



**AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL, EM
CONCRETO ARMADO, APÓS A OCORRÊNCIA DE INCÊNDIO**

CURITIBA
2020



FELIPE DEPETRIZ MARQUES

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL, EM CONCRETO ARMADO, APÓS A OCORRÊNCIA DE INCÊNDIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação em Sistemas Estruturais em Concreto, Pós-Graduação *lato sensu*, do Instituto IDD como requisito parcial para a obtenção do Grau de Especialista em Sistemas Estruturais em Concreto.

Orientador: Prof. Kirke Andrew

CURITIBA
2020

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a minha família por todo apoio fornecido durante esses tempos, principalmente a minha mãe Raquel e minha tia Lucia, por se preocuparem e por auxiliar em todas as situações presentes na minha vida.

Ao engenheiro civil prof. Kirke Andrew por me ajudar na minha pesquisa, além de oferecer sua paciência para as minhas atitudes.

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DO TCC

Por

NOME DO ALUNO 1

NOME DO ALUNO 2

NOME DO ALUNO 3

TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.

Curitiba (PR) ____ de ____ de ____.

Nome do Professor Orientador

Nome do Prof. Co-orientador

Nome do terceiro professor integrante da banca

RESUMO

O presente trabalho tem a finalidade de avaliar a estrutura de uma edificação após ocorrência de incêndio. Tendo como base de conhecimento as NBR 14432 e NBR 15200 e estudos anteriores que informam sobre os procedimentos e resistências exigidas para a estrutura nesses casos, como também o efeito presente no concreto exposto a altas temperaturas, assim definindo a redução da resistência característica do concreto (f_{ck}) nessas circunstâncias. O trabalho propõe através do software Eberick V8, realizar um projeto estrutural de 5 pavimentos para avaliar suas condições de estabilidade, tanto global quanto parcial, em 7 situações de incêndios, em diferentes locais e intensidades, para realizar uma análise mais abrangente. Também foram estudadas duas propostas para aumentar a eficiência da estrutura, durante a ação do fogo, sendo elas: aplicar concreto C50 ou aplicar vigas de 19x80cm e lajes de 20cm. O principal fator estudado foram as flechas das vigas e lajes, classificando cada peça, em boa, má, péssima e com mensagem de erro, a partir desse processo foi definido as condições globais da estrutura, considerando as porcentagens totais dos elementos em cada simulação proposta. Com o término das simulações foi definido que o caso mais prejudicial era da ação do incêndio quando atinge toda a estrutura, com maiores chances de colapso global, revelando que a área de ação do fogo é mais relevante que sua temperatura. As condições das peças, presentes no pavimento ático, acabaram sendo as mais prejudicadas pelo incêndio, revelando que os elementos que suportam as maiores cargas e reações, serão os que receberam mais danos, assim uma distribuição de esforços equilibrada pode resultar numa estrutura mais resistente aos impactos dos incêndios.

Palavras chave: incêndio, fogo, estrutura, concreto, flecha, desempenho.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Densidade de probabilidade da resistência à compressão do concreto	26
Figura 2. Ensaio de resistência a tração no concreto.....	26
Figura 3. Diagrama tensão-deformação no concreto	29
Figura 4. Diagrama tensão-deformação no concreto pelos esforços de tração	30
Figura 5. Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura	39
Figura 6. Fator de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura	40
Figura 7. Fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura	42
Figura 8. Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura.....	43
Figura 9. Perda de resistência em função do aumento da temperatura	55
Figura 10. Efeito dos modos de resfriamento na temperatura de 300°	56
Figura 11. Efeito dos modos de resfriamento na temperatura de 500°	57
Figura 12. Comparação entre os modos de resfriamento na temperatura de 800°C	57
Figura 13. Pavimento Subsolo	60
Figura 14. Pavimento Térreo	60
Figura 15. Pavimento Tipo.....	61
Figura 16. Pavimento Ático	61
Figura 17. Gráfico das porcentagens das vigas com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda	71

Figura 18. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda, com concreto C50.....	72
Figura 19. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda, com seção de 19x80cm	72
Figura 20. Destaque das vigas com as maiores flechas sobre a ação do fogo.....	73
Figura 21. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda	74
Figura 22. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda, com concreto C50.....	75
Figura 23. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda, com 20cm de espessura.....	76
Figura 24. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo.....	77
Figura 25. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com concreto C50.....	78
Figura 26. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com seção de 19x80cm.....	78
Figura 27. Destaque das vigas com as maiores flechas na situação de incêndio no subsolo	79
Figura 28. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo.....	80

Figura 29. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com concreto C50.....	81
Figura 30. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com 20cm de espessura	81
Figura 31. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio no subsolo	82
Figura 32. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento tipo.....	83
Figura 33. Destaque das vigas com as maiores flechas na situação de incêndio no pavimento tipo	83
Figura 34. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento tipo, com concreto C50.....	84
Figura 35. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento tipo, com seção de 19x80cm.....	85
Figura 36. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento tipo.....	86
Figura 37. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio no pavimento tipo	86
Figura 38. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com concreto C50.....	87
Figura 39. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com 20cm de espessura	88
Figura 40. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático	89

Figura 41. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático, com concreto C50.....	90
Figura 42. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático, com seção de 19x80cm.....	90
Figura 43. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático	91
Figura 44. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático, com concreto C50.....	92
Figura 45. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio no pavimento ático.....	92
Figura 46. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com 20cm de espessura	93
Figura 47. Destaque das vigas com as maiores flechas na situação de incêndio iniciado na cozinha	94
Figura 48. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio iniciado na cozinha	95
Figura 49. Destaque das vigas na cobertura com avisos de erros na situação de incêndio iniciado na churrasqueira	96
Figura 50. Destaque das vigas no ático com avisos de erros na situação de incêndio iniciado na churrasqueira.....	96
Figura 51. Destaque das vigas no subsolo com avisos de erros na situação de incêndio iniciado no carro	97
Figura 52. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio iniciado no carro	98
Figura 53. Gráfico das porcentagens das vigas, para análises globais, em todos os casos de incêndios	99

Figura 54. Gráfico das porcentagens das lajes, para análises globais, em todos os casos de incêndios	100
Figura 55. Gráfico das porcentagens das vigas, para análises parciais, em todos os casos de incêndios	101
Figura 56. Gráfico das porcentagens das lajes, para análises parciais, em todos os casos de incêndios	101
Figura 57. Destaque das lajes e vigas mais prejudicadas por todas as simulações de incêndio estudado.....	102

LISTA DE TABELAS

Quadro 1. Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto	27
Quadro 2. Valores das relações $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal (2000kg/m ³ a 2 800 kg/m ³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos.....	38
Quadro 3. Valores das relações $f_{y,\theta}/f_{yk}$ e $E_{s,\theta}/E_s$ para aços de armadura passiva	41
Quadro 4. Sistema global da segurança contra incêndio	47
Quadro 5. Fases de um incêndio e sua relação com os materiais	49
Quadro 6. Resistência à compressão do concreto ensaio à 300°C.....	53
Quadro 7. Resistência à compressão do concreto ensaio à 500°C.....	54
Quadro 8. Resistência à compressão do concreto ensaio à 800°C.....	54
Quadro 9. Análises de processamentos globais da estrutura.	63
Quadro 10. Classificação dos elementos estruturais pelo valor das flechas.....	69
Quadro 11. Classificação dos estados de acordo com as porcentagens de erro e deslocamento	69
Quadro 12. Avaliação final da estrutura para as vigas, em todas as simulações propostas	103
Quadro 13. Avaliação final da estrutura para as lajes, em todas as simulações propostas	103

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	6
RESUMO	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS.....	13
SUMÁRIO.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	18
1.2. OBJETIVOS.....	18
1.2.1. Objetivo Geral	18
1.2.2. Objetivos Específicos	18
1.3. HIPÓTESE	19
1.4. JUSTIFICATIVAS	19
1.4.1. Tecnológicas.....	19
1.4.2. Econômicas	20
1.4.3. Sociais	20
1.4.4. Ecológicas	20
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. CONDIÇÕES DE SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	23
2.1.1. Materiais.....	23
2.1.2. Cálculos	30
2.2. CONDIÇÕES E EXIGÊNCIAS DOS ELEMENTOS ESTRUTURAS PARA RESISTENCIA CONTRA INCÊNDIOS.....	36
2.2.1. Função Corta-fogo.....	37
2.2.2. Função de suporte.....	37

2.2.3.	Efeitos dos Materiais durante o incêndio	37
2.2.4.	Ação correspondente do incêndio	43
2.2.5.	Verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio.	44
2.3.	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	46
2.3.1.	Reação ao fogo dentro o contexto do sistema global.....	46
2.3.2.	Evolução do incêndio a sua relação com os materiais	48
2.3.3.	Comportamento dos materiais do concreto em elevadas temperaturas	50
2.4.	ENSAIOS	53
2.4.1.	Redução da resistência à compressão devido a aumento nas temperaturas	54
2.4.2.	Redução da resistência à compressão devido ao tempo de exposição às altas temperaturas	56
2.4.3.	Redução da resistência à compressão devido à forma de resfriamento	58
2.4.4.	Outros Aspectos relevantes	58
3.	METODOLOGIA	59
3.1.	EDIFICAÇÃO.....	59
3.2.	MODELO ESTRUTURAL INICIAL.....	62
3.3.	SITUAÇÕES DE INCÊNDIO	64
3.3.1.	Processo de convecção das simulações de incêndio	65
3.3.2.	Processos e configurações dos projetos	65
3.4.	ALTERAÇÕES PARA MELHORIA DO PROJETO	68
3.4.1.	Aumento da Resistência a Compressão do Concreto (fck).....	68
3.4.2.	Aumento de Seção das Peças	68
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
4.1.	CONDIÇÕES INICIAIS	70
4.2.	SITUAÇÃO DE INCÊNDIO EM TODA A ESTRUTURA	70
4.2.1.	Vigas.....	70

4.2.2. Lajes	73
4.3. SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NO PAVIMENTO SUBSOLO	76
4.3.1. Vigas.....	76
4.3.2. Laje.....	79
4.4. SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NO PAVIMENTO TIPO.....	82
4.4.1. Vigas.....	82
4.4.2. Lajes	85
4.5. SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NO PAVIMENTO ÁTICO	88
4.5.1. Vigas.....	88
4.5.2. Lajes	91
4.6. SIMULAÇÃO DE INCÊNDIOS EXTREMOS EM LOCAIS ESPECÍFICOS.....	93
4.6.1. Situação de incêndio iniciado na cozinha do pavimento tipo	93
4.6.2. Situação de incêndio iniciado na churrasqueira do ático	95
4.6.3. Situação de incêndio iniciado no carro no pavimento subsolo ..	97
4.7. ANÁLISE FINAL DAS SIMULAÇÕES	98
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

1. INTRODUÇÃO

Na engenharia civil o setor de cálculo estrutural é aplicado para realizar a modelagem da estrutura, nesse processo são definidas as dimensões das peças, os materiais utilizados, qual sistema estrutural será aplicado, uso de protendido ou blocos de alvenaria estrutural em concreto. Assim, com tais parâmetros estabelecidos corretamente para as condições fundamentais da edificação, a estrutura pode exercer sua finalidade: resistir as cargas e ações atuantes, assegurar a estabilidade global da edificação (ABNT NBR 6118, 2014).

Durante a convecção da estrutura são avaliadas inúmeras condições da construção, tais como: finalidade da obra, local da construção, nível de agressividade do ambiente, arquitetura do projeto, ações que afetam a edificação, características dos materiais presentes na estrutura, entre outros fatores considerados. Entre esses fatores estão presentes as condições de segurança, que podem ser originadas de causas excepcionais, com frequência baixa de acontecerem, como tempestades, fortes impactos, incêndios, explosão e outros (ABNT NBR 8681, 2003).

O presente trabalho terá como foco avaliar a segurança dos usuários após a ocorrência de incêndio, como variável a ser considerado. É pouco visto e/ou ensinado sobre os efeitos de altas temperaturas, causadas pela exposição do fogo, e como elas influenciam o concreto e a estrutura como um todo. A NBR 8681 (ABNT, 2003) define através da ocorrência de incêndio como ação excepcional, ou seja, com curta duração e baixa probabilidade de acontecer. Mesmo o incêndio sendo classificado como um evento raro, ele ainda é um risco possível de atingir a maiorias das construções, independentes da proporção ou finalidade da edificação, devido a isso são adotadas medidas de prevenção para evitar ao máximo os prejuízos gerados pelo fogo do incêndio (ABNT NBR 8681, 2003).

A NBR 14432 (ABNT, 2001) explica os aspectos que determinam a temperatura média do incêndio, a serem considerados para prevenir que a estrutura de concreto suporte as ações do fogo nessa situação. Entretanto é muito complexo estimar com exatidão o comportamento do fogo, pois a origem do incêndio pode alterar a temperatura e o tempo do incidente. Por causa das diversas variáveis esse trabalho procura avaliar as maneiras que estrutura global reage as diferentes situações propostas posteriormente.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Qual será o comportamento de uma edificação, com estrutura de concreto, durante a ocorrência de incêndio em diversas situações possíveis?

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de cumprir os objetivos apresentados em seguir.

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar as condições estruturais de segurança aos usuários de uma edificação residencial, após evento de altas temperaturas no concreto armado causadas por incêndio.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estimar o limite de resistência que a estrutura suporta para elevadas temperaturas antes do colapso dos elementos.

- Indicar quais as regiões podem ser mais prejudiciais pelas ações do incêndio.
- Prever o comportamento da estrutura de acordo com a evolução do incêndio.

1.3. HIPÓTESE

Visto que o concreto apresenta um desempenho reduzido em elevadas temperaturas, qual seria o comportamento de uma estrutura de concreto em diferentes casos de incêndio.

1.4. JUSTIFICATIVAS

Os motivos que inspiraram a realização desse estudo são diversos e envolvem áreas distintas como: tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas. Os âmbitos de cada disciplina serão aprofundados a seguir.

1.4.1. Tecnológicas

O concreto é um material bastante utilizado na construção, por ser moldável, com durabilidade e boa resistência ao fogo. Muitos estudos avaliam as condições do concreto em diversos cenários (COSTA, 2002). Essa pesquisa tem amplas vantagens, pois analisa o material e a estrutura de concreto, para diferentes casos de incêndio, fornecendo mais conhecimentos sobre como a estrutura, num todo, reage a essas condições. Assim, possibilitando novas práticas e estudos, para limitar a área exposta do fogo, evitar ruínas dos elementos e métodos de prevenção.

1.4.2. Econômicas

Os acidentes de incêndio podem gerar grandes danos para a edificação, resultando em altos custos para reparos e manutenções. A concepção de projetos com requisitos de segurança contra o fogo, focando na proteção passiva, utilizando materiais resistentes as temperaturas, pode ser mais econômico que a proteção ativa, com custos menores na instalação de combate a incêndio (INCÊNDIO, 2017).

1.4.3. Sociais

O incêndio é um acidente extremamente perigoso e fatal. Técnicas de prevenção e redução de riscos de incêndio são essenciais para manter as condições adequadas aos usuários e facilitam o combate contra o fogo, entre outros. É importante analisar os efeitos das altas temperaturas na estrutura para adquirir mais informações e planejar obras mais resistentes (ABNT NBR 15200, 2004).

1.4.4. Ecológicas

A área da construção civil é um dos maiores impactos ao meio ambiente, devido as suas atividades, que requerem o consumo de grandes volumes de minérios, metais, madeira e água. Além da execução exigir vários recursos, essa também gera resíduos que impactam negativamente para o ambiente. O incêndio pode aumentar esses impactos, causando mais danos na estrutura, desperdiçando os recursos usados na execução da obra e gerar mais poluentes pelas combustões dos materiais. Dessa forma, definir a possibilidade de reforço, ou reutilização, pode diminuir no impacto ao meio ambiente (MATTEI, 2015).

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia empregada nesse trabalho será um estudo de caso. A avaliação estrutural vai ser realizada através software Eberick V8. Para cada situação de incêndio será simulado a perda de resistência do concreto, proporcional a temperatura do fogo, a região afetada pelo fogo e principalmente o comportamento da estrutura, de maneira global, para as simulações apresentadas pelo trabalho.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

A estrutura adotada para a dissertação é composta de capítulos e pelas considerações finais.

O **Capítulo 1** apresenta o tema do estudo de caso, avaliar a estrutura em situação de incêndio, apontando as justificativas, os objetivos a serem atingidos, os benefícios que o trabalho pode oferecer para os setores sociais, tecnológicos, ambientais, entre outros.

O **Capítulo 2** aborda todos os conhecimentos envolvidos para o desenvolvimento desse estudo, sendo principalmente necessário as NBR 14432 (ABNT, 2001), NBR 15200 (ABNT, 2004), NBR 6118 (ABNT, 2014), que englobam as áreas sobre estruturas de concreto, projetos estruturais em situação de incêndio e exigências para resistência conta fogo.

O **Capítulo 3** explica todo o processo da metodologia utilizada no estudo de caso, informando a utilização do software Eberick V8, para modelar o projeto inicial e as várias simulações de incêndio.

O **Capítulo 4** avalia os resultados adquiridos, das vigas e lajes, das situações propostas, reunindo todos os dados em tabelas e gráficos, assim determinando as condições da estrutura, maiores danos, reações do projeto e outras informações.

O **Capítulo 5** conclui o trabalho, finalizando com os principais comportamentos avaliados do projeto estrutural em situação de incêndio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão indicadas as normas e as bibliografias que serviram como base teórica dos conhecimentos. Os temas abordados a seguir envolvem as condições de segurança na estrutura de concreto, englobando características de materiais, as diversas ações presentes nos projetos e principalmente a condição de solicitação das cargas com resistência dos materiais para o estado de limite último (ABNT NBR 8681, 2003).

Também será abordado a maneira como os elementos que constituem o concreto reagem ao aumento da temperatura, as consequências presentes no concreto durante a exposição ao fogo e as condições dos materiais após o evento do incêndio (ABNT NBR 14432, 2004).

2.1. CONDIÇÕES DE SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Para que a segurança da estrutura de concreto seja garantida, diversas condições de materiais, procedimento, cálculo e considerações precisam ser seguidas pelas indicações presentes nas normas (ABNT NBR 8681,2003).

2.1.1. Materiais

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014), especifica os elementos aplicados na estrutura de concreto assim como suas propriedades e principais características (ABNT NBR 6118, 2014).

2.1.1.1. Concreto

O concreto é feito através das misturas de água, cimento, agregado fino e agregado grosso. Algumas vezes são usados aditivos na mistura para

melhorar algumas propriedades do composto. Dependendo do material adicionado, a característica do concreto pode ser alterada, visando um concreto com as qualidades que a obra e a edificação necessitam (CHUST, 2007).

A Norma NBR 6118 (ABNT, 2014), classifica o concreto a partir das resistências que esse material possui, assim a nomenclatura das classes são de C15, C20, C25 até a classe C90, como é indicado pela NBR 8953 (ABNT, 2015). As especificações impostas nesta norma se aplicam aos concretos de massa específica normal, que são aqueles que, depois de secos em estufa, têm massa específica (ρ_c) compreendida entre 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³. Entretanto caso a massa específica não for definida claramente, através de ensaios e estudos, é considerado o valor de 2.400 kg/m³ para concreto simples e 2.500 kg/m³ para concreto armado. É tomado o valor 10⁻⁵/°C para o coeficiente de dilatação térmico (ABNT NBR 6118, 2014).

2.1.1.1.1. Resistência à compressão

Essa é a característica principal do concreto, ela é obtida através de corpos de provas à compressão centrada. Os corpos são cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura ou 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com modelagem especificada pela NBR 5738 (ABNT, 2015). Esses cilindros são submetidos a cargas até o rompimento, como explica a NBR 5739 (ABNT, 2018). A resistência deve ser associada a idade de 28 dias (ABNT NBR 6118, 2014).

Com esses ensaios é possível definir a resistência à compressão do corpo de prova (f_{cj}), pela equação:

$$f_{cj} = N_{rup}/A$$

f_{cj} – Resistência à compressão do corpo de prova de concreto na idade de (j) dias;

N_{rup} – Carga de ruptura do corpo de prova;

A – Área da seção transversal do corpo de prova.

A norma NBR 6118 (2014, p.23) relata,

“a evolução da resistência à compressão com a idade deve ser obtida através de ensaios especialmente executados para tal. Na ausência desses resultados experimentais pode-se adotar os valores indicados no item 12.3.3”

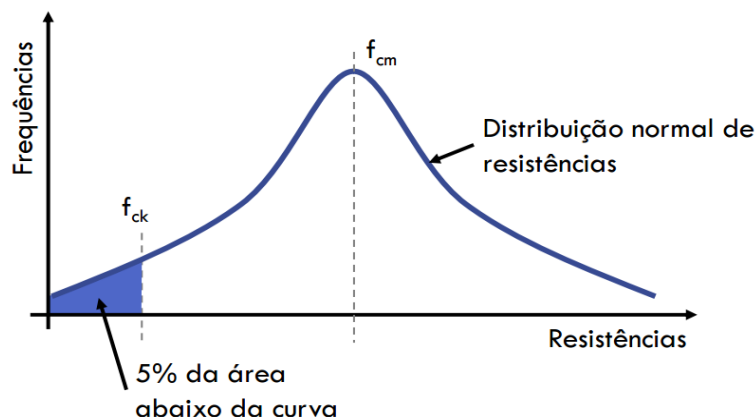
Após a realização de vários ensaios de rupturas é possível determinar a resistência à compressão média (f_{cm}), que seria a média aritmética e o desvio padrão (s). Com esses dados calcula-se a resistência característica (f_{ck}), do concreto à compressão, que apresenta 95% de confiança estatística (ABNT NBR 6118, 2014). Originada pela expressão:

$$f_{ck}=f_{cm} - 1,645 *s$$

Em que:

- a) “ s ” é o desvio padrão, sendo a distância entre a abcissa de f_{cm} e a inflexão da curva, onde a curva muda de concavidade.
- b) 1,65 é a quantidade equivalente a 5% de chances da não obtenção da resistência à compressão f_c .

Figura 1. Densidade de probabilidade da resistência à compressão do concreto



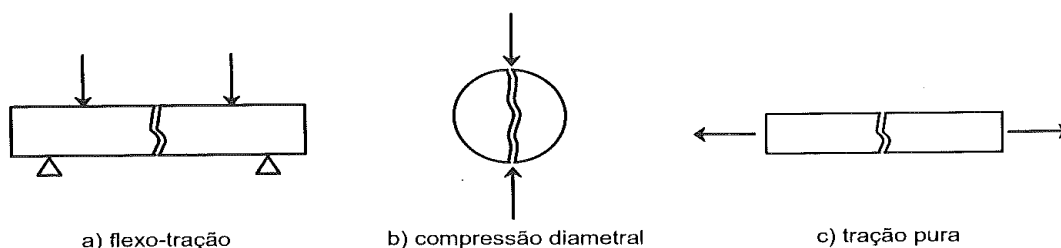
Fonte: Chust, 2007.

As classes de resistência do concreto são definidas pela NBR 8953 (ABNT, 2015), no item 4.2, em que a classificação se dá pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, de acordo com seu f_{ck} .

2.1.1.1.2. Resistência à tração

O concreto não resiste bem às cargas de tração, assim não se considera essa carga na resistência do material. Entretanto existem ensaios para definir a resistência à tração do concreto, sendo eles por: flexo-tração, tração direta e compressão diametral, também é possível definir a resistência de tração pelas equações presentes no item 8.2.5 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Os ensaios devem ser realizados de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011) e NBR 12142 (ABNT, 2010).

Figura 2. Ensaios de resistência a tração no concreto



Fonte: Chust, 2007.

2.1.1.1.3. Durabilidade

O concreto possui uma considerável durabilidade, com capacidade de duração elevada com até 30, 50 e 100 anos, variando o tipo de projeto que o material vai ser executado. A norma NBR 6118 (2014, p.13) relata,

“Durabilidade consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”.

Este é mais um motivo da grande utilização do concreto, a sua resistência contra diferentes agressividades como, umidade, carbonatação, corrosão e outros fatores que possam prejudicar a edificação (MILTON, 2014). Essa qualidade do material resulta numa vida útil maior do projeto, pois além de suportar as cargas do edifício e resistir as condições ambientais, como mostra o Quadro 1, o concreto também desempenha sua função durante um longo período (ABNT NBR 6118, 2014).

Quadro 1. Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto

Categoria	Vida Útil	Exemplos
1	10	Estruturas provisórias ¹⁾
2	10 a 25	Componentes estruturais que possam ser substituídos
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes
5	100	Estruturas de edifício monumentais, pontes e outras estruturas simples
1) as estruturas ou componentes estruturais que possam ser desmontados, tendo em vista a sua realização, não deverão ser considerados como provisórios.		

Fonte: Milton, 2014.

A durabilidade dos materiais influencia diretamente na vida útil das construções, garantindo as condições, adequadas, de uso aos quais foram projetadas. Para assegurar a qualidade da edificação durante esse período, sendo necessário o correto uso e operação da edificação, além de periódicas manutenções e limpezas (ABNT NBR 15575-1, 2013). Essas exigências são aplicadas tanto para os materiais, quando para os sistemas construtivos, para manter desempenho da estrutura de com os critérios da NBR 15575-2 (ABNT, 2013). A norma NBR 15575-2 (2013, p.14) relata,

“A estrutura principal e os elementos que fazem parte do sistema estrutural, comprometidos com a segurança e a estabilidade global da edificação, devem ser projetados e construídos de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizados conforme preconizado em projeto e submetidos a intervenções periódicas de manutenção e conservação, segundo instruções contidas no manual de operação, uso e manutenção”.

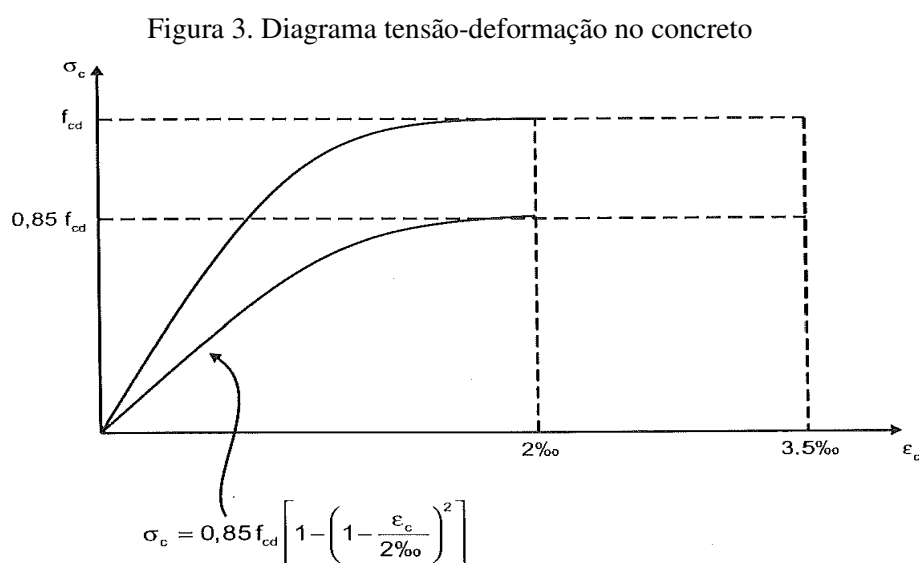
2.1.1.1.4. Cobrimento de Armadura

As condições da durabilidade do concreto dependem da espessura de cobrimento na armadura, pois o aço é facilmente afetado pelas condições do ambiente, o cobrimento do concreto isola a armadura contra as agressividades e corrosões, assim os materiais se mantêm protegidos, sem ocorrer alterações na resistência característica do aço (MODESTO, 1983).

Em relação a classe da agressividade ambiental e ao tipo do concreto, será necessário atender aos parâmetros determinados na NBR 6118 (ABNT, 2014), definidos no item 7.4.2 (ABNT NBR 6118, 2014).

2.1.1.1.5. Módulo de Elasticidade

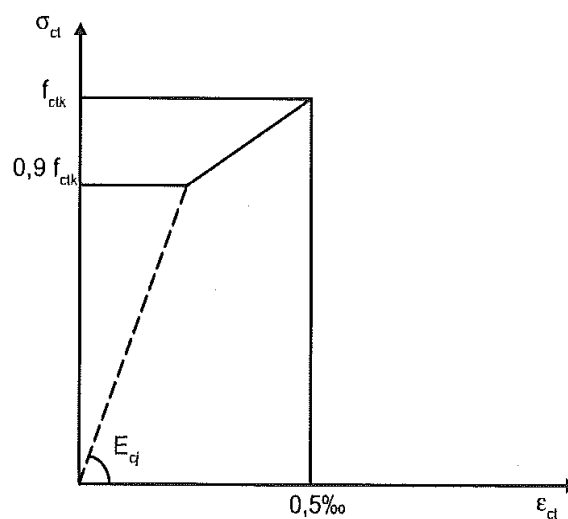
O módulo de elasticidade (E_{CI}) pode ser estabelecido pelo ensaio presente na NBR 8522 (ABNT, 2007), que apresenta a relação de tensão normal e deformação do concreto, pelo diagrama:



Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

Quando não forem realizados ensaios, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial usando as equações do item 8.2.8 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Para o concreto não fissurado, pelos esforços de tração, pode-se utilizar do diagrama tensão-deformação bilinear de tração (ABNT NBR 6118, 2014).

Figura 4. Diagrama tensão-deformação no concreto pelos esforços de tração



Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

2.1.1.2. Aço

A norma NBR 7480 (ABNT, 2007) define os tipos e as características das barras de aço destinadas a armaduras de concreto armado, sendo elas de categorias CA25 e CA50. A norma também especifica a fabricação por laminação quente e que todos os fios devem ser fabricados por trefilação ou processo equivalente. Com fios possuindo diâmetro nominal inferior a 10 mm (CHUST, 2007).

2.1.2. Cálculos

Os requisitos construtivos de segurança são constituídos por exigências, tais quais se referem ao tipo de construção e aos materiais empregados. Para poder garantir as condições de segurança são definidos valores para as ações e esforço presentes na estrutura que avaliam e, principalmente, garantem para os usuários a qualidade e segurança da edificação (ABNT NBR 8681).

2.1.2.1. Ações

As causas que provocam qualquer tipo de reação ou deformação na estrutura de uma construção podem ser denominadas como uma ação, assim como os próprios efeitos e esforços que reagem na própria estrutura (ABNT NBR 6118, 2014). As diferentes ações que podem ocorrer são:

- Ações Permanentes: agem durante toda a vida útil da construção, sem alteração das cargas na estrutura, constantemente sem mudanças exageradas na potência ou na localização desse esforço, também se consideram as cargas permanentes que aumentam com o passar do tempo (ABNT 6118, 2014);
- Ações Variáveis: constituídas por cargas acidentais que tem a possibilidade de ocorrer na construção, essas cargas podem ser variadas, a partir da finalidade da edificação, com possíveis alterações nos esforços e nas áreas de aplicação dessas forças (ABNT NBR 6118, 2014); e
- Ações Excepcionais: são aquelas que raramente agem nas estruturas da edificação. Essas ações têm uma carga extremamente grande com uma duração pequena na construção, com uma baixa probabilidade de ocorrerem. Deve-se estabelecer um valor específico para cada caso particular (ABNT NBR 6118, 2014).

2.1.2.2. Estados limites

Os estados limites são as condições extremas usados para auxiliar no dimensionamento das estruturas e revelam se a estrutura terá a capacidade para suportar as cargas, se é possível usufruir da construção adequadamente e finalmente se o elemento estrutural ficará estável (ABNT NBR 6118, 2014).

2.1.2.2.1. Estados Limites Últimos

O estado limite último é utilizado como parâmetro para definir a paralização do uso da construção, pois ele verifica se a estrutura está em condições para se manter estável (ABNT NBR 8681, 2003). Os itens verificados, para atender essas condições são:

- a) Ações Dinâmicas;
- b) Fadiga;
- c) Perda do Equilíbrio;
- d) Resistência da estrutura pela exposição ao fogo, de acordo com a NBR 15200 (ABNT, 2004).

2.1.2.2.2. Estados Limites Serviço

O estado limite do serviço são os fatores relacionados ao conforto, usando a referência mais adequada para o objetivo da edificação, são estabelecidos parâmetros que melhoram a aparência da estrutura, deixando-a mais agradável na utilização (ABNT NBR 8681, 2003).

O estado limite do serviço não pode apresentar deslocamentos ou fissuras excessivas aos elementos de construção vinculados ao sistema estrutural, estabelecidos no item 7.3.1 da NBR 15575-2 (ABNT, 2013), nem impedir a utilização e funcionalidade de janelas, portas e outros componentes da construção (ABNT NBR 15575-2, 2013).

2.1.2.3. Combinações de Ações

As combinações das ações são realizadas para descobrir quais são os efeitos mais desfavoráveis da estrutura, relacionando os estados limites últimos e

os estados limites de serviços para diferentes combinações dos estados limites últimos e de serviços (ABNT NBR 6118, 2014).

2.1.2.3.1. Combinações Últimas

As combinações últimas são classificadas em normais, especiais e excepcionais. Sempre com a presença das ações permanentes nas combinações, especificadas na NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 11.8.2.4.

2.1.2.3.2. Combinações de Serviços

As combinações de serviços são classificadas pelo tempo que estão presentes na estrutura, como: quase permanente, frequentes e raras. Definidas pelo item 11.8.3.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.1.2.4. Requisitos analíticos de segurança

O objetivo da análise estrutural é verificar os estados limites últimos e de serviço. Essa análise informa as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos, em uma parte ou em toda a estrutura (ABNT NBR 8186, 2003).

Para esse procedimento de avaliação se utiliza a partir de seu modelo estrutural, capaz de idealizar a forma com as composições estruturais básicas, formam um sistema estrutural resistente, que fornece as informações de maneira clara para a compreensão de todos os caminhos dos esforços que reagem até os apoios da estrutura. Esse modelo tem que representar a geometria, os carregamentos, as condições e as características dos materiais. Análises locais complementares também devem ser efetuadas quando a não linearidade introduzida pela fissuração for importante, como, por exemplo, na avaliação das flechas (ABNT NBR 6118, 2014).

Para poder analisar os requisitos da segurança relativos a cada um dos possíveis estados limites é preciso avaliar as condições das ações presentes com os esforços de resistência dos elementos estruturais que podem ser expressos pela desigualdade do tipo:

$$\theta (F_d, f_d, a_d, \mu_d, C) \geq 0$$

onde:

F_d – representa os valores de cálculo das ações;

f_d – representa os valores de cálculo das propriedades dos materiais, inclusive das resistências;

a_d – representa os valores de cálculo dos parâmetros que descrevem a geometria da estrutura;

μ_d – representa os valores de cálculo dos coeficientes que cobrem as incertezas do método de cálculo adotado;

C – representa as constantes empregadas, inclusive como restrições preestabelecidas no projeto.

A garantia das condições de segurança é realizada estabelecendo que as solicitações correspondentes as cargas majoradas (S_d) sejam menores que as solicitações últimas (R_d), expresso por:

$$\theta (S_d, R_d) \geq 0$$

$$S_d = S (F_d, a_{S_d}, \mu_{S_d}, C_S); \text{ e } R_d = R (f_d, a_{R_d}, \mu_{R_d}, C_R)$$

Assim sendo simplificada pela expressão:

$$R_d \geq S_d$$

As condições de segurança de estruturas de concreto especificam que as resistências calculadas precisam ser inferiores as resistências características reais do concreto, para criar uma margem de segurança, que evita o uso desse material até seu estado limite (ABNT NBR 8186, 2003).

2.1.2.5. Limites para dimensões

No processo de concepção do projeto estrutural são estabelecidos valores mínimos de dimensões dos elementos estruturais do concreto para fornecer as condições de execução adequadas e assim evitar desempenhos inaceitáveis. Esses limites definem que a seção transversal das vigas não deve apresentar largura menor que 12 cm e das vigas-parede, menor que 15cm. Para os pilares e pilares-paredes maciças, a seção transversal não deve apresentar dimensão menor que 19cm (ABNT NBR 6118, 2014).

De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2014) as lajes maciças devem ser respeitadas, os seguintes limites mínimos para a espessura:

- a) 5 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- b) 7 cm para lajes de piso ou de cobertura em balanço;
- c) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- d) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- e) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em viga, $l/42$ para lajes de piso biapoiadas e $l/50$ para lajes piso contínuas;
- f) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo.

2.1.2.6. Deslocamentos limites

Para a verificação do serviço do estado limite de deformação da estrutura, através dos valores dos deslocamentos limites, os quatro grupos básicos estruturais têm que seguir as deformações indicadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 13.3. Os grupos são classificados em:

- Aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável;
- Efeito específico: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;
- Efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos não ligados a estrutura;
- Efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação as hipóteses de cálculo adotados.

2.2. CONDIÇÕES E EXIGÊNCIAS DOS ELEMENTOS ESTRUTURAS PARA RESISTENCIA CONTRA INCÊNDIOS

Durante a ação do incêndio, os diversos elementos estruturais, assim como os materiais presentes neles, ficam expostos a uma elevada temperatura e em contato direto com fogo. Esse ambiente acaba sendo prejudicial para a edificação e para o desempenho da estrutura (ABNT NBR 14432, 2001).

Para prevenir danos maiores na construção, a norma NBR 14432 (ABNT, 2001), estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural. A norma considera que a estrutura precisa ser capaz de resistir aos efeitos de isolamento e estanqueidade,

por um tempo suficiente para: a realização da fuga dos usuários da edificação de maneira segura, manter a segurança durante o combate do incêndio por profissionais do corpo de bombeiros e finalmente minimizar os danos na infraestrutura (ABNT NBR 14432, 2001).

Considerando que a estrutura siga as condições impostas anteriormente, ela garante uma taxa de segurança maior que limita o risco da vida humana e impede que fogo se propague em todo o edifício. Para que as exigências de segurança sejam atendidas, as funções de corta fogo e suporte precisam ser realizadas pela estrutura da edificação (ABNT NBR 15200, 2004).

2.2.1. Função Corta-fogo

A principal finalidade do corta-fogo é manter o isolamento térmico e estanqueidade das chamas, evitando a passagem do fogo e o calor ultrapassem o local do incêndio inicial, para as demais áreas da edificação (ABNT NBR 15200, 2004).

2.2.2. Função de suporte

A capacidade da estrutura suportar a construção como um todo, evitando o colapso global e ou colapso local progressivo, nas condições de causadas pelo incêndio (ABNT NBR 15200, 2004).

2.2.3. Efeitos dos Materiais durante o incêndio

As funções indicadas anteriormente devem ser verificadas sob combinações excepcionais de ações, no estado limite último, de modo que sejam aceitáveis plastificações e ruínas locais que não determinem colapso além do local. A NBR 14432 (ABNT, 2001), define em função das características da

construção e do uso da edificação, as ações que devem ser consideradas para representar a situação de incêndio (ABNT NBR 15200, 2004).

Para estimar o valor da temperatura média de um incêndio-padrão, é analisado a temperatura em função do tempo, dada pela seguinte expressão:

$$\Theta_g = \Theta_o + 345 \log (8t + 1)$$

Onde:

t – Tempo em minutos;

Θ_o – Temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20°C;

Θ_g – Temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

2.2.3.1. Concreto

As alterações das propriedades de resistência e rigidez do concreto, quando submetido a compressão axial a elevadas temperaturas, deve ser obtida pela tabela a seguir:

Quadro 2. Valores das relações $f_{c,\theta}/f_{ck}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal (2000kg/m³ a 2 800 kg/m³) preparados com agregados predominantemente silicosos ou calcáreos

Temperatura do concreto θ °C	Agregado silicoso		Agregado calcáreo	
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$
1	2	3	4	5
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

Fonte: ABNT NBR 15200, 2004.

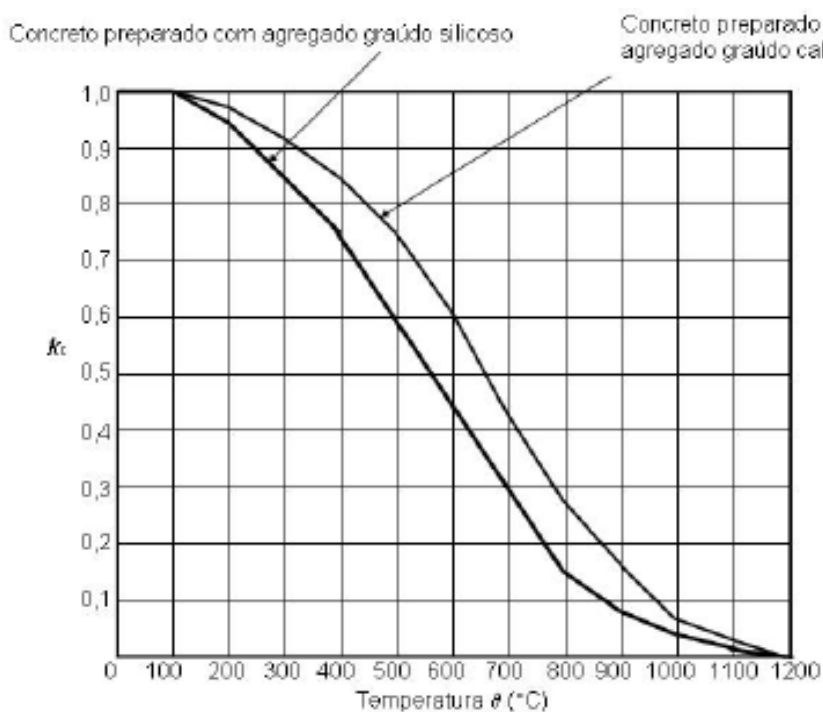
Os valores indicados no Quadro 12 podem ser adquiridos da equação:

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck}$$

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto em situação normal;

$k_{c,\theta}$ – fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ , conforme figura 5.

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



Fonte: ABNT NBR 15200, 2004.

O módulo de elasticidade do concreto decresce com o aumento da temperatura, conforme mostrado na figura 7, podendo ser obtido pela seguinte equação:

$$E_{ci,\theta} = k_{cE,\theta} E_{ci}$$

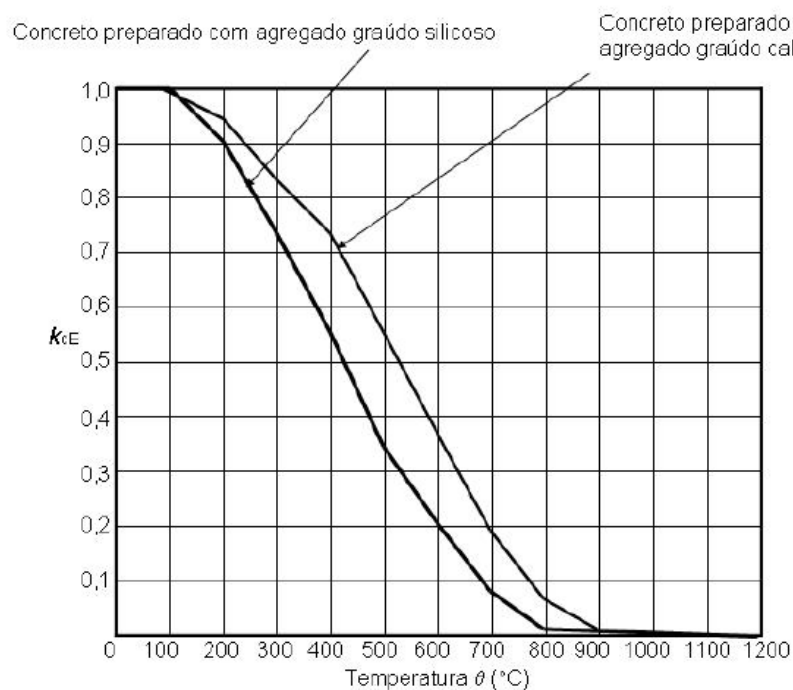
onde:

E_{ci} – módulo de elasticidade inicial do concreto em situação normal.

Essa mesma expressão vale para o módulo secante E_{cs} ;

$k_{cE,\theta}$ – fator de redução do módulo de elasticidade do concreto na temperatura θ , conforme figura 6.

Figura 6. Fator de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 15200, 2004.

2.2.3.2. Aço

A alteração das propriedades de resistência ao escoamento e rigidez do aço da armadura passiva a elevadas temperaturas deve ser obtida a partir da Figura 3.

Quadro 3. Valores das relações $f_{y,\theta}/f_{yk}$ e $E_{s,\theta}/E_s$ para aços de armadura passiva

Temperatura do aço, θ °C	$f_{y,\theta}/f_{yk}$			Es,θ/Es Temperatura do aço, θ °C $f_{y,\theta}/f_{yk}$ Es,θ/Es	
	Tração		Compressão CA-50 ou CA-60	CA-50	CA-60
	CA-50	CA-60			
1	2	3	4	5	6
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,89	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,78	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,67	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,56	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,33	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,10	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,06	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: ABNT NBR 15200, 2004.

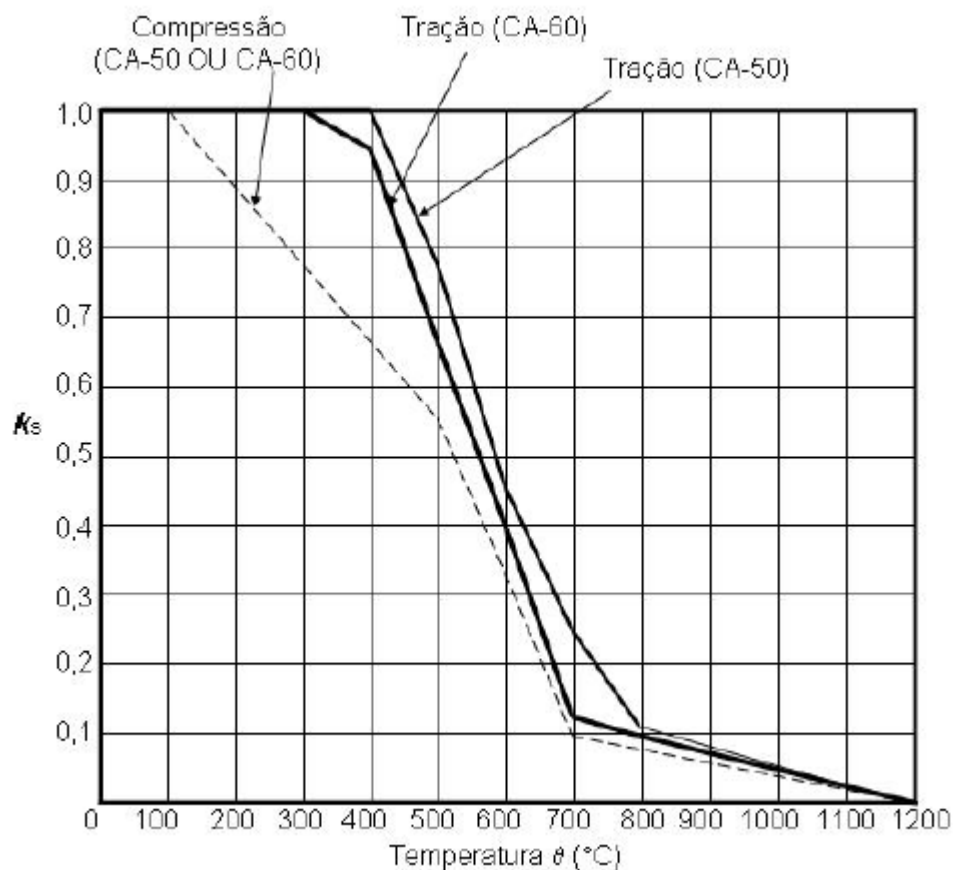
Os valores indicados no Quadro 13 podem ser adquiridos da equação:

$$f_{y,\theta} = k_{s,\theta} f_{yk}$$

f_{yk} – resistência característica do aço de armadura passiva em situação normal;

$k_{s,\theta}$ – fator de redução da resistência do aço na temperatura θ .

Figura 7. Fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 15200, 2004.

O módulo de elasticidade do aço da armadura passiva decresce com o aumento da temperatura, conforme mostrado na figura 8, podendo ser obtido pela expressão:

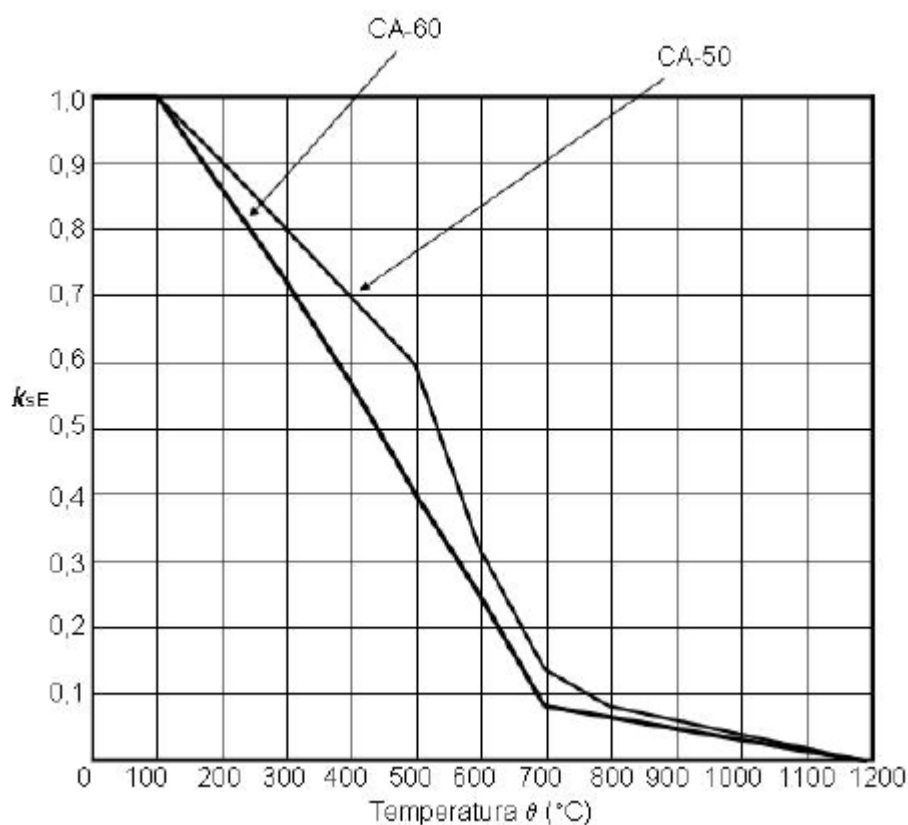
$$E_{s,\theta} = k_{sE,\theta} E_s$$

onde:

E_s é o módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em situação normal;

$k_{sE,\theta}$ é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura θ .

Figura 8. Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura



Fonte: ABNT NBR 15200, 2004.

2.2.4. Ação correspondente do incêndio

É possível representar a ação do calor na estrutura através de um intervalo de tempo da exposição do incêndio, também conhecido como Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), gera em cada elemento estrutural, função de sua forma e exposição ao fogo, uma certa distribuição de temperatura (ABNT NBR 14432, 2001).

De acordo com a NBR 15200, (2004, p.11) relata,

“Este processo gera a redução da resistência dos materiais e da capacidade dos elementos estruturais além de esforços solicitantes decorrentes de alongamento axiais de gradientes térmicos”.

Assim tal parâmetro é utilizado em projeto para estimar a resistência dos elementos estruturais, em altas temperaturas, em relação com o incêndio-padrão. Entretanto precisa ser constatado que tal parâmetro, não tem relação com a duração real do incêndio ou tempo de resposta do corpo de bombeiros (ABNT NBR 14432, 2001).

2.2.5. Verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio

Em condições usuais, as estruturas são projetadas em temperatura ambiente e, dependendo das suas características e uso, devem ser verificadas em situação de incêndio (ABNT NBR 15200, 2004). Os métodos de verificação são:

2.2.5.1. Método Tabular

Nenhuma verificação é efetivamente necessária, bastando atender as dimensões das tabelas (4 a 12) da Norma NBR 15200 (ABNT, 2004), em função do tipo do elemento estrutural e do TRRF. Essas dimensões são atribuídas para a espessura das lajes, a largura das vigas, as dimensões das seções transversais de pilares e tirantes, entre outros (ABNT NBR 15200, 2004).

2.2.5.2. Método Simplificado de Cálculo

As solicitações de cálculo em situação de incêndio (S_d, f_i) podem ser calculadas admitindo-se iguais a 70% das solicitações de cálculo em situação normal, ou seja, $S_d, f_i = 0,7 \cdot S_d$ (ABNT NBR 15200, 2004).

Também pode ser considerado a resistência do concreto sob a ação do incêndio por uma distribuição uniforme na seção de concreto ou na armadura total a perda da resistência por aquecimento do concreto ou das armaduras respectivamente. Assim como é possível calcular o esforço da resistência de cada elemento estrutural, com base na distribuição da temperatura obtida para sua seção transversal, considerando exposição ao fogo conforme o TRRF. Essa distribuição de temperatura pode ser obtida na literatura técnica ou calculada em programas específicos (ABNT NBR 15200, 2004).

2.2.5.3. Métodos Gerais de Cálculo

De acordo com a NBR 15200, (2004, p.11) define,

“A combinação de ações em situação de incêndio composta rigorosamente com base na ABNT NBR 8681. Os esforços solicitantes de cálculo, que podem ser acrescidos dos efeitos do aquecimento, desde que os calculados por modelos não lineares capazes de considerar as profundas restrições de esforços que ocorrem”.

2.2.5.4. Método Experimental

De acordo com a NBR 15200, (2004, p.17) define,

“Em casos especiais, como peças pré-moldados industrializados, pode se considerar a resistência ao fogo superior a calculadas com base na NBR 15200, desde que sejam justificados por ensaios, conforme a NBR 5628”.

2.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Devido ao fato que o concreto é composto por diferentes substâncias, em sua mistura, que resulta numa mistura heterogênea, assim dificulta na análise mais precisa do comportamento do concreto durante a exposição do fogo e finalmente as altas temperatura. A natureza polifásica do concreto confere um comportamento complexo, quando submetido a temperatura elevadas. Em incêndios, as estruturas devem atender a um tempo mínimo, para garantir a segurança. As reações serão diferentes para cada elemento, assim gerando diversos efeitos, causados pelo fogo e pelas reações internas no concreto (OLIVEIRA, 2006).

Mesmo com complexidades para definir com detalhe, o procedimento que ocorre no concreto durante as diversas situações de incêndios, é possível notar que o fogo causa certas alterações no material, o mais visível seria a mudança da coloração, especialmente se os agregados são silicosos e calcários, com a presença de componentes ferrosos (CÁNOVAZ, 1988).

2.3.1. Reação ao fogo dentro o contexto do sistema global

O controle das características de reação ao fogo dos materiais, está associada a incorporação dos elementos construtivos, para limitar o crescimento, propagação do incêndio e auxiliar na evacuação e combate, destacados no Quadro 4. O comportamento diante do fogo dos materiais combustíveis utilizados na incorporação dos sistemas construtivos pode ser conhecido mediante ensaios laboratoriais. Tais ensaios permitem avaliar as características dos materiais, perante a reação do fogo, auxiliando na seleção deles, para obter melhores níveis de segurança contra incêndio (SEITO, 2008).

Quadro 4. Sistema global da segurança contra incêndio

Elemento	Principais medidas de prevenção contra incêndio	
	relativas ao processo produtivo do edifício	Relativas ao uso do edifício
Precaução contra o início do incêndio	-Correto dimensionamento e execução de instalações de serviço -Distanciamento seguro entre fontes de calor e materiais combustíveis -Provisão de sinalização de emergência	-Correto dimensionamento e execução de instalações do processo -Correta estocagem e manipulação de líquidos inflamáveis e combustíveis e de outros produtos perigosos -Manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos e instalações que podem provocar o início do incêndio -Conscientização do usuário para a prevenção do incêndio
Limitação do crescimento do incêndio	-Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos -Controle das características de reação ao fogo dos materiais incorporados aos elementos construtivos	-Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos
Extinção inicial do incêndio	-Provisão de equipamentos portáteis -Provisão de sistema de hidrantes -Provisão de sistema de chuveiros automáticos -Provisão de sistema de detecção e alarme -Provisão de sinalização de emergência	-Manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos de proteção destinados a extinção inicial do incêndio -Elaboração de planos para a extinção inicial do incêndio -Treinamento dos usuários para efetuar o combate inicial do incêndio -Formação e treinamento de brigadas de incêndio
Limitação da propagação do incêndio	-Compartimentação horizontal -Compartimentação vertical -Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos -Controle das características de reação ao fogo dos materiais incorporados aos elementos construtivos	-Manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos destinados a compor a compartimentação horizontal e vertical -Controle da disposição de materiais combustíveis nas proximidades das fachadas

Evacuação segura do edifício	-Provisão de sistema de detecção e alarme -Provisão de sistema de comunicação de emergência -Provisão de rotas de fuga seguras -Provisão do sistema de iluminação de emergência -Provisão do sistema do controle do movimento da fumaça -Controle das características de reação ao fogo dos materiais incorporados aos elementos construtivos	-Manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos destinados a garantir a evacuação segura -Elaboração de planos de abandono do edifício -Treinamento dos usuários para a evacuação de emergência -Formação e treinamento de brigadas de evacuação de emergência
Precaução contra a propagação do incêndio entre edifícios	-Distanciamento seguro entre edifícios -Resistência ao fogo da envoltória dos edifícios	-Controle das características de reação ao fogo dos materiais incorporados aos elementos construtivos (na envoltória do edifício) -Controle da disposição de materiais combustíveis nas proximidades das fachadas
Precaução contra o colapso estrutural	-Resistência ao fogo dos elementos estruturais -Resistência ao fogo da envoltória do edifício	-
Rapidez, eficiência e segurança das operações de combate e resgate	-Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos -Controle das características de reação ao fogo dos materiais incorporados aos elementos construtivos	-Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos

Fonte: SEITO, 2008.

2.3.2. Evolução do incêndio a sua relação com os materiais

Um incêndio geralmente apresenta uma fase inicial, na qual um aumento excessivo da temperatura inicia a combustão de um material, originando fogo nesse local, assim essa fase é mais localizada, limitado e de fácil controle, indicado no Quadro 5.

Quadro 5. Fases de um incêndio e sua relação com os materiais

Fases	Evolução Característica dos materiais Envolvidos
Fase 1	Fonte localizada: calor desenvolvido limitado Reação ao fogo: - incombustibilidade - inflamabilidade
Fase 2	Propagação do incêndio Reação ao fogo: - incombustibilidade - inflamabilidade - propagação de chamas - transmissão de calor Resistência ao fogo
Fase 3	Reação ao fogo: Pânico - vítimas Resistência ao fogo: - medidas de extinção - salvamento: pessoas e bens

Fonte: SEITO, 2008.

O processo e reação ao fogo são fundamentais, para definir a magnitude que o material libera de calor, ocasionado na formação de gases e vapores. A liberação dos calores pode acabar atingindo outros componentes, próximos ao local, elevando as temperaturas e consequentemente aumentando a área do fogo, nessa etapa é fundamental a resistência ao fogo dos elementos construtivos e a função vedar a expansão das chamas. Na etapa final o incêndio já consumiu a maioria dos materiais combustíveis existente no ambiente. Independente da temperatura presente e do desenvolvimento das chamas, é nessa fase que os elementos e componentes têm que desempenhar a função para a qual foram projetados, para manter as condições de segurança adequados na evacuação dos usuários, mantendo-se íntegros e estáveis durante um período predeterminado (SEITO, 2008).

2.3.3. Comportamento dos materiais do concreto em elevadas temperaturas

Os elementos que constituem o concreto armado reagem de diferentes formas, quando submetido a exposição do fogo e altas temperaturas, para cada material ocorre uma reação física e química, como apresentado a seguir:

2.3.3.1. Reação d'Água

Durante o incêndio a umidade presente no concreto é evaporado através dos poros no concreto, assim estabilizando a temperatura o material, que acaba resistindo mais a ação do fogo. Entretanto, se o componente estiver com água em excesso, dificultando na transferência das massas, isso pode resultar em maiores efeitos de pressão no elemento, como também poros mais finos, conseqüentemente, iriam gerar mais trincas decorrentes da contração da pasta. Por essas razões, o excesso de água livre contribui na desagregação acelerada da mesma (KALIFA,2000).

2.3.3.2. Reação do Aço

Os incêndios geralmente não chegam à temperatura que possam causar a fusão do aço. A densidade do aço não é afetada pela temperatura assim considera a constante de $\rho_{aço} = 7850 \text{ kg/m}^3$. O módulo de elasticidade do aço é influenciado pela natureza do aço e tensões residuais, à medida que a temperatura aumenta a taxa de redução é maior que a observada na resistência (KALIFA,2000).

2.3.3.3. Reação do cimento Portland

As pastas de cimento hidratado têm em sua composição de 50 a 60% de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), 20 a 25% de hidróxido de cálcio, também chamado de portlandita, (Ca(OH)), 15 a 20% de sulfoaluminatos de cálcio e grão de clínquer não hidratados (MEHTA e MONTEIRO,1994).

Entre 4 a 80°C, os produtos hidratados se mantêm estáveis quimicamente. A água absorvida pelo concreto endurecido em virtude do ambiente é evaporada entre 65°C e 80°C e a água livre nos interstícios do concreto, entre 80°C e 100°C. A expansão térmica da pasta de cimento aumenta a linearidade com a temperatura até 100°C, quanto toda a água livre é evaporada, a pasta começa a perder a estabilidade dos 100° aos 200°C (NEVILLE,1997).

Acima dos 200°C, ocorre uma leve reação físico-química acentuando o aparecimento de fissuras e uma ligeira perda de resistências, persistindo até 300°C. Alteração da resistência a flexão e módulo de elasticidade a 204°C permanece entre 70 a 80% do valor inicial, a 427°C permanece 40 a 50% do valor inicial (NEVILLE,1997).

Uma série de reações na pasta de cimento endurecido ocorrem entre 400 e 600°C, dessecação dos poros seguido da decomposição dos produtos de hidratação e destruição do gel de C-S-H. A reação endotérmica da desidratação do hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ libera o oxido de cálcio CaO e água evaporada (GRATTAN-BELEW):



2.3.3.4. Reação dos Agregados

Os agregados ao serem aquecidos sofrem expansão que dependem da taxa de aquecimento e tamanho do agregado podem ser destrutivos para o concreto. Isso ocorre porque os agregados compõem cerca de 70% do concreto.

O aumento no volume dos agregados em razão da expansão térmica produz “pop outs” e “spallings” no concreto. A composição mineralógica dos agregados governa a dilatação térmica diferencial entre a pasta e os agregados e consequentemente, a resistência última da zona de transição (MEHTA e MONTEIRO,1994).

Quando o concreto é submetido a temperatura elevada, as tensões térmicas dentro do concreto são geradas na interface do agregado pela diferença de dilatação térmicas entre a argamassa e o próprio agregado gráúdo (NEVILLE,1997).

2.3.3.5. Influência do conteúdo de combustão

O desenvolvimento e a duração de um incêndio são, principalmente, influenciados pela quantidade e o tipo dos materiais queimados. Dessa forma é possível determinar a duração do incêndio, dividindo a quantidade de combustível pela taxa ou velocidade de combustão. Esse parâmetro é o potencial calorífico, em kg/m^2 , que expressa a quantidade de energia térmica que pode ser liberada pela queima do material combustível existente em um ambiente (SOUZA, 2005).

2.3.3.6. Influência da ventilação

A ação do fogo gera gases produzidos pela combustão dos materiais, as variações das temperaturas provocam um movimento ascensional dos gases, que acabam substituindo o ar presente na edificação, através das janelas e portas. Então, a taxa de combustão de um incêndio pode ser determinada pela velocidade do suprimento de ar, estando relacionada com a quantidade de combustível, as condições presentes do ambiente em chamas e das dimensões das aberturas existentes na edificação (SOUZA, 2005).

2.4. ENSAIOS

Para definir qual será a redução de resistência de compressão do concreto, causado pela exposição de altas temperaturas, foi realizado, através de um método experimental, diversos ensaios com corpos-de-prova cilíndrico, tendo como parâmetros principais da avaliação; duração 30min, 60min, 90min; grau da temperatura de 300°C, 500°, 800°C, com de resfriamento lento ou brusco (LORENZON,2014).

Os corpos-de-prova possuíam 10cm de altura, com 5cm de diâmetro na base, no total foram utilizadas 24 amostras, compostos de agregados graúdos, agregados miúdos, cimento e água, e finalmente com amostragem de 25MPa (LORENZON,2014).

Os ensaios eram feitos se utilizando de uma prensa, para avaliar as tensões de ruptura para cada situação estimado, como se apresentam nos quadros 6, 7 e 8 que apresentam os valores de resistência à compressão em MPa para cada corpo-de-prova exposto em altas temperaturas, nas diversas formas de ensaio. Para cada grupo de corpos-de-prova ensaiados nas mesmas características é apresentada a média aritmética. Os corpos-de-prova que não foram levados à mufla foram rompidos para estabelecer um parâmetro inicial de análise. A média entre eles foi de 20,87 MPa (LORENZON,2014).

Quadro 6. Resistência à compressão do concreto ensaio à 300°C

300°C		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média
30 minutos	Lento	18,88	19,15	14,28	20,02	18,08
	Brusco	11,11	14,90	19,81	16,42	15,56
60 minutos	Lento	21,90	11,61	10,00	11,82	13,83
	Brusco	15,23	9,09	12,88	13,52	12,68
90 minutos	Lento	11,18	12,05	16,22	11,45	12,73
	Brusco	9,72	12,11	14,26	10,75	11,71

Fonte: LORENZON, 2014.

Quadro 7. Resistência à compressão do concreto ensaio à 500°C

500°C		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média
30 minutos	Lento	18,32	12,96	15,93	19,57	16,70
	Brusco	17,39	12,32	15,92	15,21	15,21
60 minutos	Lento	12,96	11,89	13,23	16,30	13,60
	Brusco	9,65	12,72	13,48	12,72	12,14
90 minutos	Lento	12,80	12,16	13,85	8,48	11,82
	Brusco	7,61	11,15	11,62	8,47	9,71

Fonte: LORENZON, 2014.

Quadro 8. Resistência à compressão do concreto ensaio à 800°C

800°C		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média
30 minutos	Lento	5,91	5,12	5,15	9,53	6,43
	Brusco	5,23	6,83	4,82	4,16	5,26
60 minutos	Lento	4,75	5,66	5,20	4,51	5,03
	Brusco	3,39	3,30	0	0	3,35
90 minutos	Lento	3,68	3,48	3,56	0	3,57
	Brusco	2,58	3,22	3,14	1,64	2,65

Fonte: LORENZON, 2014.

Nos itens a seguir, cada característica ensaiada será analisada separadamente.

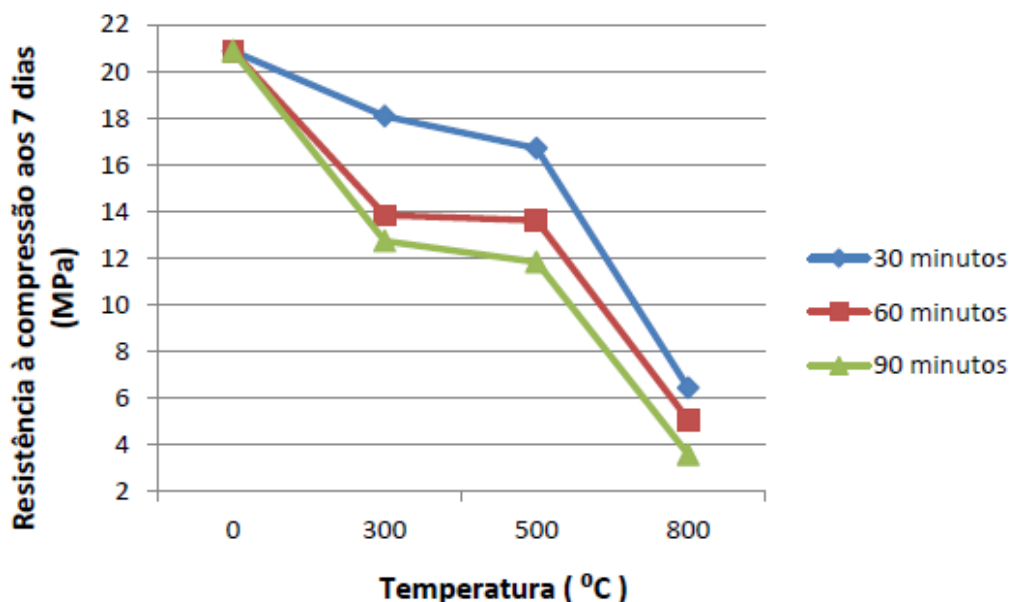
2.4.1. Redução da resistência à compressão devido a aumento nas temperaturas

O gráfico apresentado na figura 9 demonstra representa a diminuição da resistência à compressão do concreto submetido a altas temperaturas. Pode-se notar na situação, de 300°C de temperatura as reduções foram de 15%, num período de 30 minutos, 30% para 60 minutos e 40% em 90 minutos. Assim, fica evidente um crescimento gradual, na redução da resistência, para durações

maiores de exposição do fogo. Devido aos coeficientes de segurança impostos pela NBR 6118, 2014 a redução observada raramente ocasionará no colapso estrutural. Os indícios do gráfico revelam que reduções maiores de 50%, apenas ocorreram para 500° em 90 minutos, ou para temperaturas superiores a essa (LORENZON,2014).

É visível que os valores da resistência não apresentavam grande variações, no intervalo entre 300°C a 500°C, entretanto quando a temperatura ultrapassa esses valores acontece uma redução na resistência mais acentuada, possivelmente causado pela dissociação do C-S-H em CaO e água, o que geralmente ocorre nessas temperaturas, sendo um elemento que contribui satisfatoriamente para a resistência do concreto. Durante a temperatura de 800°C as reduções chegaram à 70% em 30 minutos e 80% em 90 minutos (LORENZON,2014).

Figura 9. Perda de resistência em função do aumento da temperatura

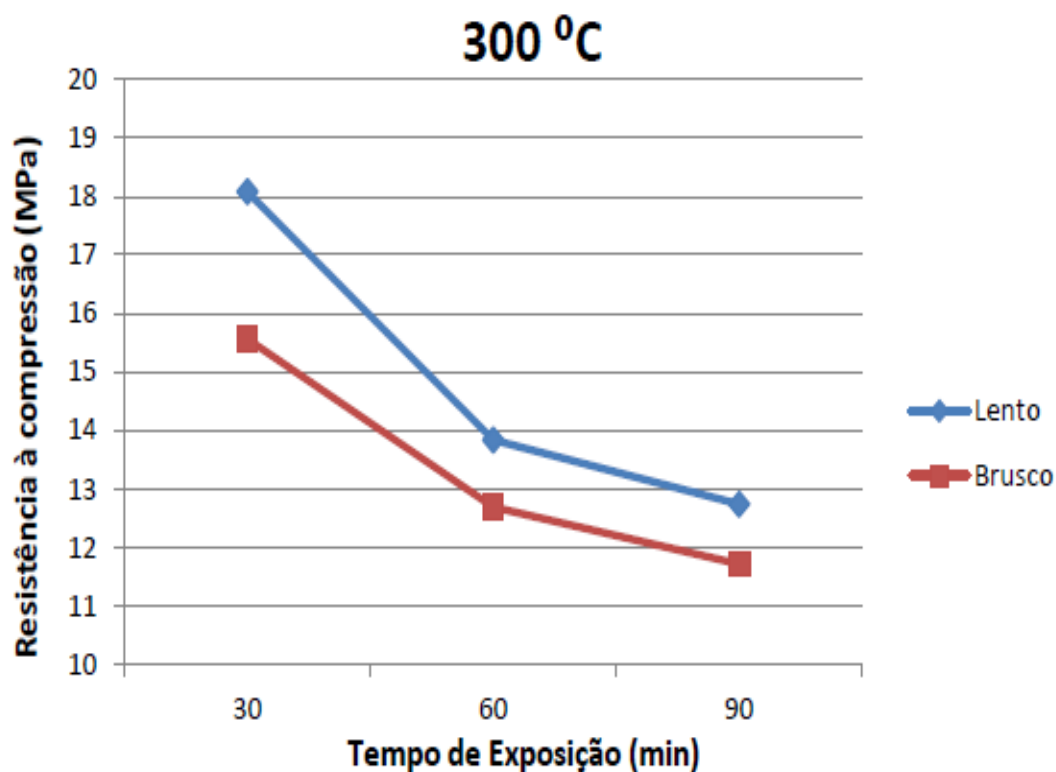


Fonte: LORENZON, 2014

2.4.2. Redução da resistência à compressão devido ao tempo de exposição às altas temperaturas

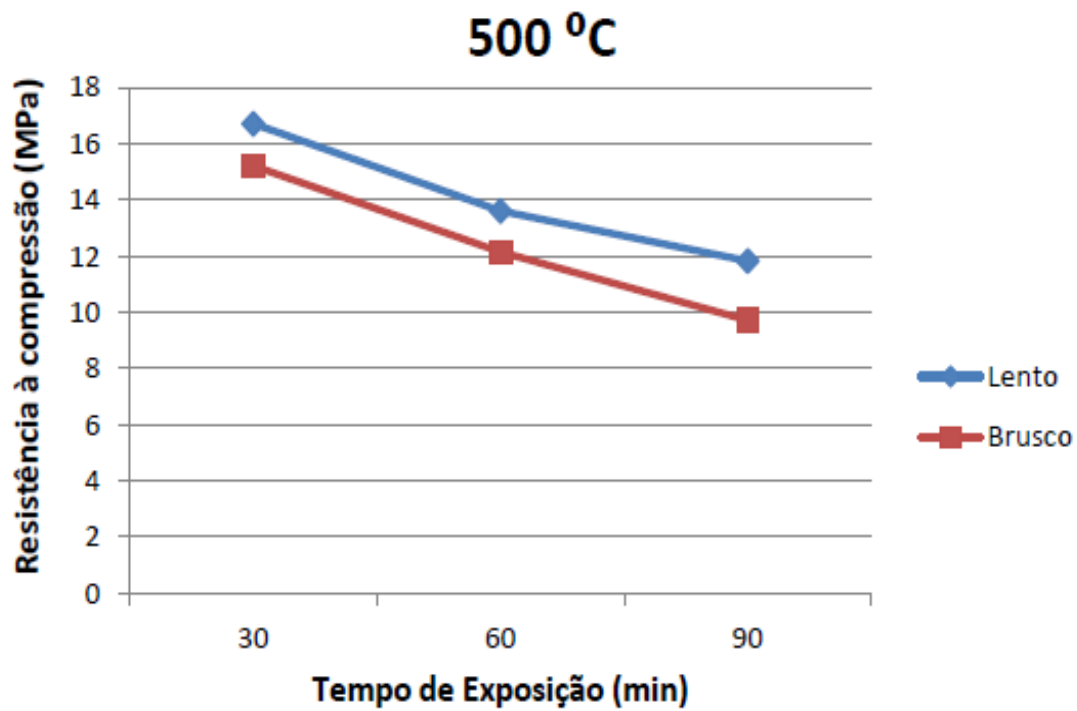
As figuras 10, 11 e 12 representam gráficos para os diferentes picos de temperaturas ensaios em função do tempo de exposição. Pode-se observar que em todos os casos houve diminuição da resistência à compressão do concreto. As diferenças ocorridas a cada meia hora a mais que os corpos-de-prova permaneciam na mesma temperatura chegam a ser de quase 24%. Esses dados afirmam a necessidade da rápida intervenção nos incêndios, devido à variação da resistência que sofrem as estruturas em alguns minutos (LORENZON,2014).

Figura 10. Efeito dos modos de resfriamento na temperatura de 300°



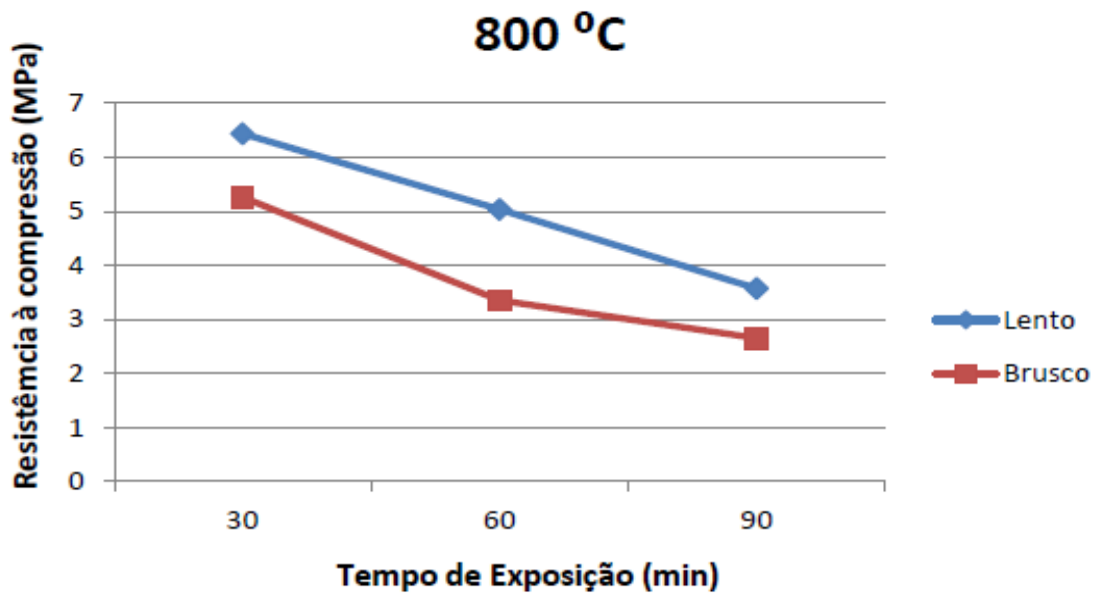
Fonte: LORENZON, 2014

Figura 11. Efeito dos modos de resfriamento na temperatura de 500°



Fonte: LORENZON, 2014

Figura 12. Comparação entre os modos de resfriamento na temperatura de 800°C



Fonte: LORENZON, 2014

2.4.3. Redução da resistência à compressão devido à forma de resfriamento

Os gráficos das figuras 11, 12 e 13 apresentam as informações adquiridas da diminuição da resistência do concreto em função do aumento do tempo de exposição em cada pico de temperatura. Foram utilizadas duas formas de resfriamento do concreto, devido aos estudos já relacionados no assunto que constam que o resfriamento brusco aumenta a perda de resistência à compressão do concreto, assim o experimento valida essas declarações. Em todos os casos o resfriamento brusco apresentou valores menores de resistência à compressão, porém as diferenças não foram em nenhum caso superior a 14% (LORENZON,2014).

2.4.4. Outros Aspectos relevantes

Os corpos-de-prova ensaiados em 800°C a partir dos 60 minutos, não puderam ser capeados devido a fragilidade com que se encontravam, pois os corpos-de-prova quebravam-se e esfarelavam-se durante a retirada dos mesmos moldes de capeamento (LORENZON,2014).

3. METODOLOGIA

Através da aplicação do software Eberick V8, será realizado um projeto estrutural de uma edificação, para avaliar o comportamento da estrutura durante a ação de incêndio. Serão feitas diversas simulações, para analisar o desempenho do projeto, para cada situação proposta, envolvendo diferentes locais e intensidades do incêndio.

3.1. EDIFICAÇÃO

O prédio analisado para o estudo foi a base inicial para definir e realizar o projeto estrutural, as informações são:

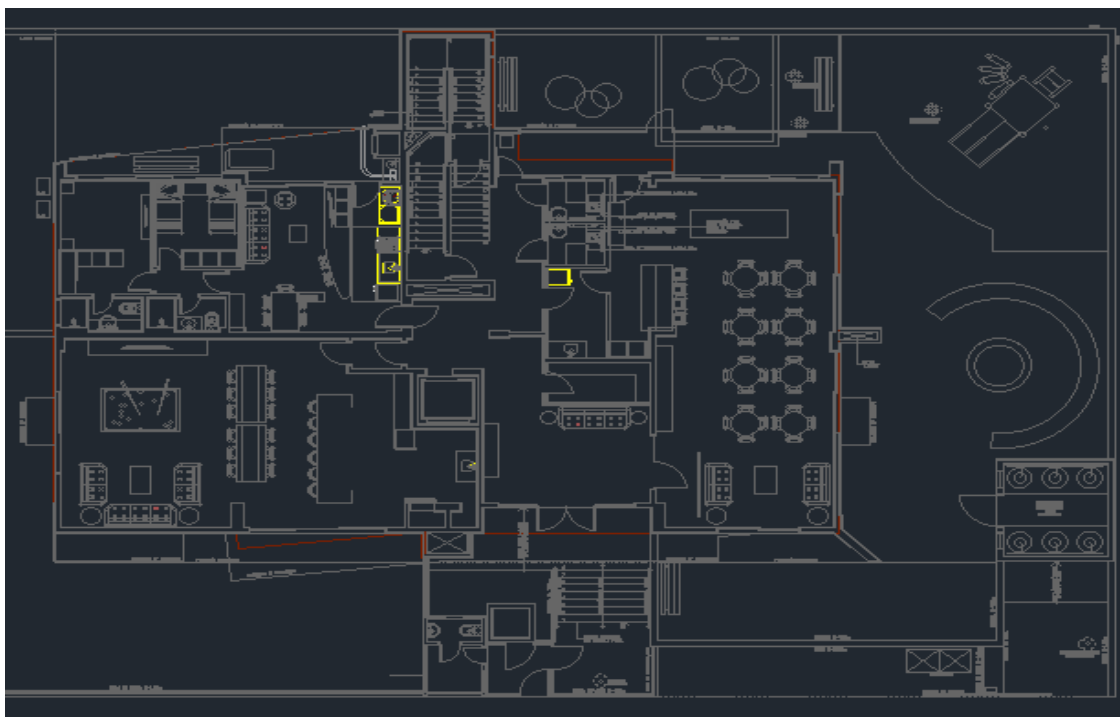
- Tipo de construção: residencial;
- Tipo de concreto aplicado: C25;
- 5 pavimentos: subsolo, térreo, tipo 1, tipo 2, ático;
- Altura da edificação: 11,2m;
- 4 apartamentos por andar;
- Área do subsolo: 637,91m²;
- Área dos pavimentos: 370,48m²;
- Área do ático: 227m².

Figura 13. Pavimento Subsolo



Fonte: o autor, 2020.

Figura 14. Pavimento Térreo



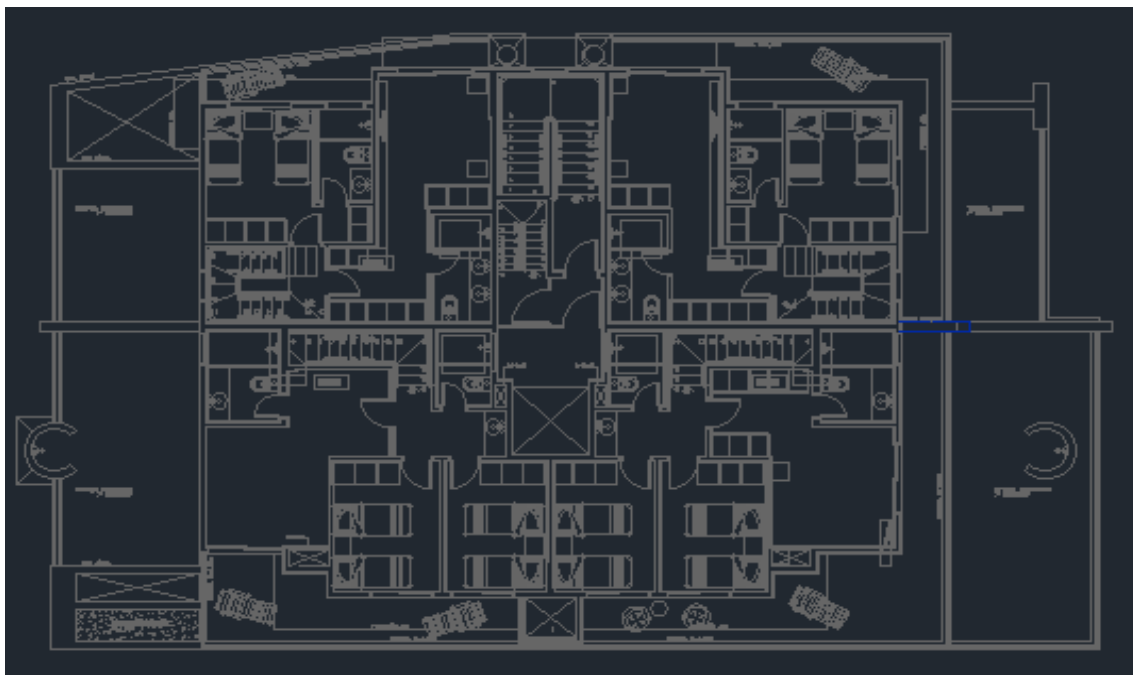
Fonte: o autor, 2020.

Figura 15. Pavimento Tipo



Fonte: o autor, 2020.

Figura 16. Pavimento Ático



Fonte: o autor, 2020.

3.2. MODELO ESTRUTURAL INICIAL

Primeiramente foi carregada a arquitetura no software Eberick V8, em seguida foram lançados os pilares. Todos os elementos utilizados na realização desse projeto, seguiram os critérios definidos da NBR 6118 (ABNT, 2014). Foram aplicados diversos pilares com seção transversal variados, sendo o maior com seção de 19x128cm, utilizado nas escadas. Essa modelagem tem como aplicação não utilizar um número excessivo de pilares ou vigas, resultando em lajes com grandes vãos, chegando até a 8x11m.

É prudente alertar que pelas condições implantadas no processo de modelagem a edificação pode ter ficado superdimensionada para os elementos aplicados, isso pode ser notado pelas espessuras das lajes:

- Pavimento Subsolo – $h = 15\text{cm}$
- Pavimento Térreo – $h = 12\text{cm}$
- Pavimento Tipo 1 – $h = 14\text{cm}$
- Pavimento Tipo 2 – $h = 14\text{cm}$
- Pavimento Ático – $h = 12\text{cm}$
- Pavimento Cobertura – $h = 10\text{cm}$

Depois foram aplicadas as cargas de paredes e acidentais e, finalmente foi feita as escadas. Com o término da modelagem foi realizado o processo de estruturas e com isso determinados os valores de δx δy , como indicados no Quadro 9. Foi analisado as flechas dos elementos e se constatou que alguns desses elementos não seguiam $l/250$ de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

As características da arquitetura acabaram exigindo que no pavimento ático fosse preciso aplicar pilares nascendo nas vigas desse pavimento. Para que o projeto estrutural ficasse em harmonia com a arquitetura, foram adicionados os pilares: P35, P36, P37, P38, P39, P40, P41, P42. Esses elementos têm seção de

14x30cm, a adição dessas peças pode acabar sobrecarregando as vigas do ático, tornando esse local do projeto mais vulnerável.

Quadro 9. Análises de processamentos globais da estrutura.

Nº de Processos	Gama z(x)	Gama z(y)	Última motivação
1	1,05	1,03	Primeiro processamento
2	1,05	1,03	Alterações das vigas
3	1,05	1,03	Alteração laje do edifício
4	1,05	1,02	Análise estática linear final

Fonte: o autor, 2020.

Foram realizadas diversas alterações para corrigir as flechas, para cada mudança feita um novo processamento para verificar a situação global da estrutura. As etapas realizadas para as correções foram:

a) Correções das vigas:

- Pavimento cobertura:
 - Aumento da seção transversal das vigas, de h=30cm para h=40cm, nas vigas: V4, V2, V15, V24, V16 e V25.
- Pavimento ático:
 - Aumento da seção transversal das vigas, de h=40cm para h=50cm, nas vigas: V7, V8 e V9.

b) Correções das lajes:

- Pavimento ático:
 - Aumento da espessura da laje de 12cm para 16cm, nas lajes: L15, L12, L11, L16.
- Pavimento Tipo 2:
 - Redução das vigas presentes das varandas, de h=60cm, para h=30cm, nas vigas: V23, V39, V40, V41, V42, V20 e V36.

- Pavimento Tipo 1:
 - Redução das vigas presentes das varandas, de h=60cm, para h=30cm, nas vigas: V23, V39, V40, V41, V42, V20 e V36.
- Pavimento Térreo:
 - Redução das vigas presentes das varandas, de h=60cm, para h=30cm, nas vigas: V23, V39, V40, V41, V42, V20 e V36.

3.3. SITUAÇÕES DE INCÊNDIO

Com o final das correções feitas, foi iniciado as simulações dos incêndios, para se obter uma avaliação mais aprofundada das condições da estrutura, em caso de incêndio, foram feitas várias simulações em diferentes locais da edificação. Além das diversas regiões, também foram estudados incêndios com durações e intensidades diferentes, utilizando o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Os principais valores aplicados de TRRF foram de 30, 60, 90 e 120min, pois serem os valores definidos pela norma NBR 15200 (ABNT, 2004). Todas essas situações são para determinar os resultados de incêndios, entre casos de altas temperaturas em pequenos locais isolados, até casos de incêndios de temperaturas mais baixas com maior área de exposição das chamas na estrutura. Ampliando as informações sobre o comportamento da estrutura. Os casos estudados foram:

- I. Incêndio ocorrido em toda a construção – Tempos requeridos de resistência ao fogo de 30min, 60min e 90min;
- II. Incêndio no pavimento subsolo – Tempos requeridos de resistência ao fogo de 30min, 60min e 90min;
- III. Incêndio no pavimento tipo – Tempos requeridos de resistência ao fogo de 30min, 60min e 90min;

- IV. Incêndio no pavimento ático – Tempos requeridos de resistência ao fogo de 30min, 60min e 90min;
- V. Incêndio iniciado na cozinha do pavimento tipo – Tempos requeridos de resistência ao fogo de 120min;
- VI. Incêndio iniciado na churrasqueira do ático – Tempos requeridos de resistência ao fogo de 120min;
- VII. Incêndio iniciado num carro no subsolo – Tempos requeridos de resistência ao fogo de 120min;

3.3.1. Processo de convecção das simulações de incêndio

Foram feitas 15 cópias do arquivo original para realizar as diferentes simulações. As propriedades do projeto foram configuradas em cada arquivo separadamente, resultando numa análise mais adequada das estruturas, evitando possíveis erros se todas os casos fossem ser realizados num único arquivo.

3.3.1.1. Considerações das simulações de incêndios

Devido a funcionalidade do incêndio, o concreto será o material mais afetado pelo fogo, assim protegendo as armaduras. Como o concreto estará mais exposto as chamas, ele será o elemento com as propriedades alteradas para simular os incêndios, desconsiderando os revestimentos, armaduras da estrutura e a necessidade de modificar as características de outros materiais do projeto.

3.3.2. Processos e configurações dos projetos

Para a maioria dos casos foi definido Tempos requeridos de resistência ao fogo de 30min, 60min, 90min e 120min. Para definir a temperatura estimada nesses casos, foi utilizado a equação:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log (8t + 1)$$

Assim foi calculado as temperaturas:

- 30min - $\Theta_g = 841,8^\circ\text{C}$
- 60min - $\Theta_g = 945,3^\circ\text{C}$
- 90min - $\Theta_g = 1006^\circ\text{C}$
- 120min - $\Theta_g = 1049^\circ\text{C}$

Com as temperaturas determinadas é possível estimar a redução de resistência a compressão do concreto (k_c, θ), utilizando a o Quadro 12, através da interpolação, dento como redução:

- $k_{c,30} = 0,121$
- $k_{c,60} = 0,0619$
- $k_{c,90} = 0,0382$
- $k_{c,120} = 0,0253$

Esses fatores foram aplicados no concreto de C25, no software Eberick V8, assim foi feito uma classe específica de concreto com a resistência reduzida, para simular a maneira como a estrutura se comportaria nessas situações e aplicá-las nos pavimentos onde há situações de incêndio. Entretanto os valores da resistência característica do concreto, resultou em números extremamente baixos, indicando que fatores adotados representavam as condições mais desfavoráveis de ocorrerem, ou seja, durante aos incêndios mais agressivos e prejudiciais.

Para os casos de incêndio V, VI e VII, aos quais teriam uma carga de incêndio mais elevada, com TRRF de 120min, atuando em lugares específicos que atingem poucos elementos estruturais, não foi possível aplicar as reduções do

concreto por causa das limitações do software, que apenas consegue adicionar o coeficiente por pavimento, ao invés de aplicá-las em cada peça de maneira isolada.

Para poder fazer uma estimativa da ação desses incêndios com elevadas temperaturas, foram aplicadas altas cargas nas peças estruturais, para representar os efeitos do incêndio, os valores das cargas extras adicionadas foram calculados pela equação das flechas.

$$\delta = (5 \cdot q \cdot L^3) / (384 \cdot EI)$$

Ao invés de aplicar o coeficiente de redução no concreto $k_c, 120 = 0,0253$. Será aplicado o inverso desse valor, correspondendo a 39,53 nas cargas atuantes das peças estruturais atingidas pelo incêndio, para os casos de TRRF de 120min.

Com o término das configurações foi processado a estrutura com a análise estática linear, determinação das flechas nas lajes, determinação das flechas no pórtico, para cada situação proposta.

3.3.2.1. Considerações do processamento estrutural

Como o projeto sofreu inúmeras modificações, para cada situação de incêndio, foi realizado vários processamentos estruturais para avaliar as condições e analisar os resultados obtidos. Entretanto a aplicação dos coeficientes de redução, do concreto, pode interferir de maneira significativa as armaduras das peças, acabando com diferentes distribuições, quantidades e bitolas de aço, em cada elemento estrutural. Analisar a quantidade de aço, em cada pavimento, para as simulações propostas iriam resultar numa extrema quantidade de dados, então para filtrar as informações será desconsiderado as armaduras presentes nos elementos estruturais.

3.4. ALTERAÇÕES PARA MELHORIA DO PROJETO

Com as simulações realizadas, foi estudado possíveis mudanças no projeto estrutural, com a finalidade de melhorar o desempenho da edificação, durante a ocorrência do incêndio. Foi proposto duas principais alterações que iriam aumentar a rigidez da estrutura e consequentemente a eficiência da construção durante a ação do fogo. Essas alterações são: alterar a seção dos elementos e aumentar o f_{ck} do concreto.

3.4.1. Aumento da Resistência a Compressão do Concreto (f_{ck})

A primeira etapa seria aumentar o f_{ck} do concreto, inicialmente seria proposto aplicar uma resistência superior, que quando submetido a ocorrência do incêndio teria o mesmo desempenho do concreto C25, porém os cálculos indicaram que seria preciso usar um concreto com mais de 150 MPa para todas as simulações propostas, então por ser um valor muito elevado, foi aplicado o concreto C50 por ser mais possível de ser utilizado nesse caso. Esse valor foi alterado para todas as simulações de incêndio, independentemente de ser global ou isolado num pavimento.

3.4.2. Aumento de Seção das Peças

A outra possível variação seria aumentar a área da seção das vigas e espessuras das lajes. Para facilitar o processo de modelagem foi proposto mudar todas as seções das vigas para ficarem com 19x80cm e deixar as espessuras das lajes com 20cm, sendo modificado apenas nos locais expostos a ação do incêndio.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a realização dos diversos modelos estruturais para cada situação de incêndio, foi feito com conjunto de tabelas, para avaliar as condições presentes na construção. Porém devido a quantidade de dados e informações, foi utilizado como parâmetro de análise principal as flechas das peças estruturais, organizando por valores diferentes, de acordo com o Quadro 10.

Quadro 10. Classificação dos elementos estruturais pelo valor das flechas

CONDIÇÕES	VIGAS	LAJES
BOA	FLECHAS MENORES DE 1cm	FLECHAS MENORES DE 1,5cm
MÁ	FLECHAS ENTRE DE 1 E 1,5cm	FLECHAS ENTRE DE 1,5 E 2cm
PÉSSIMA	FLECHAS MAIORES DE 1,5cm	FLECHAS MAIORES DE 2cm
ERRO	MENSAGEM DE ERRO NA PEÇA	MENSAGEM DE ERRO NA PEÇA

Fonte: o autor, 2020.

A partir das informações retiradas das tabelas para determinar as condições de ELU parcial e global, ELS e as flechas. Classificando os estados a partir das porcentagens de erros e deslocamentos, especificado no Quadro 11.

Quadro 11. Classificação dos estados de acordo com as porcentagens de erro e deslocamento

CONDIÇÕES	BOA	MÁ	PÉSSIMA
ELU (PARCIAL)	ERRO PARCIAL < 25%	25% < ERRO PARCIAL < 50%	ERRO PARCIAL > 50%
ELU (TOTAL)	ERRO GLOBAL < 25%	25% < ERRO GLOBAL < 50%	ERRO GLOBAL > 50%
ELS	FLECHAS MAIORES DE 2cm < 25%	25% < FLECHAS MAIORES DE 2cm < 50%	FLECHAS MAIORES DE 2cm > 50%
Flecha	FLECHAS MAIORES DE 2cm < 25%	25% < FLECHAS MAIORES DE 2cm < 50%	FLECHAS MAIORES DE 2cm > 50%

Fonte: o autor, 2020.

4.1. CONDIÇÕES INICIAIS

A estrutura na sua composição inicial apresenta desempenhos adequados, sem apresentar erros ou cargas excessivas, pelos deslocamentos exibidos nas peças em condições normais, com 93,6% das flechas menores de 0,5cm, nas vigas e 86,54% das lajes tiveram flechas menores de 1,5 cm, em sua totalidade. Foi relatado que os maiores valores encontrados estavam no pavimento da cobertura da edificação, tendo flechas de 1,8cm nas vigas e 2,23cm nas lajes, porém mesmo com esses valores altos, as condições impostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), com deslocamentos menores de $l/250$ foram cumpridos. É possível afirmar que esses valores são altos devido as extensões das peças.

4.2. SITUAÇÃO DE INCÊNDIO EM TODA A ESTRUTURA

Em seguida serão apresentados os resultados das vigas e lajes em situação de incêndio em toda a estrutura.

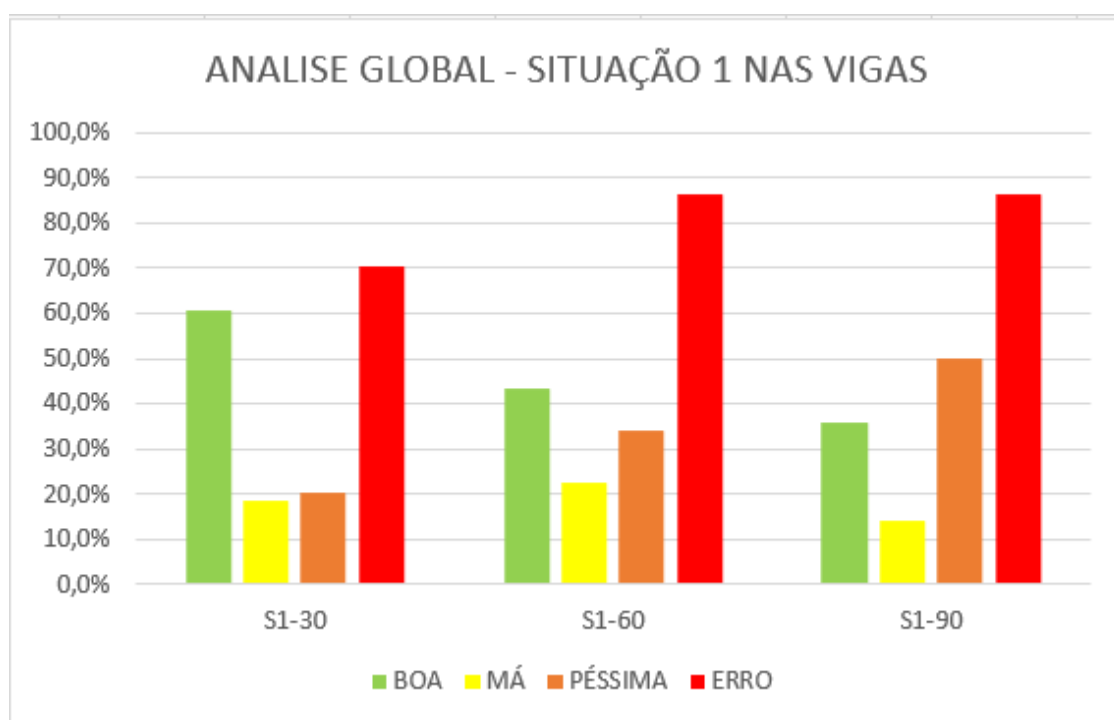
4.2.1. Vigas

A ação do fogo em toda a edificação são os mais prejudiciais por afetar praticamente todos os elementos estruturais. Foi constatado para um TRRF de 30min, que 20,4% das vigas resultou com flechas maiores de 1,5cm, com altos valores chegando até 6 e 9cm, enquanto para TRRF de 60 e 90min, a porcentagem ficou em 34 e 50%, mostrando um crescimento de 15% dos elementos em estado crítico para cada aumento do tempo. Como indicado nos Figura 17.

Entretanto é importante salientar que o software relatou para mais de 70% das vigas, erro para o valor das forças, indicando que força cortante atuante

no concreto (V_{sd}), definido no item 17.4.2.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), ultrapassou o limite da força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto (V_{rd2}). Assim com grandes probabilidades de ruínas nos elementos, o que resultaria em colapso global.

Figura 17. Gráfico das porcentagens das vigas com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda

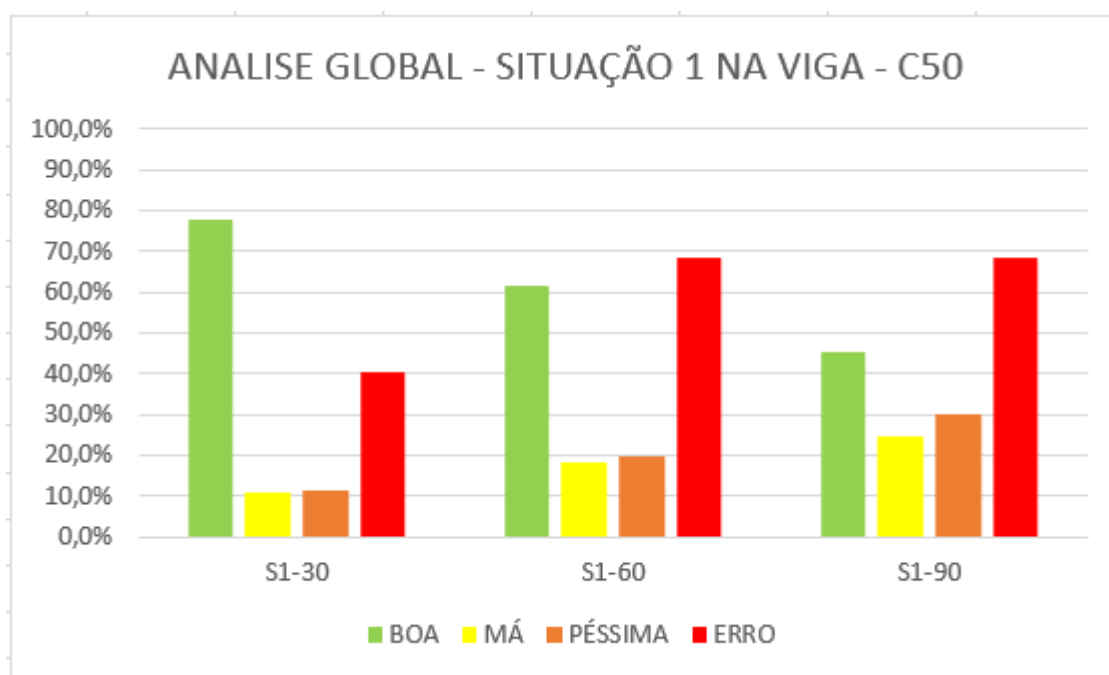


Fonte: o autor, 2020.

Devido as alterações propostas, o funcionamento da estrutura melhorou para as alterações do concreto e da seção das peças.

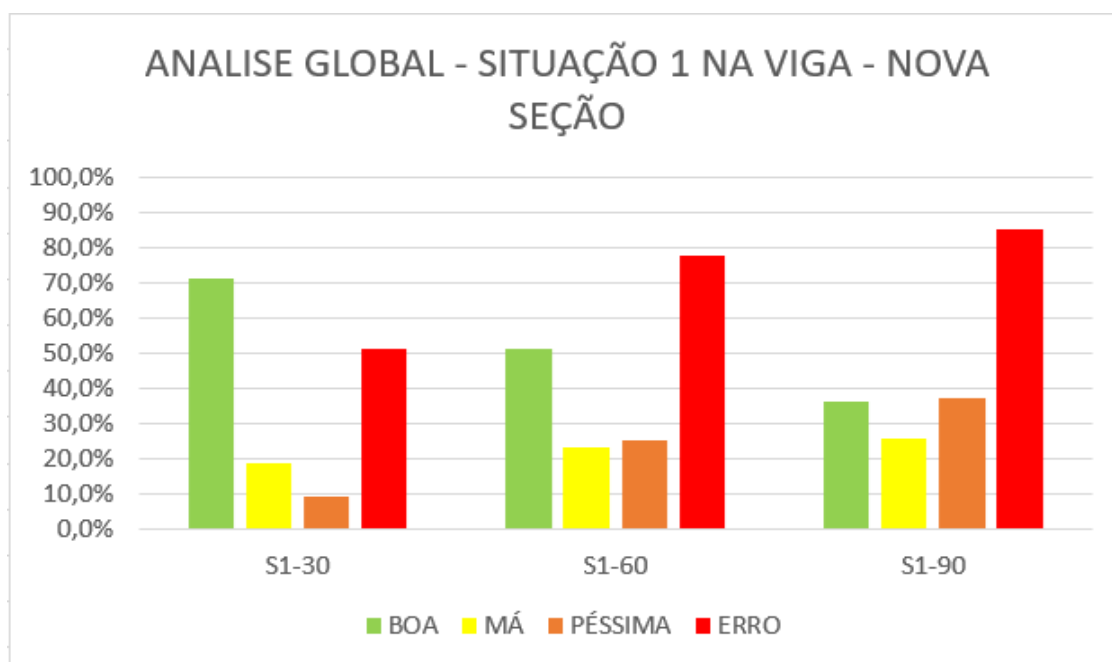
Para a utilização de concreto C50 houve um melhor funcionamento das vigas, com flechas menores, em aproximadamente 22%, dos casos, além da redução das quantidades de avisos de erro ficando entre 40,4 e 68,4% das vigas. Para segunda mudança, envolvendo as dimensões das peças, as flechas diminuíram em 10%, com apresentação de erros entre 51,6 e 85,2%, ainda inferiores ao caso inicial, como está presente nas Figuras 18 e 19.

Figura 18. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda, com concreto C50



Fonte: o autor, 2020.

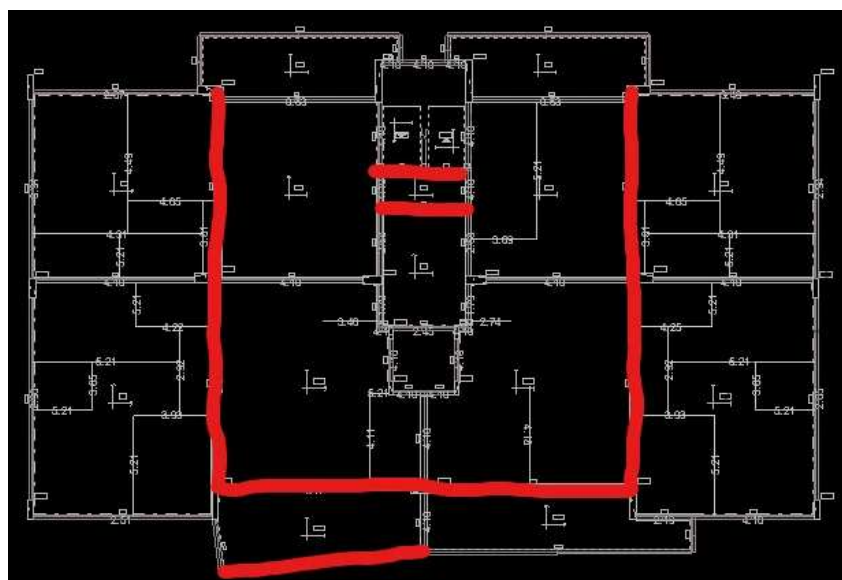
Figura 19. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda, com seção de 19x80cm



Fonte: o autor, 2020.

Também foi percebido, através das tabelas, quais eram os elementos estruturais mais afetados pela ocorrência de incêndio, com danos proporcionais de acordo com o aumento dos TRRF. Sendo as vigas: V6, V7, V16, V17, V24, V25, V34, V35 e V42. Possivelmente essas peças foram mais prejudicadas por receberem grande cargas da estrutura, ou por estarem apoiadas em outras vigas, como observado na Figura 20.

Figura 20. Destaque das vigas com as maiores flechas sobre a ação do fogo



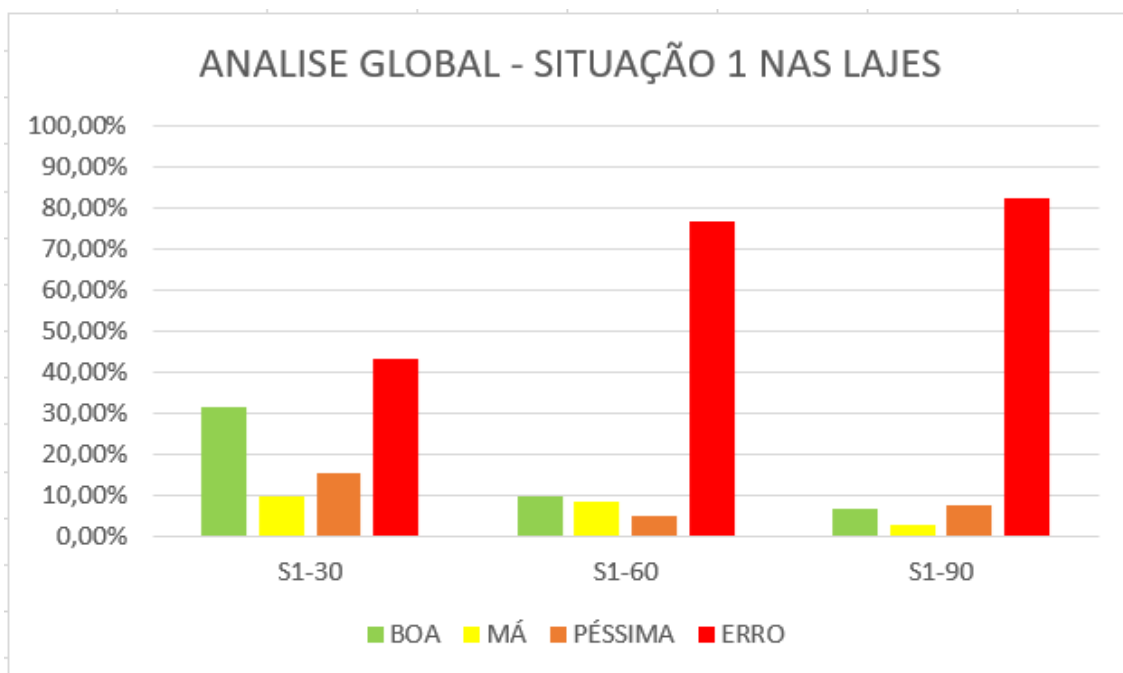
Fonte: o autor, 2020.

4.2.2. Lajes

Sobre as condições das lajes é notado um resultado similar ao das vigas, pois para todos os tempos do TRRF, ficaram com 43,27 a 82,69% de aviso nas lajes, apresentado na Figura 21, tendo a necessidade de aplicar armadura dupla, mesmo com a liberação para utilizar bitolas de ferragens maiores, o erro permanece, assim uma provável solução seria o aumento da espessura desses elementos. Por causa do aviso feito pelo Eberick V8, não foi possível calcular as

flechas da maioria das lajes, o que indicando um provável colapso em todos os pavimentos.

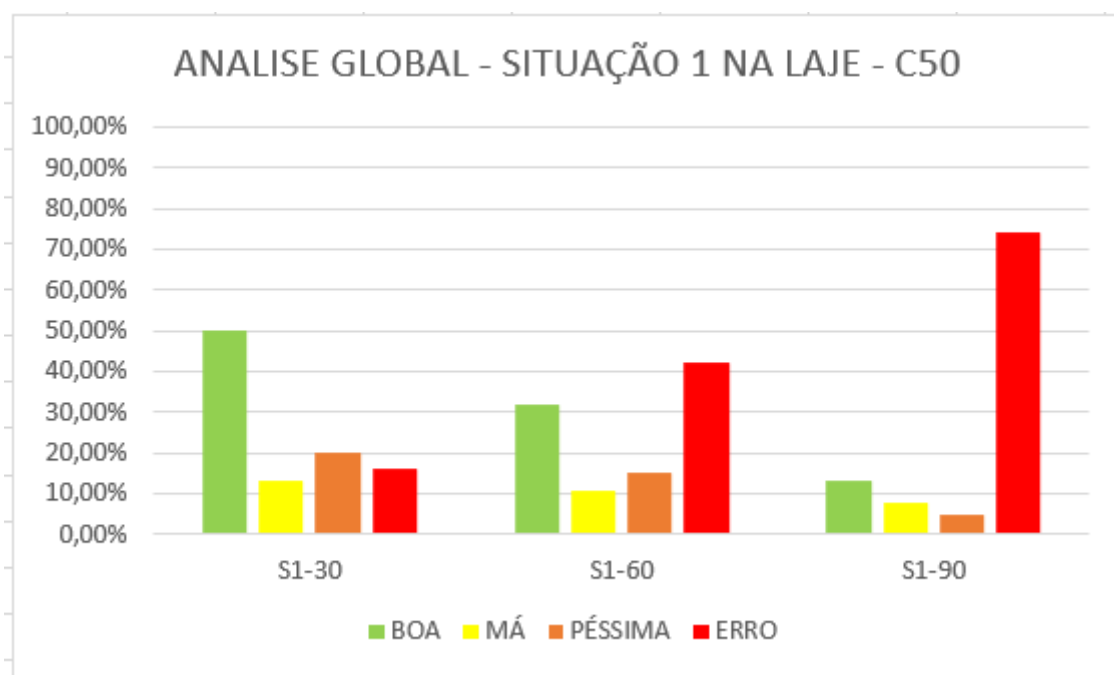
Figura 21. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda



Fonte: o autor, 2020.

Com a utilização de um fck superior, o desempenho de 20% das vigas melhorou para o TRRF de 30min, entretanto para os de 60 e 90 min as condições diminuíram proporcionalmente com tempo de 90min com mais de 74,04% das lajes, presente na Figura 22.

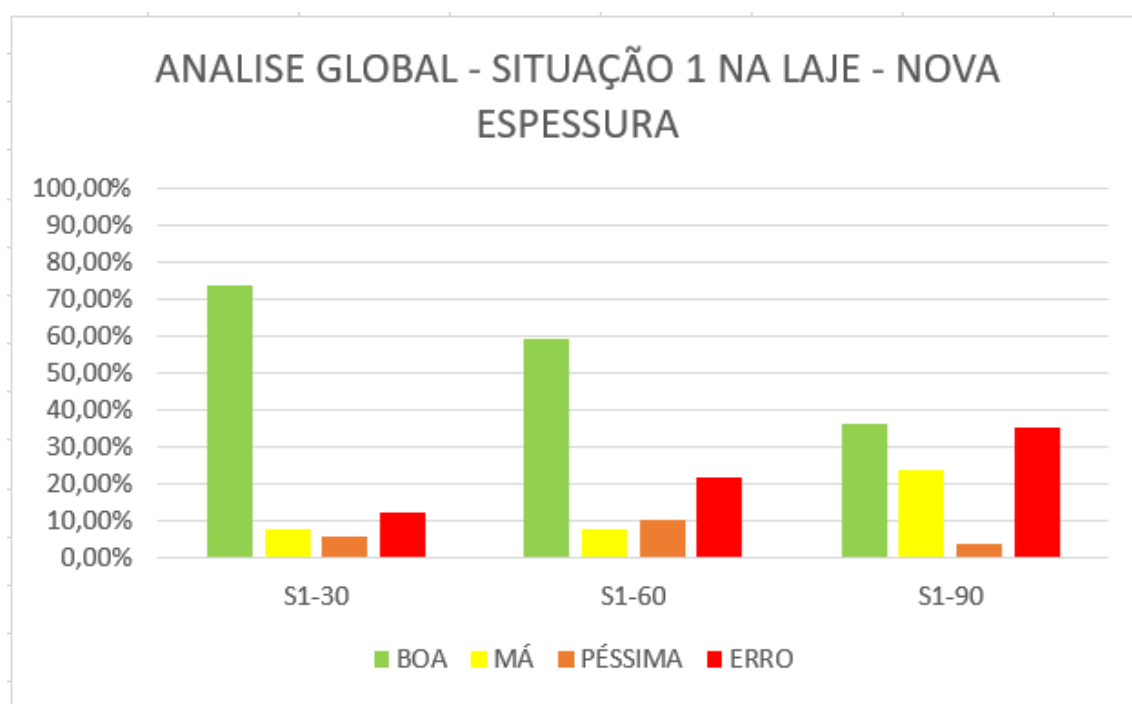
Figura 22. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda, com concreto C50



Fonte: o autor, 2020.

Com a aplicação das lajes de 20cm, se potencializou o comportamento das lajes, em frente a ocorrência do incêndio, com mais de 36% das lajes com flechas inferiores a 1,5cm, em todos os TRRF. E que os números de avisos ficaram inferiores a 35% das lajes, de acordo com a Figura 23.

Figura 23. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio na estrutura toda, com 20cm de espessura



Fonte: o autor, 2020.

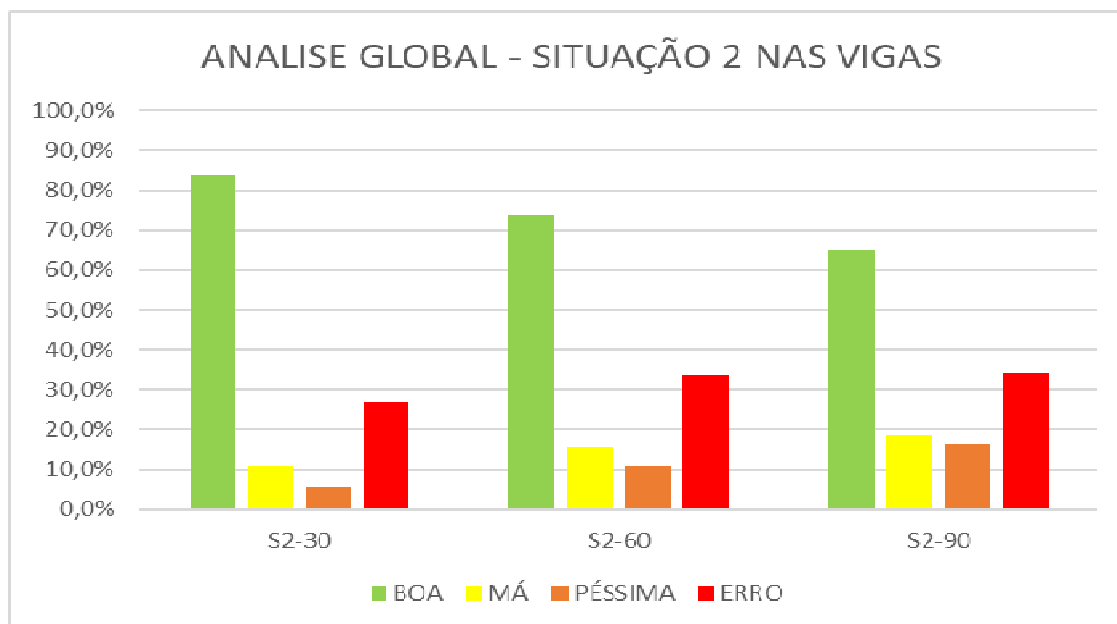
4.3. SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NO PAVIMENTO SUBSOLO

Em seguida serão apresentados os resultados das vigas e lajes em situação de incêndio no pavimento subsolo.

4.3.1. Vigas

No caso aonde a ocorrência de incêndio apenas atinge o pavimento subsolo, a maior quantidade das vigas teve flechas menores de 1cm, chegando a mais de 65% para todos os TRRF's, entretanto o número de avisos ficou entre 26,8 até 34,4%. Todos os avisos envolviam as peças no subsolo e térreo, indicando que essas regiões sofreram um colapso parcial nesse pavimento. Como indicado na Figura 24.

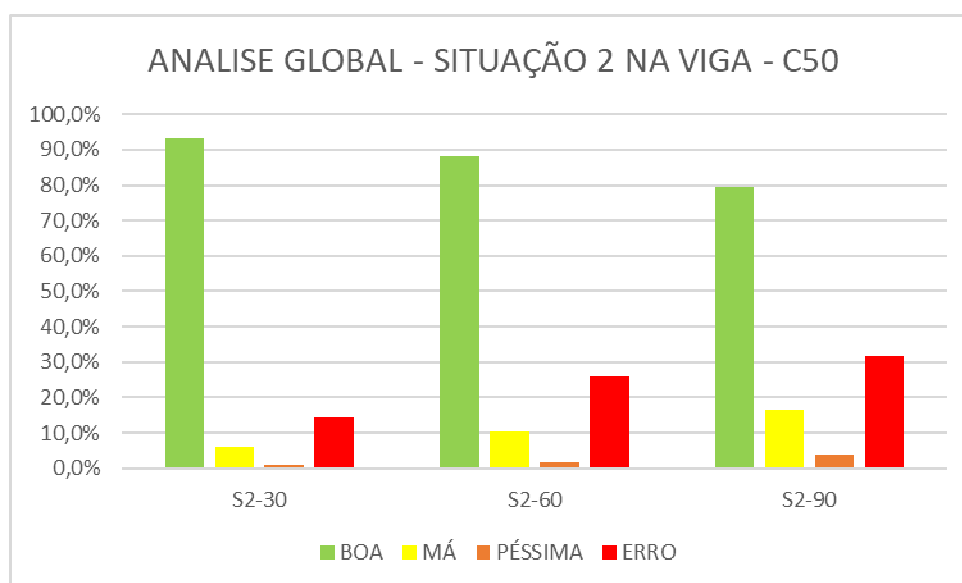
Figura 24. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo



Fonte: o autor, 2020.

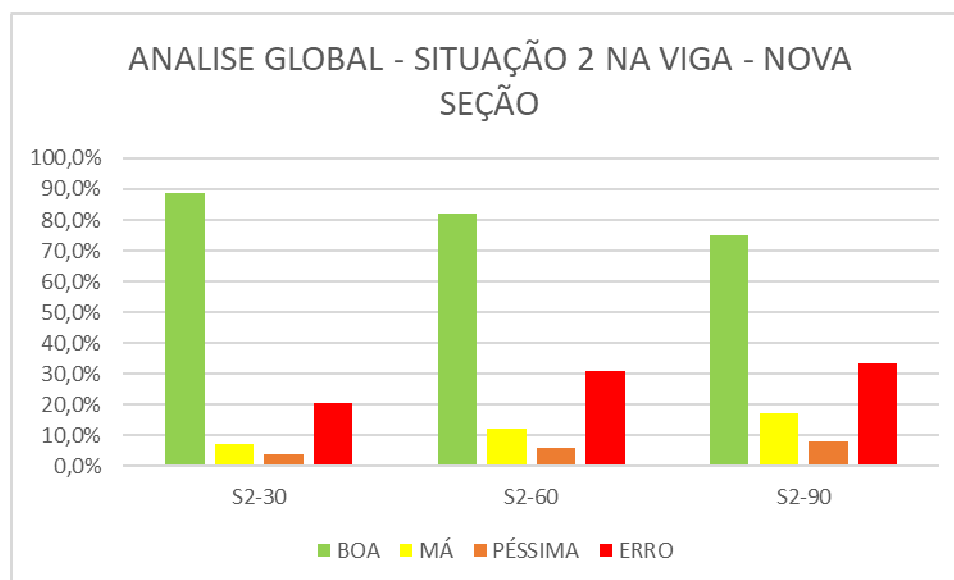
Com as alterações da aplicação do concreto C50, houve uma diminuição nos valores das flechas, em aproximadamente para 10%, visto na Figura 25. Enquanto a aplicação das seções de 19x80cm, tiveram pequenas alterações em geral no subsolo, de acordo com a Figura 26. Após as mudanças feitas, as quantidades de erros diminuíram um pouco, mas o risco de colapso ainda permaneceu.

Figura 25. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com concreto C50



Fonte: o autor, 2020.

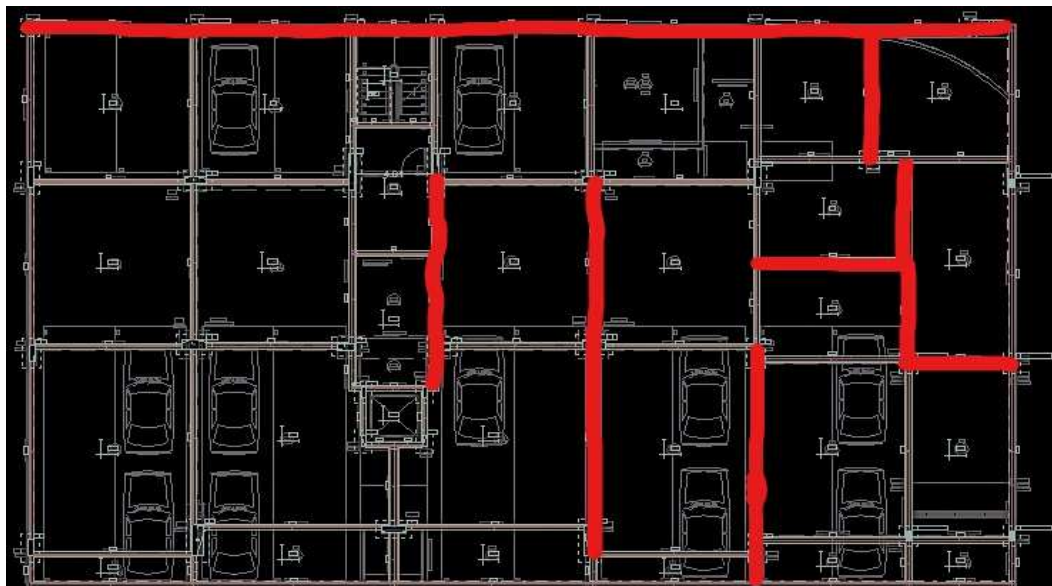
Figura 26. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com seção de 19x80cm



Fonte: o autor, 2020.

Pelas análises feitas, foi constatado que as vigas mais afetadas, com as maiores flechas, foram as vigas: V1, V10, V38, V39, V42 e V45. Com valores de 4cm de flecha na V10, com TRRF de 90min. Visto na Figura 27.

Figura 27. Destaque das vigas com as maiores flechas na situação de incêndio no subsolo

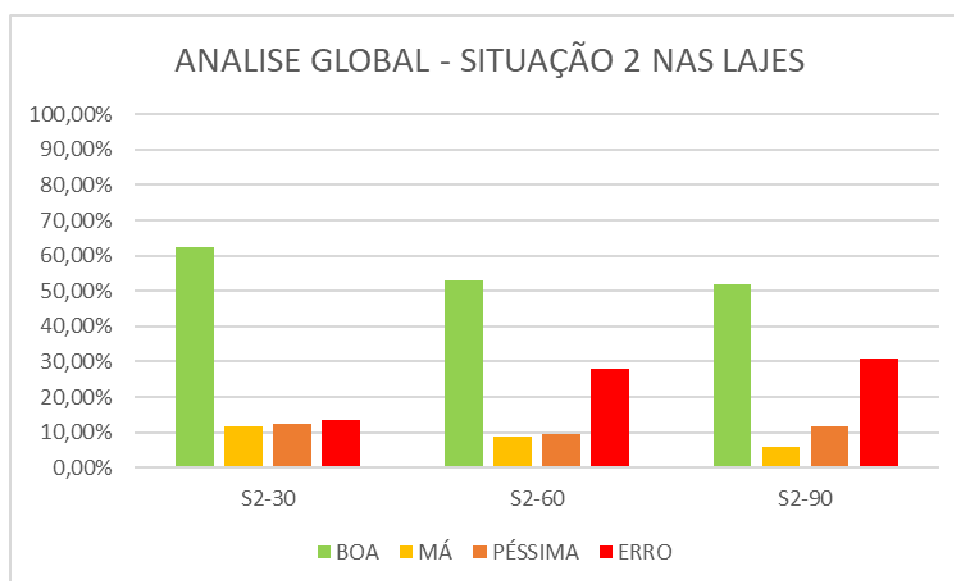


Fonte: o autor, 2020.

4.3.2. Laje

O comportamento das lajes apresentou durante essa simulação grandes quantidades de erros, principalmente nos TRRF de 60 e 90min. Enquanto para o tempo de 30min vários elementos tinham entre 1,5 a 2cm de flechas, com avisos de 13,46% para todas as lajes, como presente na Figura 28.

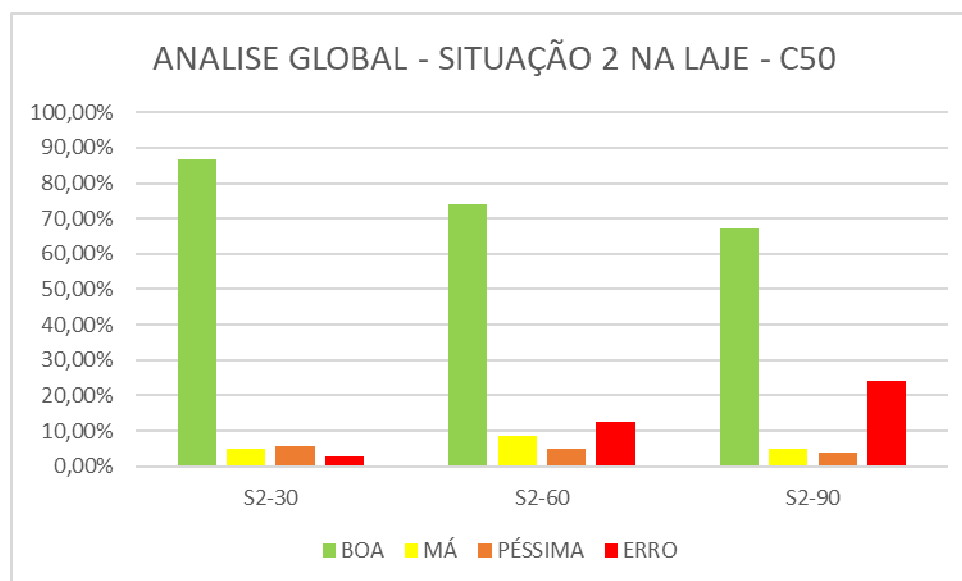
Figura 28. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo



Fonte: o autor, 2020.

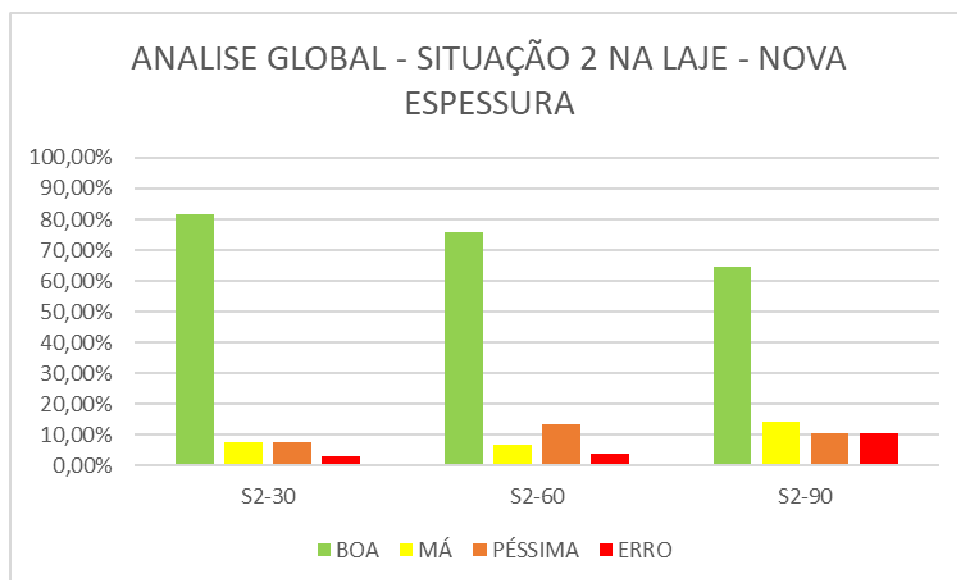
Com alteração do uso do concreto C50 e laje de 20cm, a quantidade de relatos sobre os erros diminui, ficando entre 2,88% e 24,04%. De acordo com as Figuras 29 e 30. Em comparação entre as duas mudanças, as espessuras maiores foram mais eficientes, com baixas quantidades de erros ficando entre 3 a 11 lajes. Com as regiões mais prejudicadas presentes na Figura 31.

Figura 29. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com concreto C50



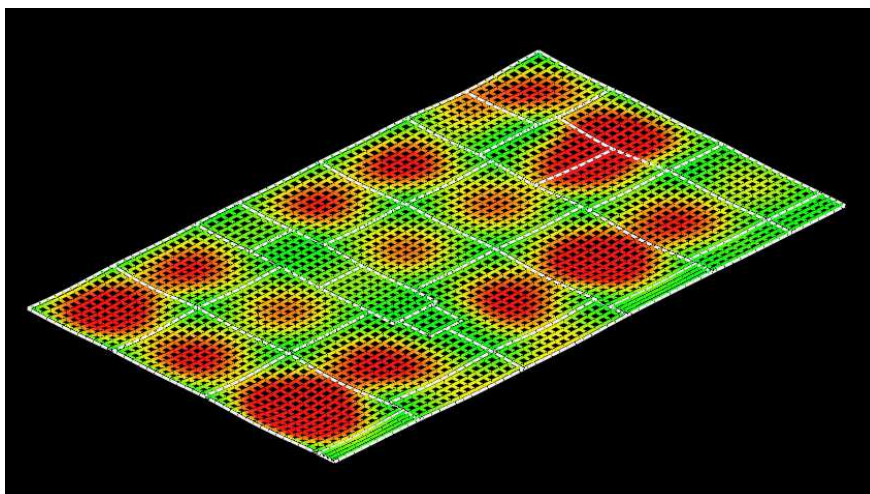
Fonte: o autor, 2020.

Figura 30. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com 20cm de espessura



Fonte: o autor, 2020.

Figura 31. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio no subsolo



Fonte: o autor, 2020.

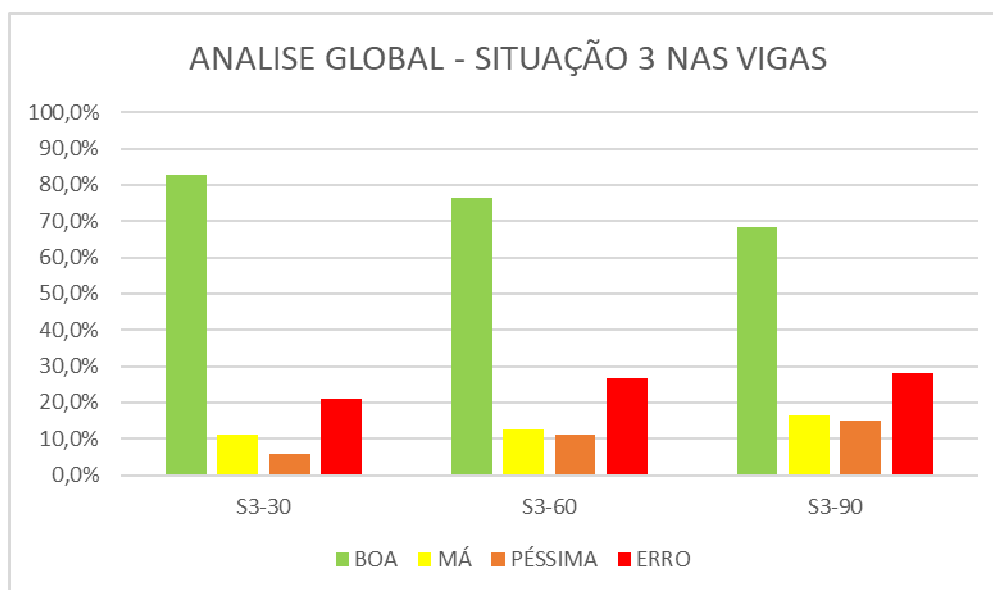
4.4. SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NO PAVIMENTO TIPO

Em seguida serão apresentados os resultados das vigas e lajes em situação de incêndio no pavimento tipo.

4.4.1. Vigas

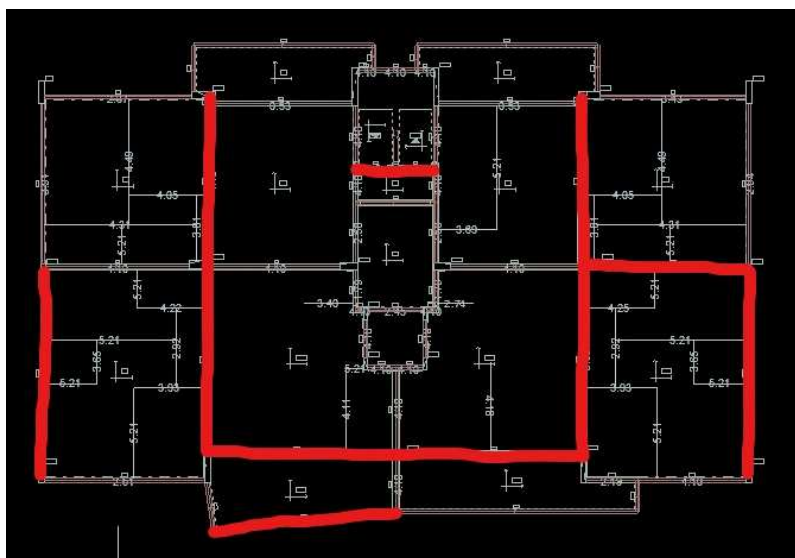
Nas simulações do incêndio no pavimento tipo foi indicado uma variação do número de erros entre aproximadamente 20 a 30%, presente na Figura 32, todos presentes no pavimento tipo. Tendo as vigas V6, V11, V16, V17, V21, V24, V25, V34, V35, V37 e V42 com as maiores flechas, de acordo com a Figura 34, maiores de 1cm para o tempo de 30min, enquanto para os TRRF's de 60 e 90min, maiores de 2cm, com a viga V24 possuindo flechas de maiores de 3cm. Além de maior incidência de erros, o que pode causar um provável colapso parcial no pavimento.

Figura 32. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento tipo



Fonte: o autor, 2020.

Figura 33. Destaque das vigas com as maiores flechas na situação de incêndio no pavimento tipo

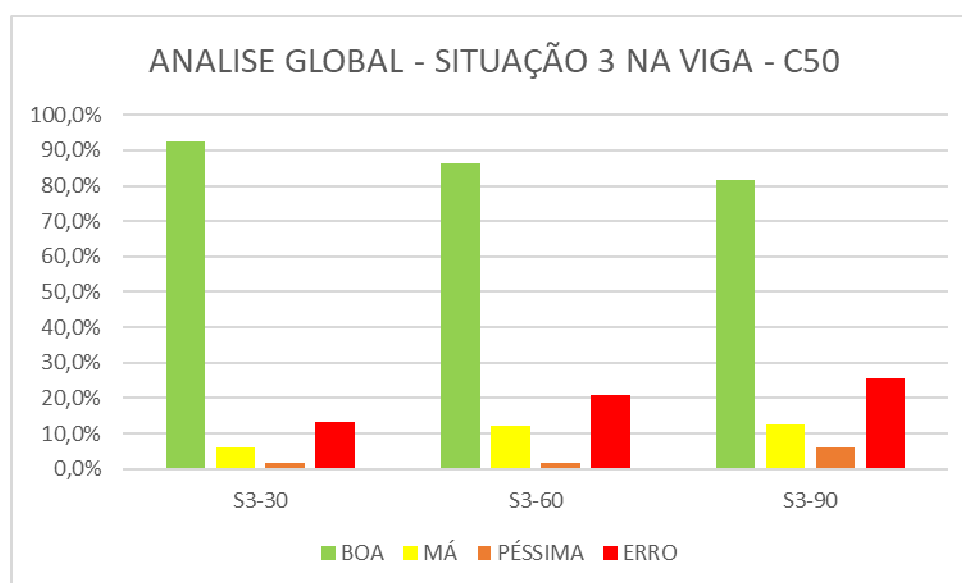


Fonte: o autor, 2020.

Para as alterações envolvendo o fck e seção aumentada das vigas, fica evidente a redução dos valores das flechas e números de avisos com variações de 81,6 até 92,4%, para deslocamentos menores de 1cm, envolvendo o concreto

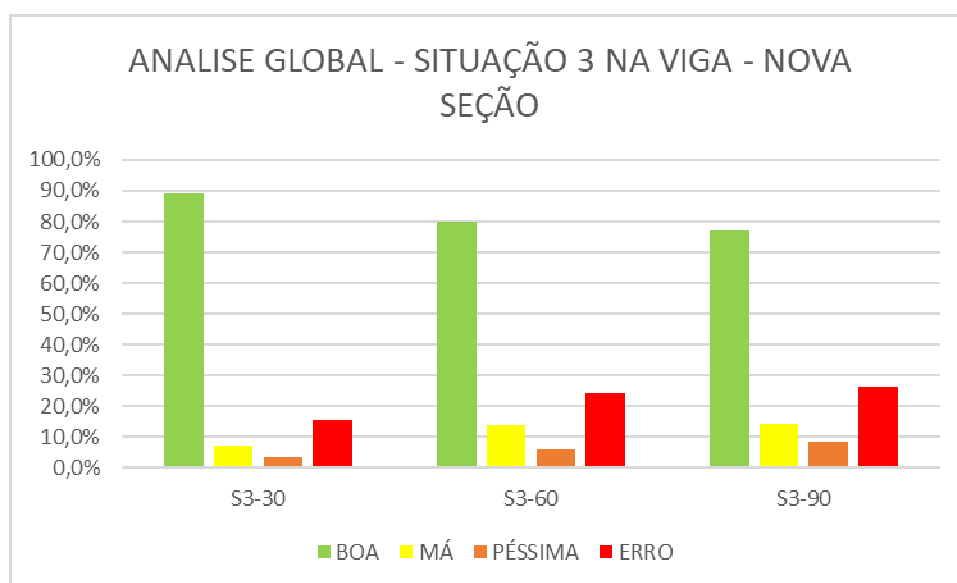
C50. Os avisos de erro, entre 13 a 25%, apresentados nas Figuras 34 e 35. Os resultados revelam que o pavimento tipo apresentou boas condições, perante a interferência do fogo, com poucas peças estruturais tendo deslocamentos maiores de 1cm, porém os erros ainda podem indicar um possível colapso nos elementos.

Figura 34. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento tipo, com concreto C50



Fonte: o autor, 2020.

Figura 35. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento tipo, com seção de 19x80cm

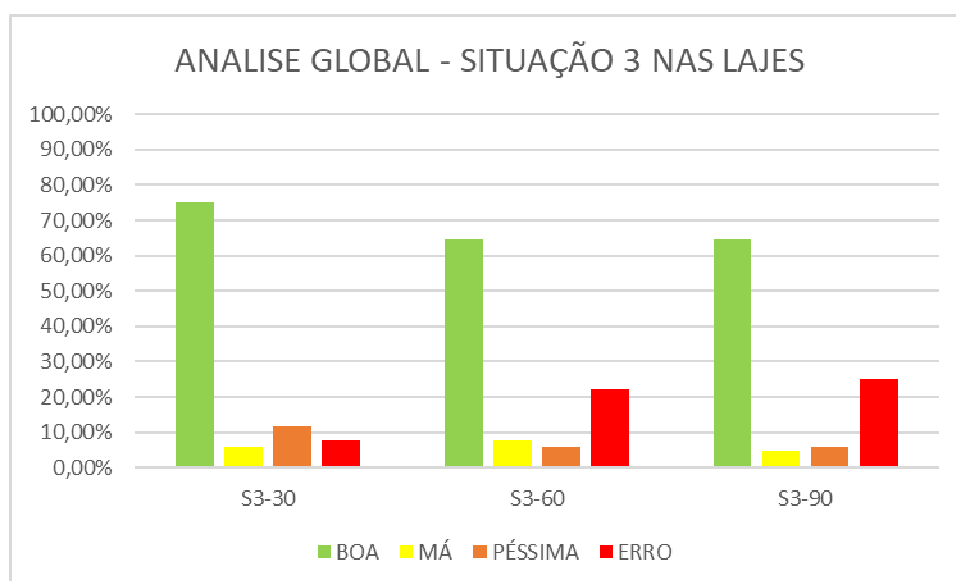


Fonte: o autor, 2020.

4.4.2. Lajes

Pelas porcentagens é mostrado um valor baixo de erros com a maioria dos elementos possuindo flechas menores de 1,5cm, entretanto todos os avisos e deslocamentos altos são pertencentes das peças estruturais no pavimento tipo. As Figuras 36 e 37 apresentam esses resultados, pois é analisado todo o projeto, exibindo que o incêndio localizado, não afeta o comportamento das outras regiões da edificação.

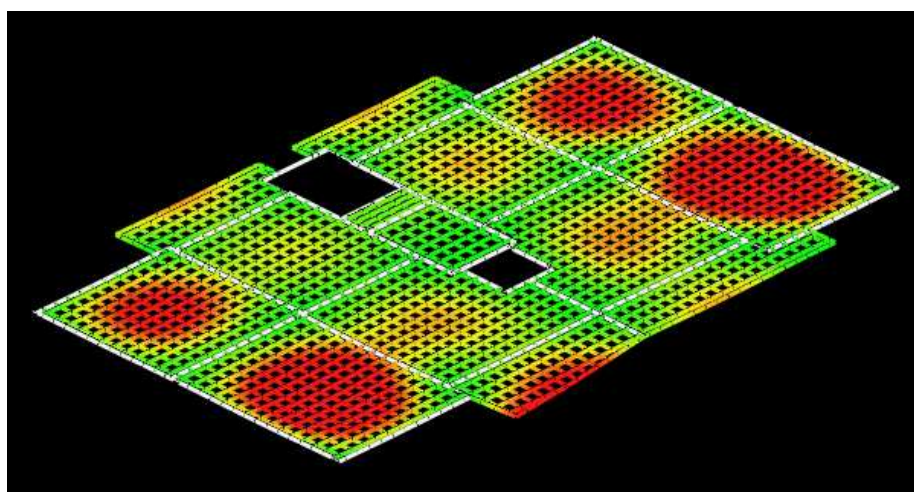
Figura 36. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento tipo



Fonte: o autor, 2020.

Para o TRRF de 30min, os danos foram os menores, com avisos em apenas 4 lajes, L3, L4, L9 e L12, tendo no total 14 lajes, no pavimento tipo, visível na Figura 37. Em comparação aos de 60 e 90min quase todas as lajes, apresentam erros, evidenciando o colapso parcial ou global.

Figura 37. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio no pavimento tipo

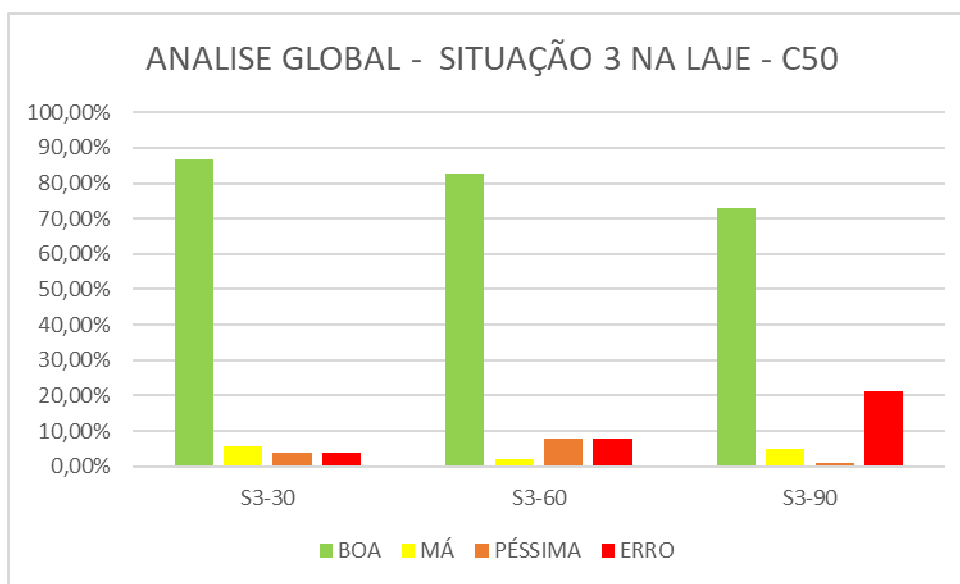


Fonte: o autor, 2020.

As alterações aplicadas ajudaram na performance da laje, mostrando resultados melhores para o uso do concreto C50 ao invés de uma espessura de 20cm nas lajes. Assim demonstra que as chances de colapso são maiores em TRRF de 60 e 90min.

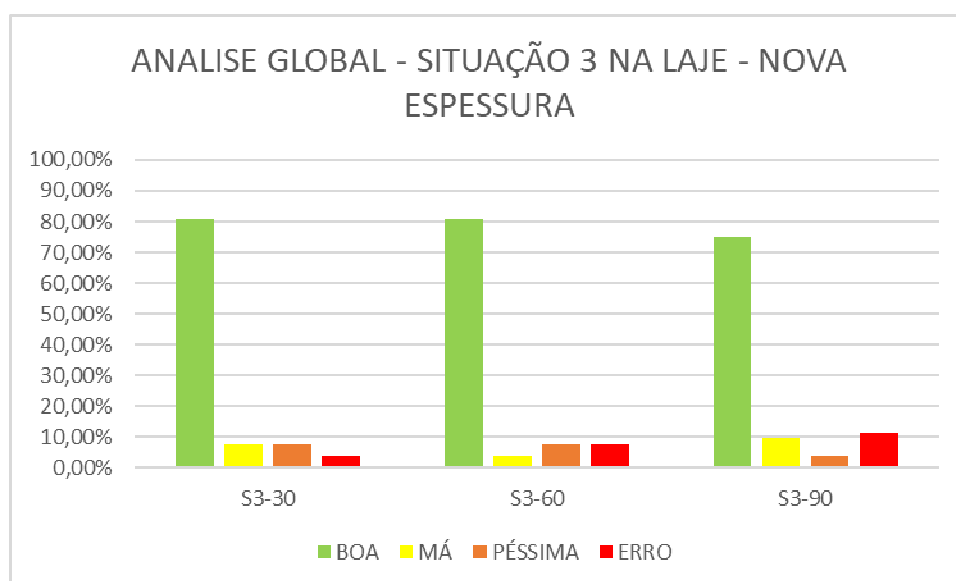
Para essa situação particular, as duas modificações revelaram dados curiosos, para a primeira mudança a porcentagem de avisos chegou a variar entre 3,85% a 21,15%, com menos de 7,69%, do número de lajes, com flechas superiores a 2cm. Em contrapartida, na segunda mudança, a quantidade de erros variou de 3,85 a 11,54%, com menos de 4 %, das lajes, com flechas inferiores de 2cm, presentes nas Figuras 38 e 39.

Figura 38. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com concreto C50



Fonte: o autor, 2020.

Figura 39. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com 20cm de espessura



Fonte: o autor, 2020.

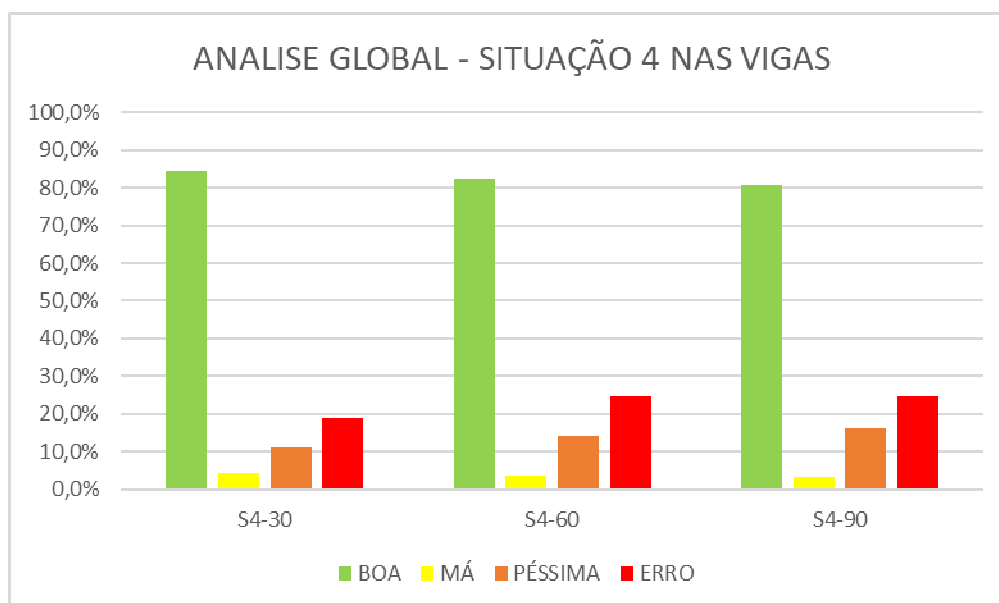
4.5. SITUAÇÃO DE INCÊNDIO NO PAVIMENTO ÁTICO

Em seguida serão apresentados os resultados das vigas e lajes em situação de incêndio no pavimento ático.

4.5.1. Vigas

Nessa condição de ocorrência do incêndio, no ático, revelou como o mais prejudicial, para os elementos atingidos, pois várias vigas possuem flechas de altos valores, chegando a mais de 5cm, para todos os TRRF, visto na Figura 40. Outro fator relevante, são os avisos de erros presentes na maioria do pavimento, resultando assim em altas chances de colapso parcial. Esses resultados, podem ter sido causados devido a presença de pilares nascendo em vigas.

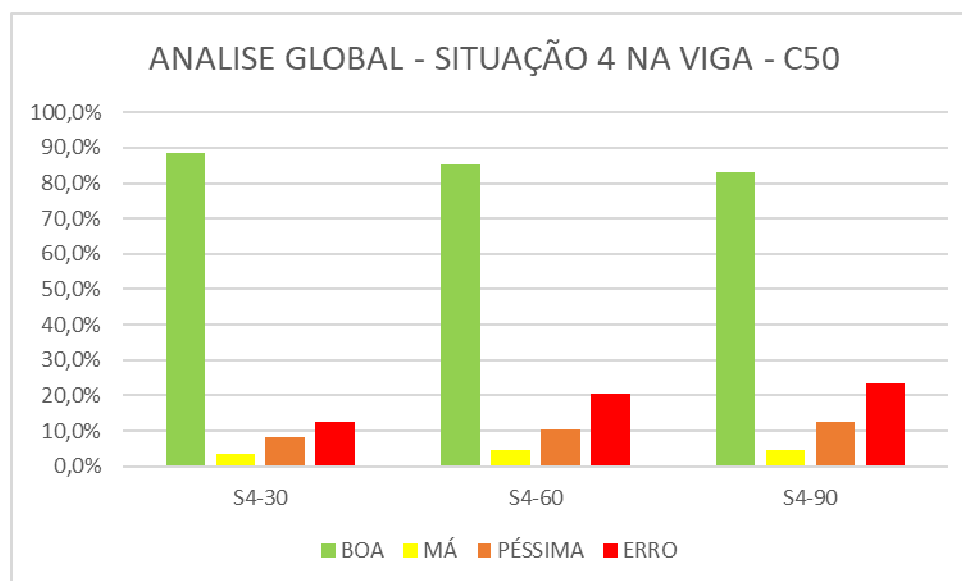
Figura 40. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático



Fonte: o autor, 2020.

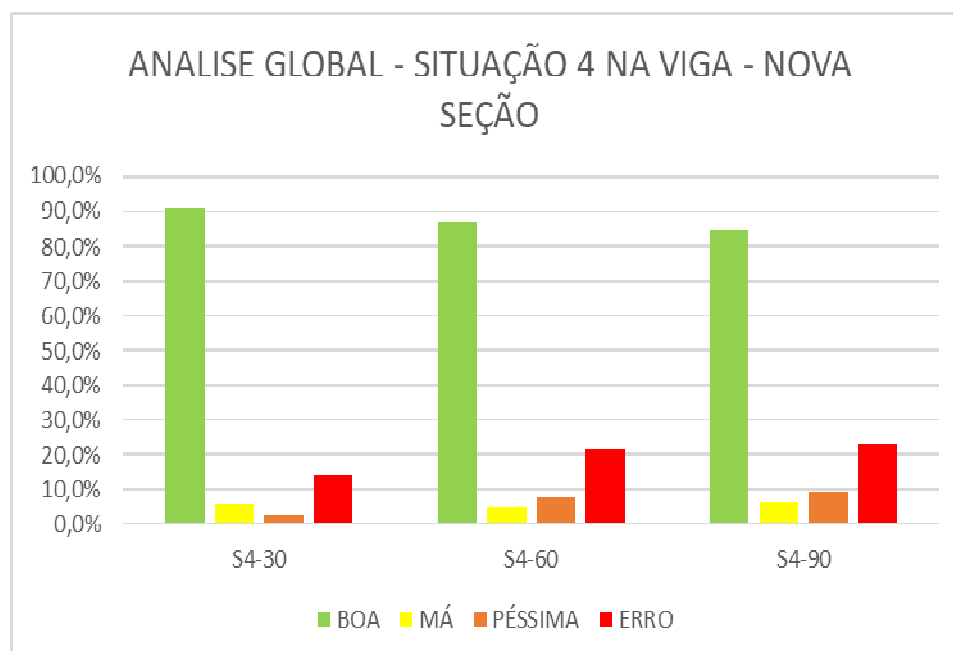
Mesmo com as mudanças, para melhorar o desempenho das vigas, utilizando fck superior ou seção de 19x80cm, não conseguiram auxiliar nessa situação de incêndio apresentando valores com diferenças mínimas, apresentado nas Figuras 41 e 42.

Figura 41. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático, com concreto C50



Fonte: o autor, 2020.

Figura 42. Gráfico das porcentagens das vigas, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático, com seção de 19x80cm

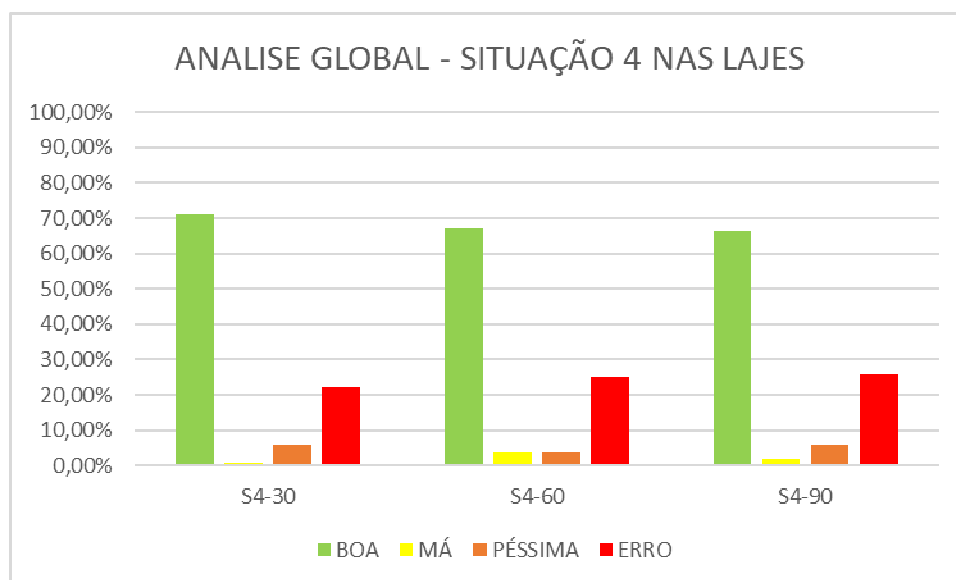


Fonte: o autor, 2020.

4.5.2. Lajes

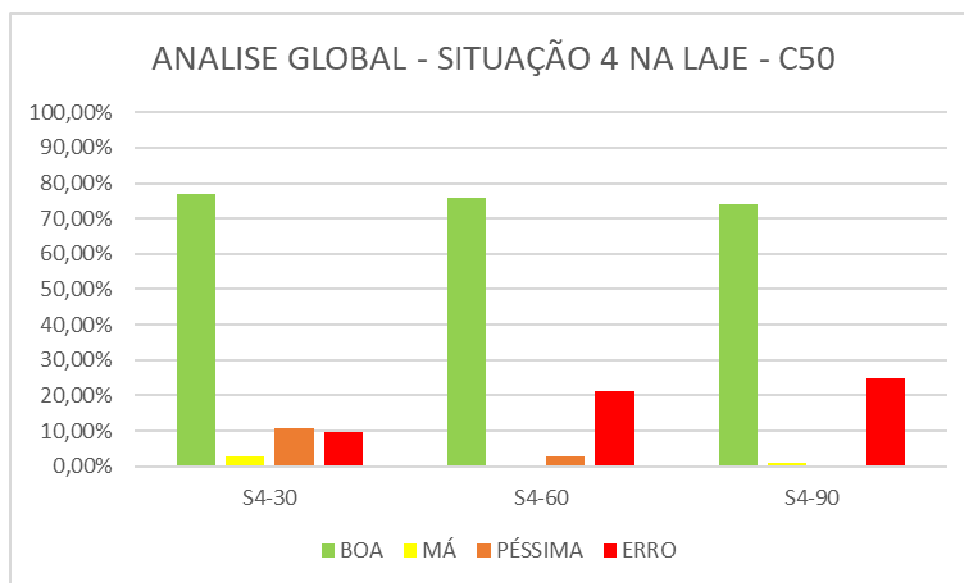
O comportamento das lajes é similar aos das vigas, com altas taxas de avisos, pertencendo aos elementos do pavimento ático. Até mesmo o uso do concreto C50, ocasionou em alterações mínimas nas porcentagens, envolvendo as flechas e avisos, com portagens até 25%, isso é visível nas Figuras 43, 44 e 45. Confirmando um provável caso de colapso parcial no pavimento.

Figura 43. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático



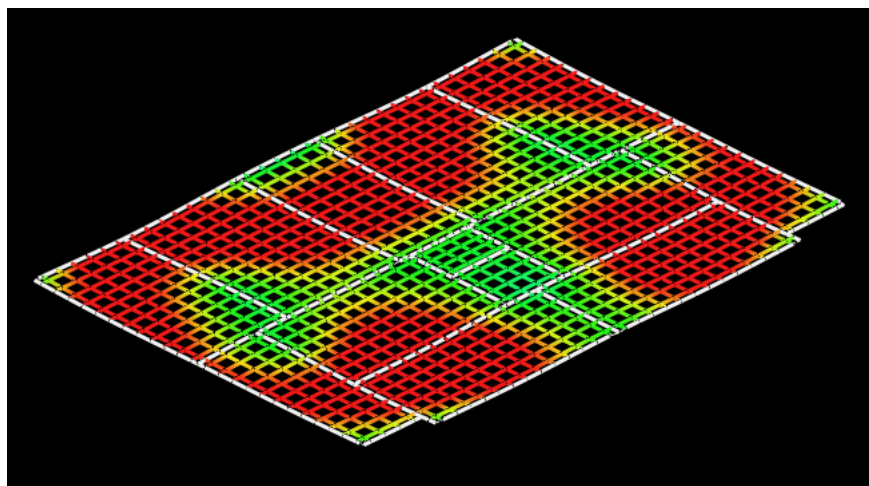
Fonte: o autor, 2020.

Figura 44. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento ático, com concreto C50



Fonte: o autor, 2020.

Figura 45. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio no pavimento ático

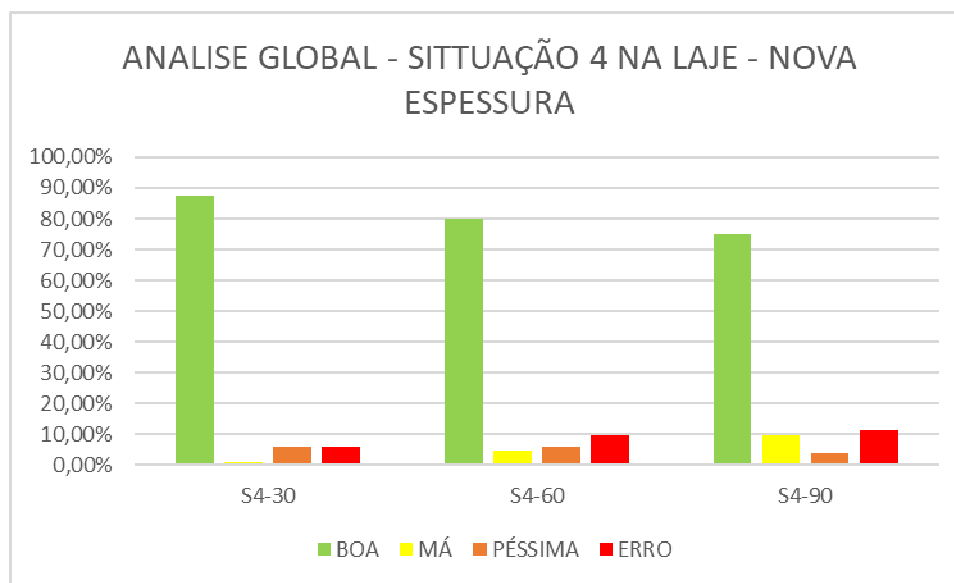


Fonte: o autor, 2020.

Apenas o uso de lajes de 20cm resultou numa melhoria das peças, reduzindo os indícios de erros pela metade, variando entre 5,77 a 11,54% para os avisos. Entretanto, isso não descarta a probabilidades de um colapso, pois os

TRRF de 60 e 90min, ainda apresentavam condições prejudiciais, diferente do tempo de 30min com desempenho mais adequado, de acordo com a Figura 46.

Figura 46. Gráfico das porcentagens das lajes, com diferentes flechas e diferentes TRRF's, para simulação de incêndio no pavimento subsolo, com 20cm de espessura



Fonte: o autor, 2020.

4.6. SIMULAÇÃO DE INCÊNDIOS EXTREMOS EM LOCAIS ESPECÍFICOS

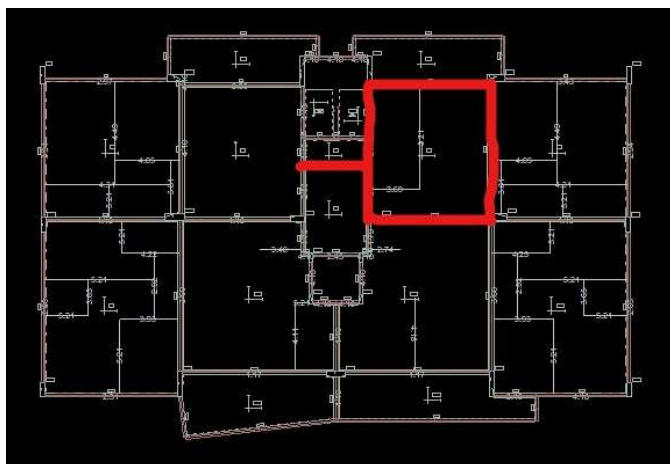
Em seguida serão apresentados os resultados que envolvem as situações de incêndio mais intensas, com uso de TRRF igual a 120min, atingindo poucas peças estruturais.

4.6.1. Situação de incêndio iniciado na cozinha do pavimento tipo

Os valores dos resultados mostraram para as vigas da edificação que 8% das flechas estavam entre 1 e 1,5cm e apenas 2,4% das lajes com mais de 1,5cm de deslocamento.

Além disso somente 10 vigas continham aviso de erro, sendo elas o V5, V7, V10, V33 e V34, as mais danificadas pois estavam mais próximas da cozinha, aonde seria a origem do fogo, visto na Figura 47. O erro relatava sobre a quantidade de barras longitudinais das peças que superava a taxa de armaduras máxima, assim o software recomendava três opções: utilizar bitolas com diâmetros maiores, alterar a taxa de armaduras para 4% ou até 8% e finalmente redimensionar a seção da viga. Esse erro possivelmente foi ocasionado pelas elevadas cargas de compressão e tração nas vigas, mesmo com tais informações é difícil especular sobre um possível colapso.

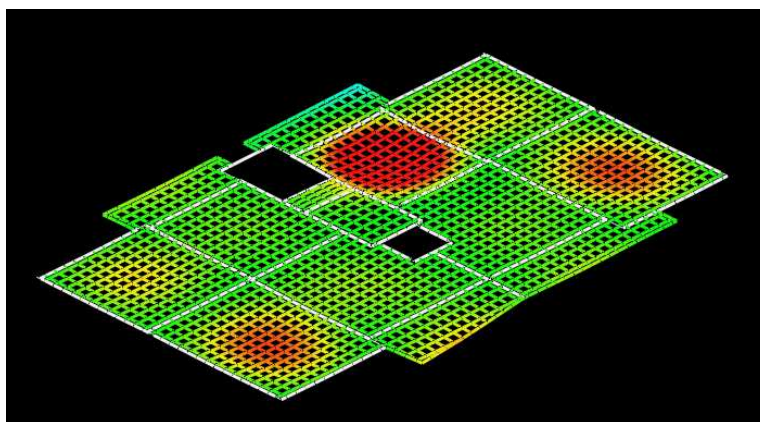
Figura 47. Destaque das vigas com as maiores flechas na situação de incêndio iniciado na cozinha



Fonte: o autor, 2020.

Para as lajes apenas ocorreu erro da necessidade armadura dupla em três lajes: a L6, L7 e L8, sendo a L6 com mais danos, pois era a laje do piso da cozinha. Ainda foram realizadas alterações envolvendo o uso do concreto C50 e laje de 20cm, ambas as modificações foram eficientes, não havendo nenhum aviso de falhas e revelando que L6 tinha as flechas maiores de 2cm conforme a Figura 48.

Figura 48. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio iniciado na cozinha

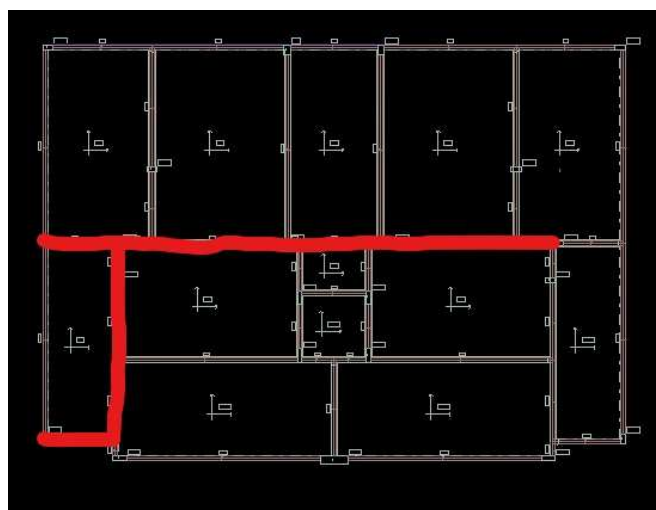


Fonte: o autor, 2020.

4.6.2. Situação de incêndio iniciado na churrasqueira do ático

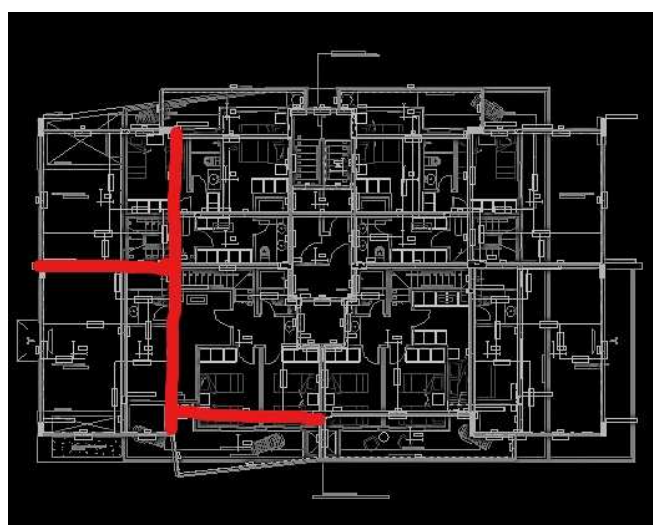
No incêndio iniciado na churrasqueira foram apresentadas flechas superiores a 3cm para as vigas. São 8 vigas com avisos de erro: envolvendo taxa de armadura e forças atuantes superiores aos limites da força cortante resistente de cálculo, sendo as vigas V2, V3, V8, V9, V14, V15, V24 e V25, de acordo com as Figuras 49 e 50. Assim, possuindo boas chances de ocorrer colapsos nesses elementos.

Figura 49. Destaque das vigas na cobertura com avisos de erros na situação de incêndio iniciado na churrasqueira



Fonte: o autor, 2020.

Figura 50. Destaque das vigas no ático com avisos de erros na situação de incêndio iniciado na churrasqueira



Fonte: o autor, 2020.

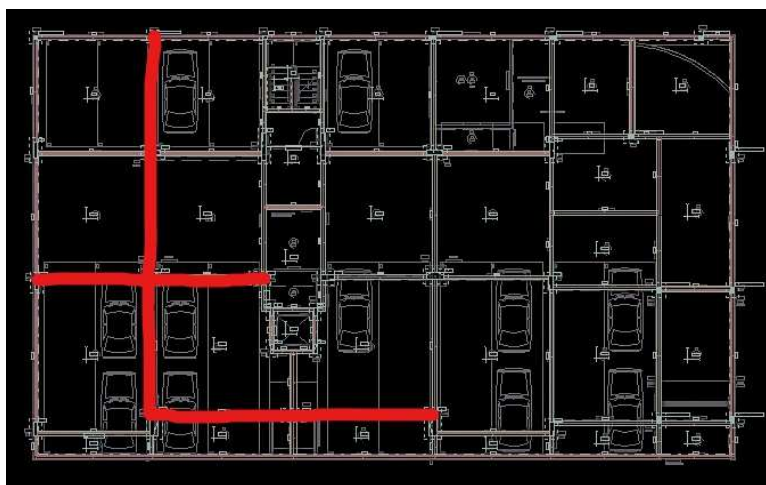
Enquanto isso, nas lajes os erros foram mínimos com apenas mensagem de erro para a L2. As alterações propostas, auxiliaram no desempenho da estrutura em geral com casos inferiores a 4% no geral, sem ter nenhum aviso de erro e flechas inferiores a 1,5cm, para quase todas as peças da estrutura.

Porém foi notado nessa simulação, que o incêndio, concentrado num local, acabou afetando outros elementos estruturais presentes no pavimento tipo, revelando diferente das outras simulações, a possibilidade de o fogo afetar a estrutura de maneira mais ampla, não apenas os elementos próximos ao incêndio.

4.6.3. Situação de incêndio iniciado no carro no pavimento subsolo

Nessas condições as vigas mostraram um bom desempenho, com 2% do total das vigas com flechas maiores de 2cm e apenas 2,4% delas com aviso de erro, o que revela baixas chances de colapso. As vigas V11, V12, V17, V21, V28, V31, visto na Figura 51.

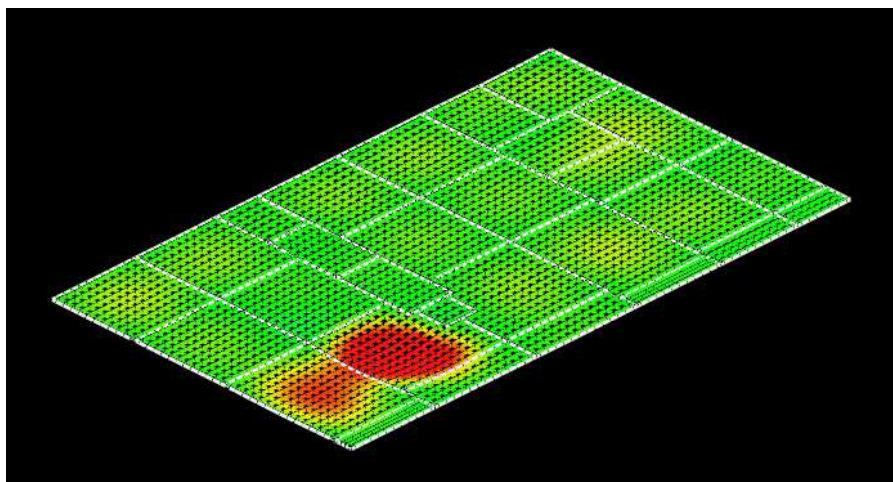
Figura 51. Destaque das vigas no subsolo com avisos de erros na situação de incêndio iniciado no carro



Fonte: o autor, 2020.

As lajes mostraram que foram pouco atingidas com apenas um aviso de erro para a laje L18 e prejudicando L17 de acordo com Figura 52. Além disso, as porcentagens foram mínimas tendo menos de 1% para as flechas de 2cm. As alterações propostas em fck superior e seção com áreas maiores ajudaram com funcionamento da estrutura.

Figura 52. Destaque das lajes com as maiores flechas na situação de incêndio iniciado no carro



Fonte: o autor, 2020.

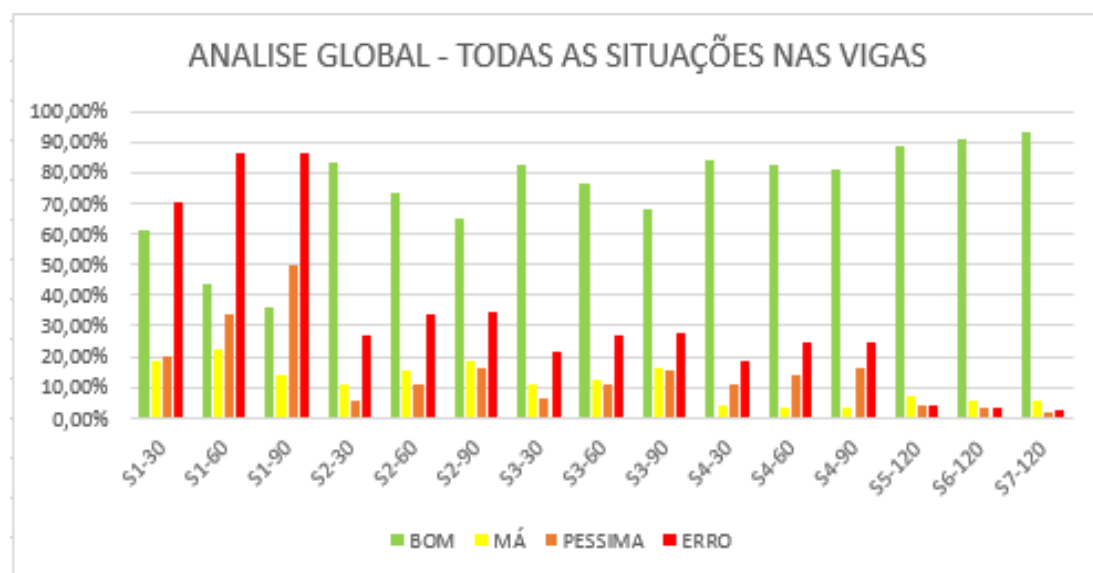
4.7. ANÁLISE FINAL DAS SIMULAÇÕES

As condições mostraram que os erros, apresentados nas quatro primeiras situações, que envolviam, em todos os avisos sobre a força cortante atuante no concreto (V_{sd}), definido no item 17.4.2.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), ultrapassou o limite da força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto (V_{rd2}). E a necessidade de aplicar armaduras nas lajes, devido ao número de armaduras excessivas, com espaçamentos menores de 2cm, definido no item 18.3.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Para as outras simulações, os erros apresentavam um aviso de altas taxas de armaduras, envolvendo a quantidade de barras longitudinais das vigas, possivelmente causado pelas elevadas cargas de compressão e tração nas vigas.

O software Eberick V8 recomendou para a maioria dos avisos fazer alterações como aumentar a seção das vigas e lajes e aumentar f_{ck} , assim confirmando a efetividade dos modelos estruturais modificado para auxílio do projeto. Ressaltando que a aplicação do concreto C50 foi mais eficiente nas vigas, enquanto, para as lajes, a aplicação de espessura de 20cm foi melhor.

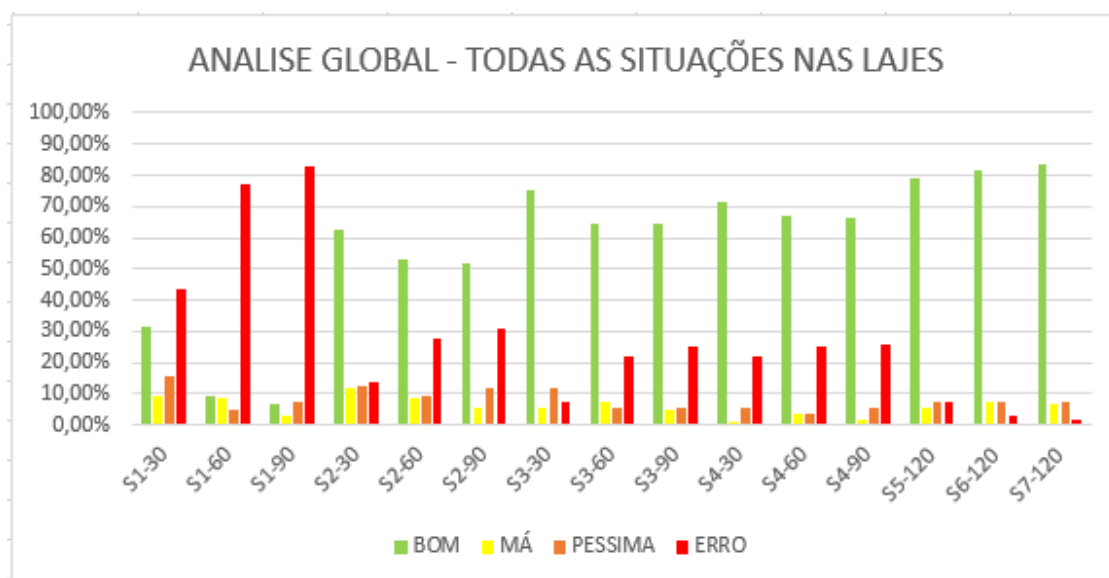
A situação com ocorrência de incêndio em toda a estrutura, revelou ser o mais grave, pois era possível haver colapso global resultando na ruína do edifício, de acordo com os Figuras 53 e 54. Quanto aos outros casos, atuando somente em pavimentos isolados, os danos eram concentrados nas regiões propostas com elevadas, probabilidades de casos de colapso local e ruptura de algumas peças estruturais, visto nos Figura 55 e 56.

Figura 53. Gráfico das porcentagens das vigas, para análises globais, em todos os casos de incêndios



Fonte: o autor, 2020.

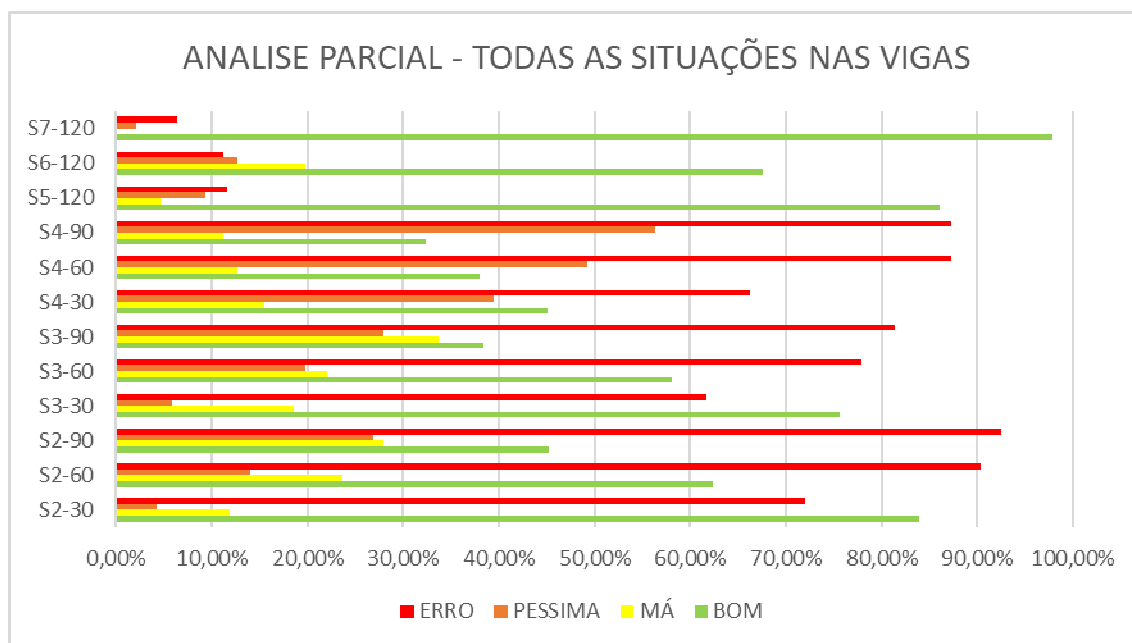
Figura 54. Gráfico das porcentagens das lajes, para análises globais, em todos os casos de incêndios



Fonte: o autor, 2020.

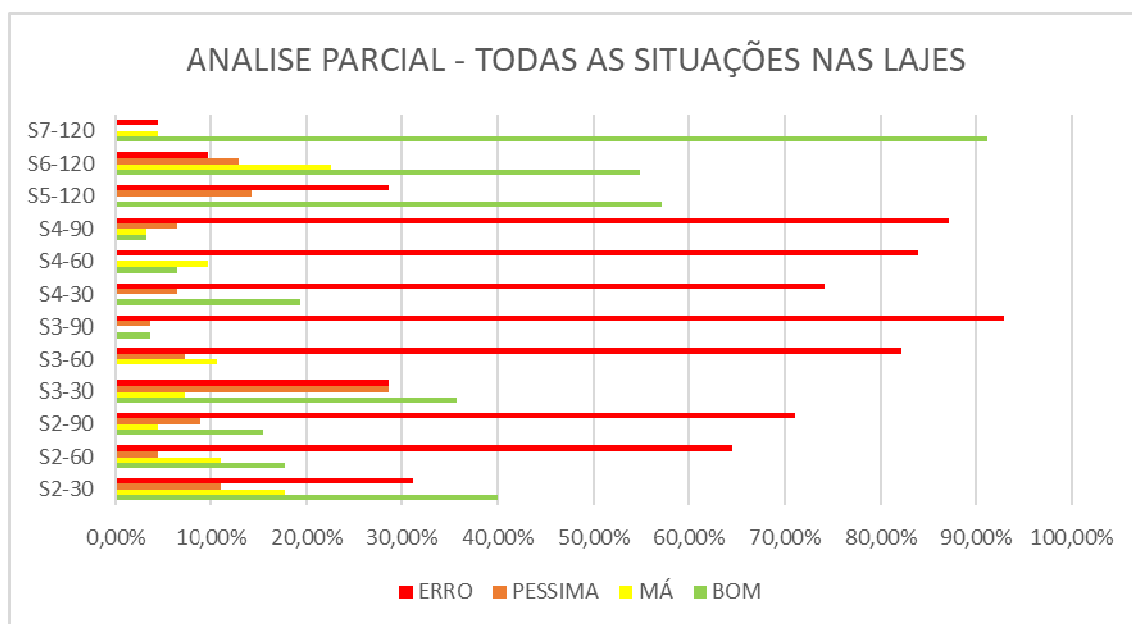
Para as simulações, com TRRF de 30min, a estrutura consegue manter uma qualidade decente perante a emergência do fogo, assim seguindo os padrões exigidos pela NBR 14432 (ABNT, 2001), que define esse mesmo tempo para a edificação estudada. Já nos tempos de 60 e 90min, as condições decaíram rapidamente devido à redução de resistência do concreto serem maiores, sendo casos mais severos para a construção, além do exigido pela norma citada.

Figura 55. Gráfico das porcentagens das vigas, para análises parciais, em todos os casos de incêndios



Fonte: o autor, 2020.

Figura 56. Gráfico das porcentagens das lajes, para análises parciais, em todos os casos de incêndios

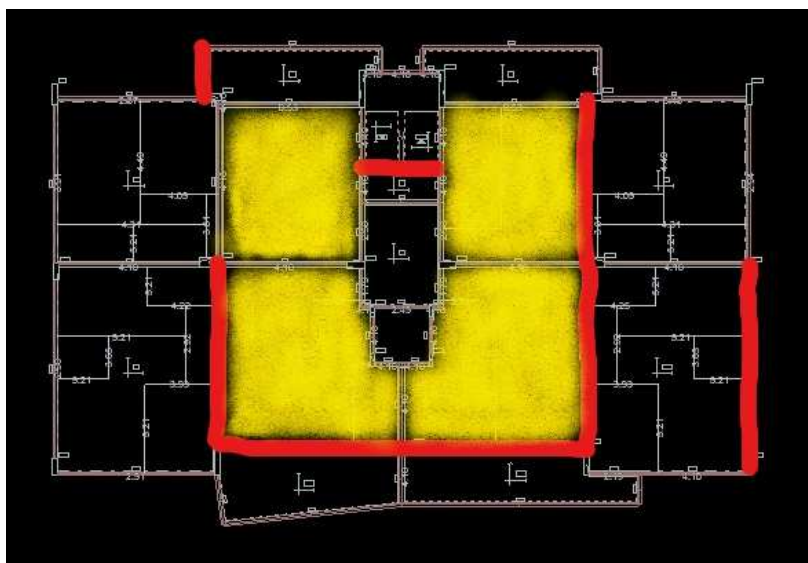


Fonte: o autor, 2020.

Alguns aspectos indicaram no projeto que o pavimento ático era o mais vulnerável, expondo as flechas com maiores valores, e maior número de avisos do software. Provavelmente provocado pela composição estrutural que integra 8 pilares nascendo em vigas junto de lajes com grandes vãos.

Também foi percebido quais eram os elementos mais afetados pela ação do fogo em todo o projeto, sendo eles V6, V16, V17, V23, V24, V34, V35, V37, L4, L5, L9 e L12, conforme Figura 57. Isso revela que as peças mais sobrecarregadas pelas forças serão as primeiras a sofrerem os prejuízos pelo incêndio, assim como as vigas apoiadas em vigas, sem ter o pilar para receber as cargas.

Figura 57. Destaque das lajes e vigas mais prejudicadas por todas as simulações de incêndio estudado



Fonte: o autor, 2020.

Com as informações obtidas foi possível montar uma tabela avaliando os estados limites da estrutura, suas condições e praticáveis medidas de segurança, presentes no Quadros 12 e 13.

Quadro 12. Avaliação final da estrutura para as vigas, em todas as simulações propostas

VIGAS	S1-30	S1-60	S1-90	S2-30	S2-60	S2-90	S3-30	S3-60	S3-90	S4-30	S4-60	S4-90	S5-120	S6-120	S7-120
ELU (PARCIAL)	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	BOA	BOA	BOA
ELU (TOTAL)	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	MÁ	MÁ	MÁ	BOA	MÁ	MÁ	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA
ELS	MÁ	PESSIMA	PESSIMA	BOA	MÁ	MÁ	BOA	BOA	MÁ	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA
Flecha	MÁ	PESSIMA	PESSIMA	BOA	MÁ	MÁ	BOA	BOA	MÁ	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA
Resultado	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	MÁ	MÁ	MÁ	MÁ	MÁ	MÁ	MÁ	MÁ	MÁ	BOA	BOA	BOA

Fonte: o autor, 2020.

Quadro 13. Avaliação final da estrutura para as lajes, em todas as simulações propostas

LAJES	S1-30	S1-60	S1-90	S2-30	S2-60	S2-90	S3-30	S3-60	S3-90	S4-30	S4-60	S4-90	S5-120	S6-120	S7-120
ELU (PARCIAL)	MÁ	PESSIMA	PESSIMA	MÁ	PESSIMA	PESSIMA	MÁ	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	PESSIMA	BOA	BOA	BOA
ELU (TOTAL)	MÁ	PESSIMA	PESSIMA	BOA	MÁ	MÁ	BOA	BOA	MÁ	BOA	MÁ	MÁ	BOA	BOA	BOA
ELS	MÁ	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA		BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA
Flecha	MÁ	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA
Resultado	MÁ	MÁ	MÁ	BOA	MÁ	MÁ	BOA	MÁ	MÁ	MÁ	MÁ	MÁ	BOA	BOA	BOA

Fonte: o autor, 2020.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as considerações finais deste trabalho bem como as sugestões para novos estudos na área.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o término das análises, conclui-se que a situação I, sendo o incêndio em toda a estrutura foi o mais prejudicial, em comparação a situação VII, que foi a menos agressiva para a estrutura. Isso revela que a área de atuação do fogo é mais impactante para o projeto, ao invés de outros fatores, como a intensidade do incêndio.

É possível afirmar que os elementos que estão resistindo as maiores cargas serão potencialmente os mais danificados, como também conclui-se que a convecção do projeto é um aspecto importante, pois se a transferência entre as cargas não for adequadamente distribuído assim ocasionando em regiões fracas, para suportar o fogo, como foi observado no pavimento ático.

As alterações propostas foram eficientes na maioria dos casos estudados, porém suas aplicações não seriam tão práticas de serem implantadas, devido a exigências de seções elevadas de f_{ck} de 50MPa, para edificações residenciais, pois iriam superdimensionar o projeto estrutural.

Pelas simulações estudadas, a estrutura sofreu algum tipo de dano, pela exposição ao fogo, apontando que a resistência do projeto contra o incêndio, era adequado, porém não era o ideal, de acordo com as exigências da NBR 14432 (ABNT, 2001). Relembrando que essa mesma norma determina que a estrutura precisa resistir a incêndios, com temperaturas maiores de 800°C, para os padrões mínimos. Então, finalmente essas avaliações do projeto, durante o incêndio, revela algumas maneiras e aspectos do comportamento da estrutura de projetos

em emergência com fogo. Porém as informações do estudo não explicam todos os efeitos e reações na estrutura, dessa forma ainda não é possível prever os danos de um incêndio em casos reais.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se novos estudos, avaliando outros parâmetros, além das flechas, para aprofundar as informações adquiridas, como por exemplo: momentos, torção, forças cortantes, reações e outros, analisados juntos ou isoladamente. Também é aconselhável, estudar diferentes tipos de edificações, com variáveis grandezas, assim determinando um plausível padrão, para os danos do incêndio e as reações da estrutura nessas circunstâncias.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

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

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, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480 – Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação.** Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681 – Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142 – Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432 – Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações.** Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200 – Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio - Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1 – Edifícios habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2 – Edifícios habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos para os Sistemas Estruturais**. Rio de Janeiro, 2013.

CÁNOVAZ, Manuel Fernández. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1988.

CHUST CARVALHO, Roberto; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Concreto armado: cálculo e detalhamento de estruturas usuais**. 3ª ed. São Carlos: Editora Edufscar, 2007. 25 p.

COSTA, C.N. e PIGNATTA, V. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. Jornadas sul-americanas de engenharia estrutural. Concrete Research, China, v. 34, p. 1001 – 1005. Brasília, 2002.

FIGUEIREDO, A. D.; COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas**. In: Seminário internacional núcleo de pesquisa em tecnologia da arquitetura e urbanismo, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002.

GRATTAN-BELLEW, P. E. *Microstructural Investigation of Deteriorated Portland Cement Concretes*. Construction and Building Materials. Vol. 10. Issue 1. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, February, 1996.

INCÊNDIO. **Consultor fala sobre a necessidades de integrar as áreas de engenharia civil e prevenção de incêndio**. Disponível em: <https://revistaincendio.com.br/especialista-fala-sobre-a-necessidade-de-integrar-a-area-de-engenharia-civil-e-de-prevencao-de-incendio/>. Acesso em 13/07/2020 às 13:42.

KALIFA, Pierre; MENNETEAU, François-Dominique; QUENARD, Daniel. *Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures*. Cement and Concrete Research, N° 30. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, 2000.

LIMA, Rogério C. A. de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

LORENZON, Andressa. **Análise da Resistência Residual do Concreto Após Exposição a Altas Temperaturas**. 2014, 57 f. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

MATTEDI, Domenica L. **Uma contribuição ao estudo do processo de projeto de segurança contra incêndio baseado em desempenho**. 2005, 61 f. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, SP. Ed. Pini, 1994.

MODESTO DOS SANTOS, Lauro. **Cálculo de concreto armado**. 1ª ed. São Paulo: Editora LMS, 1983. 44 p.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo, SP. Ed. PINI, 1997.

OLIVEIRA, Tiago A. de C. P. de. **Gerenciamento e Riscos de Incêndio: Avaliação do Impacto em Estruturas de Concreto Armado através de uma Análise Experimental de vigas Isostáticas**. 2006. 182 f. Trabalho de Conclusão (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; CARLO, U. D.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. 1ª ed. São Paulo: Editora Projeto Editora, 2008. 57 – 67 p.

SOUZA, Adriana A. A. **Influencia do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo**. 2005. 146 f. Trabalho de Conclusão (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005.