

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIA, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS**

EVELINE MANOSSO JANIK BRIK

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO
PARA CONCRETOS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO SUBMETIDOS A
RESFRIAMENTO LENTO E RÁPIDO INSTANTÂNEO**

PONTA GROSSA

2021

EVELINE MANOSSO JANIK BRIK

**AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO
PARA CONCRETOS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO SUBMETIDOS A
RESFRIAMENTO LENTO E RÁPIDO INSTANTÂNEO**

Dissertação apresentada para obtenção de título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de desenvolvimento e caracterização de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pereira.

PONTA GROSSA

2021

B856

Brik, Eveline Manosso Janik

Avaliação das alterações do módulo de elasticidade estático para concretos em situações de incêndio submetidos a resfriamento lento e rápido instantâneo / Eveline Manosso Janik Brik. Ponta Grossa, 2021.

91 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais - Área de Concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pereira.

1. Concreto. 2. Situação de incêndio. 3. Resfriamento rápido. 4. Módulo de elasticidade estático.. I. Pereira, Eduardo. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Desenvolvimento e Caracterização de Materiais. III.T.

CDD: 620.11

EVELINE MANOSSO JANIK BRIK

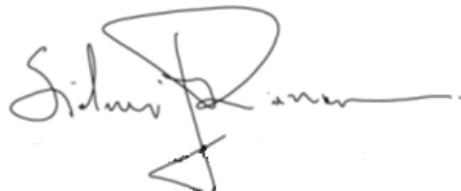
AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO
PARA CONCRETOS EM SITUAÇÕES DE INCÊNDIO SUBMETIDOS A
RESFRIAMENTO LENTO E RÁPIDO INSTANTÂNEO

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, no Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Área de concentração: desenvolvimento e caracterização de materiais.

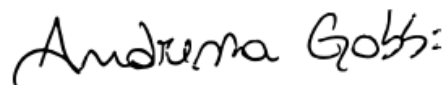
Ponta Grossa, 11 de dezembro de 2021.



Prof. Dr. Eduardo Pereira – Orientador
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof. Dr. Sidnei Antonio Pianaro
Doutor em Química
Universidade Estadual de Ponta Grossa



Profa. Dra. Andressa Gobbi
Doutora em Engenharia da Construção
Centro Universitário Unidombosco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela dádiva da vida, por estar ao meu lado sempre que preciso e por todas as pessoas incríveis que o Senhor colocou ao longo do caminho. Agradeço por cada momento, sendo de superação ou celebração.

Agradeço aos meus pais, Evilaine e Marcio, por todo amor que sempre recebi, não medindo esforços para me apoiar e auxiliar. Proporcionando além de tudo a oportunidade do estudo e crescimento pessoal e profissional, moldando meu caráter para buscar ser uma pessoa sempre melhor, do bem. E a minha família que sempre está ao meu lado, dando todo o apoio necessário.

Agradeço imensamente ao meu esposo Diogenes, pelo grande incentivo e apoio em realizar este estudo. Acreditando em mim e compreendendo a minha falta de tempo, para demais atividades em família. Deixando várias vezes de descansar e se divertir para me auxiliar em tudo que pode durante este estudo.

Agradeço especialmente ao meu orientador, o Prof. Dr. Eduardo Pereira, pela confiança e oportunidade fornecida em desenvolver esta pesquisa. Reconheço tudo que o senhor fez por mim, pela grande dedicação e orientação. O senhor é um exemplo de profissional e pessoa a ser seguido.

Agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais e à Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), por terem me ofertado a oportunidade de cursar mestrado numa instituição pública, gratuita e de qualidade.

Agradeço em especial aos amigos do grupo de pesquisa, Marcelo e Jadiel. Obrigado pela inestimável ajuda e parceria ao longo de diversos ensaios do programa experimental.

Agradeço a querida amiga Prof.^a Dr.^a Patrícia Kruger, pelo incentivo inicial e grandes conselhos ao longo desta etapa.

Agradeço ao Prof. Elias Pereira e aos serralheiros da UEPG, pela coordenação e confecção do forno utilizado nesta pesquisa, sendo a chave principal para o desenvolvimento deste estudo.

Por fim, agradeço imensamente a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, com o desenvolvimento dessa pesquisa, e que me motivaram por meio de conversas e orações.

RESUMO

O concreto exposto a altas temperaturas tem as suas propriedades modificadas, tais como, módulo de elasticidade, resistência característica à compressão e tração, porosidade, e além destas alterações também podem ocorrer fissurações, dilatações, alterações na coloração e lascamentos. Devido ao fato do concreto ser um material heterogêneo, o estudo deste material deve ser aprofundado para melhor entendimento das suas propriedades. Por esta razão o objetivo deste trabalho é avaliar as alterações do módulo de elasticidade estático de concretos de cimento Portland sujeitos a situação de incêndio em condições de resfriamento lento e rápido. Para isso se desenvolveu o programa experimental com três traços de concreto utilizando agregado basáltico. Após elaboração de diagrama de dosagens pelo método IPT/ EPUSP, foram definidos traços para atingir resistência à compressão aos 28 dias com f_{ck} igual a 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa, os quais foram expostos a temperaturas de 100 °C, 300 °C, 450 °C e 600 °C; subdivididos em dois grupos de resfriamento, lento e rápido. A partir dos ensaios de caracterização acompanhou-se as modificações nos módulos de elasticidade, resistências à compressão e resistência à tração, absorções e porosidades. Os resultados indicaram a redução nas propriedades mecânicas e o aumento da absorção, conforme se eleva a temperatura. Verificando que há uma grande influência das microfissuras em todos os ensaios realizados, o módulo de elasticidade dos concretos foi alterado independentemente do traço e do tipo de resfriamento aplicado. As correlações entre os módulos e as demais propriedades foram acompanhadas pelo aumento da microfissuração do concreto além da perda de água e decomposição das fases do concreto geradas pela desidratação da portlandita e decomposição do C-S-H.

Palavras-chave: Concreto; situação de incêndio; resfriamento rápido; módulo de elasticidade estático.

ABSTRACT

Concrete exposed to high temperatures has its properties modified, such as modulus of elasticity, characteristic resistance to compression and traction, porosity, and in addition to these changes, cracking, dilation, color changes and chipping can also occur. Due to the fact that concrete is a heterogeneous material, the study of this material must be deepened for a better understanding of its properties. For this reason, the objective of this work is to evaluate the changes in the static modulus of elasticity of Portland cement concretes subjected to fire conditions under slow and fast cooling conditions. For this, the experimental program was developed with three concrete mixes using basaltic aggregate. After drawing up a dosage diagram using the IPT/EPUSP method, lines were defined to achieve compressive strength at 28 days with f_{ck} equal to 20 MPa, 30 MPa and 40 MPa, which were exposed to temperatures of 100 °C, 300 °C, 450 °C and 600 °C; subdivided into two cooling groups, slow and fast. From the characterization tests, the changes in the modulus of elasticity, compressive strength and tensile strength, absorption and porosity were monitored. The results indicated a reduction in mechanical properties and an increase in absorption as the temperature rises. Verifying that there is a great influence of microcracks in all tests performed, the modulus of elasticity of the concretes was changed regardless of the mix and the type of cooling applied. The correlations between the modules and the other properties were accompanied by an increase in the microcrack of the concrete in addition to the loss of water and decomposition of the concrete phases generated by the dehydration of portlandite and decomposition of C-S-H.

Keywords: Concrete; high temperatures; sudden cooling; static modulus of elasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curvas temperatura-tempo padronizadas pelas principais normas internacionais e a forma típica das curvas naturais.....	21
Figura 2: Microestrutura do concreto.....	23
Figura 3: Etringita	23
Figura 4: Resumo das alterações no concreto, conforme se aumenta a temperatura de exposição.....	26
Figura 5: Zona de transição do concreto.....	31
Figura 6: Esquema das variáveis de estudo.....	38
Figura 7: Fases do planejamento experimental.....	39
Figura 8: Curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos, conforme NBR 7211.	41
Figura 9: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo, conforme NBR 7211.	41
Figura 10: Diagrama de Dosagem	43
Figura 11: Curva de Abrans: relação entre resistência à compressão e relação água/cimento.....	43
Figura 12: Curva de Lyse: correlação entre o teor de agregados totais e relação água/cimento.....	44
Figura 13: Curva de Molinari: relação entre o teor de agregados totais e o consumo de cimento por m ³ de concreto produzido	44
Figura 14: Corpos de prova executados para o ensaio: (a) cura totalmente imersa por 28 dias; (b) mantidos 90 dias em temperatura ambiente até o ensaio de elevação de temperatura	46
Figura 15: Interior do forno, durante o aquecimento	47
Figura 16: Forno adaptado para aquecimento dos corpos de prova	47
Figura 17: Corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão	49
Figura 18: Prensa utilizada para ensaios e ensaio de módulo elástico.	49
Figura 19: Corpo de prova após ensaio de tração	51
Figura 20: Resistência à compressão dos concretos sujeitos a diferentes temperaturas e condições de resfriamento	53

Figura 21: Correlação entre os resultados de resistência à compressão para as condições de resfriamento lento e rápido.....	55
Figura 22: Resistência à tração dos concretos sujeitos a diferentes temperaturas e condições de resfriamento	56
Figura 23: Resultados de resistência à tração por compressão diametral para os concretos de traços pobre e médio	56
Figura 24: Resultados de Resistência à tração por compressão diametral para os concretos de Traço Rico	57
Figura 25: Correlação entre os resultados de resistência à tração para as condições de resfriamento lento e rápido.....	58
Figura 26: Corpos de prova com corte para extração da amostra para o MEV	59
Figura 27: Absorção dos concretos sujeitos a diferentes temperaturas e condições de resfriamento	60
Figura 28: Correlação entre Resistência à compressão e Absorção.....	62
Figura 29: Módulo elástico dos concretos sujeitos a diferentes temperaturas e condições de resfriamento	63
Figura 30: Resultado do Módulo elástico no traço pobre	64
Figura 31: Resultado do Módulo elástico no traço médio.....	64
Figura 32: Resultado do Módulo elástico no traço rico.....	65
Figura 33: Correlação entre a resistência à compressão e o módulo elástico	66
Figura 34: Correlação entre a absorção e o módulo elástico	67
Figura 35: Resumo DRX - Traço Rico, resfriamento rápido, diversas temperaturas.	68
Figura 36: Imagens em MEV indicando o avanço das fissurações em função da temperatura.....	69
Figura 37: Resultados de DRX, diferentes traços, temperatura ambiente	70
Figura 38: Resultados de DRX para temperatura de 300°C.....	70
Figura 39: Etringita na amostra de MEV, traço PR 300.....	71
Figura 40: Etringita na amostra de MEV, traço PR 450.....	71
Figura 41: Etringita na amostra de MEV, traço PR 600.....	72
Figura 42: Fatores de redução do módulo de elasticidade tangente e secante do concreto em função da temperatura (ABNT NBR 15200:2004)	75
Figura 43: Fatores de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura, adaptada (CRUZ, 1966 apud ACI, 1989)	75
Figura 44: Curvas “típica” tensão-deformação para o traço pobre.	76

Figura 45: Curvas “típica” tensão-deformação para o traço médio.	76
Figura 46: Curvas “típica” tensão-deformação para o traço rico.	76
Figura 47: Fatores de redução do módulo elástico, em diferentes temperaturas.....	78
Figura 48: Fatores de redução do módulo elástico, resfriamento rápido e lento.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação das propriedades térmicas do concreto e do aço	22
Tabela 2: Condutividade térmica dos agregados	28
Tabela 3: Requisitos da norma NBR 16697:2018, para cimento CP II – F 32	40
Tabela 4: Caracterização física dos agregados	41
Tabela 5: Traços utilizados para preparação do concreto.....	45
Tabela 6:Valores para os principais parâmetros das relações tensão-deformação do concreto (EN 1992-1-2:2004).....	73
Tabela 7: Valores para cálculo da redução do módulo e resistência segundo (ABNT NBR15200:2004).....	74

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas

NBR – Norma brasileira aprovada pela associação brasileira de normas técnicas

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

CH – Hidróxido de cálcio

DRX - Difração de raios X.

EDS - Composição química elementar obtida por espectroscopia de energia dispersiva

MPa – Megapascal

pH - Potencial hidrogeniônico

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

TG - Termogravimetria

μm - Micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	19
2.2	MICROESTRUTURA DO CONCRETO E COMPORTAMENTO DAS SUAS FASES EM ELEVADAS TEMPERATURAS	22
2.2.1	Pasta De Cimento Portland Hidratada	22
2.2.2	Agregado	28
2.2.3	Zona De Transição	30
2.3	DEFORMAÇÕES TÉRMICAS E MÓDULO DE ELASTICIDADE	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	VARIÁVEIS DE ESTUDO	37
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	38
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	39
3.4	DOSAGEM DO CONCRETO E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DA PESQUISA	42
3.5	EXPOSIÇÃO DO CONCRETO À ALTAS TEMPERATURAS	46
3.6	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	48
3.6.1	Compressão Axial	48
3.6.2	Módulo Elástico	49
3.6.3	Tração por Compressão Diametral	50
3.6.4	Absorção por Imersão:	51
3.6.5	Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	52
4	RESULTADOS E DISCUÇÕES	52
4.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS	52

4.2	MODULO ELÁSTICO	62
5	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil. Isso ocorre devido a facilidade em se trabalhar com o material no estado fresco, ou seja, com sua consistência plástica, o qual permite fabricar peças de diferentes formatos e dimensões.

O concreto convencional é produzido com um custo relativamente baixo comparado a outros materiais como o aço. Por exemplo, o custo para fazer uma estrutura simples de concreto armado é 40% do custo para fazer a mesma estrutura metálica.

O agregado, a água e cimento Portland, que são os principais componentes do concreto, são, em geral, facilmente encontrados em praticamente todas as regiões do mundo. Apesar de ser largamente empregado há séculos, trata-se de um material extremamente complexo, cujas propriedades ainda não são totalmente compreendidas.

As dificuldades encontradas na descrição e previsão do comportamento de estruturas de concreto devem-se a aspectos relacionados à heterogeneidade do meio em questão, que é poroso e multifásico, podendo conter em seu interior fluidos na forma líquida e gasosa. Quando exposto a condições ambientais agressivas, as dificuldades para descrever e prever o comportamento de estruturas de concreto são ainda maiores, uma vez que o concreto é resultado de reações químicas entre o cimento e a água, principalmente encontrando-se em constante evolução (AMARAL, 2011).

Geralmente, na construção civil, o concreto é utilizado em conjunto com o aço, no qual o material é denominado concreto armado. Esta interação entre os dois materiais é feita pelo fato de o concreto ter alta resistência aos esforços de compressão, enquanto o aço tem alta resistência aos esforços de tração. Então os dois materiais em conjunto, proporcionam melhores resultados em relação a resistência mecânica.

Esta junção de materiais é possível pelo fato de que o concreto e aço possuem coeficientes de dilatação térmica praticamente iguais, por isto trabalham em conjunto no caso de pequenas variações de temperatura. O concreto possui o coeficiente entre 0,9 e $1,4 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ e o aço possui coeficiente $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. A diferença existente

é desprezível para as variações de temperaturas em que as estruturas normalmente trabalham ($\Delta t < 50^{\circ}\text{C}$) (ORTIZ, 2019).

A exposição dos elementos constituídos de concreto a elevadas temperaturas, devido aos incêndios nas edificações ou em locais próprios para este fim, tais como churrasqueiras, fornos e lareiras, geram nestes elementos alterações em suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

Com base nos estudos sobre este assunto, Georgali e Tsakiridis (2005), Costa (2002), Hager (2013), Battagin e Silveira (2018), Morales *et al.* (2011), indicam que estas alterações podem ocorrer na coloração, na perda de resistência mecânica à tração e à compressão, no módulo de elasticidade, no esfarelamento superficial, na fissuração até a própria desintegração da estrutura. Estas alterações dependem do tempo de exposição ao fogo, velocidade de resfriamento das peças, da temperatura máxima que o material ficou exposto, do agregado que compõem o concreto, do grau de hidratação, da umidade, da relação água/cimento e de porosidade. Valente (2014) destaca ainda a ocorrência de outros danos causados ao concreto submetido à ação do fogo: calcinação superficial, movimentos de dilatação e retração estrutural e movimentação da armadura devido a dilatação do aço.

Cada fase afeta o concreto de uma maneira particular. Morales *et al.* (2011) descrevem as alterações macroscópicas no concreto, em faixas de temperatura, desta maneira é possível verificar a influência do aumento da temperatura neste material. Segundo Rosso (1975) e Silva (2015), elevando a temperatura até 250°C , os efeitos no concreto são pequenos, não tendo grande influência na estrutura. Ainda segundo os autores, a partir de 300°C , o concreto perde resistência mecânica, podendo atingir até 50% da resistência inicial e sua tonalidade varia entre os tons de rosa e vermelho. Entre 600°C à 950°C sua tonalidade varia do cinza claro ao amarelo claro e entre 1.000°C à 1.200°C o concreto sofre sintetização, sua resistência é totalmente anulada e sua tonalidade é amarelo claro.

O resfriamento rápido das peças prejudica ainda mais as resistências das estruturas, sendo que quando a temperatura não ultrapassa 500°C e o resfriamento é lento pode-se recuperar em até 90% a resistência mecânica inicial das peças dentro do prazo de um ano. Segundo o Boletim 46 da FIB (2008), o concreto pode recuperar 100% de sua resistência em um período de 6 a 18 meses após o resfriamento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as alterações do módulo de elasticidade estático de concretos de cimento Portland sujeitos a situação de incêndio (elevação de temperaturas até 600 °C) em condições de resfriamento lento e rápido.

1.1.2 Objetivos Específicos

As alterações de módulo de elasticidade em concretos sujeitos a elevação de temperatura serão analisadas em concretos dosado para resistência mecânica à compressão (f_{ck}) de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa aos 28 dias de cura. Também serão verificadas as condições de resfriamento lento e brusca, visando identificar o efeito do resfriamento rápido e assim simular uma condição mais próxima ao que ocorre na prática durante o combate ao incêndio em estruturas. Adicionalmente, são objetivos específicos neste trabalho:

- Acompanhamento das resistências à compressão e resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto antes e após submetidos as situações de elevação de temperatura e posterior resfriamento lento e rápido;
- Caracterização das propriedades de absorções e porosidades dos concretos, bem como suas alterações microestruturais nas condições de exposição previstas;
- Caracterização das mudanças microestruturais e químicas dos concretos após as condições de ensaio.

1.2 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

O concreto é um material amplamente utilizado no Brasil e no mundo para a construção civil, podendo ser encontrado em obras de diversas funcionalidades e dimensões, por exemplo, desde pequenas residências até grandes construções como edifícios, rodovias, pontes, usinas hidrelétricas e nucleares ou obras de saneamento. O consumo aparente de cimento (vendas no mercado interno + importações) totalizou 60,8 milhões de toneladas no ano de 2020. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO

PORTLAND,2020). Este alto consumo do material concreto na construção civil, implica na necessidade de vários estudos, para aperfeiçoamento e conhecimento do material empregado. Como por exemplo o estudo do comportamento deste material em situações de incêndio.

Sabe-se que o concreto sofre alterações em suas propriedades quando exposto a temperaturas elevadas e que dependendo da temperatura e tempo de exposição, sua utilização é totalmente comprometida. Conforme é possível identificar no estudo de Carvalho (2001), as amostras expostas do concreto às altas temperaturas apresentaram microestrutura com aspecto não coeso, friável, muito porosa. Nas amostras não modificadas pelo fogo, a microestrutura é compatível com concretos de boa qualidade, sendo maciça e definida por elevados teores de etringita e portlandita.

Dentre estas propriedades que se alteram com a elevação da temperatura, destaca-se as alterações no módulo de elasticidade do concreto, que caracteriza a resistência do material à deformação elástica. Neste estudo busca-se contribuir para o entendimento do comportamento deste material tão utilizado no mundo, quando aplicado em situações de altas temperaturas e submetido a condições de resfriamento lento e rápido, principalmente para análise das modificações do módulo de elasticidade.

Estas duas condições de resfriamento serão analisadas para representar duas situações distintas. No resfriamento lento, as condições aplicadas em laboratório, como é feito na maioria dos trabalhos e pesquisas sobre o tema, os concretos são submetidos a elevação de temperatura em fornos e na sequência resfriados naturalmente para então ser procedido sua caracterização. Isto ocorre, pois, a redução brusca de temperatura pode gerar no material o efeito de lascamento. Apesar da condição de resfriamento lento, geralmente em ambiente laboratorial, permitir a caracterização dos concretos, esta não representa de forma apropriada uma situação de obra, onde normalmente a estrutura têm contato direto com a água, quando os bombeiros atuam para conter o incêndio.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo no primeiro, apresentada uma introdução, relação dos objetivos, justificativas e contribuição científica.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre incêndio e suas etapas, microestrutura do concreto, comportamento das suas fases em elevadas temperaturas, sobre as deformações térmicas e módulo de elasticidade.

No terceiro capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados, incluindo o planejamento experimental e as variáveis de análise.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e as discussões sobre o tema e a finalização com o quinto capítulo apresentando as principais conclusões obtidas com a execução do planejamento experimental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo descrevemos brevemente os conceitos de incêndio, da microestrutura do concreto, apresentando o comportamento das suas fases quando expostas as temperaturas elevadas e também conceitos sobre as deformações térmicas e módulo de elasticidade.

2.1 SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Pode-se definir que a combustão é uma reação química exotérmica que envolve a oxidação de materiais orgânicos, produzindo vapor de água e dióxido de carbono e que o fogo ocorre quando o processo de oxidação de um material combustível se desenvolve de forma rápida, sendo caracterizado pela emissão de calor, acompanhado de luz, fumaça ou ambos (HEISLER *et al.*, 2015). São necessários quatro elementos em conjunto para permitir a ocorrência do fogo: o combustível (a substância que queima), o comburente (o oxigênio), o calor, e a reação em cadeia.

O calor irradiado das chamas promove a decomposição do combustível em partículas que, combinadas com o comburente, queimam, irradiando calor novamente, que iniciará novamente este ciclo, que chamamos de reação em cadeia. Sinteticamente, trata-se do desencadeamento de reações, que acontecem durante o fogo, que originarão, novamente, o calor que ativará a queima do combustível na presença do comburente, enquanto houver todos estes componentes à disposição (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE GOIÁS, 2016). Como trata-se de uma ação conjunta, a retirada de um destes elementos interrompe a ação do fogo. Desse modo, pode-se extinguir o fogo retirando o calor, através do resfriamento com água, ou removendo o oxigênio, por abafamento (HEISLER *et al.*, 2015).

Lima (2005) explica que a ação química pode interromper a reação em cadeia se um determinado agente extintor for lançado sobre o fogo, pois suas moléculas se dissociam e pela ação do calor se combinam com a mistura inflamável, formando uma mistura não-inflamável, rompendo a reação em cadeia.

Na norma NPT 003 (2014), do corpo de bombeiros do Paraná, se tem as seguintes definições para incêndio:

- Incêndio: É o fogo sem controle, intenso, o qual causa danos e prejuízos à vida, ao meio ambiente e ao patrimônio.
- Incêndio classe A: Incêndio envolvendo combustíveis sólidos comuns, como papel, madeira, pano e borracha. É caracterizado pelas cinzas e brasas que deixam como resíduos e por queimar em razão do seu volume, isto é, a queima se dá na superfície e em profundidade.
- Incêndio classe B: Aquele que acontece em líquidos ou em gases combustíveis. O líquido queima na superfície, os gases, em volume. Os mais frequentes são: gasolina, álcool, GLP e éter. É caracterizado por não deixar resíduos e queimar apenas na superfície exposta e não em profundidade.
- Incêndio natural: Variação de temperatura que simula o incêndio real, em função da geometria, ventilação, características térmicas dos elementos de vedação e da carga de incêndio específica.

Segundo Rosso (1975) apud Morales *et al.* (2011) pode-se descrever o ciclo típico de um incêndio em uma edificação em três fases. Onde na fase inicial de Elevação Progressiva da Temperatura, ocorre o aquecimento dos materiais combustíveis de forma lenta, com aumento gradual da temperatura em um curto espaço de tempo, entre cinco a vinte minutos, até a escala de 300 °C. A fase intermediária ou combustão viva, é a fase onde as chamas se propagam descontroladamente e ocorre o “*flash over*”, chegando à temperatura de 1.300 °C. Na fase final, de Resfriamento e Extinção, após o consumo de uma parcela significativa do material combustível (cerca de 60% a 80%), a quantidade de calor liberada pela combustão não é suficiente para manter a elevação de temperatura; então, inicia-se a fase de Extinção ou Resfriamento.

Sendo o fenômeno “*flash over*” descrito como a súbita transição de um incêndio progressivo em um incêndio generalizado. Essa transição para um incêndio generalizado depende de variáveis tais como a influência térmica da radiação e a convecção, que são forças responsáveis por este processo. Além disso, as condições de ventilação, a divisão física, o volume, a geometria do espaço incendiado e a combinação dos gases quentes presentes são responsáveis pelo “*flash over*”. (ASSOCIAÇÃO HUMANITÁRIA DOS BOMBEIROS VOLUNTÁRIOS DE PAÇO DE SOUSA, 2013)

Segundo Souza (2010), os fatores que contribuem para a evolução de um incêndio, citados anteriormente, estão relacionados com a transmissão de calor que ocorre de três formas fundamentais:

a) por condução, ou seja, através de um material sólido de uma região de temperatura elevada em direção a uma outra região de baixa temperatura;

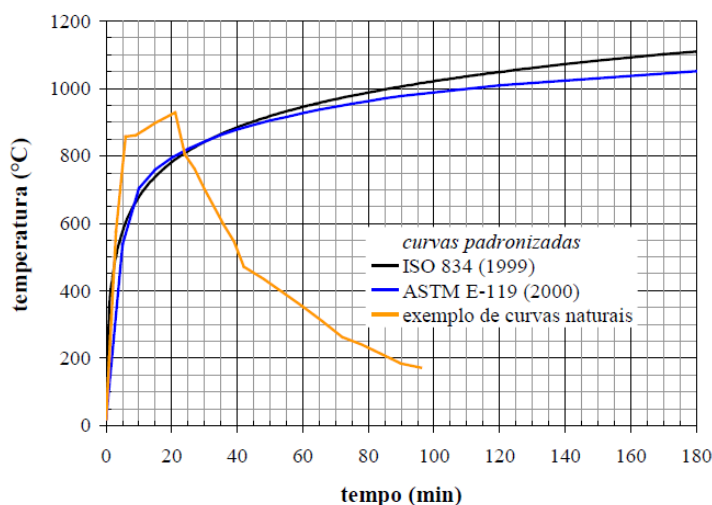
b) por convecção, ou seja, por meio de um fluido líquido ou gás, entre dois corpos submersos no fluido, ou entre um corpo e o fluido;

c) por radiação, processo pelo qual o calor flui por meio de propagação de ondas eletromagnéticas, de um corpo sob alta temperatura para um corpo de baixa temperatura.

As análises mais realísticas são obtidas por meio de curvas conhecidas como “curvas naturais” (Figura 1) que descrevem o incêndio tanto na fase de aquecimento, como na fase do resfriamento. Essas curvas podem ser parametrizadas por características do compartimento, tais como: grau de ventilação, aberturas, características dos materiais combustíveis presente no compartimento e características térmicas do material constituinte da compartimentação (COSTA, 2002).

As curvas padronizadas (Figura 1) são curvas que relacionam o aumento da temperatura com o tempo. As normas brasileiras NBR 14432/2000 e NBR 5628/1980 recomendam a curva ISO-834 para descrever a elevação padronizada de temperatura em função do tempo no projeto de elementos construtivos (COSTA, 2002).

Figura 1: Curvas temperatura-tempo padronizadas pelas principais normas internacionais e a forma típica das curvas naturais



Fonte: (Costa, 2002)

2.2 MICROESTRUTURA DO CONCRETO E COMPORTAMENTO DAS SUAS FASES EM ELEVADAS TEMPERATURAS

O concreto é um material que tem boa resistência a exposição ao fogo, pois o seu tempo de exposição ao fogo sem que o seu desempenho seja afetado é satisfatório e relativamente grande em relação a outros materiais, com características como o não desprendimento de gases tóxicos quando expostos a altas temperaturas, a estanqueidade, o isolamento térmico e a estabilidade das peças (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Comparando as propriedades térmicas do concreto com as propriedades do aço (Tabela 1), verificamos que a condutividade térmica e difusibilidade térmica é menor no concreto, o que possibilita que este material seja exposto a temperaturas mais elevadas por mais tempo do que o aço, sem transmitir o calor da superfície para o seu interior.

Tabela 1: Comparação das propriedades térmicas do concreto e do aço

Propriedades	Condutividade térmica	Difusibilidade térmica	Capacidade térmica
Concreto	0,17 a 2,00 W/mK	0,002 e 0,006 m ² /h	800 a 1200 J/Kg°C
Aço	52 W/mK	0,079 m ² /h	460 J kg ⁻¹ K ⁻¹

Segundo Pinheiro *et al.* (2010), uma das dificuldades da compreensão do comportamento do concreto deve-se a sua estrutura interna altamente complexa e heterogênea. Entretanto, o conhecimento da estrutura e das propriedades individuais dos seus materiais constituintes e da relação entre eles auxilia o entendimento das propriedades dos vários tipos de concreto. Conforme relatado por Mehta e Monteiro (2008) e já consolidado na literatura, as fases do concreto são divididas em pasta de cimento hidratada, agregado e zona de transição pasta/ agregado (ZT), além dos vazios existentes no interior do material.

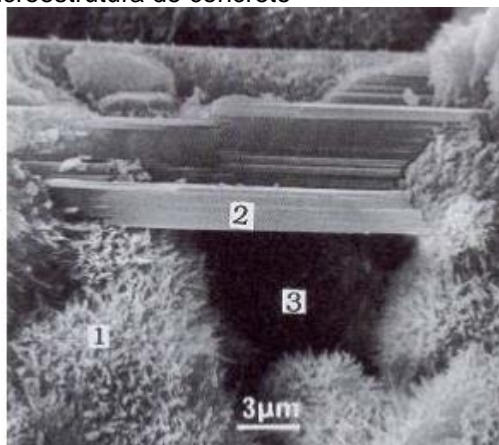
2.2.1 Pasta de Cimento Portland Hidratada

A pasta de cimento hidratada é resultado das complexas reações química do cimento Portland com a água. A hidratação do cimento evolui com o tempo, o que resulta em diferentes fases sólidas, vários tipos de vazios e água em diferentes formas.

As quatro principais fases sólidas são: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), parte resistente da pasta; hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) ou conhecido como (CH), parte frágil da pasta; sulfoaluminato de cálcio e grão de clínquer não hidratado. Estas fases do C-S-H, CH e sulfoaluminato (etringita) são identificadas nas Figura 2 e Figura 3.

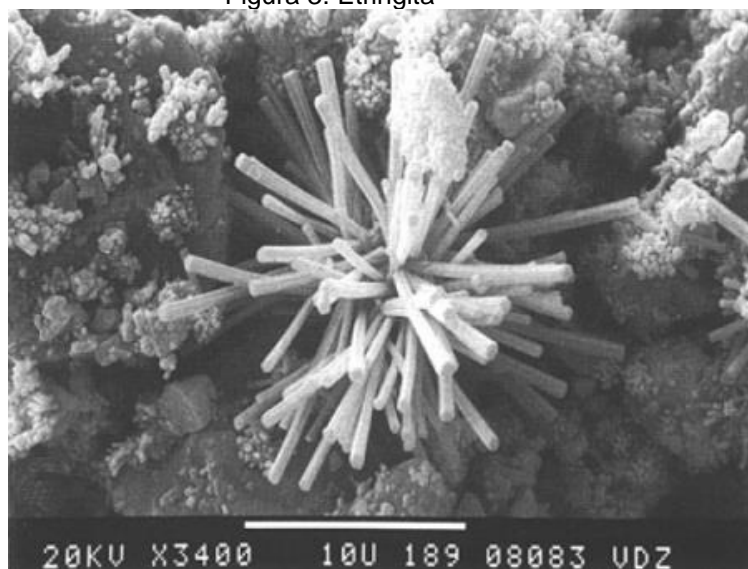
Figura 2: Microestrutura do concreto

- 1: C-S-H
- 2: Ca(OH)_2 ou (C-H)
- 3: Vazio Capilar



Fonte: (Moranville, 1992 apud Freitas, 2013)

Figura 3: Etringita



Fonte: (Griesser; Swiss, 2002 apud Freitas, 2013)

Segundo Mehta e Monteiro (1994), em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada, o C-S-H representa de 50 a 60 % do volume total, sendo o

composto responsável pela resistência à esforços mecânicos. Constituinte uma morfologia que varia em fibras poucos cristalinas ou em uma malha reticulada.

Segundo Pereira (2017), o hidróxido de cálcio hidratado, ocupa entre 20 e 25% do volume da pasta, sua principal função é manter a alcalinidade (pH igual a 13) e por consequência a passivação da armadura, já que possui baixa resistência mecânica, devido a sua baixa superfície específica o que lhe proporciona baixo poder de adesão e facilidade em dissolução em água. Sua morfologia é bem definida, com cristais prismáticos hexagonais que aumentam de tamanho, conforme se aumenta o espaço livre, ou seja, aumenta de tamanho com o aumento da relação de água/cimento.

Segundo Pereira (2017), os sulfoaluminatos de cálcio ocupam de 15 a 20% do volume da pasta, sendo seus principais compostos a etringita e o monossulfato de cálcio. A etringita é o produto da hidratação dos aluminatos, com morfologia de cristais grandes e volumosos em forma de agulhas, os quais se decompõem formando o monossulfato quando há a redução da concentração de sulfato. Na presença de umidade no concreto já endurecido, a etringita recristaliza em cristais maiores dentro dos vazios. Os monossulfato, são cristais de alta porosidade e baixa resistência mecânica, com morfologia de placas hexagonais delgadas.

Os vazios presentes na pasta de cimento hidratada são classificados de acordo com o tamanho em espaços interlamelar, vazios capilares e poros de ar incorporado ou aprisionado. O **espaço interlamelar no C-S-H** são os menores vazios, com largura entre 5 e 25 Å e não influenciam na resistência da pasta. Os **vazios capilares**, espaço entre os componentes sólidos da pasta, onde o volume total e a distribuição do tamanho dos poros afetam a resistência da pasta. Por fim, os **poros de ar incorporado ou aprisionados** são os maiores vazios, só superados pelos relativos ao ar aprisionado, devido a sua grande dimensão reduzem a resistência e aumentam a permeabilidade (FREITAS, 2013).

Os vazios têm grande importância para a pasta de cimento hidratada, pois quanto maior a quantidade e os tamanhos dos vazios, aumenta-se também a porosidade, a permeabilidade, a retração e a fluência da pasta; gerando também uma redução nas resistências mecânicas e químicas. Neste sentido, Freitas (2013) afirma que os poros com diâmetros inferiores a 500 Å não afetam a resistência mecânica, mas provocam forte retração com a saída da água.

A porosidade é influenciada pelas altas temperaturas, crescendo de modo não linear, devido, principalmente, ao processo progressivo de desidratação do C-S-H. Fernandes et al. (2017), afirma que dos 20 °C até os 300 °C o aumento na porosidade é baixo, sendo menor do que a perda de massa ocorrida. Acima dos 300 °C essa relação se inverte, com um grande aumento da porosidade, com intensificação das microfissuras e acima dos 900 °C, outro pico de aumento da porosidade é verificado. Com o aumento na temperatura tem-se a liberação de água presente na microestrutura. Ainda segundo Fernandes et al. (2017), a classificação da água presente na pasta de cimento hidratada é baseada no grau de dificuldade ou de facilidade com que esta pode ser removida. Onde primeiramente se libera a água capilar ou água livre, em seguida a água adsorvida e água interlamelar e por último ocorre a liberação da água quimicamente combinada.

Battagin e Silveira (2018), Fernandes *et al.* (2017), Hager (2013) descrevem que o efeito da alta temperatura na pasta do cimento depende do grau de hidratação e da umidade desta pasta. Sendo que quando a pasta está saturada, sua quantidade de água livre, capilar e adsorvida é maior e com o aumento da temperatura estes diversos tipos de água encontrada na pasta, são perdidas rapidamente. Se o concreto tiver baixa permeabilidade, menor porosidade, para liberar esta água o concreto acaba sofrendo lascamentos superficiais ou *spalling*, devidos aos gradientes de pressões.

O lascamento ocorre quando a pressão do vapor dentro do material aumenta a uma taxa maior do que o alívio de pressão causado pela liberação de vapor para a atmosfera. Desta maneira, verifica-se a importância da relação água/cimento no comportamento do concreto, também em relação a temperaturas elevadas. Quando a temperatura atinge 100 °C a água livre já é perdida e fissuras microestruturais surgem iniciando a dilatação da peça.

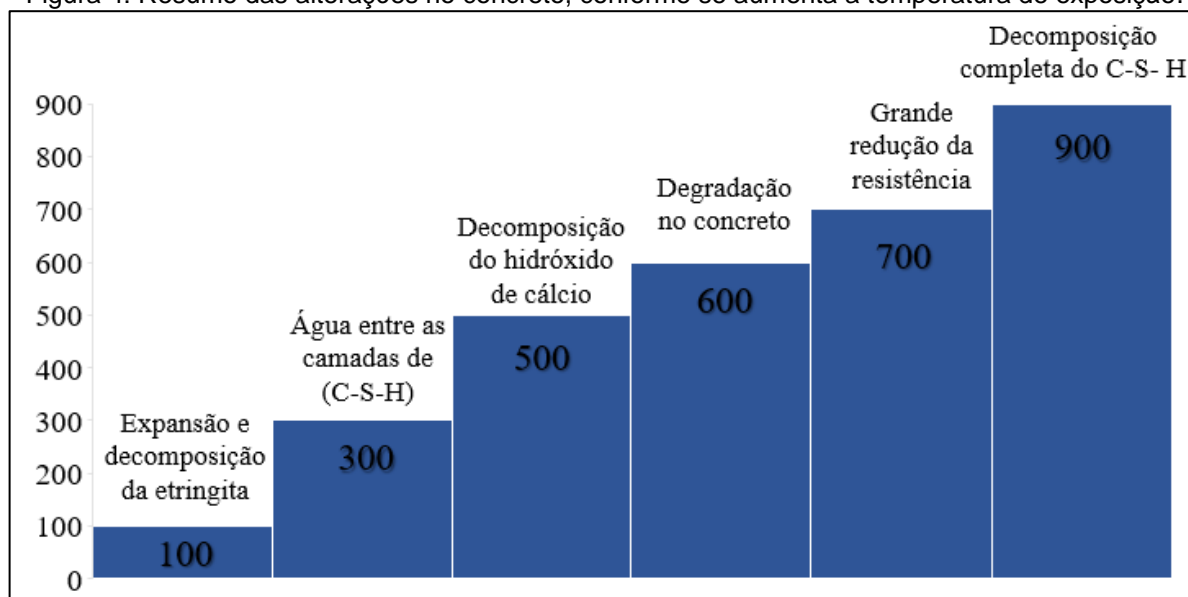
Este fenômeno também é relatado em Komonen e Penttala (2003) e Fernandes *et al.* (2017), o qual descreve que com o aumento da temperatura até 100 °C, é formado um gradiente de temperatura grande o suficiente para modificar a estrutura porosa, sendo que este efeito pode ser causado pela expansão e decomposição da etringita.

Mehta e Monteiro (1994), descrevem os efeitos das temperaturas de 300 °C à 900 °C, estando com a temperatura próxima de 300 °C, a água entre as camadas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e parte da água quimicamente combinada do C-S-H e do sulfoaluminato hidratado também será perdida. A desidratação adicional

da pasta de cimento devida à decomposição do hidróxido de cálcio começa a cerca de 500 °C, mas temperaturas da ordem de 900 °C são necessárias para a decomposição completa do C-S-H. Desta maneira nesta faixa de temperatura ocorre a perda total e irreversível das propriedades mecânicas do concreto, pois o C-S-H é a principal estrutura cristalina responsável pela resistência mecânica. Aos 700 °C o C-S-H se decompõe em β -C2S (belita), β CS (wollastonita) e água, acarretando na retração da pasta de cimento e em uma grande redução da resistência.

A Figura 4 ilustra estas alterações no concreto, conforme se aumenta a temperatura em que este material é exposto.

Figura 4: Resumo das alterações no concreto, conforme se aumenta a temperatura de exposição.



Fonte: (A autora)

Estas situações também são descritas por Souza (2005), segundo o autor, quando a temperatura atinge 600 °C inicia-se uma degradação no concreto, onde as camadas superficiais mais quentes tendem a se separar das camadas internas mais frias. Nestas condições de exposição ocorrem uma redução da resistência à compressão de 50% (SOUZA, 2005).

Segundo Caraslindas e Barros (2004), a exposição do concreto a temperaturas elevadas produz deteriorações das propriedades mecânicas devido a alterações químicas e mecânicas, aquecer o concreto em temperaturas próximas a 600 °C remove a água de hidratação da pasta de cimento.

Além disso, as diminuições do módulo de elasticidade e resistência não são recuperáveis após o concreto ser resfriado até a temperatura ambiente (CARASLINDAS E BARROS, 2004).

Entretanto, do ponto de vista de proteção ao fogo, nota-se que, devido ao considerável calor de vaporização necessário para a conversão da água em vapor, a temperatura do concreto não se elevará até que toda a água evaporável tenha sido removida. O comportamento da pasta de cimento após aquecimento e subsequente resfriamento é dominado pela absorção de umidade do ambiente, a água absorvida no concreto e a água intracamadas. Todas as águas geram um mecanismo para a reidratação do óxido de cálcio. Assim os hidratos formados preenchem os espaços vazios. Em geral, há uma recuperação autógena de parte da resistência do concreto exposto ao fogo, após resfriamento com água.

Conforme Souza (2005), estudos realizados comprovam que a decomposição do hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 , em óxido de cálcio (CaO) e água (H_2O) durante o processo de aquecimento pode resultar em sérios danos ao concreto depois de resfriado, já que a cal (CaO) expande-se durante sua reidratação. Observou-se, também, o desenvolvimento de trincas e separação do agregado e da pasta de cimento, que pode ocorrer durante o resfriamento do concreto, confirmando a influência da taxa de resfriamento na diminuição da resistência do concreto.

O hidróxido de cálcio poderia ser o principal problema do concreto exposto a elevadas temperaturas, pois quanto maior o teor de óxido de cálcio, menor será a propriedade refratária do concreto. Isto justifica a utilização do cimento Portland para aplicações usuais e o cimento aluminato de cálcio para aplicações refratárias. Para amenizar o problema da pasta de cimento Portland submetido a elevadas temperaturas, adicionam-se materiais como a pozolana e a sílica ativa (SAAD, 1996 apud SOUZA, 2005), uma vez que estas adições consomem parte do Ca(OH)_2 e o convertem em C-S-H, composto mais estável as condições de elevação de temperatura.

As altas temperaturas também afetam os grãos de clínquer não hidratados, presentes na pasta de cimento hidratada, promovendo a sua expansão. Esse fenômeno, em concomitância com a retração na pasta promovida pelas alterações no C-S-H e CH, conduz a expansões térmicas diferenciais entre os materiais, que resultam em microfissuras no concreto, que por sua vez, aumentam a porosidade deste (FERNADES *et al.*, 2017).

2.2.2 Agregado

Segundo Costa, Figueiredo e Silva (2002), o coeficiente de dilatação térmica varia com os diferentes tipos de concretos e com a temperatura, sendo que a influência do tipo de agregado é grande, pois estes compõem cerca de 70% do concreto. Conforme Neville (1997), a resistência do concreto às variações de temperaturas é inversamente proporcional ao seu coeficiente de dilatação térmica.

O quartzo possui condutividade térmica elevada; calcários calcíticos e dolomítico média e o basalto baixa condutividade. Esta afirmação também é feita por Cánovas (1988), conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Condutividade térmica dos agregados

Agregado	Condutividade térmica dos agregados (x 10 ⁻⁵ m/m °C)
Silícios e quartzosos	1,3
Granitos e escórias de alto forno	1,0
Calcário	0,8

Fonte: Cánovas (1988)

A fase agregado é a principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional do concreto. Essas propriedades dependem, principalmente, da densidade e da resistência do agregado, que por sua vez são determinadas mais por suas características físicas do que pelas químicas. (KAEFER, 2002).

Os agregados representam 80 a 90 % do volume do concreto e tem grande variedade na sua geometria, o que auxilia no aumento ou redução da porosidade do material, dependendo do maior ou menor empacotamento, além de que o grão do agregado que absorve água, pode auxiliar na falta de água na região de aderência do agregado com a pasta. A rugosidade aumenta a superfície específica (SE) e aderência com a pasta de cimento e altera a trabalhabilidade do concreto. Ainda em relação a sua geometria, deve ser levado em consideração a forma dos grãos, pois estruturas lamelares ou em formato de agulha prejudicam a trabalhabilidade do concreto e facilitam na formação de um acúmulo de água junto às paredes do agregado (exsudação interna), enfraquecendo sua ligação com a pasta (FREITAS, 2013).

Deve-se notar que a resistência requerida do agregado deve ser consideravelmente superior à resistência normal do concreto pois as tensões reais

nos pontos de contato das partículas individuais com o concreto podem ser bem maiores que a tensão nominal de compressão aplicada (NEVILLE, 1997).

O agregado utilizado na composição do concreto também tem grande influência sobre seu comportamento em altas temperaturas. Por exemplo, se o agregado contém pirita (sulfeto de ferro FeS_2), a oxidação lenta em torno dos 150 °C causa desintegração do agregado e conseqüentemente a ruptura do concreto (NEVILLE, 1997).

Agregados silicosos, contendo grande quantidade de quartzo (SiO_2) como granito, arenito e alguns xistos, apresentam uma expansão súbita de volume quando aquecidos a aproximadamente 500 °C (LANDI, 1986; LIN *et al.*, 1996). Esta informação também é encontrada em Neville (1997) o qual aponta que a perda de resistência do concreto é menor quando o agregado não contém sílica, caso das rochas calcárias, rochas ígneas básicas, material cerâmico e escória de alto forno. Aos 573 °C, os cristais de quartzo α transformam em quartzo β , essa mudança de fase é seguida de uma expansão da ordem de 0,85% (MEHTA; MONTEIRO, 1994; BATTAGIN; SILVEIRA, 2018). Esta variação volumétrica do agregado miúdo (quartzo) pode colaborar para o surgimento das microfissurações ao redor do agregado graúdo.

Os agregados calcáreos (calcíticos e dolomíticos) são estáveis até as proximidades de 850 °C, quando se inicia a decomposição do carbonato, formando os óxidos de cálcio e magnésio. Os agregados calcáreos apresentam expansões similares às dos silicosos somente a partir dos 700 °C, devido às reações de descarbonatação. Uma forte porosidade pela perda completa do CO_2 do agregado calcário somente ocorre a partir de 1000°C (BATTAGIN; SILVEIRA, 2018).

Durante o processo de aquecimento, os agregados dilatam, podendo dilatar de maneira destrutiva ao concreto, pois quanto maior o grau de aquecimento e maior suas dimensões, maior será a dilatação. Este aumento de volume em razão do aquecimento pode ser observado pela produção de “*pop out*” (pipocamentos). (HEISSLER *et al.*, 2015)

Dessa forma, os agregados graúdos que apresentam diferença de dilatações térmicas entre a argamassa e estes, bem como as demais tensões térmicas que são geradas na interface do agregado no momento em que o concreto é exposto a temperatura elevada tem fator preponderante para que haja o surgimento de microfissuras. Este processo, segundo explicado por Minami *et al.* (1987), podem se relacionar de forma direta com as formas geométricas e combinações dos agregados

para propiciar e influenciar a intensidade das tensões e o enfraquecimento do concreto.

Nos concretos compostos por agregados calcários, o dióxido de carbono é liberado dos agregados, por meio de uma reação endotérmica, próximo dos 650 °C. O calor é absorvido, retardando a elevação da temperatura e o material calcinado apresenta menor massa específica, servindo como uma forma de isolamento térmica da superfície sendo favorável em peças robustas. Mas a calcinação também causa expansão e fragmentação dos agregados, “*sloughing*” e durante o resfriamento com água de bombeiro, a reidratação do óxido de cálcio e caracterizada por uma grande expansão e elevada temperatura, aumentando substancialmente as fissuras (CANOVAS, 1988 apud COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002). Ou seja, outro efeito que ocorre no concreto é o “*sloughing*” que é o destacamento de placas de concreto ao longo de grandes extensões da superfície devido ao aumento da temperatura em concretos calcinados, pois este material se expande e causa tensões térmicas que fissuram o material e posteriormente ocorre o lascamento explosivo.

Handdo *et al.* (2002) também estudaram o concreto com microanálise química e concluíram que em concretos convencionais com agregados silicosos e resistência à compressão de 47 MPa sob temperaturas de até 1000 °C, as alterações morfológicas começaram aos 300 °C e se intensificaram aos 600 °C, apresentando grandes deformações nos cristais de portlandita e no silicato de cálcio hidratado, além da presença de vazios e fissuras. Esse acréscimo de vazios também foi constatado no programa experimental de Peng e Huang (2008), que investigaram mudanças na microestrutura de concretos com resistência à compressão de 40 MPa, 70 MPa e 110 MPa, aquecidos de 400 °C até 800 °C.

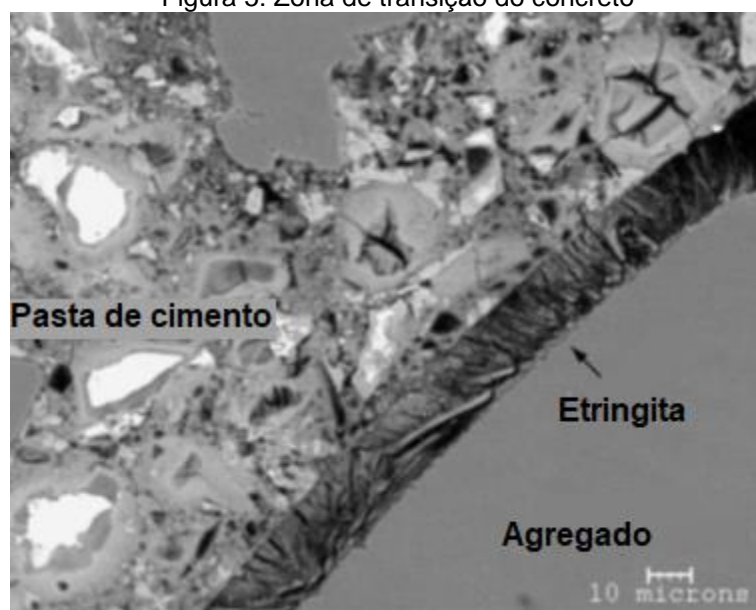
Os principais minerais do granito (quartzo, feldspato e mica) se comportam de maneira diferenciada frente ao aumento de temperatura, perdendo a coesão entre 800°C e 1000°C, sofrendo forte retração, que leva à fissuração generalizada do agregado. (BATTAGIN; SILVEIRA, 2018)

2.2.3 Zona de Transição

A Zona de transição (Figura 5) tem espessura aproximada de 10 a 50 µm e cada uma das fases que compõem a ZT tem natureza multifásica (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Embora composta pelos mesmos elementos que a pasta de

cimento hidratada, apresenta propriedades diferentes da matriz. Esse fato se deve principalmente ao filme de água formado em torno das partículas de agregado, que alteram a relação água/cimento nessa região, formando uma estrutura mais porosa e menos resistente.

Figura 5: Zona de transição do concreto



Fonte: (Freitas, 2013)

A resistência da zona de transição na interface em qualquer região depende do volume e tamanho dos vazios existentes. Mesmo para baixa relação água/cimento, nas primeiras idades, o volume e tamanho dos vazios na zona de transição serão maiores do que na matriz de argamassa. No entanto, com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode se tornar igual à resistência da matriz. Isso pode ocorrer devido a cristalização de novos produtos nos vazios da zona de transição na interface pelas lentas reações químicas entre os constituintes da pasta de cimento e o agregado formando silicatos de cálcio hidratados, além dos vazios as microfissuras também são responsáveis pela baixa resistência na zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Mehta e Monteiro (2008) explicam que esta fase tem grande influência nas propriedades do concreto, por exemplo, à microfissuração por exposição ao fogo faz com que diminua o módulo de elasticidade mais rapidamente do que a resistência à compressão. A durabilidade do concreto também é influenciada por esta fase, já que a existência de microfissuras na zona de transição na interface com o aço e o

agregado graúdo é a principal razão do concreto ser mais permeável do que a pasta de cimento hidratada.

Segundo Heissler *et al.* (2015), as microfissuras que se encontram na zona entre os agregados e a pasta, a zona de transição, consiste em uma região mais fraca, a qual desidrata com maior facilidade e, conseqüentemente é mais suscetível a fissuras. Sendo estas zonas responsáveis pela redução da resistência à flexão e do módulo de elasticidade do concreto endurecido. Enquanto aos 200 °C, o seu módulo de elasticidade expõe 70% a 80% do valor inicial, aos 420 °C ele é reduzido, apresentando de 40% a 50% de seu valor inicial. Este acontecimento se explica devido a séries de reações endotérmicas de desidratação da pasta de cimento endurecida entre 400 °C a 600 °C (HEISSLER ET AL, 2015).

Lin, Lin e Powers-Couche (1996) apud Carvalho (2001), concluíram em seu trabalho várias informações utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), tais como, que as fissuras não se desenvolvem abaixo de 300 °C, exceto microfissuras ao longo da interface de cristais de hidróxido de cálcio e partículas de cimento não hidratado. Porém entre 300 °C e 500 °C ocorre fissuras na zona de transição, e acima de 500 °C, ocorre rompimento do C-S-H e uma grave ruptura na zona de transição. Ocorrendo a anisotropia para pastas próximas ao calor resultante do dano de fogo. Assim, o julgamento de reparabilidade e reutilização deveria ser cuidadosamente avaliado (CARVALHO, 2001).

O efeito de lascamento citado anteriormente, pode ser classificado como normal ou explosivo. Onde o lascamento normal acontece quando a resistência à tração do concreto é alcançada na superfície da amostra durante o aquecimento, promovendo a fissuração e, conseqüentemente, o desprendimento do material. Por outro lado, o lascamento explosivo é uma ruptura frágil e que ocorre repentina e violentamente. De forma mais intensa nos locais de maior fissuração, ou seja, nas regiões mal adensadas ou nos planos das barras da armadura: depois de exposta, a armadura passa a conduzir calor acelerando o efeito da temperatura elevada. (CIMOLIN; GODINHO, 2015).

O lascamento costuma ocorrer nos primeiros trinta minutos da exposição ao fogo, com temperaturas entre 250 °C a 400 °C. E sua probabilidade de ocorrer aumenta conforme menor é a permeabilidade do concreto e quanto maior é a taxa do aumento da temperatura (MORALES *et al*, 2011)

Algumas pesquisas, tais como, Dotreppe *et al.* (2001) e Hertz (1992) revelam que a probabilidade de lascamentos durante um incêndio aumenta com a esbeltes de elementos estruturais e a ocorrência de altas tensões de compressão na seção ao longo de um incêndio. Estudos realizados por Ozawa e Morimoto (2014); Cifuentes *et al.* (2013) e Smarzewski *et al.* (2015) citam a adição de fibras de polipropileno no concreto de alto desempenho para se minimizar ou mitigar o efeito de *spalling*, visto que as mesmas derretem com o calor, criando poros que podem ser preenchidos pelo vapor d'água, reduzindo a poro pressão.

Segundo Maluk *et al.* (2017), as recomendações europeias para concreto em situação de incêndio orientam a utilização de pelo menos 2 kg de fibras de polipropileno do tipo monofilamento por metro cúbico de concreto. Já as recomendações australianas são de 1,2 kg de fibras com 6 mm de comprimento do tipo monofilamento por metro cúbico de concreto. Ademais, essas recomendações são baseadas em pesquisas experimentais de concretos que sofreram *spalling* por calor induzido, e só podem ser entendidas como meios de reduzir, ao invés de eliminar, a ocorrência do fenômeno.

Vieira e Godinho (2016) concluíram que a adição de fibras de polipropileno não interfere na queda da resistência à compressão e no módulo de elasticidade com o aumento da temperatura, no entanto contribui para a minimização do efeito *spalling*, sendo uma solução potencialmente indicada para evitar os deslocamentos explosivos. Neste estudo, o ensaio da análise termogravimétrica da fibra permitiu identificar que o ponto de fusão ocorre a partir de 350 °C, com perda de massa gradativa nas temperaturas superiores, chegando a 83,37 % de perda de massa inicial à temperatura de 550 °C. A partir desta temperatura de fusão, a fibra reduz seu volume deixando espaços vazios e criando uma rede de canais que favorecem a dissipação da poropressão, deixando o concreto mais poroso. Se esses poros ocasionados pela dissipação da fibra constituir uma rede de canais conectadas, o concreto também pode se tornar um material permeável, diminuindo a resistência.

Estudos realizados por Hernández-Olivares e Barluenga (2004), sobre o comportamento do concreto de elevado desempenho com borracha de pneus em relação ao fogo, verificaram o desempenho em relação ao *spalling*. Os autores concluíram que a adição da borracha diminui a forma frágil de ruptura do concreto de alta resistência, assim como a ocorrência do *spalling*. Ensaio termogravimétricos também indicaram que o aumento da quantidade de borracha, diminui a temperatura

alcançada entre a parte exposta ao aquecimento e a parte exposta à temperatura ambiente. Dessa forma, pode-se obter maior segurança em elementos estruturais contra o fogo (MARQUES *et al.*, 2012).

Segundo Hertz (1992), o lascamento explosivo pode ocorrer para taxas de aquecimento de 1°C/min usando-se microssílica, e precisa de 10°C/min ou mais, para outros tipos de concreto. Isso indica que concretos densificados por microssílica são mais suscetíveis ao lascamento explosivo. Muitos parâmetros tem a mesma influência qualitativa nos concretos com ou sem microssílica. O risco de explosão aumenta com o maior teor de umidade, decresce com a permeabilidade, decresce com a resistência e cresce com a taxa de aquecimento. Hertz (1992) concluiu que presença de fibras de aço não reduz o risco de explosão, podendo até aumentá-lo.

Hertz (1992), conseguiu dosar um concreto com 10% de microssílica que não aumentou significativamente o risco de explosão em relação a outros sem microssílica. A inclusão de agregados leves de argila expandida, em ambiente marinho, mostrou um aumento do risco de explosão em relação ao concreto com 10% de microssílica, o que pode ser atribuído ao aumento do conteúdo de água do agregado.

2.3 DEFORMAÇÕES TÉRMICAS E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Deformações térmicas são conhecidas como as expansões ocorridas nos materiais devido ao aquecimento. Em geral, sólidos se expandem com o aquecimento e se retraem com o resfriamento. A não ser sob condições extremas de temperatura, as estruturas comuns de concreto sofrem pouco ou nenhum dano com as alterações da temperatura ambiente. No entanto, em estruturas massivas, a combinação do calor produzido pela hidratação do cimento e condições desfavoráveis de dissipação de calor resultam em grande elevação da temperatura do concreto, poucos dias após o lançamento (PINHEIRO *et al.*, 2010).

A deformação imediata ou deformação devido a tensão acontece por ocasião do carregamento e ocorre de acordo com a Teoria da Elasticidade. Corresponde ao comportamento do concreto como sólido verdadeiro, e é causada por uma acomodação dos cristais que formam o material (PINHEIRO *et al.*, 2010). Segundo Silva (2015), a deformação devido à tensão aplicada em uma estrutura engloba elementos de deformação plástica e elástica. Onde há uma queda na resistência

compressão e aumento da deformação relativa à tensão máxima com o aumento da temperatura.

A deformação por fluência é a deformação dos materiais sob um carregamento constante ao longo do tempo. Em condições normais, quando o carregamento é removido, a recuperação da deformação por fluência será percebida, mas em elevadas temperaturas a deformação por fluência é substancial. Onde os principais fatores que influenciam a deformação por fluência são a temperatura, o carregamento e sua duração (SOUZA, 2010). Segundo Silva (2015) a deformação devido ao gradiente de temperatura ocorre durante a primeira fase do aquecimento do concreto sob carregamento e é responsável por alterações complexas no teor de umidade e na composição química da pasta de cimento.

Segundo Canovas (1988) apud Silva (2015), o módulo de elasticidade é amplamente afetado pela ação do incêndio que juntamente com a dilatação do aço pode causar excessivas flechas em elementos de concreto de pequena espessura como lajes e placas. Sabe-se também que o módulo de elasticidade é mais sensível à exposição térmica que a resistência à compressão, especialmente na faixa abaixo de 320 °C, conforme relatado por Lankard (1971). Afirmação que Lie (1968) apud Nassif *et al* (1999) também faz em sua pesquisa, onde concluiu que o módulo de elasticidade de concreto é reduzido para 60% do valor original em 300°C, enquanto em 600°C somente 15% é retido.

Porém Sullivan e Harada concluíram que após os 300°C o módulo de elasticidade é reduzido significativamente, onde Sullivan (1990) concluiu que o módulo de elasticidade foi reduzido entre 20 e 150°C, mas manteve-se constante entre 150 e 300°C, quando uma brusca redução se iniciava a partir desta temperatura. Harada (1972) estabeleceu que o módulo de elasticidade residual de concretos de arenito foi reduzido de 55% do seu valor original quando aquecido a 300°C e de 78% após exposição a 500°C (CARVALHO, 2001).

Já Vieira e Godinho (2016) concluíram em seu trabalho que os concretos submetidos à elevadas temperaturas perdem consideravelmente sua resistência mecânica, porém à 400°C a perda é inferior a 50 %, aumentando conforme a elevação da temperatura, até se tornar praticamente nula à 800 °C. E que a redução de massa dos corpos de prova devido a evaporação da água livre e a redução do módulo de elasticidade, sendo este fortemente afetado com o incremento da temperatura, chegando a 60 % e 70 % de perda à 400 °C, para os traços de referência e

polipropileno. Com o ensaio de DRX foi possível identificar alguns compostos químicos como portlandita, calcita e óxido e cálcio, bem como as mudanças ocorridas nos mesmos com o aumento da temperatura e sua deterioração. Dessa forma é possível constatar que a perda de resistência e módulo de elasticidade se tornam mais acentuados a partir de 400°C, podendo estar associado, entre outros fatores, à desidratação da portlandita e decomposição do C-S-H. Os autores também concluíram que comparando-se os resultados dos fatores de redução da resistência a compressão e do módulo de elasticidade obtidos na pesquisa com os prescritos pela NBR 15200:2004, conclui-se que os valores da norma se apresentam superiores e mais exigentes, sendo os fatores de redução da pesquisa favoráveis à segurança.

Ainda segundo Silva (2015), a deformação devido ao gradiente de temperatura ocorre durante a primeira fase do aquecimento do concreto sob carregamento e é responsável por alterações complexas no teor de umidade e na composição química da pasta de cimento.

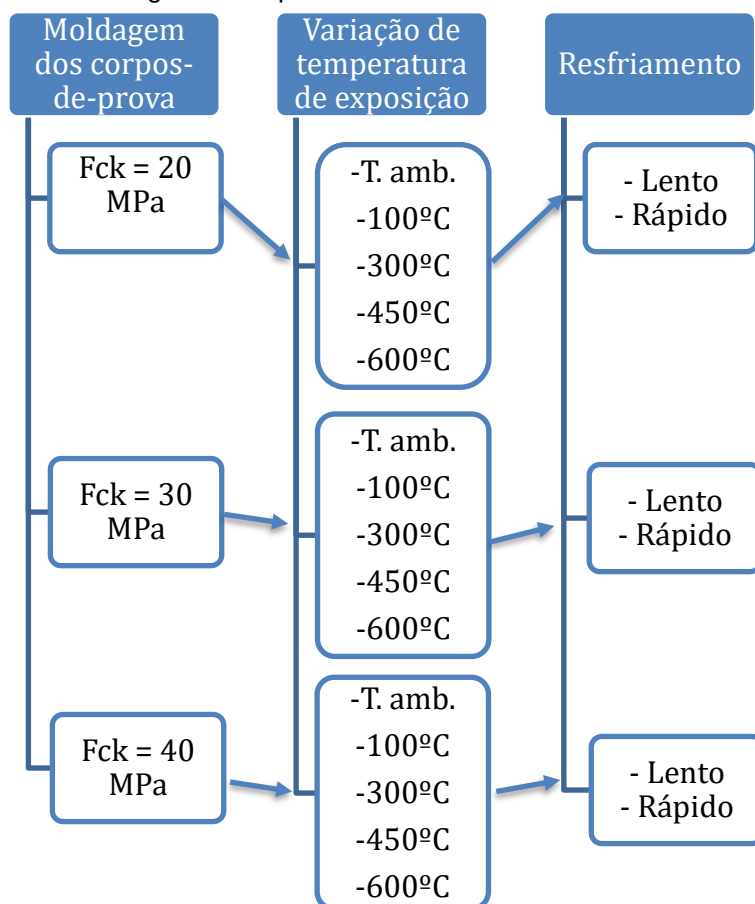
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto experimental apresentado neste capítulo, foi elaborado para atingir os objetivos descritos no capítulo 2, partindo da definição das variáveis de estudo, dos métodos que serão utilizados e dos ensaios necessários para avaliar e interpretar os resultados.

3.1 VARIÁVEIS DE ESTUDO

Para o programa experimental proposto foi analisado o comportamento do concreto de cimento Portland com três grupos de resistências característica à compressão, sendo elas de aproximadamente 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa, visando estudar as resistências característica à compressão mais habituais nas obras de pequeno e médio porte da construção civil. Esses três grupos foram expostos a cinco variações de temperatura (temperatura ambiente, 100°C, 300°C, 450°C e 600°C) tendo sempre como referência os ensaios realizados na amostra exposta à temperatura ambiente. Sendo a escolha destas temperaturas baseadas nas modificações que o concreto sofre quando exposto a temperaturas elevadas, segundo a revisão bibliográfica. Após a exposição às temperaturas elevadas, foi realizado o resfriamento, o qual também foi dividido em dois grupos, o primeiro grupo cujo o resfriamento foi rápido (com jato de água) e o segundo grupo o qual o resfriamento foi lento (temperatura ambiente). Estes dois grupos foram analisados com o objetivo de avaliar as condições observadas em um incêndio real (resfriamento rápido) e as condições observadas em laboratório (resfriamento lento). A Figura 6, demonstra o esquema das variáveis de estudo.

Figura 6: Esquema das variáveis de estudo



Fonte: (A autora)

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A primeira etapa foi a seleção de materiais disponíveis na região de Ponta Grossa – PR para confecção dos concretos. Após seleção dos materiais procedeu-se a elaboração da dosagem dos concretos pelo método IPT/EPUSP para definição dos traços a serem ensaiados.

A partir dos 90 dias após a cura dos corpos de prova foram procedidas as caracterizações das amostras, ensaiadas em temperatura ambiente e em seguida a exposição das amostras em diferentes temperaturas em forno a gás. Após a exposição as temperaturas determinadas, foi procedido o resfriamento das amostras nas duas situações propostas (lento e rápido) para então proceder com a caracterização dos corpos de prova e ensaio de módulo de elasticidade. O fluxograma da Figura 7 apresenta um resumo das etapas de trabalho propostas nesta pesquisa.

Os ensaios de caracterização foram: módulo elástico, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção por imersão, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura.

Figura 7: Fases do planejamento experimental.



Fonte: (A autora)

Os ensaios foram realizados nos laboratórios C-LABMU/UEPG e Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEPG.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item se apresentam os principais ensaios realizados para a caracterização dos materiais.

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPII-Z 32, sendo que os resultados de sua caracterização físico-química foram fornecidos pelo fabricante e deve atender os requisitos especificados na norma NBR 16697: 2018, sendo os resultados apresentados na Tabela 3, média apresentada pela Votorantim Cimentos. Este cimento foi escolhido por ser o mais comum em obras de construção civil na região dos Campos Gerais, Paraná.

Tabela 3: Requisitos da norma NBR 16697:2018, para cimento CP II – F 32

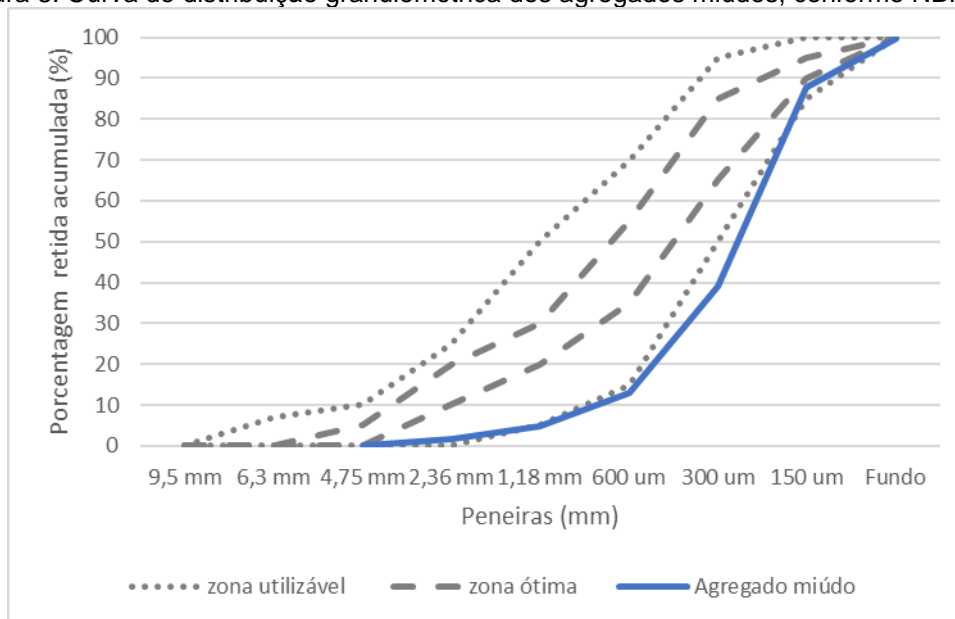
Ensaio Químicos										
Perda ao Fogo	MgO	SO ₃	Resíduo Insolúvel							
%	%	%	%							
7,01	5,82	2,58	10,13							
Ensaio Físicos										
Exp. Quente	Início de pega	Fim de pega	Cons. Normal	Blaine	Retido na		1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Mm	min	min	%	cm ² /g	# 200	# 325	MPa	MPa	MPa	MPa
0,28	286,25	360,25	28,85	3512,00	0,65	9,98	12,79	23,85	28,36	34,43

Fonte: Boletim de ensaio de cimento, Votorantim Cimentos, maio/2020.

A água utilizada para as concretagens foi proveniente da rede pública de abastecimento, fornecida pela empresa Sanepar.

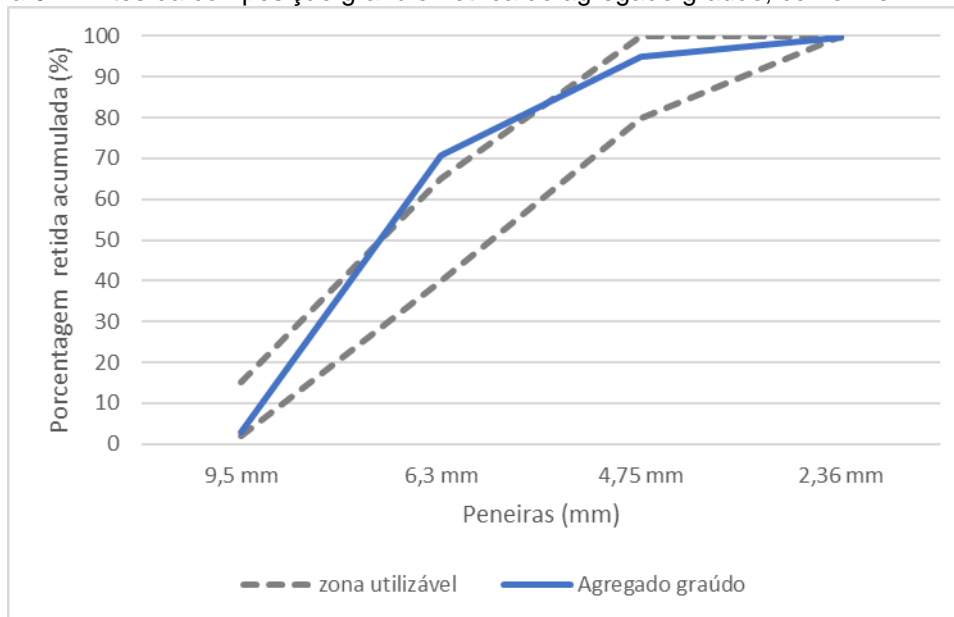
Os agregados miúdos foram caracterizados conforme a NBR 7211:2009 Versão Corrigida:2019 e os ensaios para determinar a massa específica, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo (NBR NM 53: 2009), determinação da massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo (NBR NM 52:2009), determinação da absorção de água em agregados miúdos (NBR NM 30:2001), determinação da massa unitária e do volume de vazios (NBR NM 45:2006), determinação da composição granulométrica (NBR NM 248: 2003), determinação do material fino que passa através da peneira de 75 µm (material pulverulento), por lavagem (NBR NM 46: 2003). Os resultados estão apresentados na Figura 8, Figura 9 e Tabela 4, onde são demonstrados respectivamente as suas curvas granulométricas e a caracterização física dos agregados miúdos e graúdos.

Figura 8: Curva de distribuição granulométrica dos agregados miúdos, conforme NBR 7211.



Fonte: (A autora)

Figura 9: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo, conforme NBR 7211.



Fonte: (A autora)

Tabela 4: Caracterização física dos agregados

Propriedades	Massa específica (g/cm ³)	% de material pulverulento	Módulo de finura	Absorção (%)
Agregado miúdo	2,63	13,06	1,46	-
Agregado graúdo	4,75	0,5	0,016	0,20

Os gráficos apresentados demonstram que a granulometria dos agregados utilizados ficou próxima ao limite da zona utilizável, porém optou-se pela utilização dos mesmos devido estes materiais serem os agregados utilizados na região deste estudo.

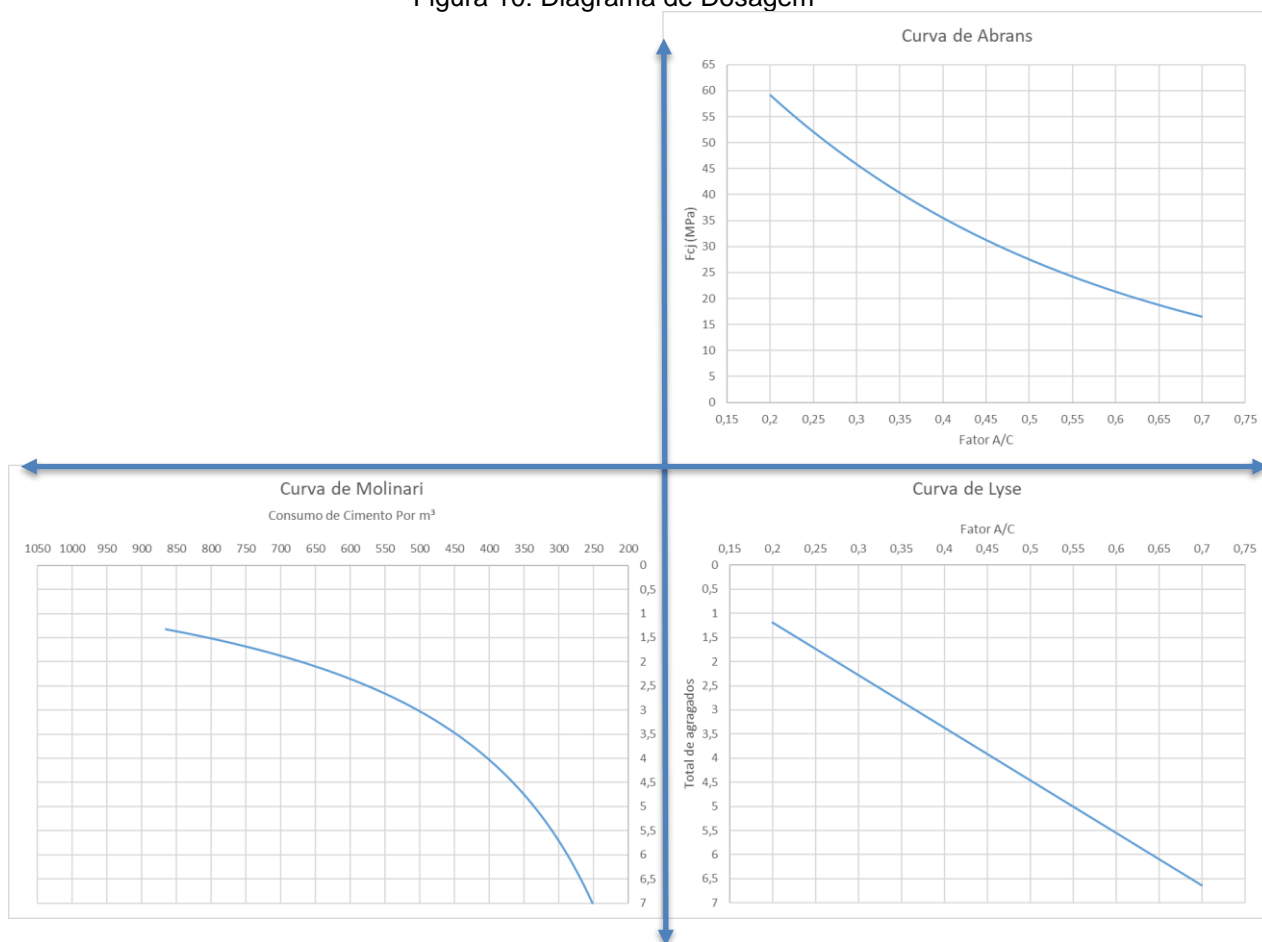
3.4 DOSAGEM DO CONCRETO E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DA PESQUISA

Na sequência do programa experimental foi elaborado diagrama de dosagem, utilizando o método IPT/EPUSP, para determinação dos traços dos concretos com base nos materiais utilizados. As moldagens dos corpos de prova foram procedidas conforme NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016.

O método EPUSP/IPT constitui-se numa atualização e generalização feita na Escola Politécnica da USP baseada do método desenvolvido inicialmente no IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Este método tem como finalidade determinar a máxima dimensão do agregado graúdo, para ser compatível com os espaços disponíveis entre armadura e fôrmas, determinar a menor quantidade de água para obter o abatimento requerido (trabalhabilidade) e estabelecer a resistência característica a compressão que se deseja alcançar na idade especificada.

O método estabelece como resultado final um diagrama de dosagem sobre três quadrantes onde são representadas as leis de comportamento, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Diagrama de Dosagem

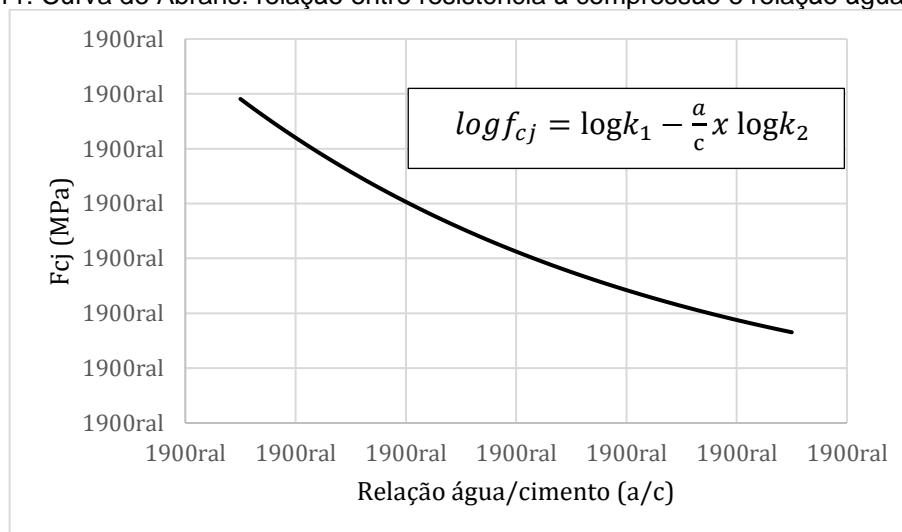


Fonte: (A autora)

Nas

Figura 11, Figura 12 e Figura 13 estão representados os gráficos de cada curva com a sua respectiva equação, para melhor visualização dos resultados.

Figura 11: Curva de Abrans: relação entre resistência à compressão e relação água/ cimento



Fonte: (A autora)

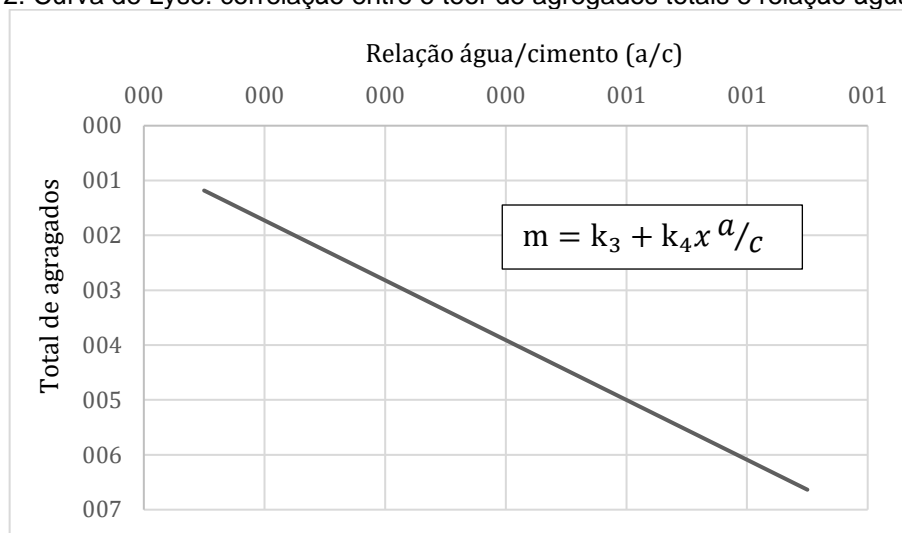
Sendo:

$$k_2 = 10^{-b} ;$$

$$b = \frac{[\log f_{cj1}(2x\frac{a}{c_1} - \frac{a}{c_2} - \frac{a}{c_3}) + \log f_{cj2}(2x\frac{a}{c_2} - \frac{a}{c_1} - \frac{a}{c_3}) + \log f_{cj3}(2x\frac{a}{c_3} - \frac{a}{c_2} - \frac{a}{c_1})]}{2x[(\frac{a}{c_1})^2 + (\frac{a}{c_2})^2 + (\frac{a}{c_3})^2] - 2x(\frac{a}{c_1}x^a/c_2 + \frac{a}{c_1}x^a/c_3 + \frac{a}{c_2}x^a/c_3)} ;$$

$$k_1 = 10^{\frac{1}{3}[\log f_{cj1} + \log f_{cj2} + \log f_{cj3} - b(\frac{a}{c_1} + \frac{a}{c_2} + \frac{a}{c_3})]} ;$$

Figura 12: Curva de Lyse: correlação entre o teor de agregados totais e relação água/ cimento



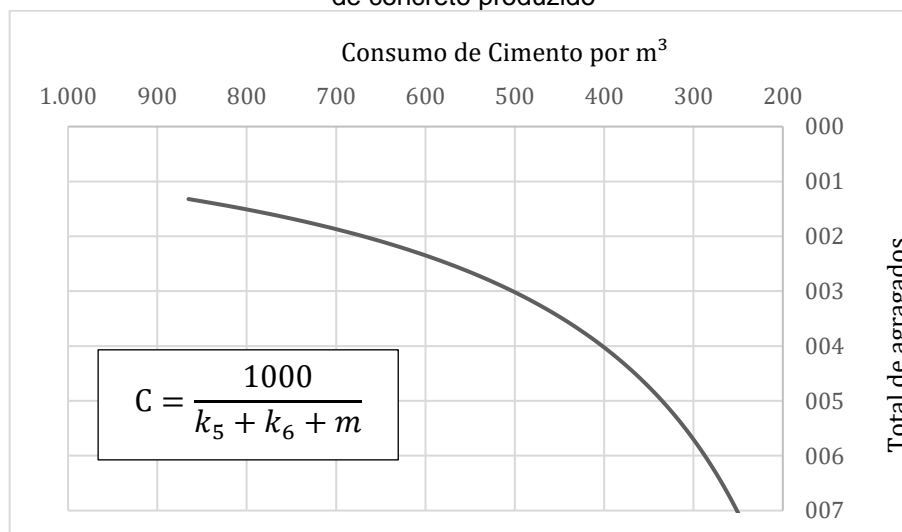
Fonte: (A autora)

Sendo:

$$k_4 = \frac{(m_1 x^a/c_1 + m_2 x^a/c_2 + m_3 x^a/c_3) - m_2 (\frac{a}{c_1} + \frac{a}{c_2} + \frac{a}{c_3})}{(\frac{a}{c_1})^2 + \frac{a}{c_2})^2 + \frac{a}{c_3})^2 - \frac{(\frac{a}{c_1} + \frac{a}{c_2} + \frac{a}{c_3})^2}{3}} ;$$

$$k_3 = m_2 - \frac{k_4 (\frac{a}{c_1} + \frac{a}{c_2} + \frac{a}{c_3})}{3} ;$$

Figura 13: Curva de Molinari: relação entre o teor de agregados totais e o consumo de cimento por m³ de concreto produzido



Fonte: (A autora)

Sendo:

$$k_6 = \frac{1000 \times 3 \times \left(\frac{m_1}{c_1} + \frac{m_2}{c_2} + \frac{m_3}{c_3} \right) - 1000 \times \left(\frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_3} \right) \times (m_1 + m_2 + m_3)}{3 \times (m_1^2 + m_2^2 + m_3^2) - (m_1 + m_2 + m_3)^2} ;$$

$$k_5 = \frac{1000 \times \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} \right) - k_6 \times (m_1 + m_2 + m_3)}{3} ;$$

Após elaborações dos diagramas de dosagem do concreto, foram definidos três traços para atingir as resistências característica à compressão aos 28 dias de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa.

A confecção do concreto para preparação dos corpos de prova foi realizada conforme a ABNT NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016, com a utilização da betoneira para mistura do concreto. O adensamento foi realizado com vibrador mecânico e os moldes cilíndricos utilizados são de diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm.

Nesta etapa foram executados 360 corpos de prova sendo 120 corpos de prova de cada traço conforme demonstrado na Tabela 5 e ilustrado na Figura 14. Todos os corpos de prova foram mantidos em imersão completa em água até os 28 dias para completar a cura. Após esta idade eles foram mantidos em temperatura ambiente protegido de intempéries até a idade de exposição a situações de elevação de temperatura.

Tabela 5: Traços utilizados para preparação do concreto

Nº	TRAÇOS				CONSUMO DE CIMENTO/ M³
	Cimento	Areia	Brita	Fator a/c	
RICO	1	1,25	2,25	0,41	595,62
MÉDIO	1	2,00	3,00	0,55	442,58
POBRE	1	2,75	3,75	0,69	352,11

Fonte: (A autora)

Figura 14: Corpos de prova executados para o ensaio: (a) cura totalmente imersa por 28 dias; (b) mantidos 90 dias em temperatura ambiente até o ensaio de elevação de temperatura



Fonte: (A autora)

3.5 EXPOSIÇÃO DO CONCRETO À ALTAS TEMPERATURAS

Após aproximadamente 120 dias da moldagem, os corpos de prova foram submetidos a exposição ao fogo, com a utilização de um forno, (Figura 16), fabricado especificamente para este ensaio, onde é possível que o concreto fique com a face exposta não só a altas temperaturas, mas também as chamas do fogo, simulando uma situação de incêndio em peças estruturais de concreto, conforme pode ser observado na Figura 15.

No interior do forno, foram colocados sensores termopar, para o acompanhamento e controle da temperatura de ensaio. O forno tem capacidade para aquecer três corpos de prova por vez e cada grupo ficou exposto a temperatura desejada por 30 minutos.

Figura 15: Interior do forno, durante o aquecimento



Fonte: (A autora)

Figura 16: Forno adaptado para aquecimento dos corpos de prova



Fonte: (A autora)

Este ensaio foi dividido em quatro etapas, com diferentes temperaturas, como já citado anteriormente. As temperaturas de ensaio foram de 100°C, 300°C, 450°C e 600°C. Os resfriamentos dos corpos de prova foram realizados, dividindo as amostras em dois grupos, resfriamento lento e rápido. Para execução do resfriamento lento, as amostras foram retiradas do forno e deixadas resfriando a temperatura ambiente. E na execução do resfriamento rápido, as amostras após o ensaio foram imersas em água com temperatura ambiente, por 30 minutos.

3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

Após os corpos de prova serem expostos às diferentes temperaturas foram realizados os seguintes ensaios com cada grupo de amostras.

3.6.1 Compressão Axial

Este foi o primeiro ensaio realizado, já que se depende deste resultado para a realização do ensaio de módulo de elasticidade. No Brasil, a norma ABNT NBR 5739:2018 estabelece o método de ensaio de compressão para os corpos de prova cilíndricos de concreto. Os moldes cilíndricos utilizados foram metálicos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Para a realização deste ensaio, foi utilizado uma prensa universal de ensaios de 200 t. Todos os corpos de prova ensaiados foram capeados com enxofre, conforme normatização da NBR 5738:2015. Na Figura 17 é apresentado corpos de prova capeados e a execução do ensaio de compressão axial na prensa universal.

Figura 17: Corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão



Fonte: (A autora)

3.6.2 Módulo Elástico

Após a execução dos ensaios de compressão axial foi executado o ensaio de módulo de elasticidade estático conforme NBR 8522:2017, o qual também se utilizou a prensa indicada no item anterior (Figura 18), porém com os sensores de deformação acoplados no corpo de prova, para possibilitar a leitura da variação de deformação elástica durante o ensaio.

Figura 18: Prensa utilizada para ensaios e ensaio de módulo elástico.



Fonte: (A autora)

A norma ABNT NBR 8522:2017 descreve duas metodologias para a determinação do módulo de elasticidade do concreto, onde os corpos de prova de concreto devem ser preparados de acordo com o que estabelece a ABNT NBR 5738, devendo ser ensaiados à compressão de acordo com a ABNT NBR 5739. A primeira metodologia é referente a tensão σ_a fixa, e a segunda metodologia é referente a deformação específica ε_a fixa. A primeira metodologia consiste em carregar e descarregar o corpo de prova por quatro vezes, sendo que o carregamento é feito até a tensão de 0,5 MPa.

O cálculo da metodologia adotada neste trabalho, é determinado pela Equação 1.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{(\sigma_b - 0,5)}{(\varepsilon_b - \varepsilon_a)} 10^{-3} \quad (1)$$

Onde:

σ_b é a tensão maior, em MPa; ($\sigma_b = 0,3 f_c$) ou outra tensão especificada em projeto;

ε_b é a deformação específica média, dos corpos de prova sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

3.6.3 Tração por Compressão Diametral

Neste estudo o ensaio de tração foi realizado por meio da compressão diametral, seguindo as orientações da norma ABNT NBR 7222:2010 Emenda 1:2011. Este ensaio consiste em colocar o corpo de prova cilíndrico da horizontal, com duas tiras de chapa dura de fibra de madeira, de comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova, para apoio entre os pratos e a amostra. O resultado é obtido conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

$$f_{f,D} = \frac{2.F}{\pi.d.L} \quad (2)$$

Onde:

$f_{f,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F = carga máxima obtida no ensaio (kN);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

L = comprimento do corpo de prova (mm).

A Figura 19 demonstra o corpo de prova após o ensaio de tração por compressão diametral.

Figura 19: Corpo de prova após ensaio de tração



Fonte: (A autora)

3.6.4 Absorção por Imersão:

O ensaio de absorção por imersão foi executado conforme a norma da ABNT NBR 9778:2005 Versão Corrigida 2:2009. De início, verifica-se as massas de cada corpo de prova e, então, são encaminhados para a secagem em estufa com uma temperatura de 105 ± 5 °C, até se obter a constância de massa, ou seja, a diferença de massa entre duas pesagens consecutivas do mesmo corpo-de-prova não exceda a 0,5% do menor valor obtido, durante o período de permanência dos mesmos em estufa, sendo a verificação da massa após 24h, 48h e 72h de permanência na estufa. Posteriormente, os corpos-de-prova são resfriados ao ar à temperatura de 23 ± 2 °C e, então se determina sua massa seca. Após o resfriamento os corpos de prova devem ser imersos durante 72 horas, neste período devem ser pesados decorrendo 24h, 48h e 72h para a obtenção da massa específica saturada. Por fim se utiliza de uma balança hidrostática, para a verificação do peso da amostra imersa em água.

3.6.5 Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Amostras dos concretos foram selecionadas para caracterização mineralógica e de microscopia. Os equipamentos estão localizados no laboratório multiusuário C- LABMU da UEPG.

Neste trabalho foi utilizado um difratômetro de raios X, modelo ULTIMA IV da marca Rigaku, com beam ótico paralelo de focalização seletiva. Os parâmetros empregados para essa análise foram: tempo de varredura de 6 minutos e velocidade de contagem de 6 s por passo em ângulos 2θ entre 3 graus e 70 graus e com tempo de passo de 0,016 graus/segundo. Como fonte de raios X será utilizado o tubo cerâmico com ânodo de cobre. As amostras para os ensaios foram pulverizadas com granulometria passante na peneira 200, de abertura 0,075 mm.

Para a realização dos ensaios de microscopia utilizou-se de um microscópio FEG SEM, Tescan, Mira 3, com detectores SE, BSE e microsonda analítica de raios X Oxford X-Maxn 50 (EDS), com metalização superficial das amostras em ouro. As amostras foram extraídas de região próxima a superfície exposta a chama no procedimento de aquecimento das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUÇÕES

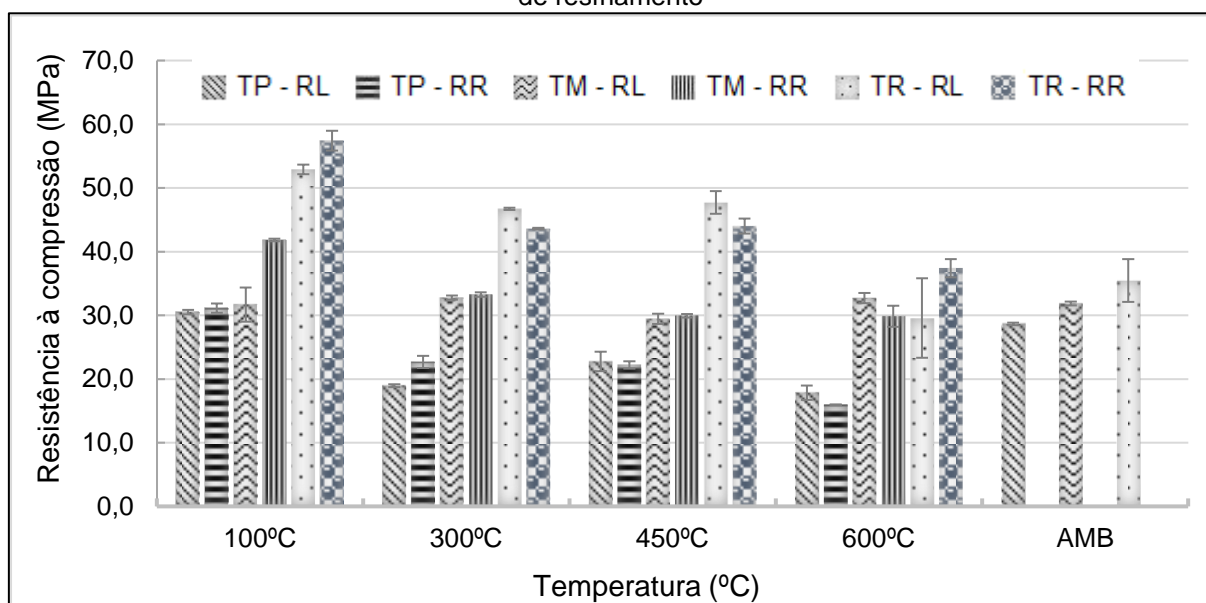
Estruturas em situação de incêndio apresentam com consequência perda de desempenho em suas propriedades. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar as alterações do módulo de elasticidade estático de concretos de cimento Portland sujeitos a situação de incêndio (elevação de temperaturas até 600 °C) em condições de resfriamento lento e rápido. Os resultados obtidos para os concretos aquecidos às temperaturas de 100°C, 300°C, 450°C e 600°C, foram divididos em tipos de resfriamento (lento e rápido).

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Figura 20 para os três traços de estudo em relação a exposição as quatro diferentes temperaturas e os dois sistemas de resfriamentos.

Sendo o significado das siglas utilizadas nos gráficos, sempre o mesmo para todos os ensaios. Onde primeiro se refere ao traço utilizado e em segundo ao resfriamento adotado, ou seja, traço pobre (TP), traço médio (TM), traço rico (TR), resfriamento rápido (RR) e resfriamento lento (RL).

Figura 20: Resistência à compressão dos concretos sujeitos a diferentes temperaturas e condições de resfriamento



Fonte: (A autora)

Verificou-se o decréscimo da resistência à compressão conforme o aumento da temperatura em que o concreto é exposto, para ambos os grupos de resfriamento. Porém no grupo do resfriamento rápido é possível identificar uma linha de tendência, do tipo logarítmica, com alto valor do coeficiente de determinação para os três traços utilizados, sendo que o modelo logarítmico apresentado na Figura 20 explica 92,72% (em média) da variância da variável dependente a partir das variáveis independentes, ou seja 92,72% das resistências obtidas em relação a temperatura de exposição, estão correlacionadas, conforme o modelo apresentado.

Os resultados indicam que a resistência a compressão é influenciada pela exposição as diferentes temperaturas, sendo que na faixa de temperatura próximo a 100°C ocorre um aumento desta resistência em relação a temperatura ambiente. Esta consideração também foi encontrada no estudo de Savva *et al* (2005) e Xu *et al* (2001), onde observaram em sua pesquisa acréscimo da resistência à compressão em relação a temperatura ambiente nas faixas de temperatura entre 100°C e 250°C. Este acréscimo foi entre 8% e 9% em concretos com agregado calcário e de até 24%

em concretos com agregado silicoso. Este aumento pode ser justificado pelo fato de que água perdida nesta condição é a água livre do concreto. Parte deste acréscimo a resistência a compressão é devido a evaporação da água livre que fortalece o concreto, o que leva a maiores forças de Van der Waal como resultado das camadas de gel de cimento se aproximando umas das outras (XU *et al.*, 2001).

Os resultados permitiram ainda identificar que com o aumento da temperatura entre 300°C e 450°C a resistência à compressão tem um decréscimo em relação as temperaturas mais baixas, sendo o decréscimo aos 450°C com pouca diferença do resultado de 300°C, enquanto os valores mais expressivos de perda de resistência, são dos concretos expostos a 600°C. Esta situação também é observada na pesquisa de Dias *et al.* (2020) e Souza (2005) o qual identificou que no grupo exposto à 300°C a resistência à compressão reduziu entre 30% e 40% e para o grupo exposto à 600°C verificaram reduções entre 50% e 70%.

Estas condições da diminuição da resistência podem ser explicadas principalmente pelo início da microfissuração (XU *et al.*, 2001) e o pequeno decréscimo entre os resultados das amostras de 300°C e 450°C, é decorrente da resistência ao fluxo e à alta temperatura, onde o vapor cria uma alta pressão na pasta. Em consequência, a chamada condição de autoclavagem interna surge na pasta de cimento e o resultado é uma hidratação adicional dos grãos de cimento anidrados (SIDERES *et al.*, 2005). Este fenômeno também é descrito no trabalho de Hager (2013), Dias *et al.* (2020), Park *et al.* (2013).

Apesar de Sideres *et al.* (2005) indicarem em seu estudo que para o material pozolânico, um gel adicional de tobermorita foi formado como resultado da reação pozolânica do Ca (OH)₂ no cimento Portland e isto tenha auxiliado a pouca diferença entre as resistências obtidas em temperaturas de 300°C e 450°C, neste estudo os difratogramas de DRX não apresentaram picos deste cristal.

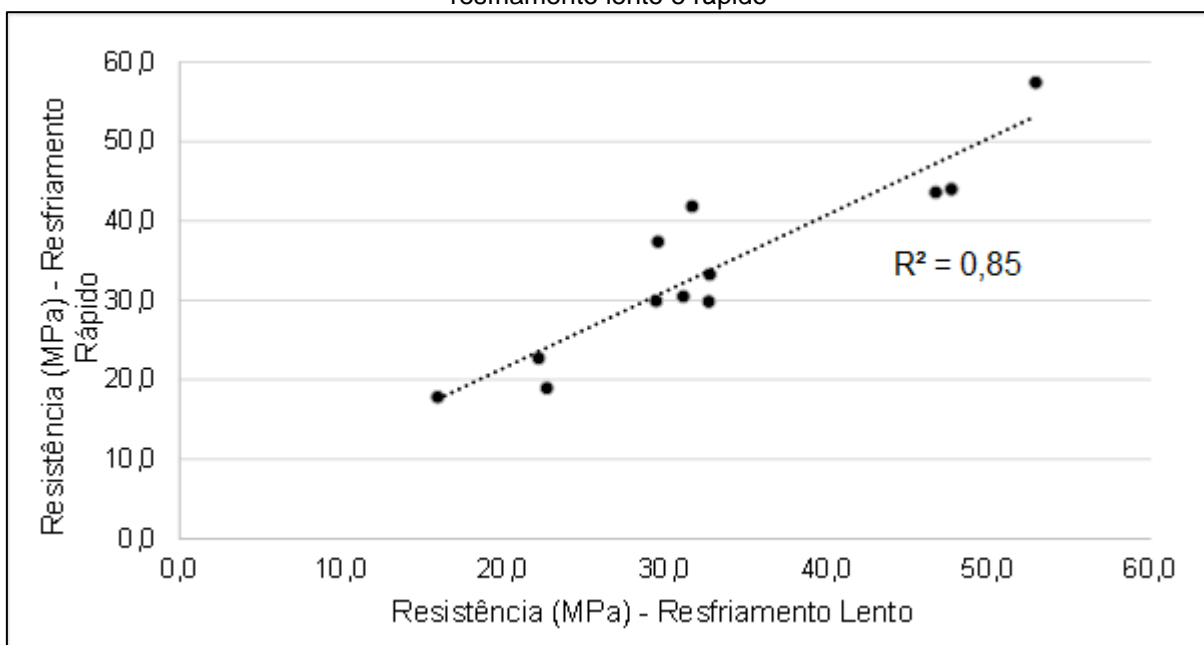
Em relação as amostras expostas a 600°C, em todos os grupos, a resistência à compressão decaiu drasticamente, em comparação com as demais temperaturas de ensaio, chegando a reduzir em média 40%, quando analisamos todos os traços e tipos de resfriamento. Este fato foi atribuído a desidratação do concreto, onde ocorre a decomposição do silicato de cálcio hidratado, o principal hidrato da microestrutura (XU *et al.*, 2001), além do aumento da microfissuração no interior da matriz.

Souza e Moreno (2010) também descrevem que aos 600°C o concreto perde não só a água livre, mas também a água contida no gel do cimento, provocando, como

consequência, um alto grau de fissuração superficial. Os agregados se expandem dando lugar a tensões internas que prejudicam a resistência à compressão do concreto. Nesta pesquisa o agregado graúdo é um basalto, o qual sendo exposto a altas temperaturas tem a perda de resistência inferior aos agregados que contém alto teor de sílica. Isto pode justificar as menores diferenças de resistência, em relação aos outros estudos, cujo os agregados são de diferentes origens mineralógicas.

Ainda que para o grupo do resfriamento rápido a correlação encontrada foi maior do que para o grupo do resfriamento lento, em ambos os resfriamentos ensaiados tem-se uma correlação de 84,95%, conforme Figura 21, o que demonstra que independentemente do tipo de resfriamento utilizado e se o traço tem maior consumo de cimento, ou seja, é mais rico em pasta de cimento, o aumento da temperatura proporciona a diminuição da resistência a compressão no concreto. Esta observação foi validada pela análise estatística utilizando-se análise de variância. Dias *et al.* (2020) também não identificou uma influência significativa nas alterações da resistência à compressão em relação ao método de resfriamento.

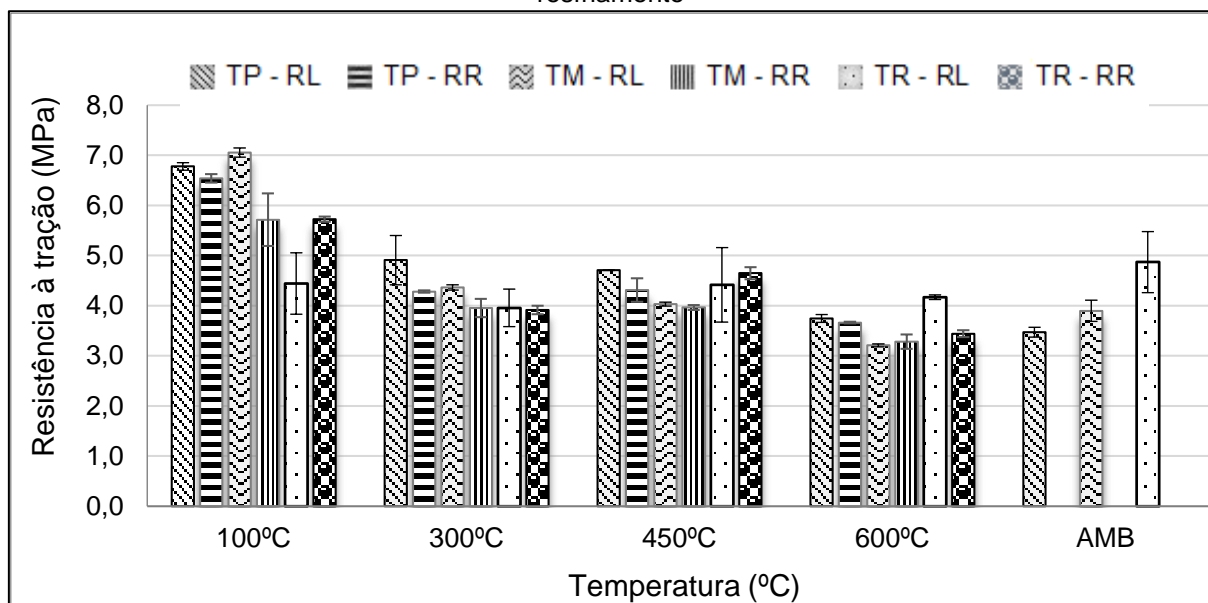
Figura 21: Correlação entre os resultados de resistência à compressão para as condições de resfriamento lento e rápido



Fonte: (A autora)

Os resultados de resistência a tração podem ser observados na Figura 22, a qual demonstra os resultados para três traços de concreto em estudo, as quatro diferentes temperaturas de exposição e os dois resfriamentos ensaiados, além do desvio padrão relativo as médias encontradas.

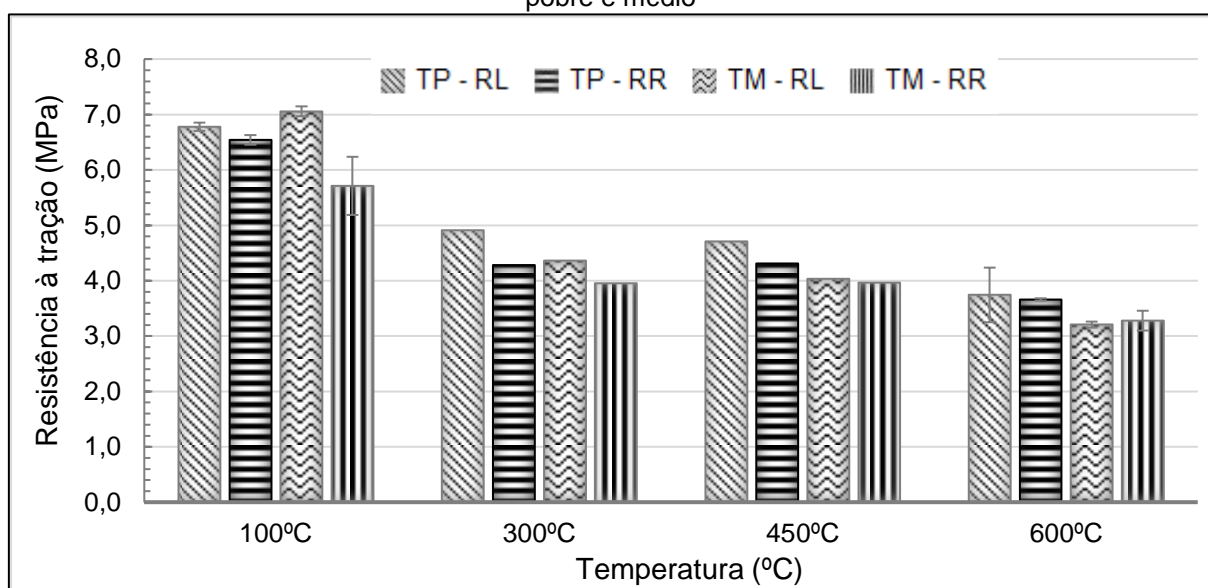
Figura 22: Resistência à tração dos concretos sujeitos a diferentes temperaturas e condições de resfriamento



Fonte: (A autora)

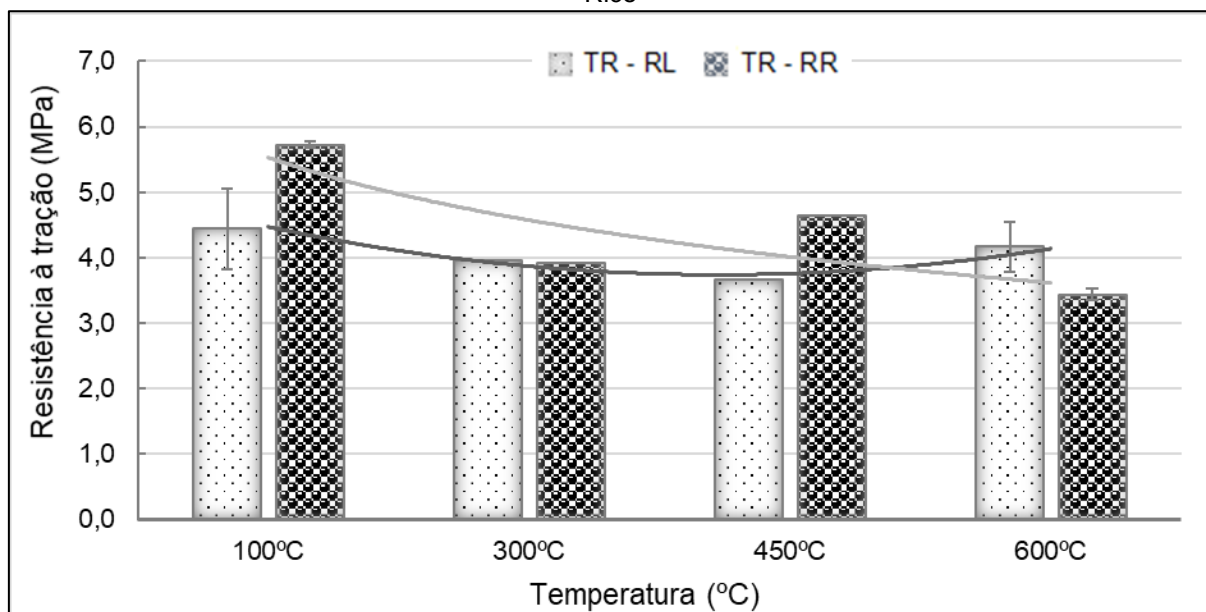
Os resultados demonstram que nos traços com menor porcentagem de pasta de argamassa, ou seja, nos traços denominados pobre e médio, há uma tendência de diminuição da resistência à tração conforme se aumenta a temperatura de exposição, como pode ser observado na Figura 23. Porém no traço rico quando exposto as temperaturas mais elevadas, de 450°C e 600°C, a resistência à tração tem uma recuperação de desempenho nesta propriedade, conforme Figura 24.

Figura 23: Resultados de resistência à tração por compressão diametral para os concretos de traços pobre e médio



Fonte: (A autora)

Figura 24: Resultados de Resistência à tração por compressão diametral para os concretos de Traço Rico



Fonte: (A autora)

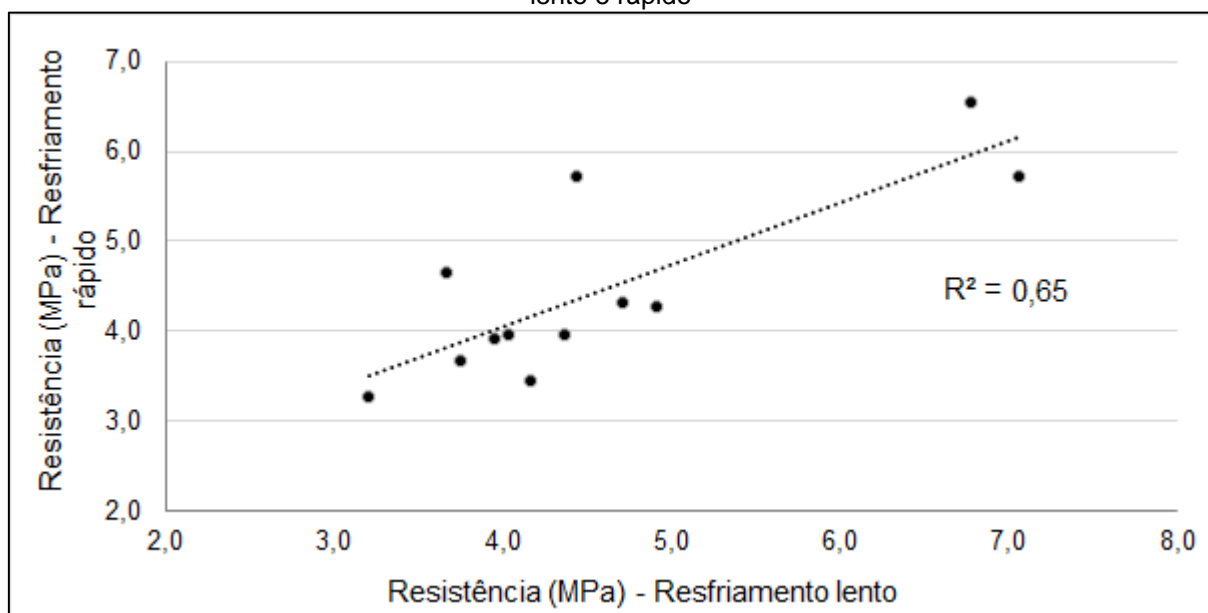
Kodur e Khaliq (2011) identificaram em seu estudo que a resistência a tração do traço de concreto de alta resistência diminui mais rápido até 300°C, tornando-se estável até 500°C e novamente, reduz a uma taxa mais rápida além de 500°C. Apesar de o concreto deste estudo não ser considerado de alta resistência, conforme o estudo dos autores, o traço que obteve uma similaridade com esta situação foi o concreto mais rico em consumo de cimento, ou seja, o traço de concreto mais próximo ao concreto de alta resistência. Pode-se atribuir a justificativa desta “recuperação” da resistência à tração aos 450°C ao fato que após o aquecimento, a umidade livre no concreto se converte em vapor e isso gera um acúmulo de pressão no poro, o que leva a uma perda de resistência inicial até 300°C. A estabilidade da resistência à tração no intervalo de 300° à 500°C pode ser atribuído à redução na desidratação da matriz de cimento, conforme indicado por Kodur e Khaliq (2011).

Verificou-se que em ambos os resfriamentos utilizados e os três traços ensaiados, a resistência a tração é mais afetada na temperatura de 600°C, onde se tem a sua redução próximo a 50%, enquanto que nas demais temperaturas a faixa de redução da resistência a tração é de 30%. O que pode ser interpretado pelo fato de que acima de 500°C, ocorre a desidratação de ambas as camadas dos hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) e hidróxidos de cálcio (Ca (OH)₂) o que causa uma redução significativa na resistência à tração. Esta é a principal causa da redução mais rápida

de resistência à tração na faixa de 500 a 800°C. Outras mudanças, como o enfraquecimento da zona de transição entre a pasta e o agregado, decomposição e expansão diferencial de agregados, também contribuem para a degradação mais rápida da resistência à tração além de 500°C (KODUR e KHALIQ, 2011).

Ainda que para o traço rico o resfriamento lento tenha sido mais expressivo na diminuição da resistência a tração, para os demais traços o tipo do resfriamento não influencia no decréscimo desta propriedade mecânica. Como pode-se observar na Figura 25, a correlação da resistência à tração entre os tipos de resfriamento é menor do que a correlação da resistência à compressão, cerca de 30%, porém ainda expressiva.

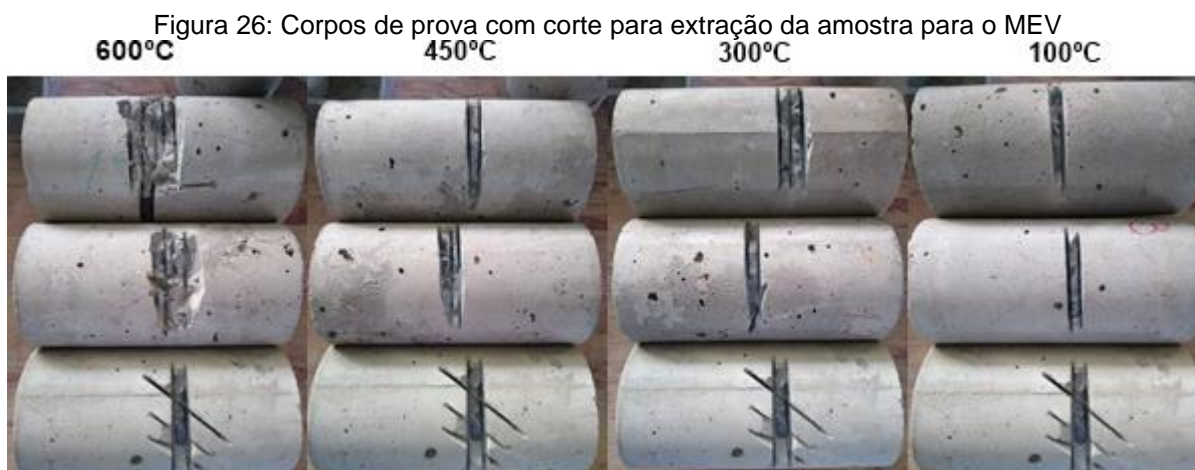
Figura 25: Correlação entre os resultados de resistência à tração para as condições de resfriamento lento e rápido



Fonte: (A autora)

Ghan *et al.* (1999) descreve em seu estudo que a perda acentuada de resistência à tração para os concretos em análise sujeitos a altas temperaturas são claramente diferentes da perda mais gradual de resistência à compressão. Isso ocorre porque muitas micro ou macro fissuras foram produzidas nos corpos de prova devido à incompatibilidade térmica dentro do concreto. Geralmente a resistência à tração é mais sensível a tais fissuras do que a resistência à compressão. Neste estudo, apesar de o concreto em análise ser de traços diferentes, também pode-se indicar que a perda da resistência à tração é mais intensa do que a perda da resistência à compressão, sendo tais fissuras evidentes também nas amostras ensaiadas.

Kodur e Khaliq (2011) definem que a diminuição na resistência à tração do concreto normal com a alteração da temperatura, pode ser atribuída à fraca microestrutura do concreto na faixa de resistências usuais, que permite microfissuras iniciais. A 300°C, o concreto perde aproximadamente 20% de sua resistência à tração inicial e acima de 300°C, a resistência à tração do concreto normal cai mais rapidamente. Isso se deve ao dano térmico mais pronunciado em forma de microfissuras no concreto (KODUR; KHALIQ, 2011). Neste estudo as microfissuras ficaram evidentes durante a preparação de amostras para MEV, onde as amostras expostas acima de 450°C começaram a desagregar e separar o agregado graúdo do restante da pasta, indicando que a zona de transição foi comprometida. Conforme pode ser observado na Figura 26.



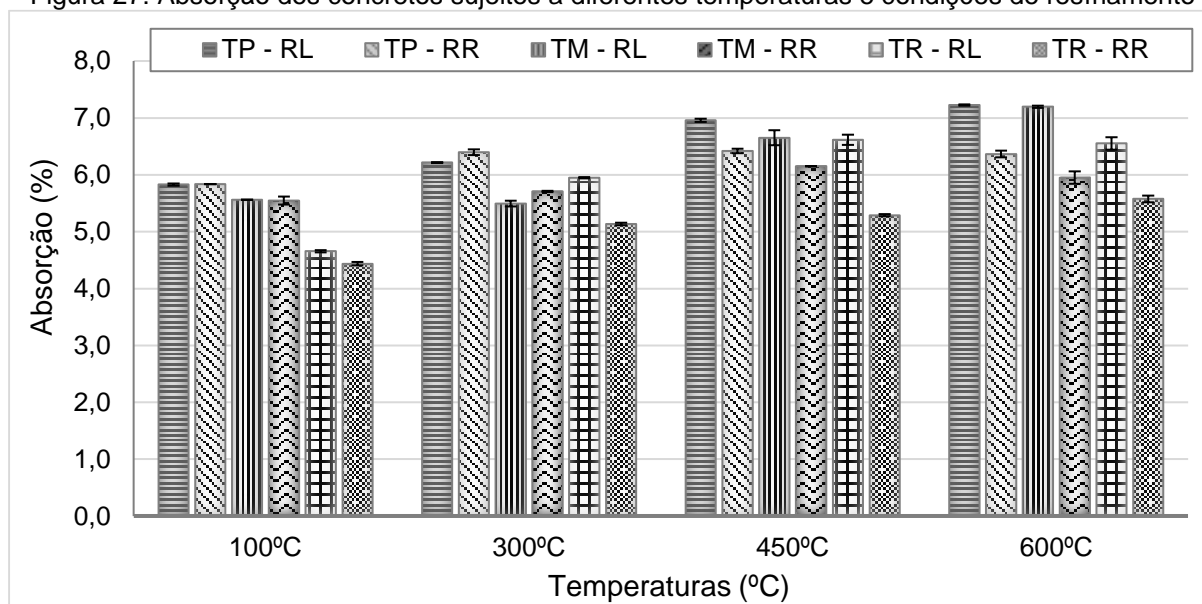
Fonte: (A autora)

Carette *et al.* (1982) complementa esta análise sobre a resistência à tração do concreto, devido ao seu estudo do concreto em uma faixa de temperatura de 75°C a 600°C através da técnica de resistência residual. Eles relataram uma redução de 65 a 70% na resistência à tração na temperatura de 600°C e concluíram que a relação água/cimento e o tipo de agregado tem uma influência significativa na resistência a tração do concreto. Nesse estudo também foi possível identificar uma significativa perda de resistência à tração próximo aos 600°C, porém não tão expressiva como a dos autores e sobre a influência da relação água/cimento, nesse estudo os traços com maior relação água/cimento, foram mais afetados nesta propriedade mecânica.

Na Figura 27 encontram-se os resultados de absorção para os três traços de ensaio, referente as diferentes temperaturas de exposição, 100°C, 300°C, 450°C e

600°C, com suas respectivas formas de resfriamento, lento e rápido. O desvio padrão também é apresentado, o qual nos indica que os valores obtidos neste ensaio foram muito próximos da média.

Figura 27: Absorção dos concretos sujeitos a diferentes temperaturas e condições de resfriamento



Fonte: (A autora)

Verifica-se que em todos os traços ensaiados e independente do tipo de resfriamento adotado, a absorção tende a aumentar conforme se aumenta a temperatura em que o concreto é exposto. Porém este aumento é mais significativo no grupo do resfriamento lento, onde a absorção chega a aumentar entre 22% e 31% para as temperaturas 450°C e 600°C respectivamente, considerando a média dos três traços ensaiados, enquanto que no grupo do resfriamento rápido, a absorção aumentou entorno de 7% e 14% para as temperaturas 450°C e 600°C respectivamente. Esta observação foi validada pela análise estatística utilizando-se análise de variância. Este aumento da absorção já era esperado, conforme descrito por Fernandes *et al.* (2017), porém pode-se justificar que o resfriamento lento tem a maior taxa de acréscimo da absorção pois estes corpos de prova não tiveram contato com a água após o aquecimento e não puderam se reidratar, conforme aconteceu nos corpos de prova que foram resfriados bruscamente.

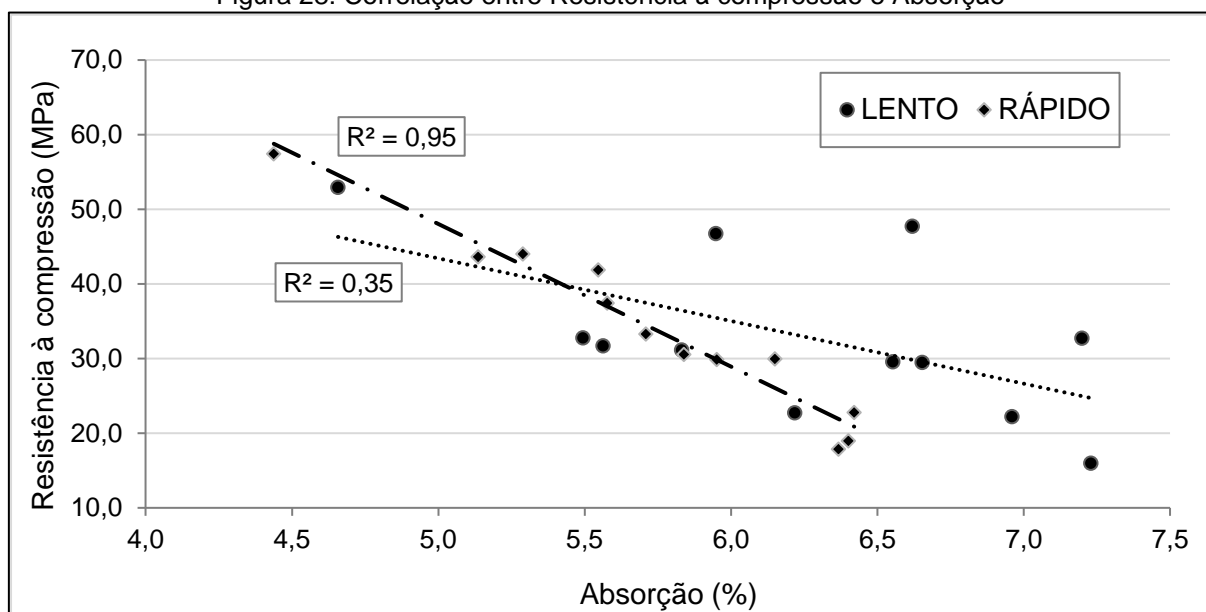
Além desta observação também pode-se verificar que o aumento da absorção é mais significativo no concreto com o traço mais rico em cimento. Ou seja, a relação água/cimento deste traço é menor do que os outros traços ensaiados, o que justifica

a maior proporção do aumento da absorção, já que o traço rico tem menos água livre em sua composição, proporcionando um maior impacto na perda da água devido a exposição as altas temperaturas.

Silva (2013) descreve que o aumento da absorção que é observado ao longo da temperatura, é induzido pela evaporação da água livre, capilar e quimicamente combinada que ocorre mais intensamente até os 300°C. A partir desta temperatura os poros aumentam em quantidade e em tamanho devido à desidratação dos produtos hidratados do cimento e a nucleação de pequenos poros dando a origem a poros maiores tendo como consequência o aumento do índice de vazios de maneira mais expressiva após aos 400°C. Essa observação é também verificada neste estudo, onde as taxas de absorção são mais expressivas a partir dos 450°C.

Ghan *et al.* (1999) também indicam que há um aumento da porosidade e do diâmetro médio dos poros com o aumento da temperatura. Este efeito pode ser pronunciado como encorpamento da estrutura dos poros. Além da perda de água há também a ocorrência das microfissuras, que justificam o aumento da absorção, onde as microfissuras principalmente devido à incompatibilidade térmica da pasta de cimento endurecido e agregado, que aumenta a porosidade e diminui a resistência. Segundo Vodak *et al.* (2004), este processo ocorre durante todo o intervalo de temperatura. O autor ainda cita que a "mini hidratação" adicional é causada principalmente por moléculas de água com energias cinéticas relativamente altas liberadas a temperaturas acima de 250 °C. Este fenômeno leva ao aumento da resistência e diminuição da porosidade, justificando mais uma vez os resultados obtidos da resistência a compressão e o de absorção, comprovando que a absorção ou índice de vazios está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas no concreto. Conforme observa-se na Figura 28, a correlação entre a resistência à compressão e a absorção são altas quando as amostras foram resfriadas bruscamente.

Figura 28: Correlação entre Resistência à compressão e Absorção



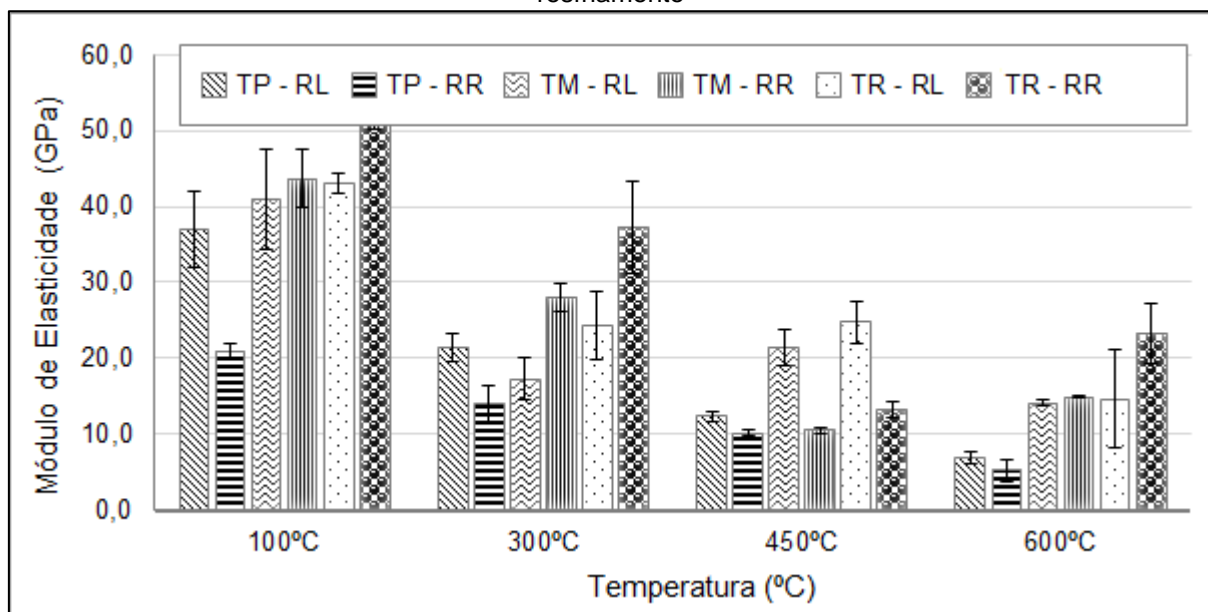
Fonte: (A autora)

A alta correlação entre a resistência à compressão e absorção para o resfriamento rápido, comprova as descrições na bibliografia conforme cita Xu *et al.* (1999), onde descreve que as propriedades mecânicas são relacionadas com a absorção, sendo que quanto maior o índice de absorção, menor é a resistência à compressão do concreto.

4.2 MODULO ELÁSTICO

O concreto é um material que apresenta um comportamento não linear quando submetido a tensões de compressão ou de tração, devido à sua natureza viscoelástica de pseudo sólido. O diagrama tensão-deformação mostra que esse material, diferentemente dos materiais homogêneos, não segue a lei de Hooke e nem sempre apresenta proporcionalidade entre tensão aplicada e a deformação específica resultante (PACHECO *et al.*, 2014). Conforme os estudos de Mehta e Monteiro (2014), esta importante propriedade do concreto é afetada por diversos fatores, entre eles, porosidade da matriz cimentícia, interface da zona de transição e módulo de elasticidade do agregado. Com o objetivo de contribuir para o entendimento do comportamento desta propriedade nos concretos expostos a altas temperaturas, os resultados obtidos no ensaio de módulo elástico estão representados na Figura 29.

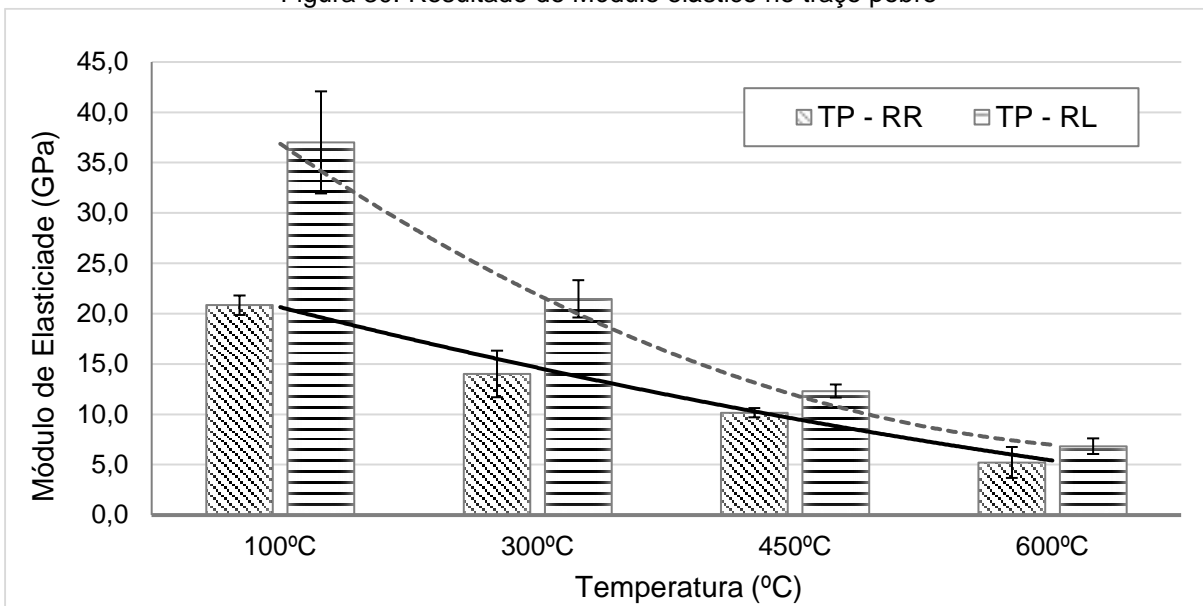
Figura 29: Módulo elástico dos concretos sujeitos a diferentes temperaturas e condições de resfriamento



Fonte: (A autora)

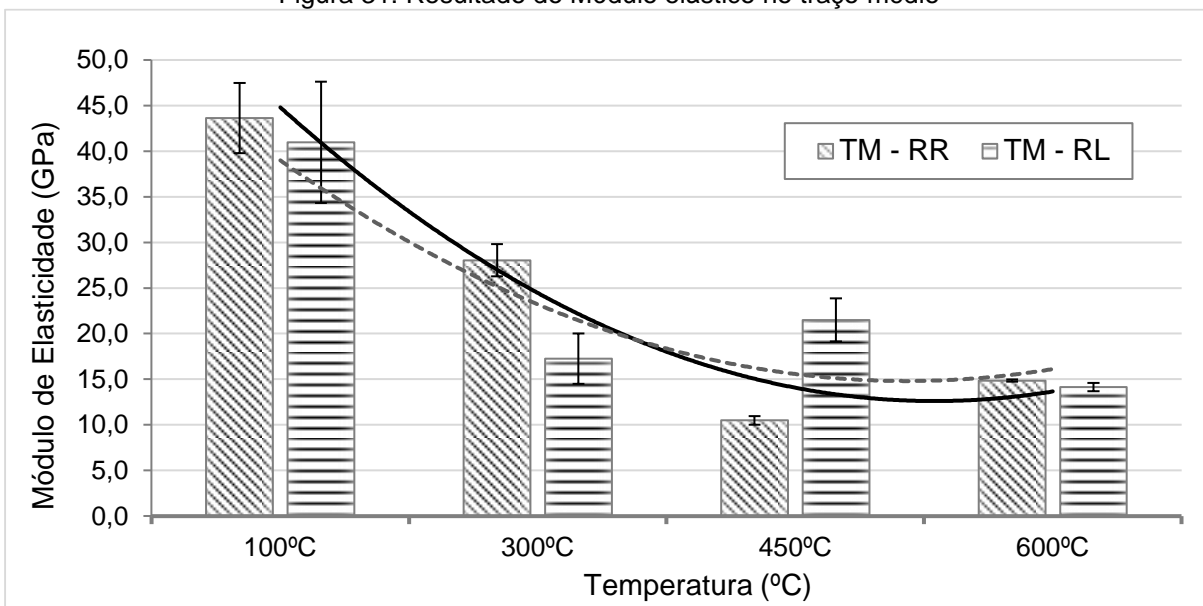
Identificou-se que conforme se aumenta a temperatura de aquecimento nas condições de incêndio simulada, o módulo de elasticidade tem o seu valor reduzido para os traços ensaiados. Porém no traço médio e rico, cuja a porcentagem de pasta de argamassa é maior, percebe-se que há uma recuperação no valor do módulo elástico, quando a temperatura atinge 600°C no grupo do resfriamento rápido, e quando a temperatura atinge 450°C no grupo do resfriamento lento. Estas tendências são observadas com melhor clareza nos gráficos representados nas Figura 30, Figura 31 e Figura 32.

Figura 30: Resultado do Módulo elástico no traço pobre



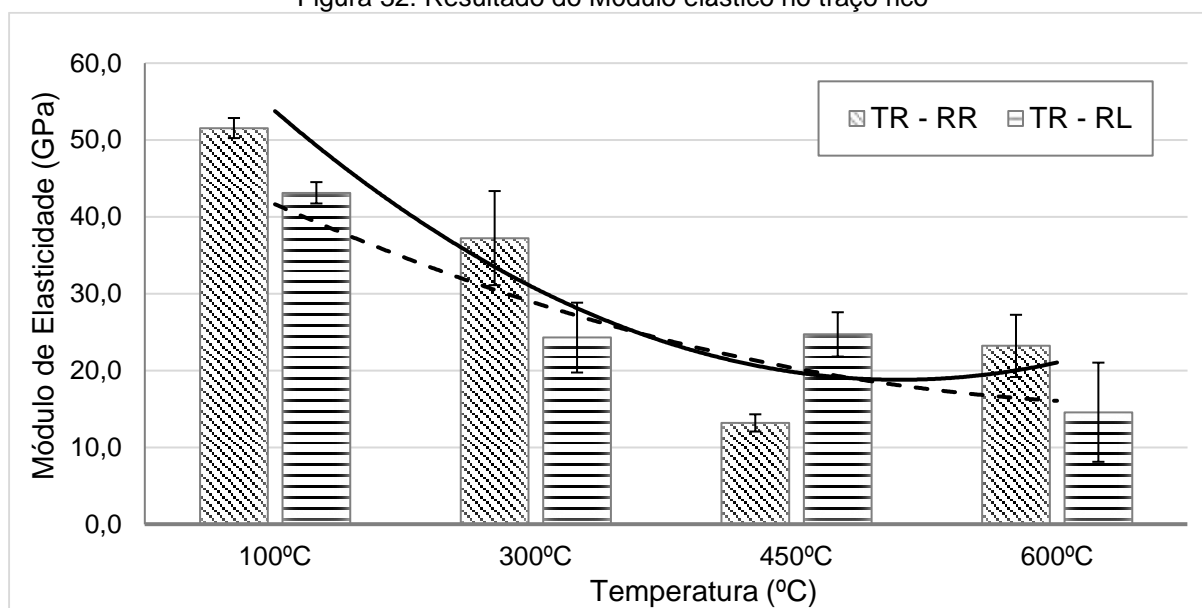
Fonte: (A autora)

Figura 31: Resultado do Módulo elástico no traço médio



Fonte: (A autora)

Figura 32: Resultado do Módulo elástico no traço rico



Fonte: (A autora)

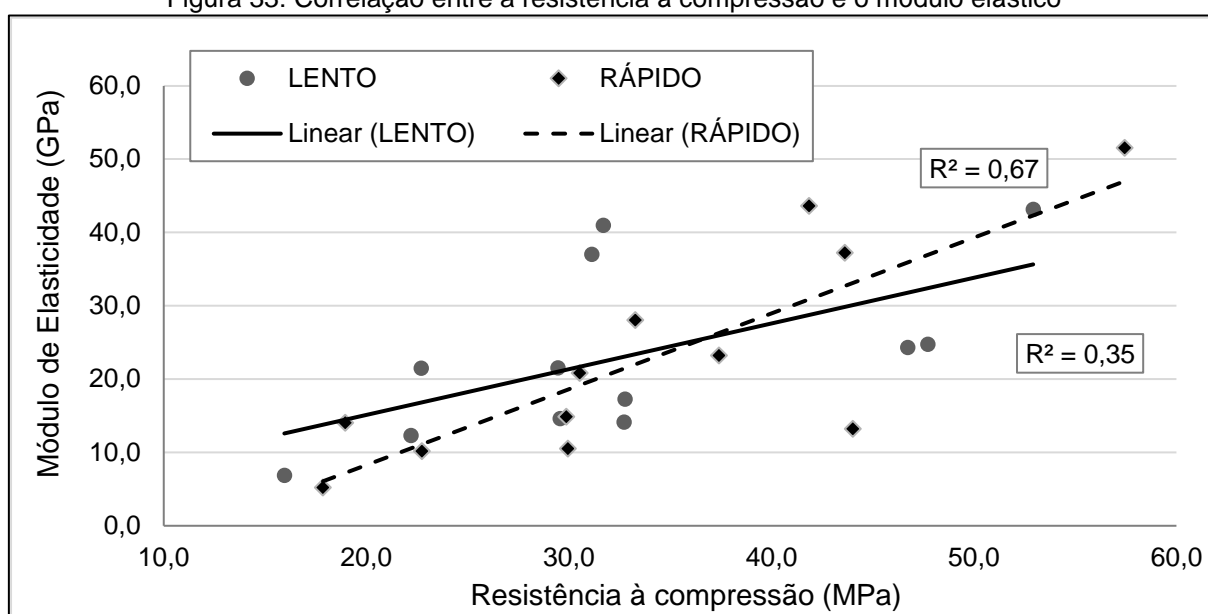
A análise realizada pela ANOVA e TUKEY, demonstram que há uma significativa redução do módulo elástico com o aumento da temperatura de exposição, independentemente do tipo de resfriamento adotado. Sendo que o decréscimo mais significativo se inicia nas amostras ensaiadas à 300°C, no qual a média da redução do módulo elástico foi de 52%, enquanto que para as amostras ensaiadas à 600°C a média da redução do módulo elástico foi de 74%. Outros autores também descrevem resultados semelhantes, como é o caso de Dias *et al.* (2020) e Souza (2005).

Ulrich (1988) descreve em seu estudo que a resistência original do concreto e a proporção de água parecem ter pouca influência sobre a relação elasticidade-temperatura. Geralmente foi observado que a diminuição da elasticidade do concreto com o aumento temperaturas excedem a diminuição da resistência à compressão.

Os resultados disponíveis na literatura são bastante variáveis, devido às diferentes composições de concreto e diferentes condições de ensaio, como observado por Kodur (2014). Apesar dessa variação, constata-se que as curvas da resistência à compressão e módulo de elasticidade em função da temperatura de exposição apresentam uma tendência de redução com o aumento da temperatura, com degradação menos acentuada para menores tempos de exposição às altas temperaturas. A redução do módulo de elasticidade é mais acentuada do que a observada na resistência (SOLLERO, 2019).

Neste estudo também pode-se identificar que independentemente do traço utilizado a redução do módulo de elasticidade é expressiva e deve ser considerada nas análises de concretos expostos a temperaturas elevadas. E apesar de se definir uma correlação entre a diminuição da resistência a compressão e o módulo elástico, conforme Figura 33, a temperatura tem maior influência sobre os resultados do módulo elástico, onde a taxa de perda desta propriedade é na ordem de 74% em temperaturas de 600°C, enquanto que a taxa de perda da resistência a compressão é de 32% para esta mesma temperatura.

Figura 33: Correlação entre a resistência à compressão e o módulo elástico



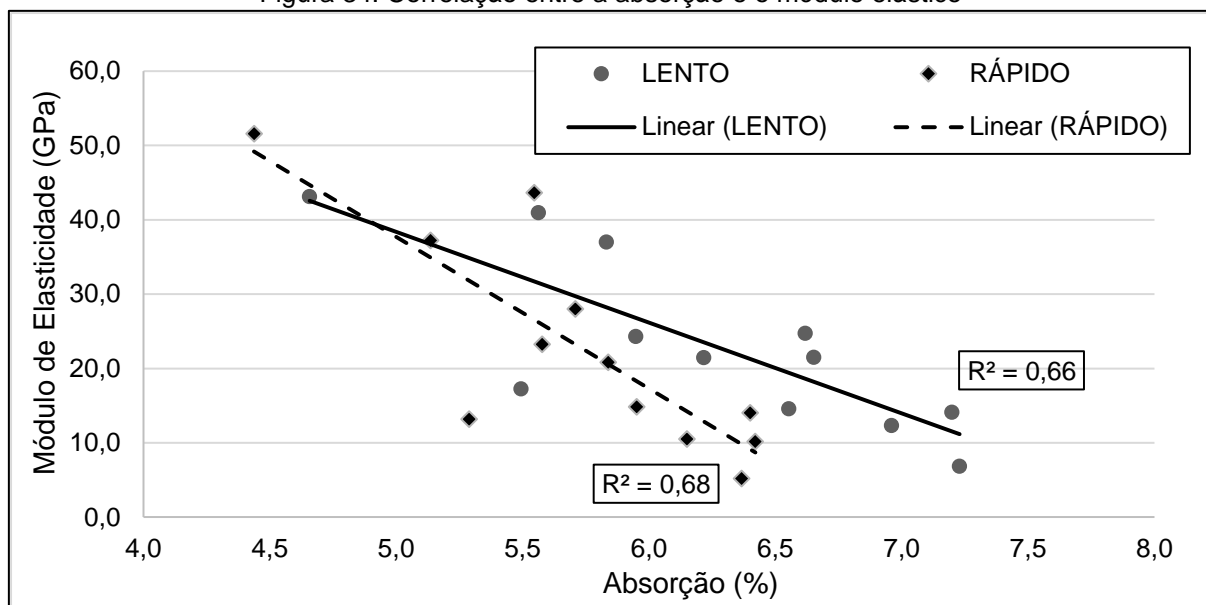
Fonte: (A autora)

Deve-se mencionar que quase nenhuma influência transitória ocorre durante o resfriamento de concreto após exposição à temperatura. Uma suposição razoável para o comportamento do concreto sob resfriamento é que o módulo de elasticidade é fixado de acordo com a temperatura máxima anterior correspondente. Além disso, deve-se considerar que as tensões térmicas podem ser significativamente irreversíveis sob condições de resfriamento (ULRICH, 1988). Com a análise dos resultados também pode-se constatar, conforme o autor menciona, que o tipo de resfriamento não tem grande influência no módulo elástico. Pois em ambos os resfriamentos ensaiados a perda desta propriedade é expressiva.

A correlação entre o módulo elástico e a absorção (Figura 34), também é expressiva e deve ser mencionada, já que conforme citado na bibliografia (MEHTA;

MONTEIRO, 2008; HEISSLER *et al.*, 2015) o módulo elástico é influenciado pela remoção da água de hidratação da pasta de cimento, microfissuração, principalmente as microfissuras na zona de transição, a qual consiste em uma região mais fraca, que desidrata com maior facilidade e ainda pela desidratação da portlandita e decomposição do C-S-H.

Figura 34: Correlação entre a absorção e o módulo elástico

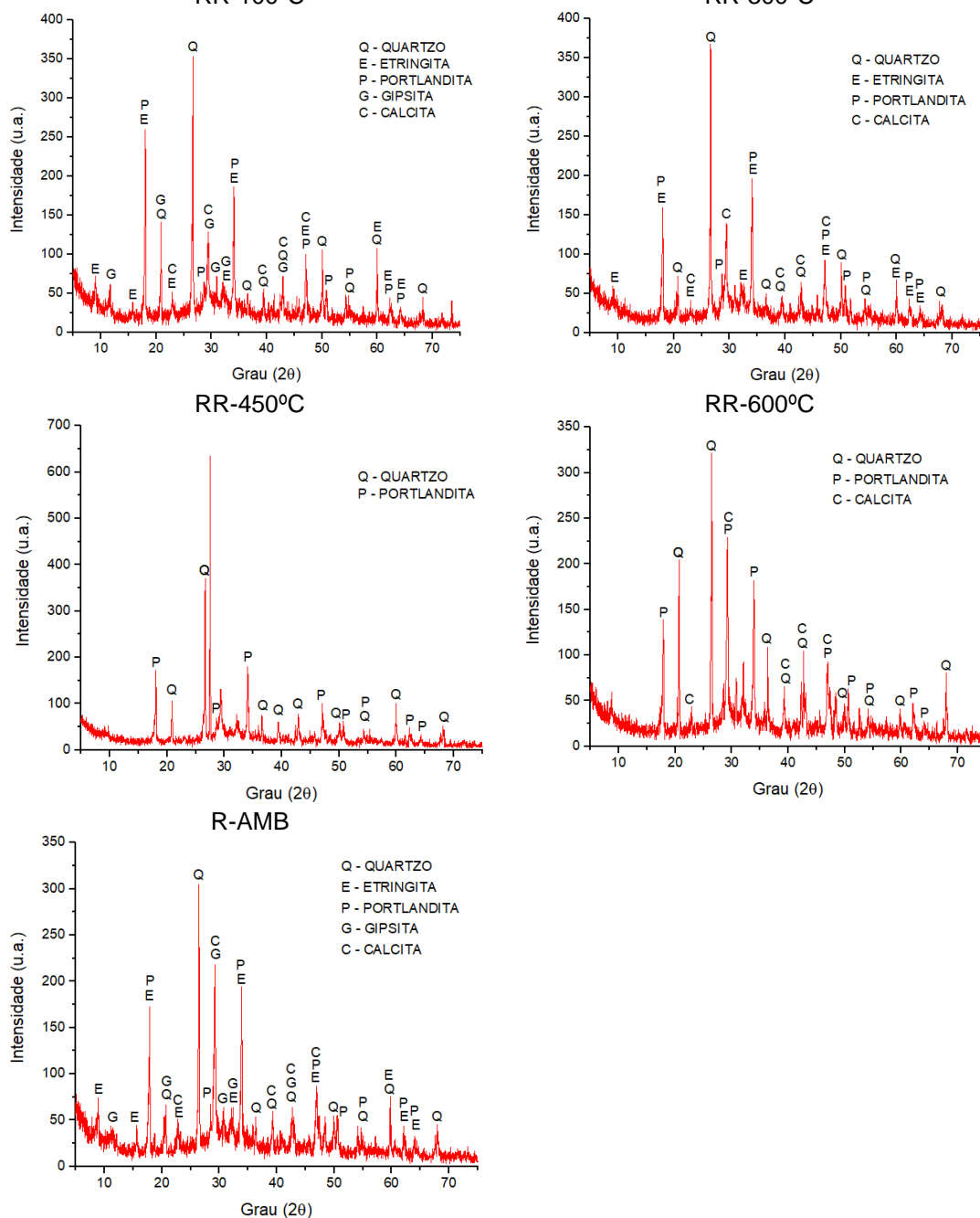


Fonte: (A autora)

Esta correlação entre a absorção e o módulo elástico evidencia a microfissuração no concreto exposto a temperaturas elevadas, as quais permitem o aumento da absorção e a diminuição do módulo elástico. Xu *et al.* (2001), Handoo *et al.* (2002) e Lim (2015) reforçam em seus estudos que a microfissuração é a principal causa de deterioração quando os concretos foram expostos a altas temperaturas, relatando que a microfissuração tem início em torno de cristais de Ca(OH)_2 e, em seguida, em torno de partículas de cimento não hidratadas. O Ca(OH)_2 se decompõem após a exposição acima de 400°C à 600°C , e a reidratação do Ca(OH)_2 dissociado torna-se uma causa prejudicial de fissuração, que é acompanhada por um aumento de volume de 44%. Esta decomposição do Ca(OH)_2 também é observada neste estudo por meio dos resultados do ensaio de DRX, conforme a Figura 35, na qual percebe-se que a Portlandita na temperatura ambiente até 300°C , tem intensidade igual ou maior que 200 u.a. e na temperatura 450°C sua intensidade reduz de 200 u.a

chegando próximo a 150 u.a. na temperatura de 600°C, a qual provavelmente está presente nas amostras de 600°C, devido a reidratação da portlandita.

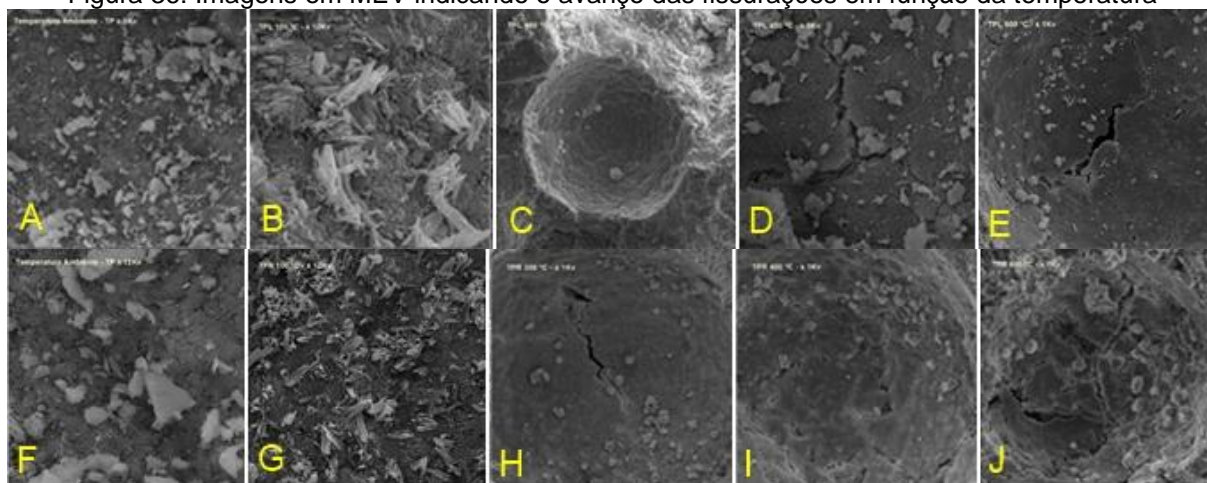
Figura 35: Resumo DRX - Traço Rico, resfriamento rápido, diversas temperaturas



Além do ensaio de DRX, as imagens do MEV, também comprovam o aumento da fissuração no concreto, com o aumento da temperatura em que os corpos de prova são expostos. Conforme pode ser observado na Figura 36. Na temperatura ambiente não verificadas fissuras, porém com o aumento da temperatura, aumenta a

quantidade de fissuras e espessuras das mesmas. Nestas imagens ainda podemos verificar que no resfriamento rápido as fissuras ficam mais evidentes e com maior quantidade, porém em ambos os resfriamentos as fissuras são de maior proporção nas temperaturas mais elevadas, de 450°C e 600°C.

Figura 36: Imagens em MEV indicando o avanço das fissurações em função da temperatura



Fonte: (A autora)

Onde:

A = TP- Temperatura ambiente x 5Kv

B = TP-RL – 100 °C x 12Kv

C = TP-RL – 300 °C x 1Kv

D = TP-RL – 450 °C x 5Kv

E = TP-RL – 600 °C x 1Kv

F = TP- Temperatura ambiente x 12Kv

G = TP-RR – 100 °C x 12Kv

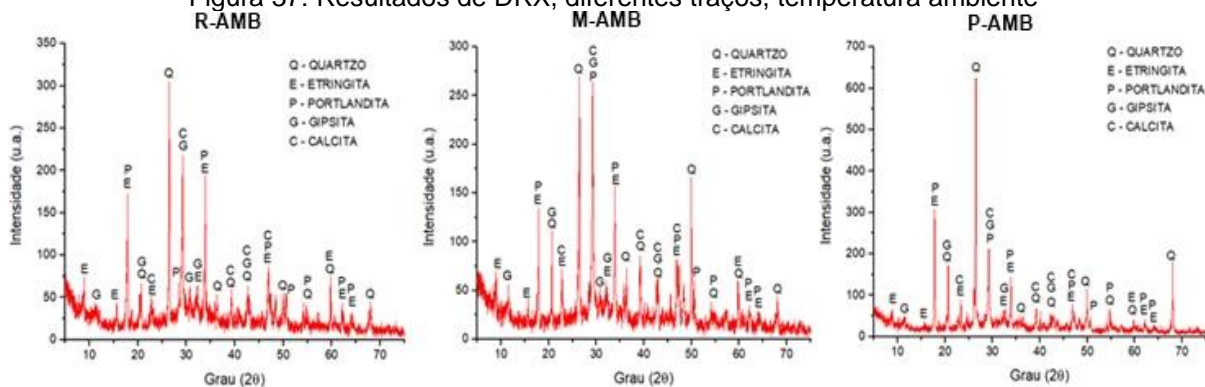
H = TP-RR – 300 °C x 1Kv

I = TP-RR – 450 °C x 1Kv

J = TP-RR – 600 °C x 1Kv

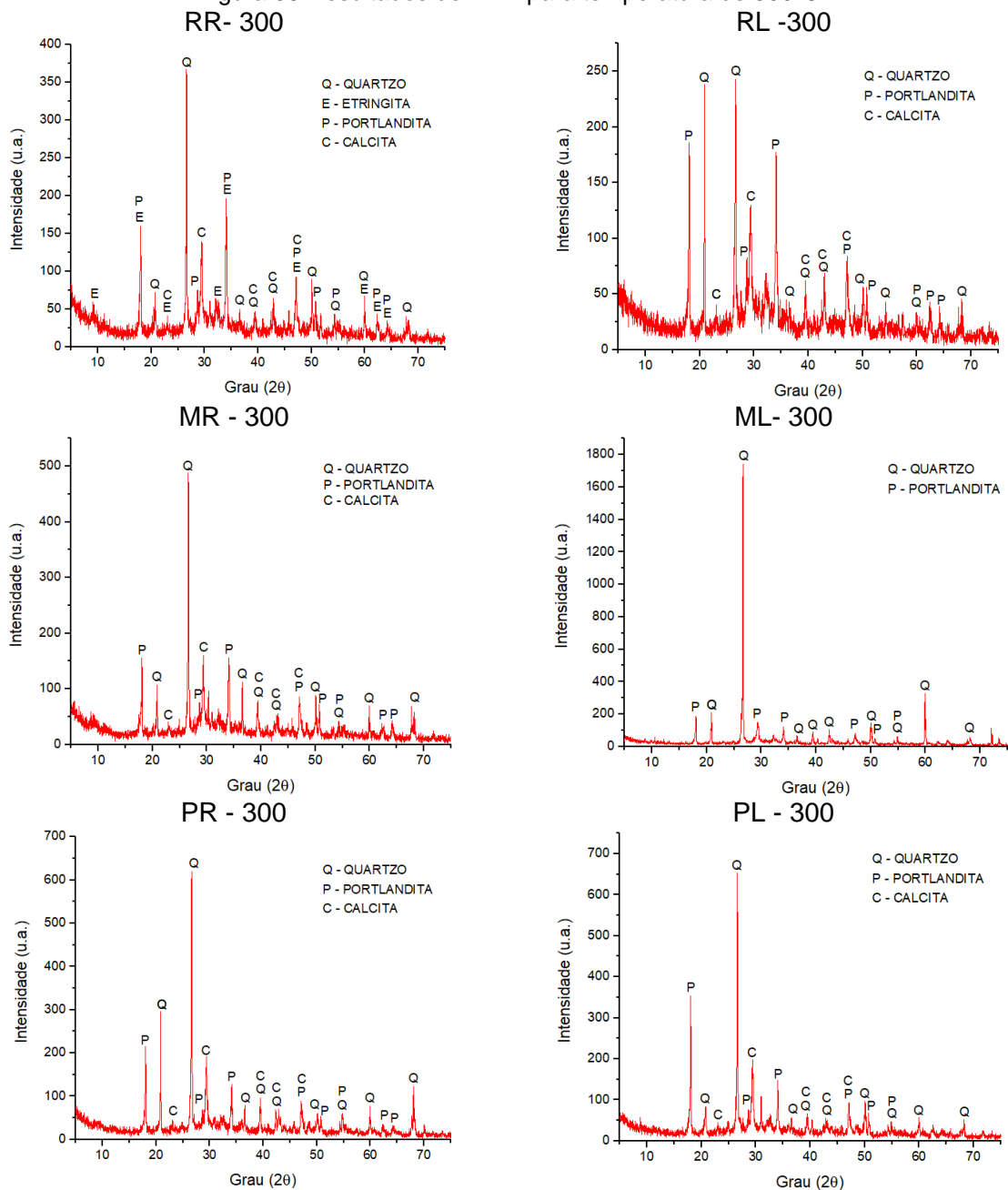
Com base nos ensaios de DRX pode-se ainda identificar que a partir de 300°C não se encontra mais o cristal de gipsita e etringita. O que já era esperado pois conforme Paulik *et al.* (1992) a gipsita se decompõe a partir de 115°C à 120°C e Amaral (2014), o qual cita que a etringita se decompõem em temperaturas acima de 100°C. Estas análises podem ser feitas na Figura 37, a qual ilustra os resultados para os três traços ensaiados em temperatura ambiente e na Figura 38 a qual ilustra os resultados do ensaio de DRX na temperatura de 300°C, para os três traços ensaiados e os dois tipos de resfriamentos.

Figura 37: Resultados de DRX, diferentes traços, temperatura ambiente



Fonte: (A autora)

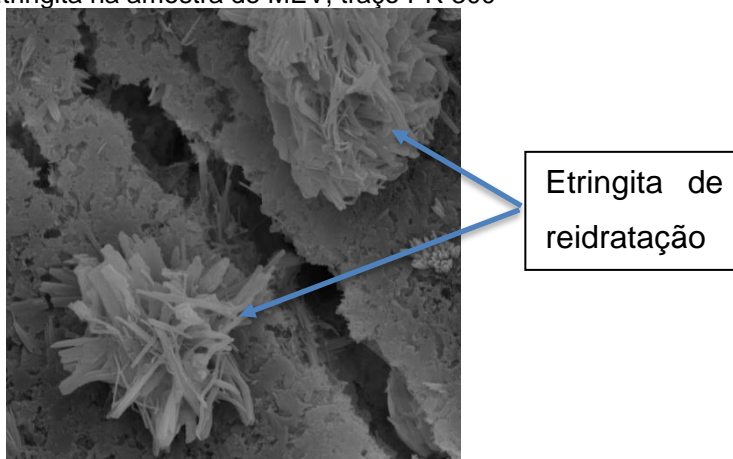
Figura 38: Resultados de DRX para temperatura de 300°C



Fonte: (A autora)

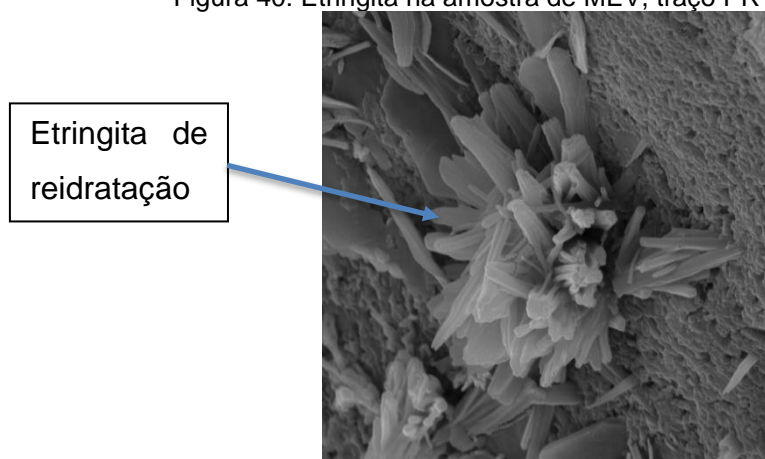
Porém as imagens do MEV apresentam etringita e portlandita nas amostras de concretos ensaiados com temperatura superior a 300°C, estes cristais provavelmente são resultados do processo de reidratação do concreto. Sendo que as amostras para o MEV foram retiradas dos CPs, após 120 dias das amostras para o DRX, ou seja, nos ensaios de DRX apenas a portlandita é identificada em amostras expostas a 600°C, porém nos ensaios do MEV é identificado a portlandita e etringita nas amostras de 300°C, 450°C e 600°C. Apesar das estruturas não estarem bem definidas, como pode ser observado nas Figura 39, Figura 40 e Figura 41, pois se tratam de um cristal de reidratação.

Figura 39: Etringita na amostra de MEV, traço PR 300



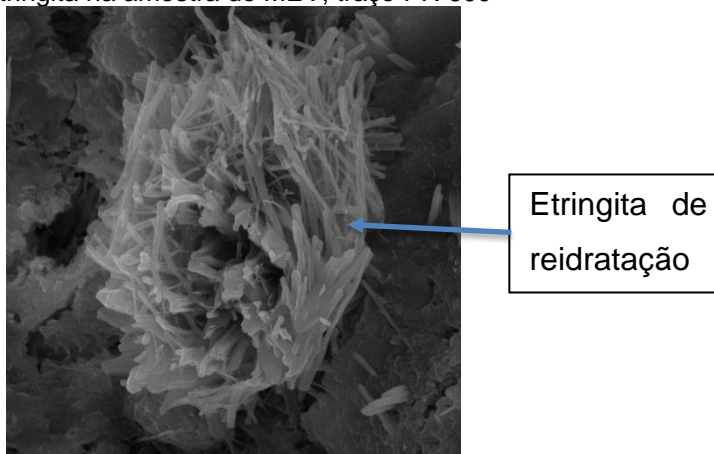
Fonte: (A autora)

Figura 40: Etringita na amostra de MEV, traço PR 450



Fonte: (A autora)

Figura 41: Etringita na amostra de MEV, traço PR 600



Fonte: (A autora)

Lima (2005) e Almeida (2017) também descrevem este processo de reidratação com o aparecimento de portlandita e etringita. Quando a amostra é aquecida em patamares superiores a 600°C e depois resfriada, o CaO formado se reidrata, formando novamente a portlandita. Isto provoca expansões, que acabam por contribuir para o aparecimento de fissuras no concreto. Esta portlandita secundária apresenta um arranjo cristalino de pior qualidade e é suscetível a processos de decomposição em temperaturas mais baixas. A reidratação é um fator bastante relevante quando a durabilidade da estrutura está sendo analisada. Outro fator preponderante é o tipo de cimento, visto que em alguns cimentos o CaO se reidrata completamente, enquanto, em outros, somente uma parcela se reidrata. A etringita vai perdendo água e se decompondo com o aumento de temperatura. Nenhuma fase cristalina contendo sulfato é detectada em temperaturas superiores a 100°C. Após o resfriamento, a etringita pode se formar novamente, por reidratação.

Souza e Moreno (2010), estudaram a reidratação de concretos expostos a altas temperaturas e em seus resultados obtiveram que o concreto exposto ao ar, ou seja, processo de reidratação ao ambiente, alcançou índices próximos daqueles obtidos para os corpos de prova imersos em água (com uma diferença de 10% a menos). Justificando a reidratação dos concretos deste estudo, os quais ficaram em temperatura ambiente até serem retiradas as amostras para o ensaio do MEV.

Analisando os resultados obtidos com as normas vigentes, no Brasil tem-se a NBR 15200:2012, a qual fornece a relação entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas e a resistência característica à

compressão do concreto à temperatura ambiente, para concretos preparados predominantemente com agregados siliciosos. A norma ainda descreve que para concretos preparados com outros agregados ou massas específicas diferentes daquelas indicadas em sua tabela, deve ser consultado o Eurocode 2, Part 1-2. Em seu anexo B, é ilustrado o diagrama tensão-deformação do concreto a temperaturas elevadas, o mesmo é apresentado no Eurocode 2, porém neste os valores para os principais parâmetros das relações tensão-deformação de concreto de peso normal em temperaturas elevadas são relacionados com os agregados siliciosos e calcários. Conforme pode ser observado na Tabela 6. Ou seja, as versões atuais das normas ABNT NBR 15200:2012 e EN 1992-1-2:2004 não estabelecem diretamente fatores de redução do módulo de elasticidade do concreto expostos às altas temperaturas, mas oferecem valores que relacionam a deformação linear específica do concreto à temperatura e a resistência à compressão do material.

Tabela 6: Valores para os principais parâmetros das relações tensão-deformação do concreto (EN 1992-1-2:2004)

Concreto temp. θ	Agregado silicioso			Agregado calcáreo		
	$f_{c\theta}/f_{ck}$	$E_{c1,\theta}$	$E_{cu1,\theta}$	$f_{c\theta}/f_{ck}$	$E_{c1,\theta}$	$E_{cu1,\theta}$
(°C)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-

Os fatores de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura foram excluídos da norma ABNT NBR 15200 em 2012, após 8 anos de vigência (ABNT, 2004; 2012). Processo semelhante afetou a norma ACI 216R, cujos fatores de redução do módulo de elasticidade do concreto em situação de incêndio, provenientes de Cruz (1966 *apud* ACI, 1989), foram removidos em 2007 (SOLLERO, 2019).

Segundo a NBR 15200:2004, a redução do módulo de elasticidade do concreto à medida que se tem um aumento de temperatura é expressada pela Equação 3, a seguir.

$$E_{ci,\theta} = k_{cE,\theta} E_{ci} \quad (3)$$

Onde:

$E_{ci,\theta}$ = módulo de elasticidade inicial do concreto sob a temperatura θ (MPa);

$k_{cE,\theta}$ = coeficiente de redução do módulo de elasticidade do concreto (adimensional);

E_{ci} = módulo de elasticidade inicial do concreto à temperatura ambiente (MPa);

Os valores das relações $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Valores para cálculo da redução do módulo e resistência segundo (ABNT NBR15200:2004)

Temperatura do Concreto θ (°C)	Agregado silicoso		Agregado calcáreo	
	$f_{c\theta}/f_{ck}$	$E_{c\theta}/E_c$	$f_{c\theta}/f_{ck}$	$E_{c\theta}/E_c$
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,95	0,90	0,97	0,94
300	0,85	0,72	0,91	0,83
400	0,75	0,56	0,85	0,72
500	0,60	0,36	0,74	0,55
600	0,45	0,20	0,60	0,36
700	0,30	0,09	0,43	0,19
800	0,15	0,02	0,27	0,07
900	0,08	0,01	0,15	0,02
1000	0,04	0,00	0,06	0,00
1100	0,01	0,00	0,02	0,00
1200	0,00	0,00	0,00	0,00

A Figura 42 ilustra os fatores apresentados pela norma ABNT NBR 15200:2004 e a Figura 43 ilustra os fatores de redução do módulo elástico, segundo a norma ACI216R:1989.

Figura 42: Fatores de redução do módulo de elasticidade tangente e secante do concreto em função da temperatura (ABNT NBR 15200:2004)

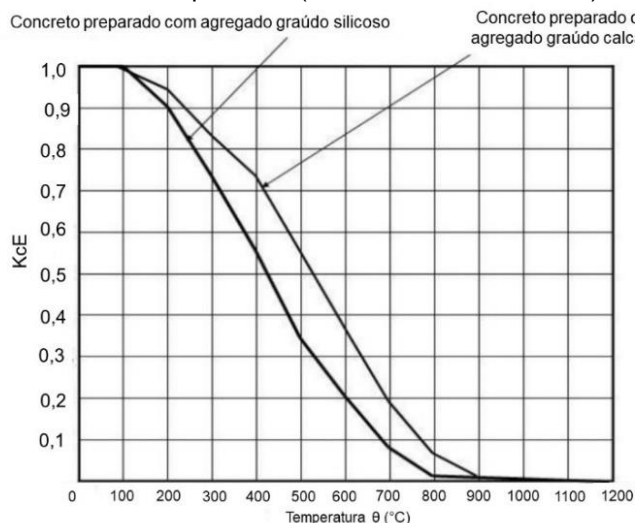
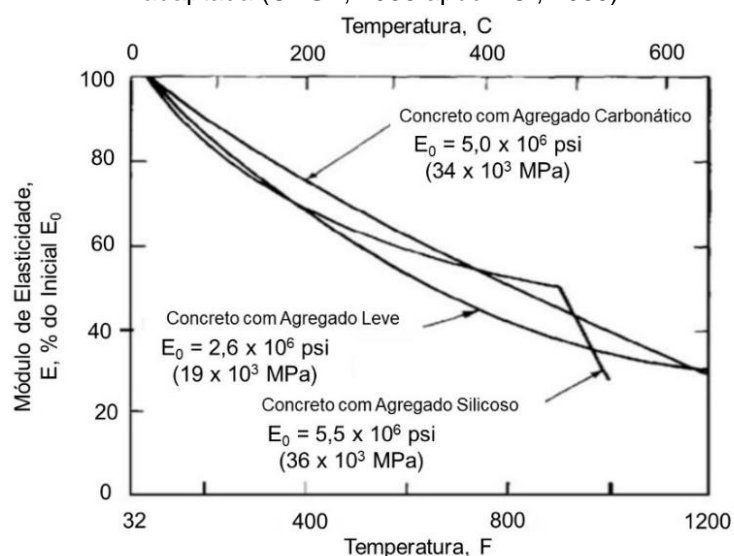


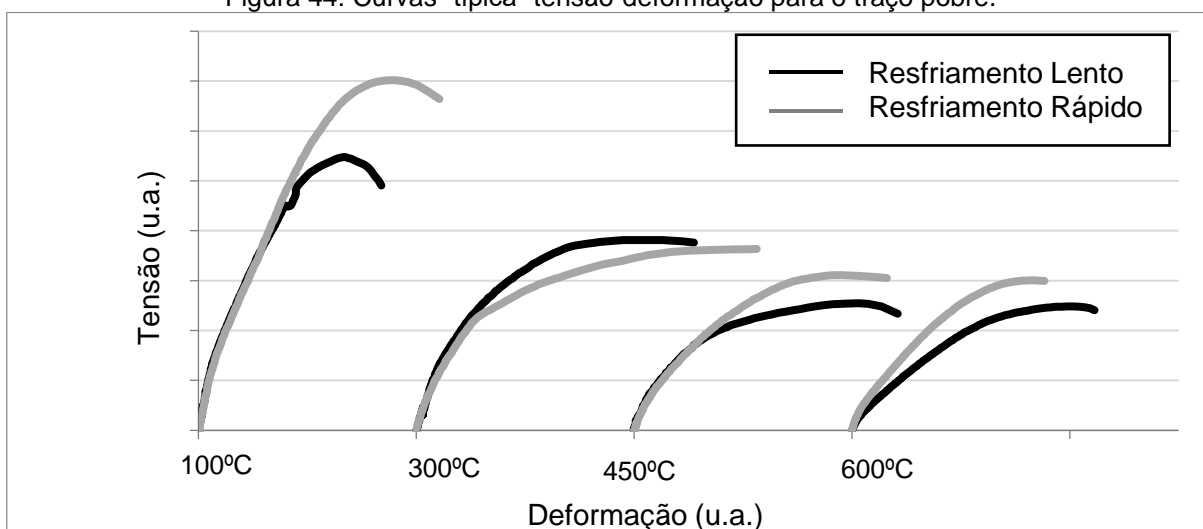
Figura 43: Fatores de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura, adaptada (CRUZ, 1966 apud ACI, 1989)



Segundo Costa (2008), a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é aplicável em métodos simplificados de verificação de estabilidade de elementos, nos quais o módulo de elasticidade ou rigidez da seção de concreto são admitidos constantes, por exemplo, em análises elásticas. Na América do Norte e na Europa, tem sido desestimulado o uso de cálculos simplificados por equações de soluções analíticas, por apresentarem resultados inseguros ou muito conservadores em projetos à temperatura ambiente.

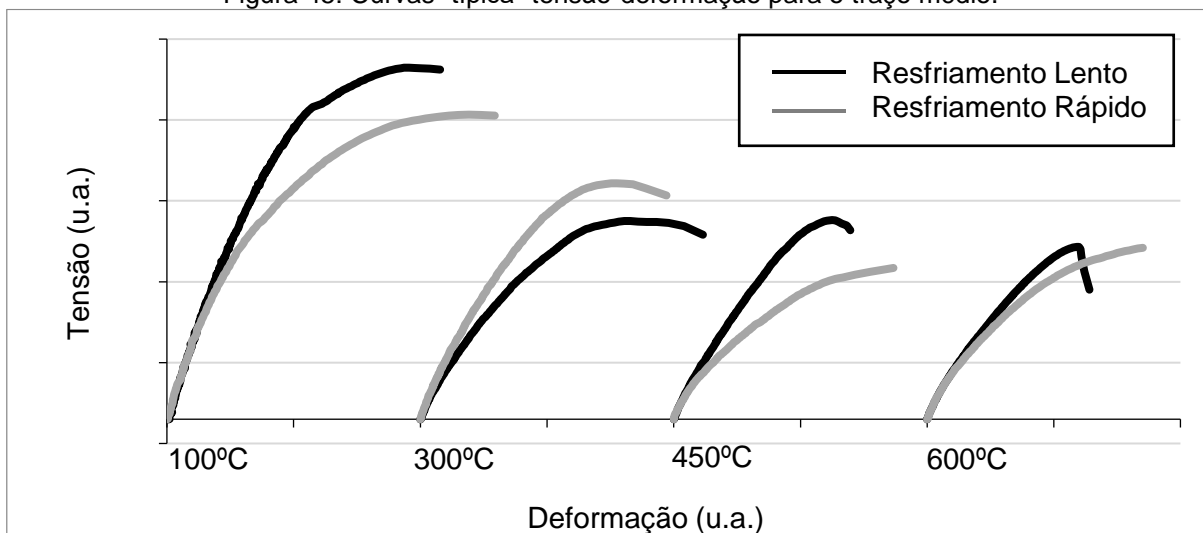
Na Figura 44, Figura 45 e Figura 46, pode se observar as curvas de tensão-deformação para cada traço, comparando o resfriamento rápido e lento, para cada temperatura ensaiada.

Figura 44: Curvas "típica" tensão-deformação para o traço pobre.



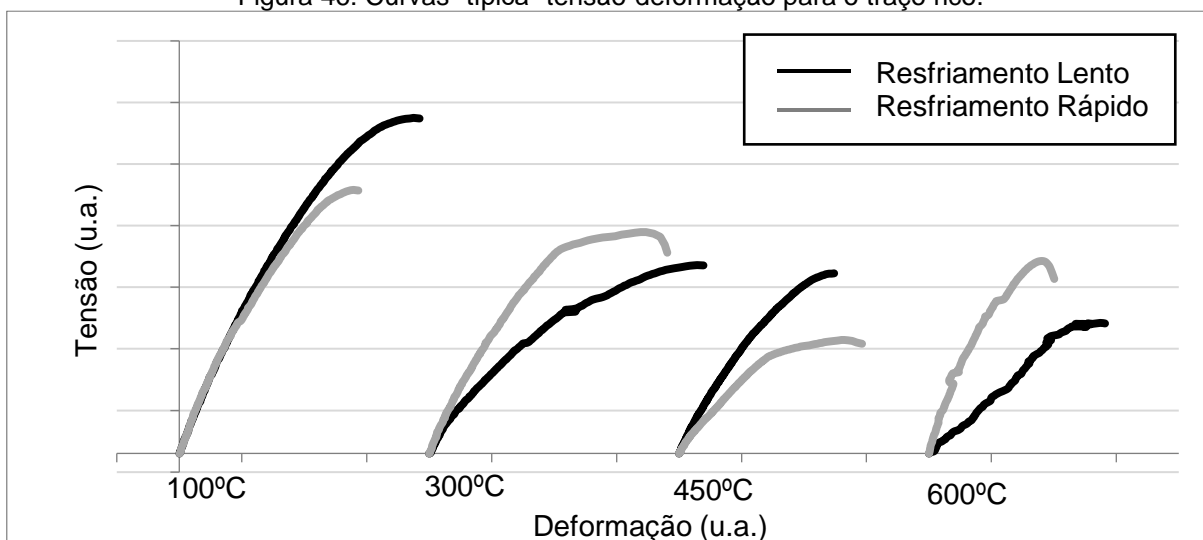
Fonte: (A autora)

Figura 45: Curvas "típica" tensão-deformação para o traço médio.



Fonte: (A autora)

Figura 46: Curvas "típica" tensão-deformação para o traço rico.



Fonte: (A autora)

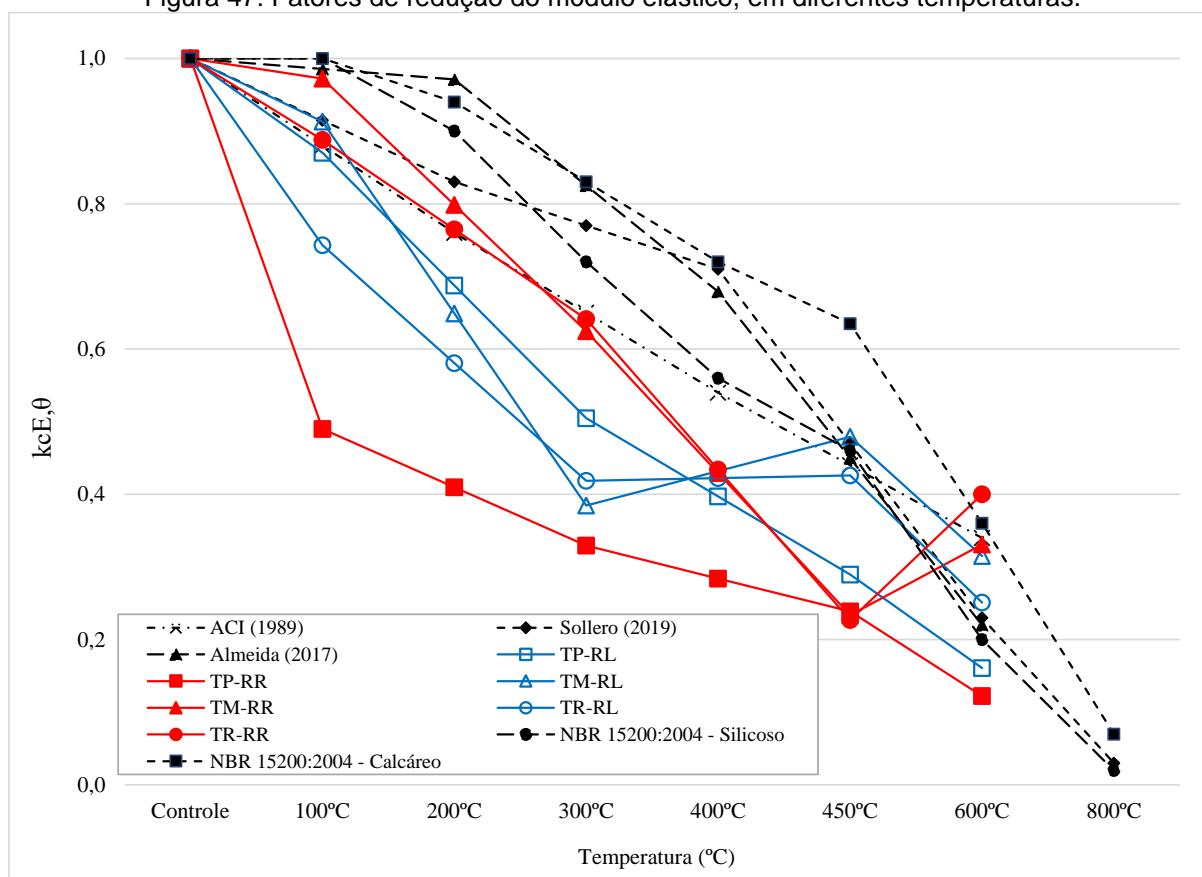
Comparando as curvas dos três traços, verificamos que não há um padrão de curvatura para cada temperatura de ensaio, pois em cada traço a curva tensão-deformação para a mesma temperatura, se diferem. E ainda se compararmos na mesma temperatura ambos os traços apresentam curvaturas similares com o resfriamento rápido e lento, nas temperaturas mais baixas, porém com o aumento da temperatura, as curvas dos dois resfriamentos se diferem expressivamente.

Estes gráficos representam os resultados obtidos para o módulo elástico, onde no traço pobre, conforme se aumenta a temperatura em ambos os resfriamentos, o módulo elástico diminuiu. Porém no traço médio e rico, é possível perceber a recuperação do módulo elástico na temperatura de 600°C, com o grupo de resfriamento rápido.

Com a observação destas curvas tensão-deformação verifica-se que dificilmente será possível estimar a redução do módulo elástico do concreto exposto a temperaturas elevadas, por meio gráfico. Pois cada traço, temperatura e tipo de resfriamento, tem uma curva diferente.

Por esta razão procurou-se analisar os resultados de módulo de elasticidade com o de outros estudos. Conforme demonstrado na Figura 47, o qual relaciona os resultados dos três traços ensaiados e o resfriamento rápido e lento, com os valores apresentados por Almeida (2017), Sollero (2019), ACI216R:1989 que são referenciados do estudo de Cruz (1966) e da NBR 15200:2004. Os valores apresentados de Almeida (2017) e Sollero (2019), são referentes ao concreto convencional elaborado com agregado graúdo de origem basáltica, porém os valores de ACI216R:1989, são referentes ao concreto convencional elaborado com agregado graúdo carbonático e os valores da NBR 15200:2004 são referentes ao concreto convencional elaborado com agregado graúdo silicoso e calcáreo.

Figura 47: Fatores de redução do módulo elástico, em diferentes temperaturas.



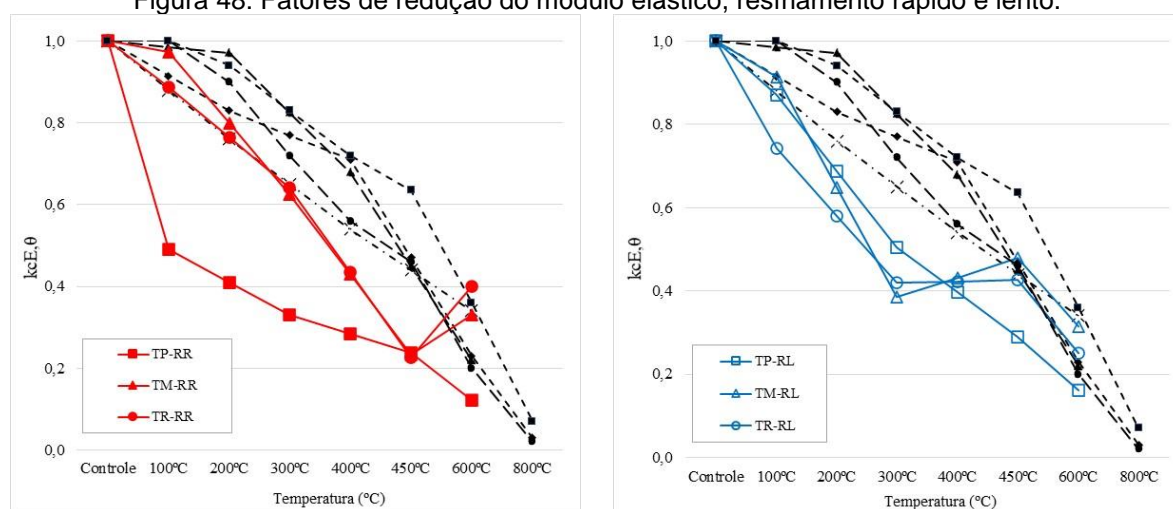
Fonte: (A autora)

Esta comparação dos resultados obtidos neste estudo com o apresentado na NBR 15200:2004 e ACI216R:1989, demonstra que realmente há uma diferença entre as duas normas, quando se relaciona o concreto convencional elaborado com agregado calcáreo, sendo a norma ACI216R:1989 mais rigorosa que a NBR 15200:2004. Quando comparado os resultados de Sollero (2019), Almeida (2017) e ACI216R:1989, verifica-se que Almeida (2017) obteve valores do fator de redução de módulo elástico menores que os resultados de Sollero (2019), até a temperatura próximo a 400°C, a partir desta temperatura ambos seguem com os valores aproximados, além de que ambos têm os resultados com menor fator de redução até 450°C quando comparado com os resultados de ACI216R:1989.

Quando comparamos os resultados dos três traços resfriados lentamente, Figura 48, todos obtiveram um fator de redução maior que o apresentado em ACI216R:1989, ou seja, todos os traços resfriados lentamente obtiveram uma redução mais acentuada do módulo elástico, do que o critério mais rigoroso apresentado na literatura.

Quando se comparam os resultados dos três traços resfriados bruscamente, verifica-se que o traço pobre se manteve com os fatores de redução maiores que o apresentado em ACI216R:1989, e que o traço rico e médio nas temperaturas até 200 °C obtiveram valores de fator de redução menores do que apresentado em ACI216R:1989, mas na faixa de temperatura entre 200°C e 600°C os valores obtidos para estes traços também foram maiores do que os fatores de ACI216R:1989. Ou seja, nas temperaturas mais elevadas, com os ensaios de resfriamento rápido, o fator de redução do módulo elástico encontrado neste estudo também foi mais rigoroso.

Figura 48: Fatores de redução do módulo elástico, resfriamento rápido e lento.



Fonte: (A autora)

Desta forma pode-se observar que em ambos os traços e resfriamentos ensaiados, foi obtido uma redução mais relevante do módulo de elasticidade, do que os resultados encontrados na literatura. E que indiferente do traço ensaiado e resfriamento adotado, o concreto quando exposto a altas temperaturas, tem o módulo elástico rigorosamente reduzido.

Sabendo-se da importância que o módulo elástico tem nos materiais, não estando o concreto de fora desta lista de materiais que tem suas propriedades e utilidade baseada também no módulo elástico, indica-se a necessidade de estudos que possam padronizar os ensaios de módulo elástico no concreto para situações de incêndio ou elevação de temperaturas, para que se possa criar parâmetros de análise e comparação destes resultados. Além da inclusão destes parâmetros de ensaios e análises nas normas, para tais aplicações. Sendo o concreto um material heterogêneo, o qual pode ser produzido com agregados de diferentes localidades e

cimentos de diferentes propriedades, a criação desta padronização de ensaios e análises pode facilitar na comparação entre os concretos de compósitos distintos.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa possibilitou avaliar as alterações do concreto convencional quando exposto a temperaturas elevadas. Analisando três diferentes traços, expostos a temperaturas de 100°C à 600°C e em dois grupos de resfriamento, lento e rápido.

Em relação aos objetivos propostos foi possível avaliar as alterações da resistência mecânica do concreto após submetidos as situações de elevação de temperatura. Em relação a estas alterações destaca-se nos resultados o decréscimo da resistência à compressão conforme o aumento da temperatura em que o concreto é exposto, para ambos os grupos de resfriamento. Porém, em cada faixa de temperatura foram verificados diferentes comportamentos, sendo que o concreto teve um aumento de resistência à compressão quando exposto a temperatura de 100°C, devido a evaporação da água livre que fortalece o concreto. Com o aumento da temperatura até 450°C a resistência à compressão reduziu comparativamente a temperatura de 100°C, porém devido à hidratação adicional dos grãos de cimento anidrados, decorrentes do efeito de autoclavagem os resultados de resistência à compressão do concreto exposto a 450°C foi próximo ao do concreto exposto a 300°C. Os resultados mais expressivos da diminuição da resistência à compressão foram nos corpos de prova expostos a 600°C, reduzindo em média 40% referente ao valor inicial, sendo estes valores mais acentuados decorrência da microfissuração interna, desidratação e alto grau de fissuração superficial.

Analisando os resultados da resistência à tração também se observa a diminuição desta propriedade conforme se aumenta a temperatura de exposição. Porém os resultados de resistência a tração obtiveram uma redução mais intensa, do que os resultados da resistência à compressão, ou seja, uma redução de 10% a mais quando comparamos os resultados da temperatura de 600 °C, devido a fissuração ser mais influente no ensaio de tração e pela fragilização da zona de transição pasta agregado. Em ambos os resfriamentos utilizados e nos três traços ensaiados, a resistência a tração também é mais afetada na temperatura de 600°C, devido a desidratação dos hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) e hidróxidos de cálcio (Ca (OH)₂). E quando comparado os tipos de resfriamento, observa-se que o resfriamento não influencia no decréscimo da resistência a tração.

Em relação a caracterização das propriedades de absorções e porosidades dos concretos, neste trabalho é possível verificar que há um aumento da absorção

conforme se aumenta a temperatura em que o concreto é exposto, sendo que os resultados do grupo de resfriamento lento apresentaram um aumento mais representativo da absorção do que o grupo de resfriamento rápido, 19% em média, para a temperatura de 600 °C e o traço rico em cimento também teve esta observação em relação aos traços com maiores relação água/cimento, chegando até 14% em média para a temperatura de 600 °C. Em resumo se conclui que a absorção do concreto é diretamente afetada pela exposição da temperatura, devido as microfissurações e perda de água.

Em relação a principal propriedade deste estudo, o módulo elástico do concreto, conclui-se que independentemente do traço e resfriamento utilizado, o concreto tem o módulo elástico afetado pela exposição a temperaturas elevadas, sendo que conforme aumenta a temperatura de exposição, diminuiu o módulo elástico. Verifica-se que há uma correlação entre a perda de módulo elástico e resistência à compressão, porém a redução do módulo elástico é mais expressiva do que a redução da resistência a compressão, reduzindo 74% em média para a temperatura de 600 °C enquanto que a resistência à compressão reduziu 40%. É possível também verificar uma correlação entre a redução do módulo elástico a o aumento da absorção, estas correlações evidenciam o aumento da microfissuração do concreto e a desidratação da portlandita e decomposição do C-S-H. Tais microfissuras e desidratação das fases são confirmadas nos ensaios de DRX e MEV, sendo claramente possível identificar o aumento da microfissuração conforme as amostras são expostas a temperaturas mais elevadas.

Tais resultados auxiliam na compreensão da necessidade de estudos sobre o concreto exposto a temperaturas elevadas, pois identificam grande variação das propriedades deste material conforme a temperatura é modificada. E evidencia a necessidade da criação de um parâmetro para tais estudos, pois o concreto pode ser formado por diferentes composições, sendo de traço ou materiais utilizados, os quais diferenciam as propriedades finais de cada concreto elaborado. E se houver um parâmetro normatizado para ensaio de concretos em altas temperaturas, as análises e comparações serão mais eficientes.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J.M.A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz.** 2017, 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

AMARAL, R. L. **Simulação do comportamento de estruturas de concreto submetidas a incêndios.** 2011, 55 f. Tese (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz De Fora, Juiz de Fora, 2011.

AMARAL, R.O. **Análise computacional termomecânica de estruturas de concreto sujeitas a temperaturas elevadas.** 2014, 92 f. Tese (Mestrando em Modelagem Computacional) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

AMERICAN CONCRETEINSTITUTE. **ACI/TMS216R.** Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies. Farmington Hills, MI,1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, **Vendas de cimento iniciam 2020 com queda, 2020.** Disponível em < <https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-iniciam-2020-com-queda/>> Acesso em: 02 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015 – Versão corrigida 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7680-1: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto.**

Parte 1 – Resistencia a compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015 – Versão corrigida: 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação a compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO HUMANITÁRIA DOS BOMBEIROS VOLUNTÁRIOS DE PAÇO DE SOUSA, Flashover. Instituição de Utilidade Pública, 2013.

BATTAGIN, A. F.; SILVEIRA, A.L.Z.P. **Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada**. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). *Concreto & Construções*, 89 Ed. p.44-48. 2018.

CÁNOVAS, M.F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1988. 522 p.

CARASLINDAS, H.; BARROS, R.C. Degradação das Propriedades Mecânicas do Betão Exposto a Altas Temperaturas. **Betão Estrutural 2004**, Porto, Vol. 2, p. 1129-1136, nov. 2004. Trabalho apresentado no Encontro Nacional de Betão Estrutural, 2004, Porto – Portugal.

CARETTE, G. G.; PAINTER, K. E.; MALHOTRA, V. M., Sustained High Temperature Effect on Concretes Made with Normal Portland Cement, Normal Portland Cement and Slag, or Normal Portland Cement and Fly Ash, **Concrete International**, v. 4, n. 7, pp. 41-51, 1982.

CARVALHO, E.F.T. **Contribuição ao estudo da resistência residual do concreto submetido ao tratamento térmico padrão para situações de incêndio**. 2001, 109 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.

CIFUENTES, Héctor; GARCÍA, Fidel; MAESO, Orlando; MEDINA, Fernando. Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviors of low-, normal- and high-strength FRC. **Construction and Building Materials**. v. 45, pp. 130–137, ago. 2013. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez82.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0950061813003103>. Acesso em: 02 nov. 2021.

CIMOLIN, F.R.; GODINHO, D.S.S. **Estudo do efeito da fibra de polipropileno em concreto exposto a altas temperaturas**. 2015, 23 f. Tese (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, 2015.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. Lausanne, 1993.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE GOIÁS, **Fundamentos de combate a incêndio - Manual de bombeiros**, 1ª edição, Goiás, 2016.

COSTA, C. N. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2002, 241 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D. de; SILVA, V. P. e. O fenômeno do lascamento (“*spalling*”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica. In: 44º Congresso Brasileiro Concreto, 2002, Belo Horizonte, **Anais [...]** Belo Horizonte: IBRACON, 2002. p. 1-15.

COSTA, C.N.; **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008, 721 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DIAS, A.R.O.; AMANCIO, F.A.; CARVALHO RAFAEL, M.F.; CABRAL, A.E.B. Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas. **Revista Matéria**, v.25, n.2, p. 2020. DOI: 10.1590/s1517-707620200002.1029 Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/bjQ4HkBHBWbMjYtDsYkfwXn/?lang=pt> Acesso em: 12 abr. 2019.

DOTREPPE, J.C.; BISSCHOPS, P.F.; FRANSSEN, J.M. – **Fire Resistance of Circular Concrete Columns**. In: Third International Conference on “Concrete Under Sever Conditions: Environment & Loading” – CONSEC’01. The University of British Columbia. Vancouver, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 2**: design of Concrete Structures: part 1-1: general rules and rules for buildings. EN 1992-1-1. Brussels, Belgium, 2004.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE [du] BÉTON (FIB). **Fire design of concrete structures: structural behavior and assessment**. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2008, 209 p. (Bulletin. FIB; 46).

FERNANDES, B.; GIL. A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS**, v.10, n.4, p.838-863. 2017.

FREITAS, J.A. **A estrutura do concreto, Notas de aula**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013. Disponível em <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/3/36/TC030_Estrutinterna_x.pdf > Acesso em: 14 mai. 2019.

GEORGALI, B.; TSAKIRIDIS, P.E. Microstructure of fire damaged concrete. A case study. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 255–259, 2005.

GHAN, Y. N.; PENG, G. F.; ANSON, M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. **Cement and Concrete Research**. v.21 pp.23-27, 1999.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, v. 61, n. 1, p. 1–10, 2013.

HANDOO, S.K.; ARGAWAL S.; ARGAWAL, S.K. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**. v.32, p. 1009-1018, 2002.

HEISSLER, R. F.; SILVA, G.C.S.; PRAGER, G.L.; TUTIKIAN, B.F. **Análise de parede pré-fabricada em concreto protendido quando submetida à resistência**. In. CONPAT, Lisboa, 2015.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p.109–117, 2004.

HERTZ, K.D. - Danish Investigations on Silica Fume Concrete at Elevated Temperatures. **MATERIALS JOURNAL**, v.89 n.4, p.345-347, 1992.

KAEFER, L.F. **Considerações sobre a Microestrutura do Concreto**. Notas de aula. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002. Disponível em:<http://engenhariaconcursos.com.br/arquivos/Materiais/microestrutura_do_concreto.pdf> Acesso em 25 fev. 2018.

KIM, K.Y.; YUN, T.S.; PARK, K.P. Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography. **Cement and Concrete Research**. v.50 p.34-40, 2013.

KODUR V. K. R. Properties of concrete at elevated temperatures. **ISRN Civil Engineering, Hindawi Publishing Corporation**, v. 2014, 2014.

KODUR, V.; KHALIQ, W. Effect of Temperature on Thermal Properties of Different Types of High-Strength Concrete. **ACI Materials Journal**. n. 108-M42 p.394-402, 2011.

KOMONEN, J.; PENTTALA, V. Effects of High Temperature on the Pore Structure and Strength of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes. **Fire Technology**, v.39, p 23-34, 2003.

LANDI, F.R. – **Ação do Incêndio sobre Estruturas de Concreto Armado**. Boletim Técnico nº 01/86. PCC-EPUSP. São Paulo, 1986.

LANKARD, D.R.; BIRKIMER, D.L.; FONDFRIST, F.F.; SNYDER, M.J.,1971. “**Effects of moisture content on the structural properties of portland cement concrete exposed to temperature up to 500 F**. TEMPERATURE AND CONCRETE, SP-25: 59-102, Detroit, 1971.

LASCARRO, M. **Indicadores do concreto, 2017**. Disponível em <<https://www.construcaolatinoamericana.com/news/indicadores-doconcreto/3128426.article>> Acesso em: 4 set. 2021

LIM, S.; MODAL, P. Effects of Nanosilica Addition on Increased Thermal Stability of Cement-Based Composite. **ACI Materials Journal**, v.112, n. M32, p. 305, 2015.

LIMA, R. C. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005, 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LIN, Wei-Ming.; LIN, T.D.; POWERS-COUCHE, L.J. – Microstructures of Fire Damaged Concrete. **ACI Materials Journal**. New York, v. 93, n. 3. May- June, 1996.

MARQUES, A.C.; AKASAKI, J.L.; FIORITI, C.F. Análise da resistência mecânica à compressão de concretos incorporados com resíduos de pneus submetidos à elevada temperatura. **TÓPOS** v. 6, n 1, p. 82 - 97, 2012.

MALUK, Cristian; BISBY, Luke; TERRASI, Giovanni. Effects of polypropylene fibre type and dose on the propensity for heat-induced concrete spalling. **Engineering Structures**. V.141, p.584–595, 2017.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **CONCRETO: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MINAMI, Kazutaka; TAZAWA, Ei-Ichi; Satoru, KAGEYAMA; WATANABE, Yasumitsu. **Effect of Type of Aggregate on Mechanical Properties of Concrete Subjected to High Temperature**. Transactions of the Japan Concrete Institute. JCI. Tokyo, 1987.

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

NASSIF, A.Y.; Rigden, S. e Burley E. The Effects of Rapid Cooling by Water Quenching on the Stiffness Properties of Fire Damaged Concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, n.51, p. 255-261, 1999.

NEVILLE A.M.; BROOKS, J.J. **Concrete Technology**. Segunda edição. Inglaterra: Longman Group UK Limited: 987; 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

NPT 003 - **Terminologia de segurança contra incêndio**. Corpo de bombeiros, versão 03, 2014.

ORTIZ, I.R. **Notas de aulas - Concreto Armado Conceitos e Funcionamento**. Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em <https://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/civ1113-matconcreto1.pdf> Acesso em: 14 mai. 2019.

OZAWA, M.; MORIMOTO, H. Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete. **Constr. Build. Mater.** v. 71, p. 83–92, 2014.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. In: 56º Congresso brasileiro do concreto, 2014, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, IBRACON, 2014. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/269.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2021.

PAULIK, F.; PAULIK, J.; ARNOLD, M. Thermal decomposition of gypsum. **Elsevier Science Publishers B.V.**, Amsterdam, v. 200, pp 195-204, 1992.

PEREIRA, E. **Notas de aulas - Tópicos Especiais em Engenharia de Materiais: Materiais cimentícios Aula 7** – Cimento Portland. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2017.

PENG, G.F.; HUANG, Z.S. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**, v. 22, n. 4, p. 593–599. 2008.

PINHEIRO, L.M.; MUZARDO, C.D.; SANTOS, S.P.; CATOIA, T.; CATOIA, B. **Estruturas de concreto**, cap.2 - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SAVVA, A., MANITA, P., SIDERIS, K.K. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 239–248, 2005.

SILVA, J.S. **Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET)**. 2013, 147 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SILVA, K. C. L. S. **Estudo do Efeito da fibra de polipropileno no concreto quando submetido à altas temperaturas**. 2015, 23 f. Tese (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, 2015.

SILVA, L.S.M.P. Apoio ao estudo do concreto em situação de Incêndio. **Revista Terra & Cultura**, v. 31, n. especial, p 39-48, 2015.

SMARZEWSKI, Piotr; HUNEK, Danuta Barnat. Fracture properties of plain and steel-polypropylene-fiber-reinforced high-performance concrete. **MATERIALI IN TEHNOLOGIJE / MATERIALS AND TECHNOLOGY**, v.49, n.4, p. 563-571. 2015.

SOLLERO, M.B.S. **Propriedades mecânicas residuais do concreto em situação de incêndio**. 2019, 215 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

SOUZA, A. A. A. **Influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo**. 2005, 169 f. Tese (Mestrado na Área de Concentração em Edificações) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SOUZA, A.A.A. **Influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo**. 2005, 215 f. Tese (Mestrado em Concentração em Edificações) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SOUZA, A.A.A. **Procedimento para verificação em laboratório da tendência ao deslocamento do concreto em situação de incêndio**. 2010, 366 f. Tese (Doutorado na Área de Concentração em Estruturas) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2010.

SOUZA, A.A.A.; MORENO JR, A.L.; Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. **Revista IBRACON**, v. 3, n.4, pp 432-448, 2010.

SOUZA, M. M. de. **Estudo experimental do comportamento mecânico e da microestrutura de um concreto convencional após simulação das condições de incêndio**. 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ULRICH, S. **Concrete at High Temperatures -- A General Review**. Department of Civil Engineering, University of Kassel, Monchebergstr. 1988.

VALENTE, L.S. Patologias estruturais causadas por efeitos de sismo, explosão e exposição ao fogo. **Revista Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE**, v. 14, n. 2, p. 08-19, jul./dez. 2014.

VIEIRA, A.; GODINHO, D.S.S. **Análise macro e microestrutural do comportamento do concreto reforçado com fibras de polipropileno submetido a elevadas temperaturas**. 2016, 22 f. Tese (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, 2016.

VODAK, F.; TRTIK, K.; KAPICKOVÁ, O.; HOSKOVÁ, S.; DEMO, P. The effect of temperature on strength – porosity relationship for concrete. **Construction and Building Materials** v.18, p 529–534, 2004.

XU, Y., WONG, Y. L., POON, C. S. ANSON, M. Impact on high temperature on PFA concrete, **Cement and Concrete Research**. v.31, p 1065–1073, 2001.