



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAIO VINÍCIUS DE SOUZA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Caruaru

2024

CAIO VINÍCIUS DE SOUZA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil do
Campus Agreste da Universidade Federal de
Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo
científico, como requisito parcial para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Profa. Dra. Giuliana Furtado Franca Bono

Caruaru

2024

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
CA	Concreto Armado
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CEN	Europaisches Komitee für Normung
ELU	Estado-Limite Último
ELS	Estado-Limite de Serviço
EN	Europäische Norm
LN	Linha Neutra
NBR	Norma Brasileira
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
TRRF	Tempo Requerido de Resistência do Fogo

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_{cu}	Deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura
ϵ_{c2}	Deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico
ϵ_{yd}	Deformação específica de cálculo do aço
ϵ_{yi}	Deformação específica de escoamento do aço
ϵ_s	Deformação plástica do aço caracterizado pelo estado limite último
$\epsilon_{c,\theta}$	Deformação linear específica do concreto à temperatura elevada θ
$\epsilon_{cl,\theta}$	Deformação linear específica última do concreto na temperatura θ
$\epsilon_{cu,\theta}$	Deformação linear específica correspondente à tensão máxima do concreto na temperatura θ
$\Delta\theta_g$	Variação da temperatura média dos gases no ambiente em chamas
$\gamma_{aço}$	Peso específico do aço
γ_c	Coefficiente de ponderação para o concreto
$\gamma_{c,fi}$	Coefficientes de ponderação das resistências do concreto
γ_s	Coefficiente de ponderação para o aço
$\gamma_{s,fi}$	Coefficientes de ponderação das resistências do aço
γ_n	Fator de ponderação
γ_m	Coefficiente de ponderação das resistências
γ_s	Fator de ponderação
$\gamma_{concreto}$	Peso específico do concreto
\varnothing	Diâmetro da barra longitudinal de aço
$\sigma_{c,\theta}$	Tensão à compressão do concreto à temperatura elevada θ
θ	Valor de temperatura
$\theta_{c,x}$	Temperatura no interior do concreto considerando fluxo de calor unidimensional
$\theta_{c,xy}$	Temperatura no interior do concreto considerando transferência de calor bidimensional

θ_g	Temperatura do incêndio padrão
θ_i	Temperatura da barra de aço i na camada v
$k(\theta_i)$	Coefficiente de redução da resistência da barra de aço i a temperatura θ_i
$k_v(\theta)$	Coefficiente médio de redução da resistência da armadura
θ_o	Temperatura do ambiente do início do aquecimento
θ_w	Temperatura na superfície do concreto
a_c	Difusividade térmica do concreto
A_{sx}	Área da seção transversal da armadura longitudinal em relação ao eixo x
A_{sy}	Área da seção transversal da armadura longitudinal em relação ao eixo y
A_v	Área de ventilação vertical para o ambiente externo do compartimento
A_F	Área do piso do compartimento
A_s	Área de uma barra de aço
b_w	Largura da nervura da viga em seção T
b_{\min}	Largura mínima da nervura em situação de incêndio
b_f	Largura da mesa da viga em seção T
b_{fi}	Largura em situação de incêndio
$b_{f,x}$	largura colaborante em relação a x
$b_{f,y}$	Largura colaborante em relação a y
c	Cobrimento da armadura
c_1	Distância da face exposta até o eixo da armadura
cc	Custo unitário do concreto
ca	Custo unitário do aço
cf	Custo unitário da fôrma
CT	Custo total
CC	Custo total do concreto
CA	Custo total do aço

CF	Custo total da fôrma
d	Altura útil
d_{fi}	Altura efetiva em situação de incêndio
E_s	Módulo de elasticidade do aço
$E_{s, \theta}$	Módulo de elasticidade da armadura passiva de aço na temperatura θ
e_x	Distância entre os eixos de nervuras na direção x
e_y	Distância entre os eixos de nervuras na direção y
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto
$f_{cd,fi}$	Resistência de cálculo à compressão do concreto em situação de incêndio
f_{tk}	Resistência característica à tração do concreto
f_{yk}	Resistência característica da armadura passiva do aço à temperatura ambiente
$f_{c, \theta}$	Resistência à compressão do concreto na temperatura θ
$f_{y, \theta}$	Resistência ao escoamento da armadura passiva do aço na temperatura θ
h	Altura da viga
H	Altura do compartimento
h_f	Altura da mesa da viga em seção T
h_w	Altura da nervura
$k_{c, \theta}$	Fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ
$k_{Es, \theta}$	Fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura θ
$k_{s, \theta}$	Fator de redução da resistência do aço na temperatura θ
$l_{ef,x}$	Vão efetivo em relação a x
$l_{ef,y}$	Vão efetivo em relação a y
$l_{o,x}$	Vão livre em relação a x
$l_{o,y}$	Vão livre em relação a y
M_u	Valor de momento último, próximo ao de ruína
$n_{b,x}$	Número de barras em relação a x

$n_{b,y}$	Número de barras em relação a y
n_w	Fator que relaciona temperatura dos gases à temperatura da superfície
n_x	Fator adimensional que relaciona temperatura da superfície do concreto com a temperatura em seu interior
n_v	Número de barras na camada v
n_y	fator adimensional que relaciona temperatura da superfície do concreto com a temperatura em seu interior
p_g	Peso próprio
$q_{fi,k}$	Valor característico da carga de incêndio específica
t	Tempo
t_e	Tempo equivalente
W	Fator que considera a influência da ventilação e da altura do compartimento
x	Distância da linha neutra
x_{500}	Profundidade da Isoterma de 500 °C

Otimização de lajes nervuradas de concreto armado em situação de incêndio utilizando algoritmo genético.

Optimization of reinforced concrete ribbed slabs in fire situation using genetic algorithm.

Caio Vinícius de Souza Silva¹

RESUMO

Adjacente à ampliação urbana com a criação de edifícios complexos, incêndios avassaladores instigaram a segurança e prescrição das construções civis no Brasil, impondo critérios inteligentes de prevenção contra incêndios. O fogo é um fenômeno físico-químico resultante da combustão, uma vez que, sua exposição aos elementos estruturais reduz as propriedades mecânicas quando submetidos a temperaturas elevadas. Nesse seguimento, o presente documento se concentra em projetar lajes nervuradas de concreto armado que tenham resistência considerável contra a ação das chamas por determinado período. Dessa forma, a estrutura em concreto armado dimensionada em condições de incêndio tem potencial para evitar a propagação de calor e gases tóxicos; garantir a integridade a fim que assegure as operações de combate ao incêndio e resgate aos feridos, além de conferir aos habitantes tempo suficiente para identificar a ação do fogo e evacuar de modo seguro. Preliminarmente, é guiado as orientações providas pela NBR 6118 (ABNT, 2023) para o dimensionamento das lajes em estudo. Sucede-se as verificações para a situação de incêndio conduzido pela NBR 15200 (ABNT, 2012), além de serem complementadas pela Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004). Associado a este projeto, tem-se a aplicação do método probabilístico, Algoritmo Genético, que permite otimizar a altura da seção transversal, a largura da nervura, a altura da mesa, os espaçamentos entre as nervuras nas direções x e y, o cobrimento e o diâmetro das barras longitudinais, sujeitos a diferentes restrições com o propósito de determinar a situação ótima da seção transversal e das propriedades dos materiais, resultando em custos mínimos. Dessa maneira, essa pesquisa poderá também oferecer apoio ao tema, sucedendo ao aprimoramento da informação à literatura.

Palavras-chave: Algoritmo Genético; concreto armado; lajes nervuradas; incêndio.

¹Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: caio.viniussilva@ufpe.br

ABSTRACT

Adjacent to urban expansion with the creation of complex buildings, overwhelming fires instigated the safety and prescription of civil constructions in Brazil, imposing intelligent fire prevention criteria. Fire is a physical-chemical phenomenon resulting from combustion, since its exposure to structural elements reduces mechanical properties when subjected to high temperatures. In this context, this document focuses on designing reinforced concrete ribbed slabs that have considerable resistance against the action of flames for a certain period. Therefore, the reinforced concrete structure designed for fire conditions has the potential to prevent the spread of heat and toxic gases; guarantee integrity to ensure firefighting and rescue operations for the injured, in addition to giving inhabitants enough time to identify the action of the fire and evacuate safely. Preliminarily, the guidelines provided by NBR 6118 (ABNT, 2023) for the design of the slabs under study are guided. Checks for the fire situation are carried out by NBR 15200 (ABNT, 2012), in addition to being complemented by Eurocode 2, part 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004). Associated with this project, there is the application of the probabilistic method, Genetic Algorithm, which allows optimizing the height of the cross section, the width of the rib, the height of the table, the spacing between the ribs in the x and y directions, the coverage and the diameter of longitudinal bars, subject to different restrictions with the purpose of determining the optimal situation of the cross section and material properties, resulting in minimum costs. In this way, this research can also offer support to the topic, improving information in the literature.

Keywords: Genetic Algorithm; reinforced concrete; ribbed slabs; fire.

DATA DE APROVAÇÃO: 10 de maio de 2024.

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, o Brasil foi marcado por alguns dos incêndios mais devastadores de sua história, que tiveram um impacto significativo na segurança e regulamentação de edificações no país. Essa época foi caracterizada por um rápido crescimento urbano e construção de edifícios mais altos e complexos, onde todos requeria de medidas adequadas de prevenção e combate a incêndios.

Dois dos incêndios mais representativo da década de 1970 ocorreram em edifícios localizados na cidade de São Paulo: o Edifício Andraus, em 1972, e o Edifício Joelma, em 1974. Ambos os eventos se tornaram marcos trágicos que destacaram as vulnerabilidades nas construções e a necessidade urgente de aprimorar a segurança contra incêndios no Brasil, a fim de proteger vidas humanas, minimizar danos materiais e ambientais.

Pires (2023) afirma que os elementos estruturais são sujeitos a uma distribuição de temperatura superior, quando exposto ao fogo, em comparação com a situação convencional. Esta distribuição é dependente do tempo de incêndio e dos aspectos estruturais. Logo, é cauteloso e abstruso realizar análises do comportamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio, necessitando de simulação computacional.

Além da redução da resistência, o concreto perde área resistente devido ao *spalling* e expõe a armadura ao fogo. Em concretos com resistência convencional ($f_{ck} \leq 50$ MPa), o *spalling* sucede do comportamento diferenciado com altas temperaturas dos materiais componentes do concreto e da pressão interna da água ao evapora-se, entre outras razões. Sua ocorrência é aleatória e pode ser antieconômico encontrar soluções para evitá-lo, conforme opina Silva (2016).

As ferramentas computacionais fornecem resultados satisfatórios com a utilização de técnicas de otimização. É possível projetar elementos estruturais de forma segura e econômicas. Os métodos numéricos para análise não linear e dimensionamento estrutural empregado na mecânica computacional, aprimora a forma de analisar as estruturas em condições de incêndio que são consideradas complexas.

Os trabalhos com soluções otimizadas sempre foram um ponto com bastante força para os estudiosos da Engenharia Estrutural. Na década de 1970, a técnica dos Algoritmos Genéticos (AG), foi apresentada pelo pesquisador John Holland, da Universidade de Michigan. Técnica que fornece um mecanismo de busca adaptativa baseada na Teoria da Evolução de Charles Darwin, consistindo no processo de seleção natural e sobrevivência das espécies mais aptas. Usada para resolver problemas complexos e encontrar soluções ótimas em diferentes áreas,

como na engenharia, ciência da computação, economia, entre outros.

Estruturas em concreto armado e protendido dificilmente apresentam alguma proteção externa, uma vez que, a composição do concreto, geralmente, é de materiais inorgânicos com baixa condutividade e alta capacidade térmica, conforme Coelho (2018). Embora o concreto possua certa resistência ao fogo, em situações de incêndio prolongado e de alta intensidade, suas propriedades podem ser comprometidas. O aquecimento contínuo pode levar à perda de resistência à compressão, necessitando garantir que os outros elementos na constituição do concreto armado e protendido tenha uma resistência considerada para suportar o carregamento durante o intervalo no qual a estrutura será exposta ao fogo.

A NBR 6118 (ABNT, 2023, p. 97), no item 14.7.7, conceitua a laje nervurada como: “lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte”. Esse material inerte é um material de enchimento, que pode ser blocos cerâmicos, poliestireno expandido (EPS) ou outros materiais, não contribuindo para aumentar a resistência da laje nervurada.

Por sua vez, Massulo (2021) alega que há o máximo benefício das propriedades dos materiais, ao utilizar lajes nervuradas. Ademais, esse tipo de laje é um aprimoramento das lajes maciças, pois reduz o volume de concreto abaixo da linha neutra, gerando um menor custo do concreto, diminuição do peso próprio da estrutura e aumento da inércia. Logo, a concepção desses tipos de estruturas ganhou espaço, principalmente em construções residenciais e comerciais de pequeno e médio porte (casas e pequenos edifícios).

Entender completamente como a estrutura reage ao fogo é essencial para garantir que ela suporte o tempo necessário para controlar o incêndio sem colocar em risco a vida das pessoas. Verificar o desempenho de uma estrutura em uma temperatura superior ao uso normal é realizar uma análise estrutural, pois essa resposta se dá em função do progresso das tensões e deformações na estrutura (Maximiano, 2018).

O concreto simples possui baixa condutividade térmica. E associado às armaduras forma peças de concreto armado, no qual o concreto protegerá as barras contra as ações de intempéries, corrosão ou incêndio. Desse modo, em caso de incêndio na edificação, o concreto dará maior tempo de fuga de pessoas. Contudo, em resultado do tempo de exposição ao fogo, os componentes do concreto reagirão quimicamente, suscitando processos mecânicos de expansões, fragmentações, fissurações e perda de resistência (Rocha et al., 2016, p. 65).

Em síntese, a otimização de lajes nervuradas de concreto armado em situações de incêndio é de extrema pertinência para garantir a segurança das edificações e das pessoas que as

ocupam. Durante um incêndio, as estruturas de concreto armado estão sujeitas a altas temperaturas, o que pode comprometer sua integridade estrutural e ocasionar o colapso. Nesse segmento, a otimização visa buscar soluções estruturais que sejam eficientes, econômicas e, ao mesmo tempo, capazes de resistir aos efeitos do fogo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente documento tem como objetivo o dimensionamento otimizado de lajes nervuradas em situação de incêndio através da implementação computacional, utilizando o método dos Algoritmos Genéticos, que atenda as restrições normativas exigidas pela NBR 6118 (ABNT, 2023), NBR 15200 (ABNT, 2012) e a Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004). Além de investigar uma redução do custo desse elemento estrutural através da racionalização dos materiais que compõe a laje nervurada e minimizar os impactos ambientais que venha a conceder.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Implementar um programa computacional para otimização de lajes nervuradas em situação convencional e de incêndio, com a finalidade de minimizar o custo com materiais (concreto, aço e fôrma), utilizando o método dos algoritmos genéticos no *software MATLAB*;
- Determinar a relação ótima, em condição de incêndio, entre as características geométricas da seção, a resistência do concreto e a área das armaduras longitudinais, a fim de encontrar a seção ótima na qual os custos dos materiais (concreto, aço e fôrma) são mínimos;
- Realizar um estudo paramétrico variando as dimensões (vãos) dos painéis de lajes retangulares com diferentes resistências características do concreto com a finalidade de analisar o comportamento do custo dos materiais (concreto, aço e fôrma) expostos ao fogo;
- Analisar as propriedades geométricas e comportamento estrutural dos painéis de lajes nervuradas, influenciados pelo efeito do calor sobre as propriedades mecânicas dos materiais.

2 METODOLOGIA

Neste trabalho, empregou-se o *software MATLAB* (versão R2024a) para o desenvolvimento da aplicação do método probabilístico, algoritmo genético, no projeto de dimensionamento de laje nervurada na condição convencional e em situação de incêndio. No próprio *MATLAB* tem o auxílio do *toolbox* de otimização. No primeiro momento, é preciso realizar algumas configurações para melhor adaptação do programa ao tipo de problema a ser otimizado, uma vez que já está definido o *default* da ferramenta de otimização.

Este trabalho foi baseado na dissertação de Nunes (2018). Foi necessário realizar modificações e atualizações para seguir rigorosamente a NBR 6118 (ABNT, 2023), além de implementar o método Tabular da NBR 15200 (ABNT, 2012) e o método simplificado de Isoterma de 500 °C da Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004) para garantir a segurança do elemento estrutural em situação de incêndio. No Apêndice AP expõe, resumidamente, as etapas que são consideradas na situação de temperatura ambiente e de incêndio, respectivamente, Figuras AP.1 e AP.2.

O dimensionamento das lajes nervuradas assemelha a rotina de cálculos de uma viga em formato T, pois são consideradas várias vigas em paralelo para compor uma laje, constituída por vigotas. Em virtude disto, foram seguidas as restrições da NBR 6118 (ABNT, 2023), cujos critérios estabelecem o dimensionamento de estruturas de concreto armado. Considerou-se os cálculos do estado-limite último (ELU), como também as verificações do estado-limite de serviço (ELS), pois são situações que a estruturas pode enfrentar ao longo de sua vida útil.

As lajes nervuradas devem ser previamente dimensionadas com base a NBR 6118 (ABNT, 2023). Em segundo momento, a estrutura deverá ser verificada para a situação de incêndio, caso não se enquadre nos requisitos de isenção da NBR 14432 (ABNT, 2001) de elementos construtivos de edificações. Os elementos estruturais e de compartimentação de edifícios em situação de incêndio devem ser atendidos pelas condições estabelecidas diante da NBR 14432 (ABNT, 2001). Visto que, devem manter a integridade estrutural e apresentar estanqueidade e isolamento térmico a fim de garantir a segurança das operações de combate ao incêndio, evitar a propagação do incêndio, garantir a evacuação dos ocupantes de forma segura e até mesmo minimizar danos às edificações (Rodrigues; Oliveira, 2021).

Após essa condição mencionada anteriormente, o dimensionamento das estruturas de concreto armado em situação de incêndio deve ser elaborado conforme preconizado na NBR 15200 (ABNT, 2012) e na Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004). Essas normas contemplam todas as considerações do método Tabular e da aplicação do método simplificado

Isoterma de 500 °C.

O custo de fabricação de uma laje é definido por vários fatores, alguns deles podem ser os preços do metro cúbico de concreto, a dimensão da largura da mesa e nervura, o diâmetro de barras de aço, a área e o preço das fôrmas. Além desses fatores, outros também podem ser influenciados diretamente pelas variáveis e das restrições sujeitas na otimização. Assim, o método dos algoritmos genéticos permite otimizar vários parâmetros de uma laje submetidos por inúmeras restrições com a finalidade de encontrar o melhor custo de fabricação de um elemento estrutural.

2.1 Dimensionamento pela NBR 6118 (ABNT, 2023)

No processo de cálculo dos elementos estruturais de concreto armado é preciso, inicialmente, verificar de requisitos que garantem que a estrutura suporte de forma segura, estável e sem deformações excessivas, todas as solicitações a que estará submetida na etapa de execução e utilização.

O dimensionamento consiste em impedir a falha da estrutura ou até mesmo das partes que a compõe. Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), no item 14.2.1, visa determinar os efeitos das ações em uma estrutura, a fim de efetuar as verificações de estados últimos e de serviço. Ao analisar o elemento estrutural, estabelece as distribuições de esforços internos, deformações, tensões e de deslocamento de um elemento estrutural ou parte desse elemento.

Os métodos de cálculo na ruptura ou dos estados limites foi aplicado na análise estrutural das estruturas de concreto armado. A segurança é garantida quando as solicitações correspondentes às cargas majoradas são menores que as solicitações últimas.

A NBR 6118 (ABNT, 2023), no item 12.5.2, aponta que as resistências não podem ser menores que as solicitações, devendo ser verificadas referente aos estados limites se todos os carregamentos em qualquer caso que respeita a condição.

Logo, adotaram-se os valores característicos para as resistências e para ações. Além disso, transformaram-se os valores característicos em valores de cálculo, minorando as resistências e majorando as ações.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) no item 12.3.3, determina duas maneiras de conceituar a resistência de cálculo do concreto (f_{cd}), em função da idade. Logo, adotou-se neste trabalho que o controle da resistência à compressão do concreto será feito igual ou superior aos 28 dias.

Outro ponto importante são os estados limites considerados no cálculo das estruturas de

concreto, os estados limites últimos e os estados limites de serviços. O estado limite último está associado à ruína estrutural ou outra forma de colapso, cuja paralisação impede o uso da estrutura toda ou apenas uma parte. Por sua vez, o estado limite de serviço estão relacionados com à durabilidade das estruturas, à aparência, ao conforto do usuário e à ótima utilização dos elementos estruturais (Carvalho; Figueiredo Filho, 2014). Sendo assim, interessam os valores mínimos de resistência e valores máximos das solicitações, a fim que estabeleça a segurança adequada. Para o estado limite último, os valores base para verificação são apresentados na Tabela 1, conforme a tabela 12.1 da NBR 6118 (ABNT, 2023):

Tabela 1 – Valores dos coeficientes γ_c e γ_s

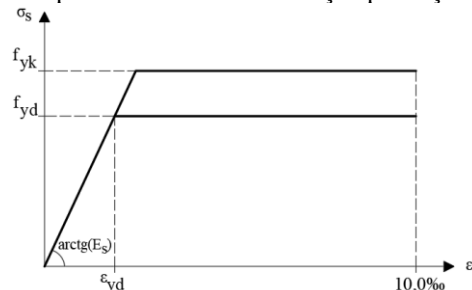
COMBINAÇÕES	CONCRETO (γ_c)	AÇO (γ_s)
Normais	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,20	1,15
Excepcionais	1,20	1,00

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023)

Para o estado de limite de serviço, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023) não é necessário utilizar os coeficientes de minoração, portanto, $\gamma_m = 1$.

Referente as características do aço, foram obtidas da NBR 6118 (ABNT, 2023), no qual fornecem as propriedades mecânicas desse material. Para o estado limite de serviço e último, no item 8.3.6 desta norma, é apresentado o diagrama tensão-deformação para o aço com ou sem patamar de escoamento, Figura 1:

Figura 1 – Diagrama simplificado tensão-deformação para aços de armaduras passivas



Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2023)

O módulo de elasticidade para este estudo foi igual a 210 GPa, recomendado pela norma em estudo, no caso de inexistência de ensaios fornecidos pelo fabricante, pode utilizar esse valor para o cálculo. Assim, este módulo de elasticidade é uma grandeza física que representa

a inclinação do trecho linear do diagrama tensão-deformação do aço.

Por sua vez, o ε_{yd} representa a deformação específica do cálculo que inicia o patamar de escoamento do aço, apresentando a ductilidade que é submetido a uma carga que leva a deformação plástica significativa sem fraturar.

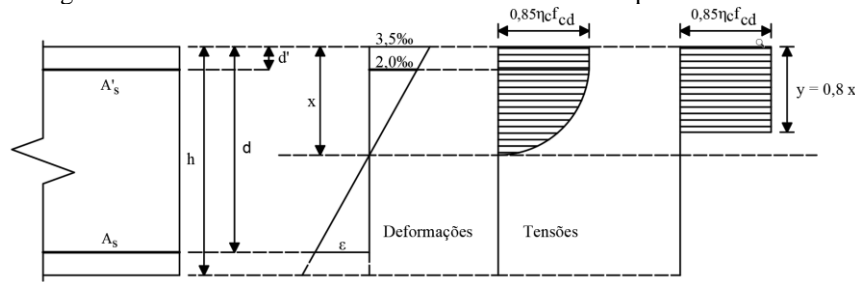
O aço CA60 não apresenta patamar de escoamento, dessa forma o item 8.3.6 da NBR 6118 (ABNT, 2023) concede como para aços com patamar, aproveitar, para os cálculos nos estados limites de serviço e último, o diagrama simplificado da Figura 1. Além disso, conforme a norma em questão, este diagrama tensão-deformação do aço é válido para intervalos de temperatura entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, além de pode ser aplicado em tração e compressão.

No item 6.1, NBR 6118 (ABNT, 2023), impõe que as estruturas de concreto sejam projetadas e construídas de maneira que, sob atuação ambientais esperáveis mantenham a segurança, estabilidade e desempenho adequado em serviço durante à sua vida útil de projeto. Dessa maneira, a tabela 6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2023) classifica a agressividade ambiental nos projetos das estruturas correntes, indo da agressividade fraca até muito forte.

As propriedades do concreto foram consideradas até a classe C50 (com f_{ck} de até 50MPa), logo, qualquer coeficiente explícito nos cálculos é exclusivo para este limite. O concreto com classe acima de C50 exigem outras características e considerações.

O cálculo de dimensionamento das estruturas de concreto armado foi feito levando em consideração o estágio III (corresponde ao estado limite último), visando projetar estruturas que resistam aos esforços sem chegar ao colapso, de forma econômica. Em virtude disso, aumenta-se o momento fletor até um valor de momento próximo ao de ruína M_u . Há a plastificação da fibra mais comprimida do concreto a partir da deformação de $\varepsilon_{c2} = 2\%$, chegando a atingir $\varepsilon_{cu} = 3,5\%$, sem o aumento da tensão; o diagrama de tensões tende a ser uniforme, fibras com tensão máxima; a peça se torna bastante fissurada, aproximando da linha neutra, fazendo com que sua profundidade diminua; supõe-se a distribuição ocorra segundo um diagrama parábola-retângulo, Figura 2. Por sua vez, o estágio I (estado elástico) e o estágio II (estado de fissuração) correspondem às situações de serviço. Para o estágio I, a tensão de tração no concreto não ultrapassa sua resistência característica à tração (f_{tk}), não há fissuras visíveis; o diagrama de tensão normal ao longo da seção é linear. Já o estágio II, as tensões de tração, em bastante pontos abaixo da linha neutra (LN), terão valores superiores ao da resistência característica do concreto à tração (f_{tk}); são visíveis as fissuras de tração e apenas o aço passa a resistir aos esforços de tração.

Figura 2 – Diagrama de tensões no concreto no estado limite último para concretos até a classe C50



Fonte: O autor (2024)

A figura 17.1 da NBR 6118 (ABNT, 2023), apresenta-se de forma geral, o conjunto de deformações específicas do concreto e do aço ao longo da seção transversal submetida a ações nos estados limites últimos.

O domínio 2 é caracterizado pela flexão simples ou composta, onde há o escoamento do aço de $\epsilon_s = 10\text{‰}$, enquanto o concreto é comprimido, mas não alcançando a ruptura, $\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$. Para o domínio 3, há também a flexão simples ou composta. A deformação específica de escoamento do aço chega à $\epsilon_s = 10\text{‰}$, o estado limite último define a deformação de ruptura do concreto por $\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$. Assim, a ruína acontece com aviso, ocorrendo simultaneamente a ruptura do concreto com o escoamento do aço, pois os dois materiais atingem sua capacidade resistente máxima. Lembrando que, parte desse domínio 3 e todo o domínio 4 não podem ser considerados para o dimensionamento devido o limite exigido pela razão $x d^{-1}$ de 0,45 para concretos de classe até 50 MPa.

2.2 Propriedades do concreto e aço exposto ao fogo

O aumento da temperatura devido à exposição do elemento estrutural ao fogo resultará na alteração e degradação das propriedades mecânicas dos materiais. Em virtude disto, a NBR 15200 (ABNT, 2012) expressa fatores de redução para as propriedades mecânicas dos materiais devido à temperatura.

A resistência à compressão do concreto em uma determinada temperatura θ ($f_{c, \theta}$) é dada pela Equação 1:

$$f_{c, \theta} = k_{c, \theta} f_{ck} \quad (1)$$

onde:

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

f_{ck} : resistência característica à compressão do concreto à temperatura ambiente.

Para concretos preparados na grande parte com agregados silicosos, o coeficiente $k_{c, \theta}$ é obtido pela NBR 15200 (ABNT, 2012). Se considerar na composição agregados na grande parte com calcários, adota-se o Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004), recomendado pela NBR 15200 (ABNT, 2012). Esses valores estão dispostos na Tabela A.1 e por meio do gráfico da Figura A.1 do Anexo A deste trabalho, conforme a tabela 1 da NBR 15200 (ABNT, 2012). No caso de valores que não estão em tabelas e gráficos, podem-se obter por interpolação linear.

Por outro lado, há alterações no diagrama tensão-deformação do concreto em virtude do aumento da temperatura, dessa forma o anexo B da NBR 15200 (ABNT, 2012), apresenta a Equação 2:

$$\sigma_{c,\theta} = f_{c,\theta} \frac{3 \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)}{2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)} \quad (2)$$

onde:

$\sigma_{c,\theta}$: é o valor da tensão à compressão do concreto à temperatura elevada θ , expresso em megapascals (MPa);

$f_{c,\theta}$: é o valor da resistência à compressão do concreto à temperatura elevada θ , expresso em megapascals (MPa);

$\varepsilon_{c,\theta}$: é a deformação linear específica correspondente do concreto à temperatura elevada θ (adimensional);

$\varepsilon_{c1,\theta}$: é a deformação linear específica correspondente à tensão de resistência máxima do concreto à temperatura elevada θ , conforme a tabela B.1 da NBR 15200 (ABNT, 2012) (adimensional).

A deformação linear específica última do concreto ($\varepsilon_{cu,\theta}$) e a deformação linear específica correspondente à tensão máxima do concreto ($\varepsilon_{c1,\theta}$) pode ser obtida pela tabela B.1 da NBR 15200 (ABNT, 2012), que é apresentada na Tabela A.2 do Anexo A deste trabalho.

Com o propósito de conhecer a evolução da temperatura da seção transversal, torna-se crucial entender as propriedades térmicas do concreto: alongamento específico, calor específico, condutividade térmica e a densidade, conforme o anexo C da NBR 15200 (ABNT, 2012).

Da mesma forma que o concreto, o aço passa por alterações em suas propriedades

mecânicas em altas temperaturas. Os tipos de aço são normatizados pela NBR 7480 (ABNT, 2024), cujo principais aços que compõe o concreto armado são o CA50 e CA60. A resistência ao escoamento do aço usado na armadura passiva na temperatura θ ($f_{y, \theta}$), é dada pela Equação 3:

$$f_{y, \theta} = k_{s, \theta} f_{yk} \quad (3)$$

onde:

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

f_{yk} : resistência característica do aço de armadura passiva à temperatura ambiente.

Na Tabela A.3 e Figura A.2 do Anexo A deste trabalho, são apresentados os valores de $k_{s, \theta}$ de acordo com a temperatura, conforme a figura 2 e tabela 2 da NBR 15200 (ABNT, 2012). As curvas expostas em azul e laranja são aplicáveis quando $\varepsilon_{yi} \geq 2\%$, geralmente, armaduras tracionadas de vigas, lajes ou tirantes. Por sua vez, a curva em cinza é aplicável quando $\varepsilon_{yi} < 2\%$, em geral, armaduras comprimidas de pilares, vigas ou lajes.

O módulo de elasticidade do aço da armadura passiva na temperatura θ ($E_{s, \theta}$), é obtido pela Equação 4, reduzida com a evolução da temperatura, conforme apresentado na figura 3 e tabela 2 da NBR 15200 (ABNT, 2012), respectivamente, Figura A.3 e Tabela A.4 do Anexo A deste documento:

$$E_{s, \theta} = k_{E_s, \theta} E_s \quad (4)$$

onde:

$k_{E_s, \theta}$: fator de redução módulo de elasticidade do aço na temperatura θ ;

E_s : módulo de elasticidade do aço de armadura passiva à temperatura ambiente.

Além disso, o diagrama tensão-deformação do aço de armadura passiva em altas temperatura é composta a partir de uma sequência de equações que caracteriza o comportamento, conforme o anexo D da NBR 15200 (ABNT, 2012). O valor do fluxo de calor ao longo da seção transversal do elemento estrutural, de maneira simplificada, é obtido pelo conjunto de equações do anexo F da referida norma.

2.3 Método Tabular, conforme a NBR 15200 (ABNT, 2012)

Após o dimensionamento convencional da laje nervurada, necessita-se dimensionar a estrutura em situação de incêndio, mas antes, recorre-se a determinar o Tempo Requerido de Resistência do Rogo (TRRF), que será um dado de entrada para a laje em estudo. Empregou-se o método Tabular para determinar o TRRF, visto que, depende de vários parâmetros, tais como: a profundidade do subsolo, da área dos pavimentos, da altura da edificação, da existência de sistemas de proteção ativa e da presença de aberturas laterais, entre outros. A legislação regional do Corpo de Bombeiros Militar deve ser recorrida e, na ausência deste documento, usa-se a NBR 14432 (ABNT, 2001). Logo, as instruções técnicas do Corpo de Bombeiro podem substituir e/ou complementar essa norma.

No anexo A da NBR 15200 (ABNT, 2012), apresenta-se o método do tempo equivalente, que trata de outra forma para obter o tempo requerido de resistência ao fogo de elementos estruturais de concreto armado de um compartimento que está detalhado no Anexo C deste trabalho.

Após identificar o TRRF, parte-se à verificação do elemento estrutural em condição de incêndio de acordo com o método Tabular que baseia-se em atender às dimensões mínimas apresentadas em tabelas, em função do tipo de elemento estrutural. Esse tipo de método permite uma rápida e fácil validação do elemento estrutural em estudo em situação de incêndio. Quanto as verificações do *spalling*, consideram-se desnecessárias. Segundo a NBR 15200 (ABNT,2012), para o dimensionamento de estruturas de concreto em situação de incêndio, basta satisfazer às dimensões mínimas apontadas no método Tabular, desse modo, compreende-se que esse fenômeno aleatório pode ser desprezado.

As dimensões mínimas das lajes nervuradas em duas direções são representadas pela Tabela B.1 do Anexo B, conforme especificado na tabela 9 da NBR 15200 (ABNT, 2012). Já para as lajes nervuradas armadas em uma só direção, as dimensões mínimas são apresentadas na Tabela B.2 do Anexo B, segundo a Tabela 11 da mesma norma. Além disso, para complementar as informações da Tabela B.2, torna-se necessário consultar a Tabela B.3 do Anexo B, conforme especificado na tabela 6 da NBR 15200 (ABNT, 2012). De forma resumida, na Figura AP.3, exibem-se as etapas estabelecidas neste método.

2.4 Método simplificado Isoterma de 500 °C

O Método da Isoterma de 500 °C descrito no Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004) é adequado para uso em seções expostas a diferentes tipos de incêndio, inclusive as seções impostas ao incêndio-padrão, contanto que gerem isotermas semelhantes no componente em questão. Foi originalmente proposto por Anderberg (1978), sendo válido para seções com larguras que atendam às especificações mínimas na Tabela B.4 do Anexo B:

De acordo com este método simplificado, deve-se encontrar o momento resistente em situação de incêndio, logo seguiu rigorosamente cada descrição ao decorrer. Seguindo esta ideia, considera-se nula a resistência da região externa à isoterma de 500 °C, pois o concreto nesta temperatura já perdeu sua resistência devido à ação do fogo. Diante disto, considera-se que o concreto da seção interna à isoterma de 500 °C, possui a mesma resistência característica à compressão em situação de incêndio da resistência característica à compressão da temperatura ambiente, já que não há o fator de redução da resistência do concreto em função de temperaturas elevadas $k_{c,\theta}$, Equação 5:

$$f_{cd,fi} = f_{ck} \quad (5)$$

onde:

$f_{cd,fi}$: resistência de cálculo à compressão do concreto em situação de incêndio;

f_{ck} : resistência característica à compressão do concreto a temperatura ambiente.

Com relação à resistência do aço, é calculada em função das temperaturas nos eixos das barras encontradas através do método de Wickström, detalhado no Anexo C, e por fim, aplicando-se os fatores de redução de resistência segundo a Tabela A.3 do Anexo A. Além disso, pode ocorrer que algumas barras fiquem de fora da seção transversal interior à isoterma de 500 °C, mesmo assim elas devem ser consideradas no cálculo do momento resistente em situação de incêndio.

A fim de aplicar esse método, é necessário determinar a profundidade a isoterma com 500 °C. Segundo Wickström (1986) apud Purkiss (2014), a profundidade pode ser calculada pela Equação 6:

$$x_{500} = \left[\frac{\frac{a_c}{0,417 \cdot 10^{-6} t}}{\left(4,5 + \frac{\Delta\theta_{c,x}}{0,18 n_w \Delta\theta_g} \right)} \right]^{0,5} \quad (6)$$

onde:

x_{500} : profundidade da isoterma de 500 °C, em milímetros (mm);

a_c : difusividade térmica do concreto, em metros quadrados por segundo (m²/s), sendo o valor de referência utilizado por Wickström de $0,417 \cdot 10^{-6}$ m²/s;

t : tempo, em horas (h);

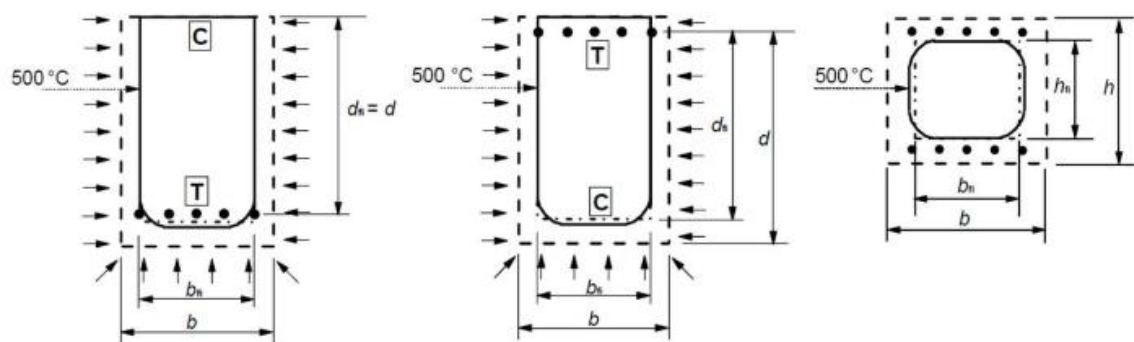
$\Delta\theta_{c,x}$: variação de temperatura, em graus Celsius (°C), no interior do concreto, em uma profundidade x , em metros (m), considerando a temperatura ambiente igual a 20 °C, $\Delta\theta_x = 480$ °C;

n_w : fator que relaciona temperatura dos gases à temperatura da superfície (adimensional), dado pela Equação C.6;

$\Delta\theta_g$: variação da temperatura média, em graus Celsius (°C), dos gases no ambiente em chamas.

Após a determinação da isoterma, determina-se a nova largura, b_{fi} , e a nova altura efetiva, d_{fi} , da seção transversal excluindo o concreto de fora da isoterma de 500 °C. Os cantos arredondados das isotermas podem ser considerados, aproximando a forma real a um quadrado ou retângulo, conforme as instruções e imagens representativos do anexo B do Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004), apresentada na Figura 3:

Figura 3 – Redução de seções de concreto armado com base no método da Isotherma de 500 °C. Da esquerda à direita, exposição ao fogo em três faces com zona tracionada exposta, exposição em três faces com zona comprimida exposta e exposição em quatro faces



Fonte: Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004)

Este método não leva em consideração a perda de resistência no concreto, pois desconsidera o fator redutor da resistência desse material em função das temperaturas elevadas, considerando somente a perda de resistência do aço. Entretanto, no cálculo das forças resultantes devem se aplicar tanto os coeficientes de ponderação das resistências do aço

e do concreto, respectivamente, $\gamma_{s,fi}$ e $\gamma_{c,fi}$, com valores iguais a 1. Por fim, o redutor do valor de cálculo da resistência à compressão do concreto α_{fi} é igual a 1, para as condições de incêndio.

A média do coeficiente de redução da resistência da armadura de cada camada v em função da temperatura é calculada de acordo com a Equação 7:

$$k_v(\theta) = \frac{\sum k(\theta_i)}{n_v} \quad (7)$$

onde:

θ_i : temperatura da barra de aço i na camada v ;

$k(\theta_i)$: coeficiente de redução da resistência da barra de aço i a temperatura θ_i ;

n_v : número de barras na camada v .

Vale ressaltar que o método simplificado de cálculo não garante a função corta fogo dos elementos estruturais. Dessa forma, para adotar essa função, os elementos estruturais devem apresentar dimensões mínimas estabelecido no método Tabular, ou deve ser verificado com base no método avançado de cálculo ou no método experimental. No caso deste trabalho, escolheu-se o método Tabular, por ser um método de fácil implementação. Na Figura AP.4, de forma resumida, explicitam-se as etapas deste método.

2.5 Modelo de laje

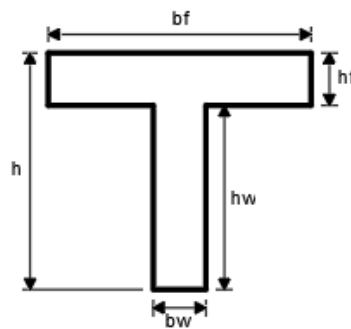
As lajes nervuradas têm como características principal a disposição das vigotas em uma só direção, podendo também ter vigotas em duas direções. A utilização de lajes nervuradas é especificamente recomendada quando há necessidade de vencer grandes vãos ou resistir a altas ações verticais (Bastos, 2021). Neste trabalho, todas as análises foram consideradas com lajes simplesmente apoiadas. Esse fato estimula recomendar que o momento máximo de uma nervura de laje simplesmente apoiada seja dimensionado, a favor da segurança, como o de um elemento isolado.

A largura das vigas de apoio, a classe de agressividade ambiental (CAA), os comprimentos dos vãos das lajes analisadas, as resistências característica do concreto e aço são dados de entrada. Realiza-se a leitura do arquivo que possui os dados relacionadas ao carregamento, propriedades mecânicas e geométricas da laje que será otimizada. Vale ressaltar que, a implementação do código utiliza valores de resistências características à compressão do

concreto (f_{ck}) menores ou iguais a 40 MPa, pois utilizou o preço unitário do banco de dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), onde constava f_{ck} de 20 MPa até 40MPa. E o tipo do aço utilizado foi o CA50.

O modelo matemático para o cálculo da laje é o agrupamento de vigotas paralelas que exercem sua função praticamente independentes, e dessa forma podendo ser considerada uma seção transversal funcionando em formato “T”. A parte vertical da seção transversal da “viga” é chamada de alma (nervura), e a parte horizontal é denominada de mesa (capa de concreto), conforme observado na Figura 4. Essas vigotas trabalham para resistir aos momentos fletores e às forças cortantes, em conjunto, através da resistência suficiente à laje (Bastos, 2021).

Figura 4 – Seção transversal em formato “T” da laje nervurada



Fonte: O autor (2024)

Para o início do cálculo de dimensionamento, o peso próprio, calculado pela Equação 8, da laje nervurada é obtido através das dimensões da seção transversal da laje (fase de pré-dimensionamento). Na Figura 5, apresenta-se o corte da seção transversal e a vista em planta da laje nervurada utilizada para o cálculo do peso próprio.

$$p_g = \frac{h_f(e_x e_y) + h_w b_w e_y + h_w b_w (e_x - b_w)}{e_x e_y} \gamma_{\text{concreto}} \quad (8)$$

onde:

p_g : peso próprio;

h_f : altura da mesa;

h_w : altura da nervura;

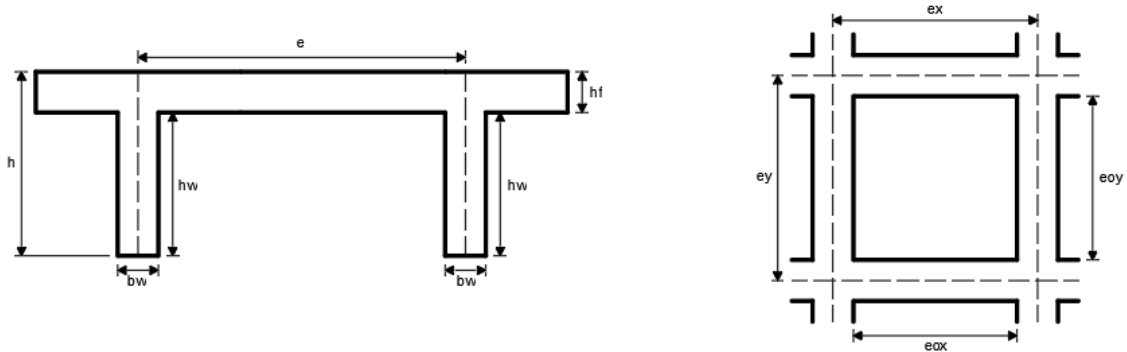
b_w : largura da nervura;

e_x : espaçamento entre as nervuras em relação a x;

e_y : espaçamento entre as nervuras em relação a y;

γ_{concreto} : peso específico do concreto.

Figura 5 – Seção transversal em formato “T” e a vista em planta da laje nervurada



Fonte: O autor (2024)

2.6 Processo de otimização

A otimização visa encontrar o máximo ou mínimo de uma função de interesse, sujeita a um conjunto de restrições. Essas restrições podem ser expressas como igualdades ou desigualdades, definindo assim um espaço de busca viável. A estrutura da otimização é composta por uma função objetivo que depende de uma ou mais variáveis de projeto. Essa função é então maximizada ou minimizada, enquanto as restrições são satisfeitas.

Algoritmo Genético é um método de otimização e busca que usa das definições da genética, baseado nos procedimentos de evolução de populações de seres vivos (Sivanandam; Deepa, 2007). Esse método originou-se a partir dos princípios da Teoria da Evolução de Charles Darwin. Como faz analogia com as técnicas da genética e da seleção natural, torna-se necessário utilizar as terminologias usadas na biologia, no método dos algoritmos genéticos aplicados ao problema de otimização (De Castilho, 2003).

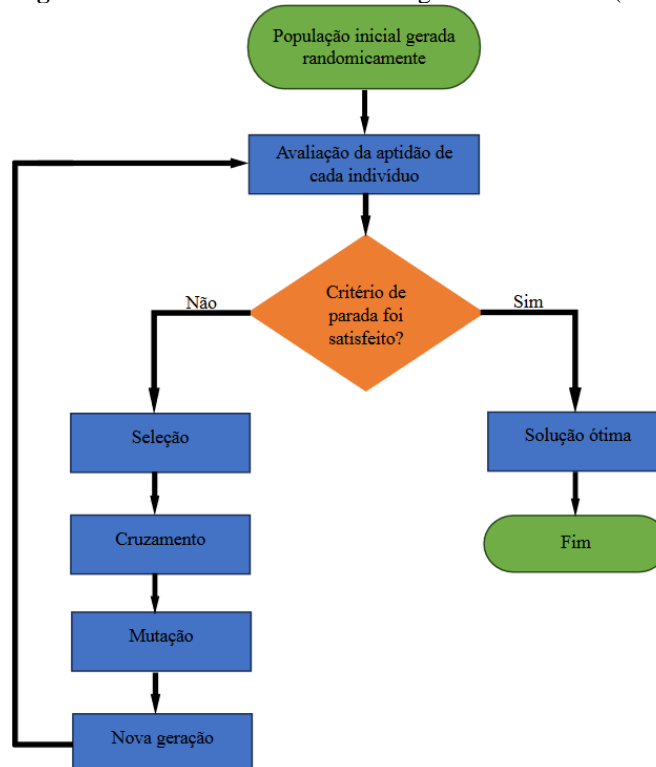
A ideia fundamental do AG é iniciar com uma população de soluções potenciais, geradas aleatoriamente. Cada solução é avaliada quanto à sua adequação por meio de uma função de aptidão, que geralmente corresponde à função objetivo para problemas não restritos, ou a uma função de penalidade para problemas restritos. A partir desta população atual de soluções, um subconjunto é selecionado com base nas melhores soluções. Isso aumenta a probabilidade de que as gerações subsequentes tenham soluções melhores do que as gerações anteriores (Arora, 2016).

Na Figura 6, apresenta-se o fluxograma que ilustra o funcionamento do método dos AG. Em primeiro momento, é gerado de forma arbitrária uma população inicial que contém soluções potenciais que traduz em pontos propagados no espaço de busca. Um grupo de indivíduos compõe uma população. Cada indivíduo (cromossomo ou *string*) representa uma

possível solução (hipótese) de um problema, equivalente a um ponto de espaço de busca. A cada indivíduo é atribuído um valor de capacidade e potencialidade durante o processo evolutivo, que proporciona maior chance de sobrevivência e reprodução, ou seja, está mais próximo da melhor solução que otimiza o valor numérico determinado para o problema.

Durante o processo do AG, aplicam-se as dificuldades do problema estabelecido sobre a população, semelhante ao processo de seleção natural da Teoria da Evolução. Os que são mais aptos, desempenham bem sua função, tem maior probabilidade de sobreviver e transferir a informação que elas detêm para a próxima geração. Após esse passo, há o cruzamento que estimula que as soluções troquem as informações, igual como acontece com os seres vivos a partir da reprodução. Por último, há a mutação, onde se altera aleatoriamente o valor dos genes de alguns indivíduos, introduzindo novos indivíduos na população. Este processo se torna iterativo determinando várias gerações até que algum critério de parada alcance o ponto ótimo. Pode ser interrompido de várias maneiras, por exemplo: número máximo de gerações é atingido; se alcançar a solução/hipótese ótima para o problema; tempo limite é extrapolado; quando a população não muda o suficiente para alcançar o número máximo de gerações ou quando uma sequência de gerações consecutivas não ocorre mudanças na população que contém a solução.

Figura 6 – Processo do método do Algoritmo Genético (AG)



Fonte: O autor (2024)

Foram definidas as variáveis de projeto utilizadas no problema de otimização: largura da nervura (b_w), altura da mesa (h_r), altura total (h), distância entre os eixos de nervuras na direção x e y , respectivamente, e_x e e_y , cobertura (c) e o diâmetro da barra longitudinal (ϕ). Com a função objetivo e as restrições imposta na implementação da situação convencional e de incêndio, descrito no Apêndice BP, pretende-se minimizar o custo de execução linear laje nervurada. Lembrando que, o custo do aço é calculado por quilograma (kg), o custo do concreto é calculado por volume (cm^3) e seu preço depende da resistência característica do concreto (f_{ck}). Recorreu-se ao banco de dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), insumos e composições não desonerados em Pernambuco, como consulta para os preços do custo do concreto, aço e fôrma, incluído o custo da mão de obra, explícita na Tabela BP.3.

O desempenho dos AG é influenciado principalmente pelos seus parâmetros, como o tamanho da população, taxas de cruzamento e mutação. Os valores desses parâmetros devem ser determinados de forma peculiar, porque, caso contrário, a solução otimizada encontrada pode ser um mínimo local. A função *ga* apresentada diversos parâmetros que podem ser acrescidos, além de parâmetros próprios desta função. Para este trabalho, foram selecionados os valores para a população, *PopulationSize* (especifica o tamanho da população em cada geração) igual a 200; reprodução *CrossoverFraction* (especifica a fração de indivíduos da próxima geração, produzida pelos operadores de cruzamento) igual a 0,8 e *EliteCount* (especifica a fração de indivíduos que sobrevirão para a próxima geração) igual 0,05; resolução das restrições não-lineares *NonlinearConstraintAlgorithm* (especifica o algoritmo para a resolução das restrições não-lineares) que foi *penalty*.

Para determinar esses valores descritos anteriormente, foi preciso escolher uma configuração teste de dimensionamento para a laje nervurada com a finalidade de estudar a convergência do resultado. Foram escolhidos para a *PopulationSize* valores iguais a {200, 400, 600, 800 e 1000}; *CrossoverFraction* valores iguais a {0,07, 0,08 e 0,09} e *EliteCount* valores iguais a {0,025 e 0,05}. Após analisar, percebeu-se que o melhor resultado seria a configuração apresentada anteriormente. Além disso, utilizou-se outro parâmetro *MaxGenerations* (especifica o número máximo de iterações antes da parada do algoritmo) com valor igual a 700 (correspondente ao número total de variáveis (7) multiplicado por 100). Ademais, necessitou-se validar o código implementado, e no Apêndice BP, apresenta-se os resultados da validação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme o estudo paramétrico das variáveis de projeto, identificaram-se similaridades em determinados casos, por exemplo, a largura da mesa (h_f) permaneceu constante em todos os casos, em busca da solução ótima. Tal análise envolveu a manipulação de variáveis para avaliar seu impacto nos resultados, com o objetivo de encontrar padrões que levem à otimização da laje.

Para isso, foram realizadas análises utilizando gráficos e tabelas, a fim de compreender os resultados de maneira clara e objetiva. Essas representações visuais facilitaram a identificação de tendências e a tomada de decisões fundamentadas.

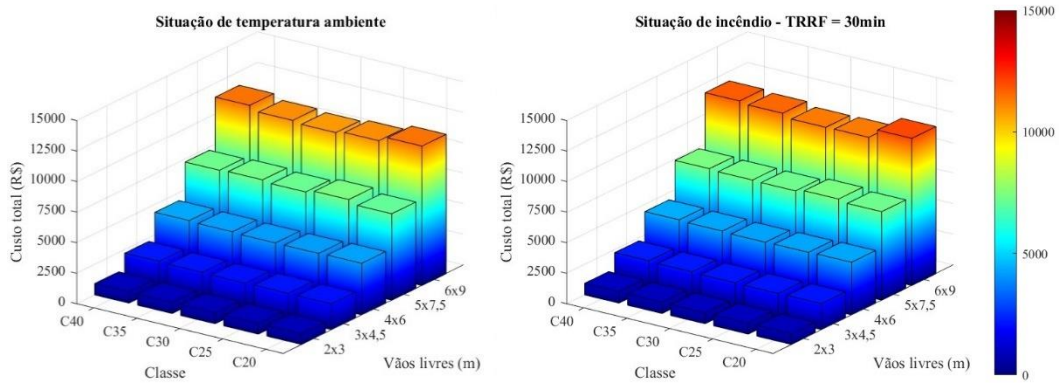
3.1 Custo das lajes bidirecionais simplesmente apoiada

Para analisar a tendência dos custos em função das classes do concreto e dos vãos livres, foi levado em consideração a situação convencional, dimensionado de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023) e a situação em exposição ao fogo, também dimensionada pela NBR 6118 (ABNT, 2023), porém restrita conforme o método Tabular e simplificado. Dessa forma, a otimização foi crucial para buscar uma solução ótima do custo total que engloba o custo do concreto, do aço e da fôrma.

Na Figura 7, apresenta-se o custo total das lajes em função da classe de resistência do concreto variando de 20 MPa até 40 MPa com intervalos de 5 MPa, e dos vãos livres variando de 2x3 metros até 6x9 metros, tanto para a situação convencional quanto para a situação que considera o incêndio com Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) igual a 30 minutos. De acordo com esta figura, mostra-se que ambos os gráficos seguem uma tendência linear e os valores de custo são visualmente próximos.

Na Tabela 2, apresenta-se a razão percentual entre os custos da situação de incêndio com TRRF igual a 30 minutos e da situação de temperatura ambiente. Essa relação mostra o quanto o valor do custo total quando leva em consideração a probabilidade de incêndio consegue ser igual a situação convencional e até mesmo superar. Essas variações ocorrem devido as condições impostas em situação convencional e de incêndio, interferidos pelas dimensões mínimas, momentos resistentes, carregamentos e outras condições a fim de ter o melhor comportamento estrutural para assegurar a segurança.

Figura 7 – Relação do custo total de execução para as lajes em situação de incêndio com TRRF igual a 30 minutos e em situação convencional



Fonte: O autor (2024)

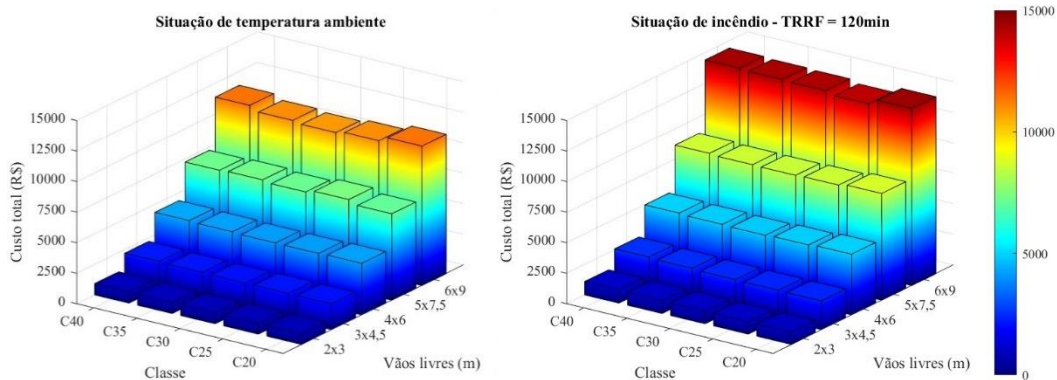
Tabela 2 – Razão entre o custo total das lajes em situação de incêndio com TRRF igual a 30 minutos e em situação convencional

VÃOS LIVRES (m)	C20	C25	C30	C35	C40
2x3	102%	102%	102%	102%	102%
3x4,5	101%	100%	102%	102%	102%
4x6	102%	102%	101%	101%	101%
5x7,5	102%	101%	101%	100%	102%
6x9	106%	103%	104%	105%	103%

Fonte: O autor (2024)

Na Figura 8 considera-se o incêndio com TRRF igual a 120 minutos. Visualmente, é possível ver também a tendência de crescimento em ambos os gráficos, principalmente para os vãos livres de 6x9 metros que apresenta valores altos em comparados com o TRRF de 30 minutos. Por sua vez, a Tabela 3 apresenta-se a razão percentual entre os custos da situação de incêndio com TRRF igual a 120 minutos e da situação de temperatura ambiente. Essa comparação dos custos em formato de percentual permite observar o quanto os custos totais das lajes em condições de incêndio são maiores em relação à situação convencional. Ainda, é possível notar as variações dos percentuais, visto que esses valores dependem das restrições impostas para criar uma configuração de seção transversal com a finalidade de resistir às ações.

Figura 8 – Relação do custo total de execução para as lajes em situação de incêndio com TRRF igual a 120 minutos e em situação convencional



Fonte: O autor (2024)

Tabela 3– Razão entre o custo total das lajes em situação de incêndio com TRRF igual a 120 minutos e em situação convencional

VÃOS LIVRES (m)	C20	C25	C30	C35	C40
2x3	116%	116%	117%	117%	118%
3x4,5	112%	112%	115%	116%	116%
4x6	118%	117%	115%	114%	114%
5x7,5	123%	116%	119%	117%	119%
6x9	127%	127%	132%	130%	127%

Fonte: O autor (2024)

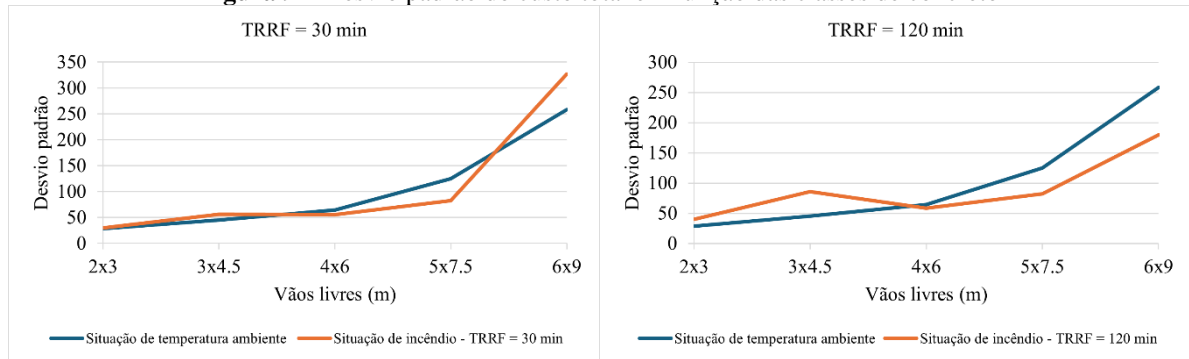
Logo, ao comparar os resultados entre a Tabela 2 e 3, é explícito que dependendo do TRRF escolhido, o custo total quando leva em consideração a probabilidade de incêndio consegue ser igual, e até mesmo, superar a situação convencional. Contudo, a escolha do TRRF depende de diversos parâmetros, como foi citado na metodologia do dimensionamento pelo método Tabular conforme a NBR 15200 (ABNT, 2012) e pelo método da Isoterma de 500 °C da Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004).

Observa-se que, em geral, há o aumento do custo total para cada condição de análise. Além disso, o resultado que a Tabela 2 expõe, é possível verificar que para um TRRF pequeno, o custo total é aproximado ao custo total da situação de temperatura ambiente.

Em condições de incêndio, a geometria das peças deve garantir a dimensão mínima para desempenhar a função corta-fogo e ter resistência suficiente para as ações excepcionais. Isso significa que as estruturas precisam ser projetadas para resistir ao fogo por um determinado período, visto que a aplicação do método simplificado não garante essa função dos elementos estruturais. No entanto, essa garantia de resistência ao fogo muitas vezes aumenta o custo das construções.

Por outro lado, observa-se que em situação de incêndio, os valores de desvios dos custos totais em função das classes de concreto são próximos e que a partir das dimensões 5x7,5 metros há uma evolução que ultrapassa os desvios da condição convencional, como indicado na Figura 9. Para situações com TRRF com valor alto, no início os valores são maiores do que a situação de temperatura ambiente e com a evolução das dimensões os desvios decrescem e cresce novamente, porém os valores ficam abaixo da situação convencional. A partir desses dois resultados, sugere que os custos das lajes variam menos quando expostos ao fogo com TRRF alto em alguns pontos do que em situação convencional. Isso é atribuído aos requisitos de materiais para resistir ao fogo. Além disso, é interessante observar que os vãos livres 4x6 metros resultou em uma dispersão por volta de 55 em ambos os casos.

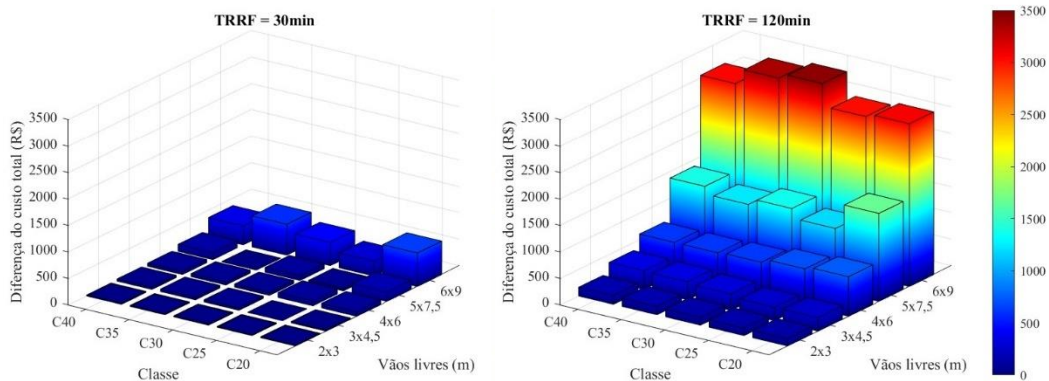
Figura 9 – Desvio padrão do custo total em função das classes de concreto



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 10, apresenta a diferença entre o custo total das lajes em situação de temperatura ambiente e de exposição ao fogo com o TRRF de 30 min e 120 min, em função dos vãos livres e da classe do concreto, objetivando analisar qual condição é mais viável.

Figura 10 – Diferença do custo total de execução das lajes em situação convencional e em incêndio

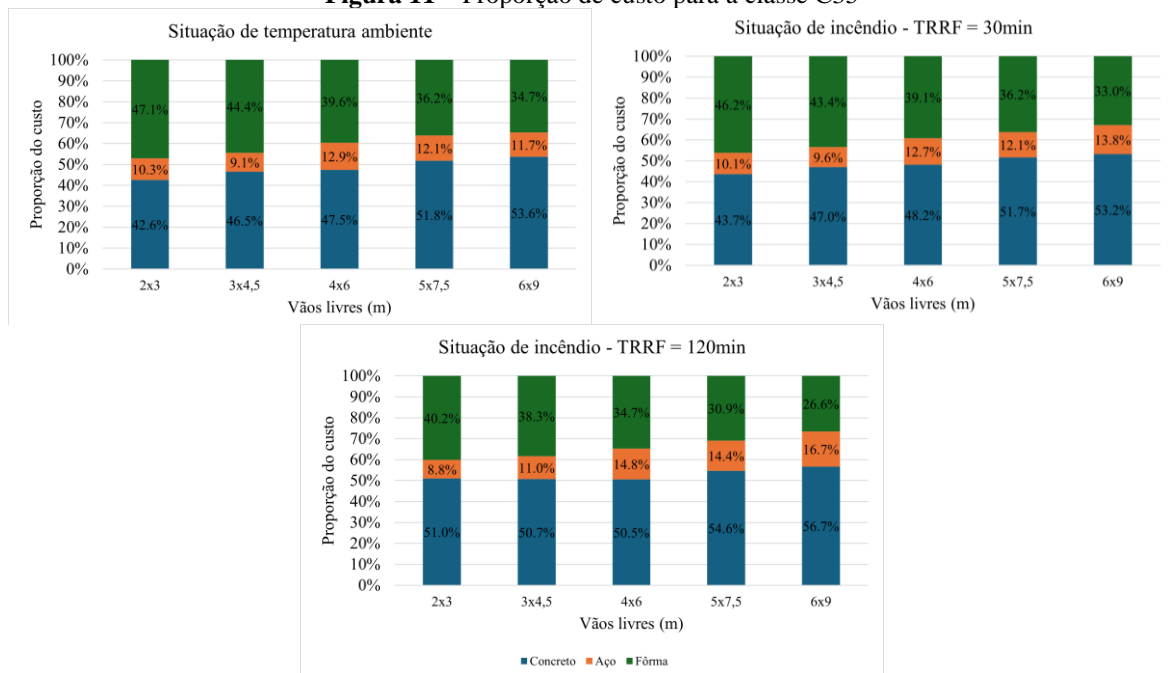


Fonte: O autor (2024)

A partir da análise da Figura 10, percebe-se que para as classes de concreto e vãos menores, a diferença entre a situação de temperatura ambiente e de incêndio apresenta valores baixos. À medida que a classe de concreto e o vão livre aumentam, essa diferença se torna significativa. No entanto, há exceções; por exemplo, ao se fixar os vãos livres 6x9 metros, é notável que para a classe C25, a diferença é baixa em comparação com os demais vãos.

Analisando as proporções de composição de custo da laje de acordo com os valores de mercado do mês de abril, como evidente na Figura 11, foi selecionada a classe C35 para a análise, valor escolhido acima de média das classes de concreto apresentado na Tabela BP.3. Observa-se que, de acordo com a solução ótima do Algoritmo Genético (AG), o concreto é o material mais dispendioso em relação ao custo, exceto para os vãos de 2x3 metros na situação de temperatura ambiente e com o TRRF de 30 minutos. Assim, sempre se buscou de alguma forma configurar uma geometria que reduzisse o custo do concreto e garantisse a segurança e estabilidade das lajes. É importante ressaltar que esse padrão ocorreu de maneira semelhante para as classes C20, C25, C30 e C40, sendo o custo do concreto o principal, seguido pela fôrma, e por fim, o aço, que exerce menor influência.

Figura 11 – Proporção de custo para a classe C35



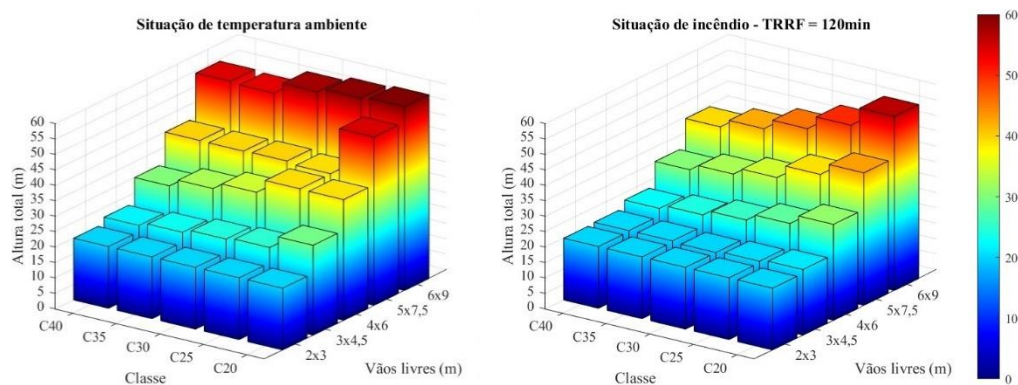
Fonte: O autor (2024)

3.2 Características geométricas

Como mencionado anteriormente, foram escolhidas como variáveis de projeto a largura da nervura (b_w), a altura da mesa (h_f), a altura total (h), a distância entre os eixos de nervuras na direção x e y , representadas por e_x e e_y , o cobrimento (c) e o diâmetro da barra longitudinal (ϕ). Além disso, foi considerado para análise a situação convencional e condição de incêndio com TRRF de 120 minutos, pois os resultados com o TRRF igual de 30 minutos fornecem resultados próximos se comparado com a condição de temperatura ambiente. Dessa forma, a Figura 12 mostra a variação da altura total (h) em função da classe de concreto e das dimensões dos vãos para os casos de temperatura ambiente e TRRF de 120 minutos.

No primeiro momento, foram escolhidos para os limites inferior e superior da altura da seção transversal, respectivamente, 20 cm e 40 cm. Em algumas combinações entre as classes de concreto e vãos livres, exigiram que a altura total fosse 40 cm, porém essa dimensão não foi capaz de resistir a solicitação, logo aumentou a largura da nervura. Percebeu-se que com essa configuração o custo aumentava consideravelmente, ou seja, alguns casos apresentavam valores bastante dispersos em comparação com outras combinações, especialmente para as dimensões de vãos de 6x9 metros. Como estratégia, optou-se de aumentar o limite superior para 60 cm. A partir dessa modificação, a altura total ultrapassou 40 cm, a largura da nervura reduziu e o custo total também diminuiu e não apresentou valor bastante disperso. Logo, a Figura 12 apresenta o resultado dessa modificação do limite superior.

Figura 12 – Altura total em função dos vãos livres e das classes de concreto

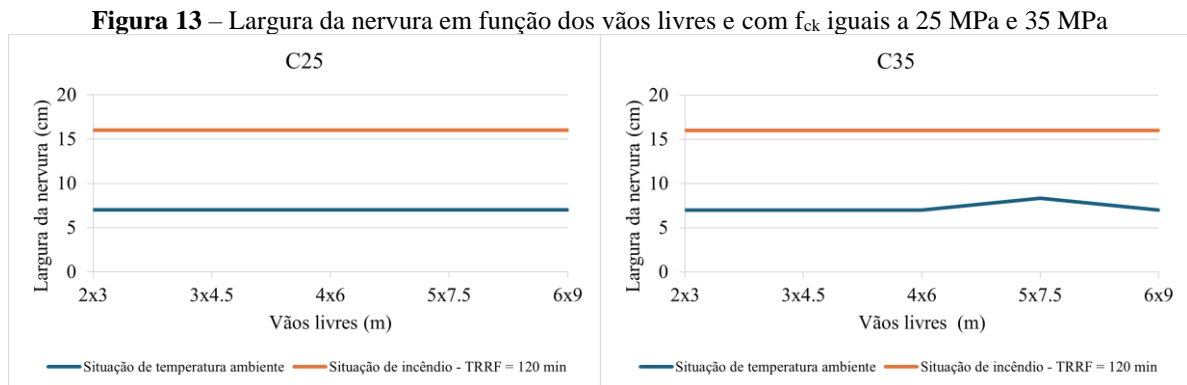


Fonte: O autor (2024)

A altura da mesa (h_f), em todos os casos, mostrou-se tanto na situação de temperatura ambiente quanto na situação de incêndio com TRRF igual a 120 minutos valores iguais a 5

cm. O método de otimização optou por manter constante a dimensão da altura da mesa (h_f) para alcançar a solução ótima.

Da mesma forma que ocorreu com a altura da mesa (h_f), a largura da nervura (b_w) permaneceu constante na maioria das situações para as classes C25 e C35, conforme mostra-se na Figura 13. Foram selecionadas as classes de concreto C25 e C35, pois são valores, respectivamente, abaixo e acima da média das classes do concreto. Observou-se que na situação de temperatura ambiente, a maioria dos valores selecionados pelo AG para a largura da nervura (b_w) é de 7 cm, exceto para os vãos livres de 5x7,5 metros com classe C35, onde o valor foi maior que 7 cm, com a finalidade de resistir ao carregamento. Na situação de exposição ao fogo, os valores apresentados foram constantes e iguais a 16 cm, a fim de atender à largura mínima exigida pela norma de incêndio.



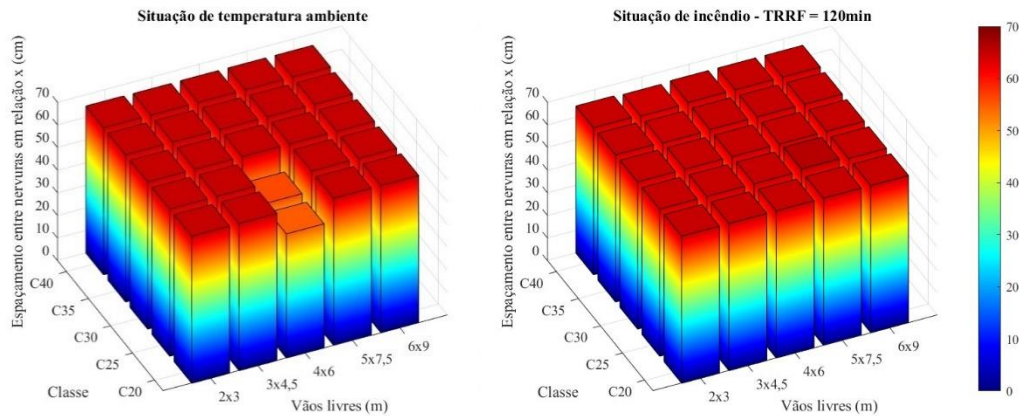
Fonte: O autor (2024)

Foi possível também analisar o espaçamento em relação a x e y, indicado nas Figuras 14 e 15. Observa-se na Figura 14 que os valores do espaçamento, na maior parte, não foram dispersos, pois sempre se aproximaram do limite de 65 cm. Logo, para resistir às tensões normais de compressão tanto na situação de temperatura ambiente quanto na exposição ao fogo (condição em que as propriedades do concreto e do aço são afetadas, necessitando de maiores dimensões para atender às recomendações indicadas em norma), foram obtidos espaçamentos próximos ou iguais ao limite de 65 cm. Provavelmente, a otimização optou por aumentar os espaçamentos ao limite a fim de ter um custo mínimo, garantindo a segurança. Vale ressaltar que a solicitação em x é maior do que em y, o que também justifica o espaçamento adotado e a minimização da altura da mesa (h_f) e da largura da nervura (b_w), como solução para garantir a economia da laje nervurada com segurança e estabilidade satisfeita.

No que lhe concerne, o espaçamento em y, apresentado na Figura 15, segue o mesmo

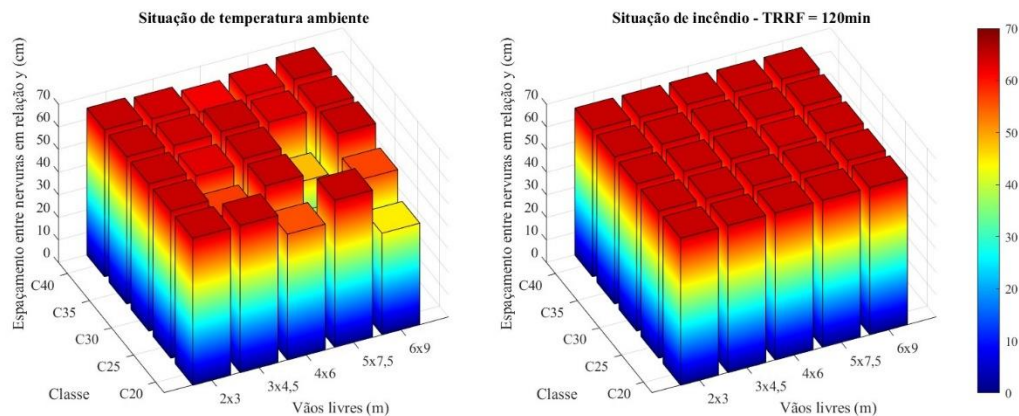
raciocínio descrito para a Figura 14. No entanto, vale ressaltar que as ações impostas na direção y são menores. Assim, na situação de temperatura ambiente, os espaçamentos são menores em alguns casos, uma vez que o método de otimização optou por aumentar a altura total (h), devido as ações serem maiores em relação x, desse modo, não necessitando de aumentar os espaçamentos em relação a y, em alguns casos. Logo, o espaçamento escolhido é capaz de suportar as solicitações e apresentar um menor custo total, não havendo necessidade de aumentar as dimensões em relação a y. Na situação de exposição ao fogo, é evidente que os espaçamentos aumentam, apresentando em todos os casos valores próximos de 65 cm (Figura 15), devido à redução das propriedades mecânicas da laje em situação à exposição ao fogo, exigindo uma geometria maior para aumentar a resistência à compressão da seção.

Figura 14 – Espaçamento entre as nervuras em relação a x em função dos vãos livres e das classes de concreto



Fonte: O autor (2024)

Figura 15 – Espaçamento entre as nervuras em relação a y em função dos vãos livres e das classes de concreto

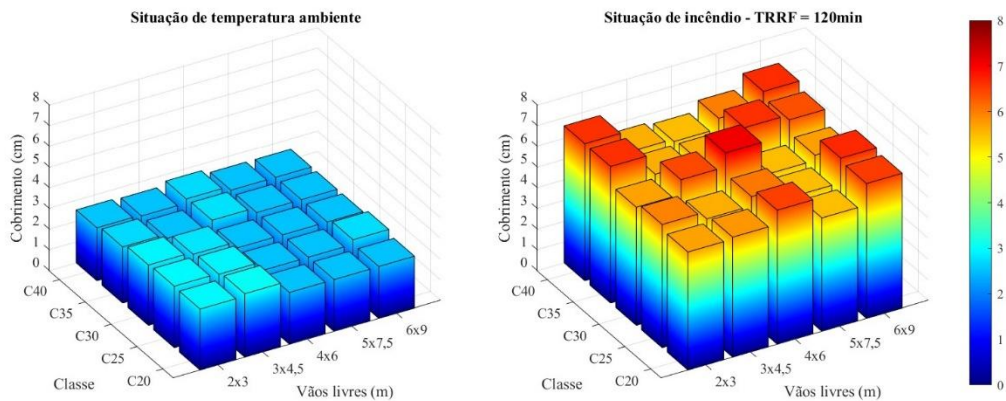


Fonte: O autor (2024)

Por último, é relevante avaliar o cobrimento, especialmente na condição da laje nervurada em exposição ao fogo. Assim, na Figura 16 apresentam-se resultados com o objetivo de

analisar essas situações impostas. No dimensionamento considerando a temperatura ambiente, o cobrimento foi maior ou igual ao mínimo exigido, que neste caso seria de 2,5 cm, uma vez que foi selecionada a classe de agressividade igual a 2, conforme a tabela 7.2 da NBR 6118 (ABNT, 2023). Também para a condição de exposição com TRRF igual a 120 minutos, o obteve-se valores iguais ou maiores que o mínimo exigido pelo método Tabular, com a finalidade de atender a NBR 15200 (ABNT, 2012).

Figura 16 – Cobrimento em função dos vãos livres e das classes de concreto

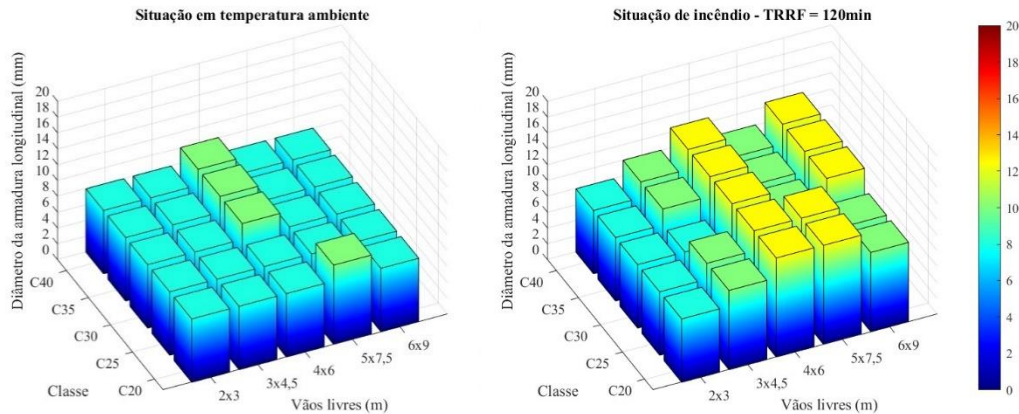


Fonte: O autor (2024)

3.3 Diâmetro da armadura

Na Figura 17, observa-se que no processo de otimização alternam-se os valores do diâmetro da armadura longitudinal, visando a minimização do custo de execução, ao mesmo tempo em que garante a segurança da laje nervurada. O método de otimização realiza essa alternância, conforme o preço de custo da armadura e a área de aço necessária para resistir à tensão de tração, ou se necessário, de compressão também, imposta pelo carregamento. Portanto, essa flexibilidade ajusta melhor o custo total. Percebe-se que na situação de temperatura ambiente, os diâmetros variam entre 6,3 mm e 8,0 mm. Já na situação de incêndio, os diâmetros variam entre de 8,0 mm e 12,5 mm.

Figura 17 – Diâmetro da armadura em função dos vãos livres e das classes de concreto



Fonte: O autor (2024)

4 CONCLUSÕES

Esse estudo se tornou relevante pois permitiu conhecer o comportamento da laje nervurada diante de diversas restrições em exposição ao fogo, além dos limites imposto pela NBR 6118 (ABNT, 2023) que são fundamentais para garantir a segurança, bom desempenho em serviço e economia. Pode-se resumir pontos importantes sobre a otimização de lajes nervradas de concreto armado em situação de incêndio:

- Diante do estudo paramétrico onde foram variadas as dimensões dos painéis de lajes nervradas retangulares e as classes de concreto, percebeu-se o aumento do custo total, principalmente para o TRRF igual a 120 minutos;
- Aumentar a altura da seção transversal reduz o custo total, sem precisar aumentar a largura da nervura para este estudo;
- Considerar TRRF de 30 minutos, apresenta um valor do custo total do elemento estrutural próximo ao custo total considerando o dimensionamento convencional pela NBR 6118 (ABNT, 2023), pois a temperatura no interior do concreto não influencia de modo acentuada, assim a seção é pouco reduzida, pois a profundidade da isoterma de 500 °C não aumenta significativamente;
- A NBR 14432 (ABNT, 2001) preconiza algumas edificações (por exemplo, edificações cuja área total seja menor ou igual a 750 m², edificação térrea usada como depósito com carga de incêndio específica inferior a 2000 MJ/m²) que estão isentas da verificação estrutural em situação de incêndio. No entanto, dependendo da gravidade,

os elementos estruturais precisam de dimensões específicas para resistir às ações excepcionais do fogo, exigindo dimensionamento para essas situações. Dessa forma, isso aumenta o custo com base no tempo de incêndio e das características estruturais. Por outro lado, conforme os resultados apresentados, percebe-se que há casos que se aproximam do dimensionamento convencional;

- Durante um incêndio, as estruturas de concreto armado estão sujeitas a altas temperaturas, o que pode comprometer sua integridade estrutural e ocasionar a ruptura. Logo, as propriedades mecânicas dos materiais são afetadas, e diante deste desafio, o método de otimização baseado em AG buscou dimensões ótimas que atendessem as restrições normativas, a fim de encontrar um custo econômico, além de garantir segurança e bom desempenho em serviço;
- O diâmetro da barra de armadura longitudinal sendo uma variável na otimização aprimorou o campo e a solução ótima para o refinamento da otimização, pois a escolha adequada do diâmetro da barra está associada com o preço unitário e área de aço calculada.

Diante de diversos incêndios devastadores, torna-se imprescindível estudos e regulamentações para as edificações. Além de medidas e equipamentos adequados de prevenção e combate de incêndios, há normas e estudos voltados para a resistência estrutural das construções em situações de incêndio. Estes abordam desde o comportamento dos materiais até o dimensionamento das estruturas, onde é essencial garantir segurança e estabilidade mesmo diante das altas temperaturas.

Em suma, a evolução contínua nessa área é essencial para garantir a segurança das edificações e proteger vidas e patrimônio. Investir em pesquisa para compreender melhor o comportamento dos materiais e das estruturas em condições de incêndio, assim como aprimorar as normas e regulamentações existentes, pode contribuir significativamente para a redução dos riscos e para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e econômicas. Ademais, a disseminação do conhecimento obtido por meio desses estudos pode beneficiar toda a comunidade de engenharia e construção, promovendo práticas mais seguras e sustentáveis no setor.

REFERÊNCIAS

ANDERBERG, Y. **Analytical fire engineering design of reinforced concrete structures based on real fire characteristics**. In Proceedings of Eighth Congress of Fédération Internationale de la Précontrainte. London: Concrete Society, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 7480**: aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

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

ARORA, Jasbir Singh. **Introduction to Optimum Design**. 4.ed. Elsevier: Academic press, 2016.

BASTOS, P. S. **Estruturas de concreto I**: lajes de concreto armado. Departamento de Engenharia civil, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2021.

EUROPENA COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2**: eurocode 2: design of concrete structures: part 1-2: general rules: structural fire design. Brussels, 2004.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 2014. 4.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

COELHO, Túlio Antunes Pinto. **Avaliação da confiabilidade de seções de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. 2018. Dissertação – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

DE CASTILHO, Vanessa Cristina. **Otimização de componentes de concreto pré-moldado protendidos mediante algoritmos genéticos**. 2003. Tese – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

MASSULO, Leonardo Azevedo. **Análise de deslocamentos em lajes nervuradas**. 2021. Dissertação – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

MAXIMIANO, Dalilah Pires. **Análise numérica avançada de estruturas de aço e de concreto armado em situação de incêndio**. 2018. Tese – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

NUNES, Jessyca Priscylla de Almeida. **Otimização de lajes nervuradas de concreto armada, utilizando algoritmo genético**. 2018. Dissertação – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Caruaru, 2018.

PIRES, Rodrigo Maffessoni. **Análise de confiabilidade de vigas de concreto armado em situação de incêndio**. 2023. Dissertação – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

PURKISS, John A.; LI, L. Y. **Fire safety engineering: design of structures**. 3. ed. Taylor & Francis Group: Boca Raton, 2014.

ROCHA, P.A.S.; da Silva, K. I. 2017. **Estudo de Desempenho de vigas em situação de incêndio a partir do modelo de fibras**. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería 33, 65 p., 2017.

RODRIGUES, João Paulo Correia; OLIVEIRA, Rafael Luiz Galvão. **Dimensionamento de estruturas em situação de incêndio: segundo as normas brasileiras**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SILVA, Valdir Pignatta. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**. 2016. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

SIVANANDAM, S.N.; DEEPA, S.N. **Introduction to Genetic Algorithms**. 3. ed. Springer-Verlag, 2007.

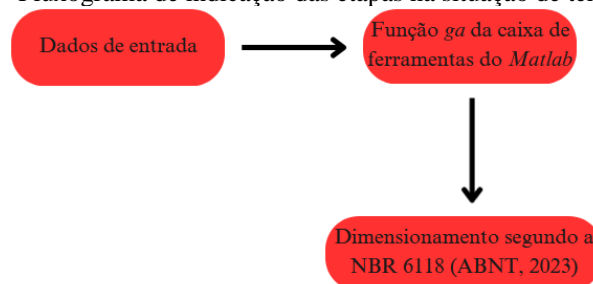
WICKSTRÖM, U. **A very simple method for estimating temperatures in fire-exposed structures**. In Grayson, S.J., Eds., *New Technology to Reduce Fire Losses and Costs*. London: Elsevier Applied Science, 1986.

APÊNDICE AP – FLUXOGRAMAS

Seguem-se os fluxogramas com a finalidade de resumir os pontos para cada situação apresentada.

Na Figura AP.1, mostra-se que a implementação necessita dos dados de entrada, que são as resistências características do concreto e aço, dimensões dos vãos livres e considerações sobre o carregamento. A função *ga* considerará estas informações iniciais para poder dimensionar o elemento estrutural na situação convencional, conforme a rotina de cálculo da NBR 6118 (ABNT, 2023) implementada.

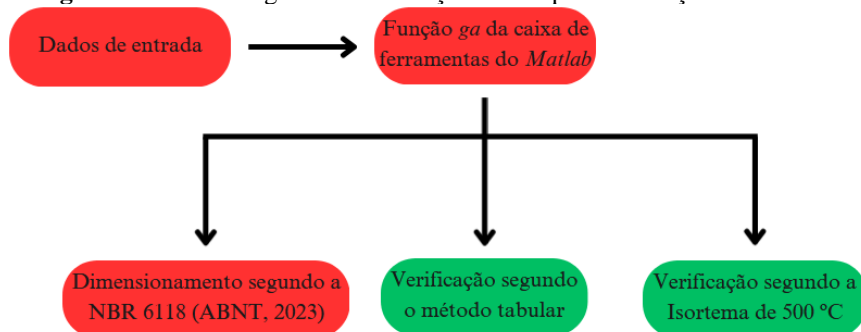
Figura AP.1 – Fluxograma de indicação das etapas na situação de temperatura ambiente



Fonte: O autor (2024)

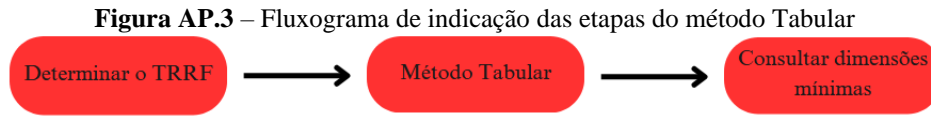
Na Figura AP.2, consideram-se os pontos descritos na situação convencional acrescido da verificação do método Tabular da NBR 15200 (ABNT, 2012) e do método simplificado Isoterma de 500 °C da Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004), a fim de dimensionar o elemento estrutural na situação de exposição ao fogo, conforme a rotina de cálculo implementada.

Figura AP.2 – Fluxograma de indicação das etapas na situação de incêndio



Fonte: O autor (2024)

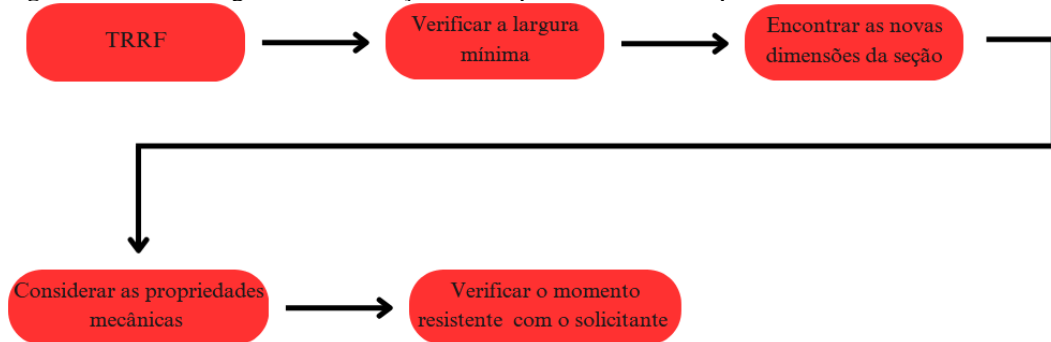
Por sua vez, na Figura AP.3, representam-se as etapas consideradas no método Tabular empregadas neste trabalho.



Fonte: O autor (2024)

Por último, na Figura AP.4, apresentam-se as etapas consideradas no método simplificado Isoterma de 500 °C aplicadas neste trabalho.

Figura AP.4 – Fluxograma de indicação das etapas do método simplificado Isoterma de 500 °C



Fonte: O autor (2024)

APÊNDICE BP – INFORMAÇÕES IMPLEMENTADAS NA OTIMIZAÇÃO

Segue-se o detalhamento da equação do custo total otimizado, além das restrições, Tabelas BP.1 e BP.2 imposta na implantação para as duas situações, como também a Tabela BP.3 dos preços unitários. Por sua vez, o resultado da validação é expresso nas Tabelas BP.4 e BP.5.

Inicialmente, a função objetivo é dada pela Equação BP.1:

$$CT = CC + CA + CF \quad (BP.1)$$

onde:

CT: custo total;

CC: custo total do concreto, dado pela Equação BP.2;

$$CC = ((b_{f,x}h_f + b_w h_w)l_{o,x}cc) \frac{l_{o,y}}{e_x} + ((b_{f,y}h_f + b_w h_w)l_{o,y}cc) \frac{l_{o,x}}{e_y} \quad (BP.2)$$

CA: custo total do aço, segundo a Equação BP.3:

$$CA = (n_{b,x}A_s l_{ef,x} \gamma_{aço} ca) \frac{l_{o,y}}{e_x} + (n_{b,y}A_s l_{ef,y} \gamma_{aço} ca) \frac{l_{o,x}}{e_y} \quad (BP.3)$$

CF: custo total da fôrma, conforme a Equação BP.4:

$$CF = l_{o,x}l_{o,y}cf \quad (BP.4)$$

$b_{f,x}$: largura colaborante em relação a x;

$b_{f,y}$: largura colaborante em relação a y;

$l_{o,x}$: vão livre em relação a x;

$l_{o,y}$: vão livre em relação a y;

$l_{ef,x}$: vão efetivo em relação a x;

$l_{ef,y}$: vão efetivo em relação a y;

A_s : área de apenas uma barra de aço;

$n_{b,x}$: número de barras em relação a x;

$n_{b,y}$: número de barras em relação a y;

$\gamma_{aço}$: peso específico do aço;

cc: custo unitário do concreto;

ca: custo unitário do aço;

cf: custo unitário da fôrma.

Na Tabela BP.1, apresentam-se as restrições da condição convencional, seguindo o dimensionamento da NBR 6118 (ABNT, 2023):

Tabela BP.1 – Restrições implementadas no AG na situação convencional

Nº	RESTRIÇÃO
1	$7 \leq \text{largura da nervura} \leq 25$
2	$\text{largura colaborante} \geq \text{largura da nervura}$
3	$5 \leq \text{altura da mesa} \leq 10$
4	$20 \leq \text{altura da seção transversal} \leq 40$, ou em alguns casos, $20 \leq \text{altura da seção transversal} \leq 60$
5	$0 \leq \text{altura útil} \leq \text{altura da seção transversal}$
6	$30 \leq \text{espaçamento entre nervuras} \leq 65$
7	$\text{cobrimento} \geq \text{cobrimento mínimo de acordo com a classe de agressividade}$
8	$\text{espaçamento entre barras} \geq \text{espaçamento mínimo entre barras}$
9	$\text{abertura de fissuras} \leq \text{abertura de fissuras imposta por norma}$
10	$\text{vibração} \leq \text{vibração limite}$
11	$\text{contra flecha} \leq \text{contra flecha limite}$
12	$\text{força cortante solicitante de cálculo} \leq \text{resistência de projeto ao cisalhamento}$

Fonte: O autor (2024)

Na Tabela BP.2, apresentam-se as restrições da condição de incêndio, seguindo o dimensionamento da NBR 6118 (ABNT, 2023), NBR 15200 (ABNT, 2012) e da Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004):

Tabela BP.2 – Restrições implementadas no AG na situação de incêndio

Nº	RESTRIÇÃO
1	$7 \leq \text{largura da nervura} \leq 25$
2	$\text{largura colaborante} \geq \text{largura da nervura}$
3	$5 \leq \text{altura da mesa} \leq 10$
4	$20 \leq \text{altura da seção transversal} \leq 40$, ou em alguns casos, $20 \leq \text{altura da seção transversal} \leq 60$
5	$0 \leq \text{altura útil} \leq \text{altura da seção transversal}$
6	$30 \leq \text{espaçamento entre nervuras} \leq 65$
7	$\text{cobrimento} \geq \text{cobrimento mínimo de acordo com a classe de agressividade}$
8	$\text{espaçamento entre barras} \geq \text{espaçamento mínimo entre barras}$
9	$\text{abertura de fissuras} \leq \text{abertura de fissuras imposta por norma}$
10	$\text{vibração} \leq \text{vibração limite}$
11	$\text{contra flecha} \leq \text{contra flecha limite}$
12	$\text{força cortante solicitante de cálculo} \leq \text{resistência de projeto ao cisalhamento}$
13	$\text{distância da face exposta até o eixo da armadura no sentido vertical} \geq \text{distância imposta pelo método tabular}$
14	$\text{distância da face exposta até o eixo da armadura no sentido horizontal} \geq \text{distância imposta pelo método tabular}$
15	$\text{largura da nervura} \geq \text{largura imposta pelo método tabular}$
16	$\text{altura da seção transversal} \geq \text{altura da seção transversal imposta pelo método tabular}$
17	$\text{momento resistente em situação de incêndio} \geq \text{momento solicitante em situação de incêndio}$

Fonte: O autor (2024)

Na Tabela BP.3, apresentam-se os preços unitários extraídos do banco de dados do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) dos materiais utilizados na implementação:

Tabela BP.3 – Custos unitários dos materiais no mês de abril de 2024

AÇO		
REFERÊNCIA	BITOLA (mm)	PREÇO (R\$·kg⁻¹)
SINAPI-92769	6,3	13,70
SINAPI-92770	8,0	13,20
SINAPI-92771	10,0	11,92
SINAPI-92772	12,5	10,09
SINAPI-92773	16,0	9,95
SINAPI-92774	20,0	11,57
CONCRETO		
REFERÊNCIA	CLASSE	PREÇO (R\$·m⁻³)
SINAPI-94964	C20	465,25
SINAPI-94965	C25	482,70
SINAPI-94966	C30	497,52
INTERPOLAÇÃO (ENTRE C30 E C40)	C35	530,86
SINAPI-94967	C40	564,20
FÔRMA		
REFERÊNCIA	MATERIAL	PREÇO (R\$·m⁻²)
SINAPI-92490	MADEIRA COMPENSADA RESINADA	70,56

Fonte: O autor (2024)

Após a decisão dos parâmetros da função *ga*, realizou-se a validação da implementação da otimização das lajes nervuradas de concreto armado. Para tanto, foram otimizadas lajes nervuradas de outras pesquisas no programa desenvolvido, e comparados os resultados a fim de verificar a eficácia da implementação. Logo, buscou o exemplo 3 de Silva (2005), laje nervurada moldada no local armada em duas direções. A Tabela BP.4 apresenta os dados de entrada necessário para o dimensionamento.

Tabela BP.4 – Carregamento, propriedades mecânicas e geométricas considerados para lajes nervuradas bidirecionais

Descrição	Valor/Unidade
Resistência características à compressão do concreto	20 MPa
Resistência características ao escoamento do aço	50 kN/cm ²
Cobrimento	2,5 cm
Carga variável	2 kN/m ²
Revestimento inferior em argamassa de gesso - Peso específico	12,5 kN/m ³
Revestimento inferior em argamassa de gesso - Espessura	1,5 cm
Camada de Regularização (contrapiso) - Peso específico	21 kN/m ³
Camada de Regularização (contrapiso) - Espessura	2,0 cm
Piso de plástico (já inclui o peso da cola) - Carga superficial	0,1 kN/cm ²
Bloco de EPS - Peso específico	0,13 kN/m ³
Diâmetro da armadura detalhada	10 mm
Largura da viga de apoio	21 cm

Fonte: O autor (2024)

De acordo com a Tabela BP.5, observam-se os resultados encontrados pelo dimensionamento apresentado por Silva (2005) e os valores da validação e otimização dos resultantes da implementação feito para esta pesquisa.

Tabela BP.5 – Comparação dos resultados obtidos por Silva (2005) e pelo código implementado neste trabalho

Parâmetro	Silva (2005)	Validação	Otimização	Diferença
Largura da nervura (cm)	10,00	10,00	7,98	20,20%
Altura total (cm)	30,00	30,00	23,54	21,53%
Altura da mesa (cm)	5,00	5,00	5,0	0,00%
Cobrimento (cm)	2,50	2,50	2,50	0,00%
Diâmetro (mm)	10,00	10,00	12,50	-25,00%
Espaçamento em relação a x (cm)	50,00	50,00	65,00	-30,00%
Espaçamento em relação a y (cm)	50,00	50,00	65,00	-30,00%
Vão livre - Direção x (cm)	580,00	580,00	580,00	0,00%
Vão livre - Direção y (cm)	580,00	580,00	580,00	0,00%
Área de aço para o maior momento máximo (cm ²)	1,26	1,20	1,05	16,67%

Fonte: O autor (2024)

ANEXO A – TABELAS E FIGURAS DOS FATORES DE REDUÇÃO

Apresentam-se as tabelas e figuras dos fatores de redução de acordo com a temperatura θ :

Tabela A.1– Valores da relação $k_{c,\theta}$

TEMPERATURA DO CONCRETO (°C)	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$	
	CONCRETO COM AGREGADOS SILICOSOS (NBR 15200)	CONCRETO COM AGREGADOS CALCÁRIOS (EN 1992-1-2)
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,60	0,74
600	0,45	0,60
700	0,30	0,43
800	0,15	0,27
900	0,08	0,15
1000	0,04	0,06
1100	0,01	0,02
1200	0,00	0,00

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012) e da Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004)

Tabela A.2 – Deformação do concreto em função da temperatura elevada

TEMPERATURA DO CONCRETO (°C)	$\epsilon_{cl,\theta}$ (%)	$\epsilon_{cu,\theta}$ (%)
20	0,25	2,00
100	0,35	2,25
200	0,45	2,50
300	0,60	2,75
400	0,75	3,00
500	0,95	3,25
600	1,25	3,50
700	1,40	3,75
800	1,45	4,00
900	1,50	4,25
1000	1,50	4,50
1100	1,50	4,75
1200	1,50	-

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

Tabela A.3 – Valores da relação $k_{s, \theta} = f_{y, \theta} / f_{yk}$

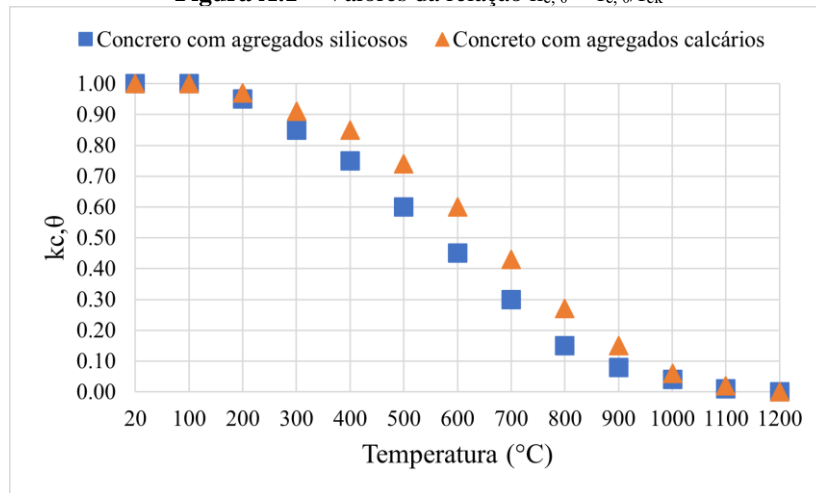
TEMPERATURA (°C)	$k_{s, \theta}$			
	TRAÇÃO		COMPRESSÃO	
	CA-50 OU CA-60	CA-50	CA-60	CA-50 OU CA-60
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00
200	1,00	1,00	1,00	0,89
300	1,00	1,00	1,00	0,78
400	1,00	0,94	0,94	0,67
500	0,78	0,67	0,67	0,56
600	0,47	0,40	0,40	0,33
700	0,23	0,12	0,12	0,10
800	0,11	0,11	0,11	0,08
900	0,06	0,08	0,08	0,06
1000	0,04	0,05	0,05	0,04
1100	0,02	0,03	0,03	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT,2012)

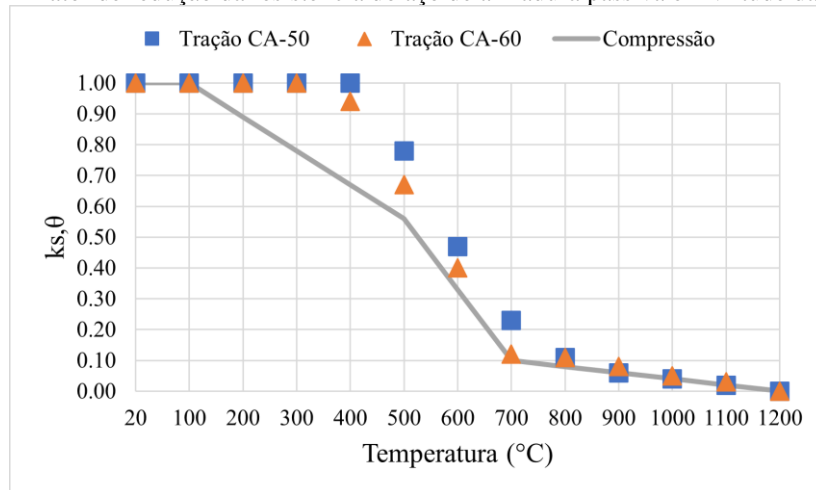
Tabela A.4 – Valores da relação $k_{E_s, \theta} = E_{s, \theta} / E_s$

TEMPERATURA DO AÇO (°C)	$k_{E_s, \theta}$	
	CA50	CA60
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,90	0,87
300	0,80	0,72
400	0,70	0,56
500	0,60	0,40
600	0,31	0,24
700	0,13	0,08
800	0,09	0,06
900	0,07	0,05
1000	0,04	0,03
1100	0,02	0,02
1200	0,00	0,00

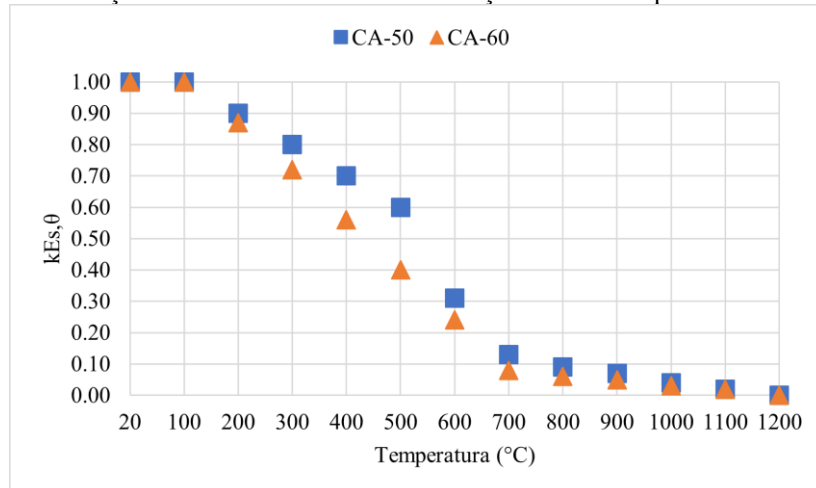
Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

Figura A.1 – Valores da relação $k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$ 

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012) e da Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004)

Figura A.2 – Fator de redução da resistência do aço de armadura passiva em virtude da temperatura

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

Figura A.3 – Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em virtude da temperatura

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

ANEXO B – DIMENSÕES MÍNIMAS SEGUNDO A NBR 15200 (ABNT, 2012)

Este anexo apresenta as dimensões mínimas para as lajes nervuradas simplesmente apoiadas armadas em uma e duas direções, de acordo com NBR 15200 (ABNT, 2012) e a largura mínima da seção transversal conforme a Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004):

Tabela B.1 – Dimensões mínimas para lajes nervuradas simplesmente apoiadas e armadas em duas direções

TRRF (MÍN)	NERVURAS-COMBINAÇÕES b_{\min}/c_1 (mm/mm)			CAPA h/c_1 (mm/mm)
30	80/15	-	-	60/10
60	100/35	120/25	190/15	80/10
90	120/45	160/40	250/30	100/15
120	160/60	190/55	300/40	120/20
180	220/75	260/70	410/60	150/30

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

Tabela B.2 – Dimensões mínimas para lajes nervuradas armadas em uma só direção

TRRF (MÍN)	NERVURAS-COMBINAÇÕES b_{\min}/c_1 (mm/mm)	
30	80/25	100/20
60	100/45	120/40
90	120/60	150/50
120	160/65	220/50
180	220/80	-

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

Tabela B.3 – Dimensões mínimas para lajes simplesmente apoiadas e armada em uma direção

TRRF (MÍN)	NERVURAS-COMBINAÇÕES	
	h/c_1 (mm/mm)	
30	60/10	
60	80/20	
90	100/30	
120	120/40	
180	150/55	

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

Tabela B.4 – Largura mínima da seção transversal do método da Isoterma de 500 °C

TRRF (MÍN)	LARGURA MÍNIMA (mm)
60	90
90	120
120	160
180	200
240	280

Fonte: Adaptado da Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004)

ANEXO C – MÉTODO EQUIVALENTE E MÉTODO DE WICKSTRÖM

Neste anexo, apresenta-se o detalhamento do método do tempo equivalente utilizado para obter o TRRF e do método de Wickström usado para encontrar a temperatura no eixo da armadura durante o processo de cálculo do método simplificado da Isoterma de 500 °C.

Primeiramente, o tempo equivalente é dado pela Equação C.1:

$$t_e = 0,07 \cdot q_{fi,k} \cdot W \cdot \gamma_n \cdot \gamma_n \quad (C.1)$$

onde:

$q_{fi,k}$: é o valor característico da carga de incêndio específica, determinado conforme a NBR 14432 (ABNT, 2001);

W : coeficiente que leva em conta a influência da ventilação e da altura do compartimento, conforme a Equação C.2, em que A_V a área de ventilação vertical para o ambiente externo do compartimento, admitindo-se que os vidros das janelas se quebrarão em situações de incêndio, A_F é a área do piso do compartimento e H é a altura do compartimento (distância do piso ao teto), medido em metros:

$$W = \left(\frac{6}{H}\right)^{0,3} \cdot (0,62 + 90 \cdot (0,4 - \frac{A_V}{A_F})^4) \geq 0,5, \text{ para } \frac{A_V}{A_F} \leq 0,3 \quad (C.2)$$

Para $\frac{A_V}{A_F} > 0,30$, deve ser adotado $\frac{A_V}{A_F} = 0,30$. Em qualquer caso, $\frac{A_V}{A_F} > 0,025$.

γ_n : é um fator de ponderação determinado por $\gamma_n = \gamma_{n1} \cdot \gamma_{n2} \cdot \gamma_{n3}$, conforme Tabela C.1:

Tabela C.1 – Valores de γ_{n1} , γ_{n2} e γ_{n3}

EXISTÊNCIA DE CHUVEIROS Automáticos	BRIGADA CONTRA INCÊNDIO	EXISTÊNCIA DE DETECÇÃO Automática
γ_{n1}	γ_{n2}	γ_{n3}
0,60	0,90	0,90

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

Na ausência de algum meio de proteção, indicado na Tabela C.1, adotar γ_n igual a 1.

γ_s : é um fator de ponderação determinado por $\gamma_s = \gamma_{s1} \cdot \gamma_{s2}$, conforme Equação C.3 e a Tabela C.2:

$$\gamma_s = 1 + \frac{A_F \cdot (h+3)}{10^5} \quad (C.3)$$

Em que A_F é a área do piso do compartimento, em metros quadrados, e h é a altura do piso habitável mais elevado da edificação, medido em metros. Para $\gamma_{s1} < 1$, deve ser adotado $\gamma_{s1} = 1$ e para $\gamma_{s1} > 3$, pode-se adotar $\gamma_{s1} = 3$.

Tabela C.2 – Valores de γ_{s2} em função do risco de ativação do incêndio (r)

γ_{s2}	r	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO
0,85	Pequena	Escola, galeria de arte, parque aquático, igreja, museu
1,00	Normal	Biblioteca, cinema, correio, consultório médico, escritório, farmácia, frigorífico, hotel, livraria, hospital, laboratório fotográfico, indústria de papel, oficina elétrica ou mecânica, residência, restaurante, supermercado, teatro, depósitos (produtos farmacêuticos, bebidas alcoólicas, venda de acessórios de automóveis) e depósitos em geral
1,20	Média	Montagem de automóveis, hangar, indústria mecânica
1,50	Alta	Laboratório químico, oficina de pintura de automóveis

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT, 2012)

De acordo com a norma em questão, o uso deste método implica em limitações:

- a) o tempo determinado por meio do método apresentado neste Anexo não pode ser inferior ao determinado pela NBR 14432 (ABNT, 2001), Tabela A.1, reduzido de 30 min;
- b) o tempo determinado por meio do método apresentado neste Anexo não pode ser inferior a 15 min;
- c) $q_{fi,k} \cdot \gamma_n \cdot \gamma_s \geq 300 \text{ MJ/m}^2$.

De acordo com o Método de Wickström, a temperatura na superfície do concreto pode ser calculada pela Equação C.4, considerando Incêndio Padrão:

$$\theta_w = n_w \cdot \theta_g \quad (C.4)$$

onde:

θ_w : temperatura na superfície do concreto, em graus Celsius (°C);

θ_g : temperatura do incêndio padrão, graus Celsius (°C), no instante t , calculada pela

Equação C.5;

n_w : fator que relaciona temperatura dos gases à temperatura da superfície (adimensional), dado pela Equação C.6.

$$\theta_g = \theta_o + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad (C.5)$$

onde:

θ_o : temperatura do ambiente do início do aquecimento, em graus Celsius (°C);

t : tempo, em minutos (min).

Usualmente, considera-se a temperatura do ambiente antes do incêndio, $\theta_o = 20$ °C.

$$n_w = 1 - 0,0616 \cdot t^{-0,88} \quad (C.6)$$

onde:

t : tempo, em horas (h).

As temperaturas no interior de elementos como lajes, por simplificação, podem ser calculadas considerando uma transferência de calor unidimensional segundo a Equação C.7, considerando uma profundidade x , em metros (m).

$$\theta_{c,x} = n_x \cdot n_w \cdot \theta_g \quad (C.7)$$

onde:

$\theta_{c,x}$: temperatura, em graus Celsius (°C), no interior do concreto, considerando fluxo de calor unidimensional, em uma profundidade com coordenada x , em metros (m);

n_x : fator adimensional que relaciona temperatura da superfície do concreto com a temperatura em seu interior, considerando uma profundidade x e o tempo t , respectivamente, em metros (m) e horas (h), dado pela Equação C.8.

$$n_x = 0,18 \cdot \ln\left(\frac{t}{x^2}\right) - 0,81 \quad (C.8)$$

Esse método também pode ser utilizado para determinar as temperaturas de elementos como vigas e pilares, considerando uma transferência de calor bidimensional, conforme a Equação C.9:

$$\theta_{c,xy} = [n_w \cdot (n_x + n_y - 2 \cdot n_x \cdot n_y) + n_x \cdot n_y] \cdot \theta_g \quad (C.9)$$

onde:

$\theta_{c,xy}$: temperatura, em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), no interior do concreto, considerando transferência de calor bidimensional, em uma profundidade com coordenadas x e y , em metros (m);

n_x : fator adimensional calculado pela Equação C.8;

n_y : fator adimensional que relaciona temperatura da superfície do concreto com a temperatura em seu interior, considerando uma profundidade y e tempo t , respectivamente, em metros (m) e horas (h), conforme a Equação C.10.

$$n_y = 0,18 \cdot \ln\left(\frac{t}{y^2}\right) - 0,81 \quad (\text{C.10})$$

Em suma, a temperatura no interior de uma viga pode ser calculada em função, apenas, das coordenadas x e y , em metros (m), do interior da viga, e do tempo do incêndio padrão ISO 834, t em horas (h).

CAIO VINÍCIUS DE SOUZA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DE LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Aprovado em 10 de maio de 2024

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Giuliana Furtado Franca Bono (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Bono (Avaliador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. M.sc. Geovane Sercundes da Silva Junior (Avaliador)
Autarquia do Ensino Superior de Garanhuns