

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI – COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANGELA MARIA MÜLLER

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO AÇO CA-60 PARA ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO - PR

2018

ANGELA MARIA MÜLLER

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO AÇO CA-60 PARA ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para conclusão da Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim.

TOLEDO - PR

2018



Ministério da Educação

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Campus Toledo

Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso N° 120

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO AÇO CA-60 PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

por

Angela Maria Müller

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15:00 h do dia 06 de Junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof^ª Dr Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)

Prof^ª Dr Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)
Orientador

Prof^ª Renathielly Fernanda da Silva
(UTFPR – TD)

Visto da Coordenação
Prof. Dr Fulvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Orientador Dr. Lucas Boabaid Ibrahim pela contribuição com seus conhecimentos e auxílio na elaboração árdua do trabalho. Agradeço também aos Técnicos do laboratório, Wilson e Marcos, pelo engajamento na realização dos ensaios.

Deixo meu reconhecimento aos meus familiares que me apoiaram e ao Eduardo pelo empréstimo de materiais e auxílio no corte das barras de aço. Por fim, agradeço ao meu bom Deus que está sempre presente em minha vida.

RESUMO

MÜLLER, A. M. **Análise do comportamento do aço CA-60 para estruturas de concreto armado em situação de incêndio.** Trabalho de conclusão de curso - Bacharelado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo. 2018.

O presente trabalho apresenta a análise do comportamento do aço CA-60 em situação de incêndio. O aço é um material largamente utilizado na engenharia pelo mundo inteiro. Trata-se de um dos principais componentes das estruturas de concreto armado. Quando em situação de incêndio, toda a estrutura sofre diversas modificações, dentre elas, a diminuição da resistência ao escoamento e módulo de elasticidade. Analisar o aço isoladamente garante que seu comportamento seja monitorado de maneira eficiente. Desta forma, experimentou-se barras de aço CA-60 com diâmetro de 5 mm em temperaturas variadas (200 °C; 400 °C; 600 °C; 800 °C e 1000 °C), com tempo de exposição de 60 e 120 minutos, sendo posteriormente resfriadas ao ar e realizado ensaio de tração na prensa universal. Obteve-se diagramas tensão-deformação que demonstraram quão grande pode ser a perda da capacidade resistiva com o aumento da temperatura e qual a importância do resfriamento ao ar para as barras de aço.

Palavras-chave: Aço, CA-60, Altas Temperatura, Módulo de Elasticidade.

ABSTRACT

MÜLLER, A. M. Analysis of the behavior of CA-60 steel for reinforced concrete structures in a fire situation. Completion of course work - Bachelor of Civil Engineering - Federal Technological University of Paraná. Toledo. 2017.

The present work presents the analysis of the behavior of CA-60 steel in a fire situation. Steel is a widely used material in engineering all over the world. It is one of the main components of reinforced concrete structures. When in a fire situation, the whole structure undergoes several modifications, among them, the decrease of the resistance to the flow and modulus of elasticity. Analyzing steel alone ensures that its behavior is monitored efficiently. In this way, CA-60 steel bars with a diameter of 5 mm were tested at various temperatures (200 ° C, 400 ° C, 600 ° C, 800 ° C and 1000 ° C), with exposure time of 60 and 120 minutes, then air-cooled and a tensile test performed on the universal press. Voltage-deformation diagrams were obtained which demonstrated how great the loss of resistive capacity can be with increasing temperature and how important is air cooling to steel bars.

Keywords: Steel, CA-60, High Temperature, Modulus of Elasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real.	18
Figura 2 - Modelo do incêndio-padrão.	20
Figura 3 - Curva incêndio padrão.	21
Figura 4 - Curvas temperatura-tempo de um incêndio padrão.	22
Figura 5 - Curvas temperatura-tempo padronizadas pelas principais normas internacionais e curva típica natural.	23
Figura 6 - Método do tempo equivalente.	25
Figura 7 - Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura.	29
Figura 8 - Fator de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura.	30
Figura 9 - Alongamento específico do concreto de densidade normal com agregado silicioso.	31
Figura 10 - Calor específico do concreto.	32
Figura 11 - Condutividade térmica do concreto.	33
Figura 12 - Densidade do concreto.	34
Figura 13 - Condutividade Térmica do aço em função da temperatura.	35
Figura 14 - Fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura.	36
Figura 15 - Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura.	37
Figura 16 - Diagrama tensão-deformação dos aços a altas temperaturas.	39
Figura 17. Diagrama tensão-deformação para diversas temperaturas.	39
Figura 18 - Diagrama tensão-deformação aço CA-60 em situação normal.	40
Figura 19 - Forno industrial (Temperatura máxima 1200 °C).	44
Figura 20 - Processo de retirada das barras após aquecimento.	44
Figura 21. Resfriamento ao ar.	45
Figura 22 - Prensa Universal.	45
Figura 23 - Técnico do laboratório operando prensa universal durante ensaio de tração.	46
Figura 24 - Medição das barras com auxílio de paquímetro.	46
Figura 25 - Extensômetro.	47
Figura 26 - Corpos de prova da marca Gerdau após aquecimento e resfriamento.	49

Figura 27. Barra aquecida a 800 graus Celsius.	49
Figura 28 - Exemplo de Diagrama tensão-deformação gerado a partir do ensaio de tração (L11 com extensômetro).	50
Figura 29 - Incandescência.	53
Figura 30. Desagregação das barras de aço a 1000 graus Celsius.	53
Figura 31 - Estricção.	56
Figura 32 - Determinação Lo.	59
Figura 33 - Aproximação por reta para determinação do módulo de elasticidade.	60
Figura 34 - Diagrama Tensão x Deformação para o lote aquecido a 200 °C durante 120 minutos.	61
Figura 35 - Diagrama Tensão x Deformação para o lote aquecido a 600 °C durante 120 minutos.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura dos gases em função do tempo conforme ASTM E119 (ASTM, 2007).....	20
Tabela 2 - Valores das relações para concretos de massa específica normal, preparados predominantemente com agregados siliciosos ou calcáreos.....	28
Tabela 3 - Valores das relações para as temperaturas estudadas em aço de armadura passiva.	38
Tabela 4 - Propriedades mecânicas exigíveis.	41
Tabela 5 - Lotes dos corpos de Prova.	48
Tabela 6 - Tensão de escoamento.	51
Tabela 7 - Fator de redução da resistência ao escoamento.	54
Tabela 8 - Tensão Máxima.	57
Tabela 9 - Módulos de elasticidade médios.....	62
Tabela 10 - Fator de redução da modulo de elasticidade.....	63
Tabela 11 - Comparação dos fatores de redução da resistência ao escoamento.....	65
Tabela 12 - Comparação do fatores de redução do módulo de elasticidade.....	67

LISTA DE SIMBOLOS

θ_g	Temperatura dos gases quentes no ambiente
θ_0	Temperatura do ambiente
t	Tempo
q_{fi}	Carga de incêndio específica
M_i	Massa total de cada componente i do material combustível
H_i	Potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível
A_f	Área do piso do compartimento
v	Grau de ventilação do compartimento em chamas
A_v	Somatória das áreas das aberturas para o ambiente externo do compartimento em chamas
A_t	Área total do compartimento
h	Altura média das aberturas
f_{ck}	Resistência à compressão do concreto em situação normal
$f_{c,\theta}$	Resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas
$E_{c,\theta}$	Módulo de elasticidade do concreto submetido a diferentes temperaturas
E_c	Módulo de elasticidade do concreto em situação normal
$K_{c,\theta}$	Fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ
E_{ci}	Módulo de elasticidade inicial do concreto em situação normal
$K_{cE,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade do concreto na temperatura
l	Comprimento da peça de concreto a 20 °C
Δl	Alongamento do elemento de concreto provocado pela temperatura
θ_c	Temperatura do concreto
λ_{max}	Valor máximo da condutividade térmica do concreto
λ_{min}	Valor mínimo da condutividade térmica do concreto
$C_{p\theta}$	Calor específico do concreto

θ_a	Temperatura do aço
$\rho(\theta)$	Densidade do concreto
λ_a	Condutividade térmica do aço
f_{yk}	Resistência característica do aço de armadura passiva em situação normal
$k_{s,\theta}$	Fator de redução da resistência do aço na temperatura θ
$E_{s,\theta}$	Módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em situação normal
$k_{ES,\theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura θ
k_{yq}	Relação entre a resistência ao escoamento do aço da armadura passiva submetido a diferentes temperaturas
$k_{ES,\theta}$	Relação entre o módulo de elasticidade do aço submetido a diferentes temperaturas
$k_{p,\theta}$	Relação entre o limite de proporcionalidade do aço submetido a diferentes temperaturas
f_{pyk}	Resistência característica do aço de armadura ativa em situação normal
$k_{p,\theta}$	Fator de resistência do aço de armadura ativa na temperatura θ
$\varepsilon_{pt,\theta}$	Deformação linear específica no final do patamar de escoamento do aço
$\varepsilon_{pu,\theta}$	Deformação linear específica última do aço

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	O INCÊNDIO	17
2.1.1	INCÊNDIO PADRÃO	19
2.1.2	INCÊNDIO NATURAL.....	22
2.1.3	PARÂMETROS PARA CARACTERIZAÇÃO DO INCÊNDIO	23
2.2	REQUISITOS DAS ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	27
2.3	CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	27
2.4	AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	35
2.4.1	AÇO CA-60.....	40
2.5	RESFRIAMENTO E PÓS-INCÊNDIO	42
3	MÉTODO DO ENSAIO	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	DETERMINAÇÃO RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO.....	51
4.2	DETERMINAÇÃO RESISTÊNCIA ÚLTIMA	56
4.3	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	58
4.4	COMPARAÇÃO COM TRABALHOS ANTERIORES	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	ANEXOS	75

1 INTRODUÇÃO

O incêndio constitui um risco considerável à propriedade e à segurança humana, ocorrendo de forma descontrolada pode ocasionar consequências devastadoras (RIGOBELLO; MUNAIAR NETO, 2008). Para evitar maiores danos, as estruturas devem ser projetadas para suportar elevadas temperaturas.

No Brasil, as primeiras regulamentações sobre segurança contra incêndio (SCI) surgiram por volta do ano de 1974, após os incêndios devastadores dos edifícios Joelma e Andraus em São Paulo. Nesse mesmo ano foi criado o Decreto Municipal nº 10.878 (S. Paulo, 1974), que institui normas para a segurança dos edifícios a serem observadas na elaboração do projeto e na execução. A partir de então, as legislações e normas técnicas vem sendo constantemente modernizadas de acordo com as necessidades.

Por volta da década de 90, o Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo outorgou a instrução técnica IT 08 (SP, 2001), exigindo que fossem avaliadas a resistência e a segurança de projetos de estruturas contra incêndios, foi então que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) cria a primeira normatização nacional: NBR 14432 (ABNT, 2001), que define exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos. Mais tarde, as normas foram estendidas também para projetos de estruturas mistas de aço e concreto em situação de incêndio através da NBR 14323 (ABNT) em 2013.

De acordo com a Lei Federal Nº 10406 (Brasil, 2002), Art. 1346: é obrigatório o seguro de toda edificação contra o risco de incêndio ou destruição, total ou parcial. Recentemente, após o incêndio da Boate Kiss (RS), criou-se a Lei Federal Nº 13425 (Brasil, 2017), que estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião pública.

O conhecimento técnico e aplicado sobre incêndio passou a ser estudado e simplificado por pesquisadores a partir do século XX. De acordo com Silva (2001), devido a necessidade de se calcular a máxima temperatura atingida pelas peças estruturais e sua correspondente resistência, adota-se a curva temperatura-tempo padronizada de um incêndio para evitar a variabilidade do método de cálculo.

O estudo do comportamento global e individual dos elementos de concreto armado é importante para a previsão do seu desempenho. Sabe-se que tanto o aço quanto o concreto, apresentam redução de sua capacidade de resistência quando sujeitos a elevadas temperaturas.

A análise individual de cada componente é válida, pois o aço e o concreto possuem propriedades físico-químicas diferentes. Embora o aço seja quimicamente mais estável do que o concreto endurecido, também é suscetível aos efeitos da dilatação; fluência; redução da resistência e do módulo de elasticidade em função das altas temperaturas.

Considerando a importância da análise do incêndio e o efeito das altas temperaturas nas estruturas, o estudo irá avaliar o comportamento do aço em situação de incêndio a partir da determinação de suas características mecânicas, simulado em diferentes temperaturas, tempos de exposição e resfriamento ao ar.

1.1 OBJETIVOS

Nos itens a seguir serão abordados os objetivos gerais e específicos do trabalho, que irão embasar a metodologia do ensaio.

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é analisar o comportamento do aço CA-60 para estruturas de concreto armado em situação de incêndio, em diferentes temperaturas; tempos de exposição e resfriamento ao ar.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensaios de tração para obter o diagrama tensão-deformação do aço CA-60 para diferentes temperaturas e tempos de aquecimento, resfriando ao ar;
- A partir do diagrama tensão-deformação, determinar a resistência ao escoamento e módulo de elasticidade do aço CA-60 exposto a 200 °C; 400 °C; 600 °C; 800 °C e 1000 °C por 60 e 120 minutos, resfriando ao ar;
- Obter o gráfico que relaciona o fator de redução da resistência ao escoamento do aço em função da temperatura e compará-lo com o fornecido pela NBR 15200 (ABNT, 2012);
- Obter o gráfico que relaciona o fator de redução do módulo de elasticidade do aço em função da temperatura e compará-lo com o fornecido pela NBR 15200 (ABNT, 2012);
- Comparar os resultados encontrados, com os resultados obtidos em trabalhos anteriores na literatura existente.

1.2 JUSTIFICATIVA

O concreto armado é um material largamente utilizado na construção civil em todo o mundo, assim, o estudo e análise do seu comportamento é bastante relevante para aprimorar seu uso em diversas estruturas e diversas situações.

As bibliografias que relacionam incêndio e aço, na maioria das vezes, tratam de estruturas compostas de peças perfiladas (laminadas ou soldadas), ou de estruturas de concreto armado. Com relação somente à barras de aço em situação de incêndio, as bibliografias tornam-se escassas e muitas destas são estrangeiras.

O aço e o concreto das estruturas de concreto armado são analisadas na bibliografia de forma conjunta, sem dissociação dos materiais, mesmo que na norma NBR 15200 (ABNT, 2012) são apresentados parâmetros individuais para cada material.

Desta forma, analisando apenas o aço isoladamente será possível colher dados precisos de seu comportamento em situação de incêndio, contribuindo com a literatura, tornando o trabalho original e viável de ser estudado.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Os ensaios para obtenção do diagrama tensão-deformação serão feitos com os tempos requeridos de resistência ao fogo iguais a 60 e 120 minutos. A NBR 14432 (ABNT, 2001) preconiza tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) iguais a 30; 60; 90 e 120 minutos. No entanto, o ensaio será feito com TRRF de 60 minutos por abranger 34 dos 91 casos estabelecidos pela norma, ou seja, TRRF mais comum (ANEXO A). Já em relação a escolha dos 120 minutos é por ser o maior tempo requerido de resistência ao fogo.

As temperaturas analisadas no ensaio serão de 200; 400; 600; 800 e 1000 °C, porém, a NBR 15200 (ABNT, 2012) apresenta temperaturas que vão de 1 a 1200 °C. Devido à grande quantidade de medições que teriam que ser feitas, optou-se por cinco temperaturas diferentes dentro do intervalo da norma.

O aço utilizado é fabricado para estruturas de concreto armado, não é utilizado em estruturas do tipo “*Steel Frame*” sem a isolamento e sustentação do concreto, porém, o ensaio analisará apenas barras do aço CA-60 pela dificuldade de ensaiar corpos de prova de concreto armado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na seção a seguir serão apresentados itens importantes referentes ao incêndio; propriedades do aço e do concreto apresentadas por diversos autores e também por normas, estabelecendo embasamento teórico ao presente trabalho.

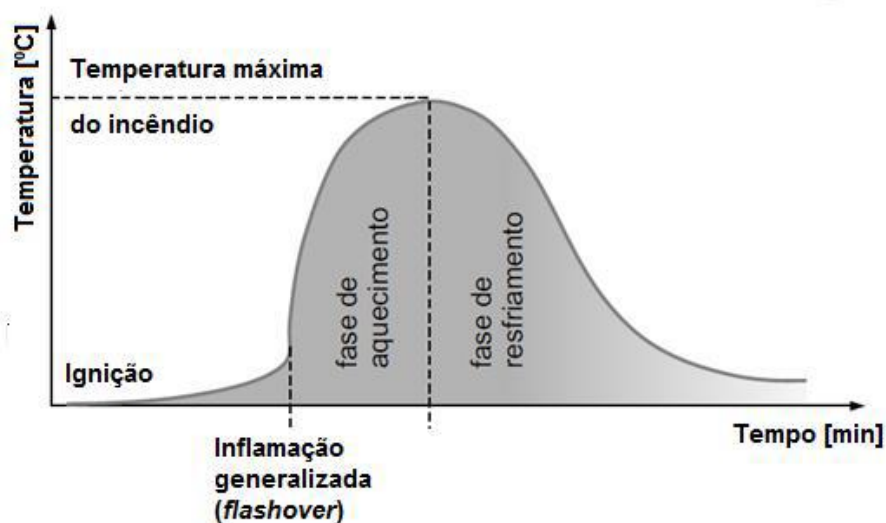
2.1 O INCÊNDIO

O incêndio é definido como fogo que lava com intensidade, em material que não estava a ele destinado, destruindo e, às vezes, causando prejuízos. Pode ter origem física; biológica; físico-química; acidental ou intencional (CALDAS, 2008).

Para que o fogo ocorra, são necessários três elementos que devem estar continuamente presentes: combustível; calor e oxigênio. Retirando um dos elementos, o processo de combustão não se sustenta e o fogo é extinto. Porém, a combustão é uma reação em cadeia, e após o início é mantida com parte do calor produzido, tornando o processo autossustentável.

De acordo com Silva (2001), a principal característica de um incêndio é a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio, visto que a partir dessa curva é possível calcular a máxima temperatura atingida pelas peças estruturais e, portanto, sua correspondente resistência a altas temperaturas. A curva representativa do incêndio real apresenta três estágios básicos, conforme Figura 1.

Figura 1 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real.



Fonte: SILVA (2001).

A Figura 1 representa a curva temperatura-tempo típica de um incêndio real, onde são estabelecidas três fases sucessivas de interesse:

- Ignição: fase inicial (*pré-flashover*) com baixas temperaturas, na qual o incêndio é considerado de pequenas proporções, sem riscos à vida humana e à estrutura com grande produção de gases tóxicos (MARTINS, 2000). Região que apresenta o início da inflamação, com o crescimento gradual da temperatura (COSTA; SILVA, 2003).
- Fase de aquecimento: Esta fase tem seu início no instante em que o fogo se espalha por efeito da radiação ou contato direto, resultando no incêndio generalizado de todo o compartimento, fenômeno conhecido como “*flashover*” (MARTINS, 2000). A temperatura dos gases quentes cresce rapidamente até atingir o pico da curva: a temperatura máxima dos gases do ambiente (COSTA; SILVA, 2003).
- Fase de resfriamento: Nesta fase ocorre uma diminuição progressiva da temperatura dos gases, pela falta de carga combustível ou oxigênio, ou mesmo pela intervenção de uma brigada de incêndio (MARTINS, 2000).

A curva temperatura-tempo de um incêndio real não é determinada facilmente, pois diversos fatores determinam a variabilidade de um incêndio em relação a outro, ou seja, cada incêndio é um caso particular em si.

De acordo com Silva (2001), tendo em vista que a curva temperatura- tempo altera-se para cada situação estudada, convencionou-se adotar uma curva padronizada como modelo para a análise experimental, este modelo chama-se modelo do incêndio padrão.

2.1.1 INCÊNDIO PADRÃO

Denomina-se incêndio-padrão, o modelo de incêndio para o qual se admite que a temperatura dos gases do ambiente em chamas respeite as curvas padronizadas para ensaio (SILVA, 2001).

É importante ressaltar que essa curva não representa um incêndio real, pois independe das características do ambiente e da carga de incêndio. As conclusões que se tenham com base nessa curva devem ser analisadas com cuidado, podendo ser utilizada apenas como modelo experimental.

A curva padronizada mais difundida internacionalmente por meio de normas e procedimentos de ensaios é a ISO-834 (ISO, 2014). Na América do Norte, a curva-padrão é representada pela tabela da ASTM E-119 (ASTM, 2007). Há também as curvas temperatura-tempo de acordo com o EUROCODE 1 (CEN, 2002).

2.1.1.1 CURVA TEMPERATURA-TEMPO, CONFORME ISO 834 (ISO, 2014).

A norma ISO 834 (ISO, 2014), recomenda a Equação 1 para determinar a curva temperatura tempo:

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

Sendo:

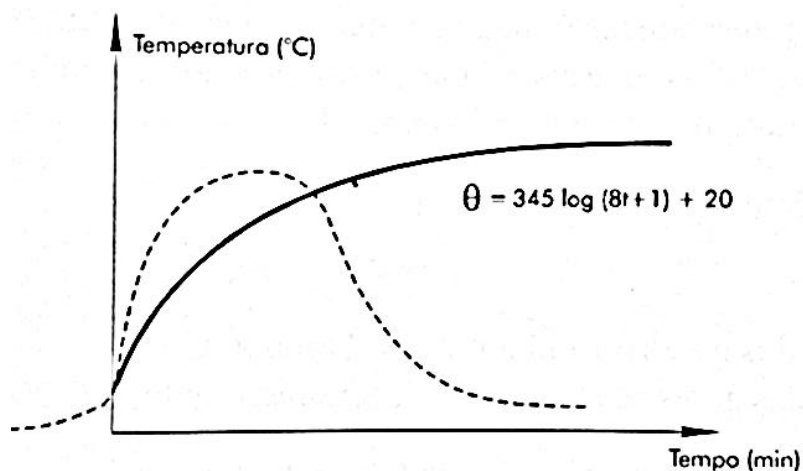
θ_g : Temperatura dos gases quentes no ambiente (°C);

θ_0 : Temperatura do ambiente, no instante $t = 0$, admitida normalmente como 20 °C;

t : Tempo (minutos).

É possível obter o gráfico representativo comparando a curva do incêndio real (pontilhado), com a curva temperatura-tempo para o incêndio padrão (Figura 2):

Figura 2 - Modelo do incêndio-padrão.



Fonte: SILVA (2001).

2.1.1.2 CURVA TEMPERATURA-TEMPO, CONFORME ASTM E119 (ASTM, 2007).

A norma ASTM E 119 (ASTM, 2007), recomenda o uso da curva temperatura-tempo de acordo com a Tabela 1:

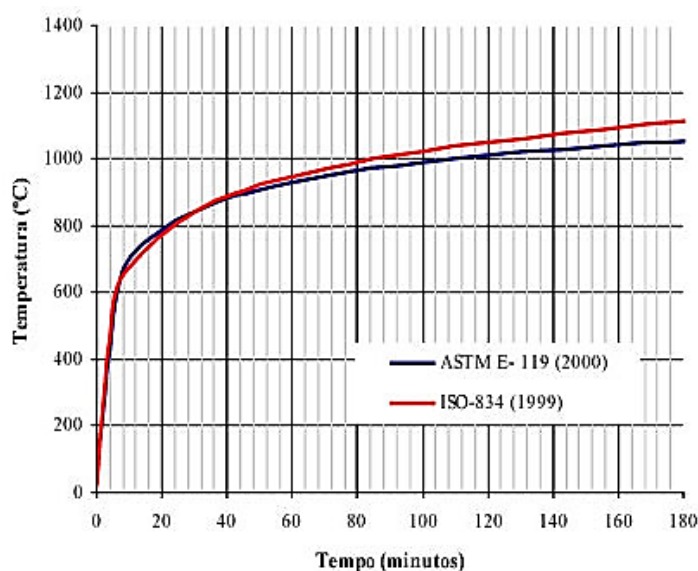
Tabela 1 - Temperatura dos gases em função do tempo conforme ASTM E119 (ASTM, 2007).

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	20	55	916
5	538	60	927
10	704	65	937
15	760	70	946
20	795	75	955
25	821	80	963
30	843	85	971
35	862	90	978
40	878	120	1010
45	892	240	1093
50	905	480	1260

Fonte: ASTM E 119 (ASTM, 2007).

A Figura 3 apresenta as curvas temperatura-tempo referentes ao incêndio padrão de acordo com a ASTM E 119 (ASTM, 2007) e a ISO 834 (ISO, 2014):

Figura 3 - Curva incêndio padrão.



Fonte: MORENO JUNIOR; MOLINA, (2012).

2.1.1.3 CURVA TEMPERATURA- TEMPO, CONFORME EUROCODE 1 (CEN, 2002).

De acordo com a norma da União Européia EUROCODE 1 (CEN, 2002), existem três curvas temperatura-tempo:

- Curva padronizada para incêndio em ambientes com material combustível formado por material celulósico (Equação 2):

$$\theta_g - \theta_0 = 345 \times \log(8 \times t + 1) \quad (2)$$

- Curva padronizada para incêndio em ambientes com material combustível formado por hidrocarbonetos (Equação 3):

$$\theta_g = 1080 \times (1 - 0,325 \times e^{-0,167 \times t} - 0,675 \times e^{-2,5 \times t}) + 20 \quad (3)$$

- Curva parametrizada (Equação 4):

$$\theta_g = 20 + 1325 \times (1 - 0,324 \times e^{-0,2 \times t} - 0,204 \times e^{-1,7 \times t} - 0,472 e^{-19 \times t}) \quad (4)$$

Sendo:

θ_g : Temperatura dos gases quentes no ambiente (°C);

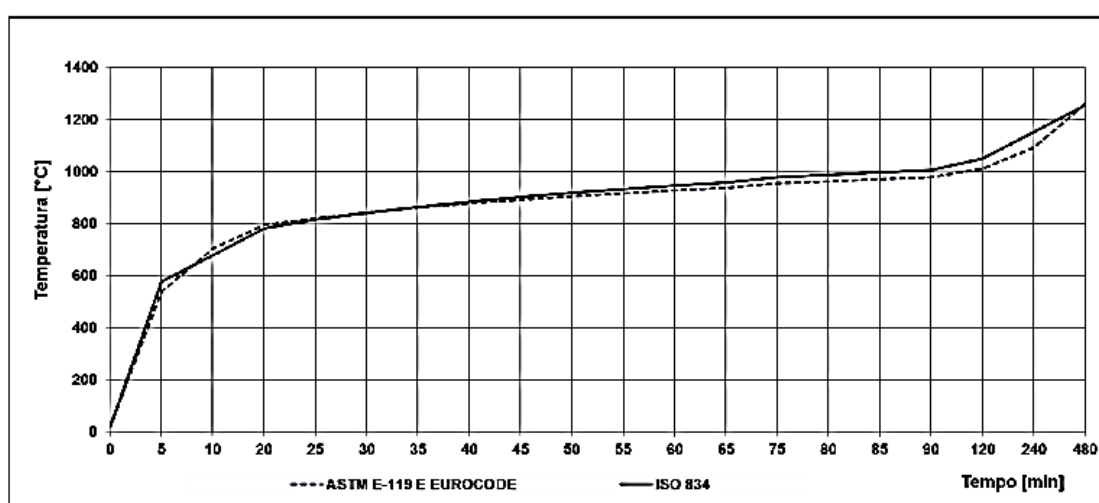
θ_0 : Temperatura do ambiente, no instante $t = 0$, admitida normalmente como 20 °C;

t : Tempo (minutos).

As relações temperatura-tempo dadas pela Equação 4, são válidas para compartimentos de incêndio com, no máximo, 500 m² de área em planta, sem aberturas no teto e com pé-direito máximo igual a 4 metros, bem como partindo do pressuposto que a carga de incêndio do compartimento é totalmente consumida.

A Figura 4 apresenta a comparação entre as curvas padronizadas segundo a ASTM E 119 (ASTM, 2007); ISO 834 (ISO, 2014) e EUROCODE 1 (CEN, 2002):

Figura 4 - Curvas temperatura-tempo de um incêndio padrão.



Fonte: ISO 834 (ISO, 2014); ASTM E119 (ASTM, 2007); EUROCODE 1 (CEN, 2002).

2.1.2 INCÊNDIO NATURAL

Denomina-se incêndio natural, o incêndio para o qual se admite que a temperatura dos gases respeite as curvas temperatura-tempo naturais, construídas a partir de ensaios (SILVA, 2001).

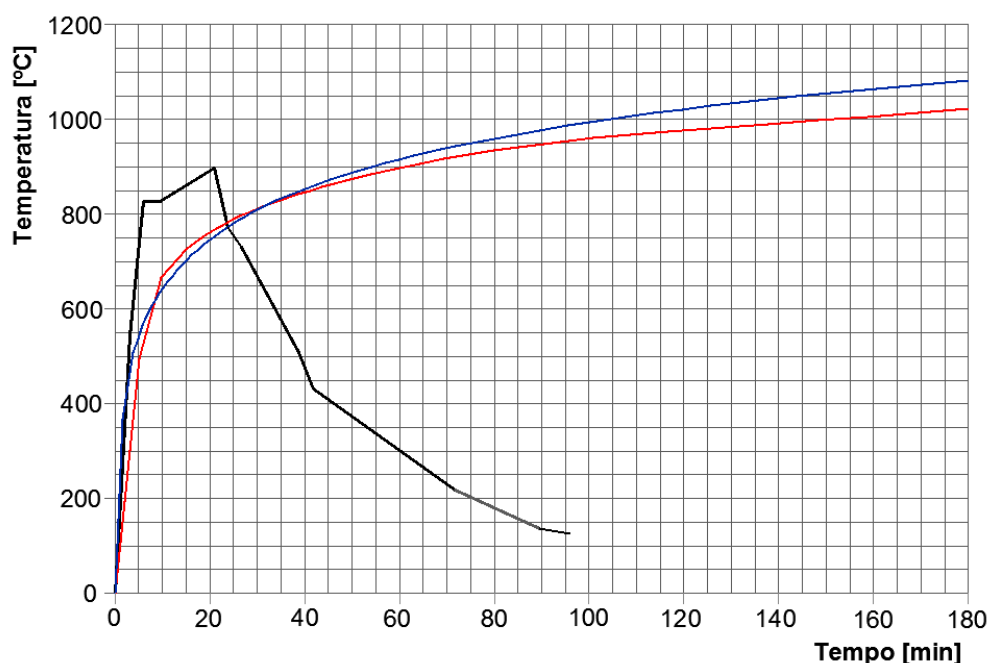
Segundo a NBR 14432 (ABNT, 2001), incêndio natural é a variação de temperatura que simula o incêndio real, sendo função da geometria, ventilação, características térmicas dos elementos de vedação e da carga de incêndio específica.

O incêndio natural possui uma singularidade em sua curva temperatura-tempo, como explica Silva (2001):

A principal característica dessas curvas, e que as distingue da curva-padrão, é a de possuírem um ramo ascendente (fase de aquecimento) e um ramo descendente (fase de resfriamento), admitindo portanto, racionalmente, que os gases que envolvem o fogo não têm sua temperatura sempre crescente com o tempo (SILVA, 2001. Pg. 35.).

Essa característica descrita anteriormente pode ser visualizada graficamente (Figura 5), onde a curva em preto representa o incêndio natural, em vermelho a curva incêndio padrão de acordo com a ISO 834 (ISO, 2014), e em azul a curva incêndio padrão de acordo com ASTM E119 (ASTM, 2007).

Figura 5 - Curvas temperatura-tempo padronizadas pelas principais normas internacionais e curva típica natural.



Fonte: SILVA (2001).

2.1.3 PARÂMETROS PARA CARACTERIZAÇÃO DO INCÊNDIO

Sabe-se que cada incêndio é único e depende de diversos fatores, porém, durante a análise de um incêndio é possível observar alguns parâmetros válidos que os caracterizam, tais como: temperatura crítica; tempo requerido de resistência ao fogo e carga de incêndio.

2.1.3.1 TEMPERATURA CRÍTICA

Denomina-se temperatura crítica, a temperatura do aço que leva ao colapso um determinado elemento estrutural (MARTINS, 2000). Para garantir a segurança estrutural em situação de incêndio, deve-se evitar que tal temperatura seja alcançada. A temperatura crítica depende do tipo de material e do sistema estrutural, isto é, carregamento aplicado, vinculações, geometria, dentre outros fatores (FAKURY, *et al.* 2000).

Determina-se a temperatura crítica do elemento de aço por intermédio de análise estrutural, conforme método simplificado apresentado na NBR 14323 (ABNT, 2013), ou por meios avançados de cálculo.

Segundo Martins (2000), tradicionalmente, adota-se o valor de 550°C para a temperatura crítica do aço. Isto porque o limite de escoamento do aço se reduz à aproximadamente 60% do seu valor usual, causando uma redução da tensão que leva ao colapso estrutural.

Segundo Gomes (2017), no caso do concreto, para temperaturas não superiores a 150 °C, a ação do fogo causa a perda da água capilar. As primeiras fissuras irão aparecer com temperaturas acima de 300 °C.

2.1.3.2 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO (TRRF)

A NBR 14432 (ABNT, 2001) define o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) como sendo o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão. Trata-se de um valor que é função do risco de incêndio e de suas consequências.

Para as estruturas calculadas em situação de incêndio, os valores dos TRRF encerram a probabilidade de colapso aceitável de uma edificação bem dimensionada, para a situação de incêndio durante sua vida útil (COSTA; SILVA, 2003).

O TRRF varia de uma especificação (norma, lei ou regulamentação) para outra, sendo fruto do consenso da sociedade, não significando a duração do incêndio ou o tempo de

evacuação dos ocupantes do edifício ou o tempo de chegada do corpo de bombeiros (CALDAS, 2008).

Pode ser calculado de duas maneiras: Método tabular e Método do tempo equivalente:

- Método Tabular:

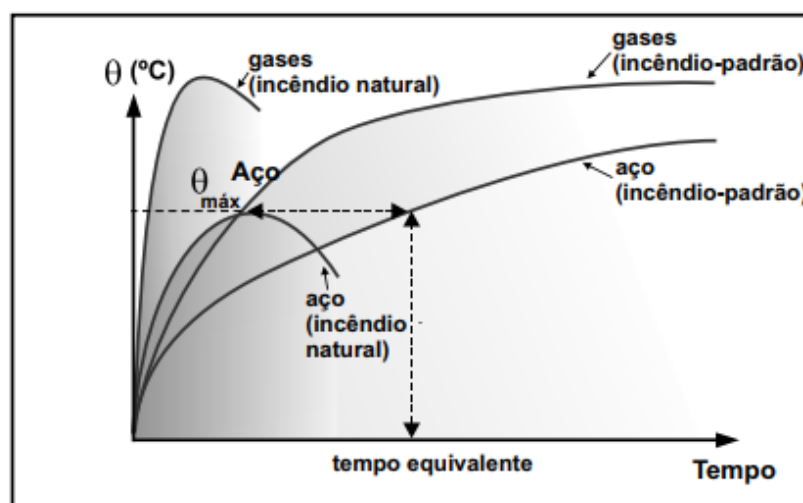
Os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) exigíveis no âmbito de aplicação da norma NBR 14432 (ABNT, 2001), estão entre 30 a 120 minutos dependendo das características da edificação, como especificado no ANEXO A.

Primeiro determina-se a altura da edificação em metros, que é a distância compreendida entre o ponto que caracteriza a saída, situada no nível no qual uma porta conduz ao exterior do prédio (nível de descarga) e o piso do último pavimento, excetuando-se zeladorias; barrilete; casa de máquinas; piso técnico e pisos sem permanência humana. Combinando a classe da altura da edificação com o uso e ocupação do empreendimento, obtêm-se o tempo requerido de resistência ao fogo.

- Método do Tempo Equivalente:

O método do tempo equivalente consiste em relacionar a máxima temperatura do aço no incêndio natural, ao tempo associado a essa mesma temperatura na curva do incêndio-padrão (VARGAS; SILVA, 2003). De acordo com a Figura 6.

Figura 6 - Método do tempo equivalente.



Fonte: VARGAS; SILVA, 2003.

A NBR 14432 (ABNT, 2001), permite a utilização desse método. O tempo equivalente determinado por meio de expressão é função da carga de incêndio; das características térmicas dos elementos de vedação; da ventilação horizontal e vertical e do pé-direito do compartimento.

De acordo com a Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros de São Paulo (IT08, 2001), para edificação com altura inferior a 12 m, admite-se o uso do método do tempo equivalente de resistência ao fogo em substituição ao método tabular, excetuando-se as edificações com explosivos e centrais de comunicação e energia.

2.1.3.3 CARGA DE INCÊNDIO

Carga de incêndio é a soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes divisórias; pisos e tetos (ABNT NBR 14432, 2001).

O valor da carga de incêndio específica é tabelada de acordo com a norma NBR 14432 (ABNT, 2001), onde é determinada a ocupação e uso de cada edificação de acordo com uma descrição completa das características pertinentes, encontrando assim a carga de incêndio em MJ/m².

Os valores da carga de incêndio específica podem ser determinados pela Equação 5:

$$q_{fi} = \frac{\sum M_i \times H_i}{A_f} \quad (5)$$

Sendo:

q_{fi} : É o valor da carga de incêndio específica, em megajoules por metro quadrado de área de piso;

M_i : É a massa total de cada componente i do material combustível, em quilogramas. Se houver alteração de ocupação, o M_i deve ser reavaliado;

H_i : O potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível, em megajoules por quilograma, conforme ANEXO B;

A_f : A área do piso do compartimento, em metros quadrados.

Ainda segundo a norma NBR 14432 (ABNT, 2001), o levantamento da carga de incêndio deve ser realizado em módulos de 500 m² ou inferior, de área de piso. Módulos maiores podem ser utilizados quando o espaço analisado possuir materiais combustíveis com

potenciais caloríficos específicos semelhantes, e que possam ser considerados uniformemente distribuídos.

2.2 REQUISITOS DAS ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Os objetivos da segurança contra incêndio (SCI) são minimizar o risco à vida e reduzir a perda patrimonial. A seleção do sistema adequado de segurança deve ser feita tendo por base os riscos de início de um incêndio, de sua propagação e de suas consequências (VARGAS; SILVA, 2003).

Segundo Silva (2001), o risco à vida devido ao colapso estrutural por ocorrência de um incêndio em edifício dimensionados de maneira adequada, de acordo com as normas pertinentes é muito pequena. A inclusão de medidas de proteção e combate ao incêndio e, principalmente, de meios que permitam a rápida evacuação dos ambientes em chamas deve ser conscientemente analisada.

A norma NBR 14432 (ABNT, 2001), estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural:

Para os elementos de compartimentação, devem ser atendidos requisitos de estanqueidade e isolamento por um tempo suficiente para possibilitar: Fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança; segurança das operações de combate ao incêndio e minimização de danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública (NBR 14432, 2001. Pg 2).

Segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012), a estrutura mantém a função de não permitir que o fogo a ultrapasse ou que o calor a atravesse em quantidade suficiente para gerar combustão no lado oposto ao incêndio inicial, compreendendo o isolamento térmico e a estanqueidade à passagem de chamas. A estrutura deve manter sua capacidade de suporte da construção como um todo ou de cada uma de suas partes, evitando o colapso global ou o colapso local progressivo.

2.3 CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

As propriedades do concreto se alteram em altas temperaturas, deve-se levar em conta sua debilitação progressiva no dimensionamento de elementos evitando o colapso da estrutura.

Segundo Vargas e Silva (2003), para se obter maior capacidade resistente à temperatura ambiente, as armaduras são dispostas próximas ao contorno da seção de concreto. As propriedades naturais de isolamento do concreto restringe o aumento da temperatura do aço protegido durante o incêndio, permitindo assim que a parte exposta resista a altas temperaturas e possa desenvolver maior tempo de resistência ao fogo.

O concreto, além da redução de sua resistência, perde área resistente devido ao “*spalling*”. Este fenômeno pode ser definido por Seito (2008):

O “*spalling*” é um lascamento da superfície do elemento de concreto submetido a um incêndio, devido à pressão interna da água ao evaporar-se e ao comportamento diferencial dos materiais componentes do concreto. O “*spalling*” reduz a área resistente do concreto e expõem a armadura ao fogo (SEITO, 2008. Pg 136).

Segundo Vargas e Silva (2003), o concreto atingirá a ruína à temperatura média menor do que a de um elemento de aço, considerando carregamento proporcional à respectiva resistência. Além disso, o concreto perderá muita resistência ao entorno da estrutura, mas no núcleo perderá pouca ou nenhuma, dependendo da severidade do incêndio.

As alterações de comportamento são resultantes da evaporação da água presente na matriz cimentícia, sob a forma livre ou combinada, durante o processo de aquecimento, sendo agravado em concretos de poros fechados (LIMA, *et al.* 2004).

De acordo com a NBR 15200 (ABNT, 2012), é possível obter valores comparativos de resistência e módulo de elasticidade. A alteração das propriedades de resistência e rigidez do concreto quando submetido a compressão axial a elevadas temperaturas devem ser obtidas de acordo com a Tabela 2, adaptada da norma, apresentando apenas os valores de temperaturas de interesse do ensaio.

Tabela 2 - Valores das relações para concretos de massa específica normal, preparados predominantemente com agregados siliciosos ou calcáreos.

Temp. do concreto, °C	Agregado silicioso		Agregado calcáreo	
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$
20	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,95	0,90	0,94	0,97
400	0,75	0,56	0,72	0,85
600	0,45	0,20	0,36	0,60
800	0,15	0,02	0,07	0,27
1000	0,04	0,00	0,00	0,02

Fonte: Adaptada NBR 15200 (ABNT, 2012).

Sendo:

f_{ck} : Resistência à compressão do concreto em situação normal;

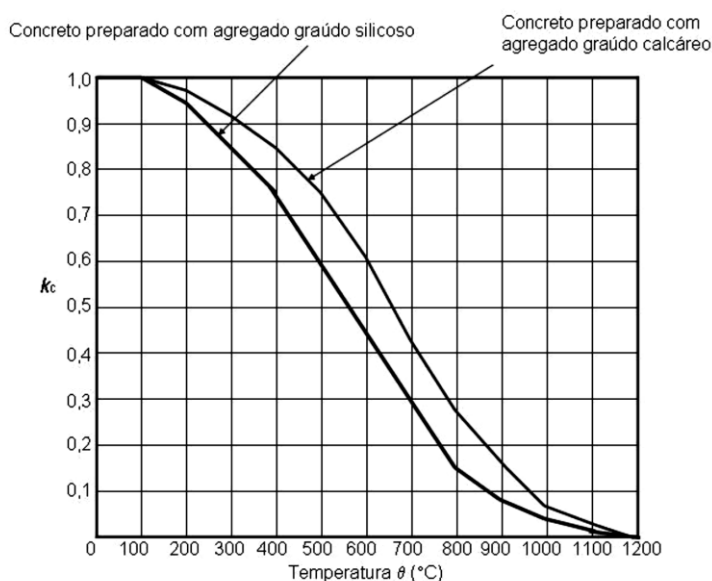
$f_{c,\theta}$: Resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas;

$E_{c,\theta}$: Módulo de elasticidade do concreto submetido a diferentes temperaturas;

E_c : Módulo de elasticidade do concreto em situação normal.

Particularmente a perda significativa de resistência mecânica do concreto ocorre em temperaturas acima de 300°C. A resistência à compressão do concreto decresce com o aumento da temperatura conforme mostrado na Figura 7:

Figura 7 - Fator de redução da resistência do concreto em função da temperatura.



Fonte: NBR 15200 (ABNT, 2012).

A resistência a compressão passa a ser obtida pela Equação 6:

$$f_{c,\theta} = K_{c,\theta} \times f_{ck} \quad (6)$$

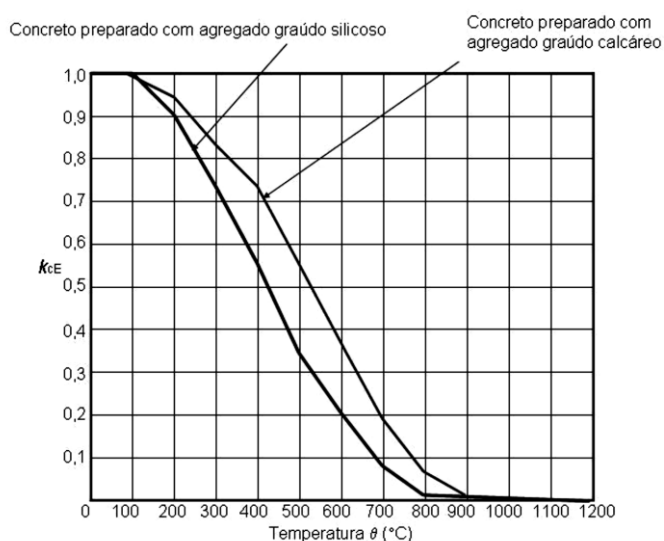
Sendo:

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto em situação normal;

$K_{c,\theta}$: Fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ .

O módulo de elasticidade do concreto também decresce com o aumento da temperatura, conforme mostrado na Figura 8:

Figura 8 - Fator de redução do módulo de elasticidade do concreto em função da temperatura.



Fonte: NBR 15200 (ABNT, 2012).

O módulo de elasticidade do concreto passa ser obtido com a Equação 7:

$$E_{ci,\theta} = K_{cE,\theta} \times E_{ci} \quad (7)$$

Sendo:

E_{ci} : Módulo de elasticidade inicial do concreto em situação normal;

$K_{cE,\theta}$: Fator de redução do módulo de elasticidade do concreto na temperatura θ .

Outro fator importante é o alongamento específico, para o concreto de densidade normal com agregado silicioso é calculado com as Equações 8 e 9 (de acordo com a temperatura), segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012) e o Eurocode 2 (CEN, 2004):

- Para $20 \text{ °C} \leq \theta_c < 700 \text{ °C}$

$$\frac{\Delta l}{l} = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \times \theta_c + 2,3 \times 10^{-11} \theta_c^3 \quad (8)$$

- Para $700\text{ °C} \leq \theta_C \leq 1200\text{ °C}$

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 \times 10^{-3} \quad (9)$$

De forma simplificada, a relação entre o alongamento específico do concreto e a temperatura pode ser considerada constante, conforme Equação 10:

$$\frac{\Delta l}{l} = 18 \times 10^{-3} \times (\theta_C - 20) \quad (10)$$

O alongamento específico do concreto de densidade normal com agregado calcário é determinado da forma apresentada nas Equações 11 e 12:

- Para $20\text{ °C} \leq \theta_C < 700\text{ °C}$

$$\frac{\Delta l}{l} = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \times \theta_C + 1,4 \times 10^{-11} \times \theta_C^3 \quad (11)$$

- Para $700\text{ °C} \leq \theta_C \leq 1200\text{ °C}$

$$\frac{\Delta l}{l} = 12 \times 10^{-3} \quad (12)$$

Sendo

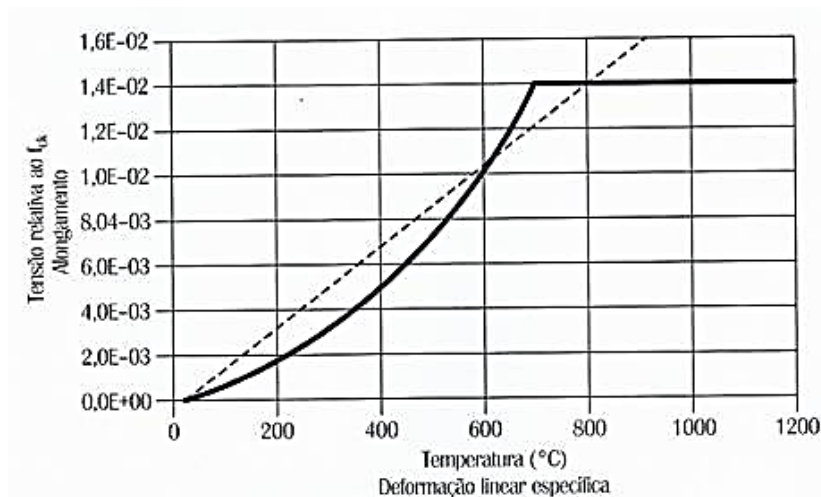
l : Comprimento da peça de concreto a 20 °C ;

Δl : Alongamento do elemento de concreto provocado pela temperatura;

θ_C : Temperatura do concreto em graus Celsius.

Na Figura 9, tem se a variação do alongamento específico do concreto de densidade normal com agregado silicioso em temperaturas diferentes.

Figura 9 - Alongamento específico do concreto de densidade normal com agregado silicioso.



Fonte: SILVA (2012).

O calor específico ($C_p\theta$) do concreto seco ($u = 0\%$) silicioso ou calcário pode ser determinado pelas Equações 13 a 16:

$$C_p\theta = 900 \left(\frac{J}{kg} \text{ } ^\circ\text{C} \right) \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \quad (13)$$

$$C_p\theta = 900 + (\theta - 100) \left(\frac{J}{kg} \text{ } ^\circ\text{C} \right) \text{ para } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \quad (14)$$

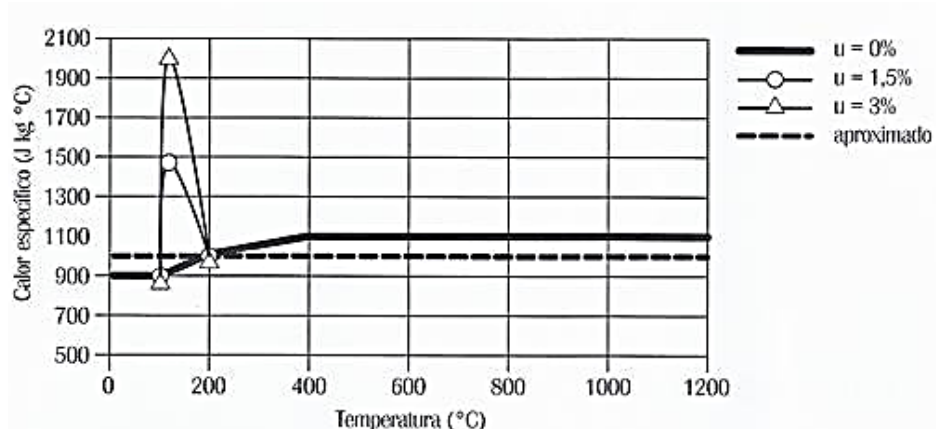
$$C_p\theta = 1000 + \frac{(\theta - 200)}{2} \left(\frac{J}{kg} \text{ } ^\circ\text{C} \right) \text{ para } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$C_p\theta = 1100 \left(\frac{J}{kg} \text{ } ^\circ\text{C} \right) \text{ para } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (16)$$

Segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012), quando a umidade não for considerada, a relação entre calor específico do concreto e a sua temperatura pode ser considerada constante ($C_{p,top}$) situado entre 100°C e 115°C . De forma simplificada, a relação entre calor específico do concreto e a temperatura pode ser considerada constante igual a $1000 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$.

A variação do calor específico do concreto com a temperatura, sendo $u =$ umidade (%), pode ser vista na Figura 10:

Figura 10 - Calor específico do concreto.



Fonte: SILVA (2012).

Outro fator a ser explanado é a condutividade térmica, para concretos de densidade normal com agregados silicoso ou calcário é dada em W/m °C. Pode ser determinada para $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$ através das Equações 17 e 18:

$$\lambda_{min} = 1,36 - 0,136 \times \frac{\theta_c}{100} + 0,0057 \times \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad (17)$$

$$\lambda_{max} = 2 - 0,2451 \times \frac{\theta_c}{100} + 0,0107 \times \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad (18)$$

Sendo:

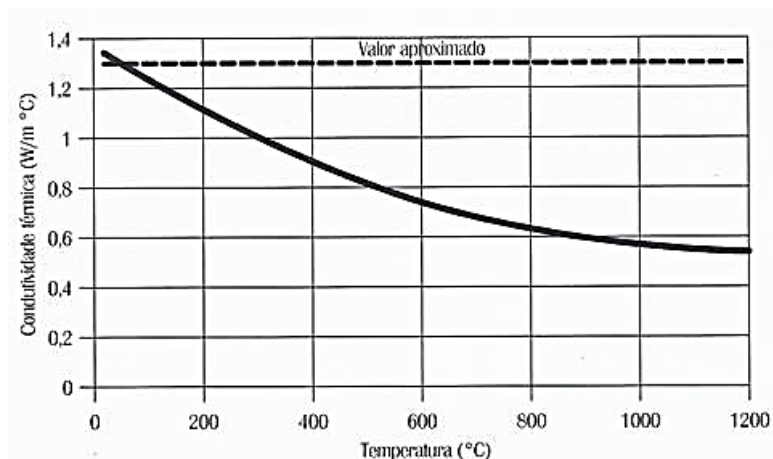
λ_{max} : Valor máximo adequado para estruturas;

λ_{min} : Valor mínimo adequado para estruturas;

θ_c : Temperatura do concreto em °C.

De forma simplificada, a relação entre a condutividade térmica do concreto e a temperatura pode ser considerada constante. Nesse caso, pode ser considerada igual a 1,3 W/m °C (NBR 15200, ABNT 2012). Como pode se observar na Figura 11:

Figura 11 - Condutividade térmica do concreto.



Fonte: SILVA (2012).

Segundo Silva (2012), a variação da densidade $\rho(\theta)$ com a temperatura é influenciada pela perda de água. Pode ser determinada conforme as Equações 19 a 22 apresentadas na EUROCODE 2 (CEN, 2004).

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \text{ para } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C} \quad (19)$$

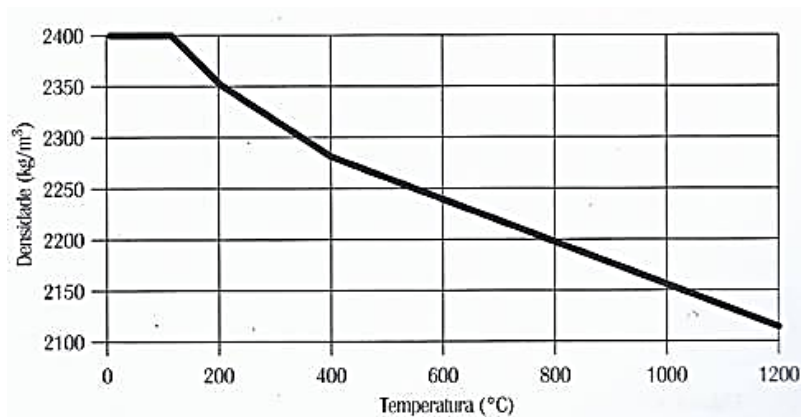
$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \times \left(1 - 0,02 \times \frac{\theta - 115}{85}\right) \text{ para } 115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \quad (20)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \times \left(0,98 - 0,03 \times \frac{\theta - 200}{200}\right) \text{ para } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \quad (21)$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \times \left(0,95 - 0,07 \times \frac{\theta - 400}{800}\right) \text{ para } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (22)$$

A variação da densidade do concreto pode ser vista na Figura 12:

Figura 12 - Densidade do concreto.



Fonte: SILVA (2012).

2.4 AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Segundo Almeida (2002), aço é uma liga metálica composta principalmente de ferro e de pequenas quantidades de carbono. Segundo Ricardo (2015), como o concreto simples apresenta pequena resistência à tração e é frágil, é altamente conveniente a associação do aço ao concreto, obtendo-se o concreto armado.

De acordo com Pinheiro *et al.* (2010), as características mecânicas mais importantes para a definição de um aço são o limite elástico, a resistência e o alongamento na ruptura. Essas características são determinadas em ensaios de tração.

Segundo Rizzo (2013), em situações de incêndio o comportamento do aço é preocupante quanto a sua deformação. Em temperaturas superiores a 550 °C, o aço começará a perder a sua margem de segurança definida no projeto, iniciando o processo de flambagem localizada e, por consequência, a compartimentação e a integridade do conjunto poderão ser comprometidas.

Os aços utilizados em estruturas de concreto armado no Brasil são especificados pela norma NBR 7480 (ABNT, 2007), que determina as condições exigíveis na encomenda; fabricação e fornecimento de barras e fios de aço para uso em armaduras.

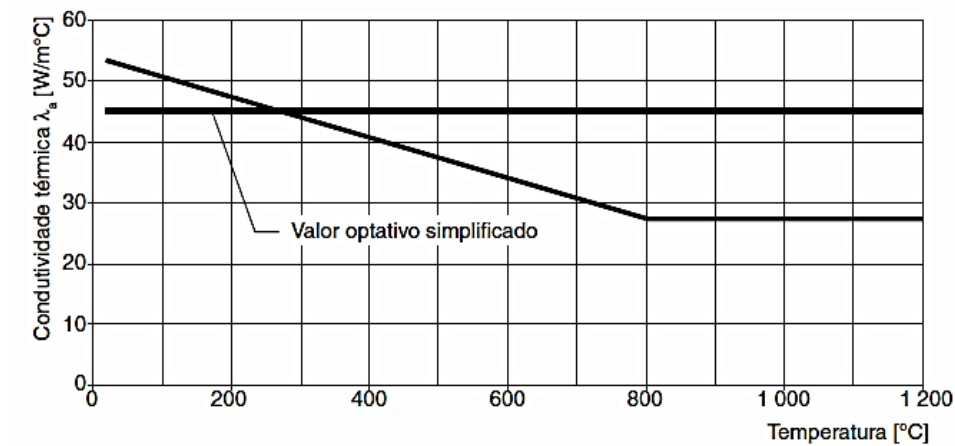
De acordo com a NBR 14323 (ABNT, 2013), a massa específica do aço independe da temperatura e pode ser considerada como sendo igual a 7850 kg/m³. A condutividade térmica (λ_a) do aço expressa em Watts por metro e por graus Celsius (W/m°C), pode ser determinada com as Equações 23 e 24:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \times \theta_a \quad \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C} \quad (23)$$

$$\lambda_a = 27,3 \quad \text{para } 800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (24)$$

Onde θ_a , é a temperatura do aço em °C. De forma simplificada, desconsiderando a temperatura do aço, a norma NBR 14323 (ABNT, 2013) considera $\lambda_a = 45 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Figura 13).

Figura 13 - Condutividade Térmica do aço em função da temperatura.



Fonte: NBR 14323 (ABNT, 2013).

A norma NBR 14323 (ABNT, 2013), possibilita que o calor específico do aço também pode ser considerado de forma simplificada independente da temperatura como sendo igual a $600 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$ (Joule por quilograma e por graus Celsius).

Segundo a NBR 15200 (ABNT, 2012), a resistência ao escoamento do aço da armadura passiva decresce com o aumento de temperatura, pode ser obtida pela Equação 25:

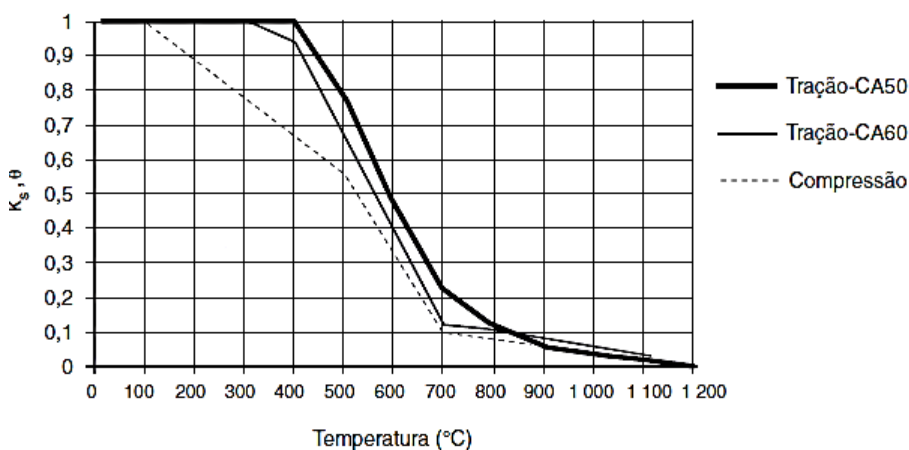
$$f_{yk,\theta} = k_{s,\theta} \times f_{yk} \quad (25)$$

Sendo:

f_{yk} : Resistência característica do aço de armadura passiva em situação normal;

$k_{s,\theta}$: Fator de redução da resistência do aço na temperatura θ , obtido de acordo com a Figura 14 a seguir:

Figura 14 - Fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em função da temperatura.



Fonte: NBR 15200, (ABNT, 2012).

Em situação normal, o valor da resistência característica ao escoamento do aço (f_{yk}) de armadura passiva denominado CA-60 é equivalente a 600 MPa. Por armadura passiva entende-se aquela que não é usada para produzir forças de protensão.

O módulo de elasticidade do aço da armadura passiva também decresce com o aumento da temperatura, e pode ser obtido pela Equação 26:

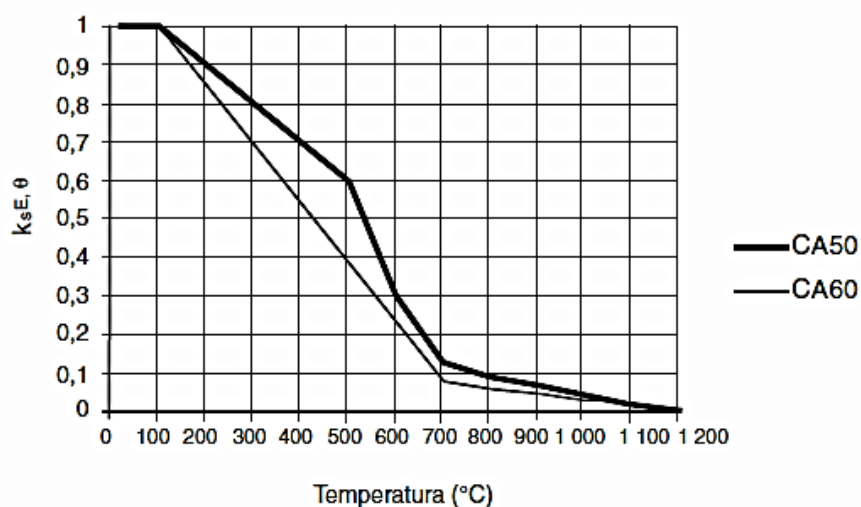
$$E_{s,\theta} = k_{E_s,\theta} \times E_s \quad (26)$$

Sendo:

$E_{s,\theta}$: Módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em situação normal;

$k_{E_s,\theta}$: Fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura θ , obtido conforme Figura 15:

Figura 15 - Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura.



Fonte: NBR 15200 (ABNT, 2012).

O módulo de elasticidade do aço em situação normal pode ser considerado igual 210 GPa de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). O módulo de elasticidade (E) indica a rigidez de um material, quanto maior for o módulo de elasticidade mais rígido será o material.

Os valores de redução (k) também são tabelados de acordo com a norma NBR 15200 (ABNT, 2012), apresentada de forma simplificada de acordo com as temperaturas de interesse do ensaio (Tabela 3):

Tabela 3 - Valores das relações para as temperaturas estudadas em aço de armadura passiva.

Temperatura do aço (°C)	$k_{yq} = f_{yk,\theta} / f_{yk}$		$k_{Es,\theta} = E_{s,\theta} / E_s$
	Tração CA-60	Compressão CA-60	CA-60
20	1,00	1,00	1,00
200	1,00	0,89	0,87
400	0,94	0,67	0,56
600	0,40	0,33	0,24
800	0,11	0,08	0,06
1000	0,05	0,04	0,03

Fonte: Adaptada de NBR 15200 (ABNT, 2012).

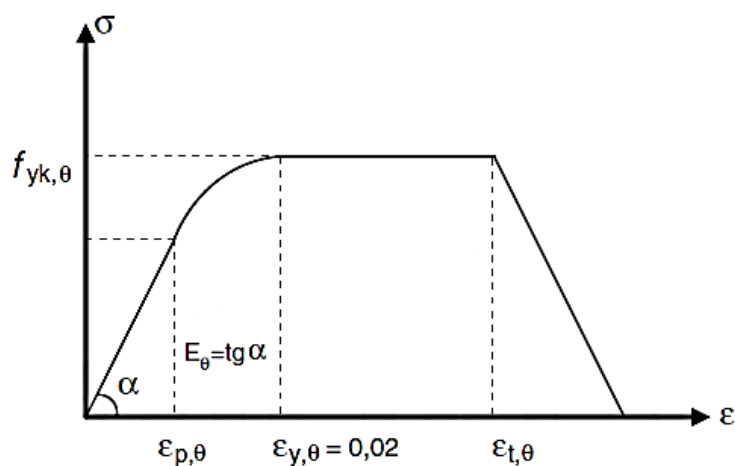
Sendo:

k_{yq} : Relação entre a resistência ao escoamento do aço da armadura passiva submetido a diferentes temperaturas;

$k_{Es,\theta}$: Relação entre o módulo de elasticidade do aço submetido a diferentes temperaturas;

Desta forma obtêm-se o diagrama tensão-deformação dos aços a altas temperaturas, o aspecto desse diagrama está representado na Figura 16:

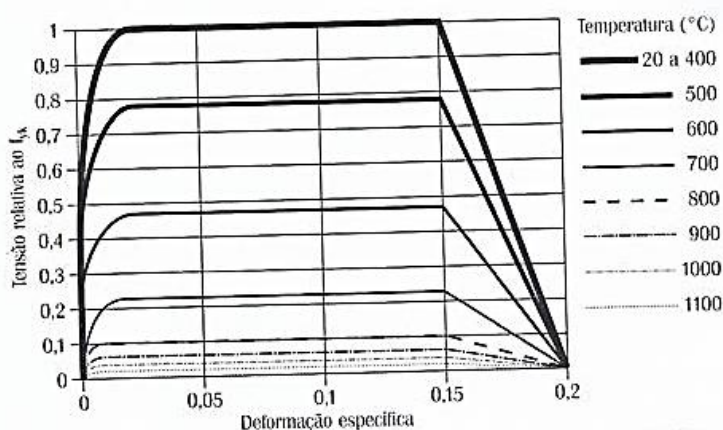
Figura 16 - Diagrama tensão-deformação dos aços a altas temperaturas.



Fonte: NBR 15200 (ABNT, 2012).

Silva (2012), apresenta comparação do diagrama tensão-deformação em determinadas temperatura, como mostra Figura 17:

Figura 17. Diagrama tensão-deformação para diversas temperaturas.



Fonte: Silva (2012).

A resistência característica ao escoamento f_{yk} , a resistência correspondente ao limite de proporcionalidade f_p e o módulo de deformação longitudinal E dos aços estruturais têm seus valores reduzidos com o aumento da temperatura (SILVA,2012).

2.4.1 AÇO CA-60

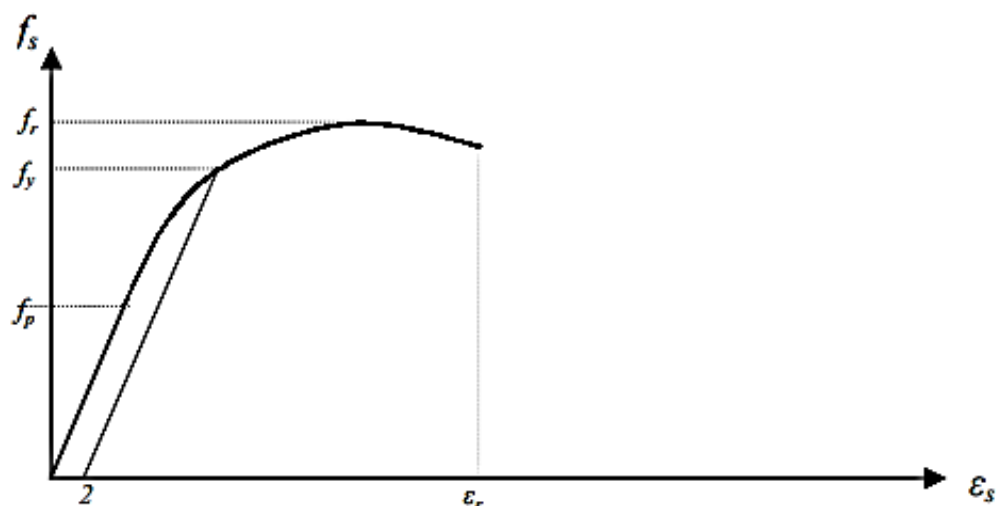
Segundo Pinheiro *et al.* (2010), o ponto de partida para obtenção do aço é o minério de ferro. O processo de transformação do minério de ferro em aço ocorre em quatro grandes estágios: preparação ou tratamento do minério e do carvão; redução do minério de ferro; refino e tratamento mecânico. A diferenciação entre aços CA-50 e CA-60 ocorre no tratamento mecânico, para obtenção dos aços CA-50 ocorre tratamento a quente, e tratamento a frio para obtenção de aços CA-60.

O processo é realizado abaixo da zona de temperatura crítica, onde os grãos permanecem deformados e ocorre o encruamento do aço. Segundo Costa e Silva (2002), os aços CA-60 são deformados a frio para aumento das tensões de escoamento e ruptura; diminuição da resistência à corrosão e da ductilidade, ou seja, decréscimo do alongamento e da estricção.

Segundo Freitas Jr (2007), o processo de encruamento do aço CA-60 ocorre por torção combinada com tração, ambas responsáveis pela mudança de textura do aço e pelo aumento de sua resistência. Observa-se que o aumento de resistência é conseguido à custa de uma grande diminuição da tenacidade. De fato, o alongamento de ruptura abaixa de 20% para 6 a 8%. Havendo defeitos no material, ele rompe por ocasião do encruamento, o que torna o processo de fabricação um verdadeiro ensaio de detecção de defeitos. Uma torção exagerada ou tração excessiva podem encruar demasiado o material, que terá uma resistência muito elevada, mas ductilidade insuficiente (alongamento de ruptura muito baixo).

Sendo assim, o diagrama tensão-deformação do aço altera-se de forma a não apresentar patamar de escoamento definido, de acordo com Figura 18:

Figura 18 - Diagrama tensão-deformação aço CA-60 em situação normal.



Fonte: Almeida (2002).

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), define-se limite de escoamento f_y , para os aços deformados a frio, como a tensão que corresponde a uma deformação permanente de 0,2%. Segundo Rasma (2015), a tensão do escoamento é a tensão máxima suportada pelo corpo de prova no estado elástico, que delimita o início das deformações plásticas. O limite de proporcionalidade é indicado por f_p , onde as tensões obedecem a lei de Hooke sendo proporcionais as deformações. Posteriormente tem-se f_r , que representa a tensão de ruptura do material.

Segundo Costa e Silva (2002), os aços CA-60 quando submetidos a altas temperaturas (incêndios), sofrem as mesmas reações dos aços laminados e ainda tendem a uniformizar a distribuição dos grãos, retomando a estrutura original antes do encruamento. Dessa forma, o aço encruado transforma-se em aço laminado, e essa mudança de classe implica em uma redução de resistência de até 50% daquela inicial.

As principais características dimensionais e de propriedades mecânicas do aço estão de acordo com a NBR 7480 (ABNT, 2007) referente a aços CA-60. Tais características são apresentadas na Tabela 4, cujo valores estão adaptados da norma NBR 7480 (ABNT, 2007), contendo somente os dados para o aço em estudo.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas exigíveis.

Categoria	Valores mínimos de tração		
	Resistência característica de escoamento (f_{yk} , em MPa)	Limite de resistência (f_{st} , em MPa)	Alongamento após ruptura (%)
CA-60	600	1,05 f_y	5

Fonte: Adaptada NBR 7480 (ABNT, 2007).

2.5 RESFRIAMENTO E PÓS-INCÊNDIO

Devido à proximidade entre os coeficientes de dilatação térmica do aço e do concreto a utilização conjunta destes materiais resulta num excelente desempenho, porém, o aço é um bom condutor de calor, enquanto o concreto um isolante térmico (MORALES, *et al.* 2011).

Segundo Costa e Silva (2002, apud Prado 1998), o calor se propaga mais rápido e uniformemente ao longo das ferragens enquanto o concreto permanece com uma temperatura média mais baixa, logo, as armaduras se dilatam mais do que o concreto. As barras flambam e comprimem a zona de aderência aço-concreto comprimindo a interface ocorrendo a perda de aderência e ancoragem.

O concreto ao ser resfriado, geralmente, não recupera a resistência inicial (SILVA 2012, apud GUO; SHI 2011). Segundo Silva (2012), o valor da resistência após o resfriamento depende da temperatura atingida durante o incêndio e da velocidade de resfriamento, quanto mais rápido o resfriamento, mais prejudicial será para a resistência do concreto.

O resfriamento brusco da temperatura é responsável pelas maiores perdas de resistência do concreto. Quando é realizado o resfriamento lento existe a possibilidade de recuperação de até 90% da resistência inicial, dependendo da temperatura máxima atingida (MORALES, *et al.* 2011).

Segundo Silva (2012), a elevação da temperatura no aço provoca alterações em sua cristalografia. Até o aço atingir cerca de 720 ° C, pode-se considerar que ele recupera totalmente a resistência inicial ao ser resfriado.

Apesar do dimensionamento levar em consideração a situação de incêndio, podem ocorrer deformações e fissuras que são aceitas, porém antes de reutilizar a estrutura é necessário fazer algumas verificações como recomenda a norma NBR 15200 (ABNT, 2012):

[...] Como plastificações, ruínas e até colapsos locais são aceitos, a estrutura só pode ser reutilizada após um incêndio se for vistoriada, tiver sua capacidade remanescente verificada e sua recuperação for projetada e executada. Essa recuperação pressupõe

o atendimento de todas as capacidades últimas e de serviço exigidas para a condição de uso da estrutura antes da ocorrência do incêndio ou para uma eventual nova condição de uso (NBR 15200, 2012. Pg. 12).

Dimensionar a estrutura para a situação de incêndio não impede que haja deformações e fissuras exageradas, a menos que o incêndio tenha sido de pequena severidade ou se a estrutura tinha proteção superabundante (SILVA, 2012).

3 MÉTODO DO ENSAIO

Os corpos de prova possuem diâmetro de 5 mm e comprimento de aproximadamente 30 cm para que possam ser aquecidos no forno da Figura 19. A marca utilizada para o aço é Gerdau (GG-60), possui certificação INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e além disso, desempenha os parâmetros de qualidade ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Os corpos de prova do aço GG-60 foram submetidos a altas temperaturas, simulando uma situação de incêndio com a utilização de um forno mufla (Figura 19), em diferentes temperaturas e tempos de exposição.

Figura 19 - Forno industrial (Temperatura máxima 1200 °C).



Fonte: Autora.

Após o aquecimento, as barras foram retiradas do forno mufla com auxílio de pinça tenaz e luvas com fios de aramida e demais equipamento para proteção individual (Figura 20).

Figura 20 - Processo de retirada das barras após aquecimento.



Fonte: Autora.

Após a retirada das barras de aço do forno mufla, foram colocadas em bandejas metálicas (Figura 21) para resfriamento ao ar até atingirem temperatura ambiente.

Figura 21. Resfriamento ao ar.



Fonte: Autora.

O ensaio de tração foi realizado com as barras de aço já resfriadas. O equipamento utilizado é a prensa universal como mostra a Figura 22, sendo manuseado de acordo com a NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2013).

Figura 22 - Prensa Universal.



Fonte: Autora.

Figura 23 - Técnico do laboratório operando prensa universal durante ensaio de tração.



Fonte: Autora.

Antes da realização do ensaio de tração, cada corpo de prova teve seu comprimento total inicial medido com auxílio de paquímetro (Figura 24), além disso, foram marcados 5 cm em cada extremidade das barras para delimitar a posição das garras no corpo de prova. A partir da medida do comprimento inicial total, diminuindo o comprimento das garras, tem-se o L_0 , utilizado para o cálculo do módulo de elasticidade.

Figura 24 - Medição das barras com auxílio de paquímetro.



Fonte: Autora.

Para obtenção do módulo de elasticidade pela prensa universal é necessário a utilização de extensômetro (Figura 25), porém, a utilização deste equipamento não é recomendada em barras que sofreram algum tipo de aquecimento pelo risco de danificar o mesmo. Desta forma, só foi possível utilizá-lo nos corpos de prova em situação normal, nos demais corpos de prova, o módulo de elasticidade foi calculado de acordo com o item 4.3.

Figura 25 - Extensômetro.



Fonte: Autora.

Considerando a necessidade de se obter um resultado confiável, o ensaio deve ser feito com 6 corpos de prova por lote, ou seja, para cada situação de temperatura e tempo de exposição.

Cada corpo de prova tem sua designação formada por três caracteres que representam, respectivamente:

Número do Lote (1 a 11) – Temperatura atingida (200 °C; 400 °C; 600°C; 800°C ou 1000°C) – Tempo de exposição as altas temperaturas (60 min ou 120 min)

A Tabela 5 a seguir contém a designação dos lotes de corpos de prova:

Tabela 5 - Lotes dos corpos de Prova.

Número do Lote	Temperatura Atingida (°C)	Tempo de Exposição (Min)	Designação Final
L1	200	60	L1-200-60
L2	200	120	L2-200-120
L3	400	60	L3-400-60
L4	400	120	L4-400-120
L5	600	60	L5-600-60
L6	600	120	L6-600-120
L7	800	60	L7-800-60
L8	800	120	L8-800-120
L9	1000	60	L9-1000-60
L10	1000	120	L10-1000-120
L11	Temperatura ambiente	-	L11

Como pode ser observado na Tabela 5, são 11 lotes com 6 corpos de prova cada, totalizando 66 corpos de prova. O lote 11 (L11) é submetido apenas ao ensaio de tração para obtenção de sua respectiva resistência em condições normais, neste lote foi possível a utilização do extensômetro.

A Figura 26 ilustra um corpo de prova de cada lote após o aquecimento e resfriamento ao ar, percebeu-se a grande variação nas cores das barras de aço e o aumento da degradação da seção transversal, o número em amarelo representa o lote ao qual a barra de aço pertence.

Figura 26 - Corpos de prova da marca Gerdau após aquecimento e resfriamento.



Fonte: Autora.

Os corpos de prova aquecidos a 800 °C e 1000 °C tiveram que passar pelo processo de descamação e limpeza, já que as barras de aço passaram a esfarelar (Figura 27), fazendo com que as garras da prensa universal se prendam adequadamente ao material ensaiado, evitando o deslocamentos.

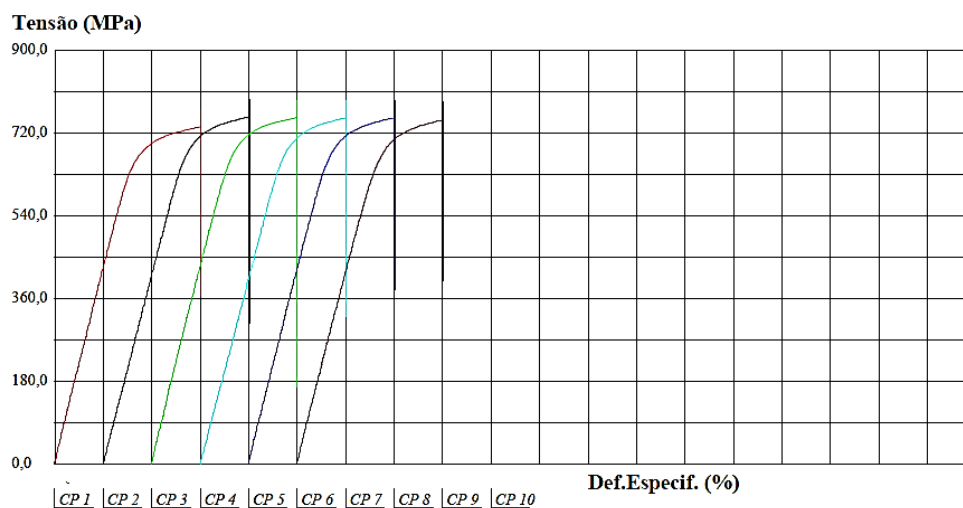
Figura 27. Barra aquecida a 800 graus Celsius.



Fonte: Autora.

Durante o ensaio de tração a prensa universal gera o diagrama tensão-deformação para cada corpo de prova, totalizando 6 diagramas tensão-deformação por lote, como mostra a Figura (28).

Figura 28 - Exemplo de Diagrama tensão-deformação gerado a partir do ensaio de tração (L11 com extensômetro).



Fonte: Autora.

Juntamente com os diagramas (Figura 28), a prensa universal gerou arquivos com todas as forças e deslocamentos correspondentes para cada corpo de prova em cada fração de segundo. A partir desses dados foi possível calcular os módulos de elasticidade; tensões de escoamento e resistências últimas apresentados no item 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos itens a seguir serão abordados os resultados encontrados no ensaio exposto na metodologia anterior, determinando a resistência ao escoamento, resistência última e módulo de elasticidade.

4.1 DETERMINAÇÃO RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

A tensão de escoamento (σ_{esc}) é determinada pelo ponto de interseção entre a curva de tensão-deformação, traçada uma reta paralela à sua porção linear e que fica distante 0,002 ou 0,2% da origem do eixo das deformações. A importância do limite de escoamento para um metal é a medida de sua resistência à deformação plástica.

As tensões de escoamento para todos os corpos de prova foram fornecidos pelo relatório da prensa universal (ANEXO C). Na Tabela 6 tem-se os valores médios de cada lote.

Tabela 6 - Tensão de escoamento.

Lote	Temperatura °C	Tempo (Minutos)	σ_{esc} (MPa)
L11	0	0	759,60
L1	200	60	756,80
L2	200	120	756,60
L3	400	60	715,00
L4	400	120	706,00
L5	600	60	349,60
L6	600	120	331,00
L7	800	60	328,40
L8	800	120	321,00
L9	1000	60	295,80
L10	1000	120	261,50

De acordo com a NBR 7480 (ABNT, 2007), para o aço CA-60 é esperado que se tenha resistência característica ao escoamento de, no mínimo, 600 MPa. A partir da tabela 6 verificou-se que as tensões de escoamento apresentadas pelos corpos de prova em situação normal foram superiores ao esperado.

A redução da tensão de escoamento para 200 °C com aquecimento de 60 minutos e 120 minutos foram de, respectivamente, 0,37 % e 0,39%. A 400 °C houve redução da tensão ao escoamento, sendo 5,87% inferior em relação a tensão de escoamento inicial, quando aquecido durante 60 minutos e 7,05 % quando aquecido durante 120 minutos.

As barras aquecidas a 600 °C sofreram aumento significativo na redução da tensão de escoamento, alcançando valores próximos a 50 % da resistência ao escoamento inicial. Isso ocorre pois, segundo Costa (2011), a redução da resistência ao escoamento nos aços é linear até 400°C e, a partir daí, decai acentuadamente. Além disso, em temperaturas superiores a 550 °C o aço começa a perder suas características resistivas, tratando-se da temperatura crítica deste material.

Os corpos de prova aquecidos a 800 °C tiveram redução da tensão de escoamento superior a 55%. Por fim, percebeu-se que as barras aquecidas a 1000 °C tiveram redução superior a 60%, chegando em 65,57 % quando aquecidas durante 120 minutos.

Percebeu-se também que a variação do tempo de exposição das barras (60 e 120 minutos) não influenciou de maneira tão significativa na redução da resistência quanto o aumento da temperatura. Como pode ser observado na Tabela 6, a principal diferença ocorreu com as barras aquecidas a 1000 °C, desta forma, durante 60 minutos a resistência ao escoamento foi de 295,8 MPa e quando aquecidas durante 120 minutos a resistência ao escoamento foi de 261,50 MPa, totalizando uma diferença de 34,3 MPa.

Além da redução progressiva da resistência do aço, este passou a apresentar incandescência quando aquecido a 800 °C e 1000 °C (Figura 29).

Figura 29 - Incandescência.



Fonte: Autora.

Além da incandescência, as barras aquecidas a 1000 °C começaram a perder parte de sua estrutura, sofrendo o processo de desagregação (Figura 30), diminuindo a área de seção transversal da barra.

Figura 30. Desagregação das barras de aço a 1000 graus Celsius.



Fonte: Autora.

De acordo com a norma NBR 15200 (ABNT, 2012), o fator de redução de resistência ao escoamento é determinado pela Fórmula (27):

$$K_{s,\theta} = f_{yk,\theta} / f_{yk} \quad (27)$$

Sendo:

$K_{s,\theta}$: Fator de redução da resistência do aço na temperatura θ ;

$f_{yk,\theta}$: Resistência característica ao escoamento do aço na temperatura θ ;

f_{yk} : Resistência característica ao escoamento do aço em temperatura ambiente.

A Tabela 7 a seguir, apresenta a comparação dos fatores de redução encontrados no ensaio com aqueles fornecidos pela NBR 15200 (ABNT, 2012):

Tabela 7 - Fator de redução da resistência ao escoamento.

Temperatura °C	Tempo (Minutos)	$K_{s,\theta}$ (Ensaio)	$K_{s,\theta}$ Norma NBR 15200 (ABNT,2012)
200	60	0,996	1,00
200	120	0,996	
400	60	0,941	0,94
400	120	0,929	
600	60	0,460	0,40
600	120	0,436	
800	60	0,432	0,11
800	120	0,423	
1000	60	0,389	0,05
1000	120	0,344	

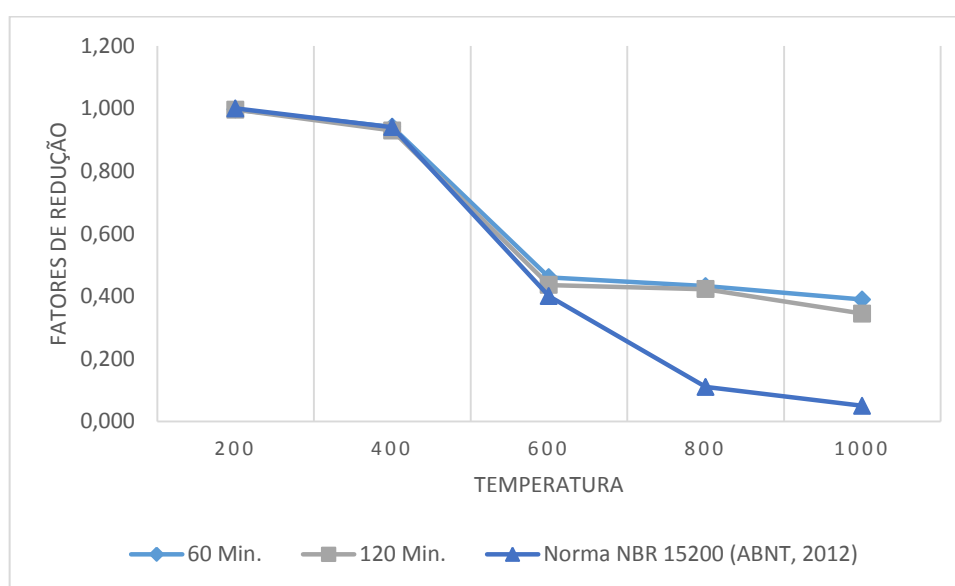
Percebeu-se que a maioria dos valores da redução da resistência ao escoamento do aço foram superiores ou próximos aos fatores da norma NBR 15200 (ABNT, 2012). O principal motivo que ocasionou este aumento do fator de redução foi o resfriamento ao ar, pois, segundo Silva *et al.* (2007), após o resfriamento à temperatura ambiente, as propriedades mecânicas residuais do aço serão as mesmas encontradas na condição pré-incêndio.

O resfriamento das barras de aço ocasionou o ganho da resistência ao escoamento, enquanto que a norma trata de fatores da redução da resistência ao escoamento a uma determinada temperatura, desconsiderando qualquer possibilidade de recuperação de resistência com o resfriamento ao ar ou com água.

Para os corpos de prova aquecidos a 600 °C; 800 °C e 1000 °C, é recomendável a utilização dos fatores de redução da norma já que estes foram inferiores aos encontrados no ensaio, logo, a resistência de cálculo será menor, priorizando a segurança da edificação.

No Gráfico 1, tem-se a comparação da curva temperatura x fator de redução da resistência ao escoamento entre os valores obtidos no ensaio com os valores da norma NBR 15200 (ABNT, 2012).

Gráfico 1. Fator de Redução da Resistência Característica ao Escoamento.



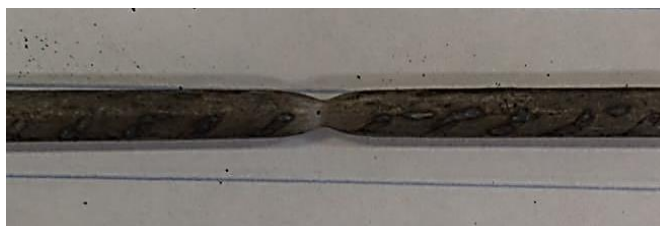
Percebe-se que as curvas do ensaio (60 Min. e 120 Min.), apresentadas pelo Gráfico 2, ficaram bastante próximas entre si e distantes da curva fornecida pela norma 15200 (ABNT, 2012) principalmente nas temperaturas de 800 °C e 1000 °C. Desta forma, o dimensionamento de estruturas em situação de incêndio utilizando apenas os fatores apresentados na norma 15200 (ABNT, 2012), torna-se viável para o aço CA-60.

4.2 DETERMINAÇÃO RESISTÊNCIA ÚLTIMA

A tensão última é determinada como a tensão máxima suportada pelo material, a partir da qual ocorre a estrição deste, que representa o início da ruptura. A ductilidade é a capacidade do material de se deformar plasticamente sem se romper. Pode ser medida por meio do alongamento específico (ϵ) ou da estrição. Quanto mais dúctil o aço, maior é a redução da área ou o alongamento antes da ruptura.

Ao sofrer tratamento mecânico a frio (encruamento), o aço CA-60 passa a ter sua ductilidade reduzida, porém, percebeu-se que as barras aquecidas em temperaturas iguais ou superiores a 600 °C, perderam essa propriedade e passaram a apresentar estrição visualmente significativa (Figura 31).

Figura 31 - Estrição.



Fonte: Autora.

Segundo Rasma (2015), a partir dos valores das cargas máximas, pode-se calcular as tensões últimas. A tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) ocorre quando a carga atinge o ponto máximo de carregamento, que por sua vez, é imediatamente anterior ao início da estrição e, portanto, da queda da carga, caracterizada por uma rápida redução local da seção de fratura. A tensão de ruptura por sua vez, é a tensão suportada pelo material antes da fratura.

Os valores da tensão máxima são fornecidos pelo relatório da prensa universal para cada corpo de prova, a Tabela 8 apresenta apenas os valores médios, sendo que todos os valores encontrados estão tabelados no ANEXO D.

Tabela 8 - Tensão Última.

Lote	Temperatura °C	Tempo (Minutos)	σ_u (MPa)
L11	0	0	770,8
L1	200	60	765,9
L2	200	120	765,5
L3	400	60	750,9
L4	400	120	743,8
L5	600	60	438,9
L6	600	120	423,6
L7	800	60	347,2
L8	800	120	337
L9	1000	60	308,5
L10	1000	120	286,5

Logicamente os valores obtidos para a resistência última são ligeiramente superiores aos valores para resistência ao escoamento do aço.

Observa-se que a redução da tensão última para a temperatura de 200 °C com aquecimento de 60 ou 120 minutos, foi insignificante, sendo, respectivamente, 0,63% e 0,73%. A 400 °C houve um aumento da redução da tensão máxima, porém ainda menor que 5 %.

Para a temperatura de 600 °C ocorreu um aumento significativo na redução da tensão última, sendo próxima de 50 %, desta forma, o resultado é coerente com Rizzo (2013), que afirma ser 550 °C a temperatura aproximada onde o aço perde metade de sua capacidade resistiva.

Para as temperaturas de 800 °C e 1000 °C observa-se o aumento gradual da redução da tensão última obtida no ensaio, chegando a 62,97 % para os corpos de prova aquecidos durante 120 minutos em 1000 °C. A norma NBR 15200 (ABNT, 2012), não apresenta valores para o fator de redução da resistência última.

4.3 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Segundo Cossolino e Pereira (2010), o módulo de elasticidade é proporcional à rigidez de um material quando este é submetido a uma tensão externa de tração. Basicamente, é a razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo corpo, quando o comportamento é linear. Quanto maior terá que ser a tensão aplicada ao material para gerar alguma deformação, maior será o módulo de elasticidade.

A determinação do módulo de elasticidade está exposto na Equação (28), onde tem-se a constante de proporcionalidade entre a tensão axial e a deformação específica que ocorre até o limite de proporcionalidade do gráfico.

$$\sigma = \varepsilon \times E \quad (28)$$

Sendo:

σ : Tensão de tração no instante analisado (MPa);

ε : Deformação específica do material;

E: Módulo de elasticidade (MPa).

A tensão de tração é determinada pela Equação (29) onde a força aplicada (N) é obtida através do relatório da prensa universal. Os corpos de prova, como dito anteriormente, possuem diâmetro de 5mm, logo, a área é de 19,63 mm².

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (29)$$

Sendo:

F: Força aplicada (N);

A: Área da seção transversal da barra (mm²).

A deformação específica do material é obtida pela razão entre o alongamento do corpo de prova em dado instante e o comprimento inicial, conforme Equação (30).

$$\varepsilon = \frac{Lf - Lo}{Lo} = \frac{\Delta L}{Lo} \quad (30)$$

Sendo:

ε : Deformação específica;

ΔL : Alongamento do corpo de prova (mm) fornecido pela prensa universal;

L_0 : Comprimento inicial do corpo de prova (mm).

A parte útil do corpo de prova, identificado por L_0 , é a região onde são feitas as medidas das propriedades mecânicas do material, e as cabeças são as regiões extremas que servem para fixar o corpo de prova a máquina (Figura 32). Ou seja, para o cálculo do L_0 é necessário medir o comprimento total do corpo de prova e descontar o comprimento da cabeça, que no caso, foi de 5 cm.

Figura 32 - Determinação L_0 .

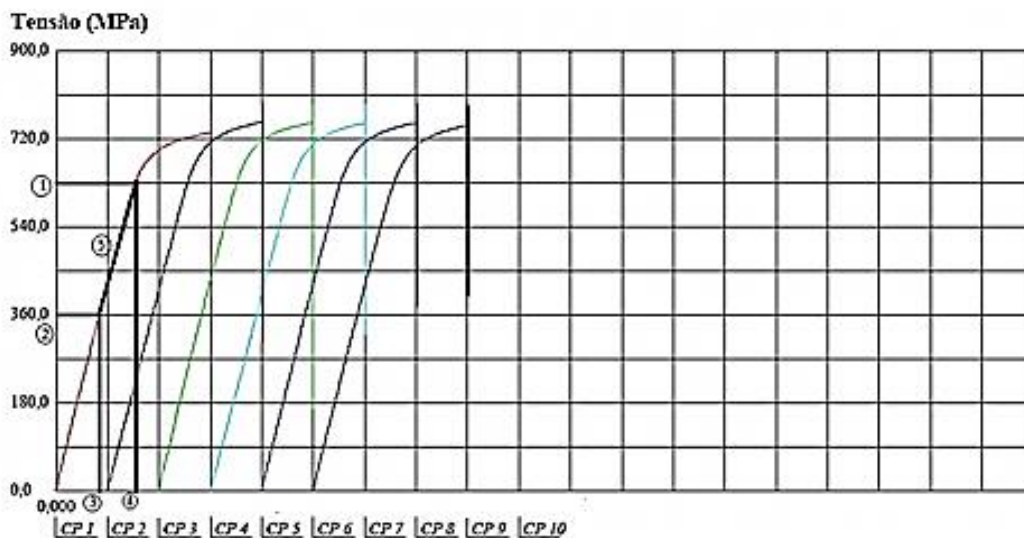


Fonte: Ricardo (2015).

A Lei de Hooke para determinação do módulo de elasticidade pode ser utilizada no trecho em que o diagrama apresenta variação linear, podendo ser aproximado por uma reta, respeitando o limite de proporcionalidade do gráfico, como exemplifica a Figura (33), onde:

- (1): Tensão superior σ_2 , em MPa;
- (2): Tensão inferior σ_1 , em MPa;
- (3): Variação do comprimento ΔL_1 , referente a σ_1 , em mm;
- (4): Variação do comprimento ΔL_2 , referente a σ_2 , em mm;
- (5): Reta formada a partir da ligação dos pontos.

Figura 33 - Aproximação por reta para determinação do módulo de elasticidade.



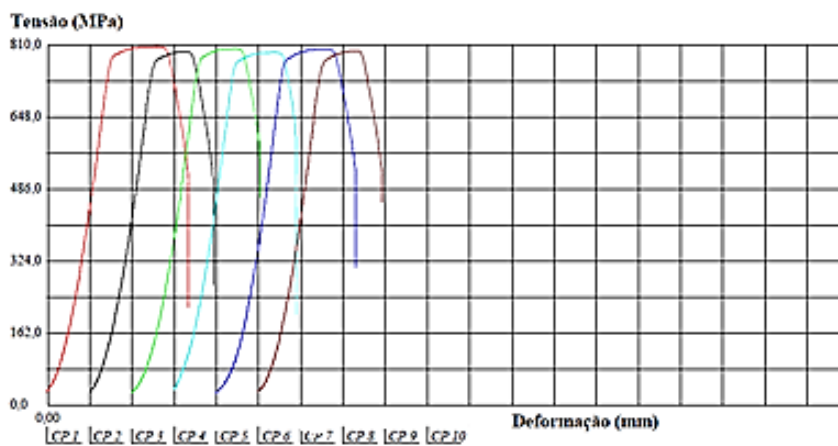
Fonte: Autora.

Desta forma, o módulo de elasticidade é a inclinação da reta demonstrada na Figura (32), calculado de acordo com a Equação (31):

$$E = \tan \theta = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\frac{\Delta L_2}{L_0} - \frac{\Delta L_1}{L_0}} \quad (31)$$

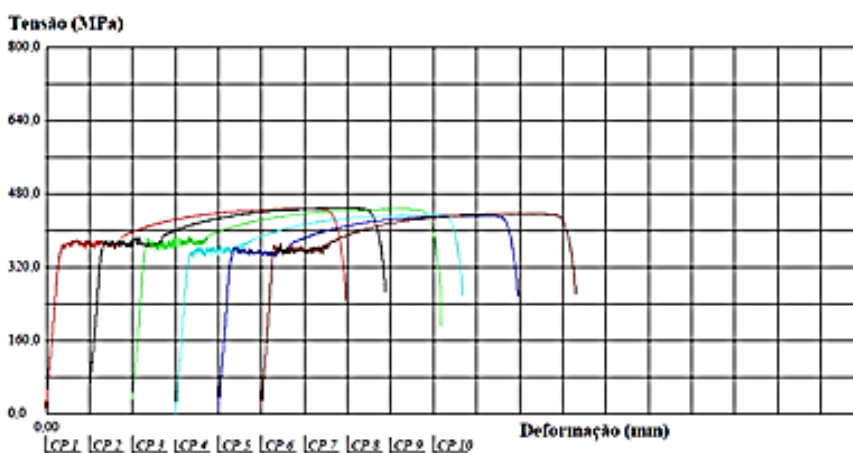
A prensa universal gerou diagramas tensão-deformação para todos os corpos de prova. Percebeu-se que os diagramas para temperaturas superiores a 600 °C apresentaram comportamento diferente dos corpos de prova aquecidos a temperaturas inferiores como comparado na Figura 34 e 35.

Figura 34 - Diagrama Tensão-Deformação para o lote aquecido a 200 °C durante 120 minutos.



Fonte: Autora.

Figura 35 - Diagrama Tensão-Deformação para o lote aquecido a 600 °C durante 120 minutos.



Fonte: Autora.

Segundo Costa (2002), o aço CA-60, submetido a altas temperaturas, superiores a 500 °C, além de sofrer as mesmas reações do aço CA-50, tende a uniformizar a distribuição dos grãos, retomando a estrutura original antes do encruamento. Portanto, o aço tipo CA-60 transforma-se em aço CA-50 e esta mudança de classe implica na mudança do diagrama tensão-deformação, passando a apresentar patamar de escoamento bem definido.

O resultado encontrado para os corpo de prova de cada lote está exposto no ANEXO E. Na Tabela 9, tem-se os valores dos módulos de elasticidade médio.

Tabela 9 - Módulos de elasticidade médios.

Lote	Temperatura °C	Tempo (Minutos)	E (GPa) Médio
L11	0	0	210,08
L1	200	60	204,60
L2	200	120	203,99
L3	400	60	200,06
L4	400	120	199,77
L5	600	60	151,66
L6	600	120	122,90
L7	800	60	113,96
L8	800	120	112,32
L9	1000	60	107,64
L100	1000	120	97,86

Observou-se que no aço aquecido a 200 °C durante 60 minutos houve redução insignificante de 2,61%, e durante 120 minutos a redução chegou a 2,90 %, ou seja, o efeito da temperatura não ocasionou perda considerável no módulo de elasticidade, já que este se manteve superior a 200 GPa. Quando aquecido a 400 °C durante 60 minutos, houve um aumento da redução do módulo de elasticidade do aço para 4,77%. Já para o lote aquecido a 120 minutos a redução foi de 4,91 %.

Percebeu-se quando os corpos de prova foram aquecidos a 600 °C, durante 60 minutos a redução do módulo de elasticidade aumentou de maneira significativa para 27,81%. Quando aquecido durante 120 minutos a 600 °C, a perda do módulo de elasticidade foi ainda maior, sendo 41,50%.

Comparando o aquecimento a 600 °C com 800 °C, não houve alteração significativa na alteração do módulo de elasticidade. Verifica-se que para os corpos de prova aquecidos a 800 °C durante 60 minutos a redução foi de 45,76%, ou seja, superior em apenas 4,26% em relação ao corpo de prova aquecido a 600 °C durante 120 minutos.

Por fim, os corpos de prova aquecidos a 1000 °C durante 120 minutos demonstraram o pior resultado, obtendo redução do módulo de elasticidade de 53,42%, ou seja, a rigidez do material à deformação esteve bastante comprometida.

De acordo com a NBR 15200 (ABNT, 2012), o módulo de elasticidade decresce com o aumento da temperatura podendo ser calculado por:

$$E_{S,\theta} = k_{ES,\theta} \times E_s \quad (32)$$

Sendo:

$E_{S,\theta}$: Módulo de elasticidade do aço na temperatura θ ;

$k_{ES,\theta}$: Fator de redução do módulo de elasticidade na temperatura θ ;

E_s : Módulo de elasticidade do aço em situação normal.

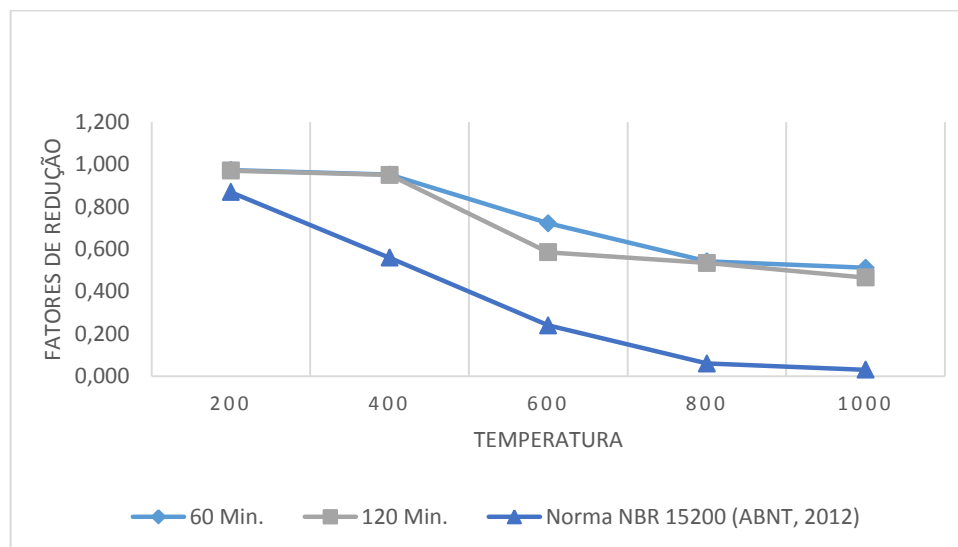
A Tabela 10 apresenta os valores do fator de redução do módulo de elasticidade encontrados a partir do ensaio, em comparação com os dados apresentados pela NBR 15200 (ABNT, 2012).

Tabela 10 - Fator de redução da modulo de elasticidade.

Temperatura °C	Tempo (Minutos)	$k_{ES,\theta}$ Ensaio	$k_{ES,\theta}$ Norma
200	60	0,974	
200	120	0,971	0,870
400	60	0,952	
400	120	0,951	0,560
600	60	0,722	
600	120	0,585	0,240
800	60	0,542	
800	120	0,535	0,060
1000	60	0,512	
1000	120	0,466	0,030

Percebeu-se que os fatores de redução do módulo de elasticidade obtidos no ensaio foram superiores aos da norma, isso se deve ao fato de que logo após o aquecimento no forno industrial, as barras foram resfriadas ao ar, fazendo com que recuperassem parte da resistência inicial. Os valores apresentados na NBR 15200 (ABNT, 2012), não levam em consideração o resfriamento das barras e o tempo de exposição ao calor intenso.

No Gráfico 2 pode-se observar a variação do fator de redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura. A curva para os corpos de prova aquecidos a 120 minutos ficou mais próxima da curva estabelecida pela norma NBR 15200 (ABNT, 2012).

Gráfico 2. Comparação Fator de redução do Módulo de Elasticidade.

Desta forma, realizar o dimensionamento de estruturas de concreto armado utilizando os coeficientes de redução do módulo de elasticidade da norma NBR 15200 (ABNT, 2012) é totalmente viável, pois, quanto menor o fator de redução, menor o módulo de elasticidade e consequentemente maior deverá ser a quantidade de aço para suprir a perda da capacidade resistiva do material.

4.4 COMPARAÇÃO COM TRABALHOS ANTERIORES

Laske (2017) expõe dados obtidos submetendo aços da marca Gerdau, com diâmetro de 10 mm, laminados a quente (CA-50), promovendo aquecimento no forno industrial em temperaturas de 200 °C; 400 °C; 600 °C; 800 °C e 1000 °C, durante 60 e 120 minutos de exposição, posteriormente resfriando as barras ao ar, finalizando com ensaio de tração em prensa universal similar.

A diferença existente é o diâmetro e a categoria do aço escolhido, o presente trabalho refere-se a aços CA-60 com diâmetro de 5 mm e Laske (2017) explana sobre aços CA-50 e diâmetro de 10 mm. A norma NBR 15200 (ABNT, 2012), apresenta valores de referência diferentes para cada categoria de aço. Desta forma, a comparação será feita proporcionalmente para cada categoria de aço.

A Tabela 11 a seguir apresenta os fatores de redução da resistência ao escoamento ($K_{s,\theta}$) e módulo de elasticidade ($k_{ES,\theta}$) da norma NBR 15200 (ABNT, 2012); obtidos por Laske (2017) em comparação aos obtidos pelo ensaio no presente trabalho.

Tabela 11 - Comparação dos fatores de redução da resistência ao escoamento.

Temperatura °C	Tempo (Minutos)	Fator de redução da resistência ao escoamento $K_{s,\theta}$			
		GG-50	Norma Aço CA-50	GG-60	Norma Aço CA-60
200	60	0,99		0,99	
200	120	0,99	1,00	0,99	1,00
400	60	0,99		0,94	
400	120	1,01	1,00	0,93	0,94
600	60	0,93		0,46	
600	120	0,92	0,47	0,44	0,40
800	60	0,58		0,43	
800	120	0,56	0,11	0,42	0,11
1000	60	0,47		0,39	
1000	120	-	0,04	0,34	0,05

Analisando os resultados encontrados em cada trabalho, percebe-se que para temperaturas inferiores a 400 °C os valores de redução da resistência ao escoamento ficaram próximos aos respectivos valores de referência.

Quando aquecido a 600 °C, o aço CA-50 com diâmetro de 10 mm conseguiu manter sua resistência mais próxima da original, enquanto que o aço CA-60 com diâmetro de 5 mm se manteve próximo aos valores da norma NBR 15200 (ABNT, 2012). Essa mudança de comportamento pode ter sido gerada pelo diâmetro do material, pois a 600 °C com 5 mm de diâmetro toda a matriz do material já estava aquecida, enquanto que o material com 10 mm demorou mais tempo para aquecer completamente e apresentar perda de capacidade resistiva.

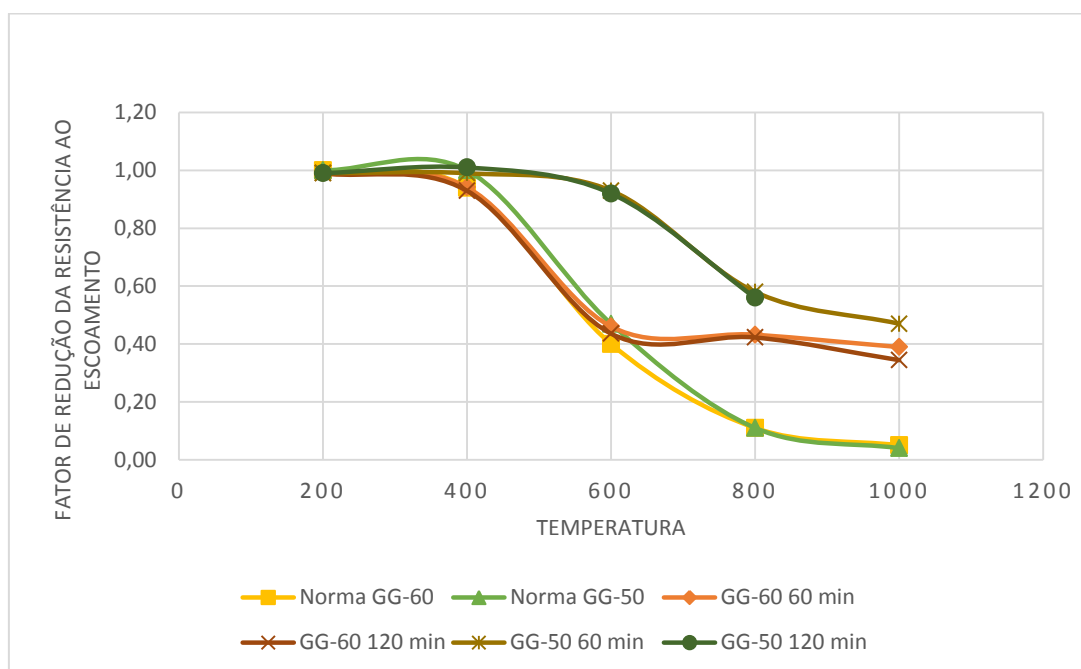
Posteriormente os valores do fator de redução da resistência ao escoamento para 800 °C e 1000 °C, voltaram a convergir entre si, chegando a 0,09 de diferença quando aquecidos a 1000 °C durante 60 minutos, como explicado na Equação (33).

$$(K_{s,1000CA50} - K_{s,Norma}) - (K_{s,1000CA60} - K_{s,Norma}) \quad (33)$$

$$(0,47 - 0,04) - (0,39 - 0,05) = 0,09 \quad (34)$$

O gráfico 3 apresenta os valores dos fatores de redução da resistência ao escoamento encontrados nos ensaios com CA-50 e CA-60 em comparação com os valores da norma NBR 15200 (ABNT, 2012).

Gráfico 3. Comparação Fator de redução da Resistência ao Escoamento.



Percebeu-se que os fatores de redução da resistência para o aço CA-50 foram superiores aos fatores da normas NBR 15200 (ABNT, 2012) e também aos fatores para o aço CA-60. Houve uma grande diferença entre os fatores de redução da resistência a 600 °C.

A Tabela 12 apresenta os fatores de redução do módulo de elasticidade do presente trabalho; obtidos no trabalho de Laske (2017) e também aqueles fornecidos pela norma NBR 15200 (ABNT, 2012).

Tabela 12 - Comparação do fatores de redução do módulo de elasticidade.

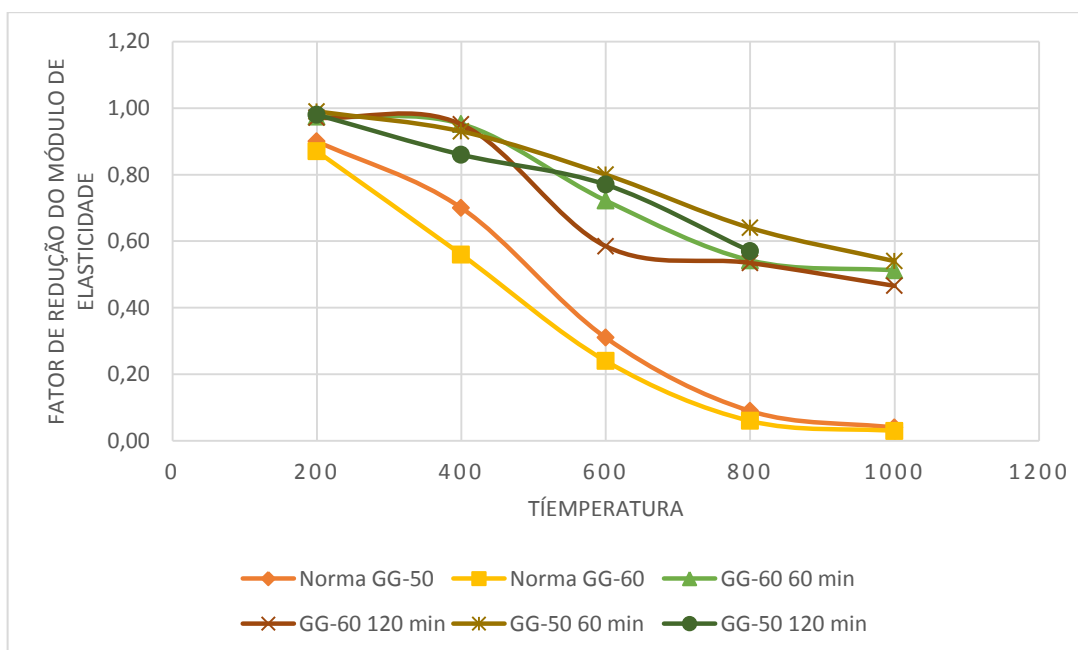
Temperatura °C	Tempo (Minutos)	Fator de redução do módulo de elasticidade $k_{ES,\theta}$			
		GG-50	Norma Aço CA-50	GG-60	Norma Aço CA-60
200	60	0,99		0,97	
200	120	0,98	0,90	0,97	0,870
400	60	0,93		0,95	
400	120	0,86	0,70	0,95	0,56
600	60	0,80		0,72	
600	120	0,77	0,31	0,59	0,24
800	60	0,64		0,54	
800	120	0,57	0,09	0,53	0,06
1000	60	0,54		0,51	
1000	120	-	0,04	0,47	0,03

Da mesma forma que na Tabela 11, a diferença entre os fatores foi pequena em temperaturas inferiores a 400 °C, ocorrendo maior variação em 600 °C. Quando aquecidas a 1000 °C a diferença converge para 0,02 apenas, como exemplificado abaixo (Equação 35 e 36).

$$(K_{ES,1000CA50} - K_{ES,Norma}) - (K_{ES,1000CA60} - K_{ES,Norma}) \quad (35)$$

$$(0,54 - 0,04) - (0,51 - 0,03) = 0,02 \quad (36)$$

O gráfico 4 apresenta os valores dos fatores de redução do módulo de elasticidade encontrados nos ensaios com CA-50 e CA-60 em comparação com os valores da norma NBR 15200 (ABNT, 2012).

Gráfico 4. Comparação Fator de redução do Módulo de Elasticidade.

A partir de 600 °C os fatores de redução do módulo de elasticidade para o aço CA-50 foram superiores aos fatores para o aço CA-60. Percebeu-se que os fatores de redução do módulo de elasticidade apresentados pela norma NBR 15200 (ABNT, 2012), foram inferiores aos fatores de redução apresentados pelo aço CA-50 e pelo aço CA-60.

Laske (2017), não obteve resultados para os corpos de prova ensaiados a 1000 °C, durante 120 minutos de aquecimento, devido à grande degradação do material. De maneira geral, os valores dos fatores de redução da resistência ao escoamento e módulo de elasticidade apresentaram valores superiores ao da norma NBR 15200 (ABNT, 2012) para os dois trabalhos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização dos ensaios possibilitou o aprendizado de algumas características pertinentes do aço CA-60 em situação de incêndio. Notou-se que os resultados encontrados comprovaram os dados obtidos tanto na literatura quanto na NBR 15200 (ABNT, 2012).

Conforme a temperatura de ensaio aumentou, (200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C e 1000 °C), o aço foi se deteriorando em relação a sua estrutura física e química, apresentando incandescência, estrição e descamação da seção transversal. Ocorreu também perda da resistência ao escoamento; tensão última e módulo de elasticidade.

Percebeu-se que o aço aquecido a 200 °C mantêm suas características resistivas tanto na resistência ao escoamento, como no módulo de elasticidade. Os fatores de redução da resistência e módulo permanecem bem próximos aos valores de referência da norma NBR 15200 (ABNT, 2012), assim como ao trabalho da Laske (2017).

Com o aumento da temperatura para 400 °C também não ocorreram mudanças significativas no comportamento do aço. Já a partir de 600 °C ocorreu a diminuição da redução da resistência do aço em até 50 % do valor inicial. De acordo com a literatura, essa diminuição já era esperada pois a temperatura crítica do aço é aproximadamente 550 °C.

As amostras na temperatura de 600 °C mostraram-se diferentes quando comparadas ao CA-50 e seus respectivos valores de redução da resistência ao escoamento e módulo de elasticidade, isto se deve ao fato de que esta é temperatura de transição do aço CA-60 para CA-50.

A 800 °C e 1000 °C houve aumento gradativo na redução da resistência ao escoamento e módulo de elasticidade, chegando a perder cerca de 60 % das características iniciais. Tal percentual só não foi maior devido ao resfriamento ao ar sofrido pelo aço logo após o aquecimento. Portanto, percebeu-se que o aço recupera pelo menos 30% da sua resistência devido ao resfriamento.

É importante ressaltar que o resfriamento ao ar auxilia na recuperação da estrutura, porém, no sentido prático, quando alguma edificação está em chamas, é recomendável que o resfriamento seja feito imediatamente, da maneira mais rápida possível, fazendo com que o resfriamento ao ar se torne inviável nesta situação.

Desta forma, para que possa ser garantido a resistência global das estruturas em situação de incêndio e evitar maiores danos à saúde e bem estar da população, como também evitar a perda material é imprescindível a análise do efeito das altas temperaturas nos materiais, levando em consideração as perdas de resistência e módulo de elasticidade, a partir da norma NBR 15200 (ABNT, 2012).

Para trabalhos futuros, é recomendável estudar o aço CA-60 para o resfriamento com aspersão de água, simulando a ação dos bombeiros. Também é recomendável fazer os ensaios de tração com auxílio de extensômetro em todas barras de aço, inclusive nas que fossem danificadas pelas altas temperaturas, retirando o fator humano na determinação da deformação.

No geral, o aço CA-60 da marca Gerdau apresentou bons resultados quanto a resistência ao escoamento e módulo de elasticidade, sendo superiores aos valores apresentados pela norma NBR 15200 (ABNT, 2012). Portanto, por exemplo, para o dimensionamento de estruturas submetidas a altas temperaturas, recomenda-se a utilização dos fatores da norma, pois convém com a realidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Luiz Carlos de. **Aços para concreto armado**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas. São Paulo. 2002. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Acos.pdf>> Acesso: 09/10/17.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials**. ASTM E-119. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – especificações. 2007.

_____. **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro. 2001.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro. 2001.

_____. **NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos – Ensaio de tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. 2013.

_____. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. 2013.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. 2012.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. 2004.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. 2014.

BRASIL. **Lei Nº 10406** de 10 de Janeiro de 2002. Institui o Código Civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF.

BRASIL. **Lei Nº 13425** de 30 de Março de 2017. Estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção contra incêndios e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF.

CALDAS, Rodrigo Barreto. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

COSSOLINO, Leiliane Cristina; PEREIRA, Antonio Henrique Alves. **Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização**. Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP. 30 pg. 2010.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. **Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais**. In: V simpósio epusp sobre estruturas de concreto. São Paulo. 2003. 19 p.

_____. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. In: XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. Universidade Federal de Brasília. DF – Brasília. 2002. 21 p.

COSTA, Paulo Roberto Silva. **Manifestações patológicas nas estruturas de concreto sujeitas a altas temperaturas**. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia UFMG. Rio de Janeiro. 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 1: actions on structures – part 1-2: general actions – actions on structures exposed to fire**. EN 1991-1-2. Brussels: CEN, 2002. 61 pg.

_____. **Eurocode 2: design of concrete structures - part 1.2: general rules - structural fire design**. EN 1992-1-2. Brussels: CEN, 2004. 97 p.

FAKURY, R. H., *et al.* **Determinação da temperatura crítica de elementos estruturais de aço em situação de incêndio**. In: XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Del Este: Facultad de Ingeniería–Universidad de La Republica, 2000.

FREITAS JR, José de Almeida. **Aços para concreto**. Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia. Departamento de Construção Civil. 65 pg. Curitiba. 2007.

GOMES, Valtencir. **Patologias e recuperação de estruturas**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Rio Grande do Norte. Disponível em: <<http://portal.ifrn.edu.br>> Acesso: 09/09/17.

INSTRUÇÃO TÉCNICA DO CORPO DE BOMBEIROS DE SÃO PAULO. **Segurança Estrutural nas Edificações - Resistência ao fogo dos elementos de construção**. IT08. São Paulo. 2001.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. **ISO 834**: Fire resistance tests - Elements of building construction. Genève. 2014.

LASKE, Ana Claudia. **Análise do comportamento do aço para estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. Trabalho de Conclusão de Curso- Engenharia Civil. UTFPR. Toledo – PR. 2017.

LIMA, R. C. A, *et al.* **Efeito de altas temperaturas no concreto**. II Seminário de Patologia das Edificações – Novos Materiais e Tecnologias Emergentes nov/2004 – UFRGS – Porto Alegre – RS.

MARTINS, Michele Mendonça. **Dimensionamento de estruturas de aço em situação de incêndio**. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2000.

MORALES, G., *et al.* **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. Seminário: Ciências exatas e tecnológicas, Londrina, v. 32, n. 1, Jan/Mar. 2011. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/>> Acesso: 29/08/17.

MORENO JUNIOR, Armando Lopes; MOLINA, Júlio César. **Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuições à revisão da NBR 5628:2001**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.12, n. 4, Oct./Dez. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br>> Acesso: 15/08/17.

MÜLLER, A. M. **Análise do comportamento do aço CA-60 para estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. Trabalho de conclusão de curso - Bacharelado em Engenharia Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo. 2018.

PINHEIRO, Libânio M., *et al.* **Aços para armaduras**. Departamento de Engenharia de Estruturas da USP. Março de 2010. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/portal/pt/> Acesso: 12/03/18.

RANGEL JUNIOR, Estellito. Nova filosofia para classificação de áreas: o uso da norma IEC 60079-10. **Revista Controle & Instrumentação**, São Paulo, n. 75, Novembro de 2002.

RASMA, Eline Tourinho. **Caracterização estrutural e mecânica do aço AISI/SAE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro –UENF. Campo dos Goytacazes – RJ. 2015.

RICARDO, Alverlando Silva. **Análise da confiabilidade estrutural de elementos de aço em situação de incêndio.** Tese de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis – SC, 2015. 143 pg.

RIGOBELLO, Ronaldo; MUNAIAR NETO, Jorge. **Análise numérica de seções transversais e de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto em situação de incêndio.** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 10, n. 47, p. 97-116, 2008.

RIZZO, Luiz Antônio Dalazen. **Estudo do colapso progressivo em estruturas de aço.** Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco - 2013.

SÃO PAULO. **Decreto Municipal Nº 10878**, de 7 de Fevereiro de 1974. Institui normas especiais para segurança do edifícios a serem observados na elaboração dos projetos e na execução. Câmara Municipal de São Paulo.

SEITO, Itiu Alexandre. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto Editora, 2008. Pg. 496.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Estruturas de aço em situação de incêndio.** São Paulo: Zigurate Editora, 2001. 249 pg.

_____. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012.** São Paulo: Blucher, 2012. 238 pg.

SILVA, Valdir Pignatta. *et al.* **Incêndio real em um apartamento de interesse social – um estudo de caso.** Revista Escola de Minas vol.60 n°.2. Ouro Preto Apr./June. 2007.

VARGAS, Mauri Resende; SILVA, Valdir Pignatta. **Resistência ao fogo das estruturas de aço.** Instituto Brasileiro de Siderurgia - IBS / Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA, Rio de Janeiro, 2003. 76 p.

ANEXOS

ANEXO A. Tempo Requerido de Resistência ao fogo (TRRF).

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

ANEXO B. Potencial Calorífico Específico.

Tipo de material	H MJ/kg	Tipo de material	H MJ/kg	Tipo de material	H MJ/kg
Acrílico	28	Lã	23	Poliéster	31
Algodão	18	Lixo de cozinha	18	Polietileno	44
Borracha	Espuma - 37 Tiras - 32	Madeira	19	Polipropileno	43
Couro	19	Palha	16	PoliuretanoP	23
Epóxi	34	Papel	17	PVC	17
Grãos	17	Petróleo	41	Resina melamínica	18
Graxa, lubrificante	41	Polycarbonato	29	Seda	19

ANEXO C. Tensão ao Escoamento (MPa).

	Tensão de Escoamento (MPa)										
	0 °C	200°C 60 Min.	200°C 120 Min.	400°C 60 Min.	400°C 120 Min.	600°C 60 Min.	600°C 120 Min.	800°C 60 Min.	800°C 120 Min.	1000°C 60 Min.	1000°C 120 Min.
CP 1	759,84	753,59	752,57	721,08	698,71	354,57	335,10	331,22	322,34	310,82	265,84
CP 2	759,98	753,62	760,16	711,64	700,18	344,41	335,59	328,82	316,20	291,26	268,17
CP 3	759,27	756,76	756,60	705,58	711,14	351,61	332,89	326,91	324,85	292,93	255,52
CP 4	759,99	761,49	752,57	722,94	711,34	355,23	327,61	325,88	320,20	287,05	264,49
CP 5	759,32	754,92	757,76	711,11	709,24	349,05	323,31	323,94	323,00	306,83	251,63
CP 6	759,07	760,44	760,13	717,66	705,64	342,51	331,64	333,77	319,69	285,72	263,17
Média	759,58	756,80	756,63	715,00	706,04	349,56	331,02	328,42	321,05	295,77	261,47

ANEXO D. Tensão Última.

	Tensão Última (MPa)										
	0 °C	200°C 60 Min.	200°C 120 Min.	400°C 60 Min.	400°C 120 Min.	600°C 60 Min.	600°C 120 Min.	800°C 60 Min.	800°C 120 Min.	1000°C 60 Min.	1000°C 120 Min.
CP 1	763,59	760,96	762,54	757,81	739,45	441,36	422,99	345,56	335,06	311,01	266,26
CP 2	765,16	763,96	767,36	745,74	739,45	437,68	422,47	348,18	335,06	306,75	298,96
CP 3	776,76	765,99	766,21	745,22	746,79	437,68	422,99	349,23	340,83	305,18	294,67
CP 4	779,39	769,98	762,01	756,76	747,84	438,73	424,56	346,61	335,59	309,50	268,11
CP 5	771,49	765,86	766,74	747,32	745,74	440,83	424,56	345,56	341,36	309,62	295,29
CP 6	768,34	768,91	768,31	752,57	743,64	437,16	424,04	348,18	334,01	308,80	295,82
Média	770,79	765,94	765,53	750,90	743,82	438,91	423,60	347,22	336,99	308,48	286,52

ANEXO E. Módulo de Elasticidade (GPa).

	Módulo de Elasticidade (Gpa)										
	0 °C	200°C 60 Min.	200°C 120 Min.	400°C 60 Min.	400°C 120 Min.	600°C 60 Min.	600°C 120 Min.	800°C 60 Min.	800°C 120 Min.	1000°C 60 Min.	1000°C 120 Min.
CP 1	214,09	197,83	214,35	207,96	204,84	148,51	118,12	103,58	124,51	113,56	116,13
CP 2	209,14	204,66	205,72	151,42	193,92	155,33	135,46	120,17	127,08	113,58	83,08
CP 3	225,95	227,55	225,53	231,73	236,81	165,78	152,22	130,38	129,49	128,87	101,22
CP 4	204,61	206,30	218,65	215,37	185,51	163,42	133,14	121,34	107,94	106,90	98,47
CP 5	203,34	195,99	168,52	187,34	174,53	125,16	92,19	97,66	85,76	80,81	90,79
CP 6	203,39	195,30	191,15	206,52	202,99	151,74	106,27	110,60	99,14	102,12	97,49
Média	210,08	204,60	203,99	200,06	199,77	151,66	122,90	113,96	112,32	107,64	97,86