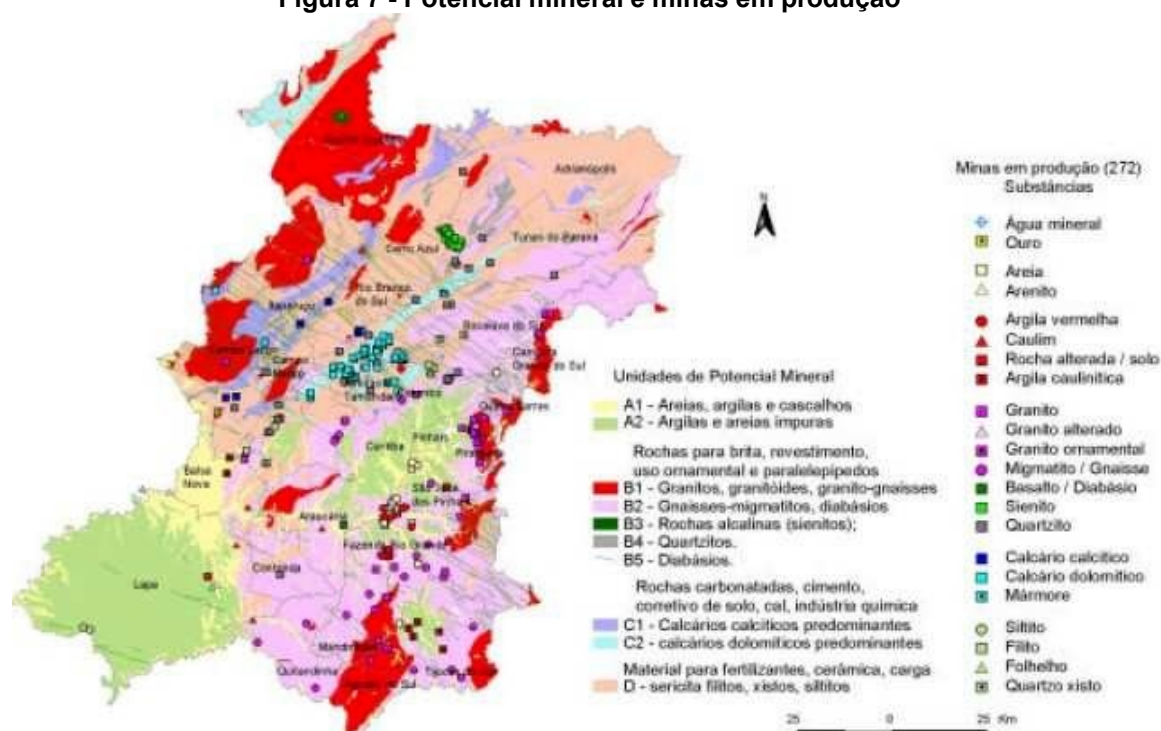
As diferenças nas performances mecânicas residuais são particularmente importantes entre 300 e 600°C. A propriedade mecânica da pasta e volume são os mesmos para todos três concretos e as diferenças no desempenho mecânico residual estão relacionadas a diferenças na composição mineralógica e química dos agregados. (XING et al., 2011, tradução livre).

Portanto a influência do tipo de agregado utilizado se mostra importante conforme, a faixa de temperatura na qual o concreto será exposto e a resistência original do elemento. Apesar de não serem os únicos fatores relevantes, os agregados, são componentes importantes no comportamento do concreto quando exposto a temperaturas elevadas.

Para a utilização dos agregados, a sua disponibilidade deve ser levada em consideração. Dentro da região metropolitana de Curitiba, no ano de 2003, estavam ativas 283 frentes de lavra de minerais, com diversos tipos de extração, desde areia até ouro. Dentre as principais substâncias minerais extraídas na região metropolitana de Curitiba estão o calcário dolomítico, granito, quartzito e gnaisse (BRASIL, 2004).

A RMC foi dividida em 5 classes, conforme a sua divisão geológica e com o seu potencial mineral para a extração de minerais não metálicos, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Potencial mineral e minas em produção



Fonte: BRASIL, 2004

É possível ver 4 grandes concentrações de minas ativas, na região de Almirante Tamandaré, com a extração principalmente de calcário dolomítico; a região de Cerro Azul, com a extração de sienito; Piraquara, com a extração de granitos; e Fazenda Rio Grande e sul de Curitiba, com a extração de areia e argila vermelha (BRASIL, 2004).

2.1.6 Cimento Portland

O Cimento Portland (CP) é o principal elemento do concreto, consiste em vários materiais, estatisticamente homogêneos em sua composição. O Cimento Portland é “um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland” (ABNT, 2018b), dividido por tipos, que atendem diversas necessidades usuais ou específicas de aplicação, obtido pela mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham oxido de ferro (NEVILLE, BROOKS, 2010).

Além das características químicas de sua composição, o CP também deve seguir outros parâmetros físico mecânicos, conforme norma brasileira, apresentados, no quadro 2.

Quadro 2 - Características dos tipos de cimento

| Sigla | lasse | Finura | | Tempo de início de pega min | Expansibilidade quente mm | Resistencia à compressão MPa | | | | Índice de brancura |
|--|-------|---------------------------|------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------|--------|---------|--------------------|
| | | Resíduo na peneira 75µm % | | | | 1 dia | 3 dias | 7 dias | 28 dias | |
| CP I CP -S CP II-E CP II-F CP II-Z | 25 | ≤ 12,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 8,0 | ≥ 15,0 | ≥ 25,0 | - | |
| | 32 | ≤ 12,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 10,0 | ≥ 20,0 | ≥ 32,0 | | |
| | 40 | ≤ 10,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 15,0 | ≥ 25,0 | ≥ 40,0 | | |
| | | | | | | | | | | |
| CP III CP IV | 25 | ≤ 8,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 8,0 | ≥ 15,0 | ≥ 25,0 | - | |
| | 32 | ≤ 8,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 10,0 | ≥ 20,0 | ≥ 32,0 | - | |
| | 40 | ≤ 8,0 | ≥ 60 | | - | ≥ 12,0 | ≥ 23,0 | ≥ 40,0 | - | |
| CP V | ARI | ≤ 6,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | ≥ 14,0 | ≥ 24,0 | ≥ 34,0 | - | - | |
| CPB Estrutural | 25 | ≤ 12,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 8,0 | ≥ 15,0 | ≥ 25,0 | ≥ 78 | |
| | 32 | ≤ 12,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 10,0 | ≥ 20,0 | ≥ 32,0 | | |
| | 40 | ≤ 12,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 15,0 | ≥ 25,0 | ≥ 40,0 | | |
| CPB Não estrutural | - | ≤ 12,0 | ≥ 60 | ≤ 5 | - | ≥ 5,0 | ≥ 7,0 | ≥ 10,0 | ≥ 82 | |

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018b).

Ao ser adicionada água à mistura, o cimento entra no processo de hidratação de seus componentes, conforme as suas fases, que (de acordo com a composição do CP) irão estabelecer a resistência inicial, tempo de pega e calor de hidratação.

Segundo Davidenko (2015), a hidratação do cimento Portland, constitui uma série de reações químicas entre seus componentes, formando novos compostos e o desenvolvimento dessas reações gera alterações químicas, físicas e mecânicas.

Normalmente, o cimento contém quatro fases principais de hidratação, chamadas de: a) alita; b) belita; c) aluminato; d) ferrite. Fases menores também são presentes, porém, o endurecimento do cimento é um resultado das fases principais. Já Mehta e Monteiro (2001), dividem os mecanismos de hidratação do cimento em duas partes, a hidratação dos aluminatos e a hidratação dos silicatos.

Alita é a principal das fases constituintes de um cimento Portland convencional. É composta por C_3S (silicato tricálcico), com uma reação rápida com a água, gerando parte da resistência inicial (TAYLOR, 1990; BULLARD *et al.*, 2011).

Belita, composta por C_2S (silicato dicálcico), tem uma reação lenta com a água, contribuindo pouco para a resistência até os 28 dias.

O produto da hidratação, tanto do C_2S (Silicato dicálcico), como do C_3S (Silicato tricálcico), em uma hidratação completa formam o composto $C_3S_2H_3$, mais comumente chamado de C-S-H, e $Ca(OH)_2$ (hidróxido de cálcio). Essas reações são exotérmicas, ou seja, durante o processo de hidratação do cimento existe a liberação de calor. O que afeta a reação de outros componentes do cimento não hidratado.

...a formação de C_3AH_6 é mais lenta do que a de C_2AH_8 ou C_4AH_13 , que são mais solúveis, então os dois últimos são formados primeiro. O aumento da temperatura acelera a formação de C_3AH_6 . Este é um bom exemplo da combinação necessária de termodinâmica e cinética para prever a formação de fases. (SCRIVENER; NONAT, 2011, tradução livre)

Apesar de o produto de ambas as reações serem similares, a hidratação do C_3S , segundo Mehta e Monteiro (2001), produz 61% de C-S-H e 39% de $Ca(OH)_2$, enquanto o C_2S , produz 82% e 18%, respectivamente. Essa formação adicional $Ca(OH)_2$ diminui a durabilidade da pasta de cimento sob ataque de ácido e sulfatos.

Apesar disso o C_3S é importante para resistência da pasta de cimento nas idades iniciais, visto que sua hidratação é mais rápida do que a hidratação do C_2S

Aluminato, fase composta pelo C_3A (aluminato tricálcico), reage rapidamente com a água gerando a retração do concreto, a menos que a reação seja controlada com a utilização de gesso. Segundo Mehta e Monteiro (2001), do ponto de vista prático aqui não está apenas a reação do C_3A , mas sim a sua reação na presença do gesso. Nesta fase é formada a etringita e o monosulfato.

A etringita é o primeiro hidrato a cristalizar devido a alta relação sulfato/aluminato, durante a primeira hora de hidratação, contribuindo para resistência em idade iniciais da pasta. Com o avanço da reação ocorre um aumento na concentração de aluminatos, em razão da continuidade da hidratação do C_3A e do ferroaluminato tetracálcio, a etringita torna-se instável e gradualmente é convertida em monosulfato (METHA, MONTEIRO, 2001).

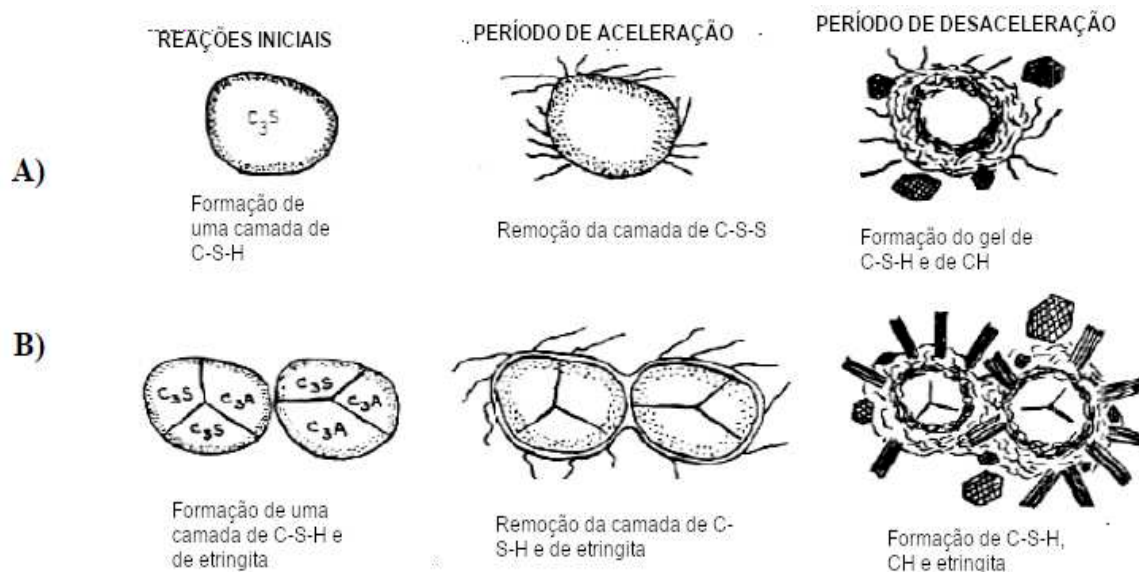
E, a última das fases principais, a Ferrite, composta por C_4AF (ferroaluminato tetracálcio), em quantidades pequenas, geralmente a velocidade de reação é menor do que a fase aluminato, mas tendo essa reação aumentada conforme a concentração de alumina aumenta, diminuído a temperatura necessária. Porém, baixa, ou muito baixa, em idades avançadas, não afetando de forma significativa o comportamento do cimento hidratado. Ao reagir com a gipsita acelera a hidratação dos silicatos, das fases alita e belita. Com isso, é possível verificar que os silicatos são os principais constituintes do cimento, visto que estes são os responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada.

Mehta e Monteiro (2001) tratam das fases aluminato e ferrite em conjunto, pois os produtos formados pelo C_4AF na presença de sulfatos são estruturalmente parecidos com os formados pelo C_3A . Porém, ainda segundo os autores a contribuição do C_4AF , nas idades iniciais depende da sua composição e da temperatura.

Tanto os silicatos, quanto os aluminatos, que compõem o cimento, ao entrarem em contato com a água, formam uma massa rígida e resistente. Em outras palavras, a sua ação cimentícia deriva principalmente das reações químicas dos componentes silicato tricálcico e silicato dicálcico com água. Assim, essa reação de hidratação gradualmente preenche os espaços vazios diminuindo assim a sua porosidade e aumentando a sua resistência a compressão.

Para Davidenko (2015), a hidratação do cimento ocorre em fases sucessivas, controladas pela hidratação do C_3S (fase alita). Dividida entre reações iniciais, período dormente, período de aceleração e período de desaceleração, conforme figura 8.

Figura 8- Sequência esquemática das reações de C_3S (A) e de C_3S+C_3A +gesso (B)



Fonte: Davidenko, 2015. Adaptada

Durante as reações iniciais, com duração de alguns minutos, os diferentes ions entram em rápida dissolução, liberando energia. Com a dissolução do C_3S e do C_3A , e uma pequena quantidade de C_2S e de C_4AF , cobrindo parcialmente a superfície do cimento com C-S-H e com etringita (BULLARD *et al.*, 2011).

Com essa película de proteção, as reações se tornam lentas, iniciando a fase dormente da hidratação. Após esse período, tem-se uma aceleração no processo de hidratação do cimento, entre 3h e 12h, causando uma grande liberação de calor. Durante a fase de aceleração os sulfatos são consumidos, para a formação de etringita e os produtos hidratados começam a se entrelaçar formando um material solido.

Após o atingir o ponto máximo, a velocidade de hidratação começa a diminuir gradualmente e o desenvolvimento da hidratação se dá por difusão. Com a falta de sulfatos é iniciada a conversão da etringita em monossulfato (MOSES, 2016).

O calor de hidratação do cimento, de suas diferentes fases, realiza uma função catalizadora para as demais, visto que muitos materiais têm a sua solubilidade aumentada quando expostos a temperaturas superiores, isso pode ser visto como algo negativo, quando em estruturas maciças (MEHTA E MONTEIRO, 2001).

2.2 Temperaturas Elevadas

As possibilidades de o concreto estar sob efeitos de temperaturas elevadas decorre principalmente das situações de incêndio ou da sua proximidade com fornalhas e reatores (ARIOZ, 2007). Assim, é possível verificar que as situações em que peças de concreto são submetidas a altas temperaturas estão, em sua maioria, em edificações industriais, quando não causadas por acidentes.

Os efeitos térmicos no concreto, como um material, podem ser descritos por faixas de temperatura, conforme quadro 3.

Quadro 3 - Efeitos no concreto por faixa de temperatura.

| Temperatura | Efeito |
|---------------------------|---|
| 80°C | é observada um aumento na taxa de hidratação do cimento |
| 80°C até 850°C | ocorre a perda da água quimicamente combinada |
| Até 100°C | é iniciado a perda de água livre, que dificulta o aquecimento do concreto |
| 80°C e 150°C | existe a decomposição da etringita |
| 100°C até 250°C | a perda de água ocorre principalmente devido à desidratação do C-S-H |
| até os 200°C | é possível a evolução da hidratação do cimento anidro |
| 150°C e 270°C | ocorre o pico do primeiro estágio da decomposição do C-S-H |
| a partir dos 300°C | há um aumento na porosidade e na microfissuração do concreto e espécimes não carregados sofrem uma expansão irreversível |
| 350°C | acontece a ruptura de alguns agregados silicosos |
| 374°C | a presença de água livre já não é possível |
| 400°C e 600°C | ocorre a dissociação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em óxido de cálcio (CaO) e água (H_2O), acarretando uma retração no concreto |
| 500°C | até essa temperatura, 90% da resistência à compressão pode ser perdida |
| 550°C a 600°C | existe um aumento na fluência do concreto, tornando-o estruturalmente inutilizável |
| 573°C | ocorre o pico da transformação do quartzo- α dos agregados em quartzo- β |
| 600°C | a fissuração superficial é facilmente notada e a resistência à tração pode ser considerada nula |

| | |
|----------------------|--|
| 600°C e 800°C | ocorre a segunda fase da decomposição do C-S-H, com pico aos 720 °C-750 °C |
| 700°C e 898°C | ocorre a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO ₃), formando CaO e dióxido de carbono (CO ₂) |
| 800°C | a fissuração superficial é muito pronunciada |
| 840°C | tem-se a decomposição da dolomita |
| 1060°C | é iniciada a fusão dos constituintes do concreto |
| 1200°C | concreto se mostra completamente decomposto |

Fontes: (GAWIN; PESAVENTO; SCHREFLER, 2003; MILLARD; PIMENTA, 2019; SOLLERO, 2019; SOLLERO; MORENO JUNIOR; COSTA, 2021).

Em um concreto submetido a um carregamento, a temperatura também realiza um papel importante, ela age como uma força aplicada no material. Boresi (2004, tradução livre) assim explica: “O trabalho realizado em um sistema mecânico por forças externas somado o calor que adentra no sistema pelo exterior é igual ao aumento na energia interna somado o aumento na energia cinética.”

Ao admitir o sistema como isostático, é possível representar matematicamente a afirmação acima na forma da equação 3:

$$\delta W + \delta H = \delta U \quad (3)$$

Onde δW é o trabalho realizado por forças externas, δH é o calor e δU sendo o aumento da energia interna do elemento em análise. Portanto, o efeito de uma variação de temperatura em um elemento de concreto, sujeita o elemento não apenas a modificações no seu comportamento químico, mas também no esforço solicitante, no qual, o elemento estrutural é submetido.

Grande parte dos efeitos sofridos no concreto decorrentes de temperaturas elevadas se deve a sua desidratação, assim, a umidade do concreto gera influência nos resultados, bem como mudanças na sua composição (SOUZA, 2005).

Outro efeito importante vem da fissuração do concreto, devido a uma variação volumétrica, quando submetido a temperaturas elevadas, a expansão térmica e a retração devido a perda de água (DI LUZIO; CUSATIS, 2009), facilitando efeitos como o *spalling*.

2.3 Mecanismos de Transferência de Calor

Ao determinar a forma como a temperatura afeta o concreto, é necessário entender os princípios de transferência de energia, bem como o seu comportamento no material.

O modo pelo qual o calor é transferido é explicado por três mecanismos: condução; radiação; e convecção. Por sua vez, seu funcionamento ocorre da seguinte maneira segundo Resnick, Halliday e Walker (2009):

- a) **Condução:** a elevação da temperatura em um sólido faz com que os elétrons e os átomos do elemento vibrem de forma intensa. Essa agitação começa a se propagar até uma região de temperaturas amenas.
- b) **Radiação:** a transferência de energia térmica ocorre por meio de ondas eletromagnéticas, chamadas de radiação térmica.
- c) **Convecção:** ocorre em um fluido, que em contato com uma fonte de calor se aquece e diminui a sua densidade. Desse modo as partículas aquecidas do fluido sobem e as partículas densas, com uma temperatura menor, assumem a posição próxima a fonte de calor, iniciando um ciclo.

Böckh e Wetzel (2011), apontam que os tipos de mecanismos para a transferência de calos são apenas, condução e radiação, para os autores a convecção é apenas uma categoria da condução, em que a transferência ocorre por meio de um fluido em movimento.

Dos mecanismos de transferência de calor o de principal importância para o comportamento do concreto é a condução, que é um processo em que o calor flui de uma temperatura elevada para outra menor, dentro de um meio, em contato físico direto. Ou seja, a condução é uma aplicação específica da 2ª lei da termodinâmica, na qual o material almeja atingir o seu equilíbrio térmico.

Conforme Resnick, Halliday e Walker (2009), a 2ª lei da termodinâmica pode ser descrita como um aumento na entropia em processos irreversíveis e constantes em processos reversíveis. Matematicamente pode ser expressa na forma da equação 4:

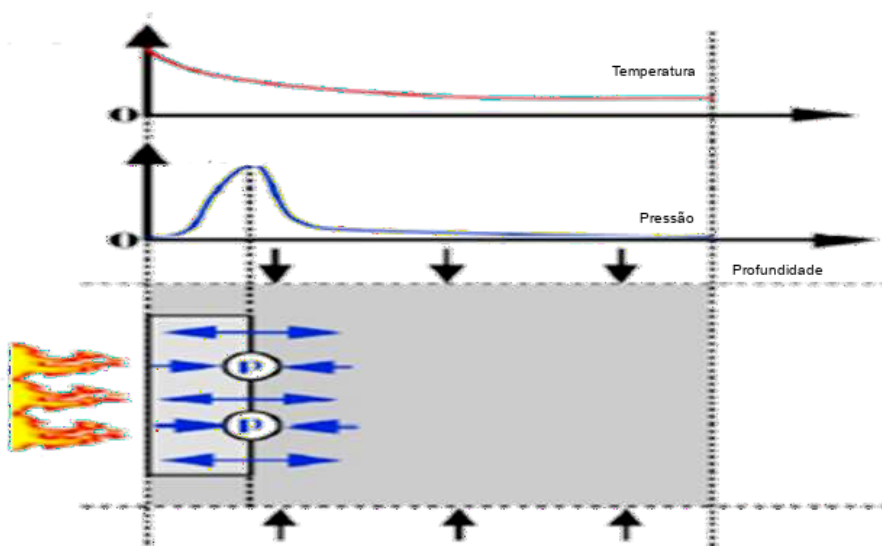
$$\Delta S \geq 0$$

(4)

Durante uma situação em que o concreto é submetido a temperaturas elevadas, a superfície do concreto é aquecida por meio da convecção, devido a temperatura elevada do ar e, por meio de radiação, seja pelas chamas ou por outras superfícies aquecidas (MILLARD; PIMENTA, 2019).

Esse aquecimento superficial, bem como a evaporação da água, faz com que a umidade do elemento migre do seu interior para a superfície, fazendo com que áreas de grande pressão, devido aos gases, surjam próximas das faces externas, gerando uma tensão devido à diferença de temperatura no próprio elemento, como mostra a figura 9.

Figura 9 - Pressão nos poros



Fonte (SHEN et al., 2020).

A próxima transferência de massa ocorre com o vapor de água, indo para regiões de baixa temperatura, no interior do elemento, elevando a saturação dos poros. Além desse fluxo, o aumento de líquidos nos poros também se deve a dessecação e expansão térmica da água.

Para uma previsão acurada sobre a distribuição de umidade no concreto sob efeito térmico, é necessário conhecer as propriedades que controlam a movimentação de fluidos no seu interior, permeabilidade e difusividade (MILLARD; PIMENTA, 2019), bem como suas propriedades térmicas, como o coeficiente de dilatação e sua capacidade térmica. Além disso, a taxa de aquecimento é crucial para o comportamento do concreto, taxa de elevação de temperatura elevadas, aumentam

os danos causados no concreto, devido a tensão térmica, fissuras são criadas e a água evaporada flui por estas (FELICETTI; MONTE; PIMENTA, 2017).

A dilatação térmica ocorre em temperaturas próximas a 300°C (HEWLETT, 2006), situação em que parte do C-S-H já foi decomposto e, tanto a água livre, quanto a quimicamente combinada, já tiveram a sua evaporação iniciada. Ainda, existe uma expansão devido a desidratação do concreto, uma vez que os produtos da reação são mais volumosos que o inicial. E uma expansão, proveniente das rachaduras, provocadas pelo aumento da pressão interna (MILLARD; PIMENTA, 2019).

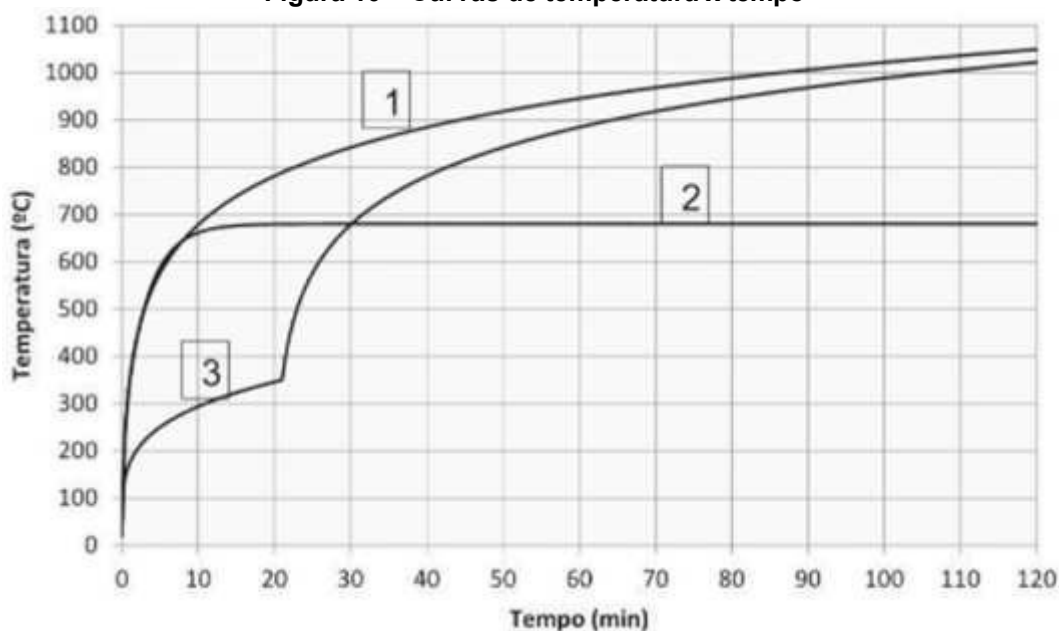
2.4 Normativas referentes as temperaturas

A NBR 16755 (ABNT, 2019) preconiza os ensaios para a determinação da resistência ao fogo de portas de pavimento de elevadores, com uma face aquecida, e sofrendo uma pressão positiva na parte superior, simulando a pressão dos gases. Apesar de trazer a conceituação básica, toda a norma está relacionada com a EN 1363-1, principalmente sobre a taxa de elevação da temperatura.

Já a NBR 16951 (ABNT, 2021a) apresenta modelos de ensaios para a propagação de fogo em fachadas. E na NBR 16965 (ABNT, 2021b) foi promulgada a primeira edição de uma norma brasileira, especificando os ensaios para a medição da resistência ao fogo de elementos construtivos, porém como indicação a norma orienta ao uso de estruturas auxiliares e preferencialmente na escala real.

Sua grande novidade vem da definição da curva padrão de incêndio, a relação temperatura x tempo para simular uma situação de incêndio, bem como uma curva secundária de aquecimento lento e a curva de aquecimento da face não exposta a temperatura, conforme a figura 10.

Figura 10 – Curvas de temperatura x tempo



Fonte: Adaptada da NBR 16965 (ABNT, 2021b)

Onde as curvas representam 1- Curva padrão de elevação de temperatura; 2- Curva de exposição pelo lado externo de fachadas; 3 – Curva de crescimento lento;

Apesar de relativamente inovadora, visto que normas internacionais já contemplavam as diretrizes gerais como o EUROCODE 2 (2004a), a ASTM E119 (ASTM, 2000) e a NFPA 251 (NFPA, 2006), a NBR 16965 (ABNT, 2021b) trata de forma genérica e demandando uma maquete em escala real e com detalhamentos e com cargas previamente aplicadas, tornando os ensaios únicos e difíceis de serem realizados.

Todos estas normativas apresentam ensaios similares para a determinação do tempo de resistência ao fogo, baseados em modelos representativos dos elementos, com o aquecimento em uma das faces, com ou sem carregamento (a depender do tipo de elemento a ser verificado).

2.5 Estudos sobre o tema

O comportamento do concreto submetido a temperaturas elevadas tem sido amplamente estudado, por pesquisadores tanto nacionais quanto internacionais. As propriedades tanto mecânicas, quanto químicas do concreto se alteram, reduzindo a sua resistência a compressão, módulo de elasticidade, dentre outros parâmetros.

Souza (2005), em seu estudo sobre a influência de agregados no comportamento do concreto submetido a temperaturas elevadas, bem como os efeitos da forma de resfriamento do elemento, com resfriamentos lento e rápido, obteve variações na resistência a compressão na ordem de 20% a 35%, com resfriamento lento e de 35% a 45% com um resfriamento rápido, quando os corpos de prova foram submetidos a uma temperatura de 300°C. Ao elevar as temperaturas, para 600°C, obteve perdas significativas de 50% a 60% e 50% a 70%, com resfriamento lento e rápido respectivamente.

Regobello (2007) estudou a elevação da temperatura em seções de elementos estruturais mistas, sua modelagem contou com o uso de estruturas de madeira, concreto e aço, com variação de temperaturas entre as seções, com um aquecimento não uniforme, em uma avaliação puramente numérica. O próprio autor considerou sua estratégia de modelagem é eficiente para as situações que se propõe, alcançando valores condizentes com o esperado pelas normativas.

Uma outra abordagem numérica foi realizada por Kodur e Dwaikat (2008), na análise de vigas de concreto armado submetidas a uma situação de incêndio. Este modelo computacional contém como parâmetros não apenas o efeito térmico, como também a carga aplicada no elemento.

Xotta et al. (2015) dividiu o concreto em três partes, pasta de cimento, agregados e zona de transição interfacial, criando um modelo numérico, e calibrando o mesmo a partir de dados gerados por um programa experimental que consistia em submeter os corpos de prova a quatorze dias sob efeitos de temperatura, com dois ciclos térmicos, aquecendo as amostras com uma rampa de temperatura lenta até os 100°C então mantida a temperatura por cinco dias, após isso os corpos de prova foram resfriados naturalmente por dois dias e o ciclo foi reiniciado, aquecimento e resfriamento. Com isso os pesquisadores criaram um mapa 3D, mostrando os danos térmicos no concreto. Durante a pesquisa concluíram que a porosidade do agregado tem influência sobre a capacidade térmica quando a rampa de elevação da temperatura é lenta.

Sollero (2019) por sua vez estudou as propriedades mecânicas residuais do concreto em situações de incêndio, utilizando ensaios com concretos normais e de alta resistência, com agregados de basalto, granito e calcário, resultou em uma análise estatística em que 95,3% da variância de resistência à compressão estava diretamente relacionada ao tipo de agregado. Para o agregado basalto a resistência

residual nas temperaturas até 400°, foi similar ao que era previsto em norma, já aos 600°C se mostrou contra a segurança. Com o uso de granito apresentou melhores resultados que os demais agregados utilizados, porém e a partir dos 400°C, as normas se mostram contra a segurança. E para o calcário a norma se mostrou a favor da segurança.

Em estudo sobre o uso de agregados reciclados de borracha (BENGAR et. al., 2020), o desempenho do concreto se mostrou compatível com o previsto em normativas, apesar de apresentar um desempenho fraco quando submetido a temperaturas elevadas, com perdas de até 85%, na sua resistência a compressão quando submetido a uma temperatura de 800°C.

Ainda sobre materiais não tradicionais, Aluko et al. (2020), em artigo sobre o comportamento de bio-fibras no concreto, reportou um aumento na resistência à compressão do concreto a 200°C. Porém, com a elevação da temperatura, tal ganho foi perdido. A grande vantagem, exposta no trabalho, foi a diminuição dos efeitos de *spalling* e fissuração do concreto, com um certo nível de estabilidade térmica.

Surya (2020), em artigo, avaliou o comportamento do concreto autoadensável, com idades de 7 dias e de 28 dias, em situações de temperaturas elevadas, por um período de duas horas. Foram testados em temperaturas variando de 200°C até 800°C, com perdas significativas. Os resultados obtidos no ápice da temperatura testada, o concreto apresentou uma perda de resistência de 51,63%, para ambas as idades. Porém, na temperatura amena (200°C) o concreto com 28 dias apresentou uma melhor resistência aos efeitos térmicos, com uma perda de 3,15%, contra 7% apresentado pela amostra com a idade de 7 dias.

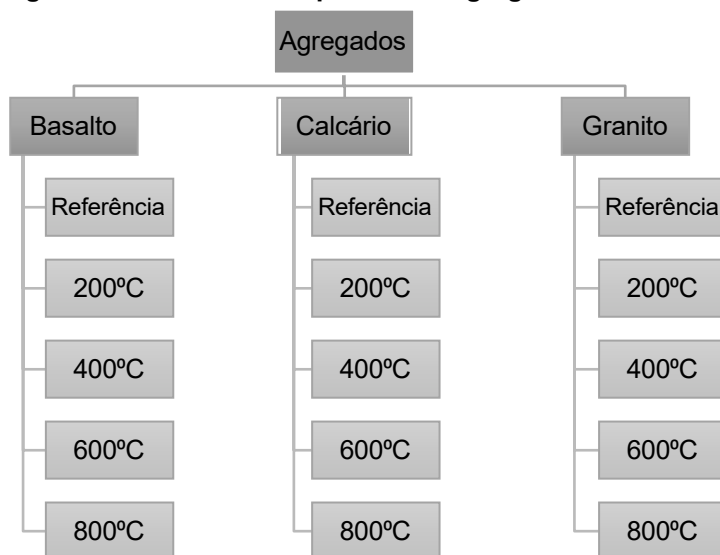
Outros autores como Gawin e Pesavento e Schrefler (2003)., Millard e Pimenta (2019), Kodur e Dwaikat (2008) desenvolveram modelos numéricos, utilizando o método dos elementos finitos, baseados em experimentações, valendo-se de formulações desenvolvidas para diferentes áreas, como para túneis e usinas nucleares. Suas contribuições ajudam a entender melhor o processo considerando os diversos efeitos dentro do concreto, seus modelos consideram as fases térmicas, hídricas e químicas ocorrentes no concreto. Esses estudos são uma base para outros realizarem modelagens específicas conforme a particularidade de cada situação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no campus Ecoville, localizado na cidade de Curitiba, Paraná. O método de pesquisa proposto por este trabalho consistiu na moldagem de corpos de prova de concreto com a utilização de três tipos de agregados graúdos, ensaiados após a exposição a diferentes faixas de temperatura, sem carregamento e sem uso de aditivos, para posterior análise experimental. O tipo de cimento, bem como a geometria, dimensões, traço e a cura do concreto foram mantidos constantes.

Os ensaios foram divididos em duas etapas: uma fase preliminar, para a determinação da viabilidade de execução, e a etapa de pesquisa propriamente dita. Durante a primeira fase foram realizados os procedimentos para apenas um tipo de agregado. Após essa fase inicial, foi iniciado o processo de moldagem dos corpos de prova para a realização dos ensaios, conforme o tipo de agregados graúdo e a faixa de temperatura que foram submetidos. Sendo que para cada tipo de agregado foram ensaiados 30 corpos de prova, sendo a quantidade mínima para a realização dos testes estatísticos, mostrado na figura 11. Vale ressaltar que foram moldados corpos de prova sobressalentes, caso algum imprevisto ocorresse nos ensaios.

Figura 11 - Faixas de temperatura e agregados utilizados.



Fonte: Autor (2022)

3.1 Materiais

Os materiais e métodos utilizados serão descritos nos itens abaixo.

3.1.1 Água

Para a mistura foi utilizada água potável, sem nenhum tratamento prévio, fornecida pela companhia de saneamento.

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado foi o CII-F-32, tal escolha deu-se devido a tentativa de comparação com o trabalho apresentado por Sollero (2019). Conforme a fabricante a composição química do lote utilizado, conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do cimento utilizado

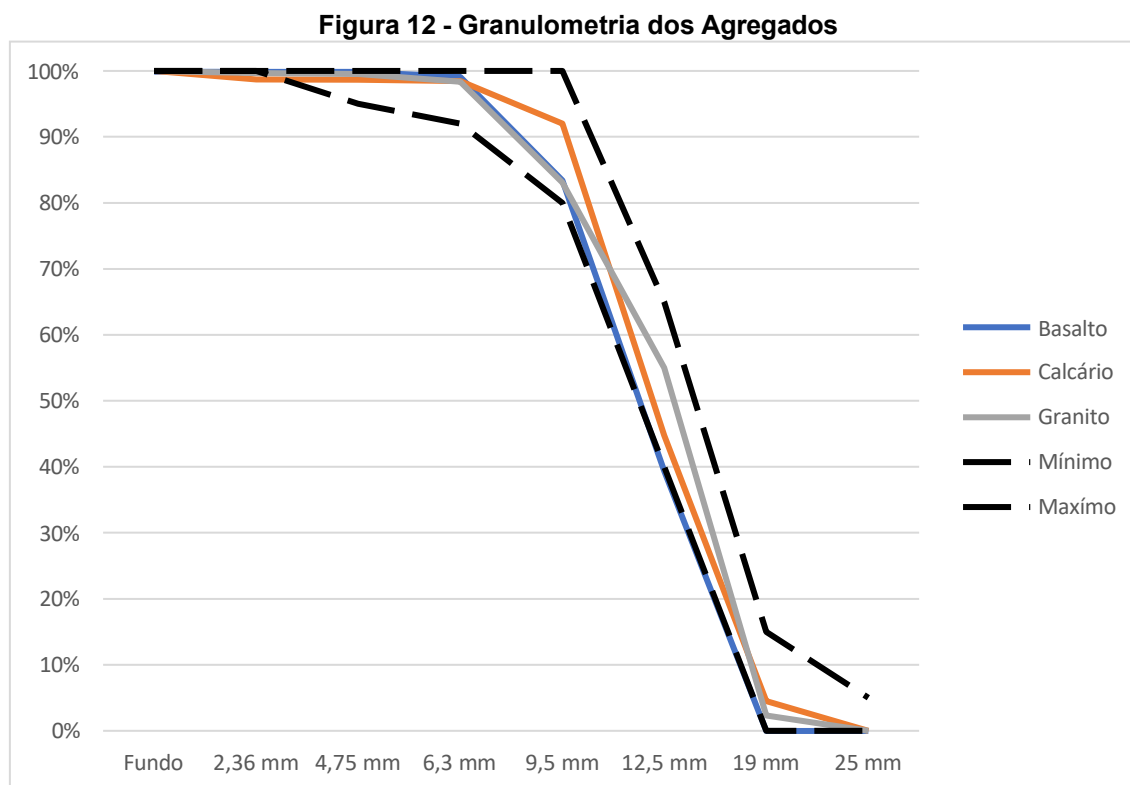
| | |
|--------------------------------|--------|
| Al ₂ O ₃ | 4,24% |
| SiO ₂ | 18,61% |
| Fe ₂ O ₃ | 2,70% |
| CaO | 60,44% |
| MgO | 3,44% |
| SO ₃ | 2,53% |

Fonte: ITAMBÉ (2022)

3.1.3 Agregados

Foram utilizados agregados de calcário, granito e basalto. Selecionados devido a diversidade de origem mineralógica e por serem extraídos na região da Grande Curitiba, com exceção do basalto. A escolha do último se deu devido a comparações com outras pesquisas, visto que este está presente em grande parte das referências utilizadas.

Conforme a norma NBR 7217 (1987), foi realizado o ensaio de granulometria dos agregados, seus valores podem ser vistos na figura 12.



Desta forma todos os agregados estão enquadrados dentro dos limites da norma NBR 7211 (2019).

Ainda para os agregados foi determinada a massa específica e absorção de água conforme tabela 2:

Tabela 2 – Demais informações sobre o agregado graúdo

| Agregado | Massa Específica | Modulo de Finura | Absorção de Água | DMC (mm) |
|----------|------------------|------------------|------------------|----------|
| Granito | 2,615 | 2,47 | 2,20% | 19 |
| Calcário | 2,589 | 2,84 | 2,50% | 19 |
| Basalto | 2,95 | 2,83 | 0,84% | 19 |

Fonte: Autor (2022)

Os ensaios foram realizados conforme as normativas NBR 7211 (2019) e NM 53 (2003).

3.1.4 Moldagem

Os corpos de prova foram moldados com um traço fixo, baseado em Sollero (2019) com variação apenas no tipo de agregado graúdo. Foram confeccionados corpos de prova de 10 cm x 20 cm, visto que os efeitos das dimensões do concreto afetam sua resistência mecânica a compressão, conforme o estudo de Muciaccia (2017) e que com pequenas dimensões os efeitos térmicos atingem um maior volume do concreto.

Os corpos de prova foram confeccionados em formas metálicas cilíndricas, em duas etapas, com a aplicação de desmoldante próprio para formas metálicas e para o adensamento do concreto foi utilizado mesa vibratória, conforme a NBR 5738 (2015a). Os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 24h e armazenados em câmara úmida até a idade de 28 dias, atendendo a normativa NBR 5738 (ABNT, 2015a). Os corpos de prova foram preparados com mistura mecanizada do concreto, utilizando betoneira.

O processo foi iniciado com a separação dos moldes e sua limpeza interna com escova e em casos em que o material não foi desprendido apenas com a escovação, foi executada uma raspagem do material aderido ao molde. Externamente os moldes foram raspados e então escovados.

Terminada a limpeza dos moldes metálicos, uma camada de desmoldante específico para formas metálicas foi aplicado com pincel e separado por 30 minutos, conforme especificação do fabricante.

O preparo do concreto se deu por meio de uma lavagem inicial da betoneira utilizando brita, para a retirada de materiais presos na parte interna, e o material foi então descartado.

Após a limpeza foi adicionado a pedra brita e um terço do volume total da água de amassamento para então ser acionado o motor da betoneira, essa mistura foi deixada durante 40 segundos, para a homogeneização.

Com a betoneira ainda ligada, foi adicionada a areia e outro terço da água de amassamento, com tempo de mistura de 40 segundos.

Por fim foi adicionado o cimento e o restante da água de amassamento, com a betoneira ainda ligada. Este processo durou 40 segundos.

Com a mistura homogeneizada, os moldes dos corpos de prova foram preenchidos até completarem 15cm (75% da altura do molde), com concha de seção

U, e então dispostos na mesa vibratória, até que o concreto no molde parasse de liberar bolhas. Finalizado o adensamento da primeira camada foi colocada uma nova camada que superava a altura do molde, com concha de seção U, e novamente o molde foi adensado em mesa vibratória e o excedente foi rasado, com a utilização de uma colher de pedreiro, seguindo as recomendações da NBR 5738 (2015).

Com o concreto devidamente adensado foram armazenados os moldes preenchidos, pelo período de 24h para então serem identificados e armazenados em cara úmida até completarem 28 dias, seguindo as recomendações da NBR 5738 (2015).

Ao término da cura, os corpos de prova foram retificados, garantindo uma superfície lisa, para a execução do ensaio a compressão. Os procedimentos acima seguem as recomendações da NBR 5738 (2015).

No total foram produzidos 90 corpos de prova, a fim de manter um mínimo de 6 corpos de prova por cada faixa de temperatura e tipo de agregado, para a realização dos ensaios, divididos igualmente para cada agregado e incluso os corpos de prova usados como referência, as quantidades bem como a sua destinação, estão descritas no quadro 4.

Quadro 4 - Quantidades Totais de corpos de prova por ensaio

| Agregado | Total de corpos de prova moldados | Ensaio à Compressão | Absorção de água |
|----------|-----------------------------------|---------------------|------------------|
| Basalto | 30 | 20 | 10 |
| Calcário | 30 | 20 | 10 |
| Granito | 30 | 20 | 10 |

Fonte: Autor (2022)

Para cada um dos tipos de agregado os corpos de prova moldados foram divididos igualmente em cinco grupos, desta forma, para cada um dos três tipos de agregados foram separados 6 corpos de prova, para cada faixa de temperatura, sendo que desses 4 foram submetidos ao ensaio de compressão e dois para o ensaio de absorção de água, conforme mostrado na tabela 3.

Tabela 3 - Discriminação das quantidades de corpos de prova para um agregado

| Ensaio | Quantidade para Referência | Quantidade para 200°C | Quantidade para 400°C | Quantidade para 600°C | Quantidade para 800°C | Quantidade Total |
|------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| Compressão | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 20 |
| Absorção | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 |

Total 6 6 6 6 6 30

Fonte: Autor (2022)

O traço e a relação água/cimento foram determinadas de forma igual ao proposto por Sollero (2019). Com um consumo de cimento de 373,69Kg/m³, a fim de obter um parâmetro de comparação, tal proposição feita por Sollero (2019) pode ser vista no quadro 5.

Quadro 5 - Traço Utilizado

| <i>fck</i> | Cimento | Agregado Miúdo | Agregado Graúdo | A/C |
|------------|---------|----------------|-----------------|------|
| 25 MPa | 1 | 2 | 3 | 0,49 |

Fonte: Adaptada de Sollero (2019)

Os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 24h. Após esse período, foram armazenados em câmara úmida, até completar a idade de 28 dias, para então serem retificados, conforme a NBR 8738 (2015).

3.2 Ensaaios

Após os corpos de prova terem atingido a idade de 28 dias, foram medidos e pesados para então serem colocados em forno estufa a uma temperatura de 50°C por 24h, para remover toda a água livre da superfície dos corpos de prova, com o objetivo de evitar o efeito de *spalling*, transcorrido esse tempo foram novamente pesados e medidos.

Após esse preparo inicial os corpos de prova foram colocados em forno mufla, em grupo de seis, conforme o tipo de agregado utilizado para sua confecção, até atingir uma faixa de temperatura (200°C, 400°C, 600°C ou 800°C). As faixas de temperatura foram selecionadas dada a sua utilização por autores como Sollero (2019), Bengar et. al (2020) e Surya et. al (2020).

Os corpos de prova foram mantidos no patamar de temperatura por uma hora, a determinação do patamar de estabilização da temperatura de 60 minutos de exposição dos corpos de prova às temperaturas foi definida com base na prática de outros autores, como Sollero (2019), Bengar et. al (2020) e Surya et. al (2020), para atingirem uma temperatura de equilíbrio. Com o tempo decorrido os corpos de prova

foram retirados do forno mufla para resfriarem em temperatura ambiente, para então serem pesados e medidos novamente.

Sobre as medições das dimensões dos corpos de prova, conforme a NBR 5739 (2018), a altura foi medida sobre seu eixo longitudinal e, para o diâmetro, foram tiradas duas medidas ortogonais na metade da altura do corpo de prova.

Tais medições foram realizadas duas vezes, antes do aquecimento e após o corpo de prova ter sido aquecido e estar em temperatura ambiente, a fim de verificar a variação das mesmas durante as diferentes etapas, com a utilização de um paquímetro.

Com as amostras, já submetidas a temperaturas elevadas, foram realizados os seguintes ensaios, para cada mistura de concreto:

- a) resistência à compressão, normatizado pelo NBR 5739 (ABNT, 2018a);
- b) dimensões dos corpos de prova, normatizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018a);
- c) absorção de água, normatizado pela NBR 9778 (ABNT, 2009).

Os corpos de prova foram submetidos as altas temperaturas, após resfriamento foram embaladas em plástico filme, garantindo a não reidratação dos elementos, até a data do rompimento. A confecção deles ocorreu em grupos de trinta corpos de prova para cada tipo de agregado. E para a referência seis corpos de prova foram moldados para cada agregado.

3.2.1 Resistência à Compressão

O concreto tem como uma de suas principais características a sua alta resistência a compressão, portanto, estabelecer a sua resistência residual é de grande importância, uma vez que parte da sua utilização é projetada entorno desta característica.

O ensaio à compressão foi realizado conforme a normativa vigente, a NBR 5739 (ABNT, 2018a), utilizando uma amostragem de quatro corpos de prova, por faixa de temperatura para cada um dos traços confeccionados. Portanto, quatro corpos de prova foram separados e submetidos ao ensaio de compressão e posteriormente comparados com os moldados como referência. Ao todo sessenta corpos de prova foram testados à compressão.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em um dia, na prensa DL 10.000 da marca EMIC.

Conforme o EUROCODE 2 (2004b), é possível determinar uma relação entre a resistência à compressão após exposição a uma temperatura, $f_{c,\theta}$, e a resistência à compressão característica do concreto, f_{ck} , que resulta em um coeficiente de redução, que - ainda conforme a norma - podem ser utilizados para taxas de aquecimento entre 2K/min e 50K/min.

Desta forma a análise comparativa ocorreu, além dos valores extraídos da norma EUROCODE 2 (2004b), o trabalho apresentado pela Sollero (2019), utilizando o fator de redução apresentado pela própria autora, para os concretos convencionais confeccionados com basalto, granito e calcário.

Além disso o trabalho de Surya *et. al* (2020), que trata sobre concretos autoadensáveis, sob temperaturas elevadas, que mesmo não trabalhando em específico sobre a influência do agregado na resistência do concreto, utilizou o tempo de aquecimento e as mesmas faixas de temperatura. Servindo como um parâmetro adicional de comparação.

Comparando o trabalho apresentado por Bengar *et. al* (2020), que assim como Surya *et. al* (2020), não trata em específico sobre os agregados, porém trabalha como adições de borracha como agregado miúdo. A comparação com os valores obtidos por Bengar *et. al*, será feito utilizando apenas os valores apresentados para seus corpos de prova de referência, visto que esses não receberam a adição de borracha.

3.2.2 Dimensões dos corpos de prova

Para os corpos de prova foram feitas medições com relação a sua altura e seu diâmetro conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018a), para os valores iniciais e repetido após o aquecimento.

3.2.3 Absorção de água

Os corpos de prova reservados para o ensaio de absorção, após o aquecimento foram colocados em forno estufa por 72h e após isso foram pesados.

Em sequência foram colocados em um recipiente com água e mantidos submersos por outras 72h e novamente pesados. Depois dessas etapas, os corpos de prova foram aquecidos, ainda submersos, por um período de 5h, até a temperatura de ebulição.

Concluído esse processo os corpos de prova foram pesados, em uma balança de precisão e em balança hidrostática.

Os processos acima descritos seguem as recomendações de ensaio fornecidas pela NBR 9778 (ABNT, 2009).

Tais ensaios visam a determinação não apenas da absorção de água, como também o índice de vazios e a massa específica das amostras.

4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos, com os ensaios anteriormente apresentados, bem como a avaliação dos mesmos.

4.1 Ensaio de resistência à compressão

Nos ensaios à compressão foram rompidos, ao todo, 60 corpos de prova e os resultados obtidos seguem na tabela 4:

Tabela 4 - Resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados

| Agregado | Temperatura | Média (MPa) | Sd | Coefficiente de variação |
|----------|-------------|----------------|------|-----------------------------|
| Granito | Referência | 27,76 | 0,82 | 0,68 |
| | 200°C | 27,95 | 1,18 | 1,41 |
| | 400°C | 19,30 | 1,58 | 2,51 |
| | 600°C | 7,69 | 1,00 | 1,01 |
| | 800°C | 2,83 | 0,22 | 0,05 |
| Basalto | Referência | 21,22 | 1,73 | 3,00 |
| | 200°C | 19,61 | 1,31 | 1,74 |
| | 400°C | 20,11 | 2,04 | 4,20 |
| | 600°C | 9,76 | 1,17 | 1,38 |
| | 800°C | 3,64 | 0,64 | 0,41 |
| Calcário | Referência | 14,56 | 1,99 | 3,98 |
| | 200°C | 17,65 | 2,64 | 6,99 |
| | 400°C | 14,52 | 0,45 | 0,21 |
| | 600°C | 9,72 | 1,83 | 3,35 |
| | 800°C | 7,12 | 0,93 | 0,88 |

Fonte: Autor (2022)

O desvio padrão apresentado na tabela 4 demonstra que as condições de preparo estão dentro das disposições apresentadas na NBR 12655 (2015). Desta forma, para o desvio padrão da amostra e a condição de preparo os valores obtidos estão de acordo com o tipo de preparo do concreto, com desvio padrão menor do que 4 MPa.

O coeficiente de variação mostra uma homogeneidade, nos procedimentos de moldagem e no procedimento de submissão dos corpos de prova às temperaturas elevadas.

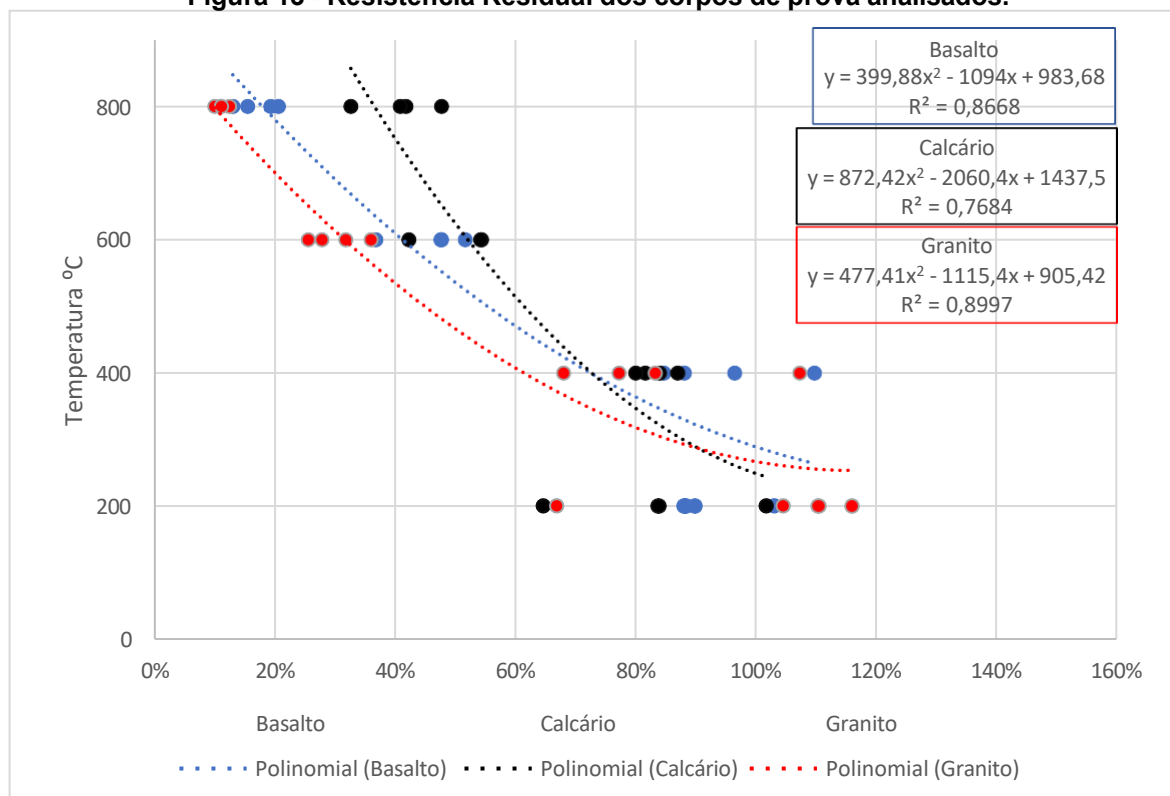
É possível perceber a baixa resistência obtida, mesmo nos corpos de prova de referência e nas temperaturas de 200°C, em especial aos agregados de basalto e de calcário, devido a uma lamelaridade dessas britas, em relação ao agregado granito utilizado.

Além disso o desempenho do agregado calcário na temperatura 800°C, que obteve um resultado médio de resistência à compressão superior em 2,51 e 1,95 vezes do que os agregados granito e basalto respectivamente. Tal diferença é explicada com a variação da taxa de aquecimento dos corpos de prova, o agregado calcário foi submetido a uma taxa de aquecimento de 6°C/min, já os agregados granito e basalto tiveram taxas de aquecimento de 4°C/min, significando um menor tempo de exposição a temperatura que os demais agregados analisados.

Tal variação na taxa de aquecimento, pode ser explicada, pois ao expandir, o concreto, aumenta o seu número de vazios, dificultando a troca de temperatura interna. Desta forma, o forno mufla consegue aumentar a temperatura em um tempo menor do que em um corpo de prova com uma expansibilidade menor.

Quanto à resistência residual dos corpos de prova, está demonstrada na figura 13.

Figura 13 - Resistência Residual dos corpos de prova analisados.

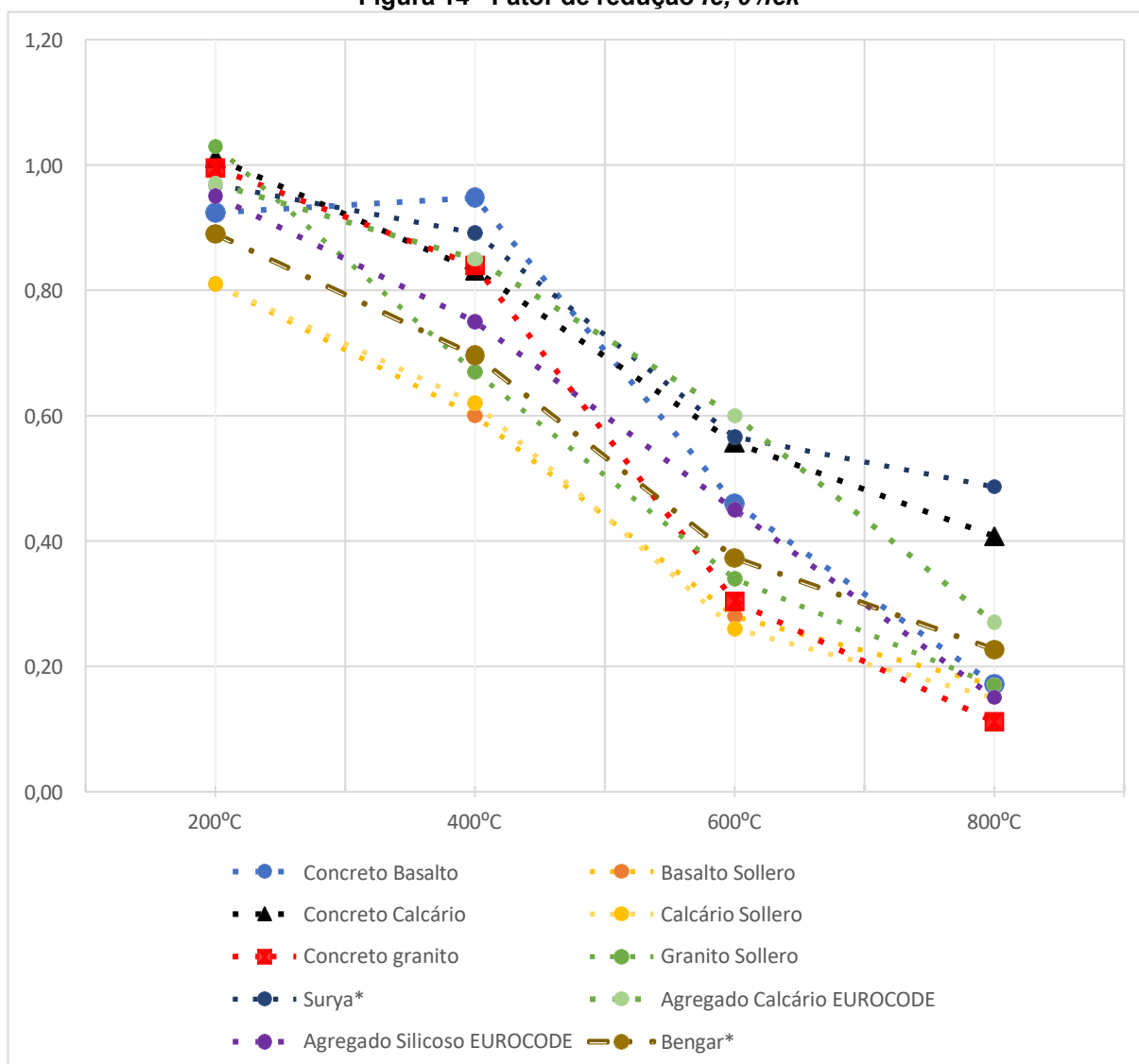


Fonte: Autor (2022)

Com base na figura 13, é possível perceber que os corpos de prova tiveram uma perda pequena de resistência, ou até mesmo um incremento, como o apresentado pelos corpos de prova com o agregado granito, quando a temperatura de 200°C. E com o aumento da temperatura ocorre a diminuição da resistência à compressão.

Para além da representação visual, o coeficiente de correlação, mostra que a resistência residual do concreto está relacionada com a temperatura, demonstrando que as equações de regressão polinomiais, apresentadas para os agregados, explicam os dados com até 89,97% de precisão, como no caso do granito.

Em comparação com os resultados obtidos por outros autores, segue a apresentação da figura 14.

Figura 14 - Fator de redução $f_c, \theta / f_{ck}$ 

Fontes: EUROCODE 2 (2004b) SOLLERO (2019), BENGAR et. al (2020), SURYA et. al (2020), Autor (2022)

Os valores obtidos durante os ensaios, para 200°C, com exceção do basalto, apresentaram valores acima do recomendado pela norma. A essa temperatura é esperada uma pequena redução da resistência. Conforme já apresentado anteriormente, no Quadro 3, é esperada o começo da perda da água livre e parte da água quimicamente combinada, devido ao início do primeiro pico de desidratação do C-S-H.

A essa temperatura foram obtidos fatores de redução de resistência de 0,92 para o basalto, 0,99 para o granito e 1,01 para o calcário. Tal aumento se deve a possibilidade de ainda ocorrer a hidratação do cimento anidro até essa temperatura.

O EUROCODE 2(2004b) estabelece valores de 0,97 para agregados calcários e 0,95 para agregados silicosos, reforçando o que foi exposto anteriormente.

Aos 400°C, tanto o agregado calcário, quanto o granito, apresentaram um fator de perda de resistência próximo 0,83 e 0,84 respectivamente. Já o basalto apresentou um aumento no fator de perda quando comparado com o patamar anterior.

A essa temperatura é esperado, que o concreto já não contém água livre, o fim do primeiro pico de desidratação do C-S-H, um aumento na microfissuração do concreto. E em especial, o início da dissociação do hidróxido de cálcio, o que acarreta não só em uma perda de massa, como também em uma acelerada redução na resistência à compressão.

Nessa faixa de temperatura, o calcário fica muito próximo ao valor fornecido pelo EUROCODE 2 (2004b), de 0,85. Esse resultado é conservador em relação ao obtido por Sollero (2019) e Bengar *et. al* (2020), que são de 0,62 e 0,67, respectivamente.

O fator de perda de 0,89, obtido, corresponde a uma perda de resistência menor do que a obtida para o concreto com granito no trabalho desenvolvido por Surya *et. al* (2020). Tal diferença pode ser dada devido as diferenças regionais dos materiais, tanto agregados quanto ao próprio cimento.

Aos 600°C os fatores de perda foram de 0,46, 0,56 e 0,3 para basalto, calcário e granito, respectivamente. Estando próximos do valor estabelecido pelo EUROCODE 2 (2004b).

Neste patamar de temperatura os efeitos da dissociação do hidróxido de cálcio, mencionados na literatura, são facilmente percebidos, como a queda acelerada da resistência e a inutilização do concreto como elemento estrutural. A partir dessa temperatura a fissuração é facilmente visível.

O concreto calcário apresentou um fator de redução idêntico ao de Surya *et. al* (2020) e um fator de redução de 4 pontos percentuais abaixo da norma.

Já o concreto com agregado granítico apresentou valores inferiores aos da Sollero (2019), com um fator de redução de 0,34 e próximo também a Bengar *et. al* (2020). Tal variação pode ser justificada pelas alterações das taxas de aquecimento e a resistência inicial do concreto.

Já o basalto apresentou valores próximos, uma diferença de 1% ao EUROCODE 2 (2004b), para agregados silicosos, com fatores de redução de 0,46 e 0,45, respectivamente.

Para a temperatura de 800°C, o concreto com agregado basalto, comparado com os valores recomendados pelo EUROCODE 2 (2004b), os valores obtidos nos ensaios apresentam uma diferença de 2% em relação aos valores recomendados na normativa.

Para o concreto com agregado granito, os valores obtidos se mostram desfavoráveis à segurança. Com o agregado granítico tendo uma redução de 4% superior do que o esperado pela norma.

Neste ponto ocorreu o segundo pico de desidratação do C-S-H e a decarbonatação do carbonato de cálcio, CaCO_3 , formando CaO e CO_2 , com uma alta fissuração do concreto

Os fatores de redução obtidos correspondem aos de Sollero (2019), para o basalto são idênticos e já para o granito a perda da resistência supera os valores obtidos por Sollero.

Para o agregado calcário o valor fica muito acima da recomendação do EUROCODE 2 (2004b), sendo 0,41 e 0,27, respectivamente os valores para o fator de redução. Mesmo assim fica abaixo do valor obtido por Surya *et. al* (2020), com um valor de 0,48.

Em geral os fatores de perda ficaram próximos dos valores determinados por norma, porém se mostraram superiores aos valores obtidos por Sollero (2019).

Para validação dos dados obtidos o teste ANOVA de fator único para validação da amostragem, desenvolvida em planilha eletrônica, com seus resultados descritos abaixo na tabela 5.

Tabela 5 - ANOVA fator único

| Agregado | Fonte da variação | SQ | gl | MQ | F | Valor-P |
|------------|-------------------|-----------|----|----------|----------|----------|
| Referência | Entre Grupos | 123,7935 | 2 | 61,89676 | 5,523759 | 0,027216 |
| | Dentro do Grupo | 100,85 | 9 | 11,20555 | | |
| | Total | 224,6435 | 11 | | | |
| 800°C | Entre Grupos | 41,65781 | 2 | 20,8289 | 34,97739 | 0,000057 |
| | Dentro do Grupo | 5,359465 | 9 | 0,595496 | | |
| | Total | 47,01727 | 11 | | | |
| 600°C | Entre Grupos | 12,71499 | 2 | 6,357494 | 5,962324 | 0,030778 |
| | Dentro do Grupo | 7,4639945 | 7 | 1,066278 | | |
| | Total | 21,12505 | 9 | | | |
| 400°C | Entre Grupos | 71,09163 | 2 | 35,54582 | 11,2947 | 0,004678 |
| | Dentro do Grupo | 25,17698 | 8 | 3,147122 | | |

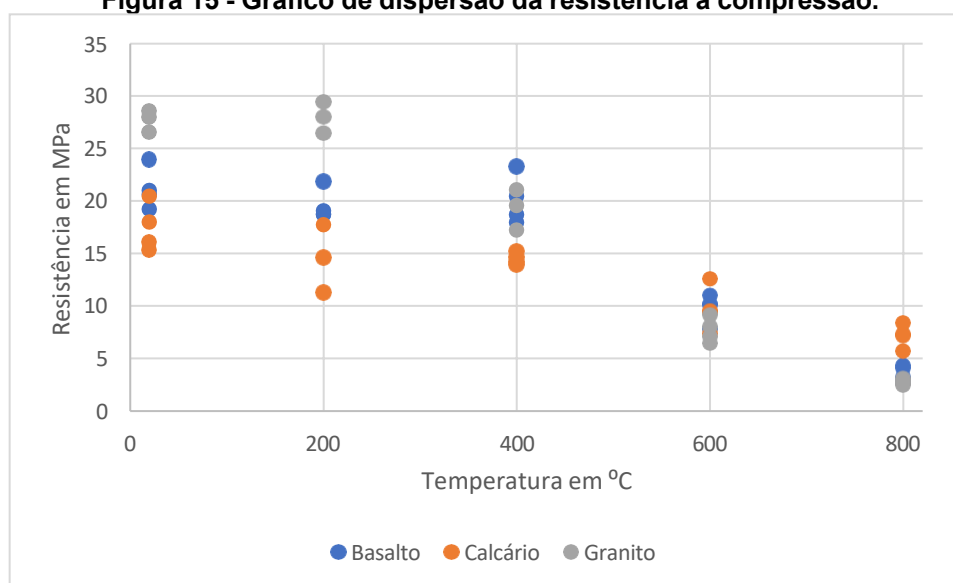
| | | | | | | |
|-------|-----------------|----------|----|----------|----------|----------|
| | Total | 176,1258 | 10 | | | |
| 200°C | Entre Grupos | 197,3277 | 2 | 98,66386 | 5,382367 | 0,033036 |
| | Dentro do Grupo | 146,6475 | 8 | 18,33094 | | |
| | Total | 343,9753 | 10 | | | |
| Total | Entre Grupos | 3188,836 | 14 | 227,774 | 23,36275 | 0,000000 |
| | Dentro do Grupo | 438,7253 | 45 | 9,749451 | | |
| | Total | 3627,562 | 59 | | | |

Fonte: Autor (2022)

Com o teste ANOVA é demonstrada a significância estatística das amostras como válida, devido a seu *p-value* (sua significância), abaixo de 0,05. Assim as amostras como um todo mostraram uma significância relevante.

Ainda sobre essa análise, pode-se visualizar os dados sem os pontos *outliers* na figura 15.

Figura 15 - Gráfico de dispersão da resistência à compressão.



Fonte: Autor (2022)

Apesar dos testes ANOVA, com a remoção dos *outliers* é possível visualizar uma dispersão entre os elementos de calcário na temperatura de 200°C, o que explica o comportamento da série no teste ANOVA, uma vez que a série de dados nessa temperatura possui o maior valor do *-p-value*.

Tal resultado se mostra em conformidade, visto que nesta faixa de temperatura o agregado calcário apresentou o desvio padrão superior em 22% ao valor de 4MPa indicado pela norma.

Desta forma cabe ressaltar que a divisão dos agregados em dois grupos apenas, calcários e silicosos, conforme o EUROCODE 2 (2004b), não atende à diversidade comportamental dos agregados. Uma vez que o granito e o basalto, apresentaram-se em lados diversos da curva proposta pela referida norma.

4.2 Dimensões dos corpos de prova

No que diz respeito às dimensões dos corpos de prova, tem-se os seguintes dados, mostrados na tabela 6.

Tabela 6 - Variação das medidas, conforme a temperatura.

| Agregado | Temperatura | ΔD (mm) | Desvio Padrão | ΔH (mm) | Desvio Padrão | ΔP (g) | Desvio Padrão |
|----------|-------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Basalto | 800°C | 0,31 | 0,20 | 0,62 | 0,31 | -69,50 | 6,68 |
| | 600 °C | 0,05 | 0,25 | 0,28 | 1,57 | -37,50 | 6,22 |
| | 400 °C | 0,07 | 0,15 | 0,1 | 0,15 | -9,50 | 5,72 |
| | 200 °C | -0,04 | 0,22 | 0,15 | 0,800 | 2,00 | 1,41 |
| Calcário | 800°C | 0,53 | 0,13 | 1,18 | 0,37 | -136,5 | 10,13 |
| | 600 °C | 0,17 | 0,04 | 0,51 | 0,19 | -39,50 | 4,33 |
| | 400 °C | 0,07 | 0,06 | 0,20 | 0,08 | -4,00 | 2,00 |
| | 200 °C | 0,00 | 0,10 | 0,26 | 0,22 | 10,75 | 11,69 |
| Granito | 800°C | 0,39 | 0,49 | 0,71 | 1,65 | -88,00 | 28,70 |
| | 600 °C | 0,24 | 0,35 | 0,61 | 1,81 | -52,00 | 44,45 |
| | 400 °C | 0,08 | 0,14 | 0,31 | 0,14 | -4,50 | 2,18 |
| | 200 °C | 0,11 | 0,08 | 0,13 | 0,09 | 1,50 | 0,87 |

Onde:

ΔD - corresponde a média da diferença dos diâmetros médios dos corpos de prova submetidos a mesma faixa de temperatura, medido em mm;

ΔH - corresponde a média da diferença das alturas dos corpos de prova submetidos a mesma faixa de temperatura, medido em mm;

ΔP - corresponde a média da diferença do peso dos corpos de prova submetidos a mesma faixa de temperatura, medido em g;

Fonte: Autor (2022)

Ao observar a reação dos corpos de prova, confeccionados com concreto à temperatura de 200°C (conforme a tabela 6), é possível perceber uma contração no seu diâmetro médio e uma expansão da sua altura e um leve incremento no seu

volume. Tal variação ocorre devido ao diâmetro ser a menor dimensão em relação à altura do corpo de prova. Desta forma, a influência da dessecação do concreto pela retração, devido à perda de água livre, é menor que a expansão térmica do concreto. Até essa temperatura ainda pode ocorrer a hidratação do cimento anidro, o que justifica o seu leve incremento de massa.

O mesmo pode ser visto para o concreto com o agregado calcário: uma leve expansão volumétrica com um pequeno ganho de massa. Na temperatura de 200°C, ao mesmo tempo em que ocorre uma tendência à retração do concreto, em razão da perda da água livre, o esqueleto sólido do concreto tenta a expandir.

Com o agregado basalto a retração causada pela perda da água livre, e da desidratação do C-S-H, causou uma expansão nos corpos de prova, causando uma expansão volumétrica e uma perda de massa, mostrando que a hidratação do cimento anidro não foi suficiente para manter a resistência à compressão, visto que ocorreu uma diminuição da resistência à compressão, nesta faixa de temperatura.

Nos corpos de provas confeccionados com calcário, é possível afirmar que o primeiro pico de desidratação do concreto ainda não ocorreu, e a hidratação do cimento anidro teve continuidade, o que levou aos ganhos de massa, volume e de resistência à compressão.

Com o concreto em que foi utilizado granito, o inverso aconteceu. A perda das águas acarretou uma retração do concreto, bem como a diminuição da sua resistência à compressão

A 200°C as expansões foram de 0,0% para o basalto, 0,24% para o granito e 0,129% para o calcário, e a variação das massas foi de 0,05%, 0,04% e 0,29% respectivamente, mostrando um incremento de massa para todos os corpos de prova a essa temperatura, demonstrando que a existência de água livre e a hidratação do cimento anidro ainda ocorreu a essa temperatura.

Aos 400°C, todos os agregados utilizados apresentaram uma dilatação volumétrica de 0,2% para o basalto, 0,33% para o granito e 0,25% para o calcário. E uma perda de massa de 0,26%, 0,13% e 0,11% respectivamente, conforme o esperado, visto que a essa temperatura já não é esperada a existência de água livre (MILLARD e PIMENTA, 2019), devido a perda de massa e sua expansão volumétrica.

A partir da temperatura de 600°C, todos os agregados sofreram uma expansão volumétrica, perda de massa e diminuição da resistência à compressão de modo muito acentuado, se comparado com as faixas anteriores.

Nessa temperatura, a expansão do basalto foi de 0,24% e perdendo 1% de sua massa original.

O granito apresentou uma expansão volumétrica de 0,8%, na faixa de 600°C, correspondendo a uma expansão 242% superior a expansão obtida na faixa de temperatura de 400°C, sofrendo uma perda de peso de 1,48% com relação ao peso inicial.

O calcário apresentou uma expansão similar ao granito quando comparado com a expansão na faixa de temperatura anterior. A expansão foi de 2,4 vezes superior à expansão na temperatura de 400°C.

A expansão, bem como a perda de massa apresentadas pelos corpos de prova à temperatura de 600°C se justifica devido ao início do segundo pico de desidratação do C-S-H, conforme a literatura prediz.

O início da descarbonatação do carbonato de cálcio, aos 800°C, e a somada ao pico de desidratação do C-S-H, iniciada a 600°C, seguindo a literatura, tem-se uma expansão de 1,54% para o granito e uma variação no volume de -2,55%, bem como uma expansão de 1,66% e uma variação de volume de -3,92% para o calcário e uma expansão de 0,92% e -1,92% para o basalto, respectivamente.

4.3 Absorção de água

Para a absorção de água, bem como índice de vazios, massa específica seca e massa específica saturada, seguem abaixo os resultados obtidos, na tabela 7.

Tabela 7 - Ensaio de Absorção de água, índice de vazio e massas específicas.

| Agregado | Faixa de Temperatura | de Absorção | Índice de Vazios | Massa Específica Seca | Massa Específica Saturada |
|----------|----------------------|-------------|------------------|-----------------------|---------------------------|
| Basalto | Referência | 8,09% | 19,07% | 2,37 | 3,16 |
| | 200°C | 7,66% | 18,39% | 2,40 | 3,17 |
| | 400°C | 8,87% | 20,69% | 2,34 | 3,21 |
| | 600°C | 8,93% | 21,15% | 2,37 | 3,27 |
| | 800°C | 10,63% | 23,84% | 2,25 | 3,26 |
| Calcário | Referência | 6,55% | 15,16% | 2,31 | 2,91 |
| | 200°C | 6,53% | 15,19% | 2,33 | 2,92 |
| | 400°C | 6,74% | 15,56% | 2,31 | 2,92 |

| | | | | | |
|---------|------------|--------|--------|------|------|
| | 600°C | 8,06% | 18,47% | 2,29 | 3,04 |
| | 800°C | 10,38% | 22,44% | 2,16 | 3,08 |
| Granito | Referência | 9,25% | 19,87% | 2,15 | 2,93 |
| | 200°C | 8,84% | 19,05% | 2,15 | 2,90 |
| | 400°C | 8,86% | 21,90% | 2,62 | 3,66 |
| | 600°C | 9,61% | 21,05% | 2,19 | 3,04 |
| | 800°C | 10,72% | 22,99% | 2,14 | 3,08 |

Fonte: Autor (2022)

À temperatura de 200°C, é possível verificar a diminuição da absorção d'água nos concretos, com todos os agregados, em conjunto com um aumento de seus pesos, confirmando que a perda da água livre e a expansão dos corpos de prova foi inferior à hidratação do cimento anidro. O que justifica o aumento, no caso do basalto e do calcário, bem como a manutenção, no caso do granito, quanto às massas específicas, tanto a seca, como a saturada.

Nas demais temperatura, as taxas de absorção mostram uma tendência de aumento, bem como o índice de vazios, mostrando-se inversos às massas específicas. Como exceção o granito a 400°C, que mostrou um aumento nas suas massas específicas, apresentando-se como um *outlier*, dentro deste conjunto de dados.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi estudada a influência dos agregados graúdos na resistência à compressão do concreto, quando submetido a altas temperaturas. Durante os ensaios realizados, foi possível constatar que:

- a) independentemente do tipo de agregado utilizado, o concreto apresentou, uma variação de -0,01%, -0,08% e 0,01% em na primeira faixa de temperatura, para os agregados de basalto, granito e calcário, quando comparado com a referência;
- b) para o conjunto de dados obtidos durante a pesquisa, a diferença entre os agregados se mostrou acentuada nas temperaturas de 400°C e 600°C;
- c) a 800°C, o basalto apresentou um fator de redução superior em 6 pontos percentuais que o granito;
- d) quanto à absorção, o granito apresentou melhores resultados, com variações menores que os demais agregados.

No que se refere à expansibilidade, o concreto confeccionado com o agregado basalto, apresentou uma expansão inferior do que os demais agregados. E o mesmo comportamento foi observado quanto à absorção de água e índice de vazios.

Sugere-se que novos trabalhos versem sobre:

- a) estudar o comportamento de outros traços na confecção do concreto, bem como outros tipos de agregado;
- b) realizar uma verificação quanto à influência do regime de resfriamento, no comportamento do concreto;
- c) avaliar o impacto da reidratação do concreto, após a exposição a temperaturas elevadas;
- d) avaliar o impacto que ciclos de variação de temperatura possam ter no concreto;
- e) investigação sobre o uso de aditivos, no desempenho do concreto quando submetido a temperaturas elevadas.

REFERÊNCIAS

ACI, **ACI 308R-01: Guide to Curing Concrete. Reapproved 2008**. Farmington Hills, Michigan, 2008.

ALMEIDA, S. M. de S.. **Análise Do Módulo De Elasticidade Estático E Dinâmico Do Concreto De Cimento Portland Através De Ensaio De Compressão Simples E De Frequência Ressonante**, Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia de Materiais e Construção Civil, Belo Horizonte, 2012.

ALUKO, O. G.; YATIM, J. M.; KADIR, M. A. A.; YAHYA, K.. **A Review Of Bio-Fibrous Concrete Exposed To Elevated Temperatures**. Construction and Building Materials, v. 260, 2020.

AMORE, C. S.. **Incêndio e ruína: é de um edifício que estamos falando?**, Cidades para que(m)?, 2018 Disponível em: <<https://cidadesparaquem.org/blog/2018/5/2/incndio-e-runa-de-um-edificio-que-estamos-falando>> Acesso em 13.nov.2020.

ARIOZ, O.. **Effects Of Elevated Temperatures On Properties Of Concrete**, Fire Safety Journal 42 pg 516–522, 2007.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118** Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7217**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT, 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, 2015b.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778** - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14931** Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220**. Desempenho Térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2003a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**. Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018b.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16755**. Requisitos de segurança para construção de elevadores — Inspeções e ensaios — Determinação da resistência ao fogo de portas de pavimento de elevadores. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16951**. Reação ao fogo de sistemas e revestimentos externos de fachadas – Método de ensaio, classificação e aplicação dos resultados de propagação do fogo nas superfícies das fachadas. Rio de Janeiro, 2021a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16965**. Ensaio de resistência ao fogo de elementos construtivos. Rio de Janeiro, 2021b.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53:2003**. Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003b.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM E119: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials**. Washington, D.C., 2000.

BENGAR, H. A.; SHAMANSOURI, A. A.; SABET, N. A. Z.; KABIRIFAR K.; TAM, V. W. Y.. **Impact Of Elevated Temperatures On The Structural Performance Of Recycled Rubber Concrete: Experimental And Mathematical Modeling**. Construction and Building Materials, v.255, 2020.

BESHR, H.; ALMUSALLAM, A. A.; MASLEHUDDIN, M.. **Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete**, Construction and Building Materials, v. 17, p. 97-103 2003.

BORESI, A. P.; SCHMIDT, R.J.. **Advanced Mechanics of Materials**, Editora Wiley, 6ª Edição, 2004.

BÖCKH, P. V.; WETZEL, T.. **Heat Transfer – Basics and Practice**, Springer, 2011.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M., LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W., SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J.. **Mechanisms of cement hydration**, Cement and Concret Research, v41, 2011.

BRASIL, Departamento Nacional de Produção Mineral, **Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba: MINEROPAR, 2004.

DAVIDENKO, T.. **Hydratation D'un Système Cimentaire Binaire Contenant Des Cendres Volantes De Biomasse**, Tese de Doutorado – Université de Sherbrooke, Faculté de Génie, Département de Génie Civil, Québec, 2015.

DI LUZIO, G.; CUSATIS, G.. **Hygro-thermo-chemical modeling of high performance concrete. 1: Theory**, Cement & Concrete Composites, v. 31, p. 301-308, 2009.

DU, P.; YANG, Y.; TAN, K. H.. **Analytical modelling of high strength concrete columns under ambient and fire conditions**. Engineering Structures, v. 247, 2021.

EUROCODE 2: **Design Of Concrete Structures – Part1-1: General Rules And Rules For Buildings**, 2004a.

EUROCODE 2: **Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**, 2004b.

FELICETTI, R.; MONTE, F. L.; PIMENTA, P.. **A new test method to study the influence of pore pressure on fracture behaviour of concrete during heating**, Cement and Concrete Research, v. 94, 2017.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M.. **Alkali–aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications**, Canadian Journal of Civil Engineering, v 27, pg 167-191, 2000.

FUSCO, P. B.. **Tecnologia do Concreto Estrutural**, 1ª Edição, Editora Pini, 2008

GAWIN, D.; PESAVENTO, F.; SCHREFLER, B. A.; **Modelling of hygro-thermal behaviour of concrete at high temperature with thermo-chemical and mechanical material degradation**, Computer methods in applied mechanics and engineering, v. 192, p. 1731-1771, 2003.

PRO GLOBAL MEDIA, **Global Concrete Report**, 2021.

HAGER, I.; TRACZ, T.; ŚLIWIŃSKI, J.; KRZEMIENI, K.. **The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature**, 2015.

HEWLETT, P. C.. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4ª Edição, Elsevier, Burlington, 2006.

ITAMBÉ. **Relatórios de ensaio**. 2022. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/relatorios-de-ensaio/?pro=368>>. Acesso em: 10 ago. 2022.

KODUR, V. K.R.; DWAIKAT, M.. **A Numerical Model For Predicting The Fire Resistance Of Reinforced Concrete Beams**. Cement & Concrete Composites, v. 30, p. 431-443, 2008.

MALIK, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI S. V.. **Thermal And Mechanical Properties Of Concrete And Its Constituents At Elevated Temperatures: A Review**, 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.; **CONCRETE Microstructure, Properties and Materials**, 2ª Edição, 2001.

MILLARD, A.; PIMIENTA, P.. **Modelling of Concrete Behaviour at High Temperature** – State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 227-HPB, 2019.

MOSES, P. E., **Hydration of Cement and its Mechanisms**. Journal of Mechanical and Civil Engineering, v13, 2016.

MUCIACCIA, G.; ROSATI, G.; DI LUZIO, G.. **Compressive failure and size effect in plain concrete cylindrical specimens**, Construction and Building Materials, v. 137, p. 185-194, 2017.

MUKHOPADHYAY, A. K.; NEEKHRA, S.; ZOLLINGER, D. G.. **Preliminary Characterization Of Aggregate Coefficient Of Thermal Expansion And Gradation For Paving Concrete**. Disponível em: < <https://tti.tamu.edu/tti-publication/preliminary-characterization-of-aggregate-coefficient-of-thermal-expansion-and-gradation-for-paving-concrete/>>. Acesso em: 13 nov. 2020.

NEVILLE, A. M., BROOKS J. J.. **Tecnologia do Concreto**, 2ª Edição, Bookman Editora, 2010.

NFPA, NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 251: Standard Methods of Tests of Fire Resistance of Building Construction and Materials**. Las Vegas, 2006.

PHAM, D.; VU M.; TRIEU, H. T.; BUI, T. S.; THOI T. N.. **A Thermo-Mechanical Meso-Scale Lattice Model To Describe The Transient Thermal Strain And To Predict The Attenuation Of Thermo-Mechanical Properties At Elevated Temperature Up To 800 °C Of Concrete**, Fire Safety Journal, v. 114, 2020.

REGOBELLO, R.. **Análise Numérica De Seções Transversais E De Elementos Estruturais De Aço E Mistos De Aço E Concreto Em Situações De Incêndio**, Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2007.

RESNICK, R., HALLIDAY, D., WALKER, J. **Fundamentos de Física – Volume 2 Gravitação, Ondas e Termodinâmica**, 8ª Edição, 2009.

ROBERT, F.; COLINA, H.. **The influence of aggregates on the mechanical characteristics of concrete exposed to fire**, 2009.

SOLLERO, M. B. S.. **Propriedades Mecânicas Residuais Do Concreto Em Situação De Incêndio**, Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2019.

SOLLERO, M. B. S.; MORENO JUNIOR, A. L.; COSTA, C. N.. **Residual mechanical strength of concrete exposed to high temperatures – international standardization and influence of coarse aggregates**, 2021.

SCRIVENER, K.L.; NONAT, A.. **Hydration Of Cementitious Materials, Present And Future**, Cement and Concrete Research, 2011.

SHEN, L.; LI, W.; ZHOU, X.; FENG, J.; DI LUZIO, G.; REN, Q.; CUSATIS, G.. **Multiphysics Lattice Discrete Particle Model for the simulation of concrete thermal spalling**, Cement and Concrete Composites, v. 106, 2020.

SILVA, D. A.; GEYER, A. L. B.. **Influência da Forma do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 12, Vol. 05, pp. 67- 82 Dezembro de 2018.

SOUZA, A. A.. **Influência Do Tipo De Agregado Nas Propriedades Mecânicas Do Concreto Submetido Ao Fogo**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2005.

SURYA, T. R.; PRAKASH, M.; SATYANARAYANAN, K. S.; CELESTINE, A, K,; PARTHASARATHI, N.. **Compressive Strength Of Self Compacting Concrete Under Elevated Temperature**. Materials Today: Proceedings, 2020.

TAYLOR, H. F. W.. **Cement Chemistry**, 2ª Edição, Thomas Telford, Londres, 1990

VIERO, E. H.. **Aplicação de Areia de Britagem de Rochas Basálticas na Fabricação de Concreto de Cimento Portland**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Caxias do Sul, 2010.

VU, C.; PLÉ, O.; WEISS, J.; AMITRANO, D., **Revisiting The Concept Of Characteristic Compressive Strength Of Concrete**, 2020.

XING, Z.; BEAUCOUR, A; HEBERT, R.; NOUMOWE, A.; LEDESERT, B.. **Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature**, 2011.

XOTTA, G.; MAZZUCCO, G.; SALOMONI, V. A.; MAJORANA, C. E.; WILAM, K.J, **Composite behavior of concrete materials under high temperatures**, International Journal of Solids and Structures, v. 64-65, p. 86-99, 2015.

YIM, H. J.; PARK, S.; JUN, Y.. **Physicochemical and mechanical changes of thermally damaged cement pastes and concrete for re-curing conditions**, Cement e Concrete Research, v 125, 2019.

WU, K.; CHEN, B.; YAO, W.; ZHANG, D.. **Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete**, Cement and Concrete Research, v 31, 2001.