



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO PEDRO SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CONCRETO
REVESTIDO COM VERMICULITA E SUBMETIDO A ELEVADAS
TEMPERATURAS POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

ANGICOS/RN
2021

JOÃO PEDRO SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CONCRETO
REVESTIDO COM VERMICULITA E SUBMETIDO A ELEVADAS
TEMPERATURAS POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

Trabalho Final de Graduação
apresentado a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido,
como requisito para a obtenção
do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wendell
Rossine Medeiros de Souza

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

SS586 Silva, João Pedro.
a Análise do comportamento termomecânico do concreto revestido com vermiculita e submetido a elevadas temperaturas por meio de simulações numéricas / João Pedro Silva. - 2021.
64 f. : il.

Orientador: Wendell Rossine Medeiros de Souza.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2021.

1. Argamassa de vermiculita. 2. Concreto em elevadas temperaturas. 3. Tensões internas. 4. Incêndio. 5. Método dos elementos finitos. I. Souza, Wendell Rossine Medeiros de , orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOÃO PEDRO SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DO CONCRETO
REVESTIDO COM VERMICULITA E SUBMETIDO A ELEVADAS
TEMPERATURAS POR MEIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

Trabalho Final de Graduação
apresentado a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Defendida em: 31 / 05 / 2021.

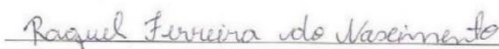
BANCA EXAMINADORA



Wendell Rossine Medeiros de Souza, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Kleber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Raquel Ferreira do Nascimento, Eng. (UFRN)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Tomaz de Aquino e
Vitória Maria por todo amor e
oportunidades concedidas em toda
minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as bênçãos e pela dádiva da vida, por me fazer um homem tão abençoado. Muitas graças por cada cuidado, pela força, determinação e saúde, assim como pelas pessoas que me permite ter afetividade.

Aos meus pais, **Tomaz de Aquino e Vitória Maria**, que sonham comigo, que confiam em mim e me concedem tanto amor, estamos aqui concluindo mais um passo, vocês graduam junto comigo. Ele sendo a pessoa mais inteligente, paciente e de bom coração que conheço. Ela é a mais determinada, cuidadosa e de bom coração também. Vocês são inspiração de pessoas, pais e amigos para mim, andamos um pelo outro, nossa família é de base indestrutível e eterna.

Meus avós, **Pedro Cosme** (*in memoriam*), **Generina Joana e Terezinha Epifânio** (*In memoriam*). Sou grato pelo tempo que vivenciei/vivencio com vocês, são a personificação da palavra amor. A última batalhou comigo muitos anos, se esforçou muito, me acolhendo em sua casa, acordando cedo, tendo cuidados sobre mim, hoje o reino dos céus é dela e sei que de lá continua me cuidando. Estamos nos formando meu vovô e minhas vovós.

Meu irmão, **Luiz Augusto**, por ser também combustível para minha conclusão nessa graduação, por me mostrar que tenho alguém para dar exemplo, apesar dos vacilos cometidos. Irmãos são amigos para sempre que com exemplo e apoio orgulham seus pais.

Minha namorada, **Flávia Oliveira**, a quem comecei uma história junto dessa graduação, e soube ser compreensiva, elevou minha autoestima quando os dias de universidade eram exaustivos. Estamos juntos em momentos bons e ruins e assim será pelos muitos anos de vida que iremos ter, muitos frutos bons ainda colheremos.

A minha família por todo apoio. Por manter a união e ser família de verdade, por preservar e ensinar bons costumes, incentivar a educação, o afeto, a honestidade e o companheirismo.

Aos meus amigos e companheiros de casa, **Fernando Cardoso e Gustavo Douglas**, pelos anos de parceria, anos difíceis e cansativos, mas que fizemos

passar com certa tranquilidade. Os intervalos entre uma lista de exercício e uma partida de videogame ou um jogo do Flamengo passavam de forma mais fácil, obrigado pelo conhecimento compartilhado.

Aos meus amigos, **Francioldson, Henrique e Paulo Henrique**, pela nossa amizade que apesar do distanciamento continua firme e forte, o tempo passa e amizade só se fortalece.

Aos meus **colegas de curso** que tiveram disponibilidade em ajudar nos conhecimentos científicos e em formar amizades que levarei para sempre.

A meu orientador e professor **Wendell Rossine** pelo auxílio, paciência e disposição no desenvolvimento deste trabalho. Parabéns pelo excelente profissional que é e obrigado pelos conhecimentos repassados, professor.

A UFRSA e todos os seus colaboradores, por terem participado e ajudado nesta graduação que se conclui com esse trabalho final.

RESUMO

O concreto armado é um material de uso em larga escala na construção civil, por ter propriedades que se adequam bem a tensões de tração e compressão além da facilidade na sua produção. Ainda que possua boas características térmicas em situações de incêndios as condições são extremamente rigorosas e medidas preventivas devem ser cada vez mais consideradas. Esta pesquisa tem como principal objetivo identificar a influência que uma camada protetora de vermiculita na argamassa de revestimento pode oferecer ao elemento de concreto. Este estudo foi realizado por meio de modelos computacionais com base no método dos elementos finitos. Para o presente estudo foram elaborados 4 modelos, expostos de 0°C a 500°C sob uma taxa de crescimento constante da temperatura no valor de 27,4°C/min, ocorrendo este fato na duração de 17 minutos aproximadamente. Os modelos eram um sem revestimento, e três com revestimento sendo na espessura de 1,00 cm, 1,75 cm e 2,50 cm. Por meio destas condições criadas, tornou-se exequível o estudo sobre o comportamento termodinâmico do concreto, observando como comportam-se a temperatura e as tensões internas no modelo, e qual seriam as intervenções criadas pelo revestimento de vermiculita. Os resultados extraídos apresentam valores satisfatórios quanto a redução de temperatura na face externa do modelo de concreto, sendo 6,83% de redução aos 5 minutos, 7,56% aos 11 minutos e 7,81% aos 17 minutos, tempo que atinge os 500°C, sendo estes os valores para uma camada de 2,50 cm de espessura. Na região da armadura foi observada uma diminuição na temperatura média da mesma de 5,61% para o revestimento de 1,00 cm, de 9,96% para o revestimento de 1,75 cm e de 11,62% quando revestido por 2,50 cm de argamassa. E as tensões internas do modelo sofreram taxa de crescimento conforme o revestimento era aumentado. Notou-se que a argamassa consegue diminuir a temperatura que o concreto e armadura passam a ser submetidos, sendo importante dizer que a espessura da argamassa pode aumentar os valores de tensões internas já que diminui a liberdade de expansão do concreto.

Palavras-Chave: Argamassa de vermiculita. Concreto em elevadas temperaturas. Tensões internas. Incêndio. Método dos elementos finitos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Noite do incêndio na Boate Kiss	20
Figura 2 – Noite do incêndio no edifício Wilson Paes de Almeida	21
Figura 3 – Incêndio no Edifício Alto do Tirol, Natal/RN	22
Figura 4 – Modos de transferência de calor.....	23
Figura 5 –Curva de temperatura-tempo.....	25
Figura 6 – Curva de incêndio-padrão ISO 834 (1975)	26
Figura 7 – Tempos requeridos de resistência ao fogo em minutos.....	27
Figura 8 – Relação da temperatura e reação do concreto.....	29
Figura 9 – Laje após incêndio	30
Figura 10 – Cubo de tensões.....	31
Figura 11 – Coeficientes de redução da resistência ($K_{s,\theta}$), limite e módulo de elasticidade ($K_{sp,\theta}$ - $K_{se,\theta}$) da armadura passiva com relação a temperatura.....	32
Figura 12 – Vermiculita: (a) estado lamelar, (b) expandida	33
Figura 13 –Cronograma do trabalho.....	36
Figura 14 – Modelo 2D axissimétrico.....	38
Figura 15 – Função Temperatura	39
Figura 16 – Coordenada dos pontos do modelo sem revestimento	40
Figura 17 – Concepção da superfície do modelo sem revestimento	40
Figura 18 – Linha modelo entre nós	41
Figura 19 – Dados extraídos pela linha modelo.....	42
Figura 20 – Exibição de temperatura no modelo sem revestimento aos 17 minutos de exposição	45
Figura 21 – Gráfico de posição x temperatura	45
Figura 22 – Gráfico de posição x tensão x-x.....	46

Figura 23 – Gráfico de posição x tensão y-y.....	47
Figura 24 – Gráfico de posição x tensão de cisalhamento.....	48
Figura 25 – Exibição de temperatura nos modelos com revestimento aos 17 minutos de exposição (1,00 cm, 1,75 cm e 2,50 cm)	49
Figura 26 – Gráfico de posição x temperatura com revestimento de 1,00 cm	49
Figura 27 – Gráfico de posição x temperatura com revestimento de 1,75 cm	50
Figura 28 – Gráfico de posição x temperatura com revestimento de 2,50 cm	50
Figura 29 – Comparativo de temperatura para 5 minutos de exposição dos modelos.....	51
Figura 30 – Comparativo de temperatura para 11 minutos de exposição dos modelos.....	52
Figura 31 – Comparativo de temperatura para 17 minutos de exposição dos modelos.....	52
Figura 32 – Comparativo entre espessura de revestimento e redução de temperatura	53
Figura 33 – Comparativo de tensão tangencial no minuto 5 de exposição.....	54
Figura 34 – Comparativo de tensão tangencial no minuto 11 de exposição.....	54
Figura 35 – Comparativo de tensão tangencial no minuto 17 de exposição.....	55
Figura 36 – Comparativo de tensão radial no minuto 5 de exposição	55
Figura 37 – Comparativo de tensão radial no minuto 11 de exposição	56
Figura 38 – Comparativo de tensão radial no minuto 17 de exposição	56
Figura 39 – Comparativo de tensão de cisalhamento no minuto 5 de exposição	57
Figura 40 – Comparativo de tensão de cisalhamento no minuto 11 de exposição	57
Figura 41 – Comparativo de tensão de cisalhamento no minuto 17 de exposição	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de estudo	38
Tabela 2 – Temperatura média da armadura	59

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

°C	Graus Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
cm	Centímetros
EN	<i>Euronormme (European Standard)</i>
GPa	Gigapascal
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
k	Condutividade Térmica do Material
KJ	Kilojoule
Kg	Quilograma
KsE,θ	Redução do Módulo de Elasticidade do aço
Ksp,θ	Redução do limite de elasticidade do aço
MEF	Método dos Elementos Finitos
min	Minutos
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
NBR	Norma brasileira regulamentadora
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
TMC	<i>Thermo-mechanical coupling</i>
TRF	Tempo de Resistência ao Fogo
TRRF	Tempo de Resistência Requerida ao Fogo
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
W	Watts
σ	Tensão Normal
τ	Tensão de Cisalhamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	18
2.1. OBJETIVO GERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE INCÊNDIO E SEGURANÇA	19
3.2. O INCÊNDIO	22
3.3. MODOS DE TRANFERÊNCIA DE CALOR.....	23
3.3.1 Condução	23
3.3.2. Convecção	24
3.3.3. Radiação	24
3.4 MODELOS DE INCÊNDIO	24
3.4.1. Incêndio Natural	25
3.4.2. Incêndio Padrão	26
3.5 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF)	27
3.6 TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRF).....	28
3.7. MATERIAIS SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS.....	28
3.7.1. Concreto Submetido a Elevadas Temperaturas.....	28
3.7.1.1. Manifestações do Concreto Submetido a Elevadas	28
Temperaturas	28
3.7.1.2. Tensões no Concreto Submetido a Elevadas Temperaturas	30
3.7.1.3. Efeitos da Temperatura na Armadura de Aço	31
3.7.2. Argamassa Submetida a Elevadas Temperaturas	32
3.7.2.1. Vermiculita.....	33
3.7.2.2. Argamassa com Adição de Vermiculita	34
3.9 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	34
4. METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO	36
4.1. DESCRIÇÃO E ETAPAS DA SIMULAÇÃO	36
4.2. SOFTWARE E MÉTODO	37
4.3. MODELOS	37
4.4. MODELO SEM REVESTIMENTO.....	38
4.5. MODELOS COM REVESTIMENTO.....	42
4.6. ANÁLISE TÉRMICA SOBRE A ARMADURA.....	43
5. RESULTADOS	44

5.1. MODELO SEM REVESTIMENTO.....	44
5.2. MODELOS COM REVESTIMENTO.....	48
5.3. ANÁLISE TÉRMICA SOBRE A ARMADURA	58
6. CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

A engenharia é responsável por buscar soluções baseando-se em três objetos principais: a economia, o desempenho e a segurança. O sistema estrutural está atrelado a estes três tópicos, tendo em vista que o mesmo é responsável pela sustentação da edificação. Tendo em vista tamanho efeito, as estruturas devem ser analisadas não somente pelas ações rotineiras, mas também para casos excepcionas e inesperados (SILVA, 2019).

É fundamental para uma construção, de modo especial as edificações, que o desempenho da mesma se dê de forma contínua e de uso do todo, completa, fazendo com que quem faça uso da mesma possa desfrutar de uma boa condição para morada e também possa fazer uso sem correr riscos, tendo segurança como afirmam Reina (2010) e Martins (2013).

Para garantir a qualidade, a segurança, o desempenho e a uniformidade das edificações existem alguns processos de controle, fiscalização por meio de órgãos responsáveis e a implementação de técnicas para com a mão de obra que realiza tais tarefas. Além destes procedimentos existem dezenas de normas. No âmbito nacional temos as normas regulamentadoras brasileiras (NBR) que foram desenvolvidas por meio de estudos, dando destaque para algumas delas tem-se: NBR 6118 (ABNT, 2014) “Projeto de Estruturas de Concreto”, NBR 6120 (ABNT, 2019) “Cargas para o cálculo de estruturas de edificações”, NBR 15200 (ABNT, 2012) “Projeto de Estruturas de concreto em situação de incêndio”, 15575 (ABNT, 2013) “Desempenho de Edificações Habitacionais”.

Tais normas são importantes por exigirem a previsão de situações prováveis e improváveis, desde cargas gravitacionais e ação do vento até a situações de incêndio. Esta previsão é importante pois faz-se utilizar os fatores de segurança que são tão importantes por priorizar em toda situação de caso de incêndio a vida humana e sua integridade física, sendo assim em segundo plano a proteção ao ambiente e ao patrimônio afirmam Costa (2008) e Martins (2013).

Tendo em grande parte das construções civis o concreto como um dos materiais mais utilizados, observa-se que o mesmo apresenta bom desempenho a esforços de compressão, e se for utilizado em conjunto com o aço (concreto

armado) consegue também possuir boa resistência a esforços de tração, sendo um composto de baixa condutividade térmica (LORENZON, 2014).

Em casos de incêndio as estruturas de concreto armado são consideradas seguras, tendo em vista que o concreto apresenta condições melhores do que outros materiais quando submetido a temperaturas mais elevadas, além de que o mesmo é incombustível, costuma ser formado por elementos volumosos e não expelle gases tóxicos durante o processo de aquecimento, mas é preciso salientar que em condições severas o quadro pode se tornar insustentável, se as propriedades mecânicas do material foram extremamente reduzidas devido a alterações químicas, físicas e mineralógicas que ocorram no interior da sua matriz, e a estrutura pode vir a ruir (SILVA, 2013).

Como consequências dessas circunstâncias, vem surgindo cada vez mais estudos buscando meios de tornar o concreto cada vez mais resistente ao efeito do fogo, ou ao menos tentando amenizar o efeito do calor sobre o mesmo. O uso de agregados leves tais como a vermiculita, perlite, pedra-pomes e argila expandida, materiais que possuem características porosas, vem ocorrendo para a produção de blocos de alvenaria, produtos de revestimento e concreto leves (KOKSAL; GENCEL; KAYA, 2015). Sendo feito uso destes agregados em argamassas ou concretos passa-se a desenvolver materiais de densidade reduzida, contribuindo com propriedades de isolamento térmico, acústico, resistência ao fogo, assim como na redução do peso próprio e das cargas sobre a estrutura (BARROS, 2018).

Seguindo a mesma ideia dos elementos citados anteriormente, a vermiculita é um mineral também classificado como um agregado leve, que detém propriedades específicas, tais como baixa densidade, contribuindo para redução de peso sobre a estrutura, e baixa condutividade térmica, favorecendo ao isolamento térmico e a elevada resistência ao fogo. Associado a isso, os materiais produzidos com esse tipo de mineral, também ganham propriedades de estabilidade de resistência com o tempo, e se torna incombustíveis (BARROS, 2018).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é examinar o comportamento termomecânico de corpos de prova de concreto submetidos a temperaturas elevadas. A temperatura aplicada é de 500°C e os modelos serão submetidos a 30 minutos de exposição até chegar a esta temperatura específica. Foram

desenvolvidos corpos de prova sem revestimento e com revestimento (espessura de 1,0cm, 1,75cm, 2,5cm) de argamassa com 25% de vermiculita, complementando o realizado em laboratório por Oliveira (2020) trazendo como adicional a distribuição de temperatura pelo concreto, as tensões (tangenciais, radiais e de cisalhamento) que atuam no interior do corpo de prova, e também verificar a temperatura alcançada no ponto da armadura de um elemento de concreto armado.

Diante das informações apresentadas, a importância desta pesquisa está ligada a avaliação e estudo em relação a proteção do concreto em situações de incêndio. Identificando assim recursos que possam vir a aumentar o tempo de evacuação de um edifício, como também diminuir a degradação sobre a estrutura de concreto.

2. OBJETIVOS

Este tópico apresenta os objetivos desta pesquisa. Primeiramente apresenta-se o objetivo geral que expõe de modo mais abrangente o intuito da realização do trabalho, em seguida mostrando os objetivos específicos os quais são mais detalhados e fundamentados permitindo entender melhor o que foi apresentado no objetivo geral.

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho terá como objetivo geral analisar os resultados obtidos por meio de simulações numéricas com auxílio do ADINA 900 *nodes* quanto ao desempenho termomecânico do concreto sem revestimento e revestido com argamassa de vermiculita quando é submetido a temperaturas elevadas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar a propagação da temperatura em modelos de corpos de prova de concreto não revestido e revestidos com argamassa de vermiculita (espessura de 1,00cm, 1,75cm e 2,50cm), submetidos a uma taxa de aquecimento de 27,4°C/min até a temperatura de 500°C;
- Observar a disposição das tensões internas, tangenciais, radiais e de cisalhamento, que atuam no modelo conforme o mesmo é aquecido;
- Analisar também o quanto o revestimento argamassado pode influenciar na temperatura atuante na armadura do concreto, definida como 3,0 cm a partir da face externa do concreto.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Este segmento do trabalho apresenta a fundamentação teórica, aspectos e considerações sobre os incêndios, o que eles podem causar a estrutura e o combate do mesmo por meios passivos visando evitar e/ou diminuir danos nas estruturas de concreto armado.

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE INCÊNDIO E SEGURANÇA

Não é difícil se deparar com notícias nos meios de comunicações sobre incêndios de diferentes proporções ocorridos em diferentes lugares como o meio doméstico, industrial, de comércio e diversão, em imóveis de maneira geral. Tais ocorrências tão variadas possuem diferentes agentes causadores também, como a falta de atendimento as normas de segurança, o uso incorreto, improprio ou irresponsável do usuário e até causas ocasionais (OLIVEIRA, 2020).

Durante o acontecimento de um sinistro a prioridade de cuidados e preservação é sobre a vida humana, sendo colocado como segunda prioridade a preservação da edificação e sua estrutura. Estes episódios podem provocar desde danos de proporções pequenas ou leves, como manchas em decorrência da fumaça, até a perda de vidas, a destruição parcial ou total da edificação provocada pela combustão ou perda de resistência dos elementos estruturais de concreto. Esta destruição está diretamente ligada ao grau de severidade do sinistro, acarretando em manifestações patológicas como fissuras, deformações e mudança nas propriedades dos materiais (LORENZON, 2014).

Os estudos voltados para a área de resistência de estruturas de concreto ao fogo têm seu início datado do século XIX tratando-se da esfera mundial, inicialmente realizados com concreto de resistência normal com incidência de altas temperaturas, mas com a evolução dos estudos sobre a resistência do concreto começou-se a adaptar para resistência de concretos de alta resistência e incrementando com os dados de normas técnicas de desempenho (KLEIN JUNIOR, 2011).

A respeito do interesse nacional nessa área de estudo, os documentos começaram a ser desenvolvidos a partir da NB 503 (1977) – “Exigências particulares das obras de concreto armado e protendido em relação à resistência

ao fogo”. Costa (2008) afirma que os estudos e normas técnicas brasileiras com relação a estruturas de concreto em situação de incêndio são novas se comparadas aquelas que atualmente são vigentes em outros países como Suécia, Japão, Reino Unido e Estados Unidos.

Com as ocorrências de incêndios ganhando notoriedade na mídia nacional, aumentou-se a atenção em relação à segurança contra estes eventos. Em 27 de janeiro de 2013, na cidade de Santa Maria, aconteceu uma tragédia que chamou a atenção de todo o país, um incêndio ocorrido em uma casa de show, conhecida por Boate Kiss, deixou 242 vítimas letais, por sufocamento devido a fumaça tóxica, além da insensatez e falta de condições dos equipamentos para combater o sinistro (AGÊNCIA BRASIL, 2021). Devido ao alto número de vítimas, tal fato gerou na população maior preocupação e exigência de condições de segurança de combate a incêndio (COSTA *et al.*, 2016). Na Figura 1 está sendo mostrado a noite do incêndio com a corporação de bombeiros no referido local.

Figura 1 – Noite do incêndio na Boate Kiss

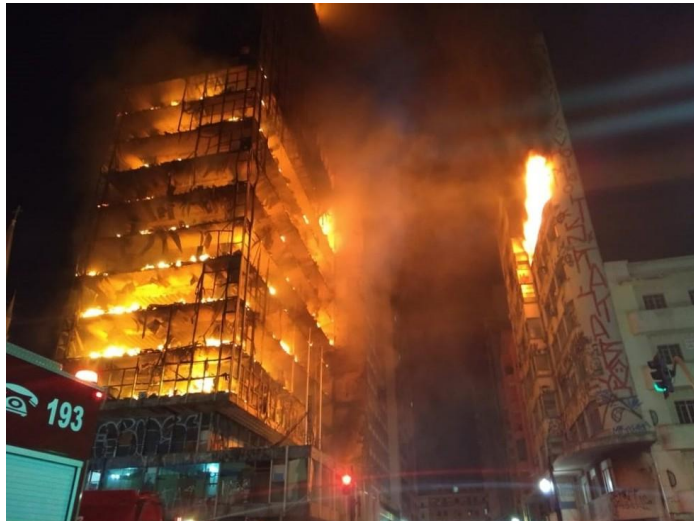


Fonte: Renova Mídia¹ (2019)

Outra grande tragédia de cunho nacional ocorrida foi em 1 de maio de 2018 onde o edifício Wilson Paes de Almeida, popularmente conhecido como prédio de vidro, veio a ruína. As causas de início do incêndio tiveram como principal hipótese um curto circuito gerado por sobrecarga em uma tomada. Além deste problema o prédio era ocupado irregularmente por já ser uma edificação tombada desde 1992, e foi afirmado pela equipe de reportagem que o prédio não continha sequer extintores de incêndio para evitar

o incidente. Nesta situação além do dano da edificação, também foram registradas sete mortes e 2 desaparecimentos (G1, 2019). A Figura 2 mostra o prédio de vidro em chamas.

Figura 2 – Noite do incêndio no edifício Wilson Paes de Almeida



Fonte: G1 (2019)

Alguns meses antes ao incidente na cidade de Santa Maria, em 16 de setembro de 2011 houve a ocorrência de um sinistro na cidade de Natal/RN, mais especificamente no edifício Alto do Tirol no 11º pavimento, como mostrado na Figura 3. Nesta situação não houve perdas de vidas humanas apenas danos materiais. Houve maior dificuldade para se acabar com o incêndio devido os registros de passagem de água estarem fechados e a reserva hídrica para tais solicitações ter sido insuficiente (TRIBUNA DO NORTE, 2011). O laudo estrutural afirmava que o prédio não havia sofrido danos estruturais significativos, sendo necessário uma recuperação estrutural apenas na laje de forro dos ambientes mais atingidos, que foram a sala e a suíte do apartamento que se iniciou o sinistro (CONISA, 2011).

Figura 3 – Incêndio no edifício Alto do Tirol, Natal/RN



Fonte: Tribuna do Norte (2011)

Logo, observando tais casos e os danos que podem causar nota-se a importância da prevenção e da segurança contra incêndios, em todos os projetos e suas etapas, considerando que os materiais estruturais, em particular, perdem sua resistência e podendo colapsar juntamente a edificação por completo (COSTA; STUCCHI; SILVA, 2005).

3.2. O INCÊNDIO

Para compreensão do termo incêndio é preciso prioritariamente entender a definição de fogo que segundo a NBR 13860 (ABNT, 1997) é o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz por meio de uma reação química exotérmica de oxidação. O Corpo de Bombeiros de São Paulo ainda acrescenta em sua Instrução Técnica N°03/2011 – Segurança Estrutural nas edificações – Terminologia de segurança contra incêndio, que para o início do processo do fogo é preciso que quatro elementos se façam presentes, sendo eles: o combustível, o comburente, o calor e a reação em cadeia. O combustível é toda substância capaz de queimar e alimentar a combustão, podendo ser líquido, sólido ou gasoso. O comburente, normalmente o oxigênio, é o elemento que reage com o combustível. O calor é a forma de energia que eleva a temperatura, gerada da transformação de outra energia, através de processo físico ou químico. E a reação em cadeia é o que permite que esse processo seja autossuficiente.

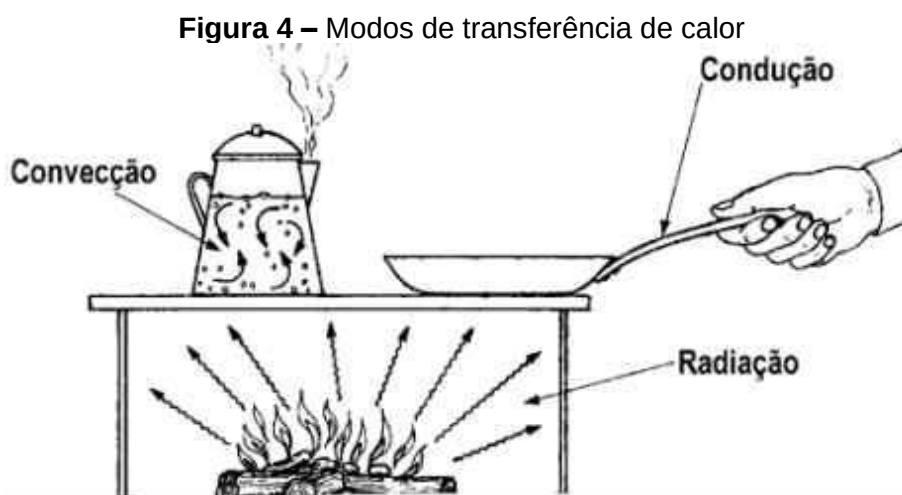
Portanto, após a compreensão de fogo é possível compreender melhor no que se refere a NBR 13860 (ABNT, 1997) ao afirmar que incêndio é o fogo fora de controle, quando o mesmo atinge grandes proporções e se tornar uma ameaça

aos seres vivos, meio ambiente e edificações por efeito de suas chamas, calor e/ou fumaça (FLORES; ORNELAS; DIAS, 2016).

Além de entender como funciona o processo de geração do fogo até o incêndio, é preciso entender como o calor é transferido e afeta os demais materiais (SILVA, 2019).

3.3. MODOS DE TRANFERÊNCIA DE CALOR

Após o entendimento de onde se parte o princípio de um incêndio precisa ser explicado os modos que o calor pode transferir-se. Na existência de dois sistemas ou materiais com temperaturas diferentes entre eles, o que possuir maior temperatura tenderá a ceder calor ao de menor temperatura até que ambos alcancem temperatura igual. Os modos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). A Figura 4 exemplifica estes modos.



Fonte: Física UFPR

3.3.1 Condução

A condução é a transferência de calor por meio da interação entre as partículas de temperaturas divergentes. Ocorre em sólidos, líquidos ou gases. Em líquido e gases, a condução ocorre devido às colisões e difusões de suas moléculas em movimentos aleatórios, e nos sólidos acontecem por meio da combinação das vibrações das moléculas em rede, o calor sendo transportado por

elétrons livres, por isso que normalmente bons condutores elétricos são também bons condutores térmicos (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

3.3.2. Convecção

A convecção é o modo de transferência de calor que ocorre entre uma superfície sólida e um líquido ou um gás, que está em movimento, portanto assim são combinados os efeitos de condução e de movimento de fluido. Se não houver movimento do fluido, a transferência se dará unicamente por condução. A transferência de calor será maior, quanto mais rápido for o movimento do fluido (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

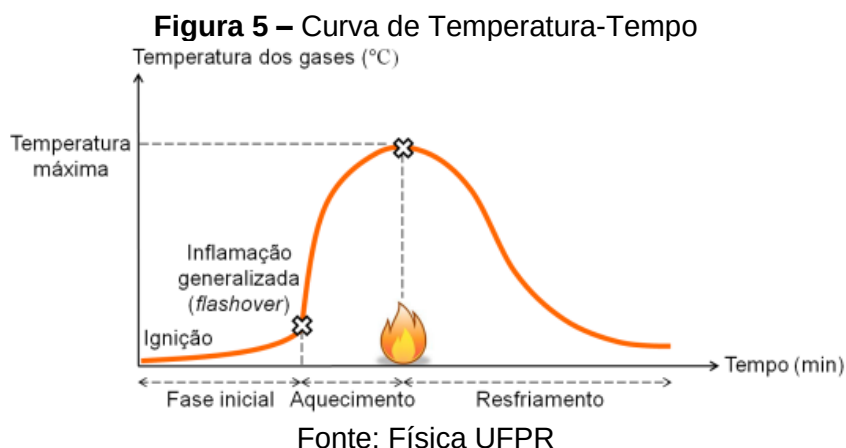
3.3.3. Radiação

A radiação é a energia emitida pela matéria sob a configuração de ondas eletromagnéticas ou fótons como consequência das mudanças nas formas eletrônicas de átomos ou moléculas. Diferente dos dois modos apresentados anteriormente, a radiação não necessita da existência de um meio mediador, além de que este é o modo mais rápido de transferência de calor e não passa por dificuldade na propagação no vácuo (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

3.4 MODELOS DE INCÊNDIO

Ao conhecer como acontece os processos de transferências de calor inicia-se o entendimento sobre modelos matemáticos de incêndio, os quais buscam descrever a variação da temperatura na ocorrência do sinistro em função do tempo. Eles foram criados com a ideia de simplificar o entendimento da ação térmica nas estruturas e são conhecidos como curvas padrão de incêndio (KLEIN JUNIOR, 2011; COSTA; SILVA, 2003; BRITEZ; COSTA; 2011).

O incêndio possui diferentes fases e cenários no seu acontecimento, através da curva mostrada na Figura 5 que apresenta a temperatura dos gases em função do tempo, pode-se conhecer a temperatura máxima do sinistro e avaliar o seu comportamento mediante o modelo de um incêndio real (ALBUQUERQUE, 2012).



A fase inicial de um incêndio trata-se da ignição, que é a queima de algum combustível gerando uma energia térmica que passará calor a outros materiais inflamáveis. Caso o fogo seja controlado nesse período, será a melhor opção pois ainda não terá causado danos intensos, todavia se o mesmo der continuidade as temperaturas irão aumentar até que as chamas predominem, o que é conhecido pela fase de *flashover* (inflamação generalizada), e partir dessa fase ocorrem prejuízos significativos a estrutura. Em sequência, vem a fase de aquecimento, onde as temperaturas acentuam-se rapidamente e assim continuam se houver combustível para queima, e após todo combustível ser consumido, se inicia a fase de resfriamento onde a temperatura cai de forma gradativa (ALBUQUERQUE, 2012).

É relevante destacar que cada incêndio possui um cenário próprio que pode variar mediante alguns parâmetros: a quantidade de combustível disponível, a geometria e ventilação do ambiente em que está ocorrendo, as propriedades dos materiais localizados no recinto (COSTA, 2008).

3.4.1. Incêndio Natural

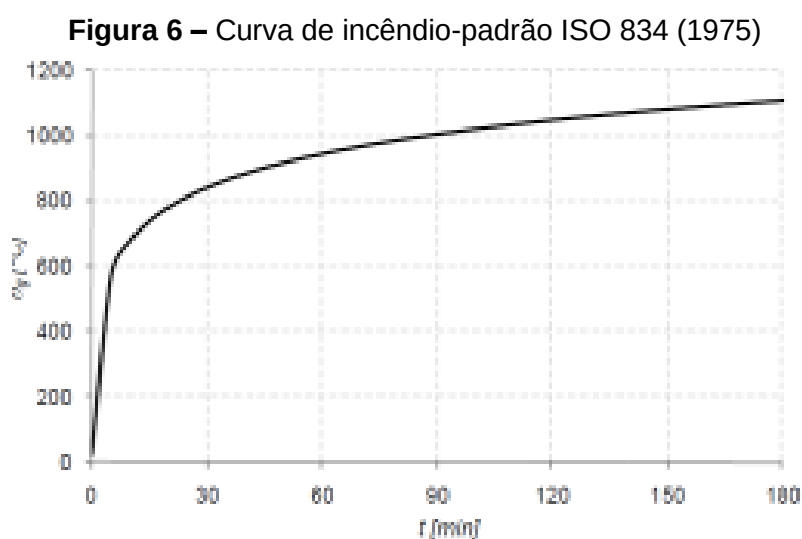
Segundo Albuquerque (2012) o incêndio natural é descrito pela curva mostrada na Figura 5, dado que apresenta o real contexto de um incêndio. No entanto, como citado anterior cada incêndio possui suas condições particulares de propagação o que acarreta na diferenciação de temperatura, tempo e grau de deterioração. A autora ainda diz que a complexidade que este modelo gera quando adotado como objeto de estudo num projeto contra incêndio o torna não usual.

3.4.2. Incêndio Padrão

Conforme foi visto o incêndio natural pode variar bastante e possui um modelo complexo, para facilitar os estudos foi criado um modelo mais simplificado e viável para uso de projetos. Este modelo é conhecido por curva de incêndio padrão temperatura-tempo, o mesmo apresenta apenas um comportamento crescente da temperatura com o tempo se diferenciando da apresentada anteriormente (ALBUQUERQUE, 2012; SOUSA; SILVA; 2015).

Existem alguns modelos de curva-padrão. As que possuem maior citação em bibliografia são a ASTM E 119 (1918), ISO 834 (1975) e a *Hydrocarbon curve* (Eurocode 1 – EN 1991-1-2:2002). Dentre estas destaca-se a ISO 834 (1975), a qual representa um incêndio em edifícios que o combustível seja exclusivamente de materiais celulósicos como madeira, papel, tecidos, entre outros (KLEIN JUNIOR, 2011). Além de que esta última citada também é recomendada pelas normas brasileiras NBR 5628 (ABNT, 2001) e NBR 14432 (ABNT, 2001) para determinar a resistência ao fogo de um elemento construtivo (SOUSA; SILVA, 2015).

Como já citado, estes modelos de curva-padrão apresentam uma evolução logarítmica crescente da temperatura do incêndio e não apresentam uma fase descendente, de resfriamento, como mostra a Figura 6 (COSTA; SILVA, 2003).



Fonte: ISO (1990).

Esta simplifica os estudos, mas também traz questionamento de alguns estudiosos como Moreno Júnior e Molina (2012) que questionam a ausência do

ramo descendente de temperatura, que caracteriza a fase de resfriamento durante o incêndio, fase esta em que alguns elementos conseguem recuperar parte da rigidez e resistência perdidas na fase de aquecimento; Costa (2008) em relação a ausência do valor de temperatura crítica, o que leva a atribuição de um tempo para que essa temperatura seja atingida: Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), encontrado em normas ou códigos.

A Figura 7, retirada da NBR 14432 (ABNT, 2001), apresenta alguns TRRF mínimos dependendo do tipo de uso da edificação, profundidade do solo e altura da edificação.

Figura 7 – Tempos requeridos de resistência ao fogo em minutos

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S ₂ h _s > 10 m	Classe S ₁ h _s ≤ 10 m	Classe P ₁ h ≤ 6 m	Classe P ₂ 6 m < h ≤ 12 m	Classe P ₃ 12 m < h ≤ 23 m	Classe P ₄ 23 m < h ≤ 30 m	Classe P ₅ h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: NBR 14432 ABNT (2001)

3.5 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF)

Conforme a NBR 14432 (ABNT, 2001) o TRRF é o “tempo mínimo de resistência ao fogo, preconizado por esta norma, de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio padrão, a norma também apresenta outras informações e tabelas importantes sobre o assunto.

Como dito, a norma estabelece tais valores utilizando como parâmetro a curva de incêndio padrão, está que já foi citada suas desvantagens e divergências com um incêndio real. Ainda é ressaltado que o valor deste tempo em minutos não pode ser confundido com o tempo para evacuação dos usuários, o tempo que o

incêndio irá durar ou o tempo para prestação de socorro pelo Corpo de Bombeiros (COSTA; SILVA, 2003).

3.6 TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRF)

Este por sua vez, é definido por Costa (2008) como sendo o tempo máximo que um elemento construtivo pode continuar exercendo sua função. Klein Junior (2011) ainda afirma que para que a segurança contra incêndio seja satisfatória é necessário que o TRF seja maior ou igual ao TRRF.

3.7. MATERIAIS SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS

Quando um material é exposto a uma temperatura elevada, como durante a ocorrência de um sinistro, o mesmo tende a sofrer alterações em suas propriedades e cada um se manifesta de um modo diferente, conforme a NBR 15200 (ABNT, 2000). O próximo Capítulo irá listar e explicar os principais efeitos causados no concreto, na argamassa e no aço.

3.7.1. Concreto Submetido a Elevadas Temperaturas

Como citado anteriormente, o concreto apresenta propriedades térmicas boas, já que o mesmo possui baixa condutividade térmica, é incombustível e não emite toxina por meio de gás quando aquecido, mas apesar disso ele sofre sim alterações de propriedades quando é submetido a temperaturas elevadas (SILVA, 2013).

3.7.1.1. Manifestações do Concreto Submetido a Elevadas Temperaturas

Sobre manifestações físicas devidas ao aquecimento as que possuem maior destaque de ocorrência são as mudanças de coloração e ocorrência de lascamentos, que são mais conhecidos por efeito “*spalling*” (SILVA, 2019).

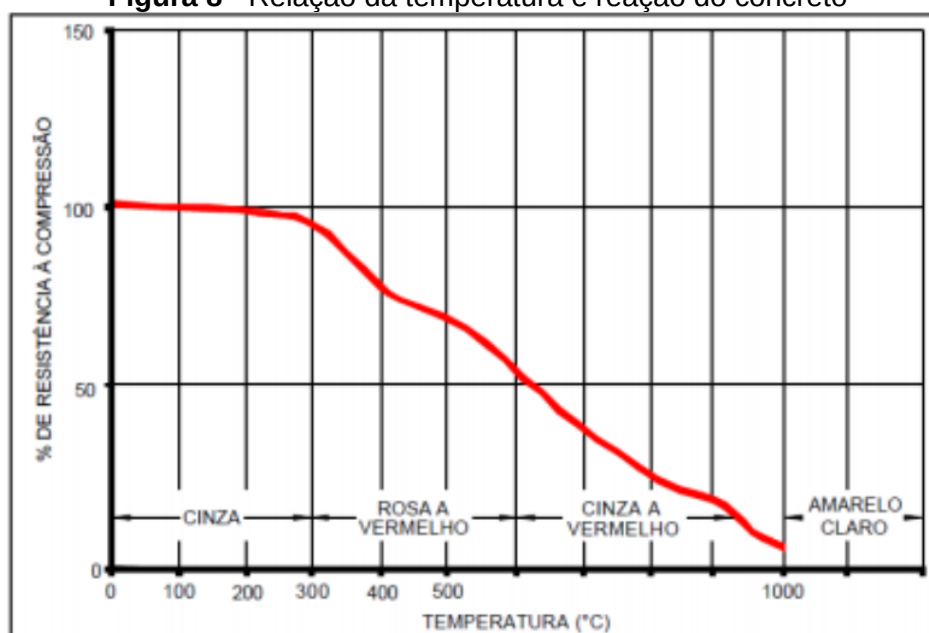
A mudança de coloração no concreto, ocorre devido as altas temperaturas que o material é exposto durante o incêndio, mas é importante destacar que a intensidade para aparecimento de uma coloração pode ocorrer devido a presença

de componentes ferrosos, que são encontrados em alguns agregados como os do tipo calcários e silicosos (CANOVÁZ, 1988).

Esta mudança de coloração pode ser um fator útil para primeira análise da estrutura após ter ocorrido o incêndio. Pode-se estimar a temperatura máxima que o incêndio chegou, o grau de intensidade e a perda de resistência (SILVA, 2019). Vale salientar que tais fatores são apenas estimativas, e é necessário sempre a realização de uma vistoria para dar como resultado valores precisos e corretos (SILVA, 2013).

Conforme Silva (2013) e Lorenzon (2014) quando o concreto é submetido a até 200°C sua coloração é acinzentada e ele não passa por perda de resistência mecânica a compressão significativa mas há uma perda de 10% dessa temperatura até 300°C. Entre 300°C e 600°C sua cor varia em tons avermelhados e sua resistência é diminuída em torno de 50%. Quando a temperatura está entre 600°C e 950°C volta a aparecer o tom acinzentado, mas dessa vez com pontos avermelhados, e sua resistência torna-se muito baixa. A partir deste último valor de temperatura, o concreto vai passando a ter tons de amarelo e sua resistência é praticamente nula (CANOVÁZ, 1988; SILVA, 2013; LORENZON, 2014). A Figura 8 de Canováz (1988) mostra em um gráfico a perda de resistência e a coloração do concreto submetido a diferentes temperaturas.

Figura 8 - Relação da temperatura e reação do concreto



Fonte: Cánovaz (1988).

E o efeito *spalling* é definido como a ocorrência de quebra de camadas de concreto devido aos gradientes de temperatura que ocorrem na peça que são as diferenças das temperaturas externa e interna do elemento. Caso o aquecimento seja lento tal gradiente não é criado, por isso este fenômeno ocorre em incêndios. Este desprendimento pode ser acompanhado por explosões violentas ou acontecer em fases posteriores ao fogo. As consequências serão pequenas caso a extensão também seja, mas se for por longas extensões pode comprometer significativamente a estabilidade e integridade da estrutura (MORALES; CAMPOS; FAGANELLO, 2011; KODUR, 2014). A Figura 8 mostra uma situação que ocorreu o efeito *spalling*.

Figura 9 – Laje após incêndio



Fonte: Lima (2005)

3.7.1.2. Tensões no Concreto Submetido a Elevadas Temperaturas

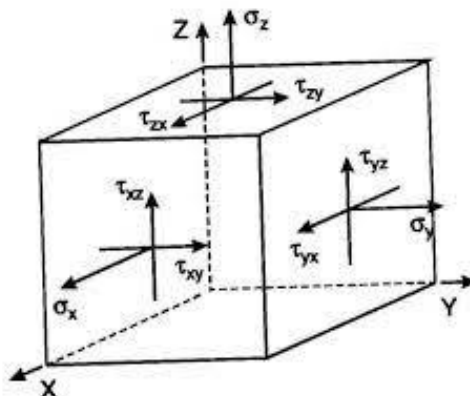
Conforme Souza (2017) tem-se que tensões mecânicas são unidades responsáveis por determinar o nível de intensidade média de forças internas em um elemento sólido ou líquido. Sendo um elemento sólido, o estado de tensões que é formado por componentes normais (σ) e de cisalhamento (τ) associando força e área nos elementos da superfície, apresentando então a dimensão física deste parâmetro:

$$\frac{\text{Força}}{\text{Área}} = \frac{N}{m^2} = Pa \quad (1)$$

A Figura 10 apresenta as 9 componentes de tensão que existem em cada elemento e a matriz representada de forma matemática

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Figura 10 – Cubo de tensões



Fonte: Fadiga dos Materiais Metálicos – Anotações de Aula (2016)

Como citado anteriormente durante um incêndio ocorre a formação de gradientes de temperatura, e devido a estes gradientes surgem as tensões térmicas, e estas agem de duas formas: na superfície são tensões de dilatação térmica, por causa das limitações, no entanto no interior do elemento são tensões de tração. Salvo ainda que também ocorrem tensões ocasionadas pela pressão do vapor nos poros do elemento, acarretando na manifestação patológica citada do efeito *spalling* (ZABEU,2011).

3.7.1.3. Efeitos da Temperatura na Armadura de Aço

O aço possui propriedades que fazem o mesmo ter maior dilatação do que o concreto, e quando ambos estão associados, como na situação do concreto armado pode causar problemas de aderência entre eles. Tal problema começa a ter ocorrência aos 100°C e altera conforme a temperatura e tempo de exposição a que é submetido, tendo como limite 600°C (COSTA, 2008).

Como é notório a temperatura além de danificar o concreto, causa problemas de perda de resistência ao aço. A Eurocode 2 (EN 1992:1-2, 2004) apresenta a Figura 11 na qual é possível notar a temperatura em que começa a ocorrer a perda

de resistência e até onde a mesma ainda existe dependendo do tipo de tratamento que o material recebeu na sua produção, além da estimativa do limite e módulo de elasticidade.

Figura 11: Coeficientes de redução da resistência ($K_{s,\theta}$), limite e módulo de elasticidade ($K_{sp,\theta}$ - $K_{se,\theta}$) da armadura passiva com relação a temperatura.

Temperatura do aço (°C)	$K_{s,\theta}$			$K_{sp,\theta}$		$K_{se,\theta}$	
	Tração		Compressão	Laminado a quente	Trabalhado a frio	Laminado a quente	Trabalhado a frio
	Laminado a quente	Trabalhado a frio	Laminado a quente ou trabalhado a frio				
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89	0,81	0,90	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,78	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,67	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,56	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,33	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,10	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,08	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,06	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,04	0,02	0,04	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Costa (2008) *apud* EN 1992:1-2:2004 adaptado.

3.7.2. Argamassa Submetida a Elevadas Temperaturas

A argamassa funciona como revestimento de proteção a elementos de vedação evitando a ação direta de agentes agressivos. A mesma também possibilita um melhor conforto térmico e acústico, melhor regularização de superfície, e pode ser a última camada de revestimento ou a camada para uma base posterior (ROMANO, 2013).

Com a intenção de melhorar a resposta de argamassas de revestimento a temperaturas elevadas como em situações de incêndio vem surgindo cada vez mais pesquisas com adição de materiais, como a vermiculita, que possuem melhores propriedades térmicas (baixa densidade, baixa condutividade e resistência adequada). Esse sistema de proteção contra incêndio é conhecido por proteção passiva contra incêndio (*passive fire protection* - PFP) que busca manter

a temperatura do ambiente abaixo da crítica e dominar o fogo no local de origem por mais tempo (LIMA; MRÓZ; HAGER; KORNIEJENKO, 2016).

3.7.2.1. Vermiculita

A definição de vermiculita é dada como sendo um agregado mineral e incombustível, apresentando estrutura lamelar triforme. Se este agregado sofrer variações de temperatura consideráveis exibe uma expansão ortogonal a qual se assemelha a uma sanfona aberta, conforme NBR 11355 (ABNT, 2015). E este processo de expansão acontece quando o mineral é exposto a uma temperatura de 800°C a 1100°C e o seu volume pode aumentar de 10 até 30 vezes (FRANÇA; LUZ, 2002; SZNELWAR; SCALABRIN, 2009). A Figura 11 mostra os estados da vermiculita.

Figura 12 – Vermiculita: (a) estado lamelar, (b) expandida



Fonte: Barros (2018).

Uma característica importante da vermiculita após está expandida é que a mesma é considerada um agregado leve, pois passa por uma redução em sua massa específica aparente de 640-960 kg/m³ para 56-192 kg/m³ (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2008).

Após este processo de expansão que o mineral passa, o mesmo adquire propriedades que trazem interesse ao uso na construção civil, que são a baixa densidade, baixa condutividade acústica, térmica e elétrica, e também não sendo inodoro, não se decompondo ou se deteriorando, não tóxico e conseguindo

absolver aproximadamente até cinco vezes do próprio peso em água (PAULA, 2014).

Devido a estes fatores a mesma é utilizada na produção de revestimento com argamassa, blocos de tijolos refratários, blocos e placas que necessitam ser resistentes a altas temperaturas, proteção de estruturas de aço a temperaturas elevadas, base de impermeabilização, porta corta fogo, entre outras funções similares (UGARTE; SAMPAIO; FRANÇA, 2008).

3.7.2.2. Argamassa com Adição de Vermiculita

Segundo Koksai, Gencel e Kaya (2015) as propriedades citadas anteriormente fazem com que a argamassa produzida com vermiculita tenha uma redução na condução térmica em relação a argamassas tradicionais, e se mantém esta redução quanto maior for a relação vermiculita/cimento menor será a condutividade. Quando a relação é aumentada de 4 para 6, é provocada uma redução de 27,6% na condutividade térmica, e para 8 a redução é de 58,1%.

Barros (2018) realizou uma pesquisa analisando quanto a quesitos térmicos e mecânicos o uso da adição da vermiculita expandida em substituição ao agregado na argamassa de revestimento, examinando parâmetros tendo como principal a condutividade térmica. Nos resultados a mesma constatou que as reduções na condutividade térmica são de 19,4%, 53,7%, 74,6% e 82% para as substituições de 25%, 30%, 75% e 100%, na devida ordem. A mesma ainda firma que a melhor porcentagem de substituição seguindo critérios térmicos e mecânicos foi a de 25%.

3.9 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Partindo do objetivo de examinar o comportamento termomecânico de um elemento de concreto, observou-se que um método bastante eficiente seria o uso de simulações numéricas com auxílio de um software, o que permitiria analisar dados térmicos e mecânicos do elemento.

Conforme Araújo (2019) o método dos elementos finitos (MEF) é muito satisfatório em sua análise, tendo que o mesmo simplifica a investigação do problema por meio de subdivisões da região estudada em componentes menores

chamados de elementos finitos, mas que não se desconectam e mantem contato por meio de nós, o que origina uma malha. Quanto mais elementos subdivididos for possível criar, maior será a análise e ao mesmo tempo também será mais específica e precisa.

Ainda segundo Araújo (2019) tal método é fragmentado em três partes:

- Pré-processamento: Etapa em que é construído o modelo e condicionado conforme sua situação, definindo sua geometria, propriedades, carregamentos;
- Processamento: Onde o software soluciona as equações matemáticas acerca da problematização em cada nó do elemento construído;
- Pós-Processamento: Etapa em que é recebido os resultados e então parte-se para sua análise.

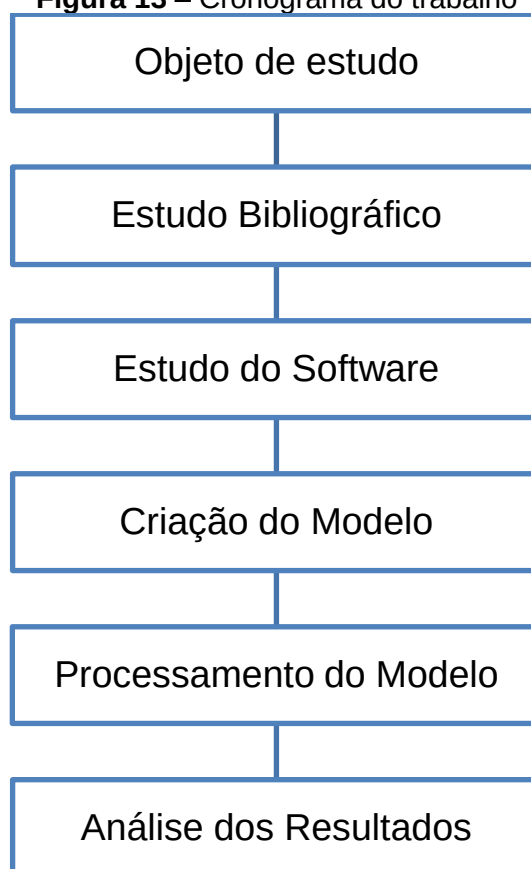
4. METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO

Este capítulo descreve como foram realizadas as simulações numéricas nos modelos criados para que os objetivos levantados no capítulo 2 fossem realizados.

4.1. DESCRIÇÃO E ETAPAS DA SIMULAÇÃO

Para realização deste trabalho, no primeiro momento definiu-se o objeto de estudo, a partir de então começaram os estudos bibliográficos com auxílio de trabalhos científicos realizados anteriormente com temas semelhantes, por meio destes facilitou o processo de escolha do software e realização dos modelos que serão apresentados em tópicos a frente. A Figura 13 a seguir mostra a sequência das atividades realizadas.

Figura 13 – Cronograma do trabalho



Fonte: Autor (2021)

4.2. SOFTWARE E MÉTODO

De modo a facilitar a modelagem do elemento que seria estudado e também submeter o mesmo a determinadas condições específicas, a solução mais prática e viável seria a modelagem computacional por meio de um software que realizasse os cálculos pelo método dos elementos finitos trazendo maior fidedignidade aos resultados que posteriormente seriam obtidos. O software escolhido foi o ADINA versão 9.6 900 *nodes*, tendo em vista que o mesmo obteve resultados muito satisfatórios em pesquisas anteriores e semelhantes. O software simula numericamente as situações criadas nele e assim retorna resultado para análise termodinâmica do modelo.

4.3. MODELOS

Os modelos foram criados no software pelo módulo ADINA *structures* sendo feita a análise dos resultados por meio de uso do recurso *TMC One-Way Coupling*. Para cumprimento dos objetivos propostos foram criados quatro modelos variando sua camada de revestimento sendo todos expostos a temperatura máxima de 500°C.

A argamassa citada anteriormente e reproduzida na modelagem é uma argamassa composta por 25% por vermiculita. Como citado previamente essa escolha foi feita devido a pesquisa realizada por Barros (2018), onde a mistura com essa porcentagem apresentou o melhor comportamento termomecânico. No comparativo entre modelos revestidos ou não, será possível observar a influência do revestimento no modelo aquecido. A Tabela 1 mostra os modelos construídos, a temperatura a qual foram expostos e a espessura do revestimento com vermiculita.

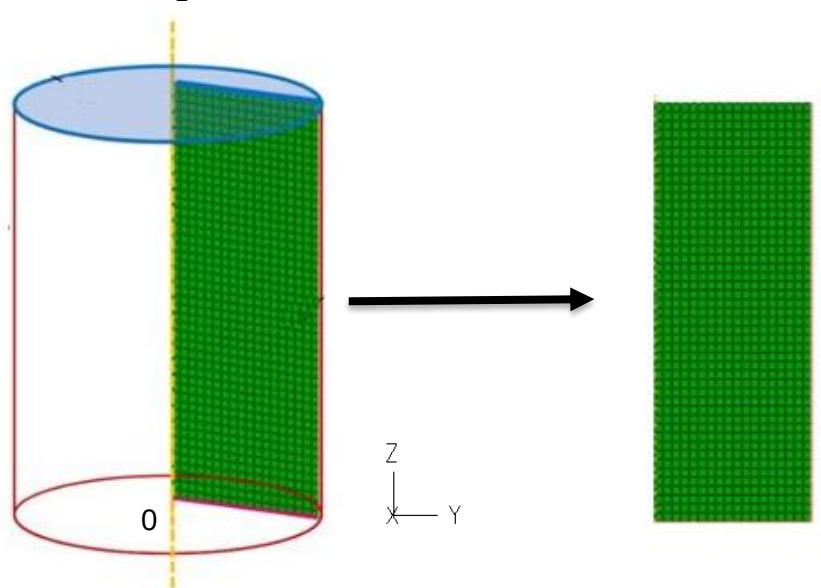
Tabela 1 - Modelos de estudo

Modelos	Temperatura máxima (°C)	Revestimento (cm)
M1	500	0,00 (Sem Revestimento)
M2	500	1,00
M3	500	1,75
M4	500	2,50

Fonte: Autor (2021)

4.4. MODELO SEM REVESTIMENTO

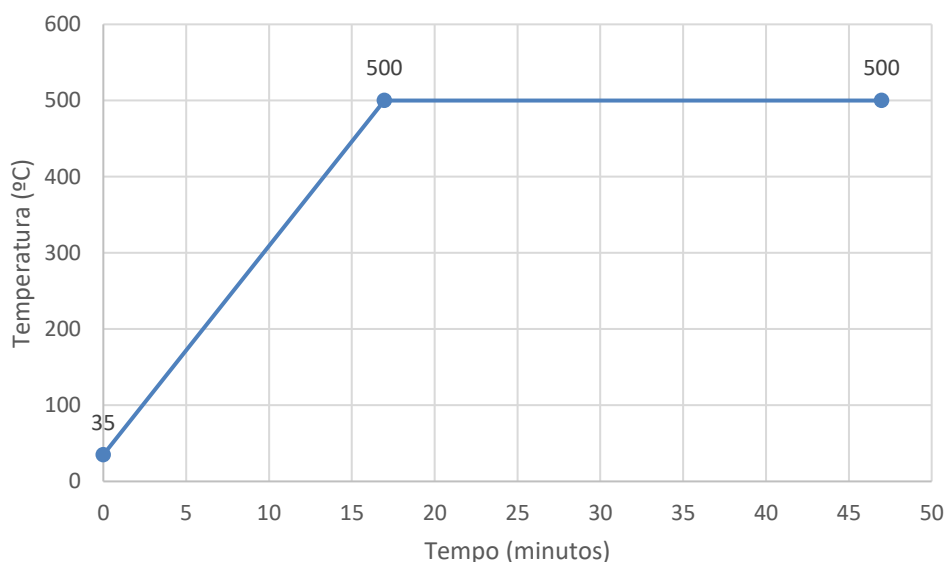
Os modelos criados eram baseados em um corpo de prova cilíndrico possuindo 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e tendo como parâmetro inicial de temperatura o mesmo citado por Oliveira (2020), 35°C. A princípio foi construído o modelo mais básico M1, o sem revestimento, e este foi usado como base para criação dos outros, com revestimento. O software permite a criação de um modelo 2D axissimétrico semelhante a Figura 14, garantindo assim que as propriedades de geometria, condições de contorno e carregamento aplicado sejam iguais para todo elemento do corpo de prova.

Figura 14 - Modelo 2D axissimétrico

Fonte: Adaptado Darvizeh (2018)

Na criação do modelo, primeiramente foram adicionadas as funções de temperatura (*time fuction*) e as propriedades do material (*manage materials*). A função de temperatura obedeceu uma taxa específica de crescimento, a qual foi estimada pela curva de incêndio padrão ISO 834 como a taxa média de crescimento de temperatura de um incêndio, $27,4^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Ao atingir a temperatura de 500°C aproximadamente aos 17 minutos tendo iniciado a 35°C , temperatura ambiente, o corpo é mantido aquecido por mais 30 minutos na temperatura de 500°C . A Figura 15 apresenta em formato gráfico a plotagem da função de temperatura e a Figura 16 mostra a criação da função no ADINA.

Figura 15 - Função Temperatura



Fonte: Autor (2021)

No modelo sem revestimento o único material que precisou ser cadastrado no software foi o concreto, este material teve as seguintes propriedades utilizadas para modelagem.

- Módulo de Elasticidade (Young): 25 GPa;
- Coeficiente de Poisson: 0,3;
- Densidade: 2500 kg/m^3 ;
- Coeficiente de dilatação térmica: $10 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;
- Condutividade térmica: $1,3 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$;
- Capacidade térmica: $0,75 \text{ KJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$.

Com estes parâmetros definidos, iniciou-se a modelagem geométrica do corpo de prova. Como já citado por ser um elemento axissimétrico criou-se apenas um radiano do mesmo, seguindo as dimensões reais, 5cm de largura por 20 cm de altura, como mostra a Figura 16 das coordenadas dos pontos.

Figura 16 - Coordenada dos pontos do modelo sem revestimento

Define Geometry Points

Save Discard OK Cancel

Method: Define By Coordinates << click Discard to re-activate

Default Coordinate System: 0

Auto... Import... Export... Clear Del Row Ins Row Help

	Point #	X1	X2	X3	System
1	1	0	0	0	0
2	2	0	0.05	0	0
3	3	0	0.05	0.2	0
4	4	0	0	0.2	0
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Fonte: Adaptado de Adina R & D, INC (2021).

A partir dos pontos realizou-se diretamente a criação da superfície integrada pelos 4 pontos como apresenta a Figura 17. Criando diretamente a superfície por meio dos pontos, a criação das linhas acontece de forma automática.

Figura 17 - Concepção da superfície do modelo sem revestimento

Define Surface

Add... Delete Copy... Save Discard OK Cancel Help

☐ Delete Lines/Points when Surface is Deleted

Surface Number: 1 P Type: Vertex

Vertices

Point 1: 1 P

Point 2: 2

Point 3: 3

Point 4: 4

Note: Specify Point 4 = Point 1 for Triangular Surface.

Fonte: Adaptado de Adina R & D, INC (2021).

Com a parte de funções, propriedades dos materiais e geométrica concluída se inicia então a parte de configuração de como o estudo dos elementos será realizado. Para realizar a divisão de elementos no corpo de prova é necessário a criação de uma malha. Esta malha divide o corpo de prova em partes de mesmo tamanho em que serão estudados e apresentaram dados individuais, sendo dados de temperatura e também de suas devidas tensões. Estes elementos eram de dimensão de 5 mm em cada lado, sendo, portanto, quadrados.

Após a conclusão de todas as configurações o modelo pôde ser processado pelo software para obtenção dos resultados já citados para cada elemento, disponibilizando posteriormente análise gráficas para o entendimento do usuário. estas análises de modo colorido facilitam a percepção do usuário sobre a temperatura de incidência e a dimensão das tensões existentes.

Para evitar dados em excesso e simplificar a análise foi feito uso de uma linha de modelo no centro do corpo de prova, a altura de 10 cm, está linha percorria do centro interior ao centro exterior do modelo, trazendo os dados para cada um dos 11 nós entre os elementos existentes a cada minuto dos 47 que o protótipo passa exposto a função de temperatura. A Figura 18 apresenta a configuração desta linha modelo citada.

Figura 18 - Linha modelo entre nós

Define Model Line (Sequence of Nodal Points) X

Add... Delete Copy... Save Discard OK

Model Line Name: MODELINE Cancel

Node Points

Auto... Import... Export... Clear Del Row Ins Row

	Node (p)	Substructure	Reuse	Weight
2	233	0	1	1
3	234	0	1	1
4	235	0	1	1
5	236	0	1	1
6	237	0	1	1
7	238	0	1	1
8	239	0	1	1
9	240	0	1	1
10	241	0	1	1
11	242	0	1	1

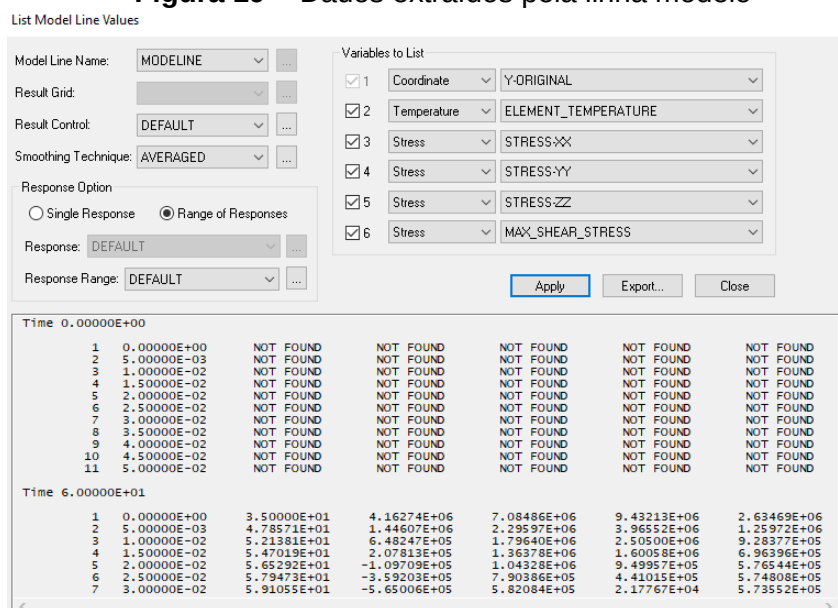
Defaults

Substructure: 0 Reuse: 1 Weight: 1

Fonte: Adaptado de Adina R & D, INC (2021).

Com esta linha criada e sendo possível extrair os dados especificamente desta região, foi possível criar uma matriz 11 x 6 a qual possuía 11 linhas indicando cada um dos nós e 6 colunas que indicavam um certo dado do elemento sendo eles: a posição do elemento (da esquerda para direita), a temperatura, as tensões atuantes nos 3 eixos (x-x, y-y, e z-z), e a tensão de cisalhamento, respectivamente, como é mostrado na Figura 19. O ADINA fornece a opção de exportar os dados em formato de texto, e assim foi feito sendo repassado ao Microsoft Excel para criação de gráficos que facilitariam a análise e percepção.

Figura 19 - Dados extraídos pela linha modelo



Fonte: Adaptado de Adina R & D, INC (2021)

4.5. MODELOS COM REVESTIMENTO

Para os modelos com revestimento foi utilizado como base o modelo sem revestimento com intenção de facilitar o processo de modelagem. As alterações realizadas foram a criação de mais uma superfície envolvendo as linhas externas do primeiro exemplar criado. Essa nova superfície foi criada como a primeira tendo ela uma espessura de três variações como no trabalho de Oliveira (2020) sendo: 1,00 cm, 1,75 cm e 2,50 cm, espessuras estas usuais nas construções civis locais. A nova superfície criada também deu origem a uma nova malha independente a anterior apesar de possuírem as mesmas dimensões, 5 mm.

Em relação ao carregamento térmico, o mesmo foi realizado como no primeiro exemplo, apenas nas linhas externas do corpo de prova argamassado. E as propriedades dos materiais não sofreram alteração em relação ao concreto, mas houve a adição das propriedades da argamassa de vermiculita, dados estes retirados do trabalho de Barros (2018) e aplicadas estas propriedades na segunda superfície criada.

- Módulo de Elasticidade (Young): 9,24 GPa;
- Coeficiente de Poisson: 0,2;
- Densidade: 1757 kg/m³;
- Coeficiente de dilatação térmica: $1,4 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$;
- Condutividade térmica: 1,1 W/m·°C;
- Capacidade térmica: 1,24 KJ/kg·°C.

4.6. ANÁLISE TÉRMICA SOBRE A ARMADURA

Como foi feito para extrair os dados dos elementos localizados no centro do corpo de prova, também se utilizou para extrair os dados de onde estaria possivelmente posicionado uma armadura de aço no concreto. Nessa segunda retirada de dados se posicionou a linha modelo na vertical a uma distância de 3 cm da linha externa do concreto como prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para um elemento do tipo pilar ou viga em uma zona de agressividade urbana/moderada.

Desta vez, a linha modelo coleta os dados de temperatura de 41 nós dos elementos de cada um dos 4 modelos criados a cada minuto dos, aproximadamente, 47 minutos que o corpo de prova passa exposto, sendo assim possível fazer uma análise refinada e com uma quantidade maior de dados para aumentar a veracidade da pesquisa.

5. RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos nas análises realizadas no software, nos modelos com e sem revestimento, apresentando a temperatura e as tensões atuantes na linha modelo criada ao centro do corpo de prova, na altura de 10 cm. Os modelos serão comparados entre si conforme a espessura do revestimento é maior. Os gráficos que serão mostrados foram criados a partir dos dados extraídos e exportados por meio da linha modelo criada. O gráfico parte do centro do corpo de prova para sua extremidade, totalizando 5 cm de largura.

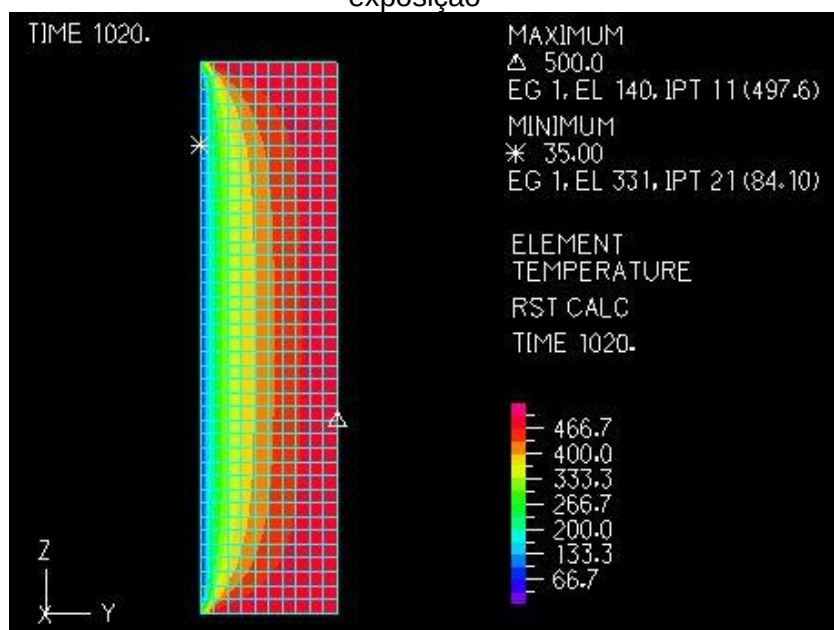
Os resultados irão abordar além das temperaturas da linha modelo horizontal pois também apresentarão os resultados da linha modelo vertical criada para simular uma armadura ali presente e analisar a dimensão do calor que chegaria a atingi-la.

5.1. MODELO SEM REVESTIMENTO

O modelo base sem revestimento foi submetido a uma condição inicial de 35°C, com a função apresentada provocando o aumento de tensão no ambiente com uma taxa de 27,4°C/min. Para chegar a temperatura de 500°C foram necessários 17 minutos de exposição. Os dados de gráfico que serão apresentados também está exibido valores dos minutos 5 e 11.

A Figura 20 apresenta o modelo de corpo de prova no software ADINA com tempo decorrido de 17 minutos e a temperatura de 500°C. A apresentação se dá com diferentes cores que evidenciam onde o protótipo está mais ou menos aquecido, podendo analisar que as faces externas estão com uma tonalidade mais avermelhada enquanto a face interior apresenta uma cor azul, mais fria.

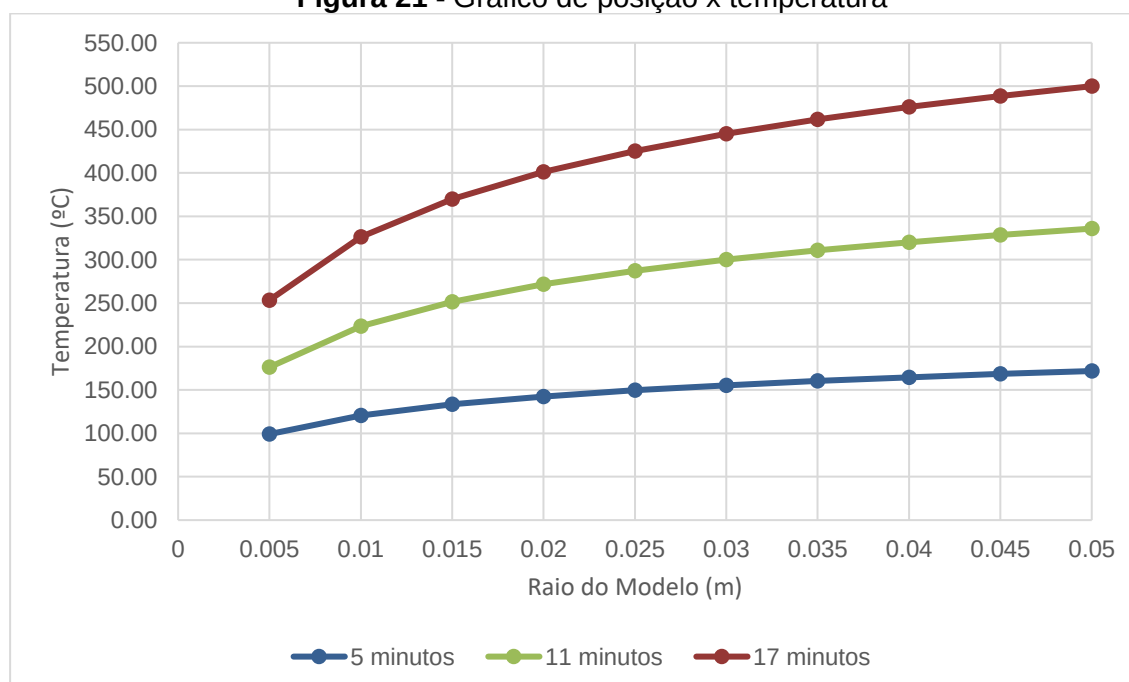
Figura 20 - Exibição de temperatura no modelo sem revestimento aos 17 minutos de exposição



Fonte: Adaptado de Adina R & D, INC (2021)

A Figura 21 mostra o gráfico de posição x temperatura. Os perfis das curvas são bem semelhantes uns aos outros e seus valores de temperatura são mais elevados conforme se aproxima da face externa do corpo de prova. Atingindo contraste de 250°C a 500°C, entre 5 mm do eixo central para a face externa do corpo de prova, respectivamente.

Figura 21 - Gráfico de posição x temperatura

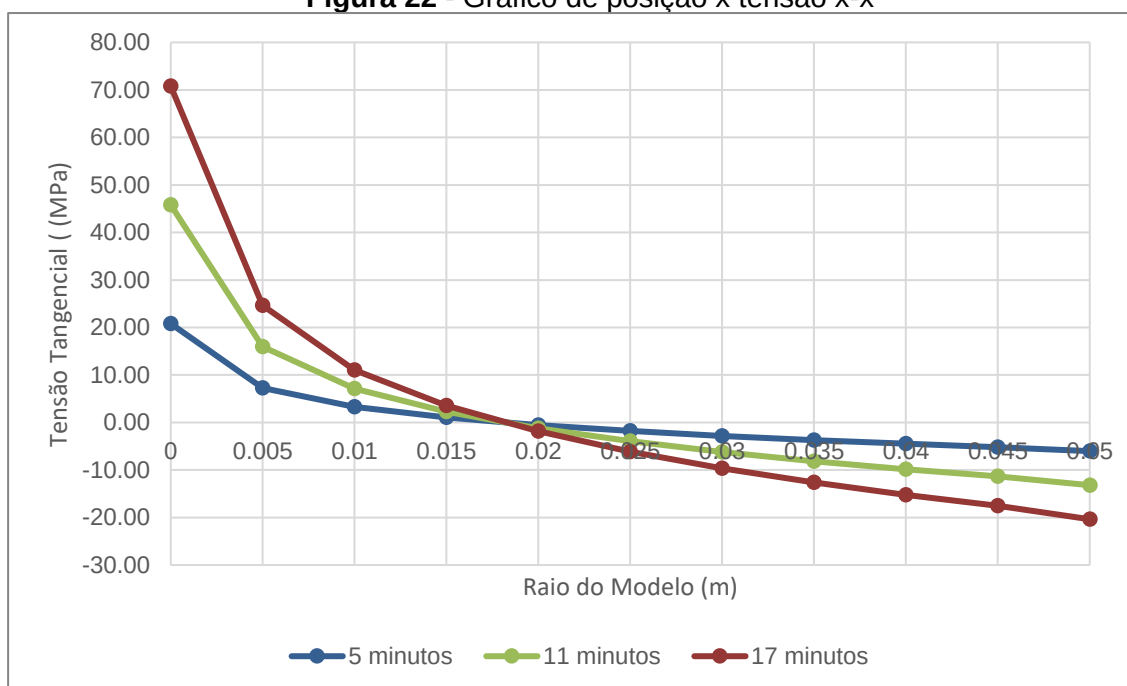


Fonte: Autor (2021)

Com esta variação de temperatura dentro do corpo de prova, entre seu eixo central e sua superfície, surgem os gradientes de temperatura que por sua vez provocam o surgimento das tensões internas. No eixo x-x as tensões atuantes são as tangenciais. Nesta tensão, percebe-se que a tração ocorre nas regiões mais próximas ao centro do corpo de prova e as tensões de compressão ao aproximar-se da superfície.

Na Figura 22, pode-se observar esta distribuição de tensões. Nos minutos separados para análises temos que aos 5 minutos a tensão de tração máxima é 20,8 MPa e a de compressão 6,03 MPa; aos 11 minutos estas tensões se tornam de ordem maior passando para 45,78 MPa de tração e 13,19 MPa de compressão, e no momento em que se atinge a temperatura de 500° C, aos 17 minutos, a tensão de tração equivale a 70,76 MPa e 20,36 MPa agindo em compressão.

Figura 22 - Gráfico de posição x tensão x-x

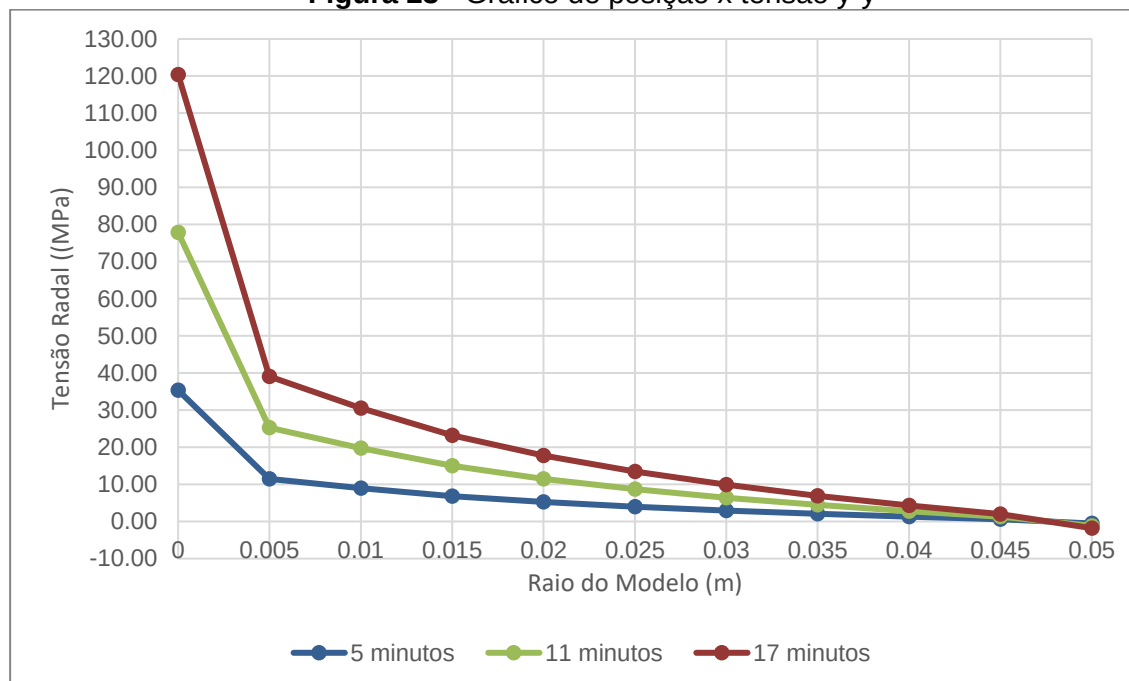


Fonte: Autor (2021)

No eixo y-y, também existem tensões atuantes e estas são conhecidas como tensões radiais. Conforme a temperatura vai aumentando e o tempo sendo decorrido, estas tensões vão tornando-se mais elevadas. As tensões radiais são apenas tensões de tração e possuem comportamento semelhante as tensões tangenciais, obtendo seu maior valor quanto mais próximo estiver do centro do

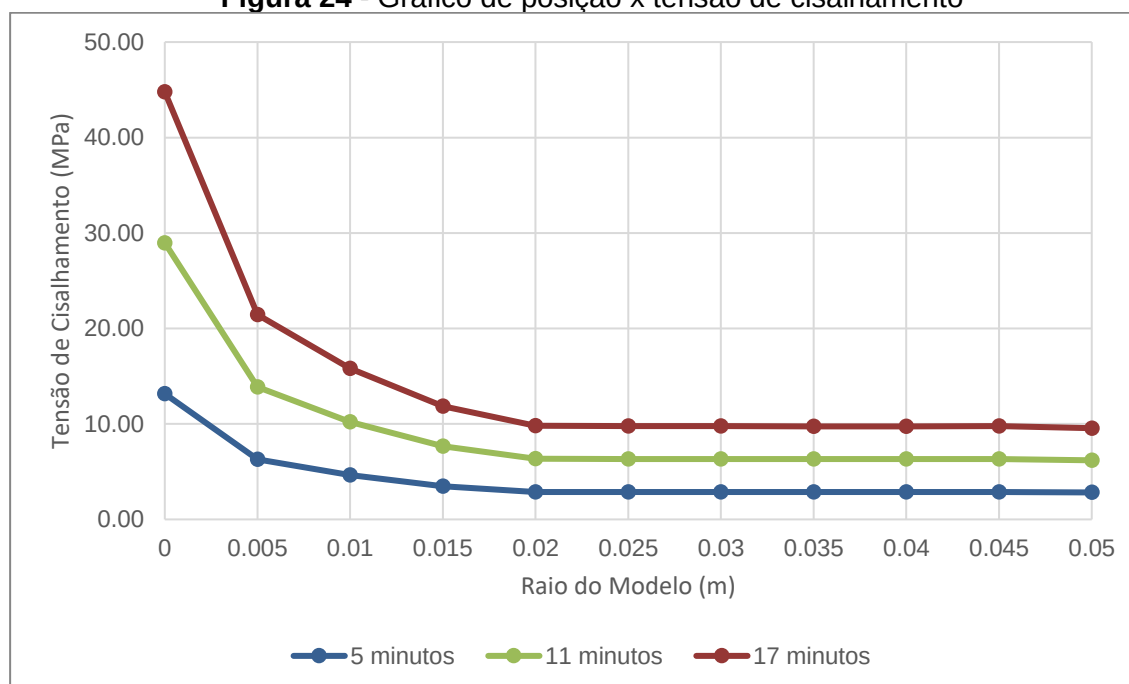
corpo de prova. A Figura 23 apresenta bem em formato gráfico as características citadas.

Figura 23 - Gráfico de posição x tensão y-y



Fonte: Autor (2021)

Por fim, a tensão de cisalhamento, que também é maior conforme se aproxima do eixo central do corpo de prova como as anteriores e também são semelhantes entre si e entre 2 cm a 5 cm do eixo, mantem-se em um valor numericamente de mesma ordem. A tensão máxima atingida para os 5 primeiros minutos foi de 13,16 MPa no eixo central e o valor mínimo de 2,82 MPa na face externa. Aos 11 minutos a tensão era de 28,97 MPa no centro e 6,19 MPa na extremidade, já ao atingir os 500° C o valor máximo foi de 44,78 MPa e o mínimo de 9,56 MPa. A Figura 24 detalha bem as curvas e seus respectivos valores analisados.

Figura 24 - Gráfico de posição x tensão de cisalhamento

Fonte: Autor (2021)

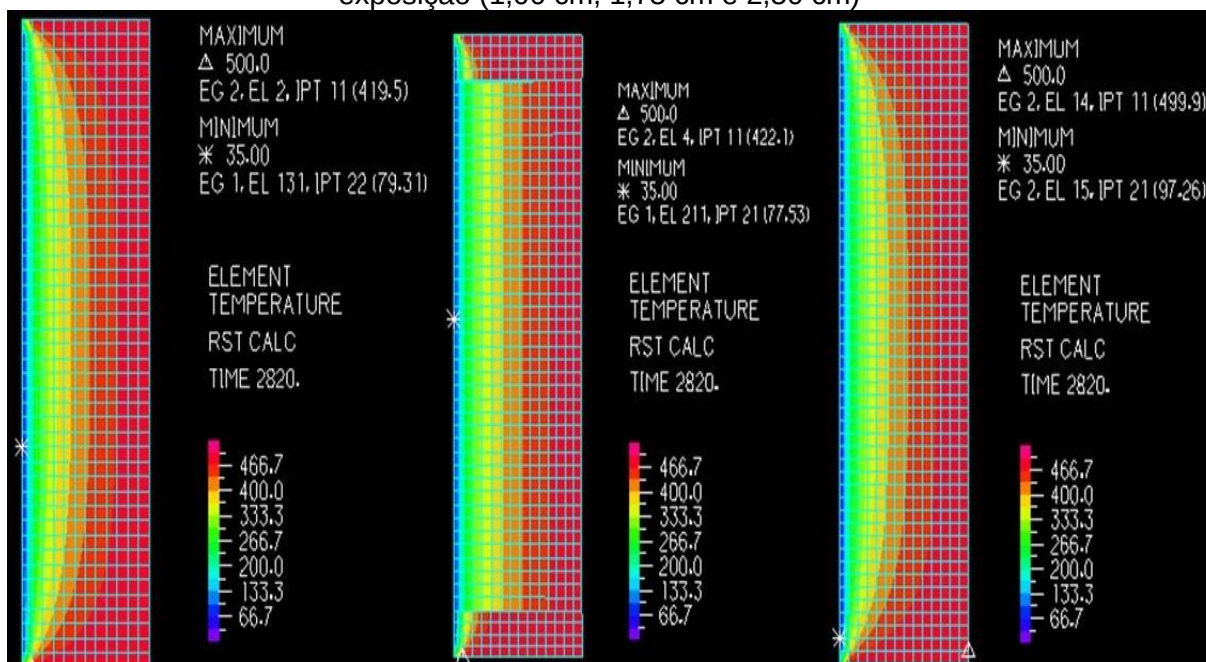
5.2. MODELOS COM REVESTIMENTO

Com a criação e inserção da camada de revestimento no modelo primário, ocorreram mudanças em relação aos fatores apresentados anteriormente: temperatura, tensão tangencial, tensão radial e tensão de cisalhamento, ocorrendo um novo arranjo nas suas configurações. Vale salientar que a região analisada nesta parte da pesquisa é a mesma da seção anterior, apenas a região de concreto. A região de argamassa não terá seus dados envolvidos graficamente, tendo em vista que a intenção da pesquisa é estudar apenas o comportamento do elemento de concreto, sendo esta região uma linha central na altura de 10 cm do corpo de prova partindo do centro do modelo até a face externa do corpo de prova, sendo limitado pela argamassa.

Pelas características e informações já apresentadas da argamassa de vermiculita, esta seção da pesquisa e resultados tende a apresentar melhores valores termodinâmicos do que a anterior.

A figura 25 apresenta os modelos de corpos de prova com revestimento no ADINA quando a temperatura é de 500°C no ambiente.

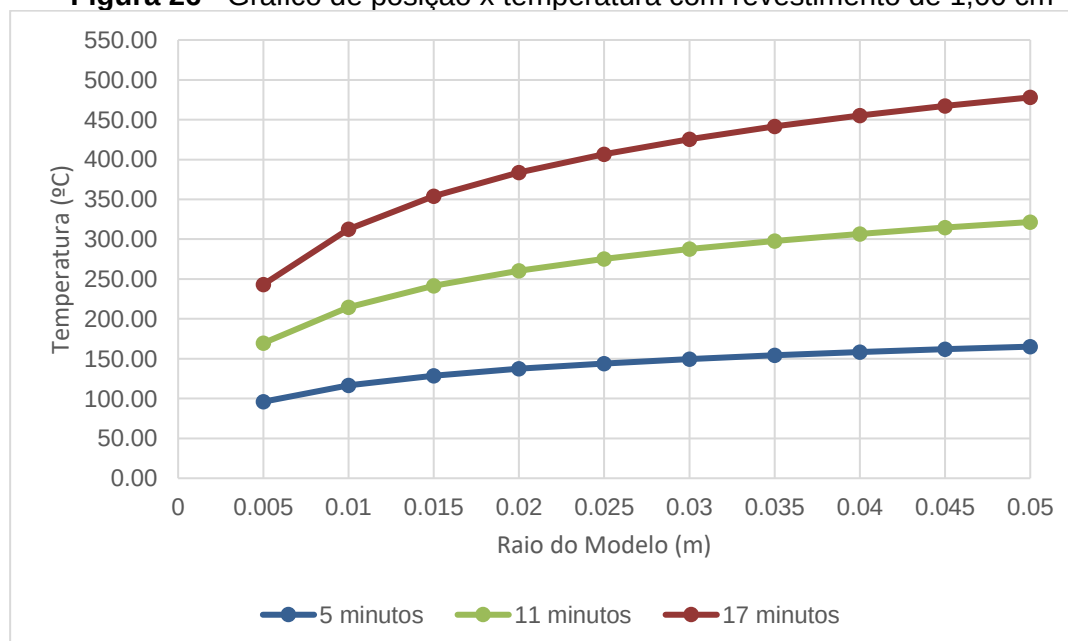
Figura 25 - Exibição de temperatura nos modelos com revestimento aos 17 minutos de exposição (1,00 cm, 1,75 cm e 2,50 cm)



Fonte: Autor (2021)

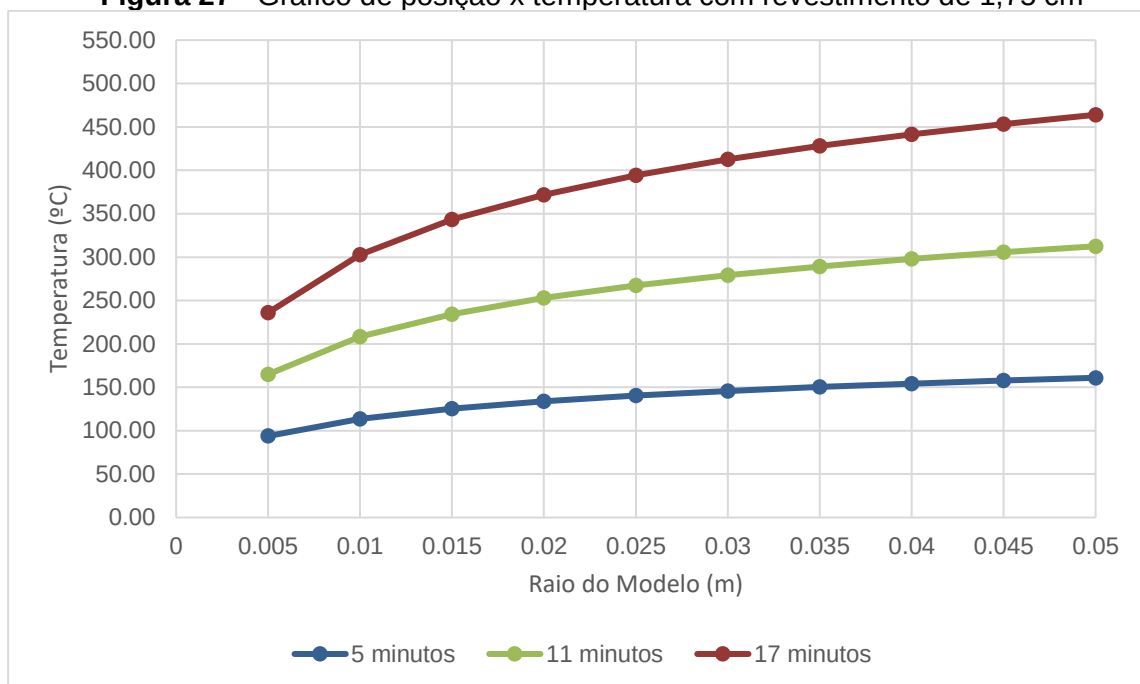
As Figuras 25, 26 e 27 mostram o comportamento da temperatura na faixa central do elemento. Percebe-se que o arranjo é semelhante variando a depender da espessura do revestimento. Cada linha mostra a temperatura mediante certo tempo, sendo 5 minutos, 11 minutos e 17 minutos os parâmetros utilizados na amostragem.

Figura 26 - Gráfico de posição x temperatura com revestimento de 1,00 cm



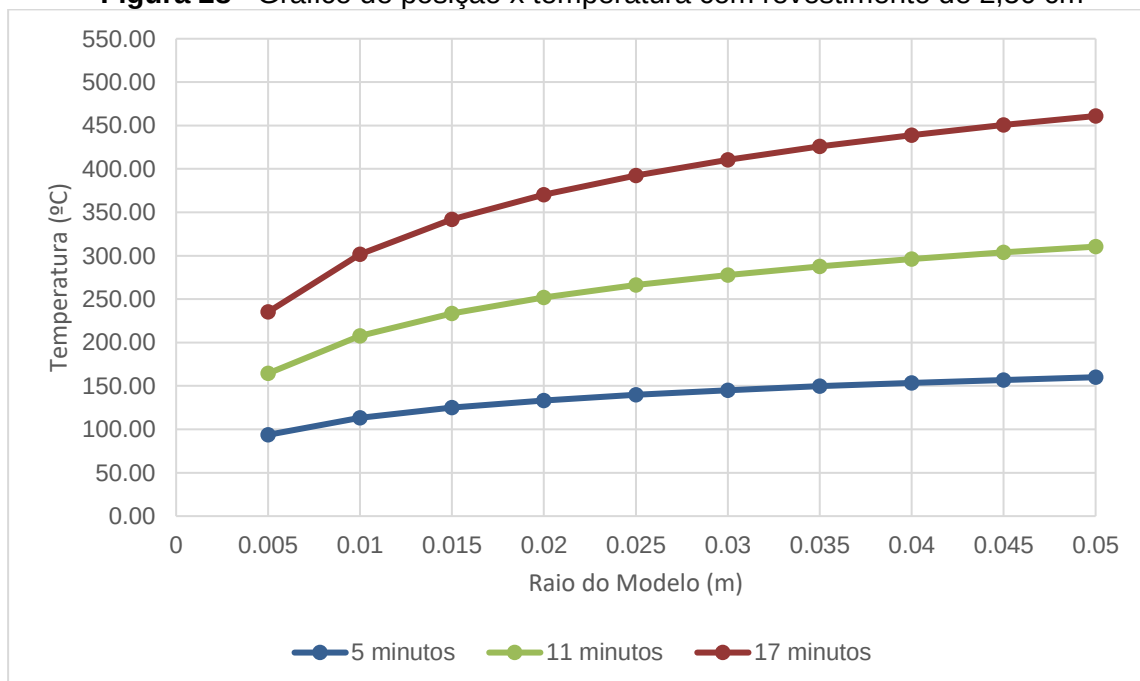
Fonte: Autor (2021)

Figura 27 - Gráfico de posição x temperatura com revestimento de 1,75 cm



Fonte: Autor (2021)

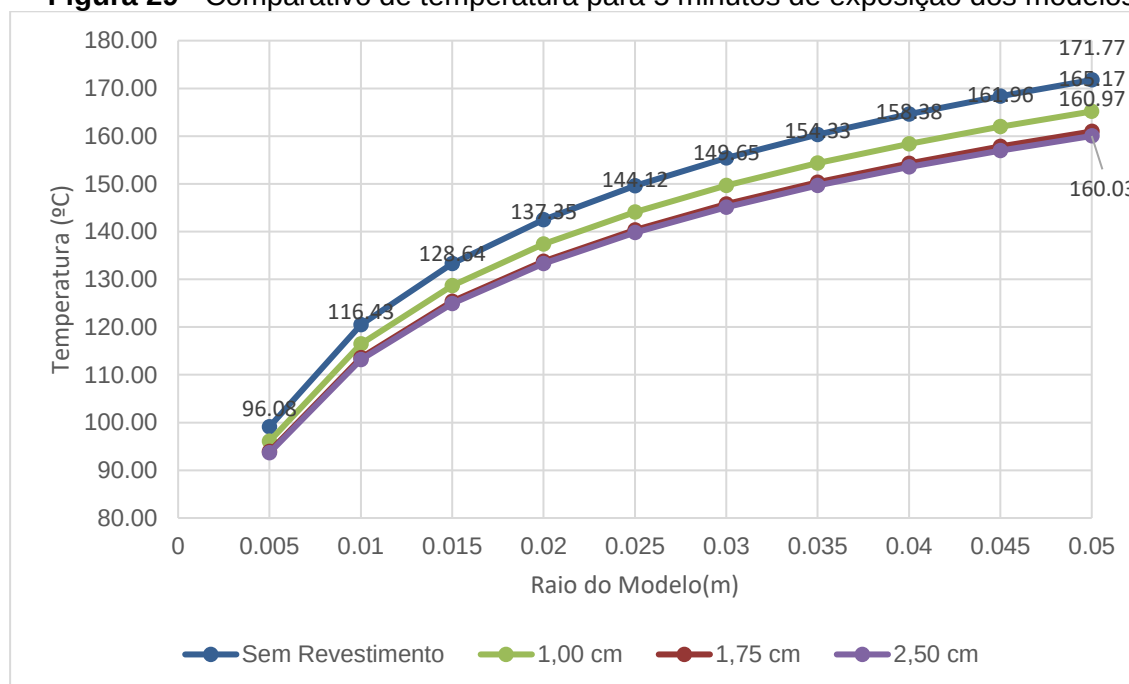
Figura 28 - Gráfico de posição x temperatura com revestimento de 2,50 cm



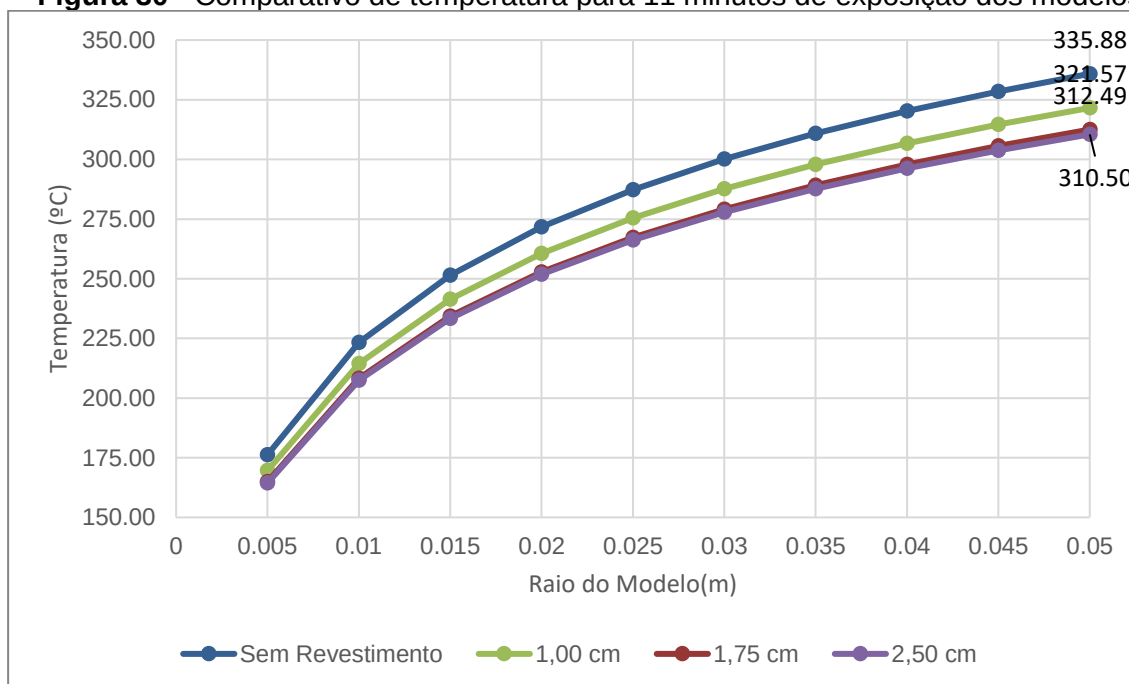
Fonte: Autor (2021)

Para melhor percepção da distinção de temperatura na superfície dos elementos submetidos a mesma função de temperatura foi colocado nas Figuras 28, 29 e 30 as curvas no mesmo gráfico. Fazendo uma comparação entre o modelo sem revestimento e o com 2,50 cm de revestimento, temos os seguintes dados nos primeiros 5 minutos: a temperatura sofre variação de 6,83% caindo de 171,77°C para 160,03°C; nos 11 primeiros minutos a redução passa a ser de 7,56%, baixando de 335,88°C para 310,50°C, já no momento que é atingido os 500°C a redução é de 7,81% saindo de 500°C e decaindo para 460,96°C, pode-se observar que a queda percentual vai sendo menor em uma comparação com as anteriores, o que sugere uma reta não linear nesta função.

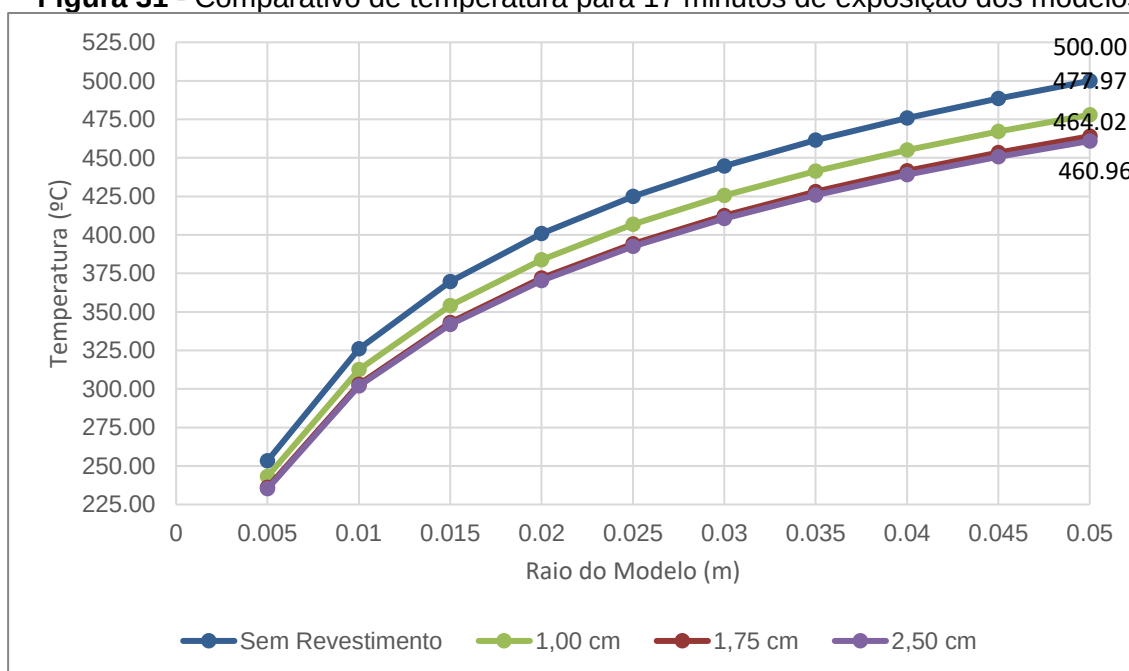
Figura 29 - Comparativo de temperatura para 5 minutos de exposição dos modelos



Fonte: Autor (2021)

Figura 30 - Comparativo de temperatura para 11 minutos de exposição dos modelos

Fonte: Autor (2021)

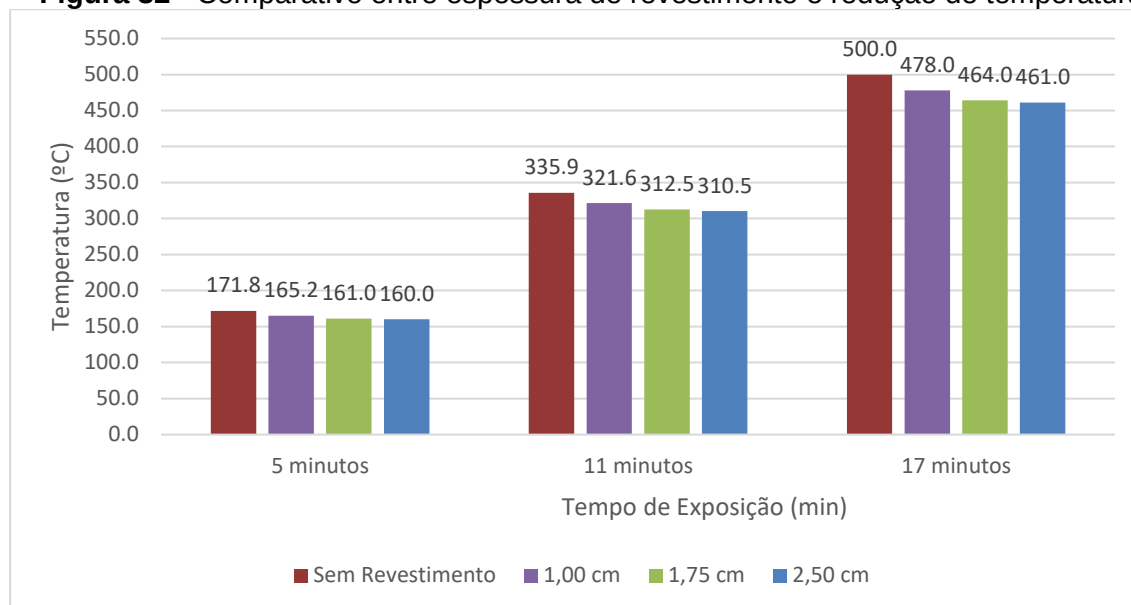
Figura 31 - Comparativo de temperatura para 17 minutos de exposição dos modelos

Fonte: Autor (2021)

Na Figura 31 são apresentadas as temperaturas na superfície externa do elemento para as sequencias de tempo já citadas: 5 minutos, 11 minutos e 17 minutos, comparando os minutos com cada tipo de revestimento. Observa-se uma

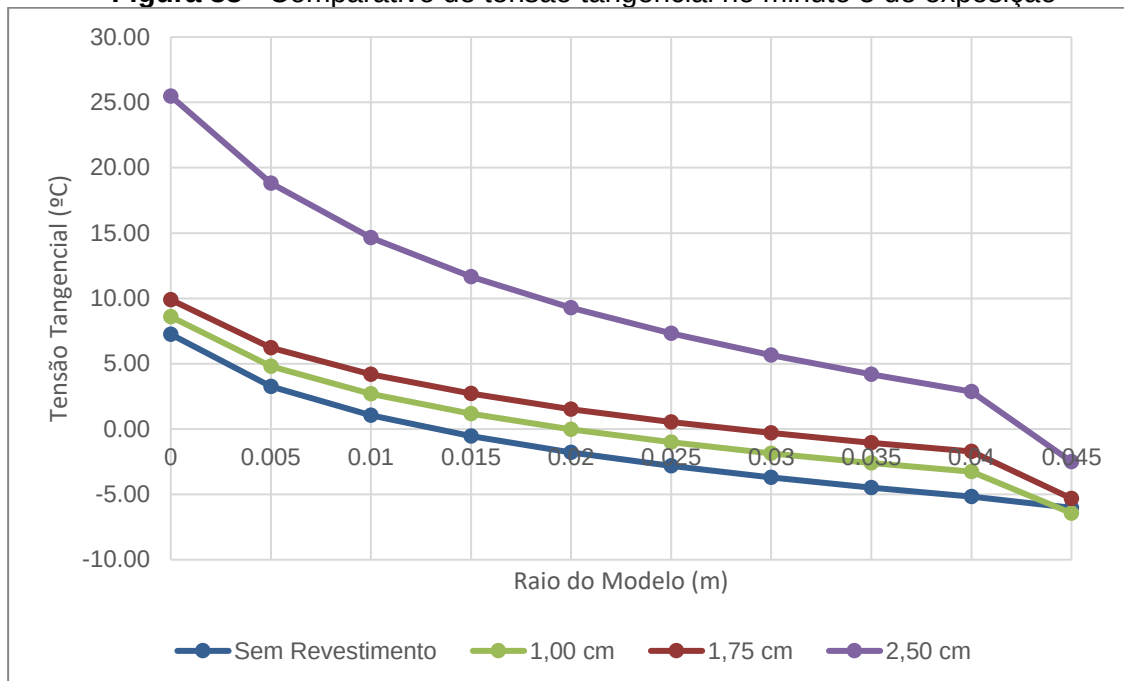
redução que chega até 7,81% na camada mais espessa de revestimento, saindo de 500°C para 461°C.

Figura 32 - Comparativo entre espessura de revestimento e redução de temperatura

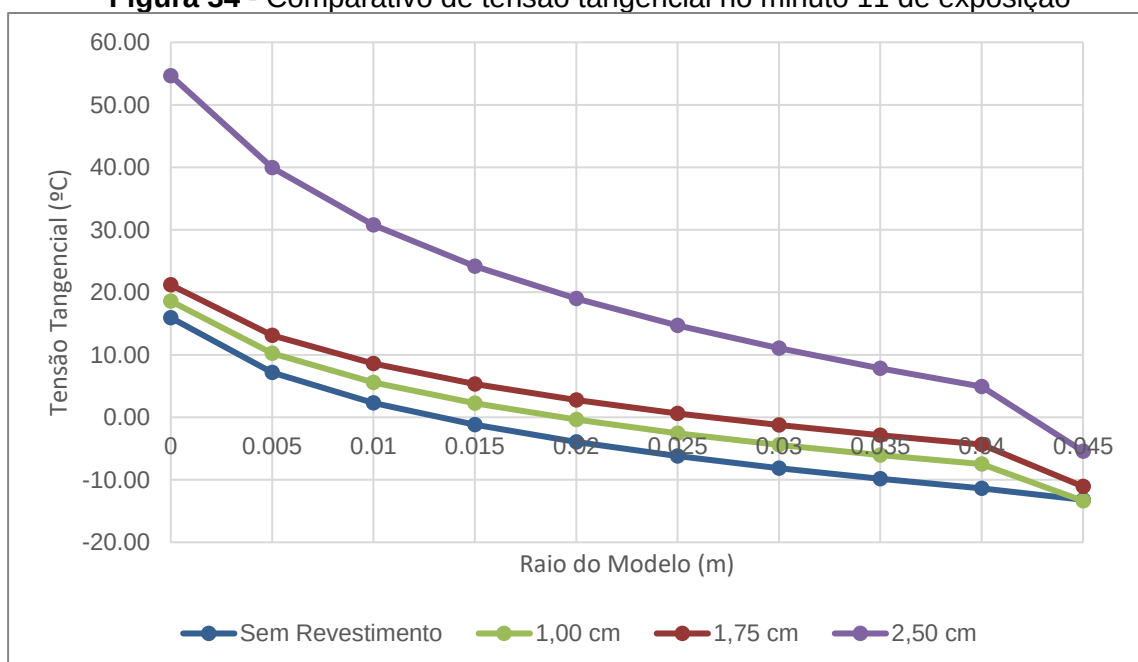


Fonte: Autor (2021)

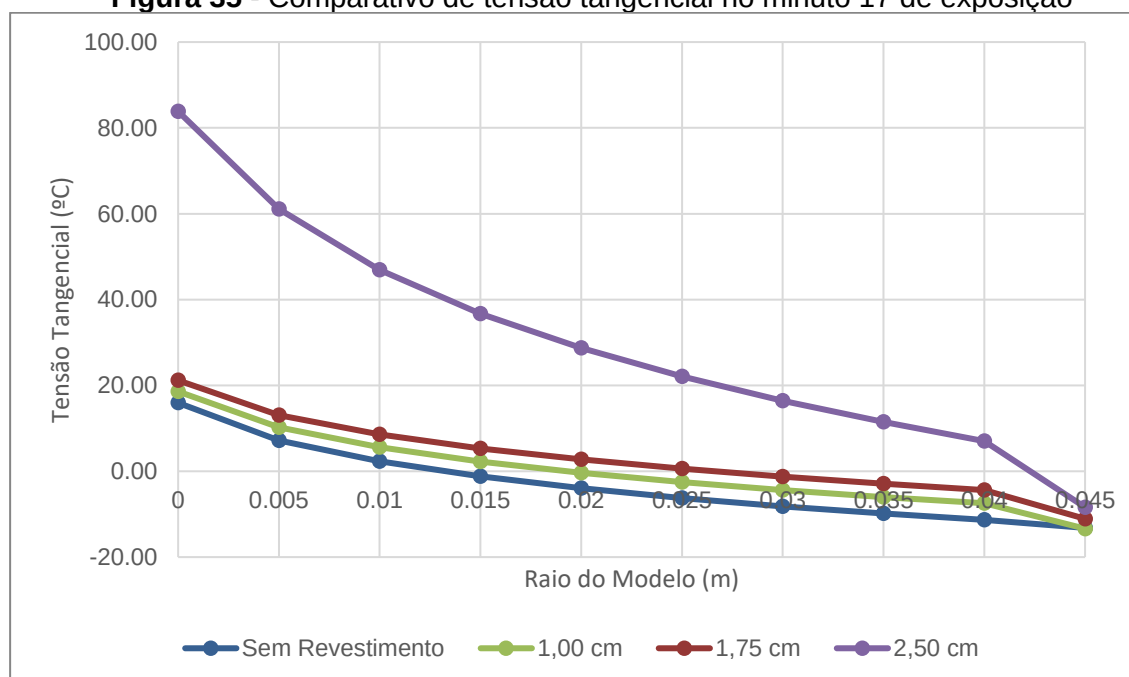
Ao fazer uma comparação entre as tensões tangenciais das diferentes espessuras de revestimento, nota-se que elas possuem comportamento semelhantes tanto entre si como com o gráfico da seção anterior, diferenciando-se entre si pela movimentação do ponto de inversão de tensões de tração e compressão como mostram as Figuras 32, 33 e 34.

Figura 33 - Comparativo de tensão tangencial no minuto 5 de exposição

Fonte: Autor (2021)

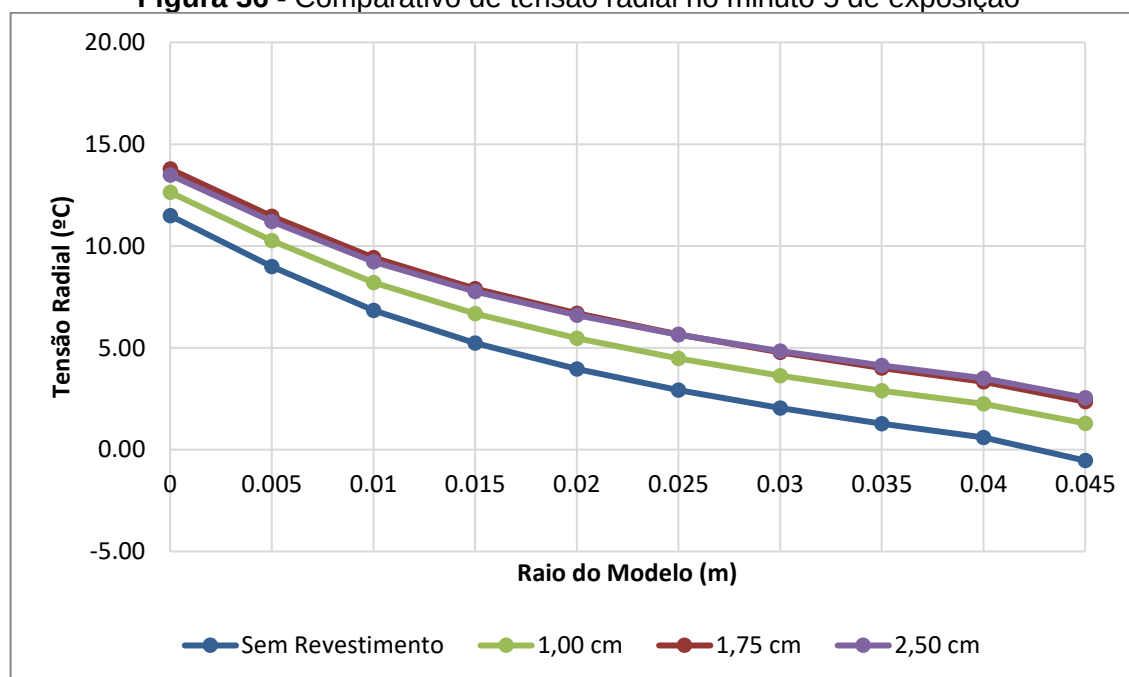
Figura 34 - Comparativo de tensão tangencial no minuto 11 de exposição

Fonte: Autor (2021)

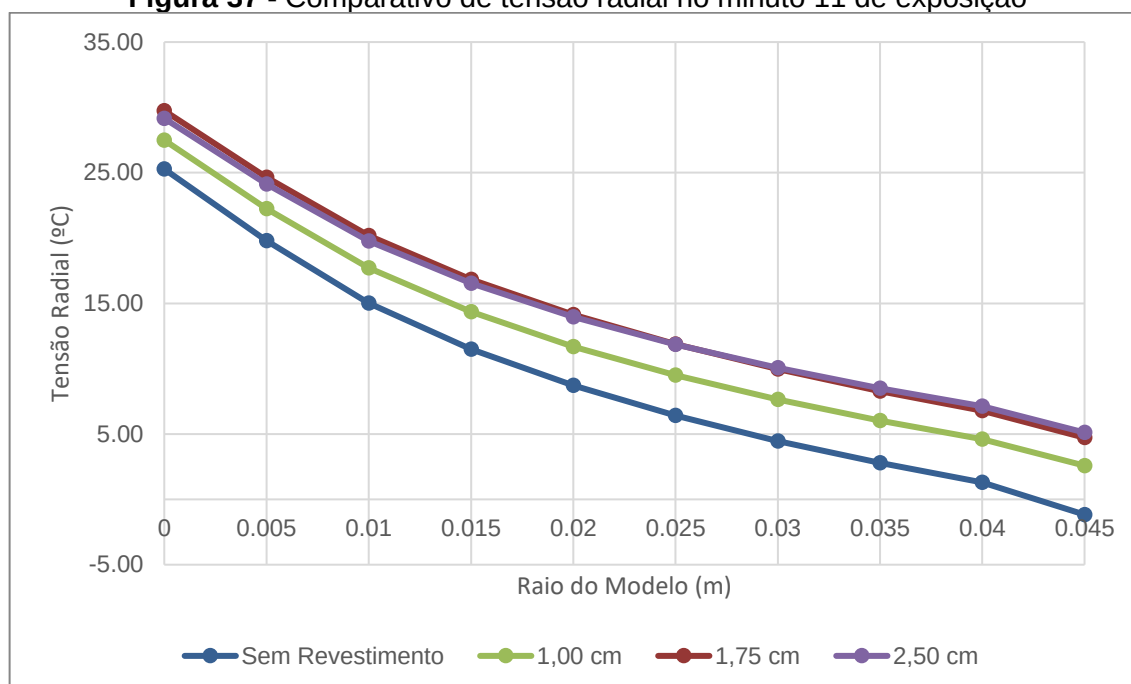
Figura 35 - Comparativo de tensão tangencial no minuto 17 de exposição

Fonte: Autor (2021)

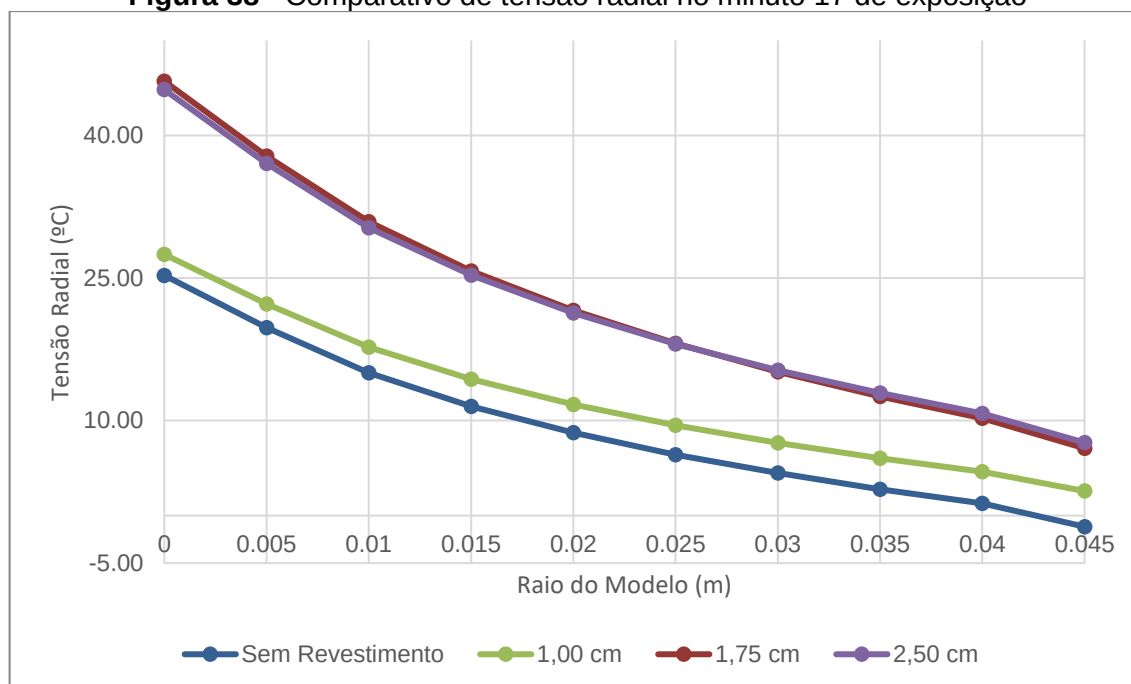
As tensões radiais também são semelhantes ao gráfico apresentado na seção anterior, sendo que na apresentação das Figuras 35, 36 e 37 as linhas não se cruzam no trecho final, dispondo de uma configuração um pouco mais aberta no último ponto, e sendo também em quase sua totalidade em valores positivos, de tração.

Figura 36 - Comparativo de tensão radial no minuto 5 de exposição

Fonte: Autor (2021)

Figura 37 - Comparativo de tensão radial no minuto 11 de exposição

Fonte: Autor (2021)

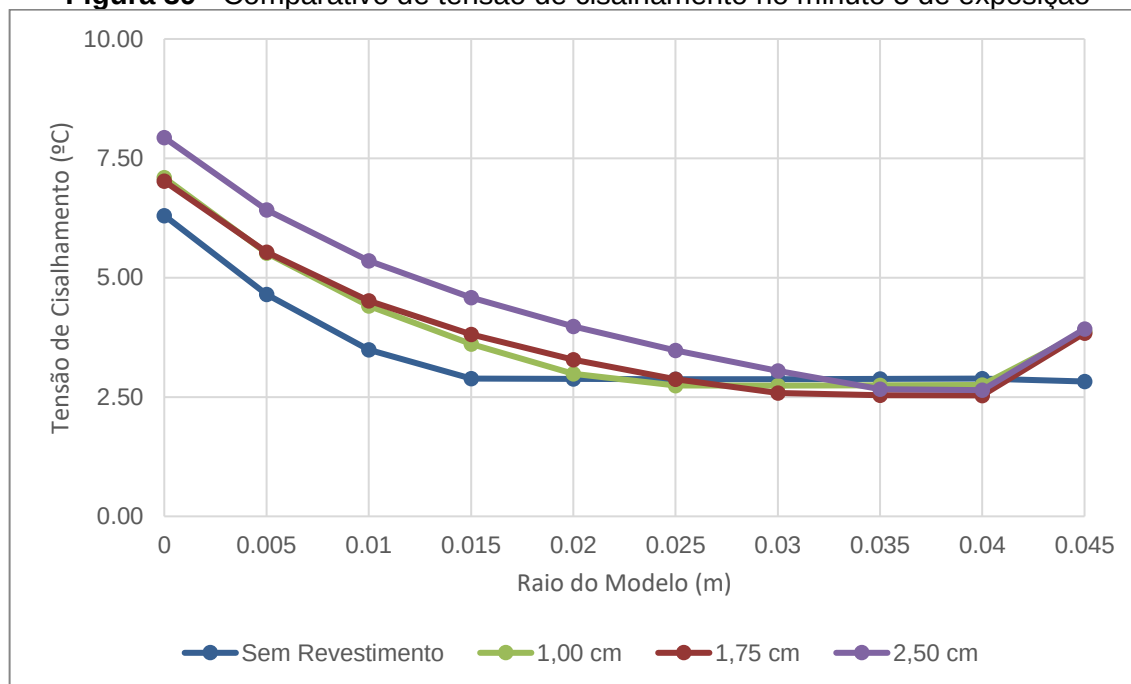
Figura 38 - Comparativo de tensão radial no minuto 17 de exposição

Fonte: Autor (2021)

Além das duas tensões citadas anteriormente, existe a tensão de cisalhamento, está também seguiu comportamento semelhante ao da seção anterior, tendo um declive e posterior um patamar de igualdade num trecho um mais longo obtendo diferença em um aumento na região próxima à superfície

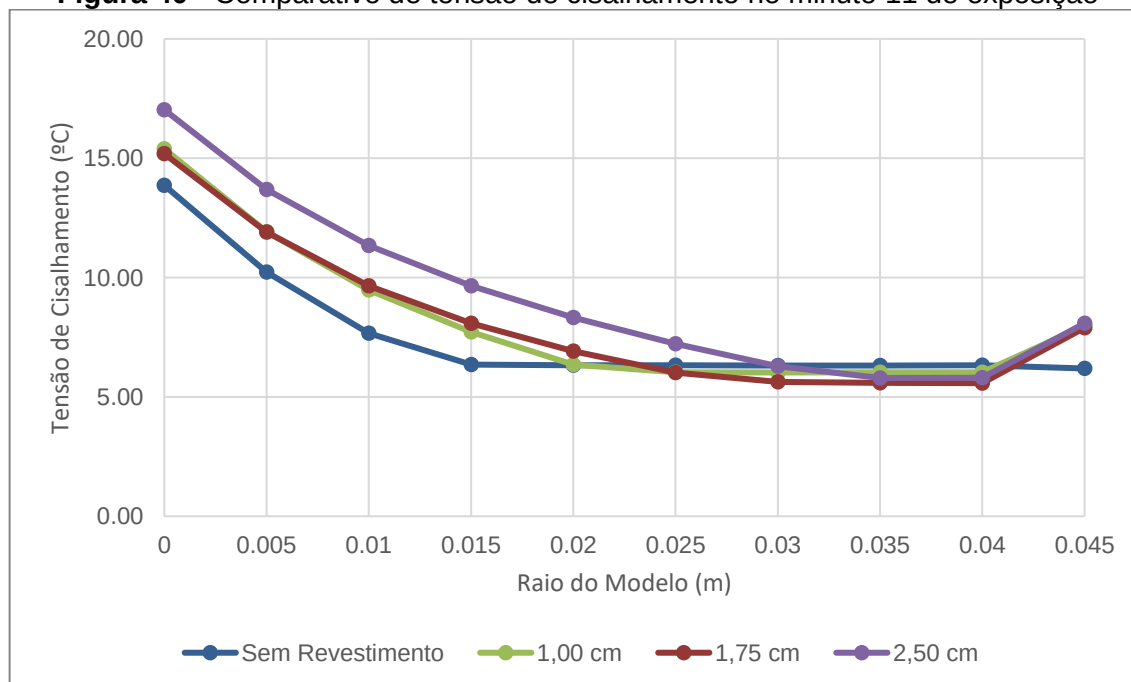
externa do corpo de prova, esse aumento pode se configurar devido a zona de mudança de material, concreto e argamassa. Nas Figuras 39, 40 e 41 pode-se notar que quanto maior o revestimento, mais o patamar de igualdade se torna menor e a curva de declive maior.

Figura 39 - Comparativo de tensão de cisalhamento no minuto 5 de exposição

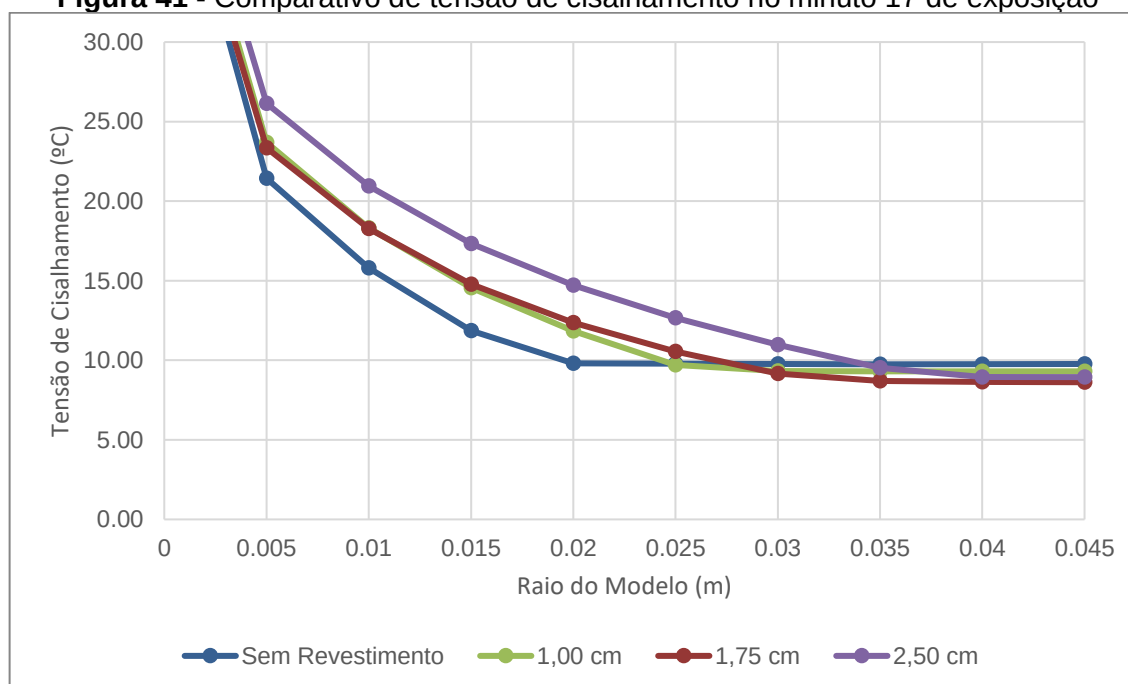


Fonte: Autor (2021)

Figura 40 - Comparativo de tensão de cisalhamento no minuto 11 de exposição



Fonte: Autor (2021)

Figura 41 - Comparativo de tensão de cisalhamento no minuto 17 de exposição

Fonte: Autor (2021)

5.3. ANÁLISE TÉRMICA SOBRE A ARMADURA

Na metodologia foi citado o procedimento que seria utilizado para extrair os dados do modelo criado, o dado extraído será apenas de temperatura para analisar se a quantidade de calor que atinge tal armadura pode vir a atrapalhar o seu bom funcionamento com o concreto.

Como visto anteriormente, a maior parte das tensões no interior do corpo de concreto são tensões de tração, tensões essas que são resistidas por meio da armadura, por esse motivo a importância deste estudo.

Para análise foi passado a linha modelo a 3,00 cm da face externa do concreto. A Tabela 2 mostra a temperatura média dos 41 nós quando o procedimento atinge 17 minutos conforme o revestimento utilizado.

Tabela 2: Temperatura média da armadura

Revestimento	Temperatura média (°C)
Sem Revestimento	420,79
1,00 cm	397,18
1,75 cm	378,88
2,50 cm	371,91

Fonte: Autor (2021)

A queda da temperatura que atinge a armadura no corpo de prova sem revestimento para o de 1,00 cm é de 5,61%, já do modelo sem revestimento para o de 1,75cm a queda percentual é de 9,96%, e por fim para a maior espessura de revestimento a temperatura decaiu 11,62%.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou por meio de situações numéricas simular de maneira próxima a realidade uma situação de incêndio e como um corpo de concreto resistiria ao mesmo, sendo objeto de seu estudo a utilização de argamassa com 25% de vermiculita e suas reações na diminuição dos efeitos de incêndio, fazendo valer das temperaturas atingidas internamente, dos tipos de tensões e ordens que as mesmas chegavam a atuar no interior do corpo de concreto e o quanto as espessuras desse revestimento de argamassa de vermiculita poderia colaborar, diminuindo a temperatura incidente sobre o concreto e a armadura de aço.

Com os resultados obtidos foi possível notar o quanto as extremidades próximas a fonte de calor discrepam da temperatura no interior do componente, variando de 500°C na face externa para 253,37°C a 5 mm no eixo do corpo de prova, uma redução de 49,33%.

Com a relação as tensões tangenciais atuantes, notou-se que as mesmas são de compressão na região próxima a fonte de calor e de tração mais ao centro do corpo de prova, havendo uma fase transitória que varia entre 1,75 cm 4,50 cm no modelo dependendo da espessura de seu revestimento, sendo o menor valor para modelos sem revestimento e o maior para modelos com 2,50 cm de revestimento. Estas tensões variaram seu valor 20,33 MPa de compressão para modelos sem revestimento até 83,86 MPa de tração no componente com revestimento de 2,50 cm.

As tensões radiais possuíam em sua grande maioria valores de tensão de tração apesar de que chegaram a apresentar valor de compressão que além de serem muito poucos eram de baixo valor, 1,79 MPa, e possuindo valor máximo de tração igual a 45,71 MPa.

Sobre as tensões de cisalhamento foi possível notar que quando seu gráfico era criado, conforme os dados iam partindo do eixo central para a face externa do corpo de concreto, ia primeiramente aparecendo uma reta decrescente, um declive, o qual ia diminuindo formando um patamar de valores semelhantes até a face externa do elemento, este patamar sofreu distorção nas análises com argamassa onde veio a surgir uma pequena reta crescente no centímetro final do

elemento, o que pode ser justificado devido a zona de aderência entre os materiais.

É importante ressaltar que conforme mais espessas eram as camadas de revestimento também maiores eram os valores das tensões internas nos corpos de prova já que a camada de revestimento restringia a liberdade e movimentação do modelo.

Em relação ao auxílio da argamassa de revestimento para diminuição da temperatura atuante sobre a armadura, foi possível observar um valor significativo de queda para um revestimento com espessura de 2,50 cm, neste modelo a temperatura caiu 11,62% em relação ao corpo de prova que não possuía argamassa de revestimento.

Por fim, pode-se afirmar que a argamassa possui valores benéficos para esta utilização, a imperfeição encontrada refere-se ao aumento das tensões conforme a espessura do revestimento aumenta, mas que continuam sendo tensões suportáveis pela armadura do concreto armada. Suas propriedades térmicas, apresentadas no referencial teórico deste trabalho, mostram um valor significativo de apoio no combate a incêndio e as deteriorações que o mesmo pode causar em sua ocorrência.

Para trabalhos futuros fica sugerido, a tentativa de criação de um modelo 3D, que possa apresentar melhor e de forma mais fidedigna as situações aqui apresentadas podendo incrementar com a utilização de cargas de convecção e radiação, e a influência das próprias cargas da edificação enquanto o corpo de concreto é aquecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASIL, Jornal. **Incêndio na boate Kiss completa oito anos sem julgamento dos réus.** 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/justica/noticia/2021-01/incendio-na-boate-kiss-completa-oito-anos-sem-julgamento-dos-reus>. Acesso em: 15 mar. 2021.

ALBUQUERQUE, G. B. M. L. de. **Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio.** 2012. 245p. Tese (Mestrado em engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 201.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13860:** Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432:** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

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

Baptista, Carlos. **REVISÃO: ANÁLISE DE TENSÕES.** Fadiga dos Materiais Metálicos, 2016, 26 f. Notas de Aula. Slide.

BARROS, Ilana Maria da Silva. **Análise térmica e mecânica de argamassas de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado.** 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

BRITEZ, Carlos Amado e COSTA, Carla Neves. **Ações do fogo nas estruturas de concreto.** In ISAIA, Geraldo Cechella (editor). Concreto: ciência e tecnologia (pp. 1029-1068). São Paulo: Ipsis gráfica e editora, 2011.

CÁNOVAZ, Manuel Fernández. Patologia e terapia do concreto armado. São Paulo: Pini, 1988

Çengel, Yunus A; Ghajar, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa.** 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

CONISA, Construções Civil LTDA. **Comunicado – Ocorrência incêndio no Alto do Tirol.** Disponível em: <http://www.conisa.com.br/br/noticias/ver/35/Comunicado-Ocorrencia-incendio-no-Alto-do-Tirol>>. Acesso em: 05 mar. 2019

CORPO DE BOMBEIROS – POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CB-PMESP). **Segurança estrutural nas edificações – resistência ao fogo dos elementos de construção.** Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros IT 08/01. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2001a. [Decreto Lei nº 46.076 do Estado de São Paulo, 31 de agosto de 2001].

COSTA, Camila Rosa Galvão da et al. **Estudo comparativo da utilização da ABNT NBR 15200: 2012 e da ABNT NBR 6118:2014.** *Reinpec*, [s.l.], v. 2, n. 1, p.65-79, 18 out. 2016. Faculdade Redentor.

COSTA, Carla Neves. **Dimensionamento de Elementos de Concreto Armado em Situação de Incêndio.** 2008. 2 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta e. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio: Métodos tabulares apresentados em normas internacionais.** In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo. Artigo. São Paulo: EPUSP, 2003.

COSTA, Carla Neves; STUCCHI, Fernando Rebouças; SILVA, Valdir Pignatta. **Nova Norma Brasileira de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio.** *Téchne. Revista de Tecnologia da Construção*, São Paulo, v. 99, p. 56-61, 2005.

DARVIZEH, Roohoolamin ; DAVEY, Keith. **Numerical Experimentation of Global Finite Similitude Scaling in Die Compaction Process.** The Tenth International Conference on Engineering Computational Technology. 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EM 1992-1-2: **Eurocode 2: design of concrete structures – part 1.2: general rules – structural fire design.** Brussels: CEN, 2004. 97p.

G1 SP, Jornal. **Incêndio e desabamento do prédio no Largo do Paissandu completam um ano; veja o que se sabe sobre o caso.** Disponível em: < <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/05/01/incendio-e-desabamento-do-predio-no-largo-do-paissandu-completa-um-ano-veja-o-que-se-sabe-sobre-o-caso.ghtml>> . Acesso em: 16 mar. 2021.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1.1: General requirements for fire resistance testing.** Geneva, Suíça [Revision of first edition (ISO 834:1975)], 1990.

KLEIN JÚNIOR, Odinir. **Pilares de concreto armado em situação de incêndio submetidos à flexão normal composta.** 2011. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

KODUR, Venkatesh. **Properties of Concrete at Elevated Temperatures.** International Scholarly Research Notices. V. 2014. Article ID 468510, 15 pages, 2014.

KOKSAL, F., GENCEL, O. KAYA, M. **Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures.** *Construction and Building Materials*, 2015.

LORENZON, Andressa. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas.** 2014. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

MARTINS, José Carlos. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013.** Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013. 308 p. Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC).

MORALES, Gilson; CAMPOS, Alessandro; FAGANELLO, Adriana M. Patriota. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto.** *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina*, v. 32, n. 1, p.47-55, jan./mar. 2011.

MORENO JUNIOR, Armando Lopes; MOLINA, Júlio Cesar. **Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628:2001.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p.37-53, out./dez. 2012. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

OLIVEIRA, Mateus Morais de. **Análise da resistência mecânica residual do concreto revestido em diferentes espessuras, de argamassa convencional e com vermiculita em situação de incêndio.** 2020. 75 f. TCC(Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2020.

REINA, A. G. R. **Dimensionamento de elementos de concreto à flexão simples em situação de incêndio.** Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010.

ROMANO, R. C. O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil.** São Paulo, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

SILVA, Ana Sulamita Bezerra da. **Análise da resistência residual do concreto em situação de incêndio com auxílio de um planejamento experimental.** 2019. 79 f. TCC(Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2019.

SILVA, Janaina Salustio da. **Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET).** 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SOUZA, Wendell Rossine Medeiros de. **Simulação numérica do comportamento mecânico da bainha de cimento em estado confinado em poços submetidos à injeção cíclica de vapor.** 2017. 137 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em ciência e engenharia do petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SOUSA, Douglas Alves de; SILVA, Guilherme Pereira. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2015. 137 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

TRIBUNA DO NORTE, Jornal. **Incêndio atinge 10º andar no edifício Torre do Tirol**. 2011. Disponível em: <<http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/incendio-atinge-10o-andar-no-edificio-torre-do-tirol/196247>>. Acesso em: 22 fev. 2021.

ZABEU, Leandro José Lopes. **Comportamento de estruturas de concreto de edifícios industriais compartimentados submetidos à situação de Incêndio**. 2011. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.