

**VERIFICAÇÃO DE SEÇÕES RETANGULARES DE CONCRETO
ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO OBLÍQUA COMPOSTA EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Alan Mercedo Morais Moreira

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**“VERIFICAÇÃO DE SEÇÕES RETANGULARES DE CONCRETO ARMADO
SUBMETIDAS À FLEXÃO OBLÍQUA COMPOSTA EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO”.**

ALAN MERCEDO MORAIS MOREIRA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Márcio da Silva
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. Dr. Ney Amorim Silva
DEES - UFMG - (Co-orientador)

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury
DEES - UFMG

Prof. Dr. José Carlos Lopes Ribeiro
DEC - UFV

Belo Horizonte, 31 de julho de 2013.

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais, Antônio Lúcio e Amélia e ao mestre Estêvão Bicalho

AGRADECIMENTOS

- A DEUS, pela vida e, mais ainda, por permitir que dela eu goze com saúde.
- Ao meu pai, o Engenheiro Civil e meu maior mestre Antônio Lúcio de Andrade Moreira, por me incentivar a me tornar quem eu sou. Por desbravar inicialmente o caminho da engenharia e por todas as longas horas gastas comigo me colocando de volta ao trilho certo.
- À minha mãe, Amélia, por tudo! Por todo amor e carinho, por me esperar dia após dia chegar das aulas que leciono a noite e ainda ter ânimo para me acompanhar jantar com uma conversa sempre doce.
- À minha irmã, Aline, também pelo amor e carinho, por todo apoio e incentivo e pela companhia diária desde que me entendo por gente. A vida sem você jamais teria a mesma graça.
- À minha querida noiva, Lorenza, por todo o companheirismo e atenção sempre regados com muito carinho e com muito amor. Pelo alto astral e bom humor, os quais se tornaram essenciais e fazem um bem imenso pra mim.
- Ao Estêvão Bicalho Pinto Rodrigues, grande mestre, professor, ex-chefe e amigo. Por me mostrar a carreira que gostaria de trilhar, pelo exemplo de ética, profissionalismo e postura impecável, pelos inúmeros conhecimentos transmitidos e por toda a paciência com minhas ausências em horário de trabalho para concluir esta tumultuada jornada.

- A todos os meus amigos e ex-colegas da E.Bicalho. Profissionais de extrema competência com quem pude, por diversas vezes, encher suas cabeças com minhas dúvidas malucas e incessantes. Em especial ao Fabiano Gomes e ao Lucas Mourão.
- Ao Grupo Pádua Pré-moldados e à Precon Engenharia pelas oportunidades dadas e pela confiança depositada.
- Aos professores que ainda não se esqueceram da importância do aluno e nos quais eu me espelho para seguir o mesmo caminho.
- Aos professores Dr. Ney Amorim Silva e Dr. Roberto Márcio da Silva, orientadores deste trabalho, por me acolherem com tanta disposição e objetividade e por me trilharem ao longo desta árdua empreitada.
- Ao meu quase primo e amigo, o Analista de Sistemas Luís Felipe Cunha Martins, o Pi, pela ajuda simplesmente impagável com o Excel e Visual Basic. Por perder horas de sono por minha causa e por toda a atenção disponibilizada. Sem você, meu caro, todo o desenvolvimento deste trabalho seria impossível.
- Ao Marcelo Paixão Pinto Rodrigues, o Bola, pela grande ajuda com as questões de incêndio e por me fornecer o banco de dados das seções no qual se baseia este trabalho.
- Às Faculdades Kennedy por confiarem em mim mesmo sem a conclusão deste trabalho. Aos meus eternos alunos e amigos que lá fiz por me motivarem todos os dias.
- Aos meus avós e familiares (e nestes já incluo a minha querida sogra, sogro, Bruna e Victor) por todo apoio e incentivo tão necessários.
- A Balu por me atrapalhar por diversas vezes a executar este trabalho, mas sempre enchendo aqueles momentos de muita alegria.
- Aos meus amigos mais presentes, principalmente ao Rodrigo, Leonardo, Thiago e aos “Animais”, por não me deixarem esquecer de aproveitar a vida, mesmo durante as tarefas mais exaustivas.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xii
Resumo.....	xiv
Abstract.....	xv
1 Introdução	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Descrição Resumida dos Capítulos.....	4
2 Revisão Bibliográfica.....	6
2.1 Considerações Iniciais.....	6
2.2 Caracterização do Incêndio.....	6
2.3 Fases do Incêndio.....	7
2.4 Incêndio Padrão.....	8
2.5 Propriedades Térmicas dos Materiais.....	9
2.5.1 Concreto.....	9
2.5.1.1 Massa específica.....	9
2.5.1.2 Calor específico.....	9
2.5.1.3 Condutividade térmica.....	10

2.5.2	Aço.....	10
2.5.1.1	Massa específica.....	10
2.5.1.2	Calor específico.....	10
2.5.1.3	Condutividade térmica.....	10
2.6	ABNT NBR 14432:2001 – Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações - Procedimento.....	11
2.7	ABNT NBR 15200:2012 – Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio.....	12
2.7.1	Propriedades do concreto em situação de incêndio.....	14
2.7.2	Propriedades do aço (armadura passiva) em situação de incêndio.....	15
2.7.3	Verificação de estruturas de concreto armado em situação de incêndio.....	18
2.7.3.1	Método tabular.....	19
2.7.3.2	Método analítico para pilares.....	20
2.7.3.3	Método simplificado de cálculo.....	20
2.7.3.4	Métodos avançados de cálculo.....	21
2.7.3.5	Método experimental.....	22
2.8	Alguns Trabalhos Produzidos na Área de Engenharia de Estruturas em Situação de Incêndio.....	22
3	Flexão Oblíqua Composta (FOC).....	27
3.1	Considerações Iniciais.....	27
3.2	Hipóteses Básicas de Cálculo.....	28
3.3	Sobre a Verificação das Seções Retangulares em Situação de Incêndio	30
3.3.1	Coeficientes de ponderação.....	30
3.3.2	Temperaturas nas bordas e no interior da peça.....	31
3.4	Propriedades dos Materiais em Situação de Incêndio.....	34
3.5	Software para Verificação da Flexão Oblíqua Composta.....	35
3.5.1	Dados de entrada do software desenvolvido.....	36

3.5.2	Dados de saída do software desenvolvido.....	38
3.5.3	Procedimentos de cálculo em temperatura ambiente.....	38
3.5.4	Procedimentos de cálculo em situação de incêndio.....	49
3.5.5	Procedimentos de cálculo em situação de pós-incêndio.....	59
4	Validação e Utilização do Programa Computacional Proposto....	64
4.1	Considerações Iniciais.....	64
4.2	Exemplo 1.....	65
4.2.1	Flexão oblíqua composta em temperatura ambiente e manuseio do software proposto.....	65
4.2.2	Flexão oblíqua composta em situação de incêndio e validação do software proposto.....	72
4.2.3	Flexão oblíqua composta em situação de pós-incêndio.....	88
4.2.4	Flexão oblíqua composta em situação de incêndio com uso de agregado calcáreo.....	90
4.3	Exemplo 2.....	92
4.4	Exemplo3.....	99
5	Considerações Finais.....	102
6	Referências Bibliográficas.....	106

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Fases do Incêndio (ALVA, 2000).....	8
FIGURA 2.2 – Curva de incêndio padrão – ISO-834 (ABNT NBR 14432:2001).....	9
FIGURA 2.3 – Redução da resistência à compressão do concreto silicoso em função do aumento da temperatura.....	15
FIGURA 2.4 – Redução da resistência ao escoamento do aço (armadura passiva) em função do aumento da temperatura.....	17
FIGURA 2.5 – Redução do módulo de elasticidade do aço (armadura passiva) em função do aumento da temperatura.....	18
FIGURA 3.1 – Domínios de deformação no ELU (ABNT NBR 6118:2007).....	29
FIGURA 3.2a – Diagrama parábola-retângulo e diagrama simplificado do concreto.....	29
FIGURA 3.2b – Diagrama tensão-deformação do aço.....	30
FIGURA 3.3 – Distribuição de temperatura em uma seção de concreto de 40x50 cm ² - Resultado do Software THERSYS (RODRIGUES, 2009).....	32
FIGURA 3.4 – Diagrama tensão-deformação adotado para o aço em situação de incêndio.....	35
FIGURA 3.5 – Tela de entrada do programa.....	37
FIGURA 3.6 – Tela de código do programa.....	39
FIGURA 3.7 – Seção de concreto armado submetida à flexão oblíqua composta, discretizada em elementos finitos de concreto e detalhada com as barras de armadura.....	42
FIGURA 3.8 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para uma seção (20x20) cm ² submetida a uma $N_{sd} = 420$ kN e armada, em temperatura ambiente, com 4 barras de 10mm...	49
FIGURA 3.9 – Diagrama completo ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para uma seção (20x20) cm ² submetida à uma $N_{sd} = 420$ kN e armada com 4 barras de 10 mm.....	55
FIGURA 3.10 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$), em situação após um incêndio de 60 minutos, para uma seção (12x30) cm ² , armada com 4 barras de 16 mm.....	63

FIGURA 4.1 – Dimensionamento do pilar (20x20) cm ² . Parte 01/04.....	67
FIGURA 4.2 – Dimensionamento do pilar (20x20) cm ² . Parte 02/04.....	67
FIGURA 4.3 – Dimensionamento do pilar (20x20) cm ² . Parte 03/04.....	68
FIGURA 4.4 – Dimensionamento do pilar (20x20) cm ² . Parte 04/04.....	68
FIGURA 4.5 – Aba “DadosIniciais”.....	69
FIGURA 4.6 – Aba “Detalhamento”. Parte 01/02.....	70
FIGURA 4.7 – Aba “Detalhamento”. Parte 02/02.....	71
FIGURA 4.8 – Diagrama ($M_{X,Rd}$ x $M_{Y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente para uma seção de concreto armado 20x20 cm ² armada com 4 ϕ 10mm e $N_{Rd} = 420$ kN...	71
FIGURA 4.9 – Diagrama ($M_{X,Rd}$ x $M_{Y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente para uma seção de concreto armado 20x20 cm ² armada com 4 ϕ 10mm pelo aplicativo web USP.....	72
FIGURA 4.10 – Diagrama ($M_{X,Rd}$ x $M_{Y,Rd}$) gerado para $N_{Rd} = 420$ kN em temperatura ambiente e gerado para $N_{Rd} = 300$ kN para os TRRF de 30 e 60 minutos para uma seção de concreto armado 20x20 cm ² armada com 4 ϕ 10mm e utilização de agregado silicoso.....	73
FIGURA 4.11 – Aba “Detalhamento”. Escolha da situação de pós-incêndio.....	88
FIGURA 4.12 – Diagrama ($M_{X,Rd}$ x $M_{Y,Rd}$) gerado para uma situação após um incêndio de 30 minutos para uma seção de concreto armado 20x20 cm ² armada com 4 ϕ 10mm.....	90
FIGURA 4.13 – Diagrama ($M_{X,Rd}$ x $M_{Y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente e para o TRRF de 30 minutos para uma seção de concreto armado 20x20 cm ² armada com 4 ϕ 10mm e utilização de agregado.....	91
FIGURA 4.14 – Detalhamento da seção (40x80) cm ²	92
FIGURA 4.15 – Aba “DadosIniciais”.....	93
FIGURA 4.16 – Aba “Detalhamento”.....	93
FIGURA 4.17 – Diagrama ($M_{X,Rd}$ x $M_{Y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente e para os TRRF de 30, 60, 90 e 120 minutos para uma seção de concreto armado 40x80 cm ² armada com 8 ϕ 32mm.....	94
FIGURA 4.18 – Diagrama ($M_{X,Rd}$ x $M_{Y,Rd}$) gerado para uma situação após um incêndio de 120 minutos para uma seção de concreto armado 40x80 cm ² armada com 8 ϕ 32mm.....	95

FIGURA 4.19 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente e para os TRRF de 30, 60 e 90 minutos para uma seção de concreto armado 30x30 cm² armada com 4 ϕ 16mm..... 100

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Valores das relações $f_{c,\theta} / f_{ck}$ para concretos de massa específica normal (2000 kg/m ³ a 2800 kg/m ³) preparados com agregados silicosos (ABNT NBR 15200:2012).....	14
TABELA 2.2 – Valores das relações $f_{y,\theta} / f_{yk}$ e $E_{s,\theta} / E_s$ para aços de armadura passiva (ABNT NBR 15200:2012).....	16
TABELA 3.1 – Tabela de resultados gerada pelo programa para a temperatura ambiente para uma seção retangular (20x20)cm ² armada com 4φ10mm.....	56
TABELA 3.2 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 30 minutos para uma seção retangular (20x20)cm ² armada com 4φ10mm.....	57
TABELA 3.3 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 60 minutos para uma seção retangular (20x20)cm ² armada com 4φ10mm.....	57
TABELA 3.4 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 90 minutos para uma seção retangular (20x20)cm ² armada com 4φ10mm.....	58
TABELA 3.5 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 120 minutos para uma seção retangular (20x20)cm ² armada com 4φ10mm.....	58
TABELA 3.6 – Valores da temperatura máxima atingida na seção retangular, $\theta_{cm\acute{a}x}$, para cada um dos TRRF preconizados pela ABNT NBR 14432:2001.....	62
TABELA 4.1 – Valores calculados manualmente para os EFi da seção retangular do Exemplo 1.....	75
TABELA 4.2 – Valores calculados manualmente para as barras de armadura “j” da seção retangular do Exemplo 1.....	83
TABELA 4.3 – Resultados do cálculo manual dos esforços resistentes da seção retangular do Exemplo 1.....	83
TABELA 4.4 – Resultados do cálculo automatizado dos esforços resistentes da seção retangular do Exemplo 1 – aba “DadosFinais”.....	84
TABELA 4.5 – Comparativo entre os resultados do cálculo manual e do automatizado para as forças normais N_{Rd} da seção retangular do Exemplo 1.....	85

TABELA 4.6 – Comparativo entre os resultados do cálculo manual e do automatizado para as forças normais $M_{x,Rd}$ da seção retangular do Exemplo 1.....	86
TABELA 4.7 – Comparativo entre os resultados do cálculo manual e do automatizado para as forças normais $M_{y,Rd}$ da seção retangular do Exemplo 1.....	86
TABELA 4.8 – Tabela de resultados gerada pelo programa para a temperatura ambiente para uma seção retangular (40x80)cm ² armada com 8φ32mm.....	96
TABELA 4.9 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 30 minutos para uma seção retangular (40x80)cm ² armada com 8φ32mm.....	97
TABELA 4.10 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 60 minutos para uma seção retangular (40x80)cm ² armada com 8φ32mm.....	97
TABELA 4.11 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 90 minutos para uma seção retangular (40x80)cm ² armada com 8φ32mm.....	98
TABELA 4.12 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 120 minutos para uma seção retangular (40x80)cm ² armada com 8φ32mm.....	98
TABELA 4.13 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o pós-incêndio de 120 minutos para uma seção retangular (40x80)cm ² armada com 8φ32mm.....	99

RESUMO

Considerando-se que há uma acentuada redução das propriedades mecânicas dos materiais constituintes do concreto armado, concreto e aço, com a elevação da temperatura apresenta-se neste trabalho um método avançado de cálculo de acordo com a norma brasileira vigente ABNT NBR 15200:2012. Este método é capaz de avaliar se uma seção retangular de concreto armado, dimensionada em temperatura ambiente e com uma distribuição de armadura qualquer, resiste aos esforços solicitantes que constituem um caso de flexão oblíqua composta quando submetida a um incêndio. O incêndio é representado pela curva padrão ISO-834 e utilizam-se neste trabalho os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) preconizados pela também norma vigente ABNT NBR 14432:2001. A distribuição de temperatura na seção é rigorosamente calculada utilizando-se o *software* “THERSYS – Sistema para simulação via método dos elementos finitos da distribuição 3D de temperatura em estruturas em situação de incêndio”, desenvolvido no Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais por RIBEIRO (2004). Esse programa computacional leva em consideração todas as não linearidades envolvidas no processo de aquecimento. Desenvolve-se em linguagem MS Visual Basic, dentro do ambiente MS Excel um algoritmo acoplado à planilhas eletrônicas capaz de gerar diagramas de interação para a seção retangular já detalhada à flexão oblíqua composta e dimensionada à temperatura ambiente. Para uma força normal “N” constante são produzidos diagramas de interação (momento fletor em torno do eixo X “Mx”) x (momento fletor em torno do eixo Y “My”) resistentes de cálculo tanto para a temperatura ambiente quanto para os quatro tempos requeridos de resistência ao fogo preconizados em norma (TRRF 30 minutos, 60 minutos, 90 minutos e 120 minutos). Faz-se ainda o mesmo para seções retangulares que tenham sido submetidas a uma situação de incêndio e já tenham sido resfriadas de volta à temperatura ambiente. Exemplifica-se, por fim, numericamente a eficiência do algoritmo e das planilhas desenvolvidas.

Palavras chave: análise térmica – estruturas de concreto – flexão oblíqua composta – método avançado – situação de incêndio – pós-incêndio

ABSTRACT

In heating process of a concrete structure there is an abrupt reduction of the mechanical properties of the raw materials of reinforced concrete, concrete and steel, when this structure is subjected to a fire. This dissertation presents a method according to ABNT NBR 15200:2012, able to assess whether a reinforced concrete rectangular cross-section resists to a compound flexure when it is subjected to fire on four sides during a time recommended by ABNT NBR 14432:2001 and denominated required time of fire resistance (TRRF). The temperature distribution in the cross-section is strictly calculated, considering all nonlinearities involved. It was possible to achieve this using "THERSYS - System simulation via finite element method of 3D temperature distribution in structures subjected to fire", a software developed by RIBEIRO (2004) inside the Department of Structural Engineering of Universidade Federal de Minas Gerais. Some electronic spreadsheets were also developed to calculate and draw interactive diagrams, taking a normal force "N" constant and resistant in section, (bending moment around the X axis "Mx") x (bending moment around the Y axis "My"). The procedure may be used for generating these interactive diagrams in room temperature, in fire situation for the (TRRF) times recommended by Brazilian Standard and in post-fire situation when the cross-section had been subjected to one of the TRRF, specified previously, of exposition to fire and after that it was cooled down back to 20°C.

Keywords: advanced method – compound flexure – concrete structures – fire situation – post fire situation – thermal analysis

1

INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Iniciais

A verificação do nível de segurança de uma edificação contra a ocorrência de um incêndio tem como intuitos principais assegurar a vida dos ocupantes nas edificações afetadas, bem como assegurar a integridade das próprias edificações. Embora o fogo em edificações tenha baixa probabilidade de ocorrência, incêndios podem acontecer em qualquer fase de sua vida útil e podem ser oriundos das mais diversas causas, devendo ser então, combatidos o mais rápido possível na tentativa de minimizar as graves consequências que podem ser geradas.

Algumas características importantes, tais como a incombustibilidade e a baixa condutividade térmica, tendem a caracterizar as estruturas de concreto como estruturas de boa resistência ao efeito do incêndio. Outras características são também relevantes ao se avaliar essa situação, tais como a relativa robustez das peças projetadas em concreto armado e conseqüentemente o grande volume de material de suas peças, além do fato de que, segundo COSTA (2002), ao se aquecer o material não há liberação de gases tóxicos. Em contrapartida, o aumento da temperatura causado pelo incêndio nas seções

de concreto armado basicamente reduz a resistência e o módulo de elasticidade dos materiais atingidos diretamente, o concreto, ou indiretamente, o aço. De outra forma, com o avanço tecnológico dos últimos tempos têm sido adotados nas edificações concretos com resistências mecânicas cada vez maiores e, portanto, peças com menor área de seção transversal. Sabe-se que para um mesmo material, peças de menor massa e volume irão se aquecer mais rapidamente e com isso, a relativa robustez das peças que ajudava a caracterizar o material como de boa resistência contra o incêndio passa a ter seu efeito minorado devido a maior esbeltez adotada dos elementos. Assim sendo, essas peças passam a estar muito mais susceptíveis aos danos causados pelo incêndio.

A análise comportamental das estruturas de concreto armado em situação de incêndio é bastante complexa e muitas vezes métodos analíticos, somente, não são suficientes para a sua determinação. Sabendo-se dos altos custos envolvidos em se ensaiar em laboratório estruturas completas, tem-se como uma alternativa viável e interessante a análise computacional dessas estruturas.

1.2 - Justificativa

Estudar o comportamento de uma estrutura em situação de incêndio é de fato muito importante, pois com o aumento da temperatura há uma diminuição considerável das propriedades mecânicas do aço e do concreto, o que diminui de modo substancial a capacidade portante das estruturas. Pode haver também a incidência de certas patologias, tais como o *spalling* e a desagregação do concreto. CALDAS (2008) define o *spalling* como o destacamento de grande extensão do cobrimento da armadura e explica que o fenômeno pode ser causado por uma elevada pressão de vapor nos poros ou por um elevado gradiente térmico ocorrido no interior da peça. A ocorrência de qualquer um destes é danosa por deixar expostas as armaduras às temperaturas elevadas, podendo levar a estrutura a colapsos parciais ou até mesmo a um colapso total.

O fenômeno do incêndio, no entanto, é de difícil definição durante a elaboração dos projetos estruturais, porque depende de parâmetros muito variáveis, tais como o tipo de revestimento do compartimento no qual ocorre o fenômeno, bem como a sua ventilação

e até mesmo a quantidade de material combustível presente. Portanto, a não previsibilidade total do fenômeno em conjunto com a sua influência negativa às propriedades mecânicas das peças estruturais tornam o estudo comportamental das peças de concreto armado em situação de incêndio bastante necessário. Então, torna-se também essencial o desenvolvimento de ferramentas de verificação da resistência dessas peças quando submetidas aos seus carregamentos de projeto e em exposição ao fogo, mais especificamente, conforme preconizado pela ABNT NBR 14432:2001, para os diferentes tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF), como será realizado neste trabalho.

1.3 - Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a verificação de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta em situação de incêndio, com uma distribuição conhecida das temperaturas atingidas no interior dos elementos devido à ação do fogo atuante por diferentes tempos (TRRF) nas quatro faces externas das peças propostas. Como produto final, objetiva-se desenvolver uma planilha eletrônica em Microsoft Excel, acoplado à rotinas de MS Visual Basic que seja capaz de:

- traçar diagramas de interação dos momentos fletores (M_x x M_y) resistentes de cálculo para seções retangulares de concreto armado na temperatura ambiente;
- verificar seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta em temperatura ambiente com uma distribuição qualquer das armaduras no interior da seção e para uma força normal conhecida;
- traçar diagramas de interação dos momentos fletores (M_x x M_y) resistentes de cálculo para seções retangulares de concreto armado em situação de incêndio, ou seja, para os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) definidos pela ABNT NBR 14432:2001. São eles, TRRF 30 (30 minutos), TRRF 60 (60 minutos), TRRF 90 (90 minutos), TRRF 120 (120 minutos);

- verificar seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta em situação de incêndio;
- traçar diagramas de interação dos momentos fletores (M_x x M_y) resistentes de cálculo para seções retangulares de concreto armado que tenham sido submetidas à um dos TRRF definidos pela ABNT NBR 14432:2001 e que já tenham sido resfriadas até a temperatura de 20°C.

Assim, o usuário poderá verificar qual o tempo máximo de resistência ao fogo de uma peça estrutural de concreto armado, de seção já detalhada em temperatura ambiente, quando esta for submetida ao incêndio padrão ou, em outras palavras, verificar para os esforços solicitantes em situação de incêndio qual será o tempo de exposição ao fogo que ela suportará. Este procedimento deverá ser realizado posicionando o par de momentos fletores atuantes, de cálculo, para uma determinada força normal também de cálculo, na seção entre as curvas geradas e então visualizar a qual TRRF a seção resiste. A análise de peças estruturais onde há ocorrência de desagregação do concreto ou de *spalling* não será contemplada neste trabalho.

1.4 – Descrição Resumida dos Capítulos

O capítulo 1 realiza uma introdução sobre a verificação das estruturas de concreto armado em situação de incêndio e também propõe os objetivos do presente trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto incêndio. Trata também sobre o comportamento dos materiais aço e concreto quando submetidos ao aquecimento provocado pelo fogo, das normas brasileiras que regem o projeto de estruturas em situação de incêndio e referencia alguns trabalhos já publicados sobre este tema.

No capítulo 3 analisa-se o comportamento de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta em temperatura ambiente, em situação de incêndio e também na situação pós-incêndio. Neste capítulo desenvolve-se o software

proposto de verificação de seções retangulares de concreto armado quando estas estiverem em uma das situações acima mencionadas.

No capítulo 4 resolvem-se alguns exemplos, de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta, pelo programa desenvolvido neste trabalho e compara-se com outras fontes já testadas para validá-lo.

No capítulo 5 encontram-se as conclusões sobre o trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Considerações Iniciais

Para um completo entendimento das características que envolvem o fenômeno de um incêndio é necessário conceituar, primeiramente, alguns fatores que serão úteis ao desenvolvimento do trabalho proposto.

2.2 – Caracterização do Incêndio

De acordo com SOUZA (1999), o incêndio é uma forma de combustão e uma situação de fogo fora de controle. Para que ele ocorra é necessária uma combinação de material combustível, de um gás comburente, normalmente o próprio oxigênio do ar, e ainda de uma fonte fornecedora de calor que eleve a temperatura. Portanto, a prevenção e o combate aos incêndios consistem na separação destes elementos ou de pelo menos um deles dos demais. O incêndio pode ser entendido como um aumento brusco da temperatura quando as superfícies de todos os elementos presentes no ambiente entram em ignição. A velocidade de combustão acentua-se naturalmente, consumindo mais

rapidamente os materiais até que, pela escassez de combustível, o processo vai se desacelerando e diminuindo de proporções.

SOUZA (1999) descreve ainda que o “incêndio em um edifício pode ser caracterizado pela combustão dos materiais existentes no local, através de reações de oxi-redução em cadeia, processando-se de maneira extremamente rápida e produzindo calor e luz. No início do fenômeno, em função de ter-se pouco acesso ao oxigênio (vidros e portas fechadas), a velocidade da reação é mais baixa. O progressivo aquecimento dos gases do ambiente, no entanto, alcança um estágio suficiente para romper os vidros, provocando um súbito contato do oxigênio externo com os gases inflamáveis gerados. Neste instante processa-se uma combustão extremamente violenta denominada *flashover*, associada muitas vezes a explosão e ao lançamento de volumosas chamas para o ambiente externo”.

2.3 – Fases do Incêndio

Segundo LANDI (1986) e ALVA (2000) pode-se dividir o fenômeno do incêndio em três fases:

- fase de ignição: também conhecida como fase inicial de elevação de temperatura. Ocasiona a lenta elevação da temperatura nos minutos iniciais e, com isto os materiais combustíveis vão se aquecendo até atingirem as suas temperaturas de ignição. Há pouca liberação de energia térmica devido à ainda pequena quantidade de material que está sendo queimada.
- fase de aquecimento: também conhecida como fase de propagação generalizada. A grande quantidade de energia térmica absorvida pelos materiais faz com que estes liberem gases que são combustíveis e se queimam com grande facilidade. Nesta fase a elevação de temperatura é muito rápida.

- fase de resfriamento: também conhecida como fase de redução da temperatura e extinção: com a escassez de material combustível ocorre a diminuição da temperatura por não haver mais fornecimento de energia térmica.

A FIG.2.1 mostra a ocorrência destas fases em função do tempo.

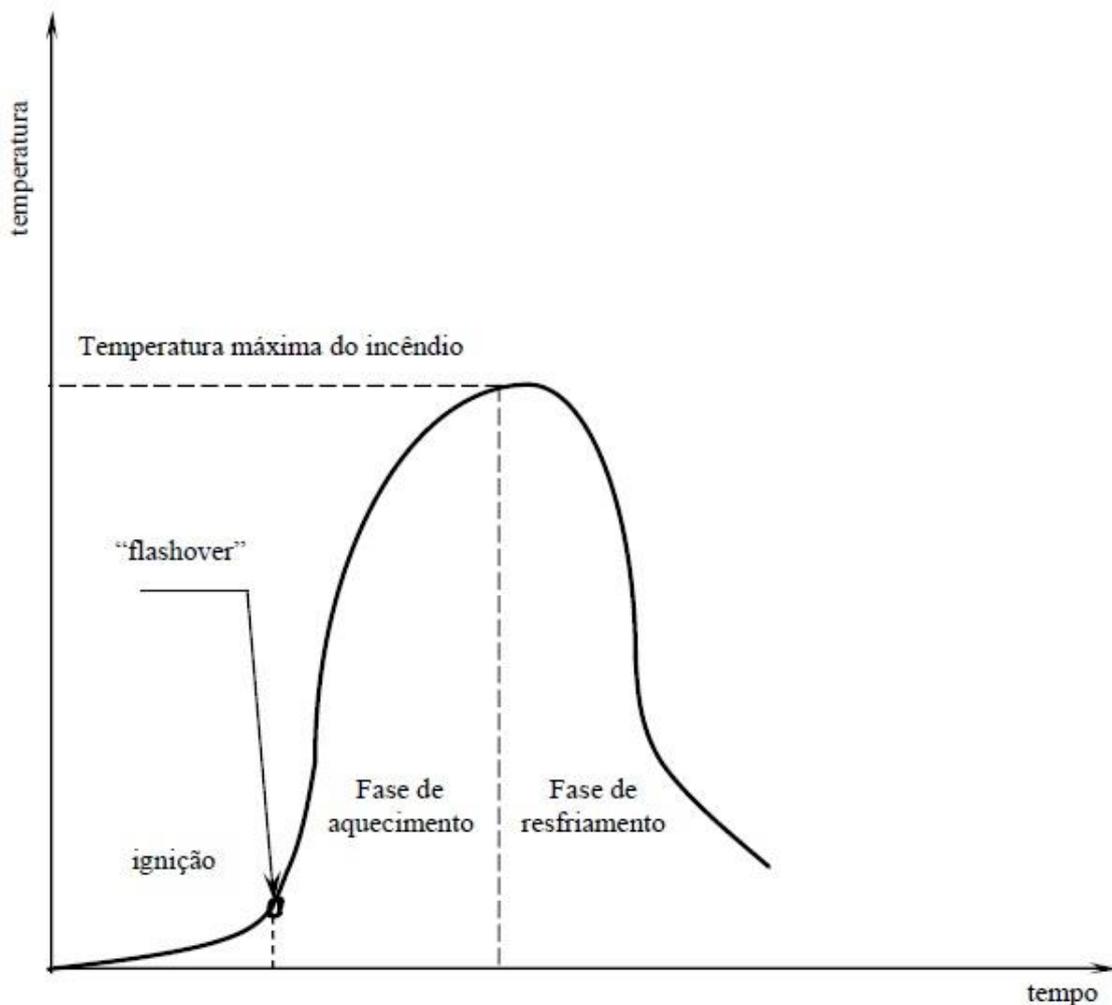


FIGURA 2.1 - Fases do incêndio

ALVA (2000)

2.4 – Incêndio Padrão

O incêndio padrão é a modelagem, em laboratório, de um incêndio cuja lei de variação da temperatura em relação ao tempo seja conhecida. Fornece banco de dados para determinações de técnicas de segurança a serem utilizadas. Porém, as curvas de

incêndio padrão são apenas uma referência teórica e simplificada que buscam representar os mesmos efeitos máximos de um incêndio real.

Neste trabalho adota-se a curva de incêndio padrão ISO-834 definida pela ABNT NBR 14432:2001 para estabelecer a relação entre (temperatura) x (tempo), como pode ser visto na FIG.2.2 e como será posteriormente explicado pela equação 2.9. A análise térmica foi obtida através do software desenvolvido por RIBEIRO (2004) intitulado THERSYS - Sistema para simulação via MEF da distribuição 3D de temperatura em estruturas em situação de incêndio.

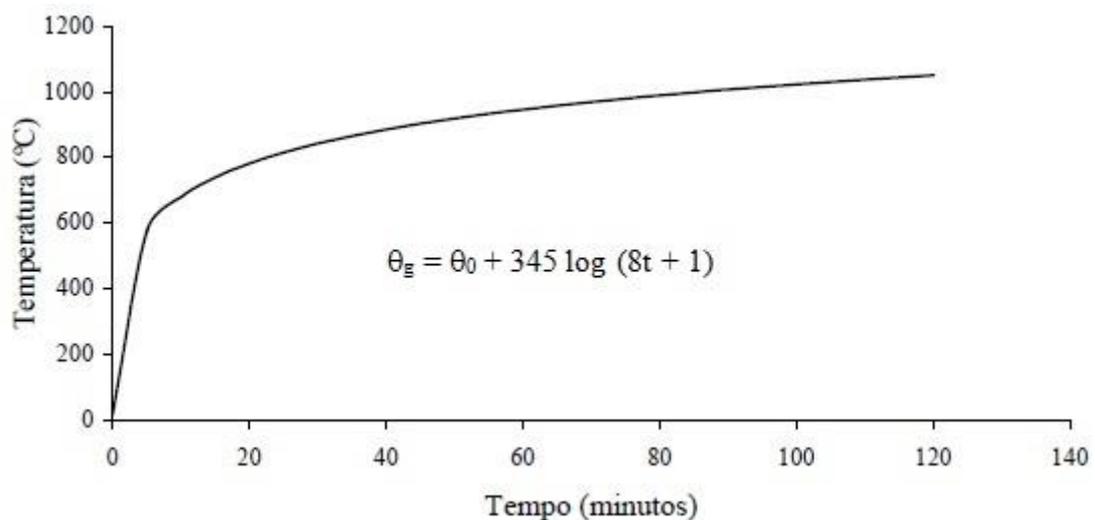


FIGURA 2.2 – Curva de incêndio padrão – ISO-834
(ABNT NBR 14432:2001)

2.5 – Propriedades Térmicas dos Materiais

Todas as propriedades térmicas a seguir são adotadas conforme CASTRO (2005).

2.5.1 – Concreto

2.5.1.1 - Massa específica (ρ_c): considerada constante e igual a $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$, não apresentando variação com a temperatura.

2.5.1.2 - Calor específico (c_c): depende da umidade relativa do concreto, porém, de forma conservadora, será considerado o calor específico (c_c) do concreto

seco. É ainda, função da temperatura do concreto (θ_c) e dado em ($J/kg^\circ C$) pela expressão:

- para $20^\circ C < \theta_c < 1200^\circ C$:

$$c_c = 900 + 80 (\theta_c / 120) - 4 (\theta_c / 120)^2, J/kg^\circ C \quad (2.1)$$

2.5.1.3 - Condutividade térmica (λ_c): é função da temperatura do concreto (θ_c) e é dado em ($W/m^\circ C$) pela expressão:

- para $20^\circ C < \theta_c < 1200^\circ C$:

$$\lambda_c = 2 - 0,24 (\theta_c / 120) + 0,012 (\theta_c / 120)^2, W/m^\circ C \quad (2.2)$$

2.5.2 – Aço

2.5.2.1 - Massa específica (ρ_a): considerada constante e igual a $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$, não apresentando variação com a temperatura.

2.5.2.2 - Calor específico (c_a): é função da temperatura do aço (θ_a) e é dado em ($J/kg^\circ C$) pelas expressões:

- para $20^\circ C < \theta_a < 600^\circ C$:

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3, J/kg^\circ C \quad (2.3)$$

- para $600^\circ C < \theta_a < 735^\circ C$:

$$c_a = 666 + 13002 / (738 - \theta_a), J/kg^\circ C \quad (2.4)$$

- para $735^\circ C < \theta_a < 900^\circ C$:

$$c_a = 545 + 17820 / (\theta_a - 731), J/kg^\circ C \quad (2.5)$$

- para $900^\circ C < \theta_a < 1200^\circ C$:

$$c_a = 650 J/kg^\circ C \quad (2.6)$$

2.5.2.3 - Condutividade térmica (λ_a): é função da temperatura do aço (θ_a) e é dado em ($W/m^\circ C$) pelas expressões:

- para $20^\circ C < \theta_a < 800^\circ C$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a, W/m^\circ C \quad (2.7)$$

- para $800^\circ C < \theta_a < 1200^\circ C$:

$$\lambda_a = 27,3 W/m^\circ C \quad (2.8)$$

2.6 – ABNT NBR 14432:2001 – Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento

A NBR 14432:2001 determina certas condições a serem atendidas pelos elementos de compartimentação e pelos elementos estruturais que integram os edifícios para que o colapso estrutural em situação de incêndio seja evitado.

Permite ainda identificar quando um elemento estrutural pode ser considerado livre da ação de um incêndio, os critérios de resistência ao fogo que devem ser considerados e principalmente estabelece o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) para os elementos estruturais, conforme detalhado no ANEXO A.

Traz ainda, várias definições e dentre elas pode-se destacar a equação para o incêndio-padrão:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log (8t + 1) \quad (2.9)$$

sendo:

t, o tempo, dado em minutos;

θ_0 , a temperatura do ambiente antes de se iniciar o aquecimento, dada em graus Celsius (°C), comumente adotada igual a 20°C;

θ_g , a temperatura dos gases, dada em graus Celsius (°C), no instante t;

Essa norma possui quatro anexos, cujos objetivos são:

- anexo A – Tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF): estabelece o TRRF em 30, 60, 90 ou 120 minutos baseado no grupo da edificação em análise, bem como a sua ocupação/uso e a sua divisão (que podem ser obtidos no anexo B), e também em dados geométricos como a altura da edificação e a profundidade do subsolo. Também define quais estruturas estão isentas dos requisitos de resistência ao fogo.
- anexo B – Classificação das edificações quanto à sua ocupação: estabelece o grupo, ocupação/uso e a divisão da edificação analisada.

- anexo C – Cargas de incêndio específicas: descreve as cargas de incêndio de edificações segundo seu uso e ocupação.
- anexo D – Condições construtivas para edificações das divisões G-1 e G-2 estruturadas em aço: define condições para que as edificações das divisões G-1 e G-2 estruturadas em aço possam usufruir da isenção de requisito de resistência ao fogo.

2.7 – ABNT NBR 15200:2012 – Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio

Essa norma estabelece os critérios de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio e a forma de demonstrar seu atendimento, conforme requisitos de resistência ao fogo estabelecidos na ABNT NBR 14432:2001.

De acordo com a NBR 15200:2012 o projeto de estruturas de concreto armado em situação de incêndio é baseado na correlação entre o comportamento dos materiais em temperatura ambiente (cerca de 20°C), definida por situação normal, e o seu comportamento em situação de incêndio.

Os objetivos da verificação em situação de incêndio são:

- limitar o risco à vida humana;
- limitar o risco da vizinhança e da própria sociedade;
- limitar o risco da propriedade exposta ao fogo.

Esses objetivos são verificados e atingidos se a estrutura puder demonstrar as duas seguintes funções:

- função corta fogo: capacidade de a estrutura impedir que o fogo a ultrapasse ou que o calor a atravesse em quantidade suficiente para gerar a combustão no lado

oposto ao incêndio inicial. Esta função diz respeito ao isolamento térmico e à estanqueidade à passagem das chamas.

- função de suporte: capacidade de a estrutura resistir aos esforços solicitantes em situação de incêndio.

Os requisitos acima descritos estão inseridos num conjunto maior de requisitos gerais de proteção contra incêndio que compreende:

- reduzir o risco de incêndio;
- controlar o fogo em estágios iniciais;
- limitar a área exposta ao fogo (compartimento corta-fogo);
- criar rotas de fuga;
- facilitar a operação de combate ao incêndio;
- evitar ruína prematura da estrutura, permitindo a fuga dos usuários e as operações de combate ao incêndio.

A norma determina que as estruturas sejam verificadas no estado limite último sob combinações excepcionais das ações. Portanto, são admitidas plastificações e ruínas locais que não determinem colapso global da estrutura, mas sim colapsos locais. Dessa maneira, a estrutura só poderá ser reutilizada após o acontecimento de um incêndio, depois de vistoriada, comprovada a sua capacidade estrutural remanescente e depois que sua recuperação for projetada e executada, caso seja necessária. A recuperação da estrutura tem como objetivo que esta volte a ter as mesmas características que apresentava antes do incêndio, recuperando, portanto, todas as capacidades últimas e de serviço exigidas pela ABNT NBR 6118:2007.

A ABNT NBR 14432:2001 estabelece que a ação que corresponde ao incêndio deve ser representada por um intervalo de tempo de exposição ao fogo. Este intervalo de tempo (TRRF) é definido de acordo com os critérios definidos no ANEXO A da norma supracitada.

O calor que é transmitido à estrutura neste intervalo de tempo (TRRF) gera em cada um dos elementos estruturais uma distribuição de temperatura, que varia em função da geometria da peça e dos diferentes tempos de exposição ao fogo. O processo reduz a resistência dos materiais e também a rigidez de cada um deles. Por outro lado, esforços solicitantes oriundos de alongamentos axiais ou de gradientes térmicos são gerados, porém como a rigidez diminui, a capacidade de adaptação plástica das peças aumenta com o aumento da temperatura. Desta maneira, estes esforços adicionais podem, em geral, ser desprezados.

2.7.1 – Propriedades do concreto em situação de incêndio

A resistência mecânica à compressão do concreto, já que sua resistência mecânica à tração é desprezada, é significativamente alterada quando este é submetido a elevadas temperaturas. Essa resistência pode ser obtida em função da temperatura conforme a TAB. 2.1. Como nem todas as temperaturas possíveis são expressas por esta tabela, deve-se interpolar linearmente o valor do coeficiente para a temperatura desejada. Deve-se atentar, ainda, ao fato de que a ABNT NBR 15200:2012 sugere que para concretos preparados com outros agregados, que não sejam os silicosos, deve-se consultar o Eurocode 2, Part 1-2.

TABELA 2.1 – Valores das relações $f_{c,\theta} / f_{ck}$ para concretos de massa específica normal (2000 kg/m^3 a 2800 kg/m^3) preparados com agregados silicosos (ABNT NBR 15200:2012)

Temperatura do Concreto, θ [°C]	Agregado silicoso
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$
20	1,00
100	1,00
200	0,95
300	0,85
400	0,75
500	0,60
600	0,45
700	0,30
800	0,15
900	0,08
1000	0,04
1100	0,01
1200	0,00

A resistência do concreto à compressão diminui com o aumento da temperatura, de acordo com a FIG. 2.3. A relação de variação entre a resistência do concreto à compressão e a temperatura é obtida pela equação:

$$f_{c,\theta} = k_{c,\theta} f_{ck} \quad (2.10)$$

sendo:

f_{ck} , a resistência característica do concreto à compressão em temperatura ambiente;

$k_{c,\theta}$, o fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ ;

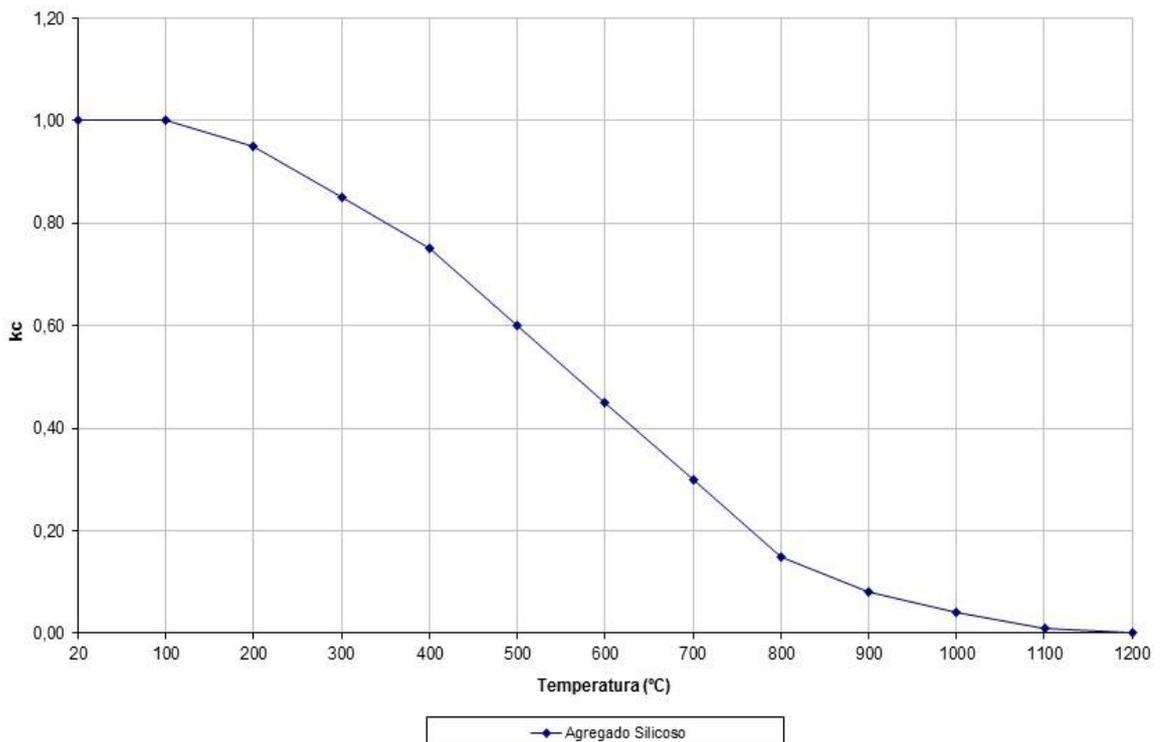


FIGURA 2.3 – Redução da resistência à compressão do concreto silicoso em função do aumento da temperatura

2.7.2 – Propriedades do aço (armadura passiva) em situação de incêndio

As propriedades de resistência ao escoamento do aço, armadura passiva, e de rigidez são significativamente alteradas quando esse é submetido a elevadas temperaturas. Essas devem então, ser obtidas conforme a TAB. 2.2. Como nem todas as temperaturas possíveis são expressas por essa tabela, deve-se interpolar linearmente o valor dos coeficientes para a temperatura desejada.

TABELA 2.2 – Valores das relações $f_{y,\theta} / f_{yk}$ e $E_{s,\theta} / E_s$ para aços de armadura passiva (ABNT NBR 15200:2012)

Temperatura do aço θ (°C)	$f_{y,\theta} / f_{yk}$			$E_{s,\theta} / E_s$	
	Tração		Compressão	CA-50	CA-60
	CA-50	CA-60			
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

A resistência ao escoamento do aço, armadura passiva, diminui com o aumento da temperatura, de acordo com a FIG. 2.4. A relação de variação entre a resistência ao escoamento do aço e a temperatura é obtida pela equação:

$$f_{y,\theta} = k_{s,\theta} f_{yk} \quad (2.11)$$

sendo:

f_{yk} , a resistência característica do aço, armadura passiva, em temperatura ambiente;
 $k_{s,\theta}$, o fator de redução da resistência ao escoamento do aço na temperatura θ ;

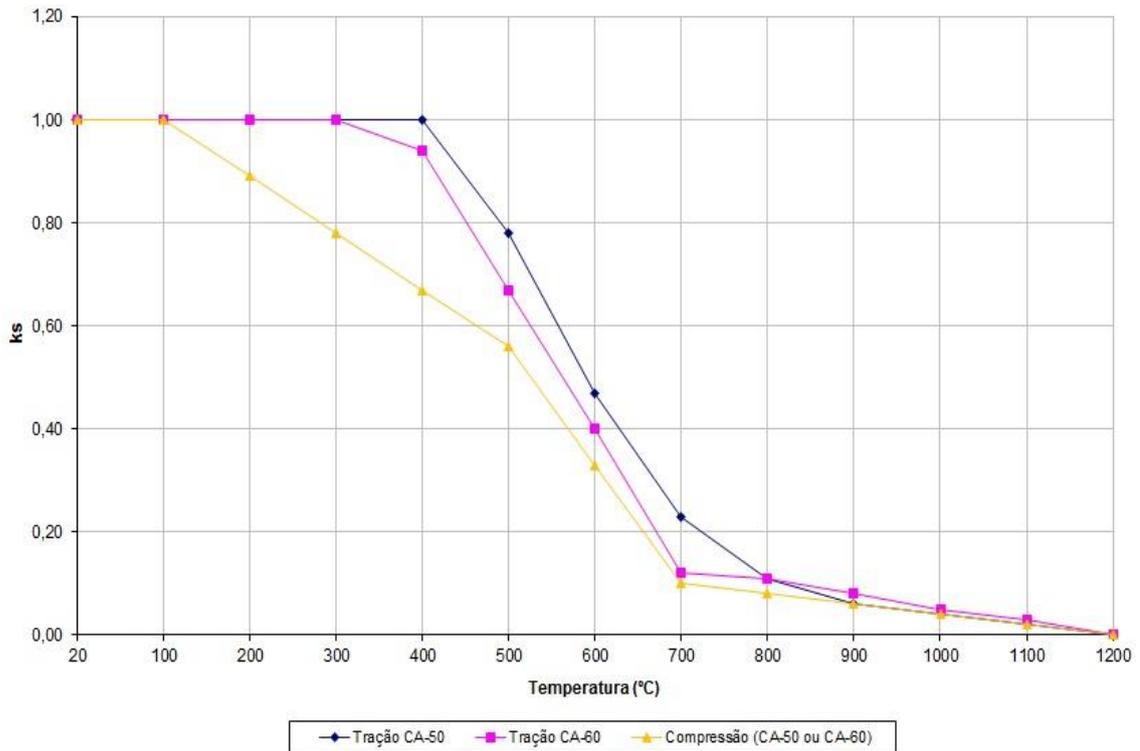


FIGURA 2.4 – Redução da resistência ao escoamento do aço (armadura passiva) em função do aumento da temperatura

A rigidez do aço, armadura passiva, diminui com o aumento da temperatura, ou seja, seu módulo de elasticidade decresce conforme a temperatura aumenta, de acordo com a FIG. 2.5. A relação de variação entre o módulo de elasticidade do aço e a temperatura é obtida pela equação:

$$E_{s,\theta} = k_{sE,\theta} E_s \quad (2.12)$$

sendo:

E_s , o módulo de elasticidade do aço, armadura passiva, em temperatura ambiente;
 $k_{sE,\theta}$, o fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura θ ;

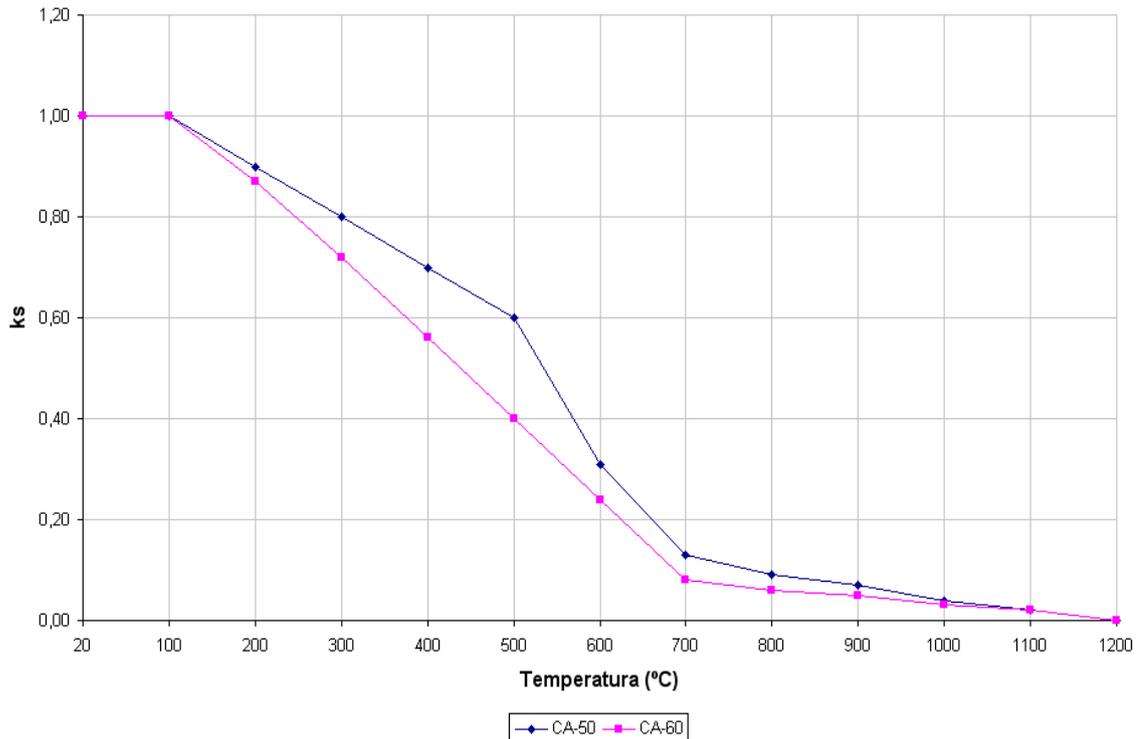


FIGURA 2.5 – Redução do módulo de elasticidade do aço (armadura passiva) em função do aumento da temperatura

2.7.3 – Verificação de estruturas de concreto armado em situação de incêndio

As estruturas de concreto armado são projetadas em temperatura ambiente e, depois disso, devem ser verificadas em situação de incêndio. É determinado pela NBR 15200:2012 que esta verificação seja realizada no estado limite último (ELU), para uma combinação excepcional de ações, através da equação:

$$F_{di} = \gamma_g F_{gk} + F_{q,exc} + \gamma_q \sum_2^n \Psi_{0j} F_{qjk} \quad (2.13)$$

sendo:

- F_{di} , a solicitação de cálculo do elemento, que varia em função da temperatura;
- γ_g , o coeficiente de ponderação do carregamento permanente;
- F_{gk} , a ação permanente característica;
- $F_{q,exc}$, a ação accidental excepcional principal (a ação do incêndio);
- γ_q , o coeficiente de ponderação das demais ações accidentais;
- Ψ_{0j} , o coeficiente de redução para as demais ações accidentais características “j”;
- F_{qjk} , a ação accidental característica;

Nesta verificação, usualmente, considera-se desprezar os esforços decorrentes de deformações impostas, pois são normalmente muito reduzidos e também pelas grandes

deformações plásticas que ocorrem em situação de incêndio. A ação do incêndio consiste em apenas reduzir a resistência dos materiais e a capacidade dos elementos estruturais. Como o incêndio tem uma probabilidade de ocorrência extremamente baixa, a ABNT NBR 8681:2003 permite adotar para o fator de combinação Ψ_{0j} o valor dos fatores de redução Ψ_{2j} correspondentes à combinação quase permanente de ações. Quando a ação principal for o fogo, o fator de redução Ψ_{2j} indicado pela ABNT NBR 6118:2007 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7, conforme recomendado na ABNT NBR 8681:2003.

Dessa forma, a verificação usual da estrutura em situação de incêndio se reduz a mostrar a condição:

$$S_{d,i} = \gamma_g F_{gk} + F_{q,exc} + \gamma_q \sum_2^n \Psi_{2j} F_{qjk} \leq R_{d,i} [f_{ck}(\theta); f_{yk}(\theta)] \quad (2.14)$$

sendo:

$S_{d,i}$, a solitação de cálculo da peça estrutural em função da variação de temperatura;

$R_{d,i}$, o esforço resistente da peça estrutural em situação de incêndio.

Existem diversos métodos de se realizar esta verificação. A ABNT NBR 15200:2012 descreve cinco deles.

2.7.3.1 – Método tabular

Pelo método tabular a verificação com relação ao efeito do incêndio consiste apenas em atender às dimensões mínimas para as peças estruturais estabelecidas em tabelas presentes no corpo da ABNT NBR 15200:2012. Estas dimensões levam em consideração o tipo da peça estrutural, bem como o TRRF em questão. Todavia, estas dimensões mínimas: espessura de lajes, larguras de vigas e seções transversais de pilares e tirantes, e principalmente, a distância entre o eixo da armadura longitudinal e a face exposta ao fogo (c_1), devem estar de acordo com a ABNT NBR 6118:2007 e com a ABNT NBR 9062:2006.

As peças de concreto armado se rompem usualmente em situação de incêndio, como mostram os ensaios, por flexão ou flexo-compressão e, não por cisalhamento. Deste

modo, pelo método tabular, faz-se a consideração apenas da armadura longitudinal e não da armadura transversal. Para uma visualização completa dos procedimentos de aplicação do método deve-se consultar o item 8.2 da ABNT NBR 15200:2012.

2.7.3.2 – Método analítico para pilares

Para pilares com mais de uma face exposta ao fogo, pode-se utilizar a formulação apresentada no item 8.3 da ABNT 15200:2012 para o cálculo de tempo de resistência ao fogo (TRF), cujo valor deve ser superior ou igual ao TRRF.

Essa formulação é adequada a estruturas de nós fixos. Entretanto, ela pode ser empregada nos casos de estruturas em que os deslocamentos não lineares (2ª ordem) devido ao desaprumo puderem ser considerados em situação de incêndio. Em qualquer caso, os efeitos globais de 2ª ordem à temperatura ambiente não podem ultrapassar 30% dos respectivos esforços de 1ª ordem (por exemplo, $\gamma_z \leq 1,3$).

2.7.3.3 – Método simplificado de cálculo

O método simplificado de cálculo é baseado em algumas hipóteses que serão descritas adiante, porém, é importante salientar que a norma em questão determina que o método simplificado de cálculo não confere a função corta fogo à estrutura. Portanto, caso esta função seja necessária deve-se fazer a verificação por algum dos outros métodos.

- independentemente de qual seja a combinação de esforços considerada, a solicitação de cálculo em situação de incêndio ($S_{d,i}$) pode ser considerada como 70% da solicitação de cálculo em situação normal (S_d). A equação 2.16 expressa a situação.

$$S_{d,i} = 0,70 S_d \quad (2.16)$$

- em situação de incêndio, a resistência de cálculo das peças estruturais ($R_{d,i}$) pode ser calculada considerando a exposição ao fogo de acordo com o TRRF adotado e tendo como base a distribuição de temperatura obtida para a seção. Essa

distribuição de temperatura pode ser calculada por softwares específicos ou pode também ser encontrada em literatura técnica apropriada.

- os esforços resistentes de cálculo ($R_{d,i}$) para a situação de incêndio são obtidos de forma análoga aos obtidos para a temperatura ambiente, de acordo com a ABNT NBR 6118:2007, adotando porém para o aço e para o concreto a resistência média em situação de incêndio. Essa resistência média é obtida distribuindo-se uniformemente na seção de concreto ou na armadura total a perda de resistência por aquecimento desses elementos. Os coeficientes de ponderação nesse caso são correspondentes às combinações excepcionais das ações, sendo 1,2 para o concreto e 1,0 para o aço.

2.7.3.4 – Métodos avançados de cálculo

Para que um método qualquer seja considerado um método avançado de cálculo, algumas hipóteses básicas, que serão descritas adiante, têm que ser atendidas. Entretanto, a verificação da capacidade resistente da peça estrutural deve respeitar o que determinam as normas ABNT NBR 6118:2007 para estruturas de concreto armado e ABNT NBR 9062:2006 para estruturas de concreto pré-moldado. As hipóteses são:

- em situação de incêndio, a combinação das ações deve ser rigorosamente elaborada de acordo com a ABNT NBR 8681:2003.
- em situação de incêndio, os esforços solicitantes ($S_{d,i}$), acrescidos dos efeitos das deformações térmicas restringidas, devem ser calculados por modelos não-lineares e que sejam capazes de considerar as profundas redistribuições de esforços que ocorrerem. Todas as não-linearidades envolvidas no processo devem também ser consideradas.
- em situação de incêndio, os esforços resistentes ($R_{d,i}$) devem ser calculados, obrigatoriamente, levando-se em consideração as distribuições de temperatura

de acordo com o TRRF adotado e considerando-se também as não-linearidades envolvidas.

Como será posteriormente realizada nesta dissertação, a distribuição da temperatura na peça estrutural pode ser determinada numericamente por softwares específicos, tais como THERSYS acoplado ao GID que foram aqui utilizados, que a considerem de maneira precisa e adequada.

2.7.3.5 – Método experimental

Em casos especiais, como o de peças pré-moldadas industrializadas, pode-se considerar uma resistência ao fogo superior à calculada com base na norma em questão, desde que esta resistência seja confirmada por ensaios específicos.

2.8 – Alguns Trabalhos Produzidos na Área de Engenharia de Estruturas em Situação de Incêndio

Foi pesquisada uma grande variedade de textos e são aqui referenciados os que mais contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

COSTA, C. N. (2002) apresenta, como objeto de estudo de sua dissertação de mestrado, métodos tabulares e simplificados existentes com o objetivo de tornar exequível ao meio técnico dimensionar e avaliar a segurança de estruturas de concreto convencionais em situação de incêndio.

FIGUEIREDO JÚNIOR, F. P. (2002) elabora, em sua dissertação de mestrado, um programa computacional denominado CALTEMI – Cálculo de Temperatura em Elementos Estruturais. Esse software realiza análise térmica transiente e não-linear com base no Método dos Elementos Finitos para obtenção dos valores de distribuição de temperatura nos diversos pontos das seções analisadas.

SOARES, E. M. P. (2003) apresenta, em sua dissertação de mestrado, um método simplificado de dimensionamento e/ou verificação de peças usuais de concreto armado

em situação de incêndio. Os elementos são dimensionados em temperatura ambiente e em seguida obtém-se os esforços resistentes em caso de incêndio, reduzindo-se as propriedades mecânicas do aço e do concreto conforme proposto pelo já extinto Anexo B do projeto de revisão da NBR 6118:1980 e pelo EUROCODE 2 (1996) – Parte 1.2. As temperaturas nos elementos analisados foram determinadas utilizando-se perfis de temperatura para vigas e pilares propostos pelo CEB (1982) e a tabela de variação de temperatura proposta pela ABNT NBR 14323:1999 para lajes.

RIBEIRO, J. C. L. (2004) elabora, com base no programa computacional desenvolvido por FIGUEIREDO JÚNIOR (2002) e descrito anteriormente, um software denominado THERSYS – Sistema para Simulação via MEF da Distribuição Tridimensional de Temperatura em Situação de Incêndio – que realiza, de maneira automática, a análise térmica bidimensional e tridimensional de elementos estruturais.

CASTRO, G. G. S. (2005) apresenta, em sua dissertação de mestrado, um método geral de cálculo de acordo com a antiga norma brasileira ABNT NBR 15200:2004, capaz de avaliar se um elemento estrutural de concreto armado, dimensionado à temperatura ambiente, resiste a incêndios com diversos tempos requeridos de resistência ao fogo, mesmo que as propriedades mecânicas de seus materiais constituintes, aço e concreto, sejam fortemente reduzidas pelo aumento de temperatura. As distribuições de temperatura são rigorosamente calculadas pelo programa computacional THERSYS, desenvolvido por RIBEIRO (2004) e descrito anteriormente. Sua dissertação de mestrado contempla o estudo da flexão simples em vigas e lajes e da compressão centrada em pilares, todos em concreto armado.

FRANSSEN, J. M. (2005) apud CALDAS (2008) desenvolveu um software específico para análise bidimensional e tridimensional de estruturas em situação de incêndio, denominado SAFIR. O autor justificou que a possibilidade de analisar o comportamento de estruturas completas, que dificilmente poderiam ser ensaiadas experimentalmente, impossibilitando a observação de fenômenos como a redistribuição de esforços e a possibilidade de realizar estudos paramétricos, são algumas vantagens dos métodos numéricos. Atualmente, métodos numéricos são usados principalmente para o projeto

de estruturas complexas ou para o desenvolvimento e verificação de procedimentos de projeto.

NAJJAR e BURGESS (1996), apud CALDAS (2008) desenvolveram um programa computacional denominado 3DFIRE, parte componente do programa VULCAN que está em desenvolvimento pela Universidade de Sheffield, UK, desde 1985, no qual elementos de viga com dois nós possuem oito graus de liberdade locais por nó e onze graus de liberdade globais. Para isso funções de forma cúbicas são utilizadas. Os oito graus de liberdade incluem três translações, três rotações, a derivada da deformação axial e o empenamento. A variação da temperatura somente é considerada ao longo da seção e é um dado de entrada para o programa. A deformação devido ao cisalhamento não é considerada na obtenção da matriz de rigidez.

HUANG, Z. et al, (2003) apud CALDAS (2008) justifica que o elemento de viga com oito graus de liberdade locais e onze globais, tem sido preciso para níveis de deslocamentos além dos aceitáveis para estruturas em situação de incêndio, porém, apresenta algumas desvantagens devido à presença de graus de liberdade além dos convencionais. O tempo de processamento, por exemplo, se torna muito maior quando comparado com análises usando seis graus de liberdade por nó. Sempre é necessário aplicar restrições a alguns graus de liberdade mesmo quando não existem condições de contorno, o que pode influenciar os resultados, especialmente quando os deslocamentos se tornam grandes. Essas observações motivaram os autores a implementarem no programa VULCAN um elemento isoparamétrico com 3 nós e seis graus de liberdade por nó apresentado por BATHE (1982).

CALDAS, R. B. (2008) apresenta, em sua tese de doutorado, o desenvolvimento e implementação de modelos numéricos não-lineares para a análise térmica e mecânica de estruturas de aço, concreto e mistas de aço e concreto em situação de incêndio. As distribuições de temperatura nas seções transversais são obtidas através de procedimentos para análise de transferência de calor, com base no método das diferenças finitas e elementos finitos. Um novo procedimento para análise da resistência de seções arbitrárias de vigas, colunas e lajes em situação de incêndio é apresentado.

Um elemento de viga tridimensional, capaz de simular estruturas submetidas ao incêndio, é implementado e testado.

COSTA, C. N. (2008) apresenta, em sua tese de doutorado, o estado da arte das diretrizes do projeto estrutural de segurança contra incêndio dos edifícios, o que compreende os modelos matemáticos de incêndio disponíveis, os efeitos do calor sobre os materiais sob a ótica do projeto estrutural, o comportamento peculiar das estruturas de concreto armado em situação de incêndio e os métodos de dimensionamento disponíveis na literatura internacional. Propõe ainda, uma estimativa para tornar o método do tempo equivalente mais racional para determinar o TRRF e realiza análises térmicas e termomecânicas numéricas a fim de se avaliar de forma mais precisa a resistência ao fogo de seções de concreto armado submetidas à flexão simples e projetadas conforme a ABNT NBR 6118:2003 segundo os critérios de estabilidade e isolamento térmico para um tempo de aquecimento menor que 120 minutos.

RODRIGUES, M. P. P. (2009) aprofundou o estudo de CASTRO (2005), sugerido pela própria autora ao final de sua dissertação de mestrado. Também utilizando o programa THERSYS desenvolvido por RIBEIRO (2004) para a obtenção da distribuição de temperatura na seção transversal, desenvolveu-se um método geral de cálculo, baseado na antiga norma ABNT NBR 15200:2004, capaz de avaliar se uma seção transversal de concreto armado resiste aos diversos tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) preconizados pela ABNT NBR 14432:2001. Diferentemente de CASTRO (2005), cujo estudo se limitava à compressão centrada nos pilares e à flexão simples para vigas e lajes, o método geral desenvolvido por RODRIGUES (2009) analisava seções submetidas à flexão normal composta em situação de incêndio. Avançando em relação aos estudos de CASTRO (2005) e SOARES (2003), analisou o diagrama tensão-deformação do aço com a redução simultânea de sua tensão e de seu módulo de elasticidade, obtendo-se inclusive uma deformação $\varepsilon_{yd,\theta}$ diferente para cada temperatura.

KLEIN JÚNIOR, O. (2011) desenvolve, em sua dissertação de mestrado defendida pela USP de São Paulo, um método denominado por ele de FNC-FOGO, para o cálculo do tempo de resistência ao fogo de pilares de concreto armado em situação de incêndio

submetidos à flexão normal composta. O processo é análogo ao utilizado para o cálculo de pilares de concreto armado em temperatura ambiente, porém considerando-se a influência do aquecimento nas propriedades dos materiais, a atuação das deformações térmicas e a não linearidade geométrica do problema, baseado nas relações momento-curvatura.

ALBUQUERQUE, G. B. M. L. (2012) apresenta, em sua dissertação de mestrado, o estado da arte sobre vigas de concreto armado em situação de incêndio, tanto em termos nacionais como internacionais. Estudou ainda, pelo projeto de revisão, os diferentes métodos que foram apresentados na ABNT NBR 15200:2012 para o dimensionamento de vigas de concreto armado expostas ao fogo, incluindo o método tabular bem detalhado no corpo da referida norma. Por fim, comparou métodos simplificados de análise e determinação dos momentos fletores resistentes em situação de incêndio, tais como pela norma brasileira, européia, pelo programa de computador Super Tempcalc e propôs um método alternativo.

3

FLEXÃO OBLÍQUA COMPOSTA (FOC)

3.1 – Considerações Iniciais

A flexão é dita oblíqua quando o plano de atuação do momento fletor (M) não contém, obrigatoriamente, nenhum eixo principal da seção transversal à qual se refere; e é dita composta quando acompanhada de uma força normal (N). Portanto, a flexão oblíqua composta é a ação combinada, em um elemento estrutural, do terno; momento fletor em torno do eixo x (M_x), momento fletor em torno do eixo y (M_y) e força normal (N).

Este tipo de solicitação é comumente encontrado em pilares de canto de estruturas de concreto armado. Esse tipo de pilar recebe as extremidades de duas vigas perpendiculares entre si e, conseqüentemente, é solicitado por dois momentos fletores em duas direções diferentes. Somando-se esse efeito à carga vertical também transferida por estas vigas e pela continuidade do pilar, além do peso próprio do elemento, fica caracterizado o caso de flexão oblíqua composta.

3.2 – Hipóteses Básicas de Cálculo

As hipóteses básicas de cálculo que regem a flexão oblíqua composta no estado limite último (ELU), de acordo a ABNT NBR 6118:2007, e excluído o caso das vigas paredes, são:

- as seções transversais se mantêm planas após as deformações;
- a deformação das barras passivas aderentes em tração ou compressão deve ser a mesma do concreto em seu entorno;
- as tensões de tração no concreto, normais à seção transversal, devem ser desprezadas;
- para o encurtamento de ruptura do concreto nas seções parcialmente comprimidas considera-se o valor convencional de 3,5‰ (domínios 3 a 4a da FIG. 3.1);
- nas seções inteiramente comprimidas (domínio 5 da FIG. 3.1) admite-se que o encurtamento da borda mais comprimida, na ocasião da ruptura, varie de 3,5‰ a 2,0‰, mantendo-se inalterada e igual a 2,0‰ a 3/7 da altura total da seção a partir da borda mais comprimida;
- para o alongamento máximo de ruptura do aço considera-se o valor convencional de 10‰ (domínios 1 e 2 da FIG. 3.1), a fim de prevenir deformação plástica excessiva;
- a tensão de compressão no concreto é determinada utilizando-se o diagrama simplificado ou de forma mais rigorosa o diagrama parábola-retângulo de tensão-deformação, conforme a FIG. 3.2a, cujas equações definidas são:

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{2\text{‰}} \right)^2 \right] \quad \text{para } 0 \leq \varepsilon_c \leq 2,0\text{‰} \quad (3.1)$$

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \quad \text{para } 2,0\text{‰} \leq \varepsilon_c \leq 3,5\text{‰} \quad (3.2)$$

- a tensão nas armaduras deve ser obtida a partir de suas deformações usando o diagrama tensão-deformação da FIG. 3.2b.

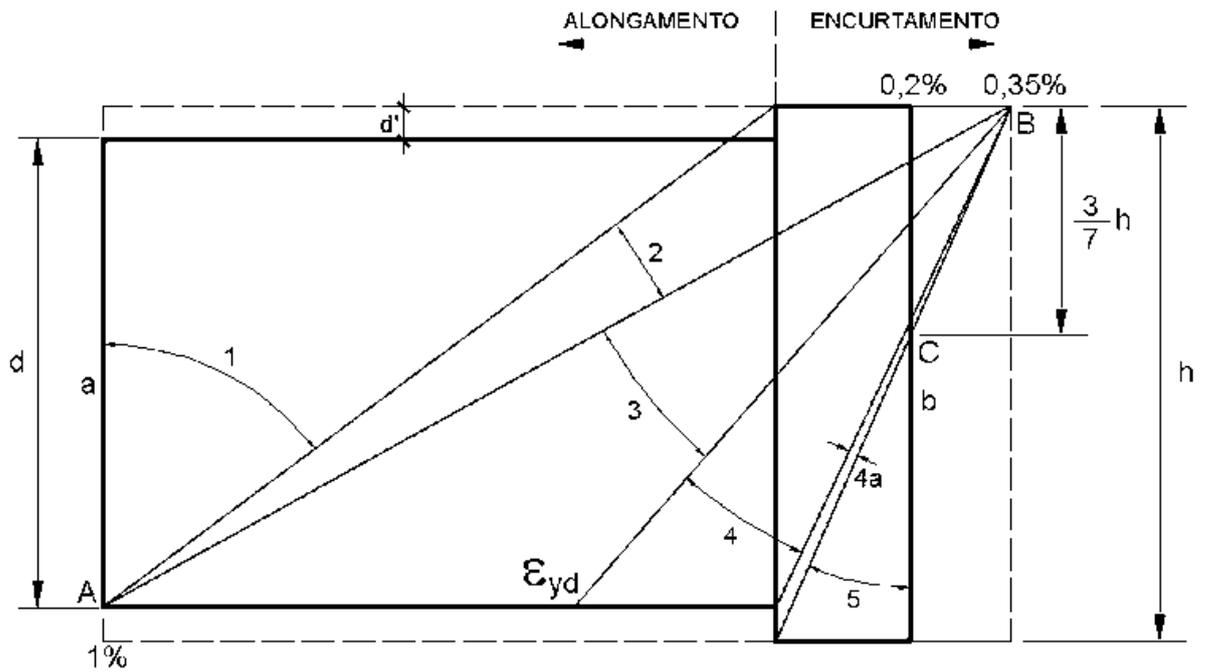


FIGURA 3.1 – Domínios de deformação no ELU (ABNT NBR 6118:2007)

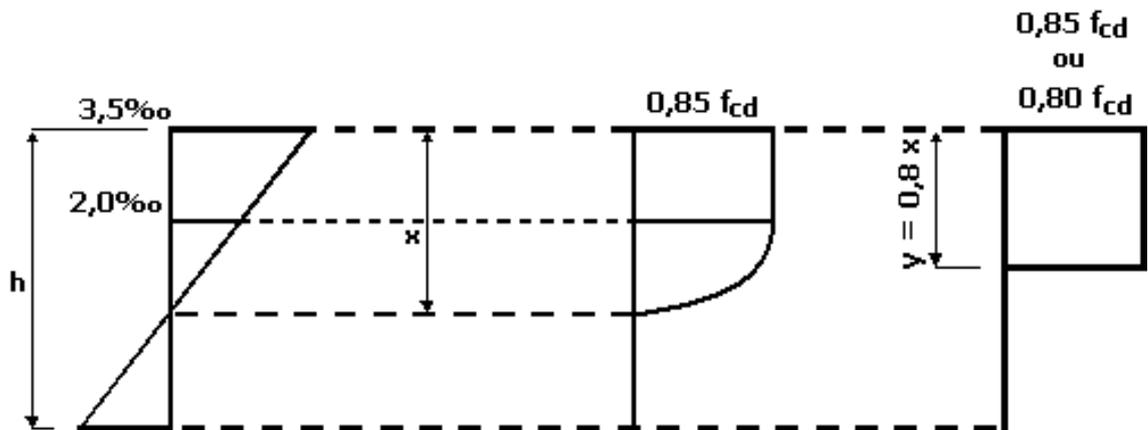


FIGURA 3.2a – Diagrama parábola-retângulo e diagrama simplificado do concreto

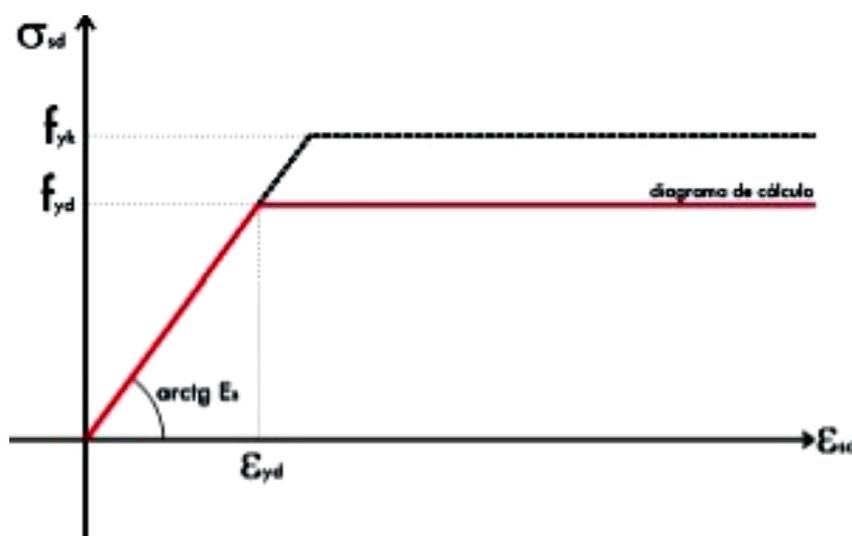


FIGURA 3.2b – Diagrama tensão-deformação do aço

3.3 – Sobre a Verificação das Seções Retangulares em Situação de Incêndio

A ABNT NBR 15200:2012 determina que a verificação de uma estrutura em concreto armado em situação de incêndio deve ser realizada após esta mesma estrutura ter sido calculada e detalhada de acordo com a ABNT NBR 6118:2007 em temperatura ambiente. Tal verificação consiste então, em depois de se determinar os tempos requeridos de resistência ao fogo para a situação na qual se enquadra a estrutura pela ABNT NBR 14432:2001, verificar a estrutura por um dos métodos descritos pela ABNT NBR 15200:2012. No presente trabalho a verificação à flexão oblíqua composta será realizada segundo os critérios que regem um método avançado de cálculo.

3.3.1 – Coeficientes de ponderação

Os coeficientes de ponderação utilizados serão aqueles correspondentes às combinações excepcionais das ações e que são determinados pela ABNT NBR 8681:2003. São eles:

- Concreto: $\gamma_c=1,20$
- Aço: $\gamma_s=1,00$
- Ações: $\gamma_f=1,00$

3.3.2 – Temperaturas nas bordas e no interior da peça

Segundo a ABNT NBR 15200:2012, a verificação de estruturas de concreto armado em situação de incêndio por um método avançado de cálculo deve considerar a distribuição de temperatura nas bordas e no interior da peça estrutural de modo criterioso e bastante rigoroso, considerando-se então, as não linearidades envolvidas. No presente trabalho, a determinação numérica da temperatura nas seções retangulares estudadas foi obtida através do software THERSYS - Sistema para simulação via MEF da distribuição 3D de temperatura em estruturas em situação de incêndio. Esse software foi elaborado por RIBEIRO (2004) e se fundamenta no Método dos Elementos Finitos (MEF) para realizar uma análise térmica de elementos bidimensionais e tridimensionais de geometria qualquer. Para o comportamento do aço e do concreto submetidos às diferentes temperaturas, referentes aos diferentes TRRF, foram utilizadas a massa específica, o calor específico e a condutividade térmica descritos pelas equações 2.1 a 2.8.

Supondo a peça estrutural de seção retangular submetida a incêndio nas suas quatro faces, a hipótese de que apenas o cobrimento da armadura é fundamental para protegê-la do calor ao qual a estrutura é exposta não é atendida. CASTRO (2005) observou que as temperaturas nas barras de aço eram praticamente idênticas à temperatura no concreto em um mesmo ponto da seção transversal. Com isto, a temperatura no aço depende de sua posição e das dimensões da seção transversal. O fato pode ser explicado devido ao concreto não ser um isolante térmico ideal.

O software THERSYS foi desenvolvido para trabalhar juntamente com o pré-processador GID (CIMNE, 2000). Mais detalhes sobre como analisar uma seção de concreto armado no THERSYS e GID podem ser encontrados nos trabalhos de RIBEIRO (2004), CASTRO (2005) e RODRIGUES (2009). Apenas como explanação, neste trabalho será adotada a curva de incêndio padrão conforme a ABNT NBR 14432:2001 para a variação da temperatura. A FIG. 3.3 exemplifica a distribuição de temperatura nas faces e no interior de uma seção retangular de 40 x 50 cm² de um

elemento estrutural submetido a um aquecimento conforme a curva do incêndio padrão, com fogo nas quatro faces, por 30, 60, 90 e 120 minutos.

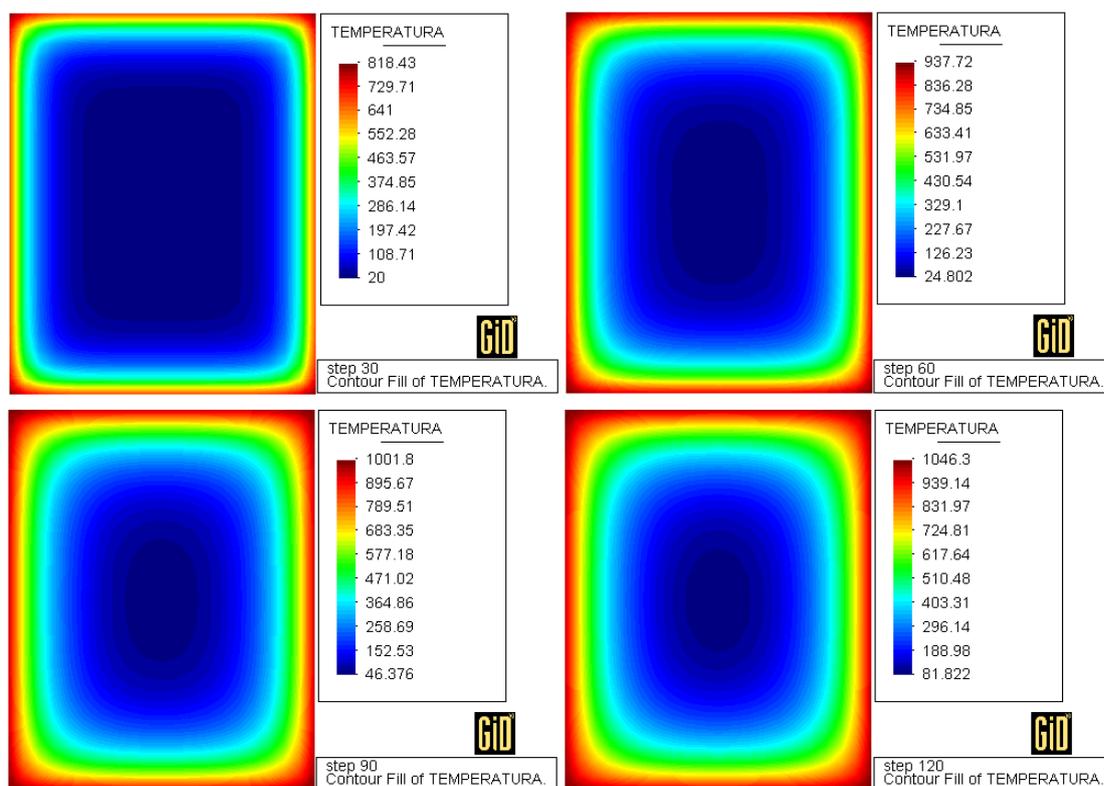


FIGURA 3.3 – Distribuição de temperatura em uma seção de concreto de 40x50 cm² - Resultado do Software THERSYS (RODRIGUES, 2009)

A motivação para a criação de um banco de dados com seções retangulares discretizadas em elementos finitos e sujeitas a diferentes temperaturas, devido aos diferentes TRRF, surgiu do fato de o software GID requerer licenças para a sua utilização e, com isso, depender dele poderia inviabilizar a utilização de um método avançado de cálculo, desenvolvido neste trabalho, no dia a dia dos escritórios de cálculo estrutural. Para contornar o problema, CASTRO (2005) elaborou um banco de dados inicial de temperaturas para seções usuais de pilares, lajes e vigas. Tal banco de dados foi construído com o auxílio do software THERSYS com malhas de 2x2 cm² e armazenado em uma planilha de Microsoft Excel. Esse banco de dados foi então expandido por RODRIGUES (2009) para seções retangulares que poderiam conter também um dos lados com medida ímpar. Dessa maneira, também com o auxílio do software THERSYS, com acréscimo de malhas de 1x1 cm² e 1x2 cm², chegou-se ao

banco de dados final que será utilizado neste trabalho. As seções retangulares do banco de dados final e suas respectivas malhas de discretização são:

- malha 2x2 cm²: 12x30, 12x40, 12x50, 12x60, 14x30, 14x40, 14x50, 14x60, 14x70, 20x20, 20x30, 20x40, 20x50, 20x60, 20x70, 20x80, 20x90, 20x100, 30x30, 30x40, 30x50, 30x60, 30x70, 30x80, 30x90, 30x100, 30x110, 30x120, 40x40, 40x50, 40x60, 40x70, 40x80, 40x90, 40x100, 40x110 e 40x120.
- malha 1x1 cm²: 12x35, 14x35, 20x25, 20x35, 25x25, 25x35, 30x35 e 35x35.
- malha 1x2 cm²: 25x30, 25x40, 25x50, 25x60, 25x70, 25x80, 25x90, 25x100, 25x110, 25x120, 35x40, 35x50, 35x60, 35x70, 35x80, 35x90, 35x100, 35x110 e 35x120.

RODRIGUES (2009) justifica que, buscou-se concentrar o estudo em seções retangulares de concreto armado com pelo menos um lado menor que 45 cm. A dimensão de 45 cm é a mínima exigida pelo método tabular para pilares de forma a atender a um TRRF de 90 minutos ou de maior tempo. O banco de dados também não compreende seções transversais de pilares-parede uma vez que as dimensões mínimas em situação de incêndio preconizadas para estes, pela ABNT NBR 15200:2012, são mais facilmente seguidas na prática usual dos escritórios de cálculo estrutural.

Algumas considerações sobre o presente trabalho devem ser feitas. A seção analisada é sempre discretizada em elementos finitos com uma das dimensões das malhas já apresentadas. A partir daí, há uma redivisão da seção em elementos finitos menores, com dimensão de 0,5x0,5 cm², e atribui-se para cada elemento finito o seu valor de temperatura coletado no banco de dados utilizado. Como o banco de dados foi desenvolvido para as malhas anteriormente apresentadas, o que se faz é uma interpolação linear das temperaturas para esta nova malha mais refinada. Então, para as barras de aço, atribui-se o valor da temperatura do elemento finito refinado coincidente com o centro geométrico de cada uma das barras de armadura.

3.4 – Propriedades dos Materiais em Situação de Incêndio

As propriedades mecânicas do concreto e do aço variam em situação de incêndio de acordo com a temperatura (θ) a que são submetidos. Com a distribuição de temperatura determinada pelo programa THERSYS, para a curva de incêndio padrão e para o TRRF devido, determinam-se os coeficientes de minoração da resistência ($k_{c,\theta}$ e $k_{s,\theta}$) e os coeficientes de minoração da rigidez do aço ($k_{sE,\theta}$) nos diversos elementos finitos que compõem a seção transversal. Esses coeficientes de redução foram retirados da ABNT NBR 15200:2012 e encontram-se na TAB. 2.1 e 2.2. Com esses valores é possível calcular a tensão resistente do concreto ($f_{c,\theta}$) pela equação 2.10. De maneira análoga, calcula-se a tensão resistente do aço ($f_{y,\theta}$) e o módulo de elasticidade do aço ($E_{s,\theta}$) pelas equações 2.11 e 2.12.

Para o concreto foi considerado o diagrama parábola-retângulo para a tensão de compressão, levando-se ainda em consideração o coeficiente minorador de resistência de 0,85 devido ao efeito Rusch. Portanto, a tensão máxima de compressão será igual a $0,85 \frac{f_{c,\theta}}{\gamma_c}$. Esse estudo do diagrama parábola-retângulo para a resistência do concreto representa um avanço em relação à SOARES (2003), CASTRO (2005) e RODRIGUES (2009).

Para o aço foi considerado o diagrama tensão-deformação conforme a FIG. 3.4. Dessa forma, obtém-se:

$$f_{yd,\theta} = \frac{k_{s,\theta} \cdot f_{yk}}{\gamma_s} \quad (3.4)$$

$$E_{s,\theta} = k_{sE,\theta} \cdot E_s \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{yd,\theta} = \frac{f_{yd,\theta}}{E_{s,\theta}} \quad (3.6)$$

Esse estudo do diagrama da relação tensão-deformação para o aço já havia sido contemplado por RODRIGUES (2009) e representou um avanço em relação à SOARES (2003) e CASTRO (2005).

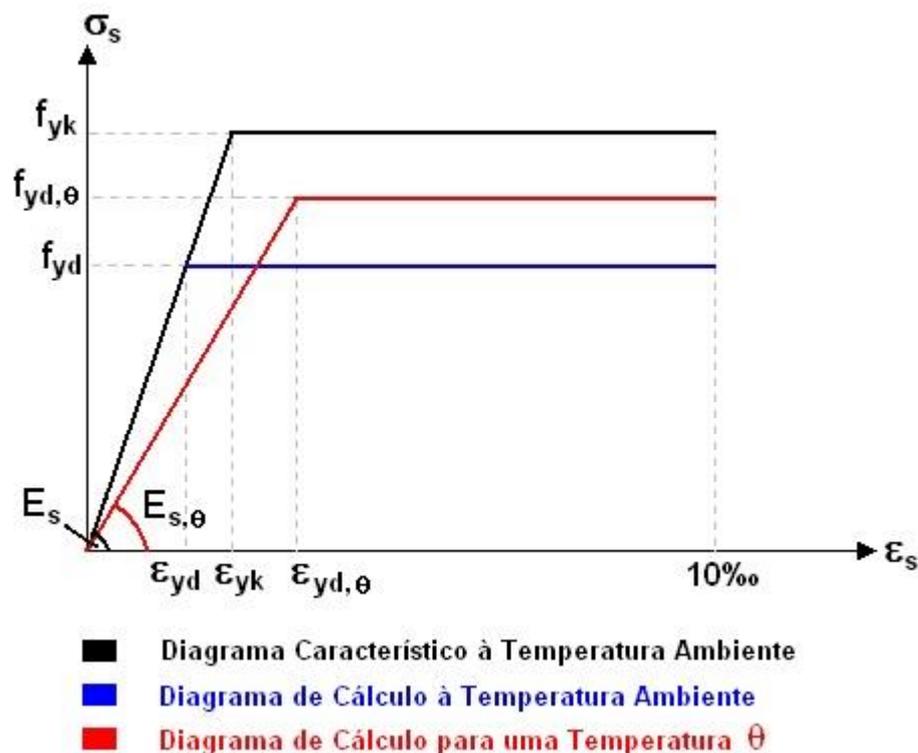


FIGURA 3.4 – Diagrama tensão-deformação adotado para o aço em situação de incêndio

3.5 – Software para Verificação da Flexão Oblíqua Composta

Com base nas hipóteses de cálculo apresentadas no item 3.2 foi desenvolvido um software de verificação de seções retangulares de concreto armado em situação de incêndio. Inicialmente, em 3.5.3, serão descritos os procedimentos de cálculo para obtenção do diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) apenas em temperatura ambiente, ou seja, sem que os coeficientes de redução de resistência e inércia devidos à elevação da temperatura sejam incluídos no processo. A complementação em situação de incêndio será contemplada em 3.5.4 e a situação de pós-incêndio, ou seja, após o acontecimento de um incêndio e o conseqüente resfriamento da estrutura será observado em 3.5.5.

O software foi desenvolvido em Microsoft Visual Basic acoplado a uma série de planilhas do Microsoft Excel. A opção por estes ambientes foi devido à facilidade de utilização posterior pelos escritórios de cálculo estrutural e, também pela familiaridade do autor com esta linguagem de programação.

Cabe ressaltar que esse software não tem como objetivo principal dimensionar seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta, haja vista que existem inúmeros softwares já desenvolvidos e habilitados a essa função. Dessa forma, o objetivo principal desse software pode ser dividido em dois, um para temperatura ambiente e outro para a situação de incêndio. Em temperatura ambiente o objetivo é apenas traçar os diagramas ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para assegurar a correta correlação entre os valores do terno de entrada (N_{s} , $M_{x,s}$ e $M_{y,s}$) e o terno de saída (N_{Rd} , $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$). Em situação de incêndio o objetivo é verificar qual o TRRF aquela seção retangular de concreto armado suporta, dado o mesmo terno inicial de esforços solicitantes (N_{s} , $M_{x,s}$ e $M_{y,s}$) para o qual a seção foi inicialmente dimensionada e detalhada. Então, pode-se comparar o TRRF que a seção armada suporta e qual o TRRF ela deveria suportar de acordo com a ABNT NBR 14432:2001.

3.5.1 – Dados de entrada do software desenvolvido

São requeridos os seguintes dados de entrada:

- geometria da seção retangular de concreto: será obtida de uma lista com as opções disponíveis mencionadas anteriormente;
- posição geométrica das barras de armadura: deverá ser informada pelo usuário, sendo o limite mínimo de quatro barras. Ressalta-se que a posição deverá ser dada de forma cartesiana, ou seja, posição no eixo x e no eixo y. O ponto inicial do sistema de coordenadas (0,0) é o C.G. (centro geométrico) da seção listada de concreto;
- diâmetro, em mm, de cada uma das barras de armadura utilizadas. Com isto, a área da seção transversal das barras de aço será automaticamente calculada pelo software;

- força normal solicitante de serviço (sem majoração): força normal (N_s);
- resistência característica do concreto (f_{ck}) em MPa;
- tipo de aço utilizado no detalhamento da seção: aço CA 50 ou aço CA 60;
- tolerância desejada, em número absoluto, entre a força normal de entrada e de saída;
- tipo de agregado: silicoso ou calcáreo. (Essa opção servirá apenas para a verificação da seção retangular em situação de incêndio. Deve-se atentar ao fato que a ABNT NBR 15200:2012 trata apenas do uso do agregado silicoso. A escolha pelos agregados calcáreos segue a recomendação do Eurocode 2, Parte 1-2).

Fornecendo esses dados como de entrada do software, este estará apto a verificar a seção retangular de acordo com os procedimentos que serão descritos em 3.5.3 e 3.5.4.

A FIG. 3.5 mostra a tela inicial onde são fornecidos os dados de entrada do programa.

The screenshot shows the input screen of a software program. The interface is in Portuguese and includes a menu bar, a toolbar, and a main workspace. The workspace is divided into several sections:

- DADOS DO CONCRETO:**
 - f_{ck} : 25,000 MPa
 - Tipo de Agregado: Silicoso
- DADOS GEOMÉTRICOS DA SEÇÃO:**
 - Seção (b x h) [cm²]: 20 x 20
 - Força Normal de Serviço (N_s): 300,000 kN
 - Tolerância (absoluta): 0,00100
 - $\Delta\alpha$: 2,000 °
 - $\Delta\alpha_c$: 6,000 cm
- DADOS DA ARMADURA:**
 - ϕ : 10,0 mm
 - Quantidade de Barras: 4
 - Tipo de Aço: CA50
- Table of Reinforcement Bar Coordinates:**

Barras de Armadura (limite: 16 barras)	Coordenadas		Barras de Armadura (limite: 16 barras)	Coordenadas	
	x [cm]	y [cm]		x [cm]	y [cm]
1	-6,5	-6,5	9	0	0
2	-6,5	6,5	10	0	0
3	6,5	-6,5	11	0	0
4	6,5	6,5	12	0	0
5	0	0	13	0	0
6	0	0	14	0	0
7	0	0	15	0	0
8	0	0	16	0	0
- SIMETRIA DA ARMADURA:**
 - Duplamente Simétrica?: Sim
 - Valor: 1
- Escolher Pós-incêndio a ser calculado:**
 - Pós-incêndio a Calcular: TRRF60 - 945,3°C
- Buttons:** NOVA MALHA, CALCULAR, GERAR GRÁFICOS
- Diagram:** A rectangular section with height H and width B. The center of gravity (C.G.) is at (0,0). The coordinate system has the Y-axis vertical (0° at top) and the X-axis horizontal (270° at right). Reinforcement bars are shown as dots at the corners and midpoints.
- Result Summary:**

Resultado do Pós-incêndio	Valor Má
Sucesso ao calcular o pos-incendio selecionado. A malha resiste ao incendio nessa temperatura.	TRRF 60 minutos

FIGURA 3.5 – Tela de entrada do programa

3.5.2 – Dados de saída do software desenvolvido

O software permite obter os seguintes resultados:

- diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$), para um valor obtido, constante, de N_{Rd} , em temperatura ambiente, considerando $\gamma_f = 1,4$.
- diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$), para um valor obtido, constante, de N_{Rd} , para TRRF 30 minutos, considerando $\gamma_f = 1,0$.
- diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$), para um valor obtido, constante, de N_{Rd} , para TRRF 60 minutos, considerando $\gamma_f = 1,0$.
- diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$), para um valor obtido, constante, de N_{Rd} , para TRRF 90 minutos, considerando $\gamma_f = 1,0$.
- diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$), para um valor obtido, constante, de N_{Rd} , para TRRF 120 minutos, considerando $\gamma_f = 1,0$.
- tabelas com os ternos N_{Rd} (constante), $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ para cada par de valores da posição flutuante da linha neutra (α e x_o); para temperatura ambiente e para cada um dos TRRF considerados.
- diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$), para um valor obtido, constante, de N_{Rd} , para a situação de pós-incêndio, considerando $\gamma_f = 1,4$, quando a estrutura já foi resfriada após ter sido submetida a um incêndio de tempo equivalente ao TRRF 30, 60, 90 ou 120 minutos.

3.5.3 – Procedimentos de cálculo em temperatura ambiente

Neste item serão descritos os procedimentos para que se obtenha o diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para uma força normal N_{Rd} obtida e de valor constante, praticamente igual à N_{sd} , para temperatura ambiente.

Após a escolha da seção de concreto que será adotada para os cálculos, bem como dos demais dados de entrada, o programa executa uma série de procedimentos até que se

obtenha o resultado final. A FIG. 3.6, apenas para exemplificar, mostra uma das telas do código do programa.

```

Dim XoAbsoluto As Double, Xo1 As Double, Xo2 As Double, Tol1 As Double, limInferior As Integer, limSuperior As Integer, Tol2 As Double
Dim Xo3 As Double, Tol3 As Double, Xo12 As Double, Xoa As Double, TolMed As Double, TolAtual As Double, Xob As Double, Xo4 As Double
Dim Tol4 As Double, XoInicial As Double, XoFinal As Double, XoAtual As Double, XoMed As Double, XoLim As Double, Ndatual As Double

NDext = 1.4 * Normal

For alfa = alfaInicial To alfaFinal Step alfaVar

    If alfa = 0 Or alfa = 90 Or alfa = 180 Or alfa = 270 Or alfa = 360 Then
        GoTo 10000
    End If

    TolEntrada = Worksheets("DadosIniciais").Range("C10")
    degrees = alfa

    verifica = 0

    zo = h / 2
    xoAbs = Abs(zo / GetSineOfDegrees(alfa - 90))

    If 0 < alfa And alfa < 90 Then
        Xod5 = -xoAbs
    ElseIf 90 < alfa And alfa < 180 Then
        Xod5 = xoAbs
    ElseIf 180 < alfa And alfa < 270 Then
        Xod5 = xoAbs
    ElseIf 270 < alfa And alfa < 360 Then
        Xod5 = -xoAbs
    End If

    Xo = Xod5

    Call calculaNds(Aj, degrees, Xo, SigmaIqArray, SigmaJqArray, SigmaPosqArray(), tam, numBarras, XjArray, YjArray, XiArray, YiArray)
    If SaídaE1 = 1 Then
        GoTo 10000
    End If
End For

```

FIGURA 3.6 – Tela de código do programa

Inicia-se o procedimento verificando se o usuário utilizou um valor adequado de força normal solicitante para a seção escolhida com a armação oferecida. Ou seja, faz-se uma verificação para avaliar se a força normal solicitante oferecida como dado de entrada tem valor entre os da força normal máxima e mínima para aquela seção de concreto armado. Destaca-se o fato de uma força normal de compressão ser adotada com um sinal positivo e uma força normal de tração com sinal negativo.

$$N_{,Sd} = 1,4 \cdot N_{,S} \quad (3.7)$$

$$N_{d\max} = (A_{seção} - A_{aço}) \cdot \frac{0,85 \cdot f_{ck}}{1,4} + A_{aço} \cdot \frac{f_{yk}}{1,15} \quad (3.8)$$

$$N_{d\min} = -A_{aço} \cdot \frac{f_{yk}}{1,15} \quad (3.9)$$

$$N_{d\min} \leq N_{,Sd\ext} \leq N_{d\max} \quad (3.10)$$

sendo:

N_{sd} a força normal solicitante de cálculo em kN;

N_s a força normal solicitante sem majoração (dado de entrada) em kN;

$N_{d_{máx}}$ a força normal de compressão resistente máxima que a seção suporta em kN;

$N_{d_{min}}$ a força normal de tração resistente máxima que a seção suporta em kN;

f_{ck} a resistência característica do concreto à compressão em kN/cm²;

f_{yk} a resistência característica do aço em kN/cm²;

$A_{seção}$ a área da seção transversal de concreto em cm²; e

$A_{aço}$ a área transversal total das barras de armadura no interior da seção em cm².

Aceita a condição imposta pela equação 3.10, duas rotinas de programação com os nomes de LISTAx_i e LISTAy_i fazem a listagem com as coordenadas cartesianas, em centímetros, dos centros geométricos (CG) de cada um dos elementos finitos (EF) da seção transversal, à partir do CG da seção de concreto (ponto 0,0). Desse modo, os valores de x_i e y_i de cada EF podem ser positivos ou negativos dependendo da posição relativa de cada um dos elementos em relação ao CG. Simultaneamente, uma terceira rotina nomeada de DEFINE_j, faz a leitura das posições das barras de armadura, informadas pelo usuário, e as lista pelo x_i e y_i correspondentes dos EF.

A partir daí, sabe-se que, como o caso é de flexão oblíqua composta, o equilíbrio da seção de concreto armado é possível de diversas maneiras, ou seja, variando-se a posição (x_o) e a inclinação (α) da linha neutra (LN) obtém-se, para a atuação de uma força normal (N_{Rd}) constante, o equilíbrio da seção em função das variações possíveis de valores entre os momentos fletores $M_{X,Rd}$ e $M_{Y,Rd}$. Portanto, para cada par válido (x_o , α) de posição da LN será obtido um par ($M_{X,Rd}$, $M_{Y,Rd}$) que satisfaz a solução do problema. Lista-se, por fim, todos os pares ($M_{X,Rd}$, $M_{Y,Rd}$) encontrados e com isso traça-se o diagrama de interação dos esforços.

A variação da LN é dada em duas etapas. A primeira delas consiste em se variar a sua inclinação. A segunda, em, para uma inclinação definida, fazer a variação da sua posição em relação ao eixo x. Portanto, é pré-definido um valor inicial de α e um incremento $\Delta\alpha$ até que seja varrida em 360° toda a seção transversal. Para cada valor estabelecido de α é varrida também toda a seção pela variação de x_o , até que se encontre um par que satisfaça o problema, ou seja, até achar uma força normal N_{Rd} que seja tão

próxima da N_{sd} a ponto de passar no teste de tolerância, sendo esta fornecida pelo usuário.

A fim de se obter o diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) final, uma série de variáveis e equações tem de ser resolvidas, como será explicado na sequência.

Uma primeira variável a ter seu valor guardado na memória do programa é D_i . Esta variável é a medida, em centímetros, da distância de cada EF_i de concreto até a LN na posição determinada por (x_o, α) . A FIG. 3.7 adiante exemplifica a questão.

$$D_i = (x_i - x_o) \cos \alpha + y_i \operatorname{sen} \alpha \quad (3.11)$$

sendo:

D_i a distância de cada EF_i de concreto à LN;
 x_i a coordenada cartesiana x de cada EF_i de concreto;
 y_i a coordenada cartesiana y de cada EF_i de concreto;
 α a inclinação da linha neutra;

Com os valores de D_i calculados, listam-se os D_i correspondentes para as barras de armadura, já que pela função DEFINEj, tais barras já foram identificadas pelos x_i e y_i correspondentes. Como prosseguimento passa-se ao cálculo das deformações nos EF_i de concreto, bem como nas barras de armadura.

Para o cálculo das deformações é importante salientar que o sinal positivo representa uma deformação de encurtamento e um sinal negativo, de forma inversa, representa uma deformação de alongamento. O cálculo das deformações consiste em se testar, a partir dos valores de D_i obtidos, a seção nos domínios de deformação definidos pela ABNT NBR 6118:2007. Assim, chama-se:

$$h = D_{i_{máx}} - D_{i_{mín}} \quad (3.12)$$

sendo:

h a altura da seção transversal, em cm, medida perpendicularmente à LN;
 $D_{i_{máx}}$ a distância à LN do EF_i de concreto que sofre maior encurtamento;
 $D_{i_{mín}}$ a distância à LN do EF_i de concreto que sofre maior alongamento.

Se $Di_{máx} \leq 0$, a seção estará completamente tracionada; ou seja; $Di_{min} < 0$ também e, conseqüentemente, a seção estará no domínio 1.

Se $0 < Di_{máx} < h$, a seção estará simultaneamente tracionada e comprimida; ou seja; $Di_{min} < 0$ e, conseqüentemente, a seção estará em um dos domínios 2, 3, 4 ou 4a.

Se $Di_{máx} \geq h$, a seção estará completamente comprimida; ou seja; $Di_{min} \geq 0$ e, conseqüentemente, a seção estará no domínio 5.

A FIG. 3.7 exemplifica a situação.

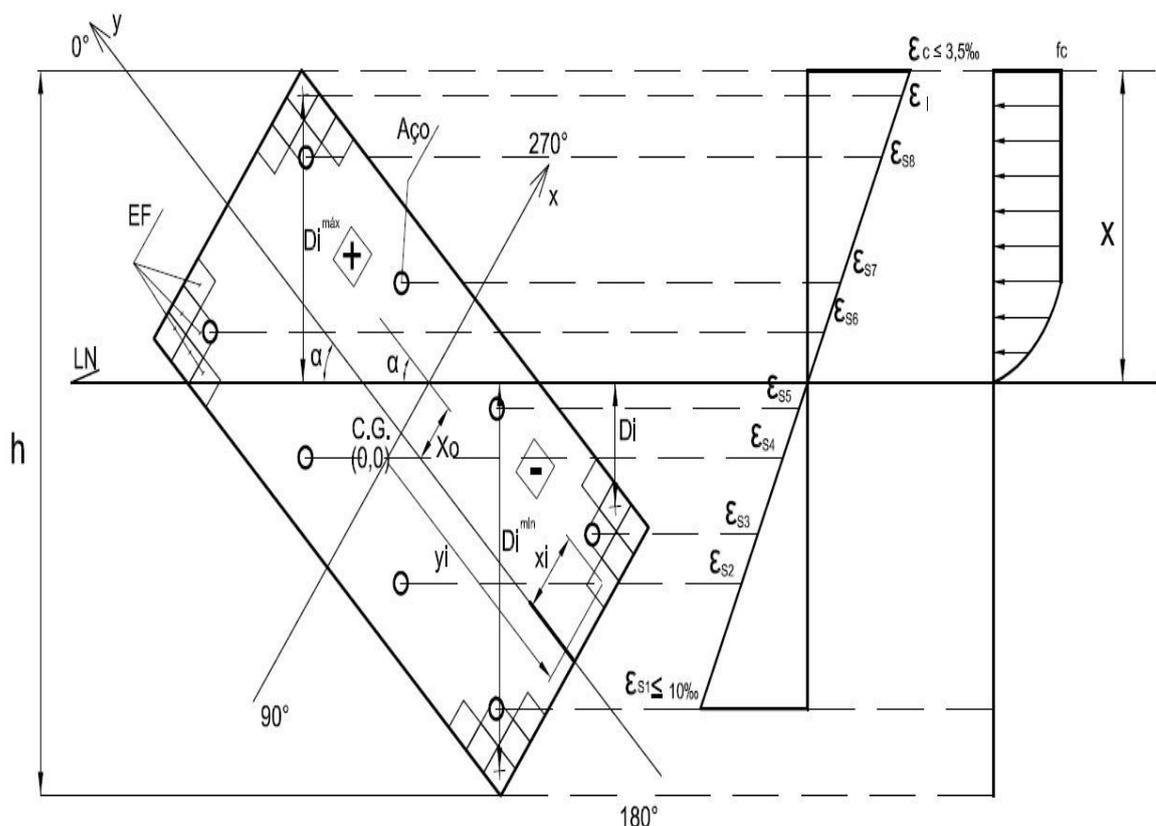


FIGURA 3.7 – Seção de concreto armado submetida à flexão oblíqua composta, discretizada em elementos finitos de concreto e detalhada com as barras de armadura

Realiza-se assim, todos os três testes acima descritos e com isso define-se o domínio de deformação adequado para o qual são calculadas as deformações e posteriormente as tensões nos EF de concreto e nas barras de armadura.

- Para $0 < Di_{máx} < h$ (Domínios 2, 3, 4 ou 4a)

$$w_s = \frac{0,01}{-Di_{min}} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_c = w_s \cdot Di_{máx} \quad (3.14)$$

sendo:

w_s uma variável que relaciona a deformação de alongamento máxima na seção com Di_{min} ;

ε_c a deformação máxima de encurtamento na seção.

Se $0 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035$, então fica aceito o valor encontrado da variável w_s . Caso $\varepsilon_c < 0$ ou $\varepsilon_c > 0,0035$ faz-se:

$$w_c = \frac{0,0035}{Di_{máx}} \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_s = w_c \cdot Di_{min} \quad (3.16)$$

sendo:

w_c uma variável que relaciona a deformação de encurtamento máxima na seção com $Di_{máx}$;

ε_s a deformação máxima de alongamento na seção.

E a relação $-0,01 \leq \varepsilon_s \leq 0$ deve obrigatoriamente ser aceita.

Portanto, define-se o valor de w como w_s ou como w_c , dependendo dos testes acima exibidos. Assim, passa-se ao cálculo das deformações da seguinte maneira:

$$\varepsilon_i = w \cdot Di \quad (3.17)$$

sendo:

w uma das variáveis w_s ou w_c acima mencionadas;

ε_i a deformação em cada EF_i de concreto.

Deve-se lembrar de que para as barras de armadura consideram-se as suas deformações ε_j como as mesmas deformações ε_i dos EF correspondentes de concreto.

$$\varepsilon_j = \varepsilon_i \quad (3.18)$$

Duas variáveis $ALAN_i$ e $LOLO_j$ foram introduzidas apenas com o intuito de simplificar o cálculo posterior das tensões. Elas dizem respeito, respectivamente, ao concreto e ao aço.

$$\text{Se } 0 < \varepsilon_i < 0,002, \text{ então } ALAN_i = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_i}{0,002} \right)^2 \right] \quad (3.19)$$

$$\text{Se } 0,002 \leq \varepsilon_i \leq 0,0035, \text{ então } ALAN_i = 1 \quad (3.20)$$

$$\text{Se não, } ALAN_i = 0 \quad (3.21)$$

Para as barras de aço, sabe-se que:

$$\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yk} / 1,15}{21000} \quad (3.22)$$

E, portanto:

$$\text{Se } \varepsilon_j \geq \varepsilon_{yd}, \text{ então } LOLO_j = \varepsilon_{yd} \quad (3.23)$$

$$\text{Se } \varepsilon_j \leq -\varepsilon_{yd}, \text{ então } LOLO_j = -\varepsilon_{yd} \quad (3.24)$$

$$\text{Se não, } LOLO_j = \varepsilon_j \quad (3.25)$$

sendo:

ε_j a deformação em cada barra de aço j , no interior da seção;

ε_{yd} a deformação de cálculo do aço ao escoamento.

- Para $Di_{máx} \leq 0$ (Domínio 1)

$$w = \frac{0,01}{-Di_{\min}} \quad (3.26)$$

$$\varepsilon_c = w \cdot Di_{máx}; \quad \varepsilon_c \leq 0 \quad (3.27)$$

$$\varepsilon_i = w \cdot Di; \quad \varepsilon_i \leq 0 \quad (3.28)$$

$$ALAN_i = 0 \quad (3.29)$$

sendo:

w uma variável que relaciona a deformação de alongamento máxima na seção com Di_{\min} ;

ε_c a deformação máxima de encurtamento na seção;

ε_i a deformação em cada EF_i de concreto.

Deve-se lembrar de que para as barras de armadura consideram-se as suas deformações ε_j como as mesmas deformações ε_i dos EF correspondentes de concreto.

$$\varepsilon_j = \varepsilon_i ; \quad \varepsilon_j \leq 0 \quad (3.30)$$

$$\text{Se } \varepsilon_j \leq -\varepsilon_{yd}, \text{ então } LOLOj = -\varepsilon_{yd} \quad (3.31)$$

$$\text{Se não, } LOLOj = \varepsilon_j \quad (3.32)$$

sendo:

ε_j a deformação em cada barra de aço j, no interior da seção;

ε_{yd} a deformação de cálculo do aço ao escoamento.

- Para $Di_{máx} \geq h$ (Domínio 5)

$$w = \frac{0,002}{\frac{4}{7}h + Di_{\min}} \quad (3.33)$$

$$\varepsilon_s = w \cdot Di_{\min} ; \quad \varepsilon_s \geq 0 \quad (3.34)$$

$$\varepsilon_i = w \cdot Di ; \quad \varepsilon_i \geq 0 \quad (3.35)$$

sendo:

w uma variável que relaciona a deformação de encurtamento máxima na seção com Di_{\min} e h;

ε_s a deformação máxima de alongamento na seção;

ε_i a deformação em cada EF_i de concreto.

Deve-se lembrar de que para as barras de armadura consideraram-se as suas deformações ε_j como as mesmas deformações ε_i dos EF correspondentes de concreto.

$$\varepsilon_j = \varepsilon_i ; \quad \varepsilon_j \geq 0 \quad (3.36)$$

$$\text{Se } 0 < \varepsilon_i < 0,002, \text{ então } ALANi = \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_i}{0,002} \right)^2 \right] \quad (3.37)$$

$$\text{Se } 0,002 \leq \varepsilon_i \leq 0,0035, \text{ então } ALANi = 1 \quad (3.38)$$

$$\text{Se } \varepsilon_j \geq \varepsilon_{yd}, \text{ então } LOLOj = \varepsilon_{yd} \quad (3.39)$$

$$\text{Se não, } LOLOj = \varepsilon_j \quad (3.40)$$

sendo:

ε_j a deformação em cada barra de aço j, no interior da seção;

ε_{yd} a deformação de cálculo do aço ao escoamento.

Para a temperatura ambiente, em qualquer que seja o domínio de deformação, o cálculo das tensões em cada EF_i de concreto e em cada barra de armadura resume-se, respectivamente, a:

$$\sigma_i = \left(\frac{0,85 \cdot f_{ck}}{1,4} \right) \cdot ALANi ; \quad \text{com } f_{ck} \text{ em kN/cm}^2 \quad (3.41)$$

$$\sigma_j = 21000 \cdot LOLOj \quad (3.42)$$

sendo:

σ_i a tensão resistente em cada EF_i de concreto em kN/cm²;

σ_j a tensão resistente em cada barra de armadura j em kN/cm².

A partir do cálculo das tensões internas resistentes, tanto para o concreto, σ_i , para cada EF_i, quanto para o aço, σ_j , para cada barra de armadura j, passa-se então ao cálculo da força normal, N_{Rd} , interna para compará-la com a força normal, N_{Sd} , solicitante externa através de um teste de aceitação com determinada tolerância. Deve-se lembrar de que tolerância é um dado de entrada do problema e é, portanto, fornecido pelo usuário. O tempo de processamento do software está diretamente ligado ao valor dessa tolerância, sendo que quanto menor seja esta tolerância, maior o tempo de processamento.

$$N_{,Sd} = 1,4 \cdot N_{,S} \quad (3.43)$$

$$N_{i,0} = A_i \cdot \sigma_{i,0} \quad (3.44)$$

$$N_{j,0} = A_j \cdot \sigma_{j,0} \quad (3.45)$$

$$N_{k,0} = A_j \cdot \sigma_{i,0} \quad (3.46)$$

$$N_{Rd,0} = \sum N_{i,0} + \sum N_{j,0} - \sum N_{k,0} \quad (3.47)$$

$$\delta_{obtida} = \left| \frac{N_{Rd,0} - N_{,Sd}}{N_{,Sd}} \right| \leq \delta_{entrada} \quad (3.48)$$

sendo:

$N_{s,d}$ a força normal solicitante de cálculo;

N_s a força normal solicitante sem majoração (dado de entrada);

N_i a força normal de compressão resistente em um EF_i de concreto;

A_i a área de um EF_i de concreto;

σ_i a tensão resistente em um EF_i de concreto;

N_j a força normal resistente em uma barra de armadura j ;

A_j a área de uma barra de armadura j ;

σ_j a tensão resistente em uma barra de armadura j ;

N_k a força normal resistente em uma área equivalente a uma barra de aço, porém submetida à tensão de um EF_i de concreto;

$N_{Rd,0}$ a força normal resistente de cálculo na temperatura ambiente;

$\delta_{entrada}$ a tolerância fornecida pelo usuário;

δ_{obtida} o erro relativo obtido pelo programa.

Caso o teste de tolerância não seja aceito, o software volta então aos passos anteriores, porém, dando um incremento de Δx_0 na posição da linha neutra até que para aquele determinado valor de ângulo α seja obtido um valor de x_0 que passe pelo teste de aceitação. Depois de aceito o teste, determina-se o par de momentos fletores $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ para aquela força normal $N_{Rd,0}$ determinada para o par aceito de α e x_0 .

$$Mx_{i,0} = N_{i,0} \cdot y_i \quad (3.49)$$

$$My_{i,0} = N_{i,0} \cdot x_i \quad (3.50)$$

$$Mx_{j,0} = N_{j,0} \cdot y_j \quad (3.51)$$

$$My_{j,0} = N_{j,0} \cdot x_j \quad (3.52)$$

$$Mx_{k,0} = N_{k,0} \cdot y_j \quad (3.53)$$

$$My_{k,0} = N_{k,0} \cdot x_j \quad (3.54)$$

$$Mx_{Rd,0} = \sum Mx_{i,0} + \sum Mx_{j,0} - \sum Mx_{k,0} \quad (3.55)$$

$$My_{Rd,0} = \sum My_{i,0} + \sum My_{j,0} - \sum My_{k,0} \quad (3.56)$$

sendo:

$Mx_{i,0}$ o momento fletor na temperatura ambiente, em torno do eixo x , resistente em um EF_i de concreto;

y_i a distância relativa, em y , entre o CG do EF_i em questão e o ponto inicial (0,0);

$My_{i,0}$ o momento fletor na temperatura ambiente, em torno do eixo y , resistente em um EF_i de concreto;

x_i a distância relativa, em x , entre o CG do EF_i em questão e o ponto inicial (0,0);

$M_{xj,0}$ o momento fletor na temperatura ambiente, em torno do eixo x, resistente em uma barra de armadura j;

y_j a distância relativa, em y, entre o CG da barra de armadura j em questão e o ponto inicial (0,0);

$M_{yj,0}$ o momento fletor na temperatura ambiente, em torno do eixo y, resistente em uma barra de armadura j;

x_j a distância relativa, em x, entre o CG da barra de armadura j em questão e o ponto inicial (0,0);

$M_{x_{Rd,0}}$ o momento resistente de cálculo na temperatura ambiente, em torno do eixo x;

$M_{y_{Rd,0}}$ o momento resistente de cálculo na temperatura ambiente, em torno do eixo y.

Após obter os valores de $N_{Rd,0}$, $M_{x_{Rd,0}}$ e $M_{y_{Rd,0}}$ para o par de valores que definiu a determinada posição da linha neutra, o software dá um incremento de $\Delta\alpha$ e começa novamente o processo de teste do valor de x_o para a obtenção dos esforços internos. Por fim, uma tabela com 'n' linhas será gerada com as colunas α , x_o , $N_{Rd,0}$, $M_{x_{Rd,0}}$ e $M_{y_{Rd,0}}$ e seus respectivos valores calculados. Dessa maneira, será plotado o diagrama final ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para a força normal $N_{,Rd}$ obtida e de valor constante, em temperatura ambiente.

A FIG. 3.8 exemplifica um diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado, em temperatura ambiente, pelo programa desenvolvido para uma seção retangular de concreto, f_{ck} 25 MPa produzida com agregado predominantemente silicoso, de (20 x 20) cm². Esta seção estava armada com quatro barras de diâmetro 10 mm, aço CA 50, sendo uma em cada vértice da seção, respeitando-se os cobrimentos de 2,5 cm cada. Estava ainda submetida a uma força normal de cálculo $N_{,sd} = 420$ kN.

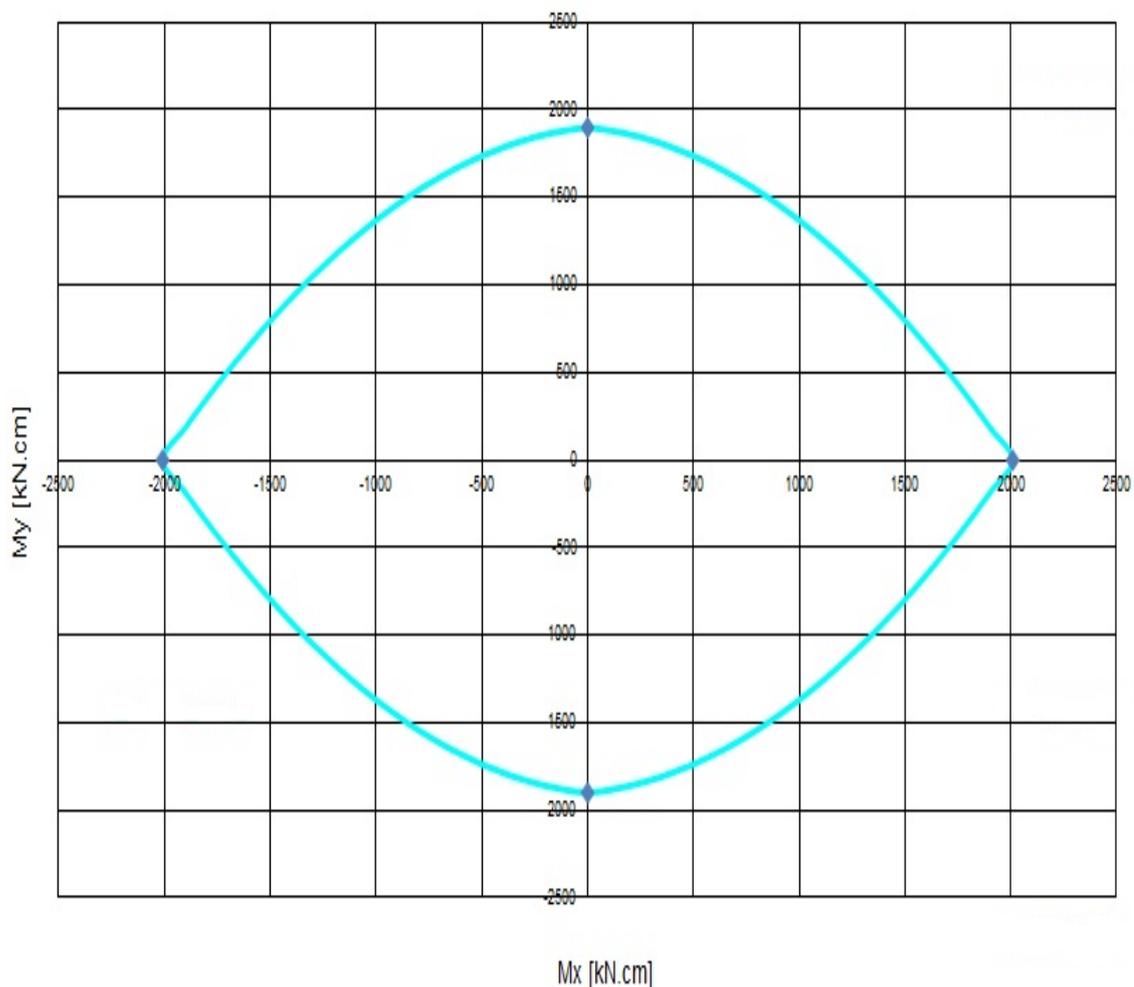


FIGURA 3.8 – Diagrama ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) para uma seção (20×20) cm^2 submetida a uma $N_{sd} = 420$ kN e armada, em temperatura ambiente, com 4 barras de 10 mm

Portanto, pode-se posicionar o par de momentos fletores solicitantes de cálculo ($M_{x,sd}$ e $M_{y,sd}$), majorados por $\gamma_f = 1,4$, e então avaliar se a seção de concreto, armada da maneira sugerida, atende ou não ao terno de esforços solicitantes (N_{sd} ; $M_{x,sd}$ e $M_{y,sd}$), sabendo-se que o diagrama foi gerado já para uma força normal resistente, constante, N_{Rd} tão próxima da N_{sd} quanto informado pela tolerância.

3.5.4 – Procedimentos de cálculo em situação de incêndio

Neste item serão descritos os procedimentos para que se obtenha o diagrama ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) para uma N_{Rd} obtida, constante, para os diversos TRRF previstos (30, 60, 90 e 120 minutos) pela ABNT NBR 14432:2001. Para tanto, serão levadas em consideração as propriedades mecânicas do concreto e do aço em situação de incêndio.

Como observação importante ressalta-se o fato de que os coeficientes de ponderação dos materiais e das ações em situação de incêndio são inferiores aos coeficientes utilizados em temperatura ambiente, conforme o item 3.3.1. Com isto, pode ocorrer de o diagrama de $(M_{x,Rd0} \times M_{y,Rd0})$ das primeiras temperaturas de um incêndio apontar uma resistência da peça maior do que a própria resistência em temperatura ambiente, ou seja, um par de valores $(M_{x,Rd0}, M_{y,Rd0})$ externo aos valores do diagrama $(M_{x,Rd0}, M_{y,Rd0})$ em temperatura ambiente. Desse modo, devem-se restringir os diagramas em situação de incêndio ao valor máximo obtido para a temperatura ambiente.

Os procedimentos de cálculo para a obtenção dos diagramas finais $(M_{x,Rd0} \times M_{y,Rd0})$ para cada um dos TRRF segue exatamente a mesma rotina apresentada anteriormente até o cálculo das deformações e consequente obtenção das variáveis $ALAN_i$ e $LOLO_j$, respectivamente, para o concreto e o aço. Entretanto, ressalta-se o fato de que, como a seção de concreto armado perde resistência durante o incêndio, há uma redistribuição dos esforços no interior da seção e com isto a posição da linha neutra deve ser recalculada assumindo um novo valor para o par (α, x_0) . No caso, para simplificar a leitura de dados ao final, o que se faz é para cada um dos ângulos α , calcula-se a nova posição x_0 que é capaz de equilibrar os esforços durante os TRRF de 30, 60, 90 e 120 minutos. Assim sendo, todas as variáveis até se obter $ALAN_i$ e $LOLO_j$ são redimensionadas, porém com a mesma formulação já apresentada. A partir deste ponto, ou seja, para o cálculo das tensões nos EF_i de concreto, nas barras de armadura e para o cálculo das forças normais e momentos fletores resistentes internos segue adiante a explicação.

Inicialmente o software lista, através de um banco de dados interno, a temperatura em cada um dos EF_i de concreto da seção escolhida pelo usuário, na tela de entrada, para cada um dos TRRF constantes na ABNT NBR 14432:2001, ou seja, 30, 60, 90 e 120 minutos de exposição ao fogo. A partir daí, pelas coordenadas cartesianas, fornecidas também pelo usuário, para as barras de armadura o software escolhe o melhor EF_i de concreto para representar cada uma das barras de armadura e determina para elas as suas respectivas temperaturas para cada TRRF.

Para cada um dos TRRF, o cálculo das tensões em cada EF_i de concreto e em cada barra de armadura depende de coeficientes de redução da resistência e também de redução do módulo de elasticidade dos materiais, como já exposto no capítulo 2 do presente trabalho. O coeficiente de minoração do concreto utilizado é o $k_{c,\theta}$ e serve para reduzir a resistência à compressão do material em cada um dos quatro TRRF. Dessa maneira, o valor de θ pode ser 30, 60, 90 ou 120 minutos. De maneira semelhante, para o aço, também se utiliza o coeficiente de minoração da sua resistência à compressão e à tração, denominado $k_{s,\theta}$. Entretanto, a ABNT NBR 15200:2012 exige também que haja uma redução do módulo de elasticidade desse material e, portanto, denomina $k_{sE,\theta}$ o coeficiente de minoração da rigidez do aço. Deve-se lembrar de que, para o concreto, o coeficiente $k_{c,\theta}$ depende do tipo de agregado que está sendo utilizado, calcáreo ou silicoso e que, a ABNT NBR 15200:2012 sugere em seu texto apenas o uso dos agregados silicosos. Para o aço, o coeficiente $k_{s,\theta}$ que minora a sua resistência depende do tipo de esforço que está solicitando a barra, ou seja, se é de tração ou de compressão. Já o coeficiente $k_{sE,\theta}$ que minora o módulo de elasticidade do aço depende de qual o tipo de aço que está sendo utilizado e nesse programa será restrito aos dois tipos mais comuns, CA 50 e CA 60.

O cálculo das tensões internas resistentes para os diversos EF_i de concreto e para as barras de armadura j , em cada um dos θ TRRF, resume-se a:

$$\sigma_{i,\theta} = \left(\frac{0,85 \cdot f_{ck} \cdot k_{c,\theta}}{1,2} \right) \cdot ALANi ; \quad \text{com } f_{ck} \text{ em kN/cm}^2 \quad (3.57)$$

$$\sigma_{j,\theta} = 21000 \cdot LOLOj \cdot k_{s,\theta} \quad (3.58)$$

sendo:

$\sigma_{i,\theta}$ a tensão resistente em cada EF_i de concreto em um dos TRRF em kN/cm²;

$\sigma_{j,\theta}$ a tensão resistente em cada barra de armadura j em um dos TRRF em kN/cm².

A partir do cálculo das tensões internas resistentes, tanto para o concreto, $\sigma_{i,\theta}$, para cada EF_i , quanto para o aço, $\sigma_{j,\theta}$, para cada barra de armadura j , passa-se então ao cálculo da

nova força normal, $N_{Rd,\theta}$, interna para compará-la com a força normal, N_{Sd} , solicitante externa através de outro teste de aceitação com a tolerância fornecida pelo usuário.

$$N_{,Sd} = 1,0 \cdot N_{,S} \quad (3.59)$$

$$N_{i,\theta} = A_i \cdot \sigma_{i,\theta} \quad (3.60)$$

$$N_{j,\theta} = A_j \cdot \sigma_{j,\theta} \quad (3.61)$$

$$N_{k,\theta} = A_j \cdot \sigma_{i,\theta} \quad (3.62)$$

$$N_{Rd,\theta} = \sum N_{i,\theta} + \sum N_{j,\theta} - \sum N_{k,\theta} \quad (3.63)$$

$$\delta_{obtida} = \left| \frac{N_{Rd,\theta} - N_{,Sd}}{N_{,Sd}} \right| \leq \delta_{entrada} \quad (3.64)$$

sendo:

N_{Sd} a força normal solicitante de cálculo em situação de incêndio, considerando-se uma combinação excepcional dos esforços;

$N_{,S}$ a força normal solicitante sem majoração (dado de entrada);

$N_{i,\theta}$ a força normal de compressão resistente em um EF_i de concreto, em um determinado TRRF;

A_i a área de um EF_i de concreto;

$\sigma_{i,\theta}$ a tensão resistente em um EF_i de concreto, em um determinado TRRF;

$N_{j,\theta}$ a força normal resistente em uma barra de armadura j , em um determinado TRRF;

A_j a área de uma barra de armadura j ;

$\sigma_{j,\theta}$ a tensão resistente em uma barra de armadura j , em um determinado TRRF;

$N_{k,\theta}$ a força normal resistente em uma área equivalente a uma barra de aço, porém submetida à tensão de um EF_i de concreto, em um determinado TRRF;

$N_{Rd,\theta}$ a força normal resistente de cálculo em um determinado TRRF;

$\delta_{entrada}$ a tolerância fornecida pelo usuário;

δ_{obtida} o erro relativo obtido pelo programa.

Caso o teste de tolerância não seja aceito, o software volta então aos passos anteriores dando um incremento de Δx_o na posição da linha neutra até que para aquele determinado valor de ângulo α seja obtido um valor de x_o que passe pelo teste de aceitação. Depois de aceito o teste, determina-se o par de momentos fletores $M_{x,Rd,\theta}$ e $M_{y,Rd,\theta}$ para aquela força normal $N_{Rd,\theta}$ determinada para o par aceito de α e x_o .

$$Mx_{i,\theta} = N_{i,\theta} \cdot y_i \quad (3.65)$$

$$My_{i,\theta} = N_{i,\theta} \cdot x_i \quad (3.66)$$

$$Mx_{j,\theta} = N_{j,\theta} \cdot y_j \quad (3.67)$$

$$My_{j,\theta} = N_{j,\theta} \cdot x_j \quad (3.68)$$

$$Mx_{k,\theta} = N_{k,\theta} \cdot y_j \quad (3.69)$$

$$My_{k,\theta} = N_{k,\theta} \cdot x_j \quad (3.70)$$

$$Mx_{Rd,\theta} = \sum Mx_{i,\theta} + \sum Mx_{j,\theta} - \sum Mx_{k,\theta} \quad (3.71)$$

$$My_{Rd,\theta} = \sum My_{i,\theta} + \sum My_{j,\theta} - \sum My_{k,\theta} \quad (3.72)$$

sendo:

$N_{i,\theta}$ a força normal de compressão resistente em um EF_i de concreto em um dos TRRF;

$N_{j,\theta}$ a força normal resistente em uma barra de armadura j em um dos TRRF;

$N_{k,\theta}$ a força normal resistente em uma área equivalente a uma barra de aço, porém submetida à tensão de um EF_i de concreto em um dos TRRF;

$N_{Rd,\theta}$ a força normal resistente de cálculo em um dos TRRF;

$Mx_{i,\theta}$ o momento fletor em um dos TRRF, em torno do eixo x, resistente em um EF_i de concreto;

y_i a distância relativa, em y, entre o CG do EF_i em questão e o ponto inicial (0,0);

$My_{i,\theta}$ o momento fletor em um dos TRRF, em torno do eixo y, resistente em um EF_i de concreto;

x_i a distância relativa, em x, entre o CG do EF_i em questão e o ponto inicial (0,0);

$Mx_{j,\theta}$ o momento fletor em um dos TRRF, em torno do eixo x, resistente em uma barra de armadura j;

y_j a distância relativa, em y, entre o CG da barra de armadura j em questão e o ponto inicial (0,0);

$My_{j,\theta}$ o momento fletor em um dos TRRF, em torno do eixo y, resistente em uma barra de armadura j;

x_j a distância relativa, em x, entre o CG da barra de armadura j em questão e o ponto inicial (0,0);

$Mx_{Rd,\theta}$ o momento resistente de cálculo em um dos TRRF, em torno do eixo x;

$My_{Rd,\theta}$ o momento resistente de cálculo em um dos TRRF, em torno do eixo y.

Após obter os valores de $N_{Rd,\theta}$, $Mx_{Rd,\theta}$ e $My_{Rd,\theta}$ para o par de valores que definiu a determinada posição da linha neutra, o software dá um incremento de $\Delta\alpha$ e começa novamente o processo de teste do valor de x_o para a obtenção dos esforços internos. Por fim, uma tabela com 'n' linhas será gerada com as colunas α , x_o , $N_{Rd,\theta}$, $Mx_{Rd,\theta}$ e $My_{Rd,\theta}$

e seus respectivos valores calculados para cada TRRF. Dessa maneira, será plotado o diagrama final ($M_{x,Rd,\theta} \times M_{y,Rd,\theta}$) para a força normal $N_{Rd,\theta}$ obtida e de valor constante, para cada um dos TRRF. Assim sendo, plota-se com cinco curvas (temperatura ambiente, TRRF 30, TRRF 60, TRRF 90 e TRRF 120) o diagrama final ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) para as forças normais $N_{Rd,0}$ e $N_{Rd,\theta}$, constantes, em temperatura ambiente e em situação de incêndio, respectivamente. No entanto, é possível que, com a perda de resistência por causa do efeito do incêndio, a seção com a atuação do fogo por determinado TRRF não mais atinja a força normal resistente de cálculo em situação de incêndio $N_{Rd,\theta}$ muito próxima à solicitante em situação de incêndio N_{Sd} e com isso diagrama nenhum ($M_{x,Rd,\theta} \times M_{y,Rd,\theta}$) é gerado para aquele TRRF, bem como para os TRRF seguintes de maior tempo de exposição ao fogo.

Com os diagramas em situação de incêndio obtidos, o usuário deve posicionar no gráfico o par de valores de $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$ calculados para a situação de incêndio, à qual a estrutura está submetida e verificar qual TRRF a seção suporta.

Mesmo sendo gerado um diagrama de interação para um determinado TRRF, o que significa que a seção suporta o valor de N_{Sd} em situação de incêndio para aquele TRRF, pode ocorrer que o par de momentos fletores solicitantes em situação de incêndio ($M_{x,Sd} \times M_{y,Sd}$) ultrapasse os limites do diagrama de interação traçado. Dessa forma a seção não suportaria para o terno em situação de incêndio ($N_{Sd}, M_{x,Sd}, M_{y,Sd}$) esse TRRF.

A FIG. 3.9 exemplifica um diagrama ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) gerado, em temperatura ambiente e também para cada um dos TRRF sugeridos pela ABNT NBR 14432:2001, pelo programa desenvolvido para uma seção retangular de concreto, f_{ck} 25 MPa, de (20 x 20) cm^2 . Esta seção estava armada com quatro barras de diâmetro 10 mm, aço CA 50, sendo uma em cada vértice da seção, respeitando-se os cobrimentos de 2,5 cm cada. Foi calculada considerando-se concreto com agregado silicoso. Estava ainda submetida a uma força normal de cálculo $N_{Sd} = 420$ kN.

Percebe-se, portanto que a seção escolhida não resiste, independentemente da atuação do par de momentos fletores solicitantes, $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$, a todos os TRRF de exposição

ao fogo. A seção retangular exibida apenas resiste, com a armação sugerida, aos TRRF de 30 e 60 minutos.

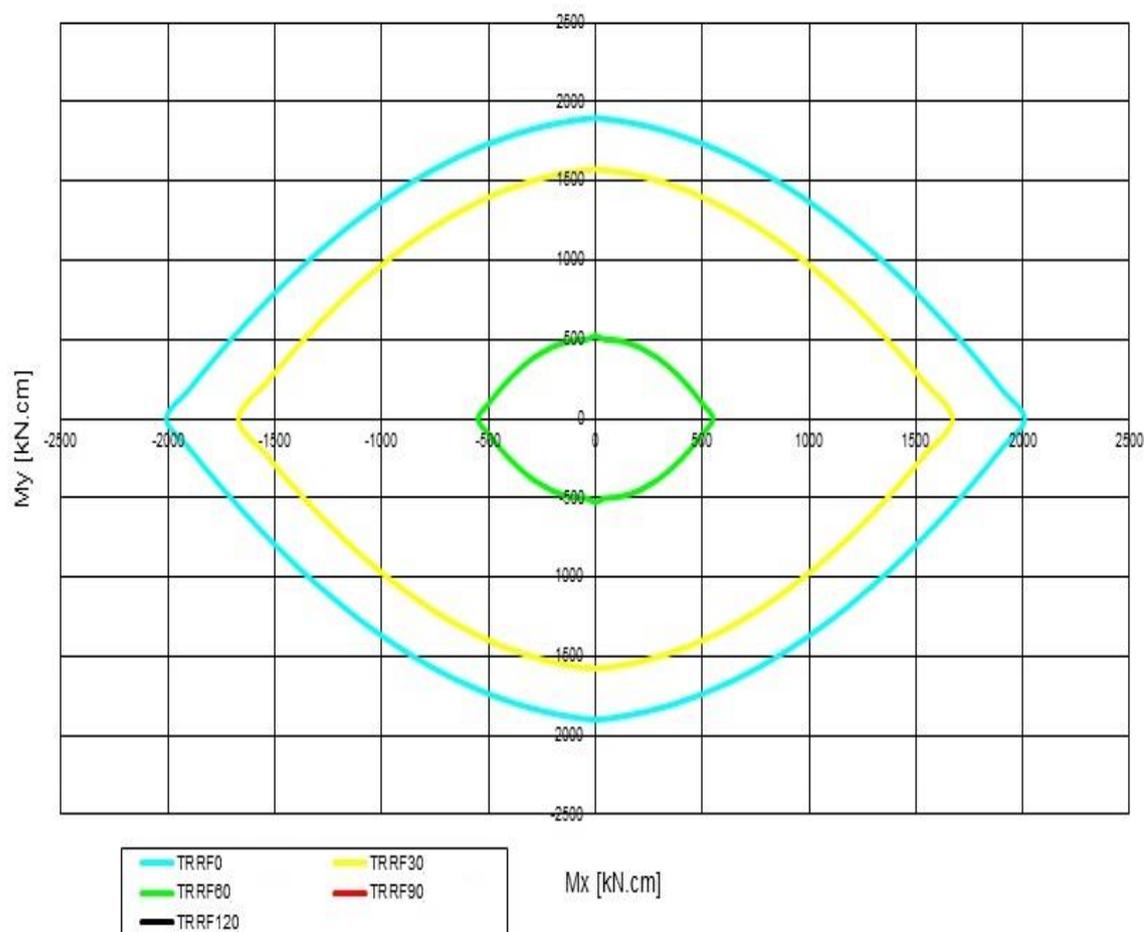


FIGURA 3.9 – Diagrama completo ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) para uma seção (20×20) cm^2 submetida a $N_{sd} = 420$ kN e armada com 4 barras de 10 mm

O usuário deve consultar a ABNT NBR 14432:2001 para saber a qual TRRF sua estrutura deverá resistir de acordo com o tipo de utilização ao qual esta se destina. Posteriormente, de posse do diagrama de interação produzido para a seção informada, o usuário deve posicionar no gráfico o par de momentos fletores solicitantes de cálculo em situação de incêndio ($M_{x,sd}$ e $M_{y,sd}$) e então avaliar se a seção de concreto, armada da maneira sugerida, atende ou não ao terno de esforços solicitantes (N_{sd} ; $M_{x,sd}$ e $M_{y,sd}$) para determinado TRRF. Deve-se lembrar que os diagramas foram gerados para forças normais resistentes de cálculo, constantes, $N_{Rd,0}$ e $N_{Rd,\theta}$ muito próximas às N_{sd} para cada situação. Essa análise é facilmente observada, bastando-se apenas verificar se

o par de momentos fletores solicitantes ($M_{x,sd}$ e $M_{y,sd}$) encontra-se interno às curvas geradas pelo programa para cada um dos TRRF (30, 60, 90 ou 120 minutos).

Na FIG. 3.9 em questão, caso os valores dos momentos fletores fossem, por exemplo, $M_{x,sd} = 1000$ kN.cm e $M_{y,sd} = 900$ kN.cm, e, posicionando-se esse par no diagrama gerado pelo programa observamos que esta seção, detalhada da maneira exposta, resiste a um incêndio de tempo equivalente ao TRRF de 30 minutos e não resiste, portanto, a incêndios de tempo equivalente aos TRRF superiores.

As TAB. 3.1 a 3.5 exibem, por partes, a tabela final gerada pelo programa, a fim de se obter o diagrama já exibido na FIG. 3.9, onde se pode visualizar os valores obtidos para o terno de esforços resistentes, N_{Rd} (constante), $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ para cada par de valores da posição flutuante da linha neutra (α e x_o); para temperatura ambiente e para cada um dos TRRF considerados. As tabelas foram calculadas para uma seção retangular de concreto armado duplamente simétrica.

TABELA 3.1 – Tabela de resultados gerada pelo programa para a temperatura ambiente para uma seção retangular (20x20)cm² armada com 4 ϕ 10mm

		Temperatura Ambiente								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
<u>185</u>	4,845	362,859	57,344	420,204	-87,850	-24,453	-112,304	-1391,552	-515,103	-1906,655
190	5,033	362,616	57,231	419,848	-177,992	-59,007	-236,999	-1371,230	-490,111	-1861,341
195	5,280	363,682	56,163	419,845	-270,348	-98,513	-368,861	-1338,198	-456,956	-1795,154
200	5,530	364,554	55,121	419,675	-367,427	-134,906	-502,333	-1294,326	-426,755	-1721,081
<u>205</u>	5,818	366,000	54,286	420,286	-470,696	-168,679	-639,374	-1235,260	-397,945	-1633,205
210	6,101	366,458	53,315	419,773	-578,887	-201,178	-780,065	-1164,440	-371,216	-1535,656
215	6,542	368,846	53,115	421,961	-685,937	-230,757	-916,694	-1078,631	-342,823	-1421,453
<u>220</u>	6,915	367,357	52,241	419,598	-793,065	-261,401	-1054,466	-992,095	-317,374	-1309,469
225	7,514	367,994	52,214	420,208	-894,228	-289,469	-1183,698	-894,228	-289,469	-1183,698
<u>230</u>	8,279	368,040	52,415	420,455	-990,912	-316,821	-1307,733	-792,390	-260,921	-1053,311
235	9,237	367,152	52,684	419,836	-1082,179	-344,287	-1426,467	-687,004	-231,855	-918,859
<u>240</u>	10,563	366,382	53,295	419,677	-1164,619	-371,288	-1535,907	-578,909	-201,224	-780,133
<u>245</u>	12,432	365,492	54,148	419,640	-1236,517	-398,474	-1634,991	-470,703	-168,966	-639,669
250	15,199	364,605	55,135	419,740	-1294,202	-426,696	-1720,898	-367,430	-134,880	-502,310
<u>255</u>	19,675	363,483	56,103	419,587	-1338,669	-457,216	-1795,885	-270,353	-98,607	-368,960
<u>260</u>	28,569	362,719	57,264	419,983	-1370,991	-489,958	-1860,949	-177,993	-58,965	-236,958
265	55,325	362,755	57,313	420,068	-1391,789	-515,307	-1907,095	-87,845	-24,460	-112,305

TABELA 3.2 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 30 minutos para uma seção retangular (20x20)cm² armada com 4φ10mm

		TRRF 30								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
185	2,852	281,709	18,033	299,742	-75,899	-27,009	-102,908	-1161,121	-427,364	-1588,485
190	3,041	281,474	18,554	300,028	-153,160	-63,337	-216,497	-1143,179	-393,347	-1536,526
195	3,229	281,058	18,967	300,025	-231,827	-95,726	-327,553	-1117,466	-363,320	-1480,786
200	3,421	280,472	19,302	299,774	-313,194	-125,246	-438,440	-1082,998	-336,214	-1419,212
205	3,638	280,191	19,586	299,777	-398,043	-151,706	-549,749	-1038,229	-311,424	-1349,653
210	3,898	280,498	19,499	299,997	-486,110	-173,029	-659,139	-982,196	-290,706	-1272,903
215	4,175	280,584	19,358	299,942	-576,945	-193,592	-770,538	-915,064	-271,134	-1186,198
220	4,501	280,781	19,282	300,063	-667,628	-213,377	-881,006	-838,656	-251,878	-1090,534
225	4,889	280,760	19,259	300,018	-755,798	-232,710	-988,508	-755,798	-232,710	-988,508
230	5,349	280,510	19,222	299,732	-838,810	-252,099	-1090,909	-667,710	-213,576	-881,286
235	5,956	280,478	19,334	299,812	-915,137	-271,226	-1186,362	-576,964	-193,667	-770,631
240	6,766	280,687	19,544	300,230	-982,065	-290,527	-1272,592	-486,096	-172,898	-658,994
245	7,838	280,606	19,688	300,294	-1037,952	-310,989	-1348,942	-398,016	-151,424	-549,440
250	9,434	280,795	19,395	300,191	-1082,776	-335,775	-1418,551	-313,192	-125,096	-438,289
255	12,082	281,259	19,030	300,289	-1117,331	-363,014	-1480,344	-231,833	-95,642	-327,475
260	17,225	281,377	18,521	299,899	-1143,242	-393,513	-1536,755	-153,164	-63,371	-216,535
265	32,638	281,785	18,061	299,845	-1161,073	-427,215	-1588,288	-75,906	-26,988	-102,894

TABELA 3.3 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 60 minutos para uma seção retangular (20x20)cm² armada com 4φ10mm

		TRRF 60								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
185	8,079	289,002	10,986	299,988	-40,246	-2,879	-43,126	-457,949	-55,419	-513,368
190	8,338	288,914	11,107	300,021	-79,434	-5,475	-84,909	-446,801	-54,634	-501,435
195	8,632	288,713	11,000	299,713	-117,465	-9,376	-126,841	-433,508	-52,280	-485,788
200	9,046	289,423	10,832	300,256	-152,612	-13,811	-166,423	-414,306	-48,841	-463,147
205	9,497	289,607	10,677	300,285	-186,200	-17,998	-204,198	-395,591	-45,605	-441,196
210	9,497	289,607	10,677	300,285	-186,200	-17,998	-204,198	-395,591	-45,605	-441,196
215	10,667	289,664	10,437	300,100	-248,562	-25,880	-274,442	-353,843	-39,427	-393,269
220	11,462	289,809	10,386	300,195	-277,060	-29,463	-306,523	-329,730	-36,202	-365,932
225	12,389	289,398	10,341	299,739	-305,345	-32,993	-338,339	-305,345	-32,993	-338,339
230	13,646	289,686	10,379	300,065	-330,113	-36,229	-366,342	-277,362	-29,488	-306,850
235	15,237	289,556	10,438	299,994	-352,506	-39,421	-391,927	-247,255	-25,876	-273,131
240	17,313	289,247	10,512	299,758	-377,098	-42,640	-419,737	-218,879	-22,136	-241,015
245	20,307	289,233	10,655	299,888	-397,049	-45,702	-442,751	-186,750	-18,062	-204,812
250	24,762	288,959	10,809	299,768	-416,224	-48,937	-465,160	-153,139	-13,854	-166,994
255	32,238	288,810	11,005	299,815	-433,089	-52,259	-485,348	-117,390	-9,368	-126,759
260	47,225	288,745	11,100	299,845	-447,557	-54,681	-502,238	-79,516	-5,478	-84,995
265	92,263	288,890	10,981	299,871	-458,459	-55,451	-513,911	-40,275	-2,881	-43,155

Como pôde ser observado, a seção em estudo não suporta, independentemente do par de momentos fletores atuantes, para a $N_{Sd} = 420$ kN os TRRF de 90 e 120 minutos. O fato é exemplificado pelas TAB 3.3 e 3.4 preenchidas apenas com números 0 (zero) o que indica que nenhuma posição válida foi encontrada para a linha neutra nestas situações de exposição ao fogo e, conseqüentemente, nenhuma $N_{Rd,90}$ e $N_{Rd,120}$ pôde ser determinada.

Como os coeficientes de ponderação dos materiais e das ações em situação de incêndio são inferiores aos coeficientes na temperatura ambiente, pode acontecer do diagrama de interação de cálculo ($M_{X,Rd} \times M_{Y,Rd}$) das primeiras temperaturas de um incêndio apontar uma resistência da peça superior à resistência na temperatura ambiente, ou seja, um par de valores ($M_{X,Rd,\theta}$, $M_{Y,Rd,\theta}$) externo aos valores do diagrama de interação em temperatura ambiente ($M_{X,Rd,0}$, $M_{Y,Rd,0}$). O fenômeno será melhor explicado no exemplo 3 constante no item 4.3 deste trabalho.

3.5.5 – Procedimentos de cálculo em situação de pós-incêndio

Os materiais constituintes do concreto armado, concreto e aço, tem seu comportamento em situação de pós-incêndio ainda bastante indefinido. Alguns pesquisadores fizeram ensaios sobre o assunto e observaram comportamentos diferentes com relação aos valores remanescentes de resistência destes materiais após o incêndio. Conforme CALDAS (2008) algumas diferenças nos resultados dos ensaios podem ser explicadas pelas diferenças de tensões atuantes e da condição de umidade do concreto enquanto este encontrava-se sob aquecimento. O autor argumenta também sobre a diferença no tempo de exposição à temperaturas elevadas e pelas diferenças nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados constituintes do concreto. Portanto, algumas considerações a respeito do comportamento do concreto e do aço quando submetidos a um incêndio e depois resfriados novamente à temperatura ambiente devem ser feitas.

Como mencionado anteriormente no presente trabalho, de acordo com a ABNT 15200:2012, a resistência à compressão do concreto tem seu valor reduzido quando este é submetido a um incêndio e conseqüentemente ao aquecimento por ele provocado. De

acordo com as pesquisas de MORENO JR. e SOUZA (2003) parte da resistência mecânica do concreto, perdida durante o processo de aquecimento, pode ser recuperada com a rehidratação. CANOVAS (1988) afirma ainda que, se a temperatura do concreto não ultrapassa os 500°C, esse pode ser submetido a uma rehidratação posterior que pode fazê-lo recuperar até 90% de sua resistência inicial, após um ano da ocorrência do incêndio. Alguns autores, tais como PAULON (1984), GALLETTO e MENEGUI (2000), e MORENO JR. e SOUZA (2003), ensaiaram corpos de prova de concreto quando submetidos à temperaturas de cerca de 300°C e depois resfriados. O que se observou foi que a perda permanente das propriedades mecânicas do material está diretamente ligada ao modo como o concreto foi resfriado após ter sido submetido à alta temperatura. Para maiores detalhes sobre essa análise deve-se recorrer ao trabalho desenvolvido por CALDAS (2008) referente à sua tese de doutorado.

Portanto, baseando-se nas conclusões realizadas por CALDAS (2008) o presente trabalho traz formulações por ele apresentadas e que estão de acordo com as prescrições do EN 1992-1-2:2004 e EN 1994-1-2:2005. CALDAS (2008), apresenta algumas formulações para se realizar o cálculo da resistência remanescente do concreto submetido a um aquecimento de temperatura máxima $\theta_{c,max}$ e depois resfriado novamente até a temperatura ambiente. Extrapolando o estudo do autor, conclui-se que os coeficientes $k_{c,\theta}$, encontrados na TAB. 2.1, devem ser alterados na situação de pós-incêndio e portanto, substituídos por novos valores. Esses novos coeficientes levam em consideração a resistência mecânica residual que cada EF_i de concreto deverá ter em função da temperatura θ_i a que foi previamente submetido.

$$k_{c,post\theta} = k_{c,\theta}, \text{ para } 20^{\circ}C \leq \theta_i \leq 100^{\circ}C \quad (3.73)$$

$$k_{c,post\theta} = \left(0,95 - \frac{0,185(\theta_i - 100)}{200} \right), \text{ para } 100^{\circ}C < \theta_i < 300^{\circ}C \quad (3.74)$$

$$k_{c,post\theta} = 0,9k_{c,\theta}, \text{ para } \theta_i \geq 300^{\circ}C \quad (3.75)$$

sendo:

θ_i , a temperatura a que cada EF_i de concreto está submetido;

$k_{c,post\theta}$, o fator de redução da resistência de cada EF_i de concreto após atingir a temperatura θ_i e ser resfriado;

$k_{c,\theta}$, o fator de redução da resistência de cada EF_i de concreto na temperatura θ_i .

Segundo PETRUCCI (1978), os aços laminados a quente, como por exemplo os aços CA50, não perdem as suas propriedades mecânicas quando submetidos à elevadas temperaturas, da ordem de até 1200°C, e depois resfriados de volta à temperatura ambiente. BATTISTA et al (1998) apud RODRIGUES (2009) apresenta uma pesquisa desenvolvida sobre a ocorrência de um incêndio no prédio do terminal de desembarque de passageiros do aeroporto de Santos Dumont na cidade do Rio de Janeiro em 1998. Observou-se que, mesmo o fogo tendo atingido temperaturas de cerca de 800°C, os aços das peças de concreto armado após serem resfriados de volta à temperatura ambiente mantiveram suas propriedades mecânicas, resistência e módulo de elasticidade inalteradas. Portanto, concluiu que embora o aço certamente tenha perdido parte das suas propriedades mecânicas durante o incêndio ele as recuperou quando foi resfriado à mesma temperatura antes da ação do fogo.

Dessa maneira, com relação às barras de aço, desde que seja mantida a sua integridade física quando da ocorrência de um incêndio, as propriedades mecânicas quando de volta à temperatura ambiente, ou seja, após o processo de resfriamento, podem ser consideradas iguais às que apresentava anteriormente a ação do fogo.

Não há para o aço, portanto, na situação de pós-incêndio, nenhuma alteração e nem sequer aplicação dos coeficientes minoradores apresentados na TAB. 2.2, $k_{s,\theta}$ e $k_{sE,\theta}$, de resistência e do módulo de elasticidade, respectivamente. Estes coeficientes são utilizados apenas em situação de incêndio.

Para composição do diagrama de interação de cálculo ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) para a situação de pós-incêndio o ideal seria que se pudesse determinar a temperatura a que se chegou em função de um determinado tempo de incêndio e assim calcular o coeficiente de redução da resistência a compressão do concreto para aquela temperatura atingida. Entretanto, no presente trabalho isto não é possível. O fato se deve ao banco de dados coletado de temperatura. Esse banco de dados apenas fornece as temperaturas em quatro casos, ou seja, arquivou-se a temperatura no interior de cada uma das seções oferecidas quando da

atuação de um incêndio, com fogo nas quatro faces da seção, de tempo equivalente aos TRRF preconizados pela ABNT NBR 14432:2001. Portanto, para cada um dos quatro TRRF (30, 60, 90 e 120 minutos) pode-se visualizar a temperatura máxima que foi obtida nos vértices da seção retangular, bem como a temperatura em cada um dos EF_i de concreto que compõem a seção. Logo, não é possível a determinação das temperaturas atingidas com a ação do fogo em tempos diferentes dos apresentados. A TAB. 3.6 exhibe para cada um dos TRRF preconizados pela ABNT NBR 14432:2001 a temperatura máxima, $\theta_{cmáx}$, atingida em um dos vértices da seção retangular.

TABELA 3.6 – Valores da temperatura máxima atingida na seção retangular, $\theta_{cmáx}$, para cada um dos TRRF preconizados pela ABNT NBR 14432:2001

TRRF	$\theta_{cmáx}$
30 minutos	841,8 °C
60 minutos	945,3 °C
90 minutos	1006,0 °C
120 minutos	1049,0 °C

O que o programa faz é, determinar para cada EF_i de concreto a sua temperatura, quando da atuação de um dos TRRF possíveis, e o seu coeficiente $k_{c,post}$, de acordo com as equações 3.73 a 3.75. Dessa forma, o diagrama de interação de cálculo ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para uma situação posterior a um incêndio é traçado analogamente ao explicado no item 3.5.4. Entretanto, enquanto a tensão e o módulo de elasticidade do aço são os mesmos utilizados à temperatura ambiente, a tensão do concreto é reduzida de acordo com os coeficientes apresentados pelas equações 3.73 a 3.75.

Um avanço com relação ao desenvolvimento de RODRIGUES (2009) fica a cargo da consideração de elementos finitos de $(0,5 \times 0,5) \text{ cm}^2$ dentro da seção retangular e, não mais faz-se a consideração por fatiamento da seção. Dessa maneira, não mais se utiliza da média das temperaturas por fatia para determinar a redução das propriedades mecânicas do concreto e sim, determina-se para cada um destes pequenos elementos finitos a sua temperatura e conseqüentemente o seu coeficiente de redução, $k_{c,post}$, da resistência à compressão do concreto.

A FIG. 3.10 exemplifica um diagrama ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) gerado pelo programa desenvolvido para uma seção retangular de concreto, f_{ck} 30 MPa, de (12×30) cm². Essa seção estava armada com quatro barras de diâmetro 16 mm, aço CA50, sendo uma em cada vértice da seção, respeitando-se os cobrimentos de 2,5 cm cada. Foi calculada considerando-se concreto com agregado silicoso e estava ainda submetida a uma força normal de serviço $N_s = 100$ kN. Esse diagrama foi gerado para a situação de pós-incêndio, quando do acontecimento de um incêndio de tempo equivalente ao TRRF de 60 minutos preconizado pela ABNT NBR 14432:2001.

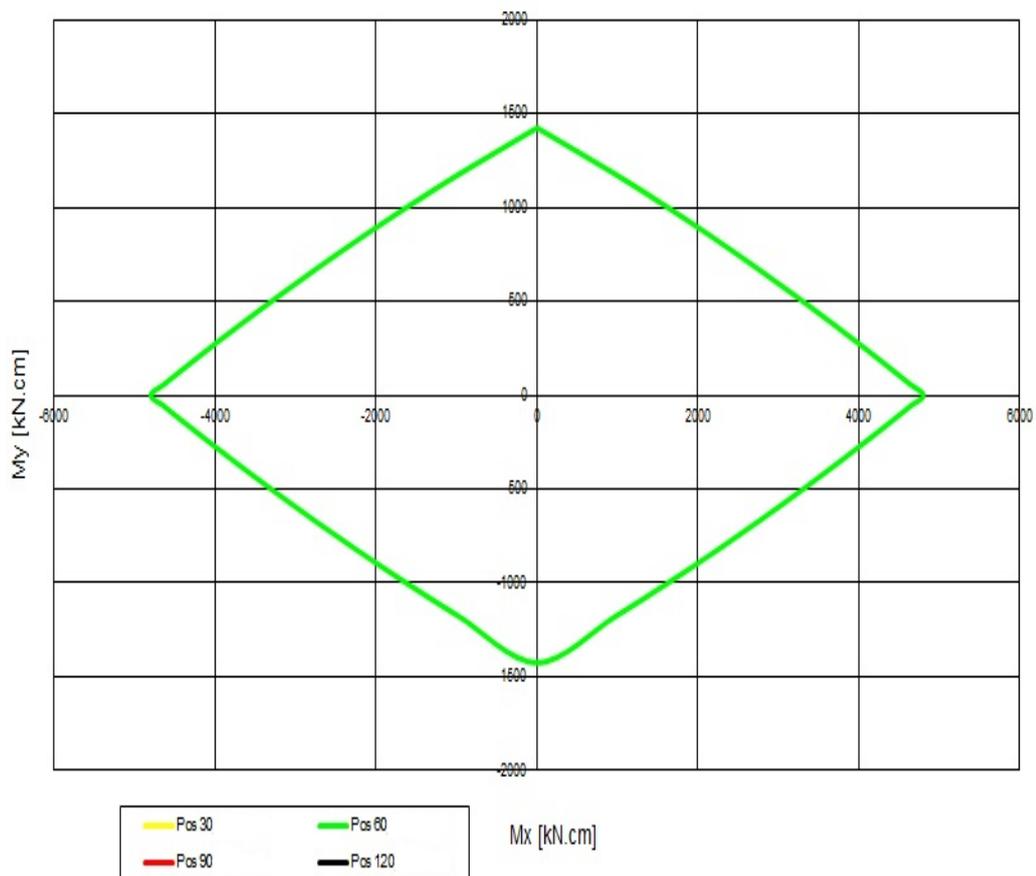


FIGURA 3.10 – Diagrama ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$), em situação após um incêndio de 60 minutos, para uma seção (12×30) cm² armada com 4 barras de 16 mm

Entretanto, é muito importante ressaltar, por fim, o fato de que a curva padrão para a determinação das temperaturas atingidas em um incêndio com relação ao tempo pode não corresponder ao incêndio real e, dessa maneira, a obtenção da resistência remanescente para a peça estrutural a partir dos TRRF 30, 60, 90 e 120 minutos não garante a relação direta com a realidade e deve ser tomada apenas como um referencial.

4

VALIDAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL PROPOSTO

4.1 – Considerações Iniciais

Nos itens a seguir será abordado de forma prática o tema da flexão oblíqua composta em temperatura ambiente, em situação de incêndio e de pós-incêndio. Para tanto, serão resolvidos alguns exemplos numéricos pelo software proposto e também por outras fontes a fim de testá-lo e de demonstrar a sua eficácia e acurácia. No primeiro exemplo será dada, ainda, uma ênfase ao modo de utilização e operação deste programa computacional. O intuito é familiarizar o usuário com os dados necessários de entrada e com os resultados emitidos.

4.2 – Exemplo 1

4.2.1 – Flexão oblíqua composta em temperatura ambiente e manuseio do software proposto

Como primeiro exemplo, para efeito de validação do programa computacional implementado, será analisada uma seção transversal de concreto armado de 20x20 cm², concreto com f_{ck} de 25 MPa e produzida com agregado silicoso, aço CA50 e que esteja submetida aos seguintes esforços solicitantes sem majoração: $N_{s}=300$ kN e $M_{x,s}=M_{y,s}=7,86$ kN.m. As solicitações presentes nessa seção transversal constituem, portanto, um típico caso de flexão oblíqua composta (FOC). Será aqui exibido o passo a passo de manuseio do software proposto até que se obtenha como resultados os diagramas de interação ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) para a temperatura ambiente, para a situação de incêndio e para a situação de pós-incêndio.

O intuito do software não é o dimensionamento da seção submetida à flexão oblíqua composta em temperatura ambiente, já que existem inúmeros softwares destinados à essa função e, também, porque a maioria dos casos de FOC ocorre em pilares de canto e cujo dimensionamento completo depende de outros fatores, tais como efeitos de 2^a ordem devido à instabilidade no que diz respeito à esbeltez da peça estrutural, armaduras mínimas e máximas de pilares, considerações de momentos fletores mínimos, entre outros, e cujos tratamentos não são abordados no presente trabalho. Assim sendo, será utilizado neste trabalho um programa computacional web, desenvolvido, em java, para o dimensionamento de pilares em concreto armado submetidos à FOC, por alunos e professores da Universidade de São Paulo (USP) e que pode ser encontrado no endereço eletrônico (<http://www.lmc.ep.usp.br/pesquisas/TecEdu/pilares/Applet/Dimensionamento.htm>).

Portanto, como saber então que o software aqui desenvolvido geraria corretamente os diagramas de interação ($M_{x,Rd} \times M_{y,Rd}$) para a temperatura ambiente, já que esses dependem também da armadura da peça? O diagrama de interação aqui desenvolvido é gerado com a prévia informação fornecida pelo usuário de qual a armadura que deve ser utilizada, sendo ela simétrica ou não e pode ser calculada pelo aplicativo web mencionado anteriormente ou por qualquer outro que a faça de maneira confiável. O

que se faz então é mostrar um comparativo entre o diagrama gerado pelo presente trabalho para a temperatura ambiente e o diagrama gerado, para o mesmo caso, por um outro aplicativo web já disponível no mercado, também desenvolvido por alunos e professores das USP, e que pode ser encontrado no seguinte endereço eletrônico: (http://www.lmc.ep.usp.br/pesquisas/TecEdu/java/vrf_fco/Verificacao.htm). Dessa maneira, pode-se validar, como será mostrado adiante, os cálculos e o diagrama de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) fornecidos por este trabalho.

Os diagramas subsequentes, sejam eles os diagramas de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) obtidos para a situação de incêndio ou para a situação de pós-incêndio são algo inédito e, portanto, não desenvolvidos anteriormente no país por nenhum outro autor para o caso de solicitação por flexão oblíqua composta. No entanto, além de ambos seguirem a mesma lógica computacional do diagrama gerado em temperatura ambiente, para provar os cálculos será exibido adiante um cálculo planilhado, mas completamente manual, para um ângulo válido de posição da linha neutra (LN), no caso, $\alpha=45^\circ$, e com a posição x_o variando para os três casos que serão demonstrados: temperatura ambiente, TRRF 30 minutos e pós-incêndio de 30 minutos. Assumem-se os demais casos como verdadeiros por analogia direta. Portanto, poderá ser observado que com o efeito do incêndio na peça ela perde resistência mecânica e a posição x_o da linha neutra, para aquele valor α fixado, é obrigada a mudar, aumentando ou diminuindo a área de concreto resistente à compressão. Isto ocorre para que a peça possa suportar a nova força normal solicitante de cálculo N_{sd} , majorada por $\gamma_f=1,0$, conforme o item 3.3.1. Para a temperatura ambiente a peça obrigatoriamente suportava, com a posição anterior de x_o , a força normal solicitante de cálculo N_{sd} , majorada por $\gamma_f=1,4$. Assim sendo, para as novas posições válidas da LN, serão obtidos pelo software apresentado e pelo cálculo manual valores muito próximos de N_{Rd} , $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ na situação de incêndio e de pós-incêndio para um TRRF igual a 30 minutos. Ou seja, para 30 minutos de atuação do fogo nas quatro faces da peça estrutural. Valida-se assim, portanto, todos os diagramas gerados.

Seja, então, a seção transversal proposta pelo exemplo a de um pilar, com pé-direito de 3,0 m e submetido à FOC. Esse pilar foi dimensionado pelo aplicativo web da USP anteriormente mencionado e foram obtidos os resultados exibidos nas FIG. 4.1 a 4.4.

Dados de Entrada Esforços de Projeto Dimensionamento da Seção Detalhamento

Dados de entrada

$h_x = 20$ cm Tipo de flexão: FCO

$h_y = 20$ cm

$l_{e_x} = 3$ m

$l_{e_y} = 3$ m

$N_{sd} = 420$ kN

$f_{ck} = 25$ MPa

$\gamma_c = 1,4$

Aço: CA-50

$\gamma_s = 1,15$

Verificação dos momentos de 2ª ordem pelo:

Método da curvatura aproximada

Método da rigidez κ aproximada

Grau de Agressividade:

I II III IV Outro

$c = 25$ mm

Atualizar

Pré-Seleção das Barras

Escolha das bitolas que pretende utilizar:

Barras longitudinais: $\phi_l = 10$ mm

Barras transversais (estribos): $\phi_t = 5$ mm

Permitir momentos menores que os mínimos.

Msdx: $M_{Sdx,topo} = 11$ kN.m, $M_{Sdx,pé} = -11$ kN.m

Msdy: $M_{Sdy,topo} = 11$ kN.m, $M_{Sdy,pé} = -11$ kN.m

FIGURA 4.1 – Dimensionamento do pilar (20x20) cm². Parte 01/04 (<http://www.lmc.ep.usp.br/pesquisas/TecEdu/pilares/Applet/Dimensionamento.htm>)

Dados de Entrada Esforços de Projeto Dimensionamento da Seção Detalhamento

Dados do pilar:

$\lambda_x = 51,962$

$\lambda_y = 51,962$

Esforços mínimos:

-Seção central na direção x:

$M_{1dx,min} = 8,82$ kN.m

$\alpha_{bx} = 1$

$\lambda_{1x} = 26,312 < 35 \rightarrow \lambda_{1x} = 35$

Como $\lambda_x > \lambda_{1x}$

$\frac{1}{r} = 0,023 \frac{1}{m}$

$e_{2dx} = 0,021$ m

$M_{2dx} = 8,686$ kN.m

$M_{Sdx,tot} = 17,506$ kN.m

-Seção central na direção y:

$M_{1dy,min} = 8,82$ kN.m

$\alpha_{by} = 1$

$\lambda_{1y} = 26,312 < 35 \rightarrow \lambda_{1y} = 35$

Como $\lambda_y > \lambda_{1y}$

$\frac{1}{r} = 0,023 \frac{1}{m}$

$e_{2dy} = 0,021$ m

$M_{2dy} = 8,686$ kN.m

$M_{Sdy,tot} = 17,506$ kN.m

-Seção central na direção x:

$M_{Sdx,A} = 11$ kN.m

$M_{Sdx,B} = -11$ kN.m

$M_{Sdx,A} > M_{1dx,min}$

$\alpha_{bx} = 0,2 < 0,4 \rightarrow \alpha_{bx} = 0,4$

$M_{cdx} = 4,4$ kN.m

$\frac{e_{1x}}{h_x} = 0,052$

$\lambda_{1x} = 64,137 < \frac{35}{\alpha_{bx}} = 87,5 \rightarrow \lambda_{1x} = 87,5$

$\lambda_x < \lambda_{1x}$

Os momentos de 2ª ordem podem ser desprezados.

-Seção central na direção y:

$M_{Sdy,A} = 11$ kN.m

$M_{Sdy,B} = -11$ kN.m

$M_{1dy,min} = 8,82$ kN.m

$M_{Sdy,A} > M_{1dy,min}$

$\alpha_{by} = 0,2 < 0,4 \rightarrow \alpha_{by} = 0,4$

$M_{cdy} = 4,4$ kN.m

$\frac{e_{1y}}{h_y} = 0,052$

$\lambda_{1y} = 64,137 < \frac{35}{\alpha_{by}} = 87,5 \rightarrow \lambda_{1y} = 87,5$

$\lambda_y < \lambda_{1y}$

Os momentos de 2ª ordem podem ser desprezados.

FIGURA 4.2 – Dimensionamento do pilar (20x20) cm². Parte 02/04 (<http://www.lmc.ep.usp.br/pesquisas/TecEdu/pilares/Applet/Dimensionamento.htm>)

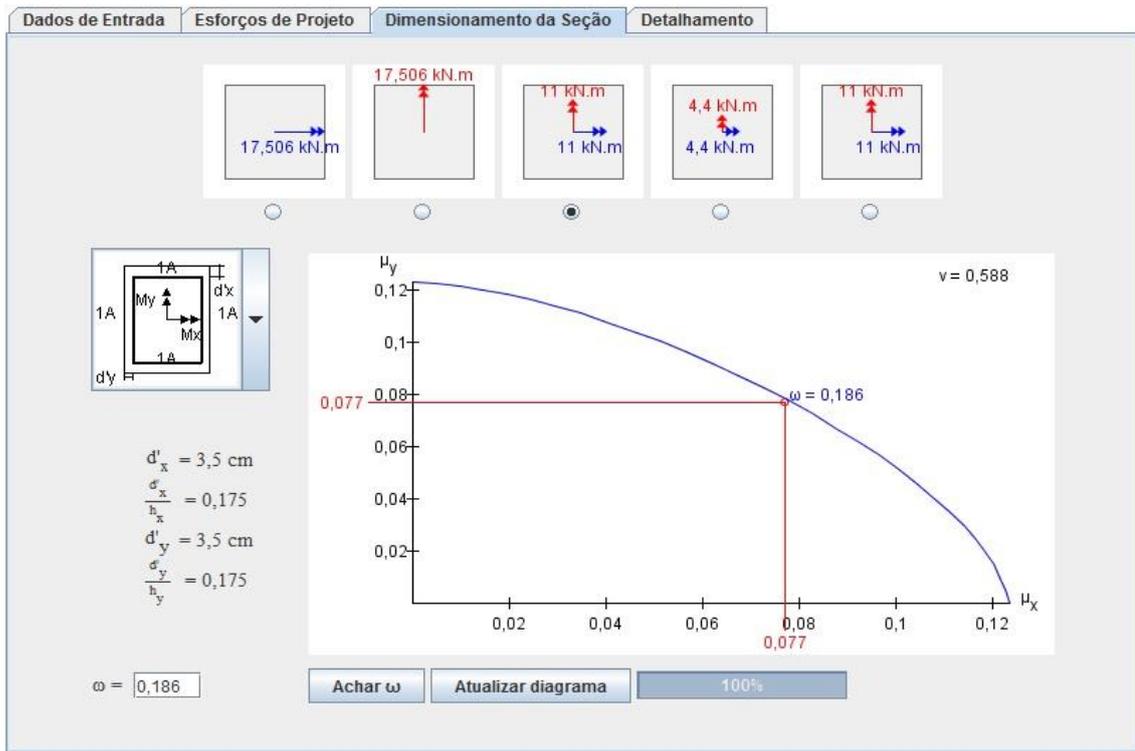


FIGURA 4.3 – Dimensionamento do pilar (20x20) cm². Parte 03/04
 (<http://www.lmc.ep.usp.br/pesquisas/TecEdu/pilares/Applet/Dimensionamento.htm>)

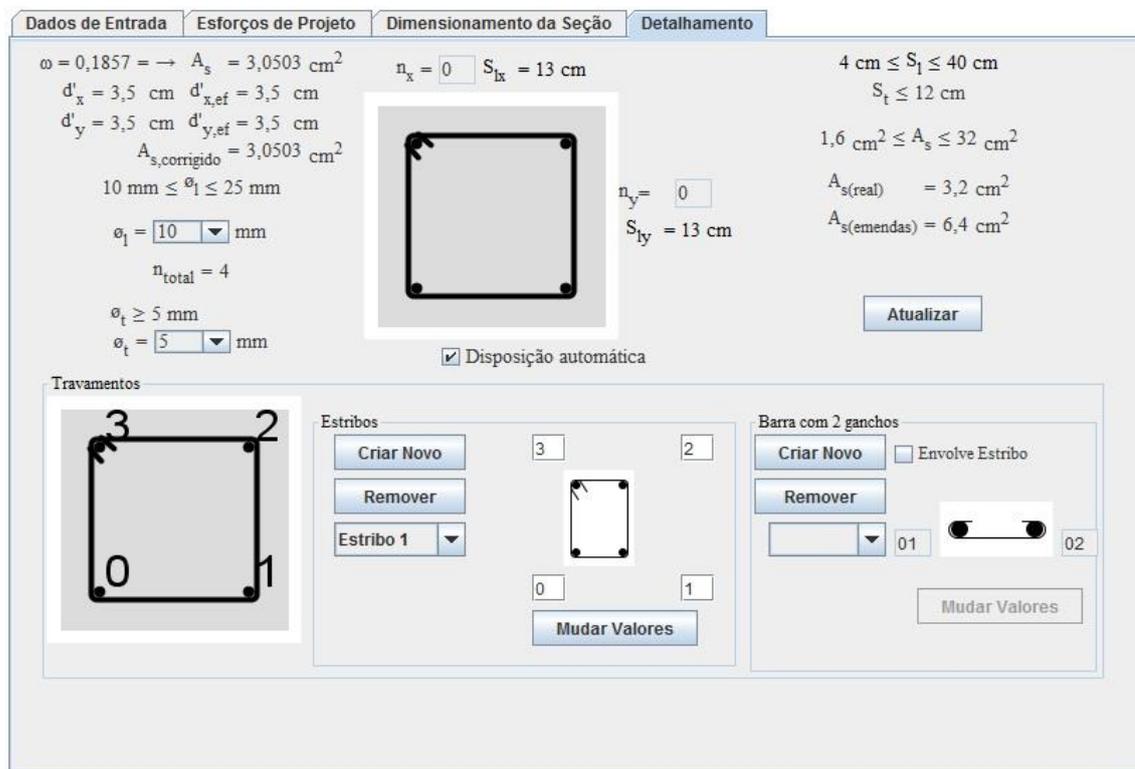


FIGURA 4.4 – Dimensionamento do pilar (20x20) cm². Parte 04/04
 (<http://www.lmc.ep.usp.br/pesquisas/TecEdu/pilares/Applet/Dimensionamento.htm>)

Portanto, a armadura a ser inserida no programa computacional aqui desenvolvido corresponde a $4 \phi 10\text{mm}$.

O usuário deve entrar com os dados geométricos da seção e as propriedades do concreto na aba “DadosIniciais” da planilha criada, conforme ilustrado na FIG.4.5. São eles, o f_{ck} do concreto, o tipo de agregado a ser considerado (silicoso ou calcáreo), a seção transversal escolhida em uma lista de disponibilidade, a força normal sem majoração (de serviço) N_s , a tolerância aceitável entre N_{sd} e N_{Rd} , e também o incremento que deve ser dado no processo de interação da linha neutra para o ângulo ($\Delta\alpha$), e para a posição no eixo x (Δx_0). O botão “NOVA MALHA” deve ser utilizado sempre que a seção transversal for alterada na lista de seções disponíveis.

	A	B	C	D
1	DADOS DO CONCRETO			
2	f_{ck}	25,000 MPa		
3	Tipo de Agregado	Silicoso	▼	
4	DADOS GEOMÉTRICOS DA SEÇÃO			
5	Seção (b x h) [cm ²]	20 x 20	▼ cm	
7	Força Normal de Serviço (N_s)	300,000 kN		
10	Tolerância (absoluto)	0,00100		
11	$\Delta\alpha$	2,000 °		
12	Δx_0	6,000 cm		
22				
23		NOVA MALHA		
24				
25				
26				
27				
◀ ▶ DadosIniciais ◀ ▶ Detalhamento ◀ ▶ Matriz-Auxiliar-Alan				
Pronto Calcula				

FIGURA 4.5 – Aba “DadosIniciais”

Na aba “Detalhamento”, conforme mostrado pela FIG. 4.6, o usuário deve entrar com os dados da armadura a ser utilizada, sendo esses o tipo de aço das barras, a quantidade de barras e o diâmetro delas. Deve ainda, informar as coordenadas das barras, de acordo com o ponto (0,0) exibido pela figura de referência. As barras de armadura são limitadas

em 16. Ao final da tela existe uma arguição ao usuário com relação à simetria destas barras dentro da seção transversal, ou seja, se um quadrante qualquer da seção será igual aos demais. Isto ocorre porque caso a resposta seja afirmativa o programa apenas executará um quarto dos cálculos previstos e trará resultados com muito mais rapidez e a mesma qualidade dos dados. O botão “CALCULAR” serve para a realização dos cálculos que darão origem aos diagramas ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$). O botão “GERAR GRÁFICOS” deve ser utilizado quando os resultados do botão “CALCULAR” forem gerados e servem para que os diagramas de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) sejam gerados automaticamente para a temperatura ambiente, para as situações de incêndio e do pós-incêndio selecionado pelo usuário. No entanto, para a situação de pós-incêndio algumas informações exibidas na FIG. 4.7, retirada também da aba “Detalhamento” devem ser observadas.

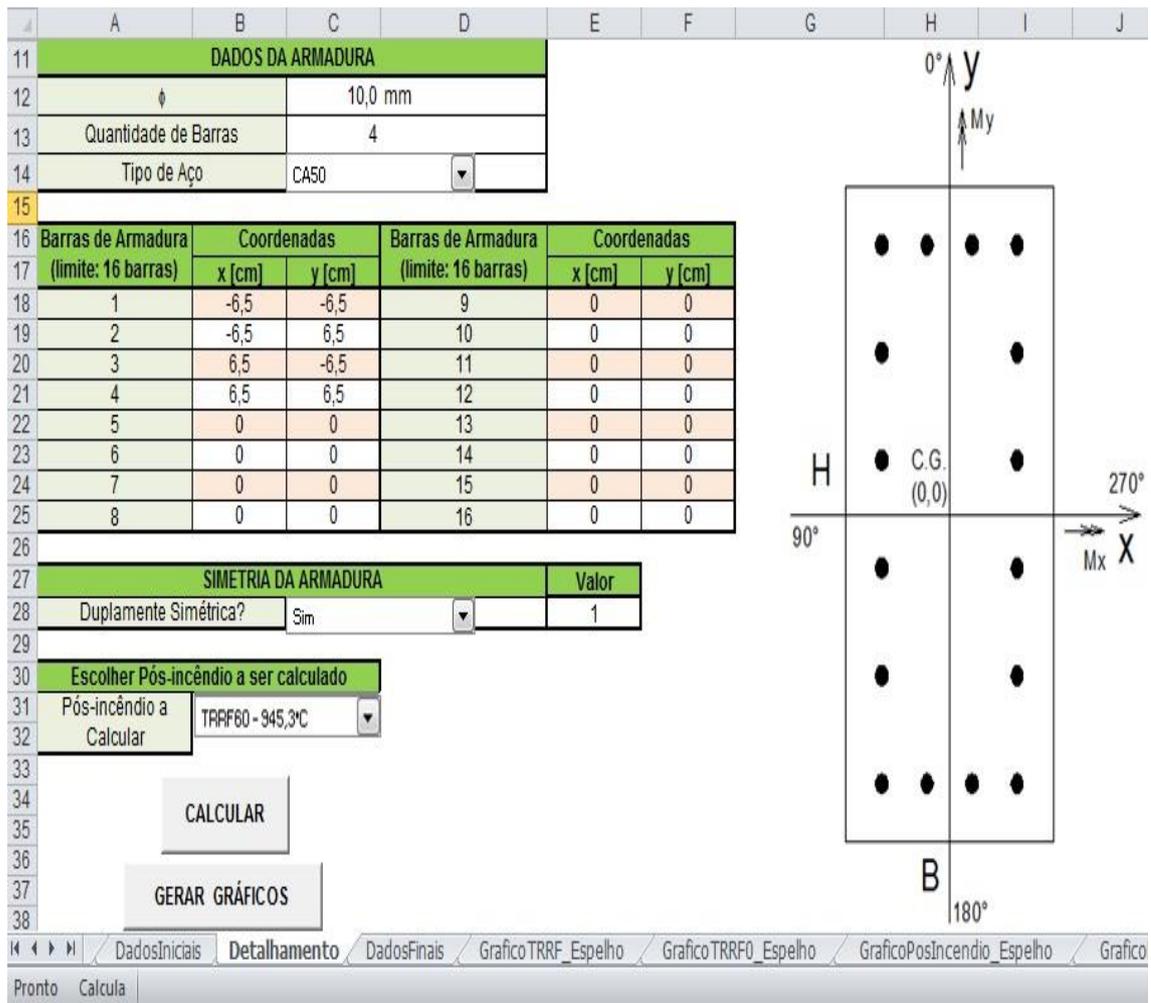


FIGURA 4.6 – Aba “Detalhamento”. Parte 01/02

K	L	M	N	O
OBSERVAÇÕES IMPORTANTES				
Temperatura máxima atingida no pós-incêndio				
TRRF 30 minutos			841,8°C	
TRRF 60 minutos			945,3°C	
TRRF 90 minutos			1006,0°C	
TRRF 120 minutos			1049,0°C	

FIGURA 4.7 – Aba “Detalhamento”. Parte 02/02

O prosseguimento do software é então a obtenção dos diagramas ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) nas três situações propostas: temperatura ambiente, incêndio e pós-incêndio. A FIG. 4.8 mostra o diagrama gerado para a temperatura ambiente para uma força normal resistente de cálculo constante de valor N_{Rd} tão próximo quanto possível ao valor N_{sd} , dependendo da tolerância fornecida pelo usuário, como já mostrado pela TAB. 3.1.

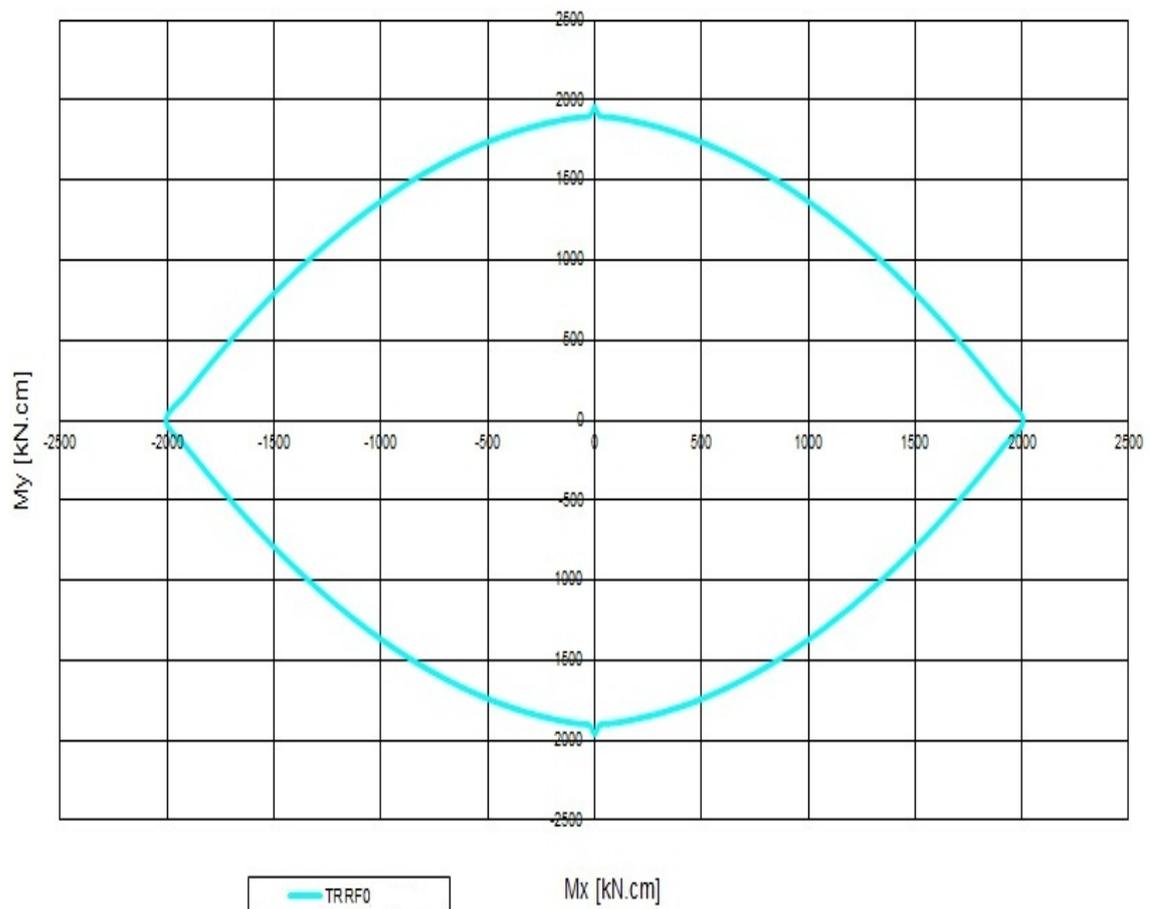


FIGURA 4.8 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente para uma seção de concreto armado 20x20 cm² armada com 4 ϕ 10mm e $N_{Rd} = 420$ kN

Para validação desse diagrama, como esclarecido anteriormente, a FIG. 4.9 mostra o mesmo diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado pelo aplicativo web da USP, para mesma seção de concreto armado e nas mesmas condições estabelecidas.

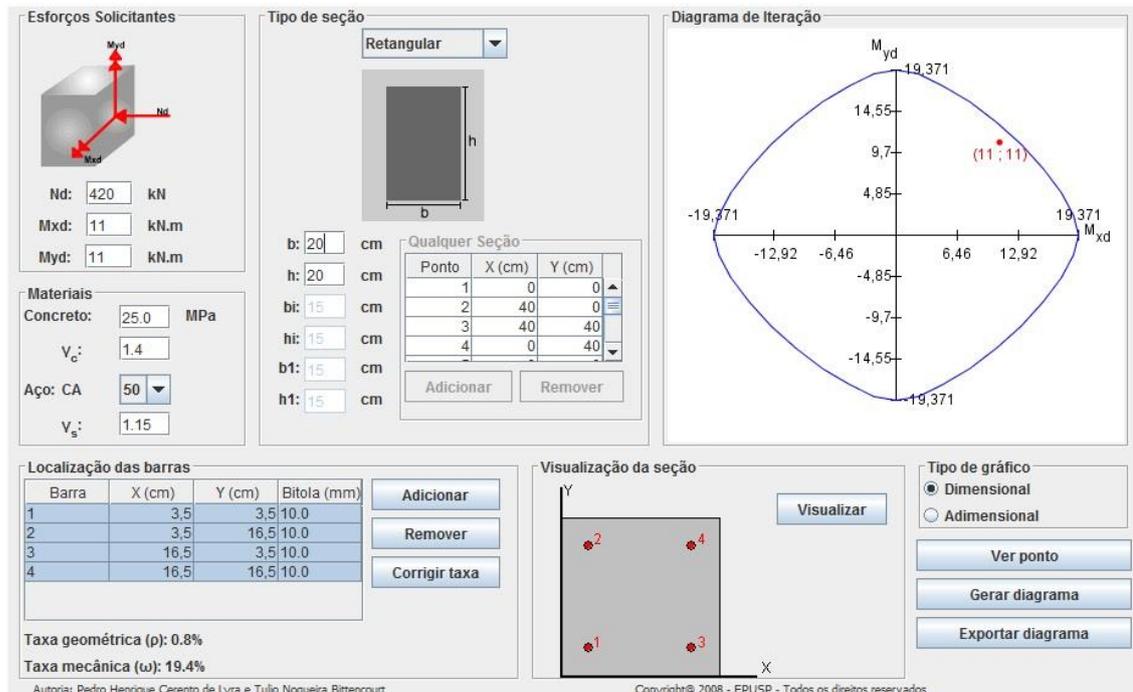


FIGURA 4.9 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente para uma seção de concreto armado 20×20 cm² armada com 4 ϕ 10mm pelo aplicativo web USP

4.2.2 – Flexão oblíqua composta em situação de incêndio e validação do software proposto

Para a situação de incêndio, o software proposto gera os diagramas de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para cada um dos TRRF preconizados pela ABNT NBR 14432:2001, ou seja, 30, 60, 90 e 120 minutos junto com o diagrama obtido em temperatura ambiente, para que se possa comparar os esforços solicitantes com os resistentes com a exposição ao fogo. Esses diagramas são gerados, cada um deles, para forças normais constantes resistentes de cálculo, N_{Rd} , tão próximas quanto possível, dependendo da tolerância arbitrada, de N_{Sd} , como já pôde ser observado pelas TAB. 3.2 a 3.5. É importante ressaltar que os diagramas só são gerados caso a seção resista àquela força normal solicitante N_{Sd} . Em caso contrário, o programa percorre todas as opções de x_o possíveis e não encontra o valor de N_{Rd} que passe pelo teste de tolerância. Nesse caso só poderia

ser encontrado um resultado válido para outro ângulo α válido. No entanto, é possível que, com a perda de resistência por causa do efeito do incêndio, a seção com a atuação do fogo por determinado TRRF não mais resista aos esforços solicitantes e com isso diagrama nenhum ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) é gerado para aquele TRRF, bem como para os TRRF seguintes de maior tempo de exposição ao fogo. A FIG. 4.10 exhibe esses diagramas para a seção do exemplo. Percebe-se portanto que a seção do exemplo, armada da maneira sugerida, resiste inicialmente apenas aos TRRF de 30 e 60 minutos. Inicialmente, porque esse fato indica apenas que, mesmo com a redução da resistência mecânica da peça imposta pela ação do fogo nos TRRF em questão ainda foi possível variar a linha neutra a fim de se obter N_{Rd} muito próxima à N_{sd} , lembrando que $\gamma_f=1,0$ e $\gamma_c=1,2$ para a situação de incêndio.

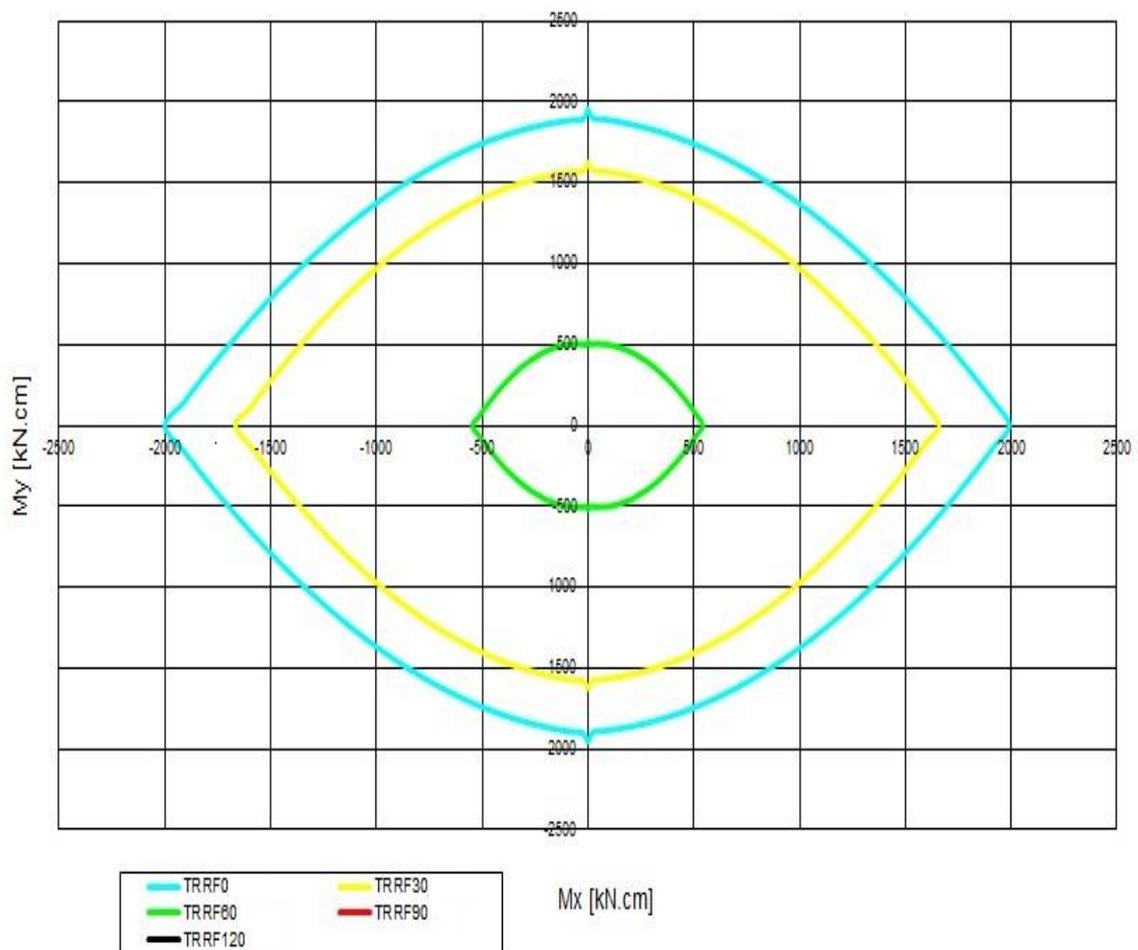


FIGURA 4.10 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado para $N_{Rd} = 420$ kN em temperatura ambiente e gerado para $N_{Rd} = 300$ kN para os TRRF de 30 e 60 minutos para uma seção de concreto armado 20×20 cm² armada com 4 ϕ 10mm e utilização de agregado silicoso

Entretanto, observando o diagrama da FIG. 4.10 nota-se que a seção de concreto armado (20x20) cm², com a armadura proposta (4φ10mm), e submetida aos esforços solicitantes em situação de incêndio $N_{s,d}=300\text{kN}$ e $M_{x,s,d}=M_{y,s,d}=786\text{kN.cm}$ resiste apenas ao TRRF de 30 minutos de incêndio, já que o diagrama da FIG. 4.10 foi desenvolvido para uma $N_{r,d}$ muito próxima à $N_{s,d}=300\text{kN}$. A conclusão é feita com base na análise simultânea do par de momentos fletores solicitantes em situação de incêndio $M_{x,s,d}=M_{y,s,d}=786\text{kN.cm}$, pois o par fica interno ao anel exibido em amarelo e que representa a resistência da peça ao incêndio de 30 minutos e externo ao anel exibido em verde e que representa a resistência da peça ao incêndio de 60 minutos.

Para verificar a precisão do método proposto, será apresentado a seguir o cálculo manual dos esforços resistentes de cálculo, $N_{r,d}$, $M_{x,r,d}$ e $M_{y,r,d}$ para a temperatura ambiente, para um TRRF de 30 minutos e para a situação após um incêndio de 30 minutos para a seção do exemplo. A TAB. 4.1 foi desenvolvida para a seção de 20x20 cm² e, portanto, é dividida em 400 elementos finitos “i” de concreto (EFi), e a TAB 4.2 para as 4 barras de armadura “j”. Assim, são calculadas manualmente as propriedades em cada um desses EFi e dessas barras de armadura afim de se obter o terno de esforços resistentes de cálculo que é mostrado na TAB 4.3. As TAB 4.1 e 4.2 foram ainda desenvolvidas apenas para três posições válidas da linha neutra. Para um ângulo válido, $\alpha=45^\circ$, da posição da linha neutra, as posições x_o necessárias para equilibrar os esforços internos e externos nos três casos são $x_o = -7,51\text{ cm}$, $x_o = -4,95\text{ cm}$ e $x_o = -9,91\text{ cm}$ para a temperatura ambiente, TRRF 30 minutos e pós-incêndio de 30 minutos, respectivamente. Dessa maneira, validando-se essas posições, por analogia, valida-se também todas as demais. Nota-se um valor da posição x_o da linha neutra bem diferente para a temperatura ambiente e para a situação de incêndio. O fato ocorre porque a força normal resistente de cálculo que o programa é obrigado a aceitar no teste de tolerância para a temperatura ambiente e para o TRRF 30 é significativamente diferente, já que os coeficientes majoradores das ações muda de uma situação para a outra, conforme o item 3.3.1. Dessa maneira, o programa busca uma nova posição x_o de modo a equilibrar os esforços internos e externos. Deve-se ressaltar que na situação de incêndio são inseridos os coeficientes redutores de resistência para o concreto, o aço e do módulo de

elasticidade do aço. Analisando-se também a mudança da ocorrência de um incêndio para a situação após o incêndio, percebe-se novamente uma posição x_0 da linha neutra bem diferente. Ocorre que, na situação após um incêndio, o que se deseja verificar é a capacidade portante remanescente da peça estrutural e, portanto, a força normal resistente de cálculo, N_{Rd} , volta a ser a mesma N_{Rd} para a qual se determinou o diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) em temperatura ambiente. Embora o concreto ao ser resfriado ainda sofra mais uma significativa perda de resistência mecânica em relação a sua resistência durante o incêndio, existe a retomada integral da resistência do aço quando da extinção do incêndio. Portanto, considera-se que, não havendo mais a ação excepcional do fogo, a peça estrutural deve ser capaz, com sua capacidade portante remanescente, de suportar os mesmos esforços solicitantes que suportava antes de ocorrido o incêndio.

TABELA 4.1 – Valores calculados manualmente para os EFi da seção retangular do Exemplo 1

EFi	x_i [cm]	y_i [cm]	N_i [kN]	M_{x_i} [kN.m]	M_{y_i} [kN.m]	θ [°C]	kc	kc,pos	$N_{i,\theta}$ [kN]	$M_{x_i,\theta}$ [kN.m]	$M_{y_i,\theta}$ [kN.m]	$N_{i,pos}$ [kN]	$M_{x_i,pos}$ [kN.m]	$M_{y_i,pos}$ [kN.m]
1	-9,5	9,5	1,132	10,753	-10,753	773,50	0,190	0,171	0,184	1,745	-1,745	0,266	2,529	-2,529
2	-8,5	9,5	1,226	11,650	-10,424	719,50	0,271	0,244	0,303	2,875	-2,573	0,398	3,778	-3,381
3	-7,5	9,5	1,308	12,422	-9,807	678,88	0,332	0,299	0,415	3,946	-3,115	0,504	4,792	-3,783
4	-6,5	9,5	1,376	13,068	-8,941	651,63	0,373	0,335	0,511	4,852	-3,320	0,581	5,518	-3,775
5	-5,5	9,5	1,430	13,588	-7,867	631,50	0,403	0,362	0,594	5,641	-3,266	0,638	6,057	-3,507
6	-4,5	9,5	1,472	13,982	-6,623	618,50	0,422	0,380	0,660	6,267	-2,969	0,673	6,392	-3,028
7	-3,5	9,5	1,500	14,251	-5,250	609,06	0,436	0,393	0,713	6,778	-2,497	0,696	6,607	-2,434
8	-2,5	9,5	1,515	14,394	-3,788	603,19	0,445	0,401	0,753	7,156	-1,883	0,710	6,741	-1,774
9	-1,5	9,5	1,518	14,420	-2,277	599,50	0,451	0,406	0,781	7,423	-1,172	0,718	6,825	-1,078
10	-0,5	9,5	1,518	14,420	-0,759	598,00	0,453	0,408	0,797	7,573	-0,399	0,722	6,859	-0,361
11	0,5	9,5	1,518	14,420	0,759	598,00	0,453	0,408	0,802	7,619	0,401	0,722	6,859	0,361
12	1,5	9,5	1,518	14,420	2,277	599,50	0,451	0,406	0,798	7,583	1,197	0,718	6,825	1,078
13	2,5	9,5	1,518	14,420	3,795	603,19	0,445	0,401	0,788	7,490	1,971	0,710	6,741	1,774
14	3,5	9,5	1,518	14,420	5,313	609,06	0,436	0,393	0,773	7,342	2,705	0,696	6,607	2,434
15	4,5	9,5	1,518	14,420	6,830	618,50	0,422	0,380	0,748	7,103	3,365	0,673	6,393	3,028
16	5,5	9,5	1,518	14,420	8,348	631,50	0,403	0,362	0,713	6,775	3,923	0,642	6,098	3,530
17	6,5	9,5	1,518	14,420	9,866	651,63	0,373	0,335	0,660	6,268	4,288	0,594	5,641	3,860
18	7,5	9,5	1,518	14,420	11,384	678,88	0,332	0,299	0,587	5,580	4,405	0,000	0,000	0,000
19	8,5	9,5	1,518	14,420	12,902	719,50	0,271	0,244	0,479	4,555	4,075	0,000	0,000	0,000
20	9,5	9,5	1,518	14,420	14,420	773,50	0,190	0,171	0,336	3,192	3,192	0,000	0,000	0,000
21	-9,5	8,5	1,024	8,706	-9,730	719,50	0,271	0,244	0,217	1,848	-2,066	0,358	3,046	-3,404
22	-8,5	8,5	1,132	9,621	-9,621	627,50	0,409	0,368	0,396	3,364	-3,364	0,574	4,875	-4,875
23	-7,5	8,5	1,226	10,424	-9,198	559,63	0,511	0,460	0,571	4,851	-4,281	0,750	6,375	-5,625
24	-6,5	8,5	1,308	11,114	-8,499	515,88	0,576	0,519	0,721	6,132	-4,690	0,876	7,449	-5,696
25	-5,5	8,5	1,376	11,692	-7,565	484,00	0,624	0,562	0,855	7,272	-4,705	0,973	8,269	-5,350
26	-4,5	8,5	1,430	12,157	-6,436	464,00	0,654	0,589	0,964	8,196	-4,339	1,035	8,800	-4,659
27	-3,5	8,5	1,472	12,510	-5,151	449,69	0,675	0,608	1,055	8,970	-3,693	1,076	9,148	-3,767
28	-2,5	8,5	1,500	12,751	-3,750	441,06	0,688	0,620	1,125	9,566	-2,814	1,097	9,326	-2,743

EFI	xi [cm]	yi [cm]	Ni [kN]	Mxi [kN.m]	Myi [kN.m]	θ [°C]	kc	kc,pos	Ni,θ [kN]	Mxi,θ [kN.m]	Myi,θ [kN.m]	Ni,pos [kN]	Mxi,pos [kN.m]	Myi,pos [kN.m]
29	-1,5	8,5	1,515	12,879	-2,273	435,50	0,697	0,627	1,179	10,020	-1,768	1,110	9,439	-1,666
30	-0,5	8,5	1,518	12,902	-0,759	433,00	0,701	0,630	1,214	10,322	-0,607	1,116	9,490	-0,558
31	0,5	8,5	1,518	12,902	0,759	433,00	0,701	0,630	1,233	10,478	0,616	1,116	9,490	0,558
32	1,5	8,5	1,518	12,902	2,277	435,50	0,697	0,627	1,234	10,486	1,850	1,110	9,439	1,666
33	2,5	8,5	1,518	12,902	3,795	441,06	0,688	0,620	1,219	10,362	3,048	1,097	9,326	2,743
34	3,5	8,5	1,518	12,902	5,313	449,69	0,675	0,608	1,196	10,167	4,186	1,077	9,150	3,768
35	4,5	8,5	1,518	12,902	6,830	464,00	0,654	0,589	1,158	9,844	5,212	1,042	8,860	4,690
36	5,5	8,5	1,518	12,902	8,348	484,00	0,624	0,562	1,105	9,393	6,078	0,995	8,453	5,470
37	6,5	8,5	1,518	12,902	9,866	515,88	0,576	0,519	1,020	8,673	6,632	0,918	7,806	5,969
38	7,5	8,5	1,518	12,902	11,384	559,63	0,511	0,460	0,904	7,685	6,781	0,814	6,917	6,103
39	8,5	8,5	1,518	12,902	12,902	627,50	0,409	0,368	0,724	6,153	6,153	0,000	0,000	0,000
40	9,5	8,5	1,518	12,902	14,420	719,50	0,271	0,244	0,479	4,075	4,555	0,000	0,000	0,000
41	-9,5	7,5	0,903	6,775	-8,582	678,88	0,332	0,299	0,206	1,549	-1,962	0,408	3,059	-3,875
42	-8,5	7,5	1,024	7,682	-8,706	559,63	0,511	0,460	0,410	3,075	-3,485	0,676	5,068	-5,743
43	-7,5	7,5	1,132	8,489	-8,489	472,13	0,642	0,578	0,621	4,661	-4,661	0,901	6,754	-6,754
44	-6,5	7,5	1,226	9,198	-7,971	416,38	0,725	0,653	0,811	6,082	-5,271	1,066	7,992	-6,927
45	-5,5	7,5	1,308	9,807	-7,192	375,75	0,774	0,697	0,969	7,271	-5,332	1,178	8,832	-6,477
46	-4,5	7,5	1,376	10,317	-6,190	350,25	0,800	0,720	1,096	8,223	-4,934	1,247	9,351	-5,610
47	-3,5	7,5	1,430	10,727	-5,006	332,06	0,818	0,736	1,206	9,044	-4,221	1,295	9,712	-4,532
48	-2,5	7,5	1,472	11,039	-3,680	321,19	0,829	0,746	1,295	9,711	-3,237	1,321	9,904	-3,301
49	-1,5	7,5	1,500	11,251	-2,250	314,13	0,836	0,752	1,366	10,249	-2,050	1,332	9,991	-1,998
50	-0,5	7,5	1,515	11,364	-0,758	310,88	0,839	0,755	1,420	10,648	-0,710	1,337	10,030	-0,669
51	0,5	7,5	1,518	11,384	0,759	310,88	0,839	0,755	1,455	10,910	0,727	1,337	10,030	0,669
52	1,5	7,5	1,518	11,384	2,277	314,13	0,836	0,752	1,471	11,032	2,206	1,332	9,991	1,998
53	2,5	7,5	1,518	11,384	3,795	321,19	0,829	0,746	1,467	11,006	3,669	1,321	9,907	3,302
54	3,5	7,5	1,518	11,384	5,313	332,06	0,818	0,736	1,448	10,863	5,070	1,304	9,777	4,563
55	4,5	7,5	1,518	11,384	6,830	350,25	0,800	0,720	1,416	10,622	6,373	1,275	9,560	5,736
56	5,5	7,5	1,518	11,384	8,348	375,75	0,774	0,697	1,371	10,283	7,541	1,234	9,255	6,787
57	6,5	7,5	1,518	11,384	9,866	416,38	0,725	0,653	1,285	9,635	8,350	1,156	8,671	7,515
58	7,5	7,5	1,518	11,384	11,384	472,13	0,642	0,578	1,137	8,524	8,524	1,023	7,672	7,672
59	8,5	7,5	1,518	11,384	12,902	559,63	0,511	0,460	0,904	6,781	7,685	0,814	6,103	6,917
60	9,5	7,5	1,518	11,384	14,420	678,88	0,332	0,299	0,587	4,405	5,580	0,000	0,000	0,000
61	-9,5	6,5	0,769	5,000	-7,308	651,63	0,373	0,335	0,159	1,033	-1,510	0,418	2,718	-3,972
62	-8,5	6,5	0,903	5,872	-7,679	515,88	0,576	0,519	0,359	2,332	-3,049	0,709	4,606	-6,023
63	-7,5	6,5	1,024	6,658	-7,682	416,38	0,725	0,653	0,583	3,787	-4,369	0,960	6,241	-7,201
64	-6,5	6,5	1,132	7,358	-7,358	353,13	0,797	0,717	0,772	5,015	-5,015	1,118	7,268	-7,268
65	-5,5	6,5	1,226	7,971	-6,745	306,75	0,843	0,759	0,943	6,127	-5,185	1,239	8,052	-6,813
66	-4,5	6,5	1,308	8,499	-5,884	277,25	0,873	0,786	1,093	7,103	-4,918	1,328	8,634	-5,977
67	-3,5	6,5	1,376	8,941	-4,814	256,19	0,894	0,806	1,225	7,965	-4,289	1,395	9,069	-4,884
68	-2,5	6,5	1,430	9,297	-3,576	243,56	0,906	0,817	1,336	8,687	-3,341	1,437	9,343	-3,594
69	-1,5	6,5	1,472	9,567	-2,208	235,38	0,915	0,825	1,429	9,288	-2,143	1,460	9,491	-2,190
70	-0,5	6,5	1,500	9,751	-0,750	231,63	0,918	0,828	1,501	9,759	-0,751	1,467	9,533	-0,733
71	0,5	6,5	1,515	9,849	0,758	231,63	0,918	0,828	1,554	10,100	0,777	1,467	9,533	0,733
72	1,5	6,5	1,518	9,866	2,277	235,38	0,915	0,825	1,586	10,306	2,378	1,461	9,494	2,191
73	2,5	6,5	1,518	9,866	3,795	243,56	0,906	0,817	1,595	10,368	3,988	1,447	9,406	3,618
74	3,5	6,5	1,518	9,866	5,313	256,19	0,894	0,806	1,583	10,286	5,539	1,426	9,272	4,993
75	4,5	6,5	1,518	9,866	6,830	277,25	0,873	0,786	1,545	10,046	6,955	1,392	9,048	6,264
76	5,5	6,5	1,518	9,866	8,348	306,75	0,843	0,759	1,493	9,706	8,213	1,344	8,736	7,392
77	6,5	6,5	1,518	9,866	9,866	353,13	0,797	0,717	1,411	9,172	9,172	1,270	8,255	8,255
78	7,5	6,5	1,518	9,866	11,384	416,38	0,725	0,653	1,285	8,350	9,635	1,156	7,515	8,671
79	8,5	6,5	1,518	9,866	12,902	515,88	0,576	0,519	1,020	6,632	8,673	0,918	5,969	7,806

EFI	xi [cm]	yi [cm]	Ni [kN]	Mxi [kN.m]	Myi [kN.m]	θ [°C]	kc	kc,pos	Ni,θ [kN]	Mxi,θ [kN.m]	Myi,θ [kN.m]	Ni,pos [kN]	Mxi,pos [kN.m]	Myi,pos [kN.m]
80	9,5	6,5	1,518	9,866	14,420	651,63	0,373	0,335	0,660	4,288	6,268	0,594	3,860	5,641
81	-9,5	5,5	0,622	3,420	-5,908	631,50	0,403	0,362	0,087	0,477	-0,823	0,403	2,217	-3,830
82	-8,5	5,5	0,769	4,231	-6,539	484,00	0,624	0,562	0,266	1,464	-2,262	0,700	3,852	-5,953
83	-7,5	5,5	0,903	4,969	-6,775	375,75	0,774	0,697	0,482	2,651	-3,615	0,952	5,237	-7,142
84	-6,5	5,5	1,024	5,633	-6,658	306,75	0,843	0,759	0,677	3,725	-4,402	1,116	6,138	-7,254
85	-5,5	5,5	1,132	6,226	-6,226	255,94	0,894	0,806	0,866	4,761	-4,761	1,256	6,909	-6,909
86	-4,5	5,5	1,226	6,745	-5,519	223,31	0,927	0,836	1,036	5,698	-4,662	1,364	7,504	-6,140
87	-3,5	5,5	1,308	7,192	-4,576	199,94	0,950	0,858	1,190	6,543	-4,164	1,449	7,971	-5,072
88	-2,5	5,5	1,376	7,565	-3,439	185,81	0,957	0,871	1,312	7,217	-3,280	1,508	8,294	-3,770
89	-1,5	5,5	1,430	7,867	-2,145	176,69	0,962	0,879	1,418	7,798	-2,127	1,546	8,504	-2,319
90	-0,5	5,5	1,472	8,095	-0,736	172,56	0,964	0,883	1,506	8,281	-0,753	1,563	8,597	-0,782
91	0,5	5,5	1,500	8,251	0,750	172,56	0,964	0,883	1,575	8,665	0,788	1,563	8,599	0,782
92	1,5	5,5	1,515	8,333	2,273	176,69	0,962	0,879	1,627	8,949	2,441	1,557	8,562	2,335
93	2,5	5,5	1,518	8,348	3,795	185,81	0,957	0,871	1,659	9,125	4,148	1,542	8,480	3,854
94	3,5	5,5	1,518	8,348	5,313	199,94	0,950	0,858	1,672	9,195	5,851	1,519	8,352	5,315
95	4,5	5,5	1,518	8,348	6,830	223,31	0,927	0,836	1,641	9,024	7,383	1,480	8,142	6,661
96	5,5	5,5	1,518	8,348	8,348	255,94	0,894	0,806	1,583	8,708	8,708	1,427	7,848	7,848
97	6,5	5,5	1,518	8,348	9,866	306,75	0,843	0,759	1,493	8,213	9,706	1,344	7,392	8,736
98	7,5	5,5	1,518	8,348	11,384	375,75	0,774	0,697	1,371	7,541	10,283	1,234	6,787	9,255
99	8,5	5,5	1,518	8,348	12,902	484,00	0,624	0,562	1,105	6,078	9,393	0,995	5,470	8,453
100	9,5	5,5	1,518	8,348	14,420	631,50	0,403	0,362	0,713	3,923	6,775	0,642	3,530	6,098
101	-9,5	4,5	0,461	2,076	-4,383	618,50	0,422	0,380	0,000	0,000	0,000	0,366	1,645	-3,473
102	-8,5	4,5	0,622	2,799	-5,286	464,00	0,654	0,589	0,141	0,633	-1,196	0,655	2,946	-5,564
103	-7,5	4,5	0,769	3,462	-5,769	350,25	0,800	0,720	0,341	1,535	-2,559	0,898	4,039	-6,732
104	-6,5	4,5	0,903	4,065	-5,872	277,25	0,873	0,786	0,543	2,445	-3,532	1,074	4,834	-6,982
105	-5,5	4,5	1,024	4,609	-5,633	223,31	0,927	0,836	0,744	3,349	-4,093	1,229	5,532	-6,761
106	-4,5	4,5	1,132	5,094	-5,094	188,44	0,956	0,868	0,925	4,164	-4,164	1,354	6,091	-6,091
107	-3,5	4,5	1,226	5,519	-4,292	163,31	0,968	0,891	1,083	4,871	-3,789	1,455	6,548	-5,093
108	-2,5	4,5	1,308	5,884	-3,269	147,94	0,976	0,906	1,222	5,500	-3,055	1,530	6,887	-3,826
109	-1,5	4,5	1,376	6,190	-2,063	138,06	0,981	0,915	1,345	6,052	-2,017	1,585	7,131	-2,377
110	-0,5	4,5	1,430	6,436	-0,715	133,69	0,983	0,919	1,450	6,523	-0,725	1,616	7,273	-0,808
111	0,5	4,5	1,472	6,623	0,736	133,69	0,983	0,919	1,536	6,912	0,768	1,627	7,320	0,813
112	1,5	4,5	1,500	6,750	2,250	138,06	0,981	0,915	1,604	7,217	2,406	1,620	7,290	2,430
113	2,5	4,5	1,515	6,818	3,788	147,94	0,976	0,906	1,651	7,431	4,128	1,604	7,217	4,009
114	3,5	4,5	1,518	6,830	5,313	163,31	0,968	0,891	1,679	7,554	5,875	1,579	7,104	5,525
115	4,5	4,5	1,518	6,830	6,830	188,44	0,956	0,868	1,682	7,569	7,569	1,537	6,918	6,918
116	5,5	4,5	1,518	6,830	8,348	223,31	0,927	0,836	1,641	7,383	9,024	1,480	6,661	8,142
117	6,5	4,5	1,518	6,830	9,866	277,25	0,873	0,786	1,545	6,955	10,046	1,392	6,264	9,048
118	7,5	4,5	1,518	6,830	11,384	350,25	0,800	0,720	1,416	6,373	10,622	1,275	5,736	9,560
119	8,5	4,5	1,518	6,830	12,902	464,00	0,654	0,589	1,158	5,212	9,844	1,042	4,690	8,860
120	9,5	4,5	1,518	6,830	14,420	618,50	0,422	0,380	0,748	3,365	7,103	0,673	3,028	6,393
121	-9,5	3,5	0,288	1,006	-2,731	609,06	0,436	0,393	0,000	0,000	0,000	0,313	1,094	-2,971
122	-8,5	3,5	0,461	1,615	-3,921	449,69	0,675	0,608	0,000	0,000	0,000	0,585	2,047	-4,970
123	-7,5	3,5	0,622	2,177	-4,664	332,06	0,818	0,736	0,176	0,616	-1,320	0,819	2,866	-6,141
124	-6,5	3,5	0,769	2,692	-5,000	256,19	0,894	0,806	0,381	1,334	-2,478	1,005	3,516	-6,530
125	-5,5	3,5	0,903	3,162	-4,969	199,94	0,950	0,858	0,591	2,070	-3,253	1,172	4,101	-6,445
126	-4,5	3,5	1,024	3,585	-4,609	163,31	0,968	0,891	0,778	2,722	-3,500	1,311	4,588	-5,899
127	-3,5	3,5	1,132	3,962	-3,962	136,81	0,982	0,916	0,950	3,326	-3,326	1,428	4,998	-4,998
128	-2,5	3,5	1,226	4,292	-3,066	120,44	0,990	0,931	1,106	3,873	-2,766	1,520	5,319	-3,799
129	-1,5	3,5	1,308	4,576	-1,961	109,94	0,995	0,941	1,246	4,361	-1,869	1,590	5,565	-2,385
130	-0,5	3,5	1,376	4,814	-0,688	105,31	0,997	0,945	1,367	4,786	-0,684	1,637	5,730	-0,819

EFI	xi [cm]	yi [cm]	Ni [kN]	Mxi [kN.m]	Myi [kN.m]	θ [°C]	kc	kc,pos	Ni,θ [kN]	Mxi,θ [kN.m]	Myi,θ [kN.m]	Ni,pos [kN]	Mxi,pos [kN.m]	Myi,pos [kN.m]
131	0,5	3,5	1,430	5,006	0,715	105,31	0,997	0,945	1,470	5,146	0,735	1,662	5,818	0,831
132	1,5	3,5	1,472	5,151	2,208	109,94	0,995	0,941	1,555	5,441	2,332	1,666	5,830	2,498
133	2,5	3,5	1,500	5,250	3,750	120,44	0,990	0,931	1,618	5,663	4,045	1,649	5,771	4,122
134	3,5	3,5	1,515	5,303	5,303	136,81	0,982	0,916	1,661	5,813	5,813	1,622	5,677	5,677
135	4,5	3,5	1,518	5,313	6,830	163,31	0,968	0,891	1,679	5,875	7,554	1,579	5,525	7,104
136	5,5	3,5	1,518	5,313	8,348	199,94	0,950	0,858	1,672	5,851	9,195	1,519	5,315	8,352
137	6,5	3,5	1,518	5,313	9,866	256,19	0,894	0,806	1,583	5,539	10,286	1,426	4,993	9,272
138	7,5	3,5	1,518	5,313	11,384	332,06	0,818	0,736	1,448	5,070	10,863	1,304	4,563	9,777
139	8,5	3,5	1,518	5,313	12,902	449,69	0,675	0,608	1,196	4,186	10,167	1,077	3,768	9,150
140	9,5	3,5	1,518	5,313	14,420	609,06	0,436	0,393	0,773	2,705	7,342	0,696	2,434	6,607
141	-9,5	2,5	0,100	0,251	-0,955	603,19	0,445	0,401	0,000	0,000	0,000	0,246	0,616	-2,341
142	-8,5	2,5	0,288	0,719	-2,444	441,06	0,688	0,620	0,000	0,000	0,000	0,493	1,233	-4,193
143	-7,5	2,5	0,461	1,153	-3,460	321,19	0,829	0,746	0,000	0,000	0,000	0,718	1,794	-5,381
144	-6,5	2,5	0,622	1,555	-4,042	243,56	0,906	0,817	0,195	0,488	-1,268	0,909	2,272	-5,908
145	-5,5	2,5	0,769	1,923	-4,231	185,81	0,957	0,871	0,408	1,021	-2,245	1,086	2,714	-5,971
146	-4,5	2,5	0,903	2,258	-4,065	147,94	0,976	0,906	0,608	1,519	-2,734	1,238	3,094	-5,569
147	-3,5	2,5	1,024	2,561	-3,585	120,44	0,990	0,931	0,795	1,987	-2,782	1,369	3,423	-4,792
148	-2,5	2,5	1,132	2,830	-2,830	103,31	0,998	0,947	0,967	2,417	-2,417	1,476	3,691	-3,691
149	-1,5	2,5	1,226	3,066	-1,840	92,31	1,000	1,000	1,118	2,795	-1,677	1,632	4,080	-2,448
150	-0,5	2,5	1,308	3,269	-0,654	87,44	1,000	1,000	1,252	3,130	-0,626	1,690	4,225	-0,845
151	0,5	2,5	1,376	3,439	0,688	87,44	1,000	1,000	1,371	3,427	0,685	1,732	4,330	0,866
152	1,5	2,5	1,430	3,576	2,145	92,31	1,000	1,000	1,474	3,686	2,212	1,759	4,397	2,638
153	2,5	2,5	1,472	3,680	3,680	103,31	0,998	0,947	1,560	3,899	3,899	1,676	4,191	4,191
154	3,5	2,5	1,500	3,750	5,250	120,44	0,990	0,931	1,618	4,045	5,663	1,649	4,122	5,771
155	4,5	2,5	1,515	3,788	6,818	147,94	0,976	0,906	1,651	4,128	7,431	1,604	4,009	7,217
156	5,5	2,5	1,518	3,795	8,348	185,81	0,957	0,871	1,659	4,148	9,125	1,542	3,854	8,480
157	6,5	2,5	1,518	3,795	9,866	243,56	0,906	0,817	1,595	3,988	10,368	1,447	3,618	9,406
158	7,5	2,5	1,518	3,795	11,384	321,19	0,829	0,746	1,467	3,669	11,006	1,321	3,302	9,907
159	8,5	2,5	1,518	3,795	12,902	441,06	0,688	0,620	1,219	3,048	10,362	1,097	2,743	9,326
160	9,5	2,5	1,518	3,795	14,420	603,19	0,445	0,401	0,788	1,971	7,490	0,710	1,774	6,741
161	-9,5	1,5	0,000	0,000	0,000	599,50	0,451	0,406	0,000	0,000	0,000	0,170	0,255	-1,612
162	-8,5	1,5	0,100	0,151	-0,854	435,50	0,697	0,627	0,000	0,000	0,000	0,386	0,578	-3,278
163	-7,5	1,5	0,288	0,431	-2,156	314,13	0,836	0,752	0,000	0,000	0,000	0,599	0,898	-4,492
164	-6,5	1,5	0,461	0,692	-2,999	235,38	0,915	0,825	0,000	0,000	0,000	0,793	1,190	-5,157
165	-5,5	1,5	0,622	0,933	-3,420	176,69	0,962	0,879	0,207	0,310	-1,138	0,978	1,467	-5,377
166	-4,5	1,5	0,769	1,154	-3,462	138,06	0,981	0,915	0,418	0,628	-1,883	1,141	1,711	-5,134
167	-3,5	1,5	0,903	1,355	-3,162	109,94	0,995	0,941	0,619	0,929	-2,168	1,286	1,928	-4,500
168	-2,5	1,5	1,024	1,536	-2,561	92,31	1,000	1,000	0,803	1,205	-2,008	1,470	2,206	-3,676
169	-1,5	1,5	1,132	1,698	-1,698	80,94	1,000	1,000	0,968	1,452	-1,452	1,559	2,339	-2,339
170	-0,5	1,5	1,226	1,840	-0,613	75,81	1,000	1,000	1,118	1,677	-0,559	1,632	2,448	-0,816
171	0,5	1,5	1,308	1,961	0,654	75,81	1,000	1,000	1,252	1,878	0,626	1,690	2,535	0,845
172	1,5	1,5	1,376	2,063	2,063	80,94	1,000	1,000	1,371	2,056	2,056	1,732	2,598	2,598
173	2,5	1,5	1,430	2,145	3,576	92,31	1,000	1,000	1,474	2,212	3,686	1,759	2,638	4,397
174	3,5	1,5	1,472	2,208	5,151	109,94	0,995	0,941	1,555	2,332	5,441	1,666	2,498	5,830
175	4,5	1,5	1,500	2,250	6,750	138,06	0,981	0,915	1,604	2,406	7,217	1,620	2,430	7,290
176	5,5	1,5	1,515	2,273	8,333	176,69	0,962	0,879	1,627	2,441	8,949	1,557	2,335	8,562
177	6,5	1,5	1,518	2,277	9,866	235,38	0,915	0,825	1,586	2,378	10,306	1,461	2,191	9,494
178	7,5	1,5	1,518	2,277	11,384	314,13	0,836	0,752	1,471	2,206	11,032	1,332	1,998	9,991
179	8,5	1,5	1,518	2,277	12,902	435,50	0,697	0,627	1,234	1,850	10,486	1,110	1,666	9,439
180	9,5	1,5	1,518	2,277	14,420	599,50	0,451	0,406	0,798	1,197	7,583	0,718	1,078	6,825
181	-9,5	0,5	0,000	0,000	0,000	598,00	0,453	0,408	0,000	0,000	0,000	0,084	0,042	-0,799

EFI	xi [cm]	yi [cm]	Ni [kN]	Mxi [kN.m]	Myi [kN.m]	θ [°C]	kc	kc,pos	Ni,θ [kN]	Mxi,θ [kN.m]	Myi,θ [kN.m]	Ni,pos [kN]	Mxi,pos [kN.m]	Myi,pos [kN.m]
182	-8,5	0,5	0,000	0,000	0,000	433,00	0,701	0,630	0,000	0,000	0,000	0,264	0,132	-2,242
183	-7,5	0,5	0,100	0,050	-0,754	310,88	0,839	0,755	0,000	0,000	0,000	0,464	0,232	-3,483
184	-6,5	0,5	0,288	0,144	-1,869	231,63	0,918	0,828	0,000	0,000	0,000	0,659	0,330	-4,286
185	-5,5	0,5	0,461	0,231	-2,537	172,56	0,964	0,883	0,000	0,000	0,000	0,849	0,425	-4,671
186	-4,5	0,5	0,622	0,311	-2,799	133,69	0,983	0,919	0,212	0,106	-0,952	1,022	0,511	-4,599
187	-3,5	0,5	0,769	0,385	-2,692	105,31	0,997	0,945	0,425	0,213	-1,489	1,179	0,589	-4,125
188	-2,5	0,5	0,903	0,452	-2,258	87,44	1,000	1,000	0,623	0,311	-1,556	1,366	0,683	-3,416
189	-1,5	0,5	1,024	0,512	-1,536	75,81	1,000	1,000	0,803	0,402	-1,205	1,470	0,735	-2,206
190	-0,5	0,5	1,132	0,566	-0,566	70,44	1,000	1,000	0,968	0,484	-0,484	1,559	0,780	-0,780
191	0,5	0,5	1,226	0,613	0,613	70,44	1,000	1,000	1,118	0,559	0,559	1,632	0,816	0,816
192	1,5	0,5	1,308	0,654	1,961	75,81	1,000	1,000	1,252	0,626	1,878	1,690	0,845	2,535
193	2,5	0,5	1,376	0,688	3,439	87,44	1,000	1,000	1,371	0,685	3,427	1,732	0,866	4,330
194	3,5	0,5	1,430	0,715	5,006	105,31	0,997	0,945	1,470	0,735	5,146	1,662	0,831	5,818
195	4,5	0,5	1,472	0,736	6,623	133,69	0,983	0,919	1,536	0,768	6,912	1,627	0,813	7,320
196	5,5	0,5	1,500	0,750	8,251	172,56	0,964	0,883	1,575	0,788	8,665	1,563	0,782	8,599
197	6,5	0,5	1,515	0,758	9,849	231,63	0,918	0,828	1,554	0,777	10,100	1,467	0,733	9,533
198	7,5	0,5	1,518	0,759	11,384	310,88	0,839	0,755	1,455	0,727	10,910	1,337	0,669	10,030
199	8,5	0,5	1,518	0,759	12,902	433,00	0,701	0,630	1,233	0,616	10,478	1,116	0,558	9,490
200	9,5	0,5	1,518	0,759	14,420	598,00	0,453	0,408	0,802	0,401	7,619	0,722	0,361	6,859
201	-9,5	-0,5	0,000	0,000	0,000	598,00	0,453	0,408	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
202	-8,5	-0,5	0,000	0,000	0,000	433,00	0,701	0,630	0,000	0,000	0,000	0,130	-0,065	-1,106
203	-7,5	-0,5	0,000	0,000	0,000	310,88	0,839	0,755	0,000	0,000	0,000	0,316	-0,158	-2,370
204	-6,5	-0,5	0,100	-0,050	-0,653	231,63	0,918	0,828	0,000	0,000	0,000	0,509	-0,255	-3,311
205	-5,5	-0,5	0,288	-0,144	-1,581	172,56	0,964	0,883	0,000	0,000	0,000	0,703	-0,351	-3,866
206	-4,5	-0,5	0,461	-0,231	-2,076	133,69	0,983	0,919	0,000	0,000	0,000	0,884	-0,442	-3,977
207	-3,5	-0,5	0,622	-0,311	-2,177	105,31	0,997	0,945	0,215	-0,107	-0,751	1,051	-0,526	-3,679
208	-2,5	-0,5	0,769	-0,385	-1,923	87,44	1,000	1,000	0,427	-0,213	-1,066	1,247	-0,624	-3,118
209	-1,5	-0,5	0,903	-0,452	-1,355	75,81	1,000	1,000	0,623	-0,311	-0,934	1,366	-0,683	-2,050
210	-0,5	-0,5	1,024	-0,512	-0,512	70,44	1,000	1,000	0,803	-0,402	-0,402	1,470	-0,735	-0,735
211	0,5	-0,5	1,132	-0,566	0,566	70,44	1,000	1,000	0,968	-0,484	0,484	1,559	-0,780	0,780
212	1,5	-0,5	1,226	-0,613	1,840	75,81	1,000	1,000	1,118	-0,559	1,677	1,632	-0,816	2,448
213	2,5	-0,5	1,308	-0,654	3,269	87,44	1,000	1,000	1,252	-0,626	3,130	1,690	-0,845	4,225
214	3,5	-0,5	1,376	-0,688	4,814	105,31	0,997	0,945	1,367	-0,684	4,786	1,637	-0,819	5,730
215	4,5	-0,5	1,430	-0,715	6,436	133,69	0,983	0,919	1,450	-0,725	6,523	1,616	-0,808	7,273
216	5,5	-0,5	1,472	-0,736	8,095	172,56	0,964	0,883	1,506	-0,753	8,281	1,563	-0,782	8,597
217	6,5	-0,5	1,500	-0,750	9,751	231,63	0,918	0,828	1,501	-0,751	9,759	1,467	-0,733	9,533
218	7,5	-0,5	1,515	-0,758	11,364	310,88	0,839	0,755	1,420	-0,710	10,648	1,337	-0,669	10,030
219	8,5	-0,5	1,518	-0,759	12,902	433,00	0,701	0,630	1,214	-0,607	10,322	1,116	-0,558	9,490
220	9,5	-0,5	1,518	-0,759	14,420	598,00	0,453	0,408	0,797	-0,399	7,573	0,722	-0,361	6,859
221	-9,5	-1,5	0,000	0,000	0,000	599,50	0,451	0,406	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
222	-8,5	-1,5	0,000	0,000	0,000	435,50	0,697	0,627	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
223	-7,5	-1,5	0,000	0,000	0,000	314,13	0,836	0,752	0,000	0,000	0,000	0,155	-0,233	-1,164
224	-6,5	-1,5	0,000	0,000	0,000	235,38	0,915	0,825	0,000	0,000	0,000	0,345	-0,518	-2,243
225	-5,5	-1,5	0,100	-0,151	-0,553	176,69	0,962	0,879	0,000	0,000	0,000	0,541	-0,811	-2,973
226	-4,5	-1,5	0,288	-0,431	-1,294	138,06	0,981	0,915	0,000	0,000	0,000	0,728	-1,092	-3,277
227	-3,5	-1,5	0,461	-0,692	-1,615	109,94	0,995	0,941	0,000	0,000	0,000	0,905	-1,357	-3,167
228	-2,5	-1,5	0,622	-0,933	-1,555	92,31	1,000	1,000	0,215	-0,323	-0,538	1,112	-1,668	-2,780
229	-1,5	-1,5	0,769	-1,154	-1,154	80,94	1,000	1,000	0,427	-0,640	-0,640	1,247	-1,871	-1,871
230	-0,5	-1,5	0,903	-1,355	-0,452	75,81	1,000	1,000	0,623	-0,934	-0,311	1,366	-2,050	-0,683
231	0,5	-1,5	1,024	-1,536	0,512	75,81	1,000	1,000	0,803	-1,205	0,402	1,470	-2,206	0,735
232	1,5	-1,5	1,132	-1,698	1,698	80,94	1,000	1,000	0,968	-1,452	1,452	1,559	-2,339	2,339

EFI	xi [cm]	yi [cm]	Ni [kN]	Mxi [kN.m]	Myi [kN.m]	θ [°C]	kc	kc,pos	Ni,θ [kN]	Mxi,θ [kN.m]	Myi,θ [kN.m]	Ni,pos [kN]	Mxi,pos [kN.m]	Myi,pos [kN.m]
284	-6,5	-4,5	0,000	0,000	0,000	277,25	0,873	0,786	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
285	-5,5	-4,5	0,000	0,000	0,000	223,31	0,927	0,836	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
286	-4,5	-4,5	0,000	0,000	0,000	188,44	0,956	0,868	0,000	0,000	0,000	0,179	-0,806	-0,806
287	-3,5	-4,5	0,000	0,000	0,000	163,31	0,968	0,891	0,000	0,000	0,000	0,373	-1,678	-1,305
288	-2,5	-4,5	0,100	-0,452	-0,251	147,94	0,976	0,906	0,000	0,000	0,000	0,557	-2,506	-1,392
289	-1,5	-4,5	0,288	-1,294	-0,431	138,06	0,981	0,915	0,000	0,000	0,000	0,728	-3,277	-1,092
290	-0,5	-4,5	0,461	-2,076	-0,231	133,69	0,983	0,919	0,000	0,000	0,000	0,884	-3,977	-0,442
291	0,5	-4,5	0,622	-2,799	0,311	133,69	0,983	0,919	0,212	-0,952	0,106	1,022	-4,599	0,511
292	1,5	-4,5	0,769	-3,462	1,154	138,06	0,981	0,915	0,418	-1,883	0,628	1,141	-5,134	1,711
293	2,5	-4,5	0,903	-4,065	2,258	147,94	0,976	0,906	0,608	-2,734	1,519	1,238	-5,569	3,094
294	3,5	-4,5	1,024	-4,609	3,585	163,31	0,968	0,891	0,778	-3,500	2,722	1,311	-5,899	4,588
295	4,5	-4,5	1,132	-5,094	5,094	188,44	0,956	0,868	0,925	-4,164	4,164	1,354	-6,091	6,091
296	5,5	-4,5	1,226	-5,519	6,745	223,31	0,927	0,836	1,036	-4,662	5,698	1,364	-6,140	7,504
297	6,5	-4,5	1,308	-5,884	8,499	277,25	0,873	0,786	1,093	-4,918	7,103	1,328	-5,977	8,634
298	7,5	-4,5	1,376	-6,190	10,317	350,25	0,800	0,720	1,096	-4,934	8,223	1,247	-5,610	9,351
299	8,5	-4,5	1,430	-6,436	12,157	464,00	0,654	0,589	0,964	-4,339	8,196	1,035	-4,659	8,800
300	9,5	-4,5	1,472	-6,623	13,982	618,50	0,422	0,380	0,660	-2,969	6,267	0,673	-3,028	6,392
301	-9,5	-5,5	0,000	0,000	0,000	631,50	0,403	0,362	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
302	-8,5	-5,5	0,000	0,000	0,000	484,00	0,624	0,562	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
303	-7,5	-5,5	0,000	0,000	0,000	375,75	0,774	0,697	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
304	-6,5	-5,5	0,000	0,000	0,000	306,75	0,843	0,759	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
305	-5,5	-5,5	0,000	0,000	0,000	255,94	0,894	0,806	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
306	-4,5	-5,5	0,000	0,000	0,000	223,31	0,927	0,836	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
307	-3,5	-5,5	0,000	0,000	0,000	199,94	0,950	0,858	0,000	0,000	0,000	0,177	-0,973	-0,619
308	-2,5	-5,5	0,000	0,000	0,000	185,81	0,957	0,871	0,000	0,000	0,000	0,364	-2,003	-0,911
309	-1,5	-5,5	0,100	-0,553	-0,151	176,69	0,962	0,879	0,000	0,000	0,000	0,541	-2,973	-0,811
310	-0,5	-5,5	0,288	-1,581	-0,144	172,56	0,964	0,883	0,000	0,000	0,000	0,703	-3,866	-0,351
311	0,5	-5,5	0,461	-2,537	0,231	172,56	0,964	0,883	0,000	0,000	0,000	0,849	-4,671	0,425
312	1,5	-5,5	0,622	-3,420	0,933	176,69	0,962	0,879	0,207	-1,138	0,310	0,978	-5,377	1,467
313	2,5	-5,5	0,769	-4,231	1,923	185,81	0,957	0,871	0,408	-2,245	1,021	1,086	-5,971	2,714
314	3,5	-5,5	0,903	-4,969	3,162	199,94	0,950	0,858	0,591	-3,253	2,070	1,172	-6,445	4,101
315	4,5	-5,5	1,024	-5,633	4,609	223,31	0,927	0,836	0,744	-4,093	3,349	1,229	-6,761	5,532
316	5,5	-5,5	1,132	-6,226	6,226	255,94	0,894	0,806	0,866	-4,761	4,761	1,256	-6,909	6,909
317	6,5	-5,5	1,226	-6,745	7,971	306,75	0,843	0,759	0,943	-5,185	6,127	1,239	-6,813	8,052
318	7,5	-5,5	1,308	-7,192	9,807	375,75	0,774	0,697	0,969	-5,332	7,271	1,178	-6,477	8,832
319	8,5	-5,5	1,376	-7,565	11,692	484,00	0,624	0,562	0,855	-4,705	7,272	0,973	-5,350	8,269
320	9,5	-5,5	1,430	-7,867	13,588	631,50	0,403	0,362	0,594	-3,266	5,641	0,638	-3,507	6,057
321	-9,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	651,63	0,373	0,335	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
322	-8,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	515,88	0,576	0,519	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
323	-7,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	416,38	0,725	0,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
324	-6,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	353,13	0,797	0,717	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
325	-5,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	306,75	0,843	0,759	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
326	-4,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	277,25	0,873	0,786	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
327	-3,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	256,19	0,894	0,806	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
328	-2,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	243,56	0,906	0,817	0,000	0,000	0,000	0,169	-1,096	-0,422
329	-1,5	-6,5	0,000	0,000	0,000	235,38	0,915	0,825	0,000	0,000	0,000	0,345	-2,243	-0,518
330	-0,5	-6,5	0,100	-0,653	-0,050	231,63	0,918	0,828	0,000	0,000	0,000	0,509	-3,311	-0,255
331	0,5	-6,5	0,288	-1,869	0,144	231,63	0,918	0,828	0,000	0,000	0,000	0,659	-4,286	0,330
332	1,5	-6,5	0,461	-2,999	0,692	235,38	0,915	0,825	0,000	0,000	0,000	0,793	-5,157	1,190
333	2,5	-6,5	0,622	-4,042	1,555	243,56	0,906	0,817	0,195	-1,268	0,488	0,909	-5,908	2,272
334	3,5	-6,5	0,769	-5,000	2,692	256,19	0,894	0,806	0,381	-2,478	1,334	1,005	-6,530	3,516

EFI	xi [cm]	yi [cm]	Ni [kN]	Mxi [kN.m]	Myi [kN.m]	θ [°C]	kc	kc,pos	Ni,θ [kN]	Mxi,θ [kN.m]	Myi,θ [kN.m]	Ni,pos [kN]	Mxi,pos [kN.m]	Myi,pos [kN.m]
335	4,5	-6,5	0,903	-5,872	4,065	277,25	0,873	0,786	0,543	-3,532	2,445	1,074	-6,982	4,834
336	5,5	-6,5	1,024	-6,658	5,633	306,75	0,843	0,759	0,677	-4,402	3,725	1,116	-7,254	6,138
337	6,5	-6,5	1,132	-7,358	7,358	353,13	0,797	0,717	0,772	-5,015	5,015	1,118	-7,268	7,268
338	7,5	-6,5	1,226	-7,971	9,198	416,38	0,725	0,653	0,811	-5,271	6,082	1,066	-6,927	7,992
339	8,5	-6,5	1,308	-8,499	11,114	515,88	0,576	0,519	0,721	-4,690	6,132	0,876	-5,696	7,449
340	9,5	-6,5	1,376	-8,941	13,068	651,63	0,373	0,335	0,511	-3,320	4,852	0,581	-3,775	5,518
341	-9,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	678,88	0,332	0,299	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
342	-8,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	559,63	0,511	0,460	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
343	-7,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	472,13	0,642	0,578	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
344	-6,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	416,38	0,725	0,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
345	-5,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	375,75	0,774	0,697	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
346	-4,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	350,25	0,800	0,720	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
347	-3,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	332,06	0,818	0,736	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
348	-2,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	321,19	0,829	0,746	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
349	-1,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	314,13	0,836	0,752	0,000	0,000	0,000	0,155	-1,164	-0,233
350	-0,5	-7,5	0,000	0,000	0,000	310,88	0,839	0,755	0,000	0,000	0,000	0,316	-2,370	-0,158
351	0,5	-7,5	0,100	-0,754	0,050	310,88	0,839	0,755	0,000	0,000	0,000	0,464	-3,483	0,232
352	1,5	-7,5	0,288	-2,156	0,431	314,13	0,836	0,752	0,000	0,000	0,000	0,599	-4,492	0,898
353	2,5	-7,5	0,461	-3,460	1,153	321,19	0,829	0,746	0,000	0,000	0,000	0,718	-5,381	1,794
354	3,5	-7,5	0,622	-4,664	2,177	332,06	0,818	0,736	0,176	-1,320	0,616	0,819	-6,141	2,866
355	4,5	-7,5	0,769	-5,769	3,462	350,25	0,800	0,720	0,341	-2,559	1,535	0,898	-6,732	4,039
356	5,5	-7,5	0,903	-6,775	4,969	375,75	0,774	0,697	0,482	-3,615	2,651	0,952	-7,142	5,237
357	6,5	-7,5	1,024	-7,682	6,658	416,38	0,725	0,653	0,583	-4,369	3,787	0,960	-7,201	6,241
358	7,5	-7,5	1,132	-8,489	8,489	472,13	0,642	0,578	0,621	-4,661	4,661	0,901	-6,754	6,754
359	8,5	-7,5	1,226	-9,198	10,424	559,63	0,511	0,460	0,571	-4,281	4,851	0,750	-5,625	6,375
360	9,5	-7,5	1,308	-9,807	12,422	678,88	0,332	0,299	0,415	-3,115	3,946	0,504	-3,783	4,792
361	-9,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	719,50	0,271	0,244	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
362	-8,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	627,50	0,409	0,368	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
363	-7,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	559,63	0,511	0,460	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
364	-6,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	515,88	0,576	0,519	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
365	-5,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	484,00	0,624	0,562	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
366	-4,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	464,00	0,654	0,589	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
367	-3,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	449,69	0,675	0,608	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
368	-2,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	441,06	0,688	0,620	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
369	-1,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	435,50	0,697	0,627	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
370	-0,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	433,00	0,701	0,630	0,000	0,000	0,000	0,130	-1,106	-0,065
371	0,5	-8,5	0,000	0,000	0,000	433,00	0,701	0,630	0,000	0,000	0,000	0,264	-2,242	0,132
372	1,5	-8,5	0,100	-0,854	0,151	435,50	0,697	0,627	0,000	0,000	0,000	0,386	-3,278	0,578
373	2,5	-8,5	0,288	-2,444	0,719	441,06	0,688	0,620	0,000	0,000	0,000	0,493	-4,193	1,233
374	3,5	-8,5	0,461	-3,921	1,615	449,69	0,675	0,608	0,000	0,000	0,000	0,585	-4,970	2,047
375	4,5	-8,5	0,622	-5,286	2,799	464,00	0,654	0,589	0,141	-1,196	0,633	0,655	-5,564	2,946
376	5,5	-8,5	0,769	-6,539	4,231	484,00	0,624	0,562	0,266	-2,262	1,464	0,700	-5,953	3,852
377	6,5	-8,5	0,903	-7,679	5,872	515,88	0,576	0,519	0,359	-3,049	2,332	0,709	-6,023	4,606
378	7,5	-8,5	1,024	-8,706	7,682	559,63	0,511	0,460	0,410	-3,485	3,075	0,676	-5,743	5,068
379	8,5	-8,5	1,132	-9,621	9,621	627,50	0,409	0,368	0,396	-3,364	3,364	0,574	-4,875	4,875
380	9,5	-8,5	1,226	-10,424	11,650	719,50	0,271	0,244	0,303	-2,573	2,875	0,398	-3,381	3,778
381	-9,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	773,50	0,190	0,171	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
382	-8,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	719,50	0,271	0,244	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
383	-7,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	678,88	0,332	0,299	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
384	-6,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	651,63	0,373	0,335	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
385	-5,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	631,50	0,403	0,362	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

EFI	xi [cm]	yi [cm]	Ni [kN]	Mxi [kN.m]	Myi [kN.m]	θ [°C]	kc	kc,pos	Ni, θ [kN]	Mxi, θ [kN.m]	Myi, θ [kN.m]	Ni,pos [kN]	Mxi,pos [kN.m]	Myi,pos [kN.m]
386	-4,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	618,50	0,422	0,380	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
387	-3,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	609,06	0,436	0,393	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
388	-2,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	603,19	0,445	0,401	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
389	-1,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	599,50	0,451	0,406	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
390	-0,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	598,00	0,453	0,408	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
391	0,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	598,00	0,453	0,408	0,000	0,000	0,000	0,084	-0,799	0,042
392	1,5	-9,5	0,000	0,000	0,000	599,50	0,451	0,406	0,000	0,000	0,000	0,170	-1,612	0,255
393	2,5	-9,5	0,100	-0,955	0,251	603,19	0,445	0,401	0,000	0,000	0,000	0,246	-2,341	0,616
394	3,5	-9,5	0,288	-2,731	1,006	609,06	0,436	0,393	0,000	0,000	0,000	0,313	-2,971	1,094
395	4,5	-9,5	0,461	-4,383	2,076	618,50	0,422	0,380	0,000	0,000	0,000	0,366	-3,473	1,645
396	5,5	-9,5	0,622	-5,908	3,420	631,50	0,403	0,362	0,087	-0,823	0,477	0,403	-3,830	2,217
397	6,5	-9,5	0,769	-7,308	5,000	651,63	0,373	0,335	0,159	-1,510	1,033	0,418	-3,972	2,718
398	7,5	-9,5	0,903	-8,582	6,775	678,88	0,332	0,299	0,206	-1,962	1,549	0,408	-3,875	3,059
399	8,5	-9,5	1,024	-9,730	8,706	719,50	0,271	0,244	0,217	-2,066	1,848	0,358	-3,404	3,046
400	9,5	-9,5	1,132	-10,753	10,753	773,50	0,190	0,171	0,184	-1,745	1,745	0,266	-2,529	2,529
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
SOMA	367,91	894,34	894,34	270,01	743,92	743,92	354,27	538,50	538,50

TABELA 4.2 – Valores calculados manualmente para as barras de armadura “j” da seção retangular do Exemplo 1

j	xj [cm]	yj [cm]	Nj [kN]	Mxj [kN.m]	Myj [kN.m]	θ [°C]	ks	ksE	Ni, θ [kN]	Mxj, θ [kN.m]	Myj, θ [kN.m]	Nj,pos [kN]	Mxj,pos [kN.m]	Myj,pos [kN.m]
1	-6,5	-6,5	-10,40	67,57	67,57	353,13	1,000	0,747	-8,93	58,04	58,04	-5,85	38,03	38,03
2	-6,5	6,5	14,22	92,43	-92,43	353,13	0,722	0,747	8,81	57,29	-57,29	18,77	121,97	-121,97
3	6,5	-6,5	14,22	-92,43	92,43	353,13	0,722	0,747	8,81	-57,29	57,29	18,77	-121,97	121,97
4	6,5	6,5	34,15	221,96	221,96	353,13	0,722	0,747	21,16	137,56	137,56	34,15	221,96	221,96
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
SOMA	52,19	289,53	289,53	29,86	195,60	195,60	65,83	259,99	259,99

Somando-se as parcelas para os EFi de concreto e para as barras j de armadura, obtém-se o valor final dos esforços resistentes, N_{Rd} , $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ para a temperatura ambiente, para o TRRF de 30 minutos e para uma situação após um incêndio de 30 minutos. O resultado é exibido pela TAB. 4.3.

TABELA 4.3 – Resultados do cálculo manual dos esforços resistentes da seção retangular do Exemplo 1

$N_i + N_j = N_{Rd}$ [kN]	$M_{xi} + M_{xj} = M_{x,Rd}$ [kN.m]	$M_{yi} + M_{yj} = M_{y,Rd}$ [kN.m]	N_{Rd} [kN]	$M_{x,Rd}$ [kN.m]	$M_{y,Rd}$ [kN.m]
367,91 + 52,19	894,34 + 289,53	894,34 + 289,53	420,11	1183,87	1183,87
$N_{i,30} + N_{j,30} = N_{Rd,30}$ [kN]	$M_{xi,30} + M_{xj,30} = M_{x,Rd,30}$ [kN.m]	$M_{yi,30} + M_{yj,30} = M_{y,Rd,30}$ [kN.m]	$N_{Rd,30}$ [kN]	$M_{x,Rd,30}$ [kN.m]	$M_{y,Rd,30}$ [kN.m]
270,01 + 29,86	743,92 + 195,60	743,92 + 195,60	299,87	939,52	939,52
$N_{i,pos30} + N_{j,pos30} = N_{Rd,pos30}$ [kN]	$M_{xi,pos30} + M_{xj,pos30} =$ $M_{x,Rd,pos30}$ [kN.m]	$M_{yi,pos30} + M_{yj,pos30} =$ $M_{y,Rd,pos30}$ [kN.m]	$N_{Rd,pos30}$ [kN]	$M_{x,Rd,pos30}$ [kN.m]	$M_{y,Rd,pos30}$ [kN.m]
354,27 + 65,83	538,50 + 259,99	538,50 + 259,99	420,10	798,49	798,49

A TAB. 4.4 exibe os resultados de $N_{,Rd}$, $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ para as mesmas condições do cálculo manual, porém, automaticamente pelo software proposto pelo presente trabalho. Os resultados podem ser retirados da aba da planilha eletrônica “DadosFinais”. Vale ainda ressaltar que os valores de x_o , da posição da linha neutra, determinados pelo cálculo automatizado são, em alguns casos, ligeiramente diferentes para um mesmo ângulo fixado α . Isto ocorre porque no cálculo automatizado a precisão numérica dos dados é consideravelmente maior. Portanto, para o ângulo do exemplo $\alpha=45^\circ$, x_o vale, com arredondamento para duas casas decimais, $x_o = -7,51$ cm, $x_o = -4,89$ cm e $x_o = -10,42$ cm para a temperatura ambiente, TRRF 30 minutos e pós-incêndio de 30 minutos, respectivamente.

TABELA 4.4 – Resultados do cálculo automatizado dos esforços resistentes da seção retangular do Exemplo 1 – aba “DadosFinais”

$N_i + N_j = N_{,Rd}$ [kN]	$M_{xi} + M_{xj} = M_{x,Rd}$ [kN.m]	$M_{yi} + M_{yj} = M_{y,Rd}$ [kN.m]	$N_{,Rd}$ [kN]	$M_{x,Rd}$ [kN.m]	$M_{y,Rd}$ [kN.m]
367,99 + 52,21	894,23 + 289,47	894,23 + 289,47	420,20	1183,70	1183,70
$N_{i,30} + N_{j,30} = N_{,Rd,30}$ [kN]	$M_{xi,30} + M_{xj,30} = M_{x,Rd,30}$ [kN.m]	$M_{yi,30} + M_{yj,30} = M_{y,Rd,30}$ [kN.m]	$N_{,Rd,30}$ [kN]	$M_{x,Rd,30}$ [kN.m]	$M_{y,Rd,30}$ [kN.m]
280,76 + 19,26	755,80 + 232,71	755,80 + 232,71	300,02	988,51	988,51
$N_{i,pos30} + N_{j,pos30} = N_{,Rd,pos30}$ [kN]	$M_{xi,pos30} + M_{xj,pos30} = M_{x,Rd,pos30}$ [kN.m]	$M_{yi,pos30} + M_{yj,pos30} = M_{y,Rd,pos30}$ [kN.m]	$N_{,Rd,pos30}$ [kN]	$M_{x,Rd,pos30}$ [kN.m]	$M_{y,Rd,pos30}$ [kN.m]
354,78 + 65,30	553,89 + 250,57	553,89 + 250,57	420,09	804,46	804,46

Conclui-se, portanto, que comparando os resultados obtidos pelo cálculo manual e pelo cálculo automatizado proposto pelo presente trabalho, pode-se validar totalmente o programa computacional desenvolvido, já que os resultados obtidos são extremamente satisfatórios. A diferença percentual entre os resultados das TAB. 4.3 e TAB. 4.4 são:

- Temperatura Ambiente: 0,02% para $N_{,Rd}$, 0,01% para $M_{x,Rd}$ e 0,01% para $M_{y,Rd}$.
- TRRF 30: 0,05% para $N_{,Rd}$, 5,21% para $M_{x,Rd}$ e 5,21% para $M_{y,Rd}$.
- Pós-incêndio 30: 0,00% para $N_{,Rd}$, 0,75% para $M_{x,Rd}$ e 0,75% para $M_{y,Rd}$.

Apenas como comparativo, as TAB. 4.5, TAB. 4.6 e TAB. 4.7 exibem, para valores de α de 10 em 10 graus, para os primeiro e segundo quadrantes da seção retangular, os resultados da posição x_o da linha neutra, dos esforços resistentes de cálculo e a diferença

percentual entre eles quando calculados manualmente ou pelo modo automatizado como proposto por este trabalho. Os demais ângulos foram omitidos, dada a simetria da seção retangular deste exemplo e porque o cálculo manual é extremamente dispendioso. Assim sendo, como os resultados para os ângulos exibidos já foram extremamente satisfatórios e os diagramas gerados tem as curvas esperadas, extrapola-se então os resultados obtidos para os demais ângulos em todos os quadrantes da seção transversal.

TABELA 4.5 – Comparativo entre os resultados do cálculo manual e do automatizado para as forças normais N_{Rd} da seção retangular do Exemplo 1

α	CÁLCULO MANUAL						CÁLCULO AUTOMATIZADO						Dif. (%)	Dif. (%)	Dif. (%)
	xo	xo30	xopos30	NRd	NRd30	NRdpos30	xo	xo30	xopos30	NRd	NRd30	NRdpos30			
1	-4,74	-2,66	-6,64	420,24	300,13	400,16	-4,74	-2,77	-6,64	420,24	300,25	420,19	0,00	-0,04	-5,00
11	-5,09	-3,08	-7,02	420,25	302,85	421,99	-5,09	-3,08	-7,02	420,25	300,05	420,35	0,00	0,92	0,39
21	-5,60	-3,47	-7,66	420,26	300,13	429,43	-5,60	-3,47	-7,66	420,26	299,98	420,31	0,00	0,05	2,12
31	-6,17	-3,94	-8,54	419,80	298,62	431,89	-6,17	-3,94	-8,54	419,80	299,75	420,37	0,00	-0,38	2,67
41	-7,05	-4,57	-9,77	420,30	298,55	432,51	-7,05	-4,57	-9,77	420,30	300,13	420,24	0,00	-0,53	2,84
51	-8,44	-5,46	-11,67	420,10	298,29	431,92	-8,44	-5,46	-11,67	420,10	299,81	419,79	0,00	-0,51	2,81
61	-10,92	-6,94	-15,00	420,26	298,96	430,19	-10,92	-6,94	-15,00	420,26	299,96	420,03	0,00	-0,34	2,36
71	-15,97	-9,83	-21,78	420,36	300,59	428,64	-15,97	-9,83	-21,78	420,36	299,93	419,75	0,00	0,22	2,07
81	-31,51	-18,95	-43,51	420,08	303,11	418,02	-31,51	-18,95	-43,51	420,08	299,95	419,66	0,00	1,04	-0,39
91	271,00	152,00	496,00	419,89	299,89	420,25	-31,51	-18,95	379,51	420,08	299,95	419,75	-0,04	-0,02	0,12
101	26,15	15,84	36,09	419,92	302,87	422,03	26,15	15,84	36,09	419,92	300,08	420,33	0,00	0,92	0,40
111	14,56	9,03	19,91	419,94	300,12	428,78	14,56	9,03	19,91	419,94	299,95	419,75	0,00	0,06	2,11
121	10,30	6,58	14,15	420,41	298,84	430,63	10,30	6,58	14,15	420,41	299,99	419,81	0,00	-0,39	2,51
131	8,10	5,27	11,24	420,18	298,63	432,72	8,10	5,27	11,24	420,18	300,21	420,08	0,00	-0,53	2,92
141	6,82	4,43	9,44	419,74	298,48	430,99	6,82	4,43	9,44	419,74	299,99	419,63	0,00	-0,51	2,63
151	6,05	3,85	8,30	420,19	299,05	429,81	6,05	3,85	8,30	420,19	300,06	419,72	0,00	-0,34	2,35
161	5,48	3,39	7,52	419,69	300,83	428,45	5,48	3,39	7,52	419,69	300,17	420,19	0,00	0,22	1,93
171	4,99	3,00	6,89	420,12	303,08	417,98	4,99	3,00	6,89	420,12	299,91	419,64	0,00	1,05	-0,40

TABELA 4.6 – Comparativo entre os resultados do cálculo manual e do automatizado para os momentos fletores $M_{x,Rd}$ da seção retangular do Exemplo 1

α	CÁLCULO MANUAL						CÁLCULO AUTOMATIZADO						Dif. (%)	Dif. (%)	Dif. (%)
	xo	xo30	xopos30	MxRd	MxRd30	MxRdpos30	xo	xo30	xopos30	MxRd	MxRd30	MxRdpos30			
1	-4,74	-2,66	-6,64	23,84	20,82	19,20	-4,74	-2,77	-6,64	23,84	21,28	18,58	0,00	-2,19	3,25
11	-5,09	-3,08	-7,02	263,42	221,84	140,71	-5,09	-3,08	-7,02	263,42	238,87	194,31	0,00	-7,68	-38,10
21	-5,60	-3,47	-7,66	529,04	430,11	337,72	-5,60	-3,47	-7,66	529,04	460,69	393,24	0,00	-7,11	-16,44
31	-6,17	-3,94	-8,54	808,01	643,23	528,68	-6,17	-3,94	-8,54	808,01	681,44	571,78	0,00	-5,94	-8,15
41	-7,05	-4,57	-9,77	1080,04	856,72	703,10	-7,05	-4,57	-9,77	1080,04	902,57	741,61	0,00	-5,35	-5,48
51	-8,44	-5,46	-11,67	1332,55	1055,50	856,22	-8,44	-5,46	-11,67	1332,55	1110,48	895,43	0,00	-5,21	-4,58
61	-10,92	-6,94	-15,00	1555,10	1224,47	983,98	-10,92	-6,94	-15,00	1555,10	1289,07	1034,47	0,00	-5,28	-5,13
71	-15,97	-9,83	-21,78	1734,88	1354,29	1110,78	-15,97	-9,83	-21,78	1734,88	1431,91	1163,35	0,00	-5,73	-4,73
81	-31,51	-18,95	-43,51	1873,15	1455,17	1139,63	-31,51	-18,95	-43,51	1873,15	1547,21	1273,86	0,00	-6,33	-11,78
91	271,00	152,00	496,00	1923,36	1500,85	327,09	-31,51	-18,95	379,51	1873,15	1547,21	1301,14	2,61	-3,09	-297,80
101	26,15	15,84	36,09	1848,36	1436,15	1146,75	26,15	15,84	36,09	1848,36	1525,67	1254,74	0,00	-6,23	-9,42
111	14,56	9,03	19,91	1704,19	1331,54	1085,01	14,56	9,03	19,91	1704,19	1405,58	1138,67	0,00	-5,56	-4,95
121	10,30	6,58	14,15	1513,04	1193,62	963,48	10,30	6,58	14,15	1513,04	1256,37	1008,25	0,00	-5,26	-4,65
131	8,10	5,27	11,24	1283,97	1017,72	824,67	8,10	5,27	11,24	1283,97	1070,53	861,47	0,00	-5,19	-4,46
141	6,82	4,43	9,44	1027,48	815,27	666,15	6,82	4,43	9,44	1027,48	859,20	710,79	0,00	-5,39	-6,70
151	6,05	3,85	8,30	751,66	599,99	491,47	6,05	3,85	8,30	751,66	636,98	540,98	0,00	-6,16	-10,07
161	5,48	3,39	7,52	475,43	388,68	292,10	5,48	3,39	7,52	475,43	416,27	354,80	0,00	-7,10	-21,46
171	4,99	3,00	6,89	210,41	178,67	103,27	4,99	3,00	6,89	210,41	194,13	156,47	0,00	-8,65	-51,51

TABELA 4.7 – Comparativo entre os resultados do cálculo manual e do automatizado para os momentos fletores $M_{y,Rd}$ da seção retangular do Exemplo 1

α	CÁLCULO MANUAL						CÁLCULO AUTOMATIZADO						Dif. (%)	Dif. (%)	Dif. (%)
	xo	xo30	xopos30	MyRd	MyRd30	MyRdpos30	Xo	xo30	xopos30	MyRd	MyRd30	MyRdpos30			
1	-4,74	-2,66	-6,64	1922,15	1500,28	1004,12	-4,74	-2,77	-6,64	1922,15	1611,47	1299,16	0,00	-7,41	-29,38
11	-5,09	-3,08	-7,02	1847,40	1435,72	1146,82	-5,09	-3,08	-7,02	1847,40	1525,72	1254,68	0,00	-6,27	-9,41
21	-5,60	-3,47	-7,66	1703,30	1331,21	1082,67	-5,60	-3,47	-7,66	1703,30	1405,55	1136,56	0,00	-5,58	-4,98
31	-6,17	-3,94	-8,54	1514,59	1194,19	960,14	-6,17	-3,94	-8,54	1514,59	1256,69	1002,55	0,00	-5,23	-4,42
41	-7,05	-4,57	-9,77	1283,75	1017,63	825,13	-7,05	-4,57	-9,77	1283,75	1070,62	864,73	0,00	-5,21	-4,80
51	-8,44	-5,46	-11,67	1027,03	815,04	671,93	-8,44	-5,46	-11,67	1027,03	859,35	710,47	0,00	-5,44	-5,74
61	-10,92	-6,94	-15,00	751,61	599,95	490,93	-10,92	-6,94	-15,00	751,61	637,03	540,54	0,00	-6,18	-10,10
71	-15,97	-9,83	-21,78	475,14	388,37	298,76	-15,97	-9,83	-21,78	475,14	416,35	355,15	0,00	-7,20	-18,88
81	-31,51	-18,95	-43,51	210,43	178,68	103,27	-31,51	-18,95	-43,51	210,43	194,12	156,47	0,00	-8,64	-51,51
91	271,00	152,00	496,00	-23,89	-20,84	-17,50	-31,51	-18,95	379,51	210,43	194,12	-18,57	980,91	1031,48	-6,14
101	26,15	15,84	36,09	-263,50	-221,92	-140,73	26,15	15,84	36,09	-263,50	-238,86	-194,31	0,00	-7,64	-38,07
111	14,56	9,03	19,91	-529,18	-430,26	-338,35	14,56	9,03	19,91	-529,18	-460,70	-393,75	0,00	-7,08	-16,38
121	10,30	6,58	14,15	-807,56	-642,92	-530,42	10,30	6,58	14,15	-807,56	-681,29	-575,99	0,00	-5,97	-8,59
131	8,10	5,27	11,24	-1080,22	-856,80	-702,71	8,10	5,27	11,24	-1080,22	-902,50	-738,43	0,00	-5,33	-5,08
141	6,82	4,43	9,44	-1333,29	-1055,78	-849,75	6,82	4,43	9,44	-1333,29	-1110,27	-895,86	0,00	-5,16	-5,43
151	-4,74	-2,66	-6,64	1922,15	1500,28	1004,12	-4,74	-2,77	-6,64	1922,15	1611,47	1299,16	0,00	-7,41	-29,38
161	-5,09	-3,08	-7,02	1847,40	1435,72	1146,82	-5,09	-3,08	-7,02	1847,40	1525,72	1254,68	0,00	-6,27	-9,41
171	-5,60	-3,47	-7,66	1703,30	1331,21	1082,67	-5,60	-3,47	-7,66	1703,30	1405,55	1136,56	0,00	-5,58	-4,98

A TAB. 4.5 traz as forças normais resistentes de cálculo, N_{Rd} , no qual as diferenças percentuais máximas encontradas entre os métodos de cálculo foram de 5,00% para o ângulo $\alpha=1,0^\circ$ e de 2,92% para o ângulo $\alpha=131,0^\circ$ e ambas ocorreram na situação de pós-incêndio. Para a temperatura ambiente, as diferenças percentuais encontram-se muito próximas a 0%, bem como para a situação de incêndio em questão. Um fato relevante é que na situação de pós-incêndio o cálculo é baseado em coeficientes redutores da resistência mecânica e que já dependem de outros coeficientes redutores para a situação de incêndio. Assim sendo, é aceitável que as maiores discrepâncias sejam realmente encontradas para a situação de pós-incêndio, devido a propagação de diferenças já no cálculo para a temperatura ambiente e depois para a situação de incêndio antes que se determine para a situação após o incêndio. Além do mais, deve-se ponderar o fato de a maior diferença percentual encontrada ter sido justamente no ângulo $\alpha=1,0^\circ$. O ângulo é muito próximo a 0° onde o $\sin(\alpha)=0$, o que distorce o cálculo manual já que não há tratamento específico e nem truncamento para esse caso. O mesmo fato ocorre próximo aos ângulos 90° , 180° , 270° e 360° , pois em todos eles ou $\sin(\alpha)=0$, ou $\cos(\alpha)=0$, o que também distorce o cálculo manual nesses pontos e altera significativamente os resultados em ângulos próximos a eles. É por esta razão que nas TAB 4.5 a 4.7 as linhas dos ângulos $\alpha=1^\circ$ e $\alpha=91^\circ$ estão cortadas, não tomando, portanto, como significativos os seus resultados.

As TAB. 4.6 e 4.7 trazem os momentos fletores resistentes de cálculo, $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$, que já dependem do cálculo de N_{Rd} para serem determinados e portanto, já assumem implicitamente as diferenças percentuais encontradas para N_{Rd} . Mesmo assim as diferenças percentuais quando do cálculo em temperatura ambiente são bem próximas a 0% em todos os ângulos estudados, chegando ao máximo de 2,62% para $M_{x,Rd}$ quando $\alpha=91^\circ$. Descartando da análise os ângulos $\alpha=1^\circ$ e $\alpha=91^\circ$, pois o cálculo manual em ambos é bastante distorcido pela falta de truncamento, observamos que para a situação de incêndio, onde TRRF é igual a 30 minutos, encontra-se uma diferença percentual máxima de 8,65% para $M_{x,Rd}$ quando $\alpha=171^\circ$ e de 8,64% para $M_{y,Rd}$ quando $\alpha=81^\circ$. Ressalta-se novamente o fato de esses ângulos serem relativamente próximos aos ângulos onde são bastante distorcidos os resultados pelo cálculo manual ($\alpha=90^\circ$ e

$\alpha=180^\circ$) e que mesmo assim os resultados são satisfatórios. Em contrapartida, para os ângulos mais distantes desses o resultado é ainda mais satisfatório e a diferença percentual fica em torno de 5%. Para a situação de pós-incêndio percebe-se mais acentuadamente ainda que as diferenças percentuais aumentam muito quanto mais o ângulo α em questão se aproxima, por cima ou por baixo, dos ângulos 0° , 90° ou 180° . O mesmo também aconteceria, por simetria, com os ângulos nas proximidades de 270° e 360° . Então, atendo-se principalmente aos ângulos mais distantes desses ângulos de cálculo manual distorcido, nota-se que mesmo com possíveis diferenças já propagadas do cálculo de N_{Rd} , de $M_{x,Rd}$ e de $M_{y,Rd}$, para a temperatura ambiente e depois para a situação de incêndio, a diferença percentual entre o cálculo automatizado e o manual para a situação de pós-incêndio fica próxima dos 5%, o que é extremamente plausível.

Como a formulação foi implementada de maneira automatizada na planilha, pode-se extrapolá-la de um TRRF de 30 minutos para os demais tempos requeridos de resistência ao fogo. Valida-se então, uma vez mais, os resultados obtidos pelo presente trabalho.

4.2.3 – Flexão oblíqua composta em situação de pós-incêndio

Na aba “Detalhamento” deve-se escolher a temperatura máxima atingida pelo incêndio estudado de acordo com o TRRF que equivalha àquela temperatura, conforme a FIG.4.11 onde é mostrado a escolha da situação após um incêndio de 30 minutos em que a temperatura máxima atingida pelo fogo foi de cerca de $841,8^\circ\text{C}$.



FIGURA 4.11 – Aba “Detalhamento”. Escolha da situação de pós-incêndio

Ao acionar o botão “GERAR GRÁFICOS” na mesma aba da planilha, com a opção da situação de pós-incêndio pré-selecionada, cria-se a curva de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) de cálculo resistida pela peça nas condições escolhidas. O gráfico gerado nessa etapa encontra-se na aba “GraficoPosIncendio”. Para uma temperatura máxima de incêndio

próxima a 841,8°C, equivalente a 30 minutos de exposição a um incêndio padrão nas quatro faces da peça, o diagrama para a seção detalhada neste exemplo encontra-se na FIG.4.12.

Observando o diagrama gerado exibido pela FIG. 4.12 conclui-se que a seção de concreto armado (20x20) cm², com a armadura proposta (4φ10mm), e submetida aos esforços solicitantes novamente em temperatura ambiente $N_{s,d}=420\text{kN}$ e $M_{x,s,d}=M_{y,s,d}=1100\text{kN.cm}$ não tem capacidade portante remanescente suficiente para suportar os mesmos esforços solicitantes que suportava anteriormente ao incêndio de 30 minutos. Dessa maneira, para essa peça hipotética deveria ser projetado um reforço estrutural a fim de que essa pudesse voltar a ter capacidade suficiente para suportar os esforços solicitantes. Ressalta-se que o diagrama foi concebido para uma N_{Rd} muito próxima à $N_{s,d}=420\text{kN}$. A conclusão é feita de maneira análoga à realizada em situação de incêndio. Analisando o par de momentos fletores solicitantes $M_{x,s,d}=M_{y,s,d}=1100\text{kN.cm}$, verifica-se que esse encontra-se externo ao anel exibido em amarelo e que representa a resistência da peça após o incêndio de 30 minutos.

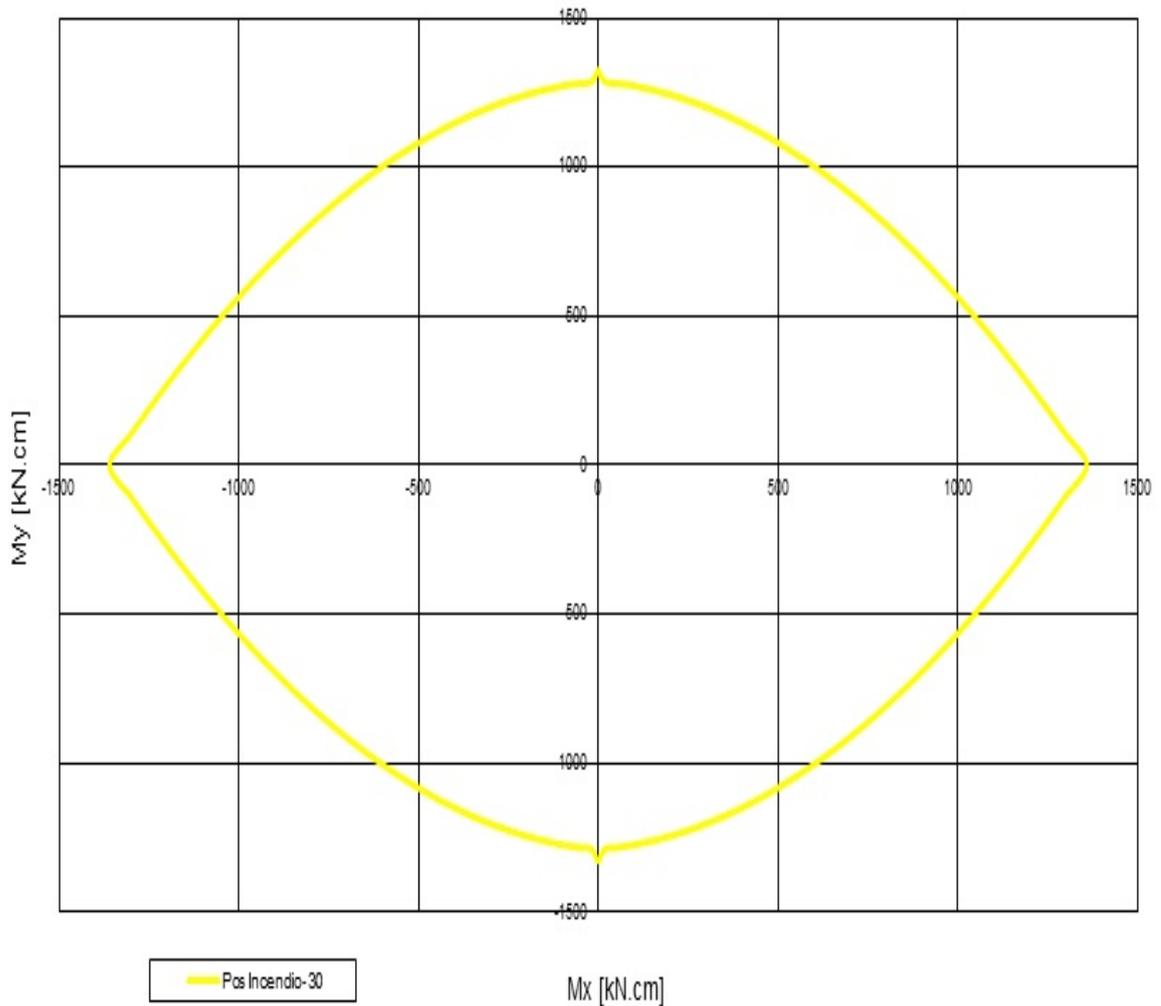


FIGURA 4.12 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado para uma situação após um incêndio de 30 minutos para uma seção de concreto armado $20 \times 20 \text{ cm}^2$ armada com $4 \phi 10 \text{ mm}$

4.2.4 – Flexão oblíqua composta em situação de incêndio com uso de agregado calcáreo

Neste item, será analisada a influência do agregado utilizado na produção do concreto no diagrama de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) de cálculo para os TRRF de 30 e 60 minutos. Para tanto, será utilizada a mesma seção transversal do exemplo, submetida aos mesmos esforços solicitantes e cujo detalhamento encontra-se na FIG. 4.4.

A FIG. 4.13 apresenta o diagrama de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para seção em questão com a utilização de agregado não mais silicoso e sim calcáreo. O anel mais externo (azul ciano) é equivalente à temperatura ambiente, o intermediário (amarelo) ao TRRF

de 30 minutos e o mais interno (verde) corresponde à resistência da seção retangular do exemplo para um TRRF de 60 minutos.

Observa-se que a peça produzida com agregado calcáreo resiste à esforços maiores em situação de incêndio se comparado à peça produzida com agregado silicoso, cujo diagrama resistente é exibido pela FIG. 4.10. Esse comportamento já era esperado pois embora a ABNT NBR 15200:2012 tenha retirado de seu texto a tabela com os coeficientes redutores para os agregados calcáreos, nota-se pelo seu antigo texto, a NBR 15200:2004, no qual essa tabela estava presente, que os coeficientes de redução tem valores nominais maiores para concretos com agregados calcáreos do que para concretos com agregados silicosos. Isto resulta, portanto, em menores reduções da resistência em temperaturas elevadas para os concretos com agregados calcáreos.

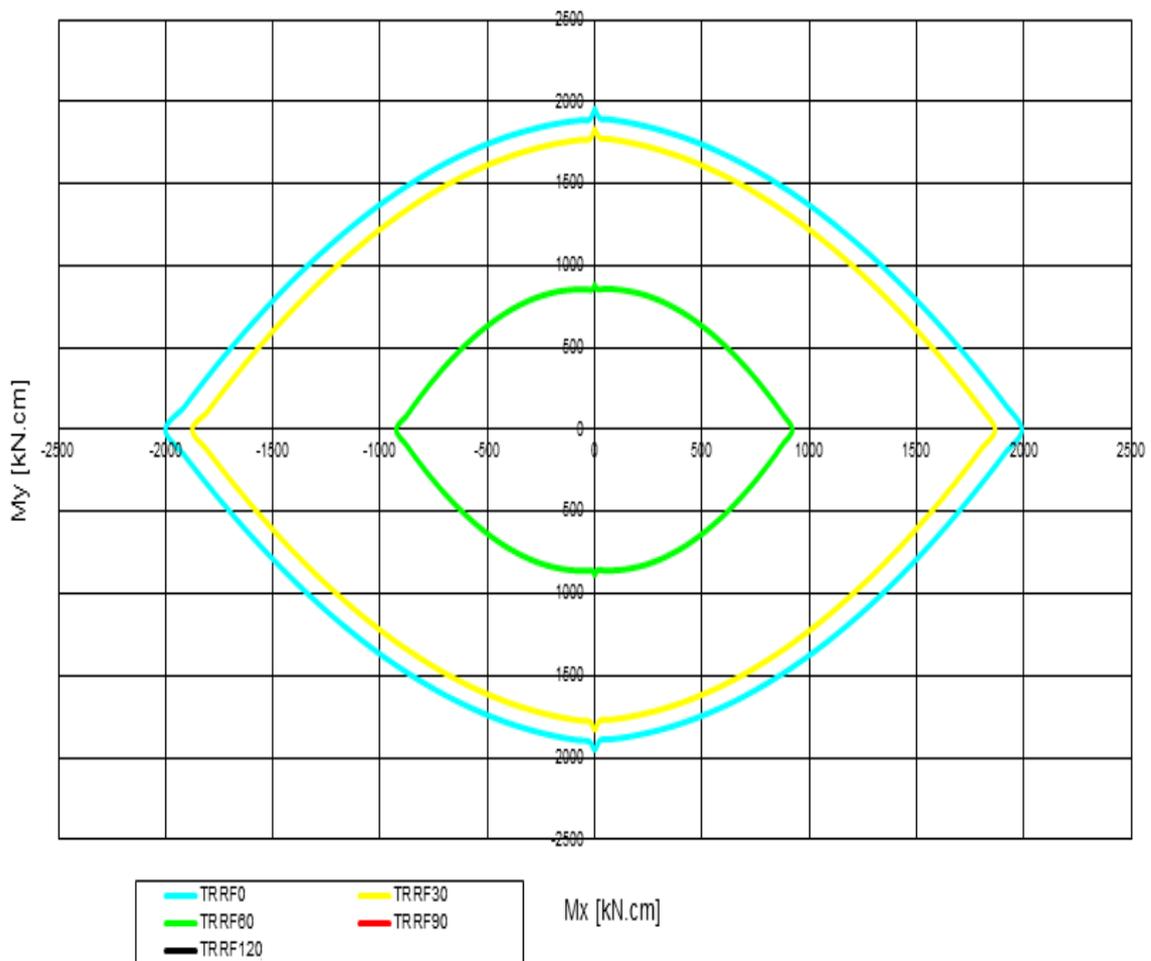


FIGURA 4.13 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente e para o TRRF de 30 minutos para uma seção de concreto armado $20 \times 20 \text{ cm}^2$ armada com $4 \phi 10 \text{ mm}$ e utilização de agregado calcáreo

4.3 – Exemplo 2

Neste segundo exemplo será verificada uma seção retangular de concreto armado de $40 \times 80 \text{ cm}^2$, produzida com f_{ck} de 30 MPa e com agregado predominantemente silicoso, submetida ainda aos esforços solicitantes de serviço: $N_{s}=400 \text{ kN}$, $M_{x,s}=100,00 \text{ kN.m}$ e $M_{y,s}=90,00 \text{ kN.m}$. O dimensionamento foi realizado para um pilar, com essa seção e com um pé-direito igual a 4,0 m, pelo mesmo aplicativo web desenvolvido pela USP e citado no Exemplo 1. Dessa forma, obteve-se uma armação longitudinal necessária $A_s=5,72 \text{ cm}^2$. Entretanto, criando a necessidade de que essa seção de concreto armado resista a um incêndio de 120 minutos, faremos o seu detalhamento, em aço CA50 utilizando $8 \phi 32 \text{ mm}$, conforme a FIG. 4.14.

The screenshot shows the 'Detalhamento' (Detailing) tab of a software interface. It includes the following elements:

- Input Fields (Left):**
 - $\omega = 0,0363 \rightarrow A_s = 5,7179 \text{ cm}^2$
 - $d'_x = 4,9 \text{ cm}$, $d'_{x,ef} = 4,9 \text{ cm}$
 - $d'_y = 4,9 \text{ cm}$, $d'_{y,ef} = 4,9 \text{ cm}$
 - $A_{s, corrigido} = 5,7179 \text{ cm}^2$
 - $10 \text{ mm} \leq s_1 \leq 32 \text{ mm}$
 - $s_1 = 32 \text{ mm}$ (dropdown)
 - $n_{total} = 8$
 - $s_t \geq 8 \text{ mm}$
 - $s_t = 8 \text{ mm}$ (dropdown)
- Dimensioning (Top Center):**
 - $n_x = 1$, $S_{kx} = 15,1 \text{ cm}$
 - Diagram of a rectangular section with 8 reinforcement bars.
 - $n_y = 1$, $S_{ly} = 35,1 \text{ cm}$
 - Disposição automática
- Constraints (Top Right):**
 - $12,8 \text{ cm} \leq S_1 \leq 40 \text{ cm}$
 - $S_1 \leq 20 \text{ cm}$
 - $12,8 \text{ cm}^2 \leq A_s \leq 256 \text{ cm}^2$
 - $A_{s(real)} = 64 \text{ cm}^2$
 - $A_{s(emendas)} = 128 \text{ cm}^2$
- Buttons:** 'Atualizar' (Update)
- Travamentos (Stirrups):**
 - Diagram of a section with stirrups.
 - Buttons: 'Criar Novo', 'Remover', 'Estribo 1' (dropdown), 'Mudar Valores'.
 - Input fields: 3, 2, 0, 1.
- Barra com 2 ganchos (Bar with 2 hooks):**
 - Buttons: 'Criar Novo', 'Remover', 'Barra 1' (dropdown), 'Mudar Valores'.
 - Input fields: 7, 5.
 - Diagram of a bar with two hooks.
 - Checkbox: 'Envolve Estribo'.

FIGURA 4.14 – Detalhamento da seção $(40 \times 80) \text{ cm}^2$

(<http://www.lmc.ep.usp.br/pesquisas/TecEdu/pilares/Applet/Dimensionamento.htm>)

As FIG. 4.15 e 4.16 ilustram a entrada de dados do programa proposto.

	A	B	C	D
1	DADOS DO CONCRETO			
2	f_{ck}	30,000 MPa		
3	Tipo de Agregado	Silicoso		
4	DADOS GEOMÉTRICOS DA SEÇÃO			
5	Seção (b x h) [cm ²]	40 x 80		
7	Força Normal de Serviço (N_s)	400,000 kN		
10	Tolerância (absoluto)	0,00010		
11	$\Delta\alpha$	2,000 °		
12	Δx_o	20,000 cm		
22	NOVA MALHA			
23				
24				
25				
26				
27				

← → ↶ ↷ **DadosIniciais** ↳ Detalhamento ↳ Matriz-Auxiliar-Alan
 Pronto ↳ Calcula

FIGURA 4.15 – Aba “DadosIniciais”

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
11	DADOS DA ARMADURA								
12	ϕ	32,0 mm							
13	Quantidade de Barras	8							
14	Tipo de Aço	CA50							
16	Barras de Armadura (limite: 16 barras)		Coordenadas		Barras de Armadura (limite: 16 barras)		Coordenadas		
17		x [cm]	y [cm]		x [cm]	y [cm]			
18	1	-16	-36	9	0	0			
19	2	-16	0	10	0	0			
20	3	-16	36	11	0	0			
21	4	0	-36	12	0	0			
22	5	0	36	13	0	0			
23	6	16	-36	14	0	0			
24	7	16	0	15	0	0			
25	8	16	36	16	0	0			
27	SIMETRIA DA ARMADURA								
28	Duplamente Simétrica?	Sim		Valor	1				
30	Escolher Pós-incêndio a ser calculado								
31	Pós-incêndio a	TRRF120 - 1049,0°C							
32	Calcular								
34	CALCULAR								
37	GERAR GRÁFICOS								

← → ↶ ↷ **DadosIniciais** ↳ **Detalhamento** ↳ DadosFinais ↳ GraficoTRRF_Espelho ↳ GraficoTRRF0_Espelho ↳ GraficoPosIncendio_Espelho ↳ Grafico
 Pronto ↳ Calcula

FIGURA 4.16 – Aba “Detalhamento”

Assim sendo, obteve-se os diagramas de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) resistentes de cálculo para a temperatura ambiente e para todos os quatro possíveis TRRF

preconizados pela NBR 14432:2001. Portanto, o programa conseguiu, mesmo com as reduções de resistência mecânica provocadas pelo efeito do incêndio, determinar forças normais resistentes de cálculo, N_{Rd} , tão próximas às forças normais solicitantes de cálculo, N_{Sd} , para cada situação, quando se exigiu pela tolerância informada. Afirma-se então que a seção retangular de concreto armado do exemplo 2 resiste, mesmo ao incêndio mais severo de 120 minutos, à N_{Sd} em situação de incêndio.

Para finalizar, deve-se posicionar o par de momentos fletores solicitantes de cálculo em situação de incêndio, $M_{x,Sd}$ e $M_{y,Sd}$, no plano cartesiano onde os diagramas de momentos fletores resistentes de cálculo ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) foram gerados e concluir para a seção como um todo qual é o TRRF resitido por ela. A FIG. 4.17 exibe os diagramas ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) em temperatura ambiente e em situação de incêndio (para todos os TRRF aos quais a seção resiste, ou seja, 30, 60, 90 e 120 minutos).

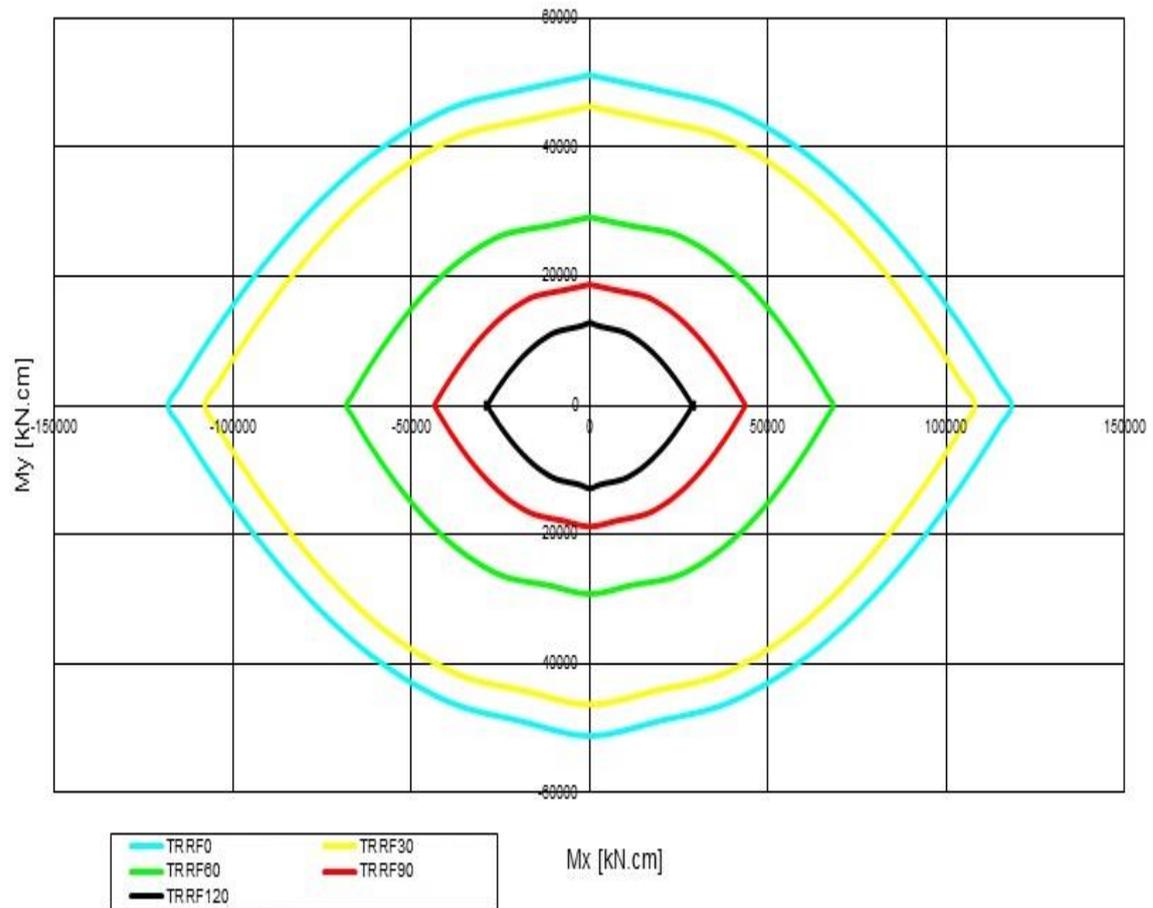


FIGURA 4.17 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente e para os TRRF de 30, 60, 90 e 120 minutos para uma seção de concreto armado 40x80 cm² armada com 8 φ 32mm

Como a seção foi propositalmente superarmada para os esforços solicitantes em questão nota-se que o par de momentos fletores solicitantes de cálculo em situação de incêndio $M_{x,Sd}=10000,00$ kN.cm e $M_{y,Sd}=9000,00$ kN.cm está interno ao anel de cor preta e que representa a resistência da peça a um incêndio de 120 minutos. Conclui-se, logo, que essa seção retangular, armada da maneira sugerida, resiste a um incêndio de 120 minutos.

A FIG. 4.18 exibe o diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para a situação após a ocorrência de um incêndio de 120 minutos com a capacidade portante remanescente da seção em concreto armado.

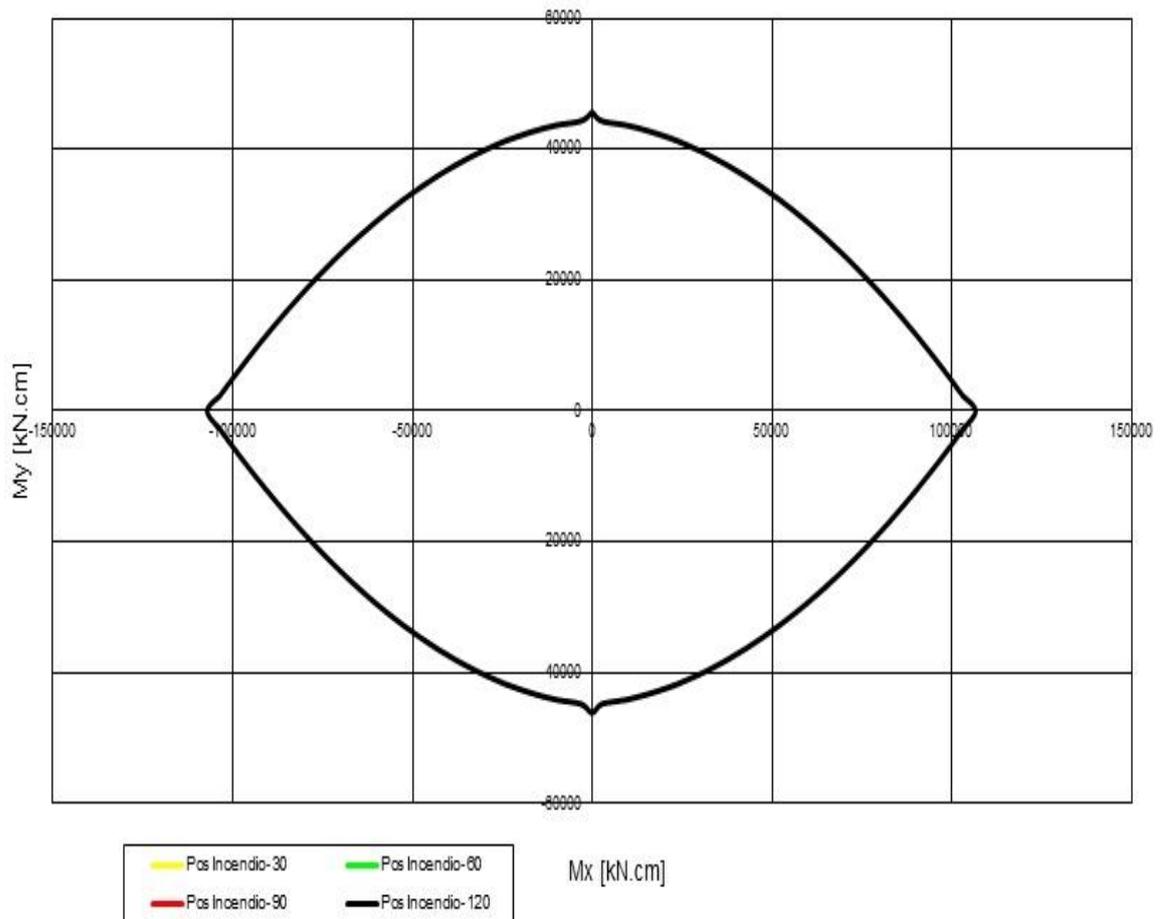


FIGURA 4.18 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado para uma situação após um incêndio de 120 minutos para uma seção de concreto armado 40×80 cm² armada com 8 ϕ 32mm

Nota-se que após a seção sofrer um incêndio de 120 minutos o par de momentos fletores solicitantes de cálculo novamente em temperatura ambiente, ou seja, majorados por

$\gamma_f=1,4$, $M_{x,Sd}=14000,00$ kN.cm e $M_{y,Sd}=12600,00$ kN.cm está interno ao anel de cor preta e que representa a resistência remanescente da peça após o resfriamento. Conclui-se que essa seção retangular, armada da maneira sugerida, poderia ser reutilizada sem a necessidade de um reforço estrutural, desde que não houvesse nenhum dano físico à ela, após ocorrido o incêndio de 120 minutos.

As TAB. 4.8 a 4.13 exibem, por partes, a tabela final gerada pelo programa, a fim de se obter os diagramas já exibidos nas FIG. 4.17 e 4.18, onde se pode visualizar os valores obtidos para o terno de esforços resistentes, N_{Rd} (constante), $M_{X,Rd}$ e $M_{Y,Rd}$ para cada par de valores da posição flutuante da linha neutra (α e X_o), para temperatura ambiente e para cada um dos TRRF considerados, além do pós-incêndio de 120 minutos.

TABELA 4.8 – Tabela de resultados gerada pelo programa para a temperatura ambiente para uma seção retangular (40x80)cm² armada com 8 ϕ 32mm

		Temperatura Ambiente								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
185	-8,00	1333,88	-773,77	560,11	-6797,79	-13563,37	-20361,16	-19973,19	-29834,66	-49807,84
190	-7,22	1332,96	-773,14	559,82	-13515,84	-22384,92	-35900,76	-18914,53	-27554,46	-46468,99
195	-6,93	1305,27	-745,26	560,01	-19309,84	-30153,67	-49463,51	-17236,62	-24892,39	-42129,01
200	-7,32	1263,03	-702,55	560,48	-23627,17	-38110,15	-61737,32	-15463,60	-21618,44	-37082,04
205	-8,01	1246,62	-686,65	559,98	-26561,86	-44511,43	-71073,30	-14059,81	-18891,38	-32951,19
210	-8,99	1246,81	-686,79	560,02	-28922,63	-49973,87	-78896,50	-12835,80	-16495,20	-29331,00
215	-10,28	1258,32	-697,92	560,40	-31043,14	-54844,32	-85887,46	-11656,51	-14303,24	-25959,75
220	-11,93	1278,28	-718,30	559,98	-33085,25	-59345,48	-92430,72	-10426,31	-12226,62	-22652,93
225	-14,47	1278,84	-719,13	559,71	-34544,58	-61954,63	-96499,21	-9119,02	-10810,25	-19929,27
230	-17,91	1270,15	-710,18	559,97	-35566,20	-63632,01	-99198,20	-7861,00	-9702,03	-17563,04
235	-22,28	1263,66	-704,05	559,61	-36409,36	-65289,55	-101698,90	-6679,95	-8564,74	-15244,69
240	-27,97	1259,56	-699,17	560,40	-37121,01	-66991,73	-104112,74	-5569,06	-7374,80	-12943,86
245	-35,80	1255,74	-695,77	559,97	-37682,44	-68772,68	-106455,12	-4521,23	-6103,29	-10624,52
250	-47,27	1252,84	-692,55	560,29	-38124,89	-70698,06	-108822,95	-3533,44	-4721,42	-8254,86
255	-66,05	1249,81	-689,43	560,38	-38438,50	-72824,35	-111262,85	-2601,04	-3188,78	-5789,82
260	-101,91	1258,53	-698,11	560,42	-38905,53	-74561,76	-113467,29	-1711,68	-1539,13	-3250,81
265	-209,95	1259,14	-699,35	559,79	-39100,15	-75879,02	-114979,17	-849,42	-349,67	-1199,10

TABELA 4.9 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 30 minutos para uma seção retangular (40x80)cm² armada com 8φ32mm

		TRRF 30								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
185	-8,43	1266,75	-866,57	400,18	-7234,92	-11375,86	-18610,78	-18560,60	-26626,47	-45187,07
190	-7,99	1236,88	-836,98	399,90	-13991,70	-19665,18	-33656,87	-17213,53	-24636,74	-41850,26
195	-7,81	1220,94	-821,10	399,84	-19491,80	-26017,25	-45509,04	-15783,43	-22734,77	-38518,20
200	-8,38	1182,73	-783,00	399,74	-23123,49	-33722,89	-56846,38	-14208,84	-19565,00	-33773,84
205	-9,25	1170,24	-769,93	400,32	-25663,78	-39939,72	-65603,50	-13005,05	-16911,50	-29916,55
210	-10,42	1172,04	-772,40	399,64	-27735,50	-45251,16	-72986,65	-11956,72	-14570,23	-26526,96
215	-11,88	1184,77	-784,59	400,18	-29632,80	-49993,01	-79625,81	-10955,44	-12425,72	-23381,17
220	-13,87	1194,36	-794,47	399,89	-31258,34	-53600,26	-84858,59	-9887,74	-10674,49	-20562,23
225	-16,72	1189,42	-789,52	399,90	-32406,69	-55149,53	-87556,22	-8742,46	-9662,15	-18404,61
230	-20,24	1189,78	-789,80	399,98	-33476,25	-56634,96	-90111,21	-7622,42	-8614,17	-16236,59
235	-24,70	1193,19	-792,87	400,31	-34443,20	-58099,47	-92542,66	-6538,01	-7537,64	-14075,64
240	-30,55	1198,12	-798,30	399,81	-35297,91	-59584,86	-94882,77	-5493,07	-6410,00	-11903,07
245	-38,53	1205,18	-804,92	400,26	-36071,54	-61143,94	-97215,48	-4488,43	-5212,08	-9700,51
250	-50,24	1213,11	-812,75	400,36	-36746,11	-62815,96	-99562,07	-3523,71	-3916,21	-7439,91
255	-69,38	1221,39	-821,57	399,82	-37315,90	-64651,93	-101967,83	-2600,09	-2489,76	-5089,85
260	-106,13	1240,46	-840,47	399,99	-38029,24	-66164,89	-104194,12	-1712,36	-978,23	-2690,59
265	-221,39	1223,95	-823,86	400,10	-37829,57	-67240,51	-105070,08	-842,52	-272,25	-1114,77

TABELA 4.10 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 60 minutos para uma seção retangular (40x80)cm² armada com 8φ32mm

		TRRF 60								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
185	-8,70	995,99	-595,73	400,26	-6261,61	-5638,21	-11899,83	-14226,64	-14329,76	-28556,40
190	-8,64	942,95	-543,10	399,85	-11707,43	-11240,80	-22948,23	-12831,45	-13182,10	-26013,55
195	-8,76	925,18	-524,84	400,34	-15809,79	-15070,97	-30880,76	-11711,83	-12250,85	-23962,68
200	-9,44	906,94	-507,24	399,70	-18412,28	-18877,10	-37289,38	-10677,99	-10762,10	-21440,09
205	-10,47	901,02	-500,75	400,28	-20243,98	-22057,31	-42301,29	-9846,07	-9418,29	-19264,36
210	-11,82	903,51	-503,50	400,00	-21738,63	-24755,67	-46494,30	-9111,32	-8217,20	-17328,52
215	-13,50	912,25	-512,34	399,91	-23086,72	-27154,28	-50241,00	-8407,86	-7102,52	-15510,38
220	-15,90	908,17	-508,02	400,16	-24011,78	-28329,54	-52341,32	-7622,33	-6401,16	-14023,49
225	-18,75	913,43	-513,26	400,17	-24997,97	-29340,80	-54338,77	-6847,25	-5652,35	-12499,60
230	-22,27	923,69	-523,59	400,10	-25994,20	-30215,81	-56210,01	-6055,59	-4936,73	-10992,32
235	-26,73	936,24	-536,25	399,99	-26943,96	-31069,44	-58013,40	-5252,68	-4198,85	-9451,53
240	-32,56	951,03	-550,79	400,23	-27858,57	-31929,81	-59788,38	-4460,30	-3427,64	-7887,95
245	-40,55	966,98	-567,10	399,88	-28711,27	-32820,65	-61531,92	-3675,30	-2609,80	-6285,09
250	-52,24	984,92	-584,57	400,35	-29526,10	-33771,47	-63297,57	-2905,61	-1736,10	-4641,71
255	-71,35	1003,38	-603,76	399,62	-30269,46	-34803,89	-65073,35	-2154,88	-783,91	-2938,79
260	-108,29	1029,33	-629,65	399,68	-31104,21	-35603,44	-66707,65	-1424,52	193,82	-1230,70
265	-225,14	1017,09	-616,80	400,29	-30979,10	-36059,65	-67038,75	-707,36	405,86	-301,50

TABELA 4.11 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 90 minutos para uma seção retangular (40x80)cm² armada com 8φ32mm

		TRRF 90								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
185	-8,84	815,43	-415,52	399,91	-5395,35	-2033,88	-7429,22	-11445,05	-6851,64	-18296,69
190	-9,07	750,80	-350,71	400,09	-9821,26	-5763,58	-15584,84	-10072,51	-6260,51	-16333,02
195	-9,59	716,12	-316,33	399,79	-12820,94	-8266,64	-21087,58	-8992,04	-5768,67	-14760,71
200	-10,39	707,73	-307,68	400,05	-14774,11	-9701,28	-24475,39	-8275,81	-5288,10	-13563,91
205	-11,57	704,91	-304,66	400,25	-16143,82	-10878,64	-27022,46	-7673,54	-4807,55	-12481,09
210	-13,09	706,35	-306,58	399,77	-17240,18	-11843,29	-29083,48	-7130,51	-4359,49	-11490,00
215	-15,01	709,70	-309,74	399,96	-18173,81	-12581,68	-30755,49	-6601,29	-3963,67	-10564,97
220	-17,32	717,97	-317,61	400,37	-19086,44	-13164,64	-32251,08	-6078,82	-3534,54	-9613,36
225	-20,10	731,34	-330,94	400,39	-20035,95	-13704,49	-33740,45	-5538,19	-3044,71	-8582,91
230	-23,57	747,67	-347,47	400,21	-20995,73	-14168,68	-35164,41	-4957,73	-2560,97	-7518,70
235	-27,97	765,94	-365,76	400,18	-21943,55	-14616,63	-36560,18	-4348,02	-2058,70	-6406,72
240	-33,73	785,91	-385,69	400,22	-22869,85	-15063,93	-37933,78	-3722,72	-1531,87	-5254,59
245	-41,63	807,23	-407,26	399,97	-23765,14	-15523,05	-39288,18	-3090,97	-973,90	-4064,87
250	-53,20	830,19	-430,32	399,87	-24634,96	-16007,71	-40642,66	-2459,77	-380,48	-2840,24
255	-72,05	854,87	-454,81	400,06	-25476,31	-16531,58	-42007,88	-1832,46	254,15	-1578,32
260	-108,85	883,33	-483,48	399,85	-26339,79	-16845,14	-43184,94	-1217,70	862,33	-355,37
265	-224,20	881,61	-481,75	399,86	-26438,79	-16906,82	-43345,61	-605,89	891,00	285,11

TABELA 4.12 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o TRRF de 120 minutos para uma seção retangular (40x80)cm² armada com 8φ32mm

		TRRF 120								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
185	-9,45	627,29	-227,51	399,79	-4543,92	1549,04	-2994,89	-8825,18	-3738,16	-12563,33
190	-9,76	576,37	-176,72	399,64	-8049,14	-1235,39	-9284,53	-7726,09	-3299,66	-11025,75
195	-10,43	550,40	-150,23	400,18	-10266,63	-3025,95	-13292,58	-6912,02	-2940,24	-9852,27
200	-11,43	542,10	-141,91	400,19	-11649,36	-4072,81	-15722,17	-6367,62	-2622,68	-8990,30
205	-12,76	540,78	-140,51	400,27	-12652,09	-4824,32	-17476,42	-5935,90	-2309,45	-8245,36
210	-14,44	542,25	-142,46	399,79	-13455,24	-5427,52	-18882,75	-5544,69	-2013,45	-7558,14
215	-16,48	546,81	-146,60	400,21	-14180,54	-5894,27	-20074,81	-5175,94	-1725,56	-6901,50
220	-18,86	556,78	-156,55	400,23	-14938,23	-6317,12	-21255,34	-4818,89	-1369,95	-6188,84
225	-21,80	568,40	-168,24	400,16	-15684,68	-6698,20	-22382,88	-4434,00	-1007,90	-5441,90
230	-25,46	581,79	-181,77	400,02	-16437,75	-7047,46	-23485,21	-4012,34	-635,24	-4647,58
235	-30,11	596,98	-197,10	399,88	-17199,89	-7376,54	-24576,43	-3556,06	-247,71	-3803,77
240	-36,20	613,94	-213,91	400,03	-17965,48	-7704,34	-25669,82	-3073,57	161,85	-2911,72
245	-44,56	632,37	-232,34	400,03	-18725,86	-8039,93	-26765,79	-2574,91	599,89	-1975,02
250	-56,86	652,40	-252,44	399,96	-19481,01	-8393,51	-27874,52	-2066,84	1071,68	-995,16
255	-76,92	674,39	-274,10	400,29	-20234,01	-8776,61	-29010,62	-1552,42	1581,14	28,72
260	-119,07	668,14	-267,93	400,21	-20232,70	-9032,30	-29264,99	-1028,62	1608,02	579,40
265	-241,45	665,38	-265,51	399,86	-20242,45	-9118,24	-29360,69	-512,31	1615,67	1103,35

TABELA 4.13 – Tabela de resultados gerada pelo programa para o pós-incêndio de 120 minutos para uma seção retangular (40x80)cm² armada com 8φ32mm

		PÓS-INCÊNDIO 120								
		Normal			MomentoX [kN.cm]			MomentoY [kN.cm]		
alfa	Xo(cm)	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total	Concreto	Aço	Total
185	-5,01	1007,55	-447,40	560,15	-4770,16	-11226,59	-15996,75	-12161,74	-31230,68	-43392,43
190	-4,25	1030,47	-470,90	559,57	-9295,92	-19907,29	-29203,21	-11617,62	-28516,29	-40133,90
195	-4,19	1007,66	-447,57	560,10	-13124,68	-30105,22	-43229,90	-10524,13	-24795,31	-35319,44
200	-4,32	999,97	-446,81	553,16	-16213,58	-38177,82	-54391,40	-9474,83	-21870,28	-31345,11
205	-4,74	1000,25	-440,25	560,00	-18587,03	-44997,54	-63584,57	-8503,77	-18950,73	-27454,50
210	-5,49	1003,17	-442,65	560,52	-20420,60	-50483,64	-70904,23	-7593,98	-16421,59	-24015,56
215	-6,57	1007,18	-446,67	560,51	-21889,89	-54880,56	-76770,46	-6727,45	-14165,80	-20893,25
220	-7,91	1016,49	-456,88	559,61	-23161,79	-58970,65	-82132,44	-5915,52	-12077,00	-17992,52
225	-9,52	1029,66	-470,06	559,61	-24280,94	-62861,82	-87142,76	-5157,72	-10094,90	-15252,63
230	-11,59	1040,01	-480,23	559,77	-25189,59	-66283,99	-91473,58	-4447,41	-8331,27	-12778,68
235	-14,86	1028,77	-468,74	560,04	-25602,52	-67896,51	-93499,03	-3773,06	-7370,95	-11144,01
240	-19,13	1018,86	-458,89	559,97	-25916,63	-69533,31	-95449,94	-3148,91	-6395,63	-9544,54
245	-24,99	1010,04	-449,93	560,11	-26152,11	-71232,74	-97384,85	-2565,21	-5382,60	-7947,81
250	-33,47	1004,58	-444,77	559,80	-26365,40	-72839,07	-99204,47	-2014,55	-4300,16	-6314,71
255	-46,92	1005,33	-445,70	559,63	-26621,32	-74179,65	-100800,97	-1489,96	-3115,04	-4604,99
260	-73,41	1006,66	-446,59	560,06	-26829,03	-75647,88	-102476,92	-983,70	-1817,03	-2800,73
265	-147,51	1028,54	-468,80	559,74	-27349,80	-75763,75	-103113,55	-489,56	-1048,00	-1537,55

4.4 – Exemplo 3

Apenas para exemplificar um erro que pode acontecer, suponha uma seção em concreto armado de 30x30 cm², produzida com f_{ck} de 25 MPa e agregado predominantemente silicoso. Essa seção conta ainda com uma armação de 4 φ 16 mm e está submetida a uma força normal de serviço $N_{s}=800$ kN. Entrando com esses dados no programa proposto e analisando os resultados gerados, nota-se que é possível que essa seção, armada da maneira proposta, resista à um incêndio de até 90 minutos, dependendo, claro, do par de momentos fletores solicitantes de cálculo.

Ressalta-se entretanto, que o objetivo deste terceiro exemplo não é o de averiguar uma seção submetida à um terno completo de esforços solicitantes e sim, apenas demonstrar como, contra a segurança, é possível que sejam gerados em situação de incêndio diagramas de interação resistentes de cálculo ($M_{X,Rd}$ x $M_{Y,Rd}$) para uma força normal também resistente de cálculo, N_{Rd} , maiores do que o mesmo diagrama gerado para a temperatura ambiente.

A FIG. 4.19 mostra os diagramas de interação ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) para a temperatura ambiente e situação de incêndio.

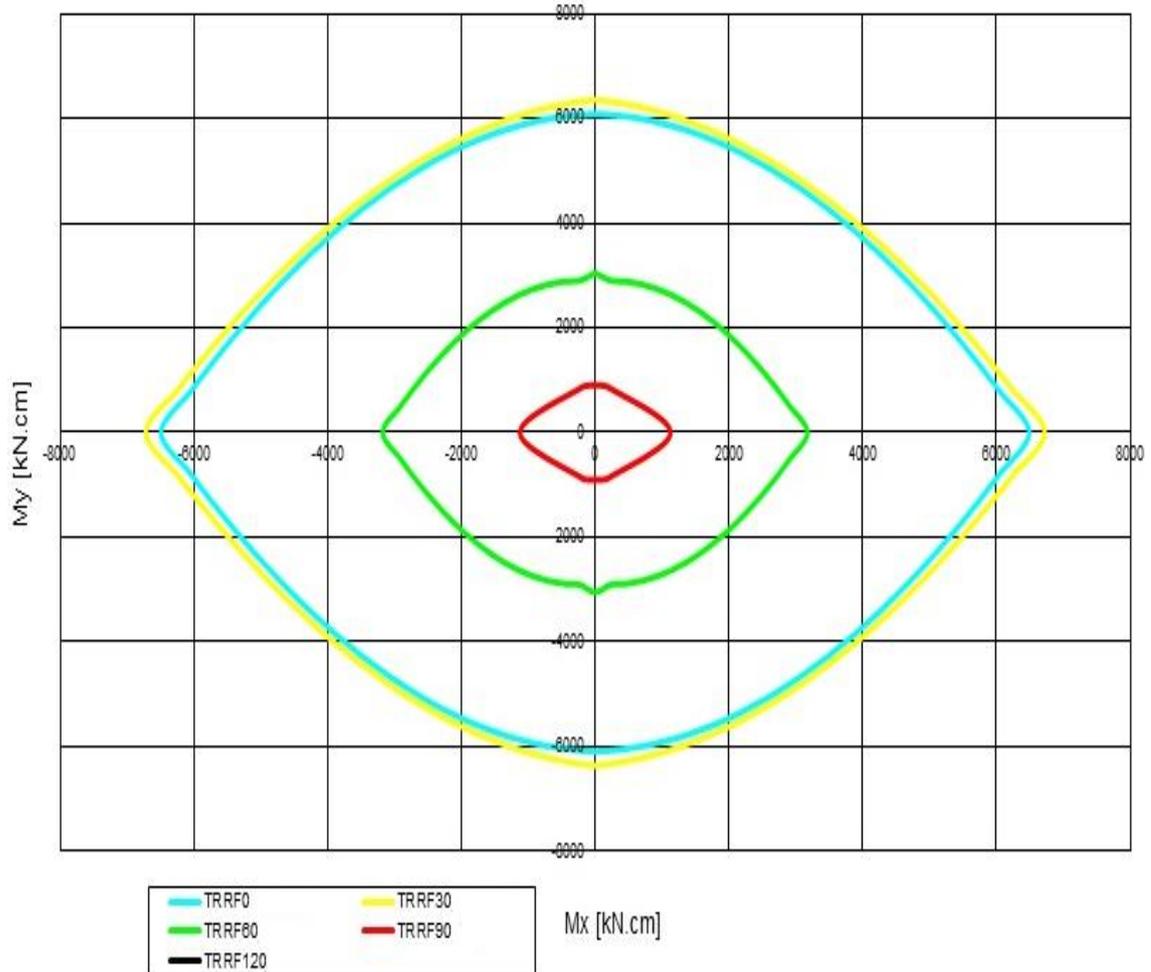


FIGURA 4.19 – Diagrama ($M_{x,Rd}$ x $M_{y,Rd}$) gerado em temperatura ambiente e para os TRRF de 30, 60 e 90 minutos para uma seção de concreto armado $30 \times 30 \text{ cm}^2$ armada com $4 \phi 16 \text{ mm}$

Nota-se que o diagrama da FIG. 4.19 exibe o anel de cor amarela e que corresponde à resistência da peça a um incêndio de 30 minutos externo ao anel de cor azul ciano e que corresponde à resistência da peça a temperatura ambiente. Embora matematicamente os diagramas gerados estejam corretos, o caso se constitui, claramente, contra a segurança estrutural e **deve-se tomar como resistência máxima para a peça o diagrama gerado em temperatura ambiente**. O fato pode ocorrer pois os coeficientes redutores da resistência do concreto e do aço em situação de incêndio são menores do que os coeficientes em temperatura ambiente, além de o coeficiente majorador de esforços

solicitantes ser maior em temperatura ambiente que em situação de incêndio, já que a situação de incêndio é um caso de combinação excepcional de ações. Todos esses coeficientes constam no item 3.3.1 deste trabalho.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi proposto o desenvolvimento de um método avançado de cálculo, conforme as prescrições da ABNT NBR 15200:2012, capaz de verificar seções retangulares de concreto armado quando essas estão submetidas simultaneamente à flexão oblíqua composta e à ação de um incêndio e, também, a sua verificação quando resfriadas após a extinção desse mesmo incêndio. Foi, portanto, desenvolvido um programa em MS Visual Basic acoplado a planilhas de MS Excel para atingir esse fim. Esse programa conta com um banco de dados de seções retangulares que contém a distribuição precisa das temperaturas no seu interior para os TRRF preconizados pela ABNT NBR 14432:2001. Portanto, pode-se considerar a atuação de incêndios de tempo equivalente aos TRRF de 30, 60, 90 ou 120 minutos. Esse banco de dados foi gerado inicialmente por CASTRO (2005) e contava com 25 seções retangulares, o que foi expandido por RODRIGUES (2009) até chegar ao seu valor atual que é de 64 seções retangulares e, com a possibilidade de se inverter os eixos x e y, totaliza-se um valor de 123 seções retangulares. Para se chegar a esse banco de dados foram testadas todas as seções acima mencionadas no programa THERSYS, desenvolvido por RIBEIRO (2004) na Universidade Federal de Minas Gerais.

Pode-se considerar que o método desenvolvido neste trabalho é um método avançado de cálculo, pois ao se adotar a distribuição da temperatura no interior das seções retangulares foram também consideradas todas as não-linearidades envolvidas no processo de aquecimento. Um grande avanço com relação ao desenvolvimento de RODRIGUES (2009) fica a cargo da consideração de elementos finitos de $(0,5 \times 0,5)$ cm^2 dentro da seção retangular e, não mais faz-se a consideração por fatiamento da seção. Isto, tanto para a determinação dos esforços resistentes quando a seção retangular for submetida à flexão oblíqua composta em temperatura ambiente, quanto para os casos da seção retangular também submetida ao incêndio ou em uma situação de pós-incêndio. Dessa maneira, não mais se utiliza a média das temperaturas por fatia para determinar a redução das propriedades mecânicas do concreto e aço e sim, determina-se para cada um destes pequenos elementos finitos a sua temperatura e conseqüentemente os seus coeficientes de redução das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos. Representando um avanço com relação a SOARES (2003) e CASTRO (2005), RODRIGUES (2009) fez a consideração da redução simultânea da tensão e do módulo de elasticidade do aço, obtendo-se um diagrama de tensão-deformação diferente para cada temperatura, o que foi mantido no presente trabalho. Representando-se, agora, um avanço em relação a RODRIGUES (2009), o presente trabalho adota o diagrama parábola-retângulo para a resistência do concreto e, não mais o diagrama retangular simplificado para a resistência do concreto.

Pelo programa desenvolvido é possível verificar se seções retangulares de concreto armado submetidas à flexão oblíqua composta em temperatura ambiente e já armadas estão adequadas da maneira proposta, ou seja, se para os esforços solicitantes e para a seção transversal aquele conjunto proposto de armaduras longitudinais é mesmo adequado. Assim sendo, determina-se para uma força normal resistente, tão próxima quanto possível da solicitante, e constante, o par de momentos fletores resistentes, nos eixos x e y , para cada posição válida da linha neutra no interior da seção. Com todos esses pares válidos gera-se por fim um diagrama de interação (momento fletor em torno de x) X (momento fletor em torno de y) resistentes de cálculo. Isto, em temperatura ambiente, para qualquer das seções retangulares que podem ser escolhidas. Podem também ser gerados os mesmos diagramas para seções submetidas aos tempos

requeridos de resistência ao fogo prescritos pela ABNT NBR 14432:2001. Permite-se traçar, ainda, os diagramas de interação (momento fletor em torno de x) X (momento fletor em torno de y) resistentes de cálculo para uma seção de concreto armado que tenha sido exposta a um incêndio padrão de tempo equivalente a 30, 60, 90 ou 120 minutos e resfriada novamente até a temperatura ambiente. Foram atingidos, portanto, todos os objetivos propostos.

Em sequência ao desenvolvimento dos trabalhos anteriores realizados no Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG sobre estruturas de concreto armado em situação de incêndio, temos a seguinte cronologia: SOARES (2003) desenvolveu um método simplificado de análise, CASTRO (2005) implementou um método geral para casos de compressão axial centrada e RODRIGUES (2009) desenvolveu um método geral que leva em consideração a flexão normal composta. O presente trabalho desenvolveu um método também geral, porém agora denominado como avançado pela norma vigente, que leva em consideração a flexão oblíqua composta.

O tema deste trabalho surgiu como aceitação de uma das sugestões dada por RODRIGUES (2009) e sugere-se, agora, como continuidade ao estudo sobre o comportamento das estruturas de concreto armado em situação de incêndio, as seguintes linhas de pesquisa:

- analisar seções retangulares de concreto armado submetidas também ao novo TRRF de 180 minutos, proposto para o método tabular, em algumas poucas situações, pela ABNT NBR 15200:2012, porém não mencionado na ABNT NBR 14432:2001.
- integrar o software de análise estrutural ao de análise térmica para poder generalizar o formato das seções, sem necessidade de montar um banco de dados;
- analisar curvas de incêndio diferentes da curva padrão, principalmente para análises da situação de pós-incêndio.

- estudar o cisalhamento em peças submetidas a um incêndio.
- estudar a combinação de cisalhamento e torção em peças submetidas a um incêndio.
- ensaiar peças de concreto armado submetidas a elevadas temperaturas para estudar a eficácia das prescrições da ABNT NBR 15200:2012.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, G. B. M. L. “Dimensionamento de Vigas de Concreto Armado em Situação de Incêndio”. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

ALVA, G. M. S. “Sobre o Projeto de Edifícios em Estrutura Mista Aço-Concreto”. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 277p. Brasil, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Projeto e execução de obras de concreto armado.” – NBR 6118, 1980. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.” – NBR 6118, 2003. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.” – NBR 6118, 2007. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Ações e segurança nas estruturas – Procedimento.” – NBR 8681, 2003, versão corrigida: 2004. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado.” – NBR 9062, 2006. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio – Procedimento” – NBR 14323, 1999. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento” – NBR 14432, 2001. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio.” – NBR 15200, 2004. Rio de Janeiro, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). “Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio.” – NBR 15200, 2012. Rio de Janeiro, Brasil.

BATHE, K.J. Finite Element Procedures in Engineering analysis. New Jersey: Prentice-Hall, 1982.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

CALDAS, R. B. “Análise Numérica de Estruturas de Aço, Concreto e Mistas em Situação de Incêndio”. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2008.

CANOVAS, M. F. “Patologia e Terapia do Concreto Armado” – São Paulo – SP – Editora PINI – 1988.

CASTRO, G. G. S. “Um Método Geral de Cálculo para Verificação de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2005.

CEB – FIP MODEL CODE. “Design of concrete structures for fire resistance. Preliminary draft of appendix to the CEB – FIP Model Code”, 1982.

CIMNE – Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia. GID – Pré e Pós-processador. Barcelona, 2000.

COSTA, C. N. “Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio.” Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

COSTA, C. N. “Dimensionamento de Elementos de Concreto Armado em Situação de Incêndio.” Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. “Design of concrete structures, Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design” – EUROCODE 2 – ENV 1996-1-2. 1996. Brussels. Belgium.

FIGUEIREDO JUNIOR, F. P. “Simulação Via Método dos Elementos Finitos da Distribuição de Temperatura em Estruturas Metálicas e Mistas em Caso de Incêndio.” Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2002.

GALLETTO, A.; MENEGHINI, E. C. A. “Comportamento do Concreto Submetido à Temperaturas Elevadas” – Seminário apresentado na disciplina Análise Experimental de Estruturas – FEC – UNICAMP – Fev./2000.

GUEDES, J. S. M. “Dimensionamento de Peças de Concreto Armado Submetidas à Flexão Oblíqua”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2001.

KLEIN JÚNIOR, O. “Pilares de Concreto Armado em Situação de Incêndio Submetidos à Flexão Normal Composta.” Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

LANDI, F. R. “Ação do Incêndio Sobre as Estruturas de Concreto Armado”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim Técnico 01/86. São Paulo. SP. Brasil, 1986.

MORENO JR., A. L.; SOUZA, A. A. A. “Efeito de Altas Temperaturas na Resistência à Compressão, Resistência à Tração e Módulo de Deformação do Concreto” – Revista Engenharia, Ciência e Tecnologia, vol. 06, n. 5, p. 21-30 – Setembro/Outubro - 2003.

PAULON, V. A. “Durabilidade do Concreto – Avanços da Tecnologia” – 7º SIMPATCON – Simpósio de Aplicação da Tecnologia do Concreto, Campinas – SP – 1984.

PETRUCCI, E. G. R. “Materiais de Construção”. 3ª ed. Editora Globo. Porto Alegre, 1978.

RIBEIRO, J. C. L. “Simulação via Método dos Elementos Finitos da Distribuição Tridimensional de Temperatura em Estruturas em Situação de Incêndio”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2004.

RODRIGUES, M. P. P. “Flexão Normal Composta em Seções Retangulares de Concreto Armado em Situação de Incêndio”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2009.

SILVA, N. A. “Concreto Armado I”. Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

SOARES, E. M. P. “Verificação de Peças Usuais de Concreto Armado em Situação de Incêndio”. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2003.

SOUZA, U. E. L. “Incêndio em Edifícios: Conceitos Básicos”. Revista CIPA. São Paulo, 1999.