



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

TIAGO ALVES GALINDO

**OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Orientadora: Prof. Dra. Giuliana Furtado Franca Bono

Caruaru

2025

TIAGO ALVES GALINDO

**OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE
INCÊNDIO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
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

2025

AGRADECIMENTOS

A Deus, que em sua infinita misericórdia, me fez chegar até aqui. A sua bondade me sustentou em vários momentos e me fez afirmar diariamente que tudo é possível ao que crer.

Ao meu pai, *in memoriam*, o qual sempre fez parte deste sonho e que foi um grande incentivador para ganhar o mundo, como o próprio dizia. Ao senhor, minha eterna gratidão.

A minha mãe, Lenivalda, que não mediu esforços para a realização deste sonho e que, sob seus cuidados e orações, fez com que isso fosse possível.

A minha irmã Emanoelly, por seu incentivo e vibração pelas conquistas.

A minha namorada Renatha, que em tantos momentos me apoiou, me abraçou e me ajudou nessa caminhada, especialmente nessa reta final.

A minha família, que sempre foi suporte quando precisei, em especial aos meus tios João e Moisés, vocês têm especial contribuição.

Agradecimento particular a minha professora e orientadora, Giuliana Furtado Franca Bono, por toda compreensão e paciência, pelo incentivo, apoio e por acreditar nessa pesquisa.

A todos meus amigos, que em vários momentos foram apoio, incentivadores e que, mesmo na ausência, compreenderam os motivos. Em especial, aos meus amigos/irmãos da graduação, Eduarda, Igor, Cléberson, Pedro, Izadora, Brenda e Samuel: sem vocês tudo isso seria mais difícil.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, meu muito obrigado.

A universidade, seu corpo docente, por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação de caráter e ética no processo de formação profissional.

A todos os professores que contribuíram para minha formação, especialmente aos que tive durante a graduação.

Otimização de vigas de concreto armado em situação de incêndio utilizando algoritmo genético

Optimization of reinforced concrete beams in fire situations using a genetic algorithm.

Tiago Alves Galindo¹

RESUMO

A urbanização trouxe às cidades a necessidade da verticalização como meio de garantir um maior número de moradias, no entanto, alguns episódios no Brasil evidenciaram a falta de um dimensionamento correto de estruturas para situação de incêndio, visto pela deterioração de prédios que foram submetidos a tal situação. A exposição ao fogo de estruturas de concreto armado diminui a vida útil da estrutura ao reduzir a resistência mecânica e rigidez da peça. O presente estudo visa realizar um dimensionamento de vigas em situação de incêndio, utilizando o software MATLAB (versão R2022a), que tenham a capacidade de suportar a situação de exposição ao fogo por determinado período. Esse dimensionamento computacional, segue os preceitos normativos da NBR 6118 (ABNT, 2023), a qual garante o correto dimensionamento de estruturas de concreto armado, seguido pela verificação de situações de incêndio dadas pela NBR 15200 (ABNT, 2024), por meio do método Tabular e pela Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992 1-2-CEN, 2004), a qual estabelece como uma de suas verificações para essa situação o método de Isoterma 500°C. Em consonância com esse projeto de situação de incêndio, há uma otimização da estrutura por meio do método probabilístico Algoritmo Genético, baseado no princípio da genética e evolução, capaz de minimizar o custo das vigas ao encontrar a melhor configuração de dimensões e armaduras da seção que satisfaçam esse objetivo. Assim, a pesquisa em estudo buscou otimizar vigas de concreto armado em situação de incêndio para diferentes situações, sob diversas situações de projeto, com variações do vão, carregamento, relação entre cargas e resistências de concreto.

¹ Graduando em Setembro pela UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. E-mail: tiago.galindo@ufpe.br

Palavras-chave: vigas, incêndio, dimensionamento, otimização.

ABSTRACT

Urbanization has brought the need for vertical construction to cities as a means of ensuring a greater number of homes. However, some incidents in Brazil have highlighted the lack of adequate structural design for fire situations, as evidenced by the deterioration of buildings subjected to such conditions. Exposure of reinforced concrete structures to fire shortens their service life by reducing their mechanical strength and rigidity. This study aims to design beams capable of withstanding fire exposure for a given period using MATLAB software (version R2022a). This computational design follows the normative precepts of NBR 6118 (ABNT, 2023), which ensures the correct design of reinforced concrete structures. This is followed by verification of fire situations as specified by NBR 15200 (ABNT, 2024) using the Tabular method and by Eurocode 2, part 1.2 (EN 1992 1-2-CEN, 2004), which establishes the 500°C Isotherm method as one of its verifications for this situation. In line with this fire situation design, the structure is optimized using the probabilistic Genetic Algorithm method, based on the principle of genetics and evolution. This method minimizes beam costs by finding the best configuration of cross-section dimensions and reinforcement that meets this objective. Thus, the research under study sought to optimize reinforced concrete beams in fire situations for different situations, under different design situations, with variations in span, loading, relationship between loads and concrete resistance.

Keywords: beams, fire, sizing, optimization.

DATA DE APROVAÇÃO: 12 de Setembro de 2025.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da urbanização junto à tecnologia nos últimos anos gerou a necessidade da verticalização das cidades e de construções cada vez maiores e modernas. Para o pleno avanço das construções, a engenharia estrutural desempenha papel fundamental na garantia da segurança e durabilidade das edificações, unindo a esses fatores a economia.

As tomadas de decisões nos projetos estruturais de concreto armado a temperatura ambiente são norteadas, inicialmente, por recomendações da ABNT NBR 6118 (2023), a qual estabelece requisitos básicos exigíveis para o projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido. Contudo, visto acontecimentos relevantes de incêndios no Brasil, como o do Edifício Andraus, em 1972, o qual teve 16 vítimas fatais e, dois anos depois, o Edifício Joelma, que levou a morte de 190 pessoas, torna-se necessário considerar nos projetos situações excepcionais nos quais as edificações estão sujeitas.

É a partir desse fator que surge a necessidade do dimensionamento de estruturas em exposição ao fogo, visto que tanto a pasta de cimento quanto o agregado são constituídos de componentes que se decompõem, em maior ou menor grau, com a exposição ao calor (Metha & Monteiro, 1994), além da redução da resistência à compressão.

De modo a garantir um projeto que atenda a esses requisitos, os projetistas estruturais seguem as recomendações da ABNT NBR 15200 (2024), que estabelece critérios para dimensionamento de lajes, vigas e pilares de concreto armado, citando propriedades físico-térmica do material a alta temperaturas, as ações correspondentes ao incêndio e os métodos de cálculos prováveis.

Cada componente da estrutura é essencial para a estabilidade global das edificações. A viga, por exemplo, conforme ABNT NBR 6118 (2023, p. 83), são elementos lineares em que a flexão é preponderante, responsável por transmitir a carga de lajes e elementos superiores, como paredes e divisórias, aos elementos de suporte como pilares e/ou fundações.

O dimensionamento feito por meio de ferramentas computacionais, permite resultados precisos ao fazer um vínculo ou relacionar a estrutura concebida em teoria com a estrutura real, por meio da modelagem, além da possível otimização de uma estrutura, de modo a compatibilizar segurança, economia e aprimorar a forma de analisar as estruturas em condições de incêndio que são consideradas complexas

Na década de 1970, seguindo a teoria evolucionária de Charles Darwin, o pesquisador John Holland, da Universidade de Michigan, apresentou o Algoritmo Genético (AG), método de otimização que consiste no processo de seleção natural e sobrevivência das espécies mais aptas, ou seja, é um método que permite gerar dados com características desejadas.

Compreender o comportamento de uma estrutura de concreto armado em situação de incêndio é essencial para garantir a segurança da edificação e das pessoas envolvidas ao garantir que a estrutura suporte o tempo necessário requerido para controle do incêndio, mantendo total ou parcialmente sua integridade, por meio de uma estrutura otimizada, ao considerar perda de sua característica inicial, causada pela exposição ao fogo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O presente documento tem como objetivo o dimensionamento otimizado de vigas em situação de incêndio, utilizando o método dos Algoritmos Genéticos, que atenda as restrições normativas exigidas pela NBR 6118 (ABNT, 2023), NBR 15200 (ABNT, 2024) 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 viga e minimizar os impactos ambientais provenientes do uso dos materiais.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Otimizar vigas 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 minimizar os custos das vigas;
- Analisar o comportamento de vigas, ao dimensionar pelo método Tabular e pelo método de Isoterma 500°C, utilizados para estruturas em situação de incêndio.

2 METODOLOGIA

2.1 Dimensionamento pela NBR 6118 (ABNT, 2023)

De acordo com o item 14.2.1 da ABNT NBR 6118:2023, o objetivo da análise estrutural é determinar os efeitos das ações em uma estrutura, com a finalidade de efetuar verificações de estados limites últimos e de serviço. A análise estrutural permite estabelecer as distribuições de esforços internos, tensões, deformações e deslocamentos em uma parte ou em toda a estrutura, de modo a garantir, com segurança adequada, que a estrutura mantenha certas características que possibilitem a utilização satisfatória da construção, durante sua vida útil, para as finalidades às quais foi concebida (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

O presente trabalho segue o modelo de cálculo na ruptura, na qual a segurança é garantida fazendo com que as solicitações correspondentes às cargas majoradas (solicitações de cálculo) sejam menores que as solicitações últimas, sendo estas as que levariam a estrutura à ruptura (ou a atingir um estado limite último) se os materiais tivessem suas resistências reais (resistências características) minoradas por coeficientes de ponderação das resistências (resistências de cálculo).

Estado limite último refere-se à ruina estrutural ou outra forma de colapso, enquanto que o estado limite de serviço está relacionado com à durabilidade das estruturas, à aparência e ao conforto do usuário. 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), enquanto que para o estado de limite de serviço não é necessário utilizar os coeficientes de minoração, portanto, $\gamma_m = 1$.

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

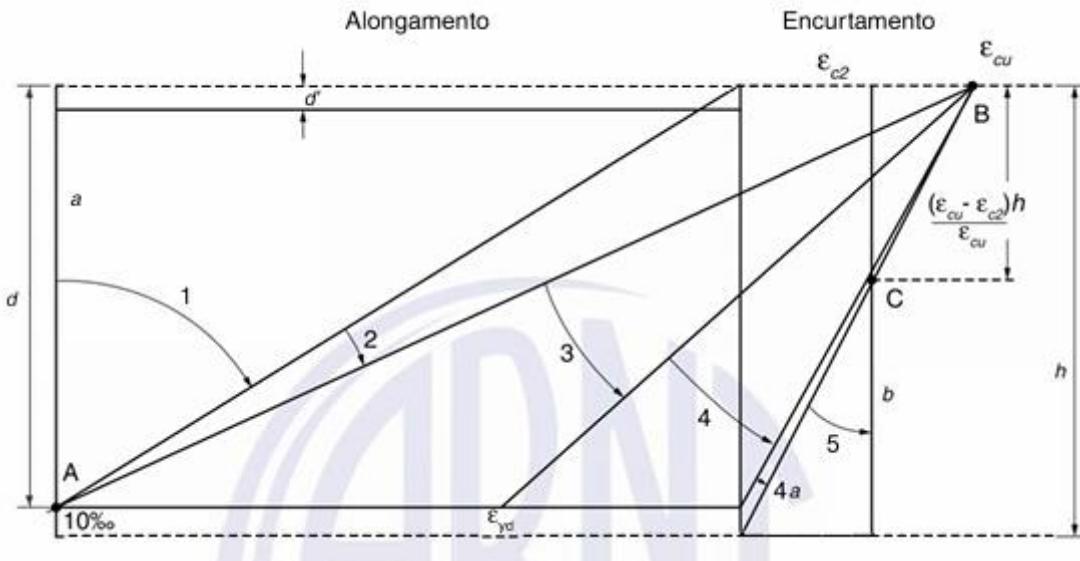
Fonte: O autor (2025).

No item 8.2.10.1 da NBR 6118 (ABNT, 2023) é apresentado o diagrama parábola-retângulo da distribuição de tensões no concreto, juntamente com a definição dos valores de deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico (ε_{c2}) e deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura (ε_{cu}). Já na seção 8.3.6 da mesma norma, é apresentado o diagrama da tensão-deformação para o aço com ou sem patamar de escoamento.

Os domínios de deformação delineiam as distintas possibilidades de ruína na seção transversal, definidos no item 17.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2023), visto na Figura 1. O cálculo de dimensionamento fora feito levando em consideração o estádio III, em que ocorre flexão simples ou composta com ruptura à compressão do concreto e com escoamento do aço.

No domínio III há a plastificação da fibra mais comprimida do concreto, sem colapso global da peça, a partir da deformação de $\varepsilon_{c2} = 2\%$, chegando a atingir $\varepsilon_{cu} = 3,5\%$, sem o aumento da tensão. Nesse estágio, a seção fica mais fissurada e a distribuição de tensões tende a se tornar mais uniforme, exigindo equilíbrio entre resistência última e ductilidade. Reforços adicionais e cuidados com a rigidez podem ser necessários para evitar redistribuição excessiva de momentos, mantendo compatibilidade de deformações entre concreto e aço e assegurando que a estrutura opere com segurança econômica sem colapso repentino.

Figura 1 - Domínios de deformação.



Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023)

Conforme o item 17.2.3 da NBR 6118 (ABNT, 2023), para se garantir boas condições de ductilidade em vigas, é necessário respeitar os limites da posição da linha neutra. O item 14.6.4.3 da norma estabelece para concretos com menor ou igual a 50 Mpa que a linha neutra

é limitada pela relação (x/d) menor ou igual a 0,45. O dimensionamento à flexão simples calcula as áreas de aço na seção transversal, necessárias para resistir ao esforço de flexão.

Além disso, as vigas também são submetidas a esforços cortantes, de modo que é necessário dimensionar as armaduras transversais e verificar estado-limite último relativo a este esforço. Ao fazer uma analogia de treliça, a NBR 6118 (ABNT, 2023) nos itens 17.4.2.2 e 17.4.2.3 apresenta, respectivamente, os modelos de cálculo I e II para verificação do estado-limite último do esforço cortante.

2.2 Propriedades do concreto e aço exposto ao fogo

O concreto armado possui bom desempenho na compressão e, pela solidariedade entre o aço e o concreto, pode ser considerado um material “homogêneo” à temperatura ambiente. Quando submetido a temperaturas superiores a 100 °C o concreto armado perde essa característica de material “homogêneo” à medida que a temperatura cresce devido a transformações químicas, físicas e mineralógicas da sua matriz. (COSTA, 2008).

A resistência à compressão do concreto decresce com o aumento da temperatura e pode ser obtida pela seguinte Equação 1:

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

Onde:

f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto na temperatura ambiente;

$f_{ck,\theta}$ é a resistência característica à compressão do concreto na temperatura ambiente θ ;

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

A NBR 15200 (ABNT, 2024) fornece a relação entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas $f_{ck,\theta}$ e a resistência característica à compressão do concreto na temperatura ambiente f_{ck} , para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos, conforme coluna 2 da Tabela 2. Para concretos preparados com agregados calcários a norma brasileira recomenda a utilização do Eurocode 2, parte 1.2 (2004), conforme coluna 3, da Tabela 2.

Devido ao aumento da temperatura há uma alteração nos diagramas tensão-deformação do concreto, como mostra o Anexo B da NBR 15200 (ABNT 2025), assim como na deformação específica última do concreto e na deformação linear específica correspondente à tensão

máxima do concreto, apresentada pela Tabela B.1 da referida norma e no Anexo A deste trabalho.

Tabela 2 - Valores da relação $k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$, conforme ABNT NBR 15200:2024 e Eurocode 2, parte 1.2 (2004)

Temperatura do Concreto [°C]	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$	
	Agregado Silicoso	Agregado Calcário
1	2	3
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)

O aço também sofre modificações devido ao aumento da temperatura e pode ser obtida pela seguinte Equação:

$$f_{yk,\theta} = k_{s,\theta} f_{yk} \quad (2)$$

Em que:

f_{yk} é a resistência característica ao escoamento do aço de armadura passiva na temperatura ambiente;

$f_{yk,\theta}$ é a resistência característica ao escoamento do aço de armadura passiva na temperatura θ ;

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

O módulo de elasticidade do aço da armadura passiva decresce com o aumento da temperatura, visto na figura 3 e tabela 2 da NBR 15200 (ABNT 2024), encontradas na figura A.1 e Tabela A.2 do Anexo A deste trabalho e pode ser obtido pela seguinte Equação 3:

$$E_{s,\theta} = k_{Es,0} \cdot E_s \quad (3)$$

Onde:

E_s é o módulo de elasticidade do aço de armadura passiva na temperatura ambiente;

$E_{s,\theta}$ é o módulo de elasticidade do aço de armadura passiva na temperatura;

$k_{Es,0}$ é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço na temperatura θ .

2.3 Método Tabular

No dimensionamento dos elementos estruturais, as normas especificam dimensões mínimas que garantem boa usabilidade e segurança destes. Para situações de incêndio a NBR 15200 (ABNT, 2024) apresenta um método capaz de garantir a segurança mínima para estruturas sob essa condição.

Neste método, é suficiente atender às dimensões mínimas em função do tipo de elemento estrutural e do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), respeitando as limitações indicadas. O TRRF, conforme definição da NBR 14432 (ABNT, 2001), é o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão e que depende de parâmetros como profundidade do subsolo, área dos pavimentos, altura da edificação, da existência de sistemas de proteção ativa e da presença de aberturas laterais.

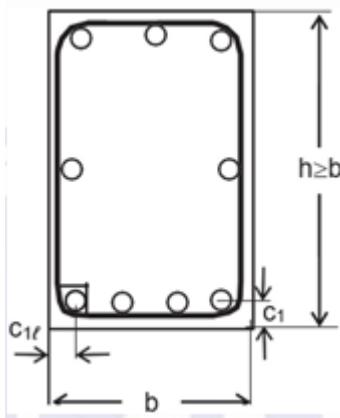
O Anexo B da NBR 14432 (ABNT, 2001) classifica as edificações quanto a sua ocupação, enquanto que o Anexo A da mesma norma estabelece o TRRF de acordo com a ocupação. No entanto, a NBR 15200 (ABNT, 2024), no anexo A, apresenta o método do tempo equivalente, outro meio de se calcular o TRRF, que pode ser reduzido em até 30min em relação ao da NBR 14432 (ABNT, 2001), desde que a edificação possua projeto de segurança contra incêndio elaborado de acordo com as Normas Técnicas aplicáveis e a legislação e regulamentação vigentes.

Ao obter o TRRF, pode-se consultar a tabela B.1 do Anexo B, conforme visto nas tabela 4 da NBR 15200 (ABNT, 2024), que fornece as dimensões mínimas b_{min} e b_{wmin} das vigas e o valor de c_1 das armaduras inferiores, em função dos TRRF. As tabelas foram construídas com a hipótese de vigas com aquecimento nos três lados, sob laje. Pode ser usada para o caso de vigas aquecidas nos quatro lados, desde que sua altura não seja inferior a b_{min} e a área da seção transversal da viga não seja inferior a $2 \cdot (b_{min})^2$.

Devido a concentração de temperatura junto às bordas da face inferior das vigas, para aquelas em que se tem somente uma camada de armadura e largura não superior ao b_{min} , indicado na

coluna 3 da Tabela 4 da NBR 15200 (ABNT 2024), conforme o TRRF, a distância c_{1l} (ver Figura 2) na base das vigas deve ser 10 mm maior do que o c_1 dado pelas referidas tabelas.

Figura 2 - Distâncias c_1 e c_{1l}



Fonte: NBR 15200 (ABNT, 2024)

No caso de vigas que possuem armaduras negativas e $TRRF \geq 90$ min, a área de armaduras negativas entre a linha de centro do apoio e $0,3 \cdot l_{ef}$ não pode ser menor do que o definido na seguinte Equação:

$$A_{s,calc}(x) = A_{s,calc}(0) \cdot (1 - 2,5 \frac{x}{l_{ef}}) \quad (4)$$

Em que:

x : é a distância entre a linha de centro do apoio e a seção considerada, devendo ser acrescida do comprimento de ancoragem conforme a ABNT NBR 6118;

$A_{s,calc}(x)$: é a área mínima de armaduras negativas na seção localizada na distância “ x ”;

$A_{s,calc}(0)$: é a área de armaduras negativas calculada conforme a ABNT NBR 6118;

l_{ef} : é o comprimento efetivo do vão da viga determinado, conforme a ABNT NBR 6118.

2.4 Método simplificado Isoterma de 500 °C

A exposição de uma estrutura a uma situação de incêndio tende a mudar a configuração inicial da mesma. Proposto pelo pesquisador Yngve Anderberg em 1978, o método da isoterma de 500°C consiste na redução da seção transversal do concreto, determinada a partir do posicionamento da isoterma e para aplicação deste método, a seção transversal do elemento em situação de incêndio deve possuir a espessura mínima indicada na tabela B.2 do Anexo B. Assume-se também que resistência à compressão é conservada em sua totalidade, nas regiões de concreto restantes, com temperatura inferior a 500 °C, deixando os efeitos térmicos apenas

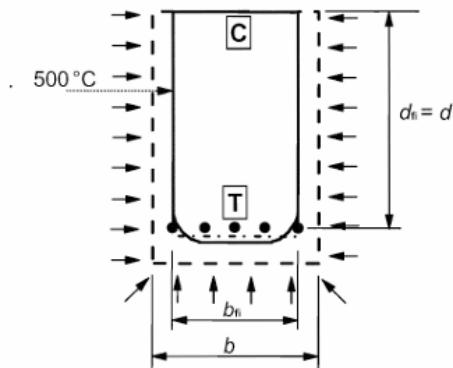
para o aço das armaduras. Na realidade isso não ocorre, mas análises empíricas com diferentes carregamentos e TRRF, verificaram tal simplificação para concretos de densidade normal e agregados silicosos (RIGBERTH (2000)).

A partir do modelo semiempírico de Wickström, a posição da isoterma de 500°C é determinada por meio da equação 5, a qual considera uma temperatura ambiente de 20°C (PURKISS; 2007).

$$x_{500} = \sqrt{\frac{a_r t}{\exp\left(4,5 + \frac{480}{0,18 n_w T}\right)}} \quad (5)$$

Onde a_r é a razão de difusividade térmica considerada para um valor de referência de $0,417 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$, t é o tempo em horas, n_w é um parâmetro do modelo de Wickstrom e T é a temperatura do incêndio em graus Celsius. Após a determinação da isoterma, determina-se a nova largura e altura efetiva, b_f e d_{fi} , respectivamente, da seção. 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 Isoterma de 500 °C com exposição ao fogo em três faces com zona tracionada exposta.



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

No caso das armaduras situadas fora da seção transversal residual, é aplicado coeficientes redutores da resistência do aço para a temperatura no eixo das barras em questão, de forma a minorar a resistência do aço para a situação de incêndio, conforme a equação 5.

$$f_{yk,\theta} = k_{s,\theta} f_{yk} \quad (5)$$

Onde:

$f_{yk,\theta}$: resistência característica do aço à tração à temperatura elevada θ [MPa];

$k_{s,\theta}$: coeficiente de redução da resistência à tração do aço em função da temperatura θ , segundo a Tabela A.2. [adimensional];

f_{yk} : resistência característica do aço à tração em temperatura ambiente [MPa].

2.5 Otimização

A otimização busca uma solução para um problema de modo a minimizar ou maximizar uma função de interesse, sujeita a um conjunto de restrições. A estrutura da otimização baseia-se em uma função objetivo que depende de uma ou mais variáveis. Para um elemento estrutural é possível desenvolver por meio de uma função objetivo, por exemplo, uma melhor configuração da estrutura como uma composição ótima em desempenho e forma, menor peso, flambagem local ou global, entre outros fatores (Silva, 2011).

Há diversos métodos para implementação da otimização, desde os mais antigos baseados em soluções analíticas, passando pelos métodos iterativos e os mais recentes métodos de otimização evolutivos como os algoritmos genéticos. Os algoritmos genéticos são definidos como técnicas de busca baseadas nos mecanismos de seleção natural e genética, pertencentes ao grupo de métodos de otimização probabilísticos, particularmente aos algoritmos evolucionários (LINDEN, 2008).

Ao seguir o conceito evolutivo proposto por Darwin, este método parte de uma população, em que cada indivíduo (cromossomo ou string) representa uma possível solução, na qual a adaptação de cada um é medida pelo valor da função objetivo. Conforme Correia (2020), na teoria evolutiva cada indivíduo possui um valor de capacidade e potencialidade no processo, gerando uma maior chance de sobrevivência ao meio e possibilidade de reprodução, ou seja, se aproxima da melhor solução numérica para o problema ao gerar indivíduos com suas características e que possuem, de forma individualizada, capacidade de continuar melhorando por meio de mutações, como ocorre na Teoria Evolutiva.

É importante frisar que os algoritmos genéticos não constituem em um método de busca da solução ótima de um problema, mas uma meta-heurística que encontra soluções próximas da solução ótima. Além disso, é um método probabilístico, logo, pode fornecer diferentes valores de solução, para cada execução com os mesmos parâmetros. Diferentemente dos métodos enumerativos, os algoritmos genéticos não avaliam todas as soluções possíveis, mas apenas um conjunto delas, e contrariamente aos métodos aleatórios, utilizam informações pertinentes do problema para direcionar a busca das soluções, não sendo totalmente aleatório (LINDEN, 2008).

2.6 Concepção da otimização em situação de incêndio

Para que fosse possível a integração entre o dimensionamento de vigas de concreto em situação normal e em situação de incêndio, o trabalho fora desenvolvido a partir do software MATLAB (versão R2022a), que também conta com opções de otimização de um problema por métodos probabilísticos, como o de Algoritmo Genético.

O programa implementado no software teve como base fundamental a dissertação de Correia (2020), esta que tem como tema a otimização e confiabilidade de vigas de concreto armado. Por outro lado, teve-se a introdução do método Tabular da NBR 15200 (2024) e do método simplificado de Isoterma de 500 °C da Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004), certo de que o presente estudo tem como objetivo a avaliação das vigas em situação de incêndio. A implementação desses métodos foi baseado no trabalho de Silva (2024), no qual os métodos são inseridos no código em sequência, sendo o método Tabular o primeiro, e suas restrições impostas para de fato iniciar a otimização.

Como geralmente nesse elemento estrutural o esforço normal é desprezível (com exceção para vigas protendidas), foi considerado para efeitos de cálculo apenas a flexão normal. A estrutura, conforme já mencionado, é calculada por meio da NBR 6118 (ABNT, 2023), seguindo os métodos de cálculo dos estados limites, o qual a segurança é garantida fazendo com que as solicitações correspondentes às cargas majoradas sejam menores que as solicitações últimas, sendo estas as que levariam a estrutura à ruptura (ou atingir um estado limite último) se os materiais tivessem suas resistências reais minoradas por coeficientes de ponderação das resistências (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Ao considerar o elemento como passível de resistência ao fogo, a estrutura deve obedecer aos requisitos estabelecidos na NBR 14432 (ABNT, 2001), a qual define requisitos de estanqueidade e isolamento para os elementos estruturais de modo a garantir condições seguras para a estrutura em situação de incêndio por tempo suficiente para que seja possível a fuga dos ocupantes da edificação e operações de combate ao incêndio em condições seguras.

O dimensionamento da estrutura na situação de incêndio segue os parâmetros estabelecidos na NBR 15200 (ABNT, 2024) e na Eurocode 2, parte 1.2 (EN 1992-1-2-CEN, 2004). Ambas as normas demonstram a mudança do comportamento dos materiais expostos a condições adversas e possuem métodos para dimensionamento de peças estruturais, como Método Tabular e método simplificado Isoterma de 500°C, utilizados neste trabalho.

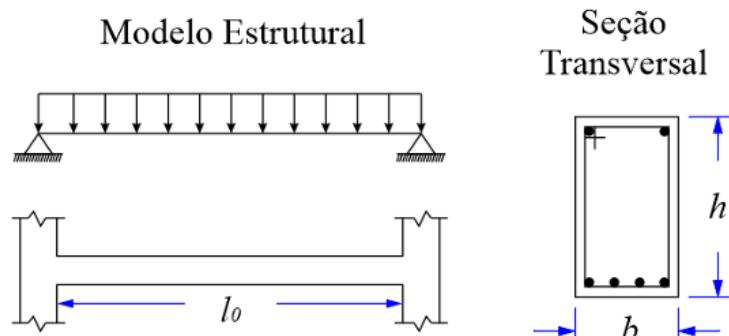
As vigas são elementos que possuem a função de vencer vãos e suportar, em sua maioria, a carga proveniente de lajes e paredes existentes, além de seu próprio peso. A NBR 6118 (ABNT,

2023) conceitua vigas como sendo elementos lineares em que a flexão é preponderante, de forma que não é considerado para efeitos de cálculo esforço normal no caso das vigas.

A viga a ser dimensionada (Figura 4) e otimizada em situação de incêndio é de seção transversal retangular, biapoiada em pilares e submetida a um carregamento vertical uniformemente distribuído. Para se obter resultados para diferentes situações de projeto foram variados os valores do vão (L) de 2,5 a 7,5 m, em incrementos de 1,0m. o carregamento total foi variado de 10 a 50kN/m, em incrementos de 10kN/m. A relação r , razão entre carregamento variável e o total, foi considerado variando de 0,2 a 0,8, em incrementos de 0,2.

Para a otimização da viga foram feitas análises utilizando valores de resistências características à compressão do concreto variando de C20 até C40, e o aço CA-50, com cobrimento nominal de 30mm e Classe de Agressividade Ambiental II. Os pilares nos quais a viga se apoia são de seção transversal quadrada de dimensão de 20cm. São considerados dados de entrada: vão, carregamento total, resistências características do concreto e do aço, seguindo as orientações prescritas na NBR 6118 (ABNT, 2023).

Figura 4 - Viga de concreto armado a ser dimensionada para situação de incêndio.



Fonte: Correia (2016).

Aliado à segurança da estrutura, foram estabelecidas condições de otimização utilizando o método de algoritmos genéticos, buscando a minimização do custo de fabricação ao tornar a largura (b), a altura (h), a quantidade (n_t) e o diâmetro das barras tracionadas (\emptyset_t), e a quantidade (n_c) e o diâmetro das barras comprimidas (\emptyset_c) da seção transversal como variáveis de projeto. A Equação 5 mostra a função objetivo em questão, em que se quantifica o que se quer otimizar.

$$C = C_C + C_A + C_F \quad (5)$$

A função objetivo e as restrições impostas na implementação da situação de incêndio, conforme apêndice AP, busca minimizar o custo das vigas, que tem como elementos o aço –

calculado por quilograma -, o concreto – calculado por m^3 - e as fôrmas de concreto. Para valores desses materiais fora consultado o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), expresso na Tabela AP.3 do apêndice.

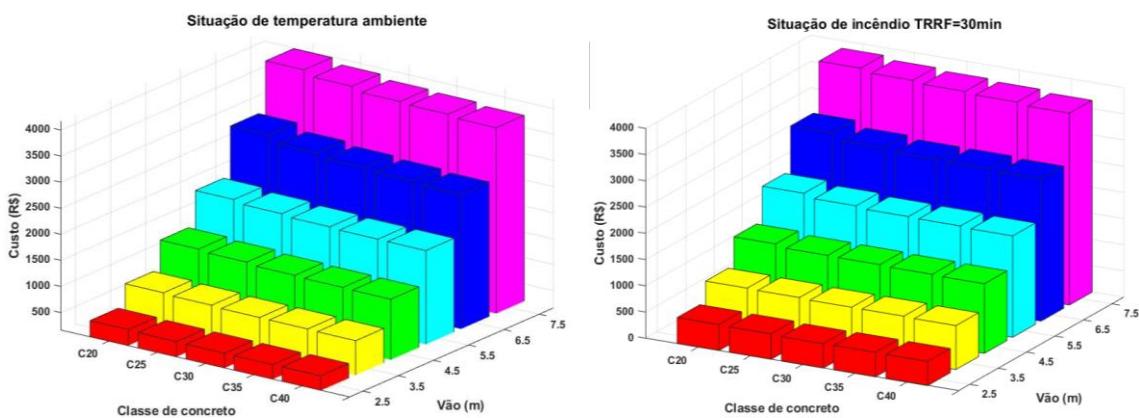
O método de algoritmos genéticos faz parte de um grupo de técnicas de otimização chamada Computação Evolutiva, que se baseia em características da natureza para compor suas características de programação. Para calibração desse método é necessário definir valores dos parâmetros, para garantia da solução ótima não ser um mínimo local. Com base nos dados de Correia (2020), foi definido como sendo igual a 1000 a *PopulationSize*, que define o tamanho da população em cada geração; a reprodução *CrossoverFraction* sendo igual a 0,7, esta que (especifica a fração de indivíduos da próxima geração, produzida pelos operadores de cruzamento; a *EliteCount* sendo igual a 0,05, responsável por especificar a fração de indivíduos que sobrevirão para a próxima geração e a resolução das restrições não-lineares *NonlinearConstraintAlgorithm*, que especifica o algoritmo para a resolução das restrições não-lineares) que foi penalty. Por fim, utilizou-se o *MaxGenerations*, que determina número máximo de iterações antes da parada do algoritmo, como sendo igual a 700.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a análise de otimização de vigas em situação de incêndio, foram consideradas diferentes situações para otimização das vigas, variando parâmetros como L , $(g + q)$, r e f_{ck} de modo a ser possível identificar os principais fatores que influenciam no dimensionamento, principalmente nas dimensões da seção transversal da viga e no custo final.

Na Figura 5, apresenta-se o custo total das vigas submetidas a um carregamento de 30kN/m em função da classe de resistência do concreto, que varia de 20MPa até 40MPa, em incrementos de 5MPa, e do vão livre que varia de 2,5 a 7,5m, tendo incremento de 1,0m. Para a situação de incêndio foi considerado o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de 30min. Nota-se uma proximidade dos custos, visto que o tempo em que a viga é submetida ao fogo é muito pequeno e isso influi em seções muito próximas e que não reflete em uma grande diferença entre o custo, chegando em alguns casos ao valor da viga em situação de incêndio apresentar um valor menor que o da viga em temperatura ambiente, como se pode ver na razão entre o custo das vigas em situação de incêndio e temperatura ambiente mostrado na Tabela 3.

Figura 5 - Relação do custo total de execução para as vigas em situação convencional e em situação de incêndio com TRRF igual a 30 minutos.



Fonte: O autor (2025).

Tabela 3 - Razão entre o custo total das vigas em situação de incêndio com TRRF 30 e situação convencional.

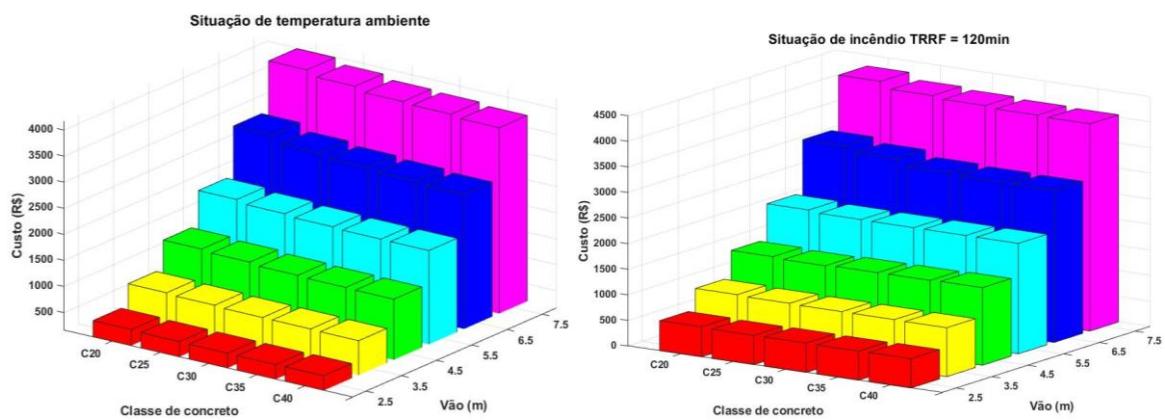
VÃO LIVRE (m)	C20	C25	C30	C35	C40
2,5	103,5%	104,4%	101,7%	103,3%	101,3%
3,5	99,4%	100,4%	100,7%	100,9%	100,4%
4,5	99,0%	97,9%	99,8%	99,7%	99,5%
5,5	99,5%	98,7%	98,5%	99,0%	98,0%
6,5	96,3%	96,7%	96,9%	98,0%	98,3%
7,5	96,6%	97,3%	98,2%	97,9%	97,8%

Fonte: O autor (2025).

Outro caso analisado foi a situação com Tempo Requerido de Resistencia ao Fogo (TRRF) de 120min. Na Figura 6, faz-se a comparação entre os custos dessas duas situações: convencional e a exposta ao fogo, para o mesmo modelo de viga da Figura 5. Ao se ter uma exposição maior ao fogo, a viga necessita de seções maiores, para proteger e suportar a situação de incêndio. Claramente isso reflete no custo total, em que neste caso é mais evidente a diferença. Na Tabela 4, apresenta-se a razão entre o custo da situação de incêndio com o TRRF de 120min e da situação de temperatura ambiente. É visto que para vãos menores a diferença

de custo tem um percentual maior que para vãos maiores, o que pode ser explicado pela necessidade de as vigas submetidas ao incêndio atenderem às restrições impostas pelos métodos de incêndio, diferentemente das vigas que possuem um vão livre maior a ser vencido, que acabam já atendendo a essas restrições ao serem dimensionadas para situação de temperatura ambiente, embora seu custo seja mais elevado visto a necessidade de peças mais robustas.

Figura 6 - Relação do custo total de execução para as vigas em situação convencional e em situação de incêndio com TRRF igual a 120 minutos.



Fonte: O autor (2025).

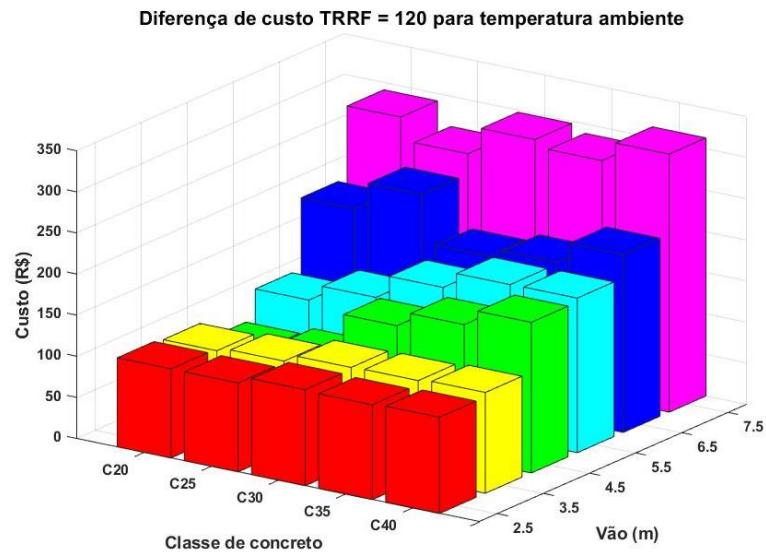
Tabela 4 - Razão entre o custo total das vigas em situação de incêndio com TRRF 120 e situação convencional.

VÃO LIVRE (m)	C20	C25	C30	C35	C40
2,5	122,6%	123,3%	125,6%	125,5%	125,7%
3,5	111,9%	112,7%	114,1%	114,3%	114,7%
4,5	105,8%	106,6%	110,7%	112,2%	113,7%
5,5	105,7%	106,8%	108,4%	109,5%	109,5%
6,5	106,7%	108,2%	106,4%	106,8%	107,9%
7,5	107,3%	106,8%	107,8%	107,6%	108,4%

Fonte: O autor (2025).

Como visto anteriormente, o Método Tabular e o método de Isoterma de 500°C exigem, conforme se aumenta o TRRF, uma seção mais robusta de concreto para proteger as armaduras e para que a peça estrutural consiga seguir suportando os esforços. Na Figura 7, apresenta-se a diferença de custo das vigas submetidas ao fogo com TRRF= 120min com relação a situação convencional, para um carregamento de 30kN/m. Essa diferença pode ser melhor entendida ao ver os valores da Tabela 5.

Figura 7 - Diferença de custo das situações de TRRF 120min para a situação convencional.



Fonte: O autor (2025).

Tabela 5 - Diferenças entre o custo total das vigas em situação de incêndio com TRRF 120 e situação convencional.

VÃO LIVRE (m)	C20	C25	C30	C35	C40
2,5	108,37	108,15	116,76	115,38	117,06
3,5	105,78	110,06	119,22	120,14	122,57
4,5	82,68	91,66	145,37	163,53	183,19
5,5	118,06	138,20	167,22	187,51	188,02
6,5	204,36	238,76	180,48	190,17	216,52
7,5	291,29	263,58	297,76	289,02	313,85

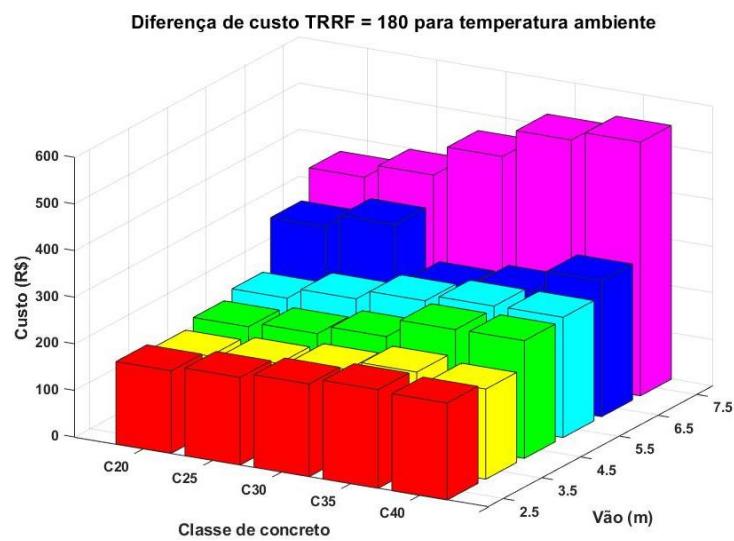
Fonte: O autor (2025).

A Figura 8, por sua vez, apresenta a diferença de custo da situação TRRF=180min para a situação convencional, seguido da Tabela 6 que evidencia essas diferenças. A partir da análise das Figuras 7 e 8, é possível destacar que quanto menor o vão e classe de concreto, menor a diferença de custo, com exceção dos vãos maiores como 6,5 e 7,5m. Ademais, conforme o vão

e classe de concreto são maiores, a diferença de custo para as duas situações tende ao aumento, com ênfase para a situação de TRRF = 180min que segue uma tendência linear de crescimento.

Para se ter uma noção da influência de cada material, foi considerado a situação de concreto de classe C25, muito utilizado no sistema construtivo pré-moldado, e feito uma análise dos custos parciais do concreto, forma e aço. A Figura 9 faz uma comparação entre a situação de temperatura convencional e a de TRRF = 30min e evidencia que o concreto é o que possui menor interferência na composição dessas vigas enquanto que a forma se torna o custo mais predominante nessa estrutura.

Figura 8 - Diferenças de custo das situações de TRRF 180min para a situação convencional.



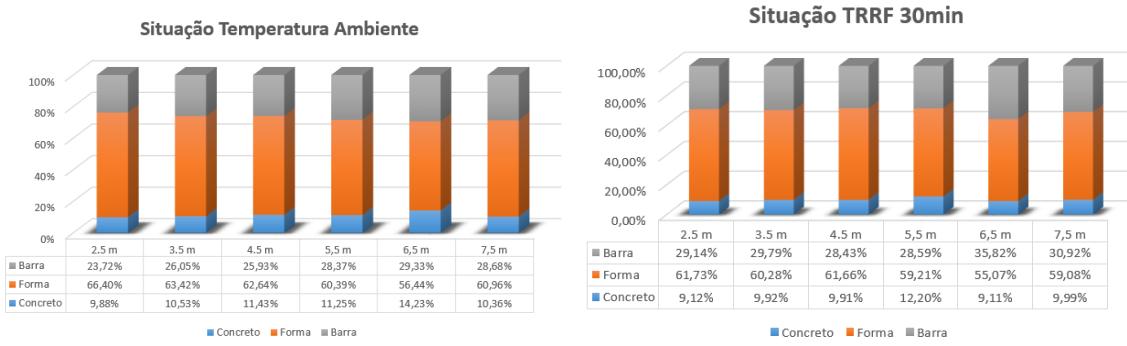
Fonte: O autor (2025).

Tabela 3 - Diferença entre o custo total das vigas em situação de incêndio com TRRF 180 e situação convencional.

VÃO LIVRE (m)	C20	C25	C30	C35	C40
2,5	177,01	187,89	198,86	211,68	208,09
3,5	163,84	173,08	185,00	204,72	193,32
4,5	182,14	192,35	211,05	251,08	252,46
5,5	198,80	222,39	243,21	256,82	257,93
6,5	307,07	337,08	226,81	244,00	291,72
7,5	368,83	398,41	463,46	523,90	544,32

Fonte: O autor (2025).

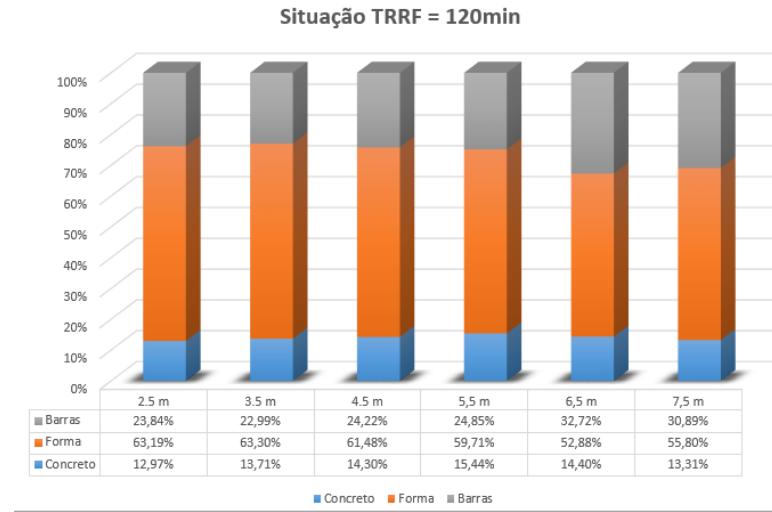
Figura 9 – Proporção custos totais.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 10, por sua vez, faz uma análise comparativa da situação de TRRF = 120min. É possível notar que a forma continua sendo predominante e, assim como nas situações anteriores, conforme o vão aumenta, tende a diminuir sua parcela na composição final. O concreto, por sua vez, na medida que o vão aumenta tende a apresentar uma parcela de influência mais relevante, chegando a uma média de 14%, e isso condiz pela necessidade de cobrimentos maiores devido ao aumento da exposição ao fogo, visto pelos métodos de incêndio.

Figura 10 – Proporção custos totais para TRRF=120min.

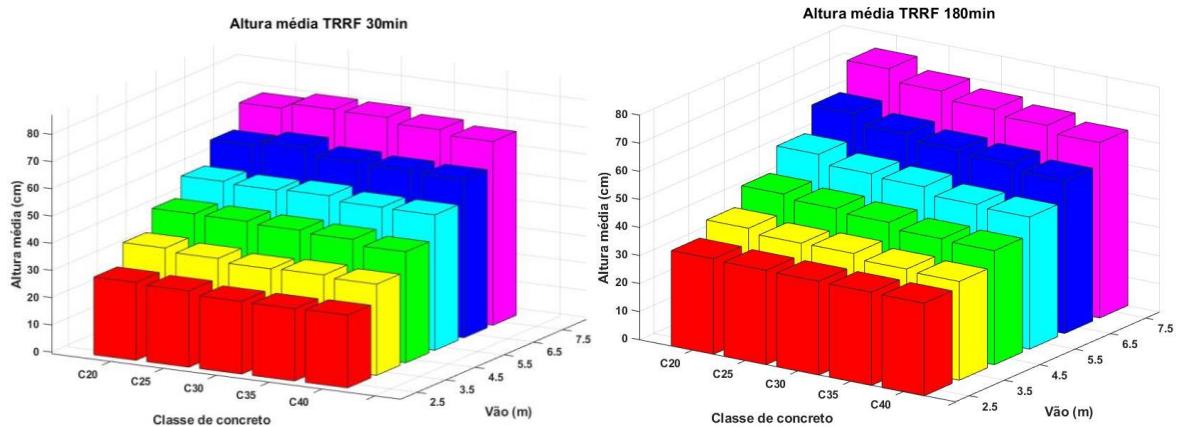


Fonte: O autor (2025).

Foi feita uma outra análise para observar a influência da maior exposição ao fogo na seção transversal. Na Figura 11 ilustra-se esse resultado, em que conforme a peça estrutural é mais solicitada, a altura ótima se eleva. A Tabela 4 mostra esses valores e se percebe que para vãos menores a situação de maior exposição tende a gerar as maiores alturas, enquanto que para maiores vãos é a situação de menor tempo de exposição ao fogo que gera as maiores. A partir da análise do custo total, a situação com TRRF = 30 min converge mais com a realidade convencional: para vãos maiores, a altura fica em torno de 65 cm; para vãos menores, fica pouco acima de 25 cm. Já na situação com TRRF = 180 min, para vãos menores a altura tende

a ficar acima de 30 cm, enquanto para vãos maiores a altura diminui à medida que aumenta a classe do concreto.

Figura 11 - Alturas médias para as situações de TRRF 30min e TRRF 180min.



Fonte: O autor (2025).

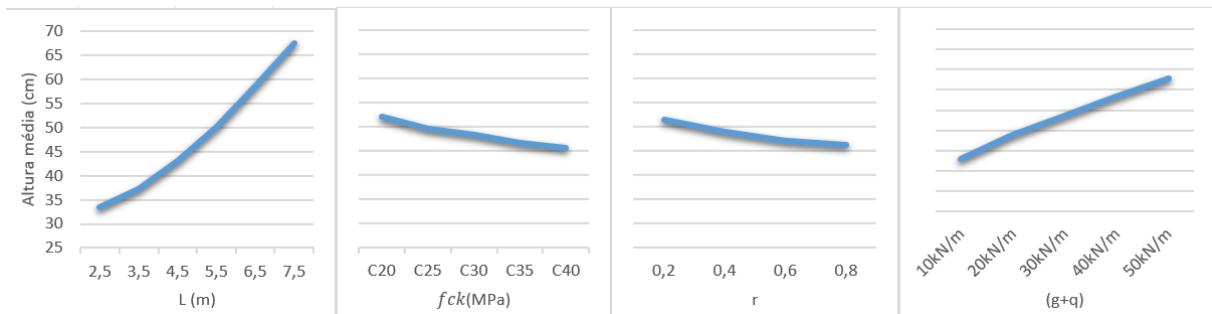
Tabela 4 - Alturas médias para diferentes situações de incêndio.

CLASSE DO CONCRETO	TRRF	VÃO LIVRE (m)					
		2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5
C20	30min	28,6	36,7	44,6	51,9	60,6	69,7
	180min	34,0	39,4	46,0	54,6	63,7	74,0
C25	30min	28,1	35,4	44,4	51,3	62,3	71,7
	180min	33,6	37,7	44,5	51,4	60,0	69,7
C30	30min	26,7	34,1	43,7	51,7	59,6	71,4
	180min	33,4	37,8	43,3	50,5	57,9	66,9
C35	30min	26,6	34,4	42,8	50,1	58,7	69,3
	180min	33,2	35,9	41,2	47,8	56,8	64,9
C40	30min	26,7	33,5	40,8	49,8	58,1	67,6
	180min	33,0	35,2	40,6	47,1	54,5	62,5

Fonte: O autor (2025).

No Gráfico 1, apresentam-se a influência de algumas variáveis no dimensionamento da estrutura e sua influência nos valores ótimos da altura (h) de vigas submetidas ao TRRF 180min. É verificado que o vão e o carregamento influenciam diretamente no aumento na seção, enquanto que uma variação no f_{ck} e no r causam uma mudança menos expressiva nessa altura ótima.

Gráfico 1 - Gráfico de efeitos principais para a altura.



Fonte: O autor (2025).

Os resultados obtidos indicam que, de modo geral, há uma tendência de aumento no custo total da viga à medida que tanto o vão quanto o carregamento variável aumentam. Especificamente, vigas com maiores vãos e submetidas a cargas mais elevadas tendem a demandar maiores quantidades de material e reforços, elevando assim o custo total do projeto. Além disso, foi observado que o aumento do f_{ck} também contribui para uma redução no custo, devido à maior resistência do concreto, o que possibilita uma seção mais eficiente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao ser feito o dimensionamento por meio de algoritmos genéticos buscando a otimização da estrutura, foi visto a capacidade e confiabilidade desses algoritmos que permite explorar um vasto espaço de soluções, identificando configurações de vigas que não só atendem aos requisitos de resistência ao fogo, mas também minimizam o consumo de materiais e os custos de construção.

Os resultados enfatizaram que a menor exposição ao fogo leva a uma proximidade das seções com a realidade, como foi o caso de seções expostas a 30min de incêndio. Nesse caso, o custo total se aproxima muito da situação normal, evidenciando que é possível garantir a mínima segurança de uma estrutura, ao considerar um tempo mínimo de exposição ao fogo nos projetos.

A análise do impacto da exposição ao fogo demonstrou que tempos de resistência ao fogo mais longos demandam seções transversais significativamente maiores, a fim de preservar a integridade estrutural e a capacidade de suporte de carga, como evidenciado pela comparação dos custos entre TRRF de 30 e 120 minutos. Por outro lado, o aumento do TRRF para 180

minutos implica em um crescimento linear e mais acentuado nos custos, principalmente para vãos e classes de concreto mais elevados.

Esses resultados corroboram que a otimização de vigas em condições de incêndio, particularmente com tempos de exposição prolongados, exige uma reavaliação das abordagens convencionais de projeto, visando conciliar a segurança estrutural com a eficiência econômica. Em termos geométricos, é visto que devido a necessidade de maior cobrimento, e consequentemente, seções maiores, torna-se inevitável que a altura da viga nessas situações seja de fato maior que a situação convencional, embora não sejam valores tão disparentes.

Portanto, diante de avanços tecnológicos constantes e projetos cada vez mais modernos, é imprescindível na construção civil, a implementação de dimensionamentos otimizados, visto que uma simples redução de custo traz resultados significativos ao final da obra, não apenas em valor financeiro, mas de material. Além disso, fora visto é viável a consideração de situações adversas, como o incêndio, ainda que para tempos reduzidos de exposição ao fogo, uma vez que o custo não foge da realidade atual.

Ademais, é importante a implementação desse estudo de forma prática de modo a garantir a segurança das edificações e evitar acidentes ou ruínas de estruturas que não foram dimensionadas para a mínima exposição ao fogo. É necessário a aplicação também de dimensionamentos otimizados, para que se tenha cada vez mais construções com o mínimo de desperdício, sem danos a segurança estrutural.

REFERÊNCIAS

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 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.

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.

CORREIA, Rubens Silva. **Otimização vigas de concreto armado, utilizando a ferramenta Solver.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016. Disponível em: <https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/40337/1/CORREIA%2C%20Rubens%20Silva.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.

CORREIA, Rubens Silva. **Avaliação da confiabilidade de vigas otimizadas de concreto armado.** 2020. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/39598/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Rubens%20Silva%20Correia.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2025.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio.** 2008. 724f. Tese (Doutorado em engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

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

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos.** Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

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.

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

RIGBERTH, J. **Simplified design on fire exposed concrete beams and columns: an evaluation of Eurocode and Swedish building code advanced computer models.** Report 5063, Lund university, Sweden, 2000

SILVA, Caio Vinicius de Souza. **Otimização de lajes nervuradas de concreto armado em situação de incêndio utilizando algoritmo genético.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/56436> Acesso em: 16 mar. 2025.

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.

SINAPI - SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 24 de jul. de 2025.

APÊNDICE AP – INFORMAÇÕES IMPLEMENTADAS NA OTIMIZAÇÃO

Função objetivo com a equação que minimiza os custos da viga, considerando o custo do concreto, aço e forma, além das restrições, Tabelas AP.1 e AP.2, impostas para o problema de otimização e dimensionamento da viga em situação convencional e de incêndio, respectivamente, além dos preços unitários usados para cálculo na Tabela AP.3

$$C = C_C + C_A + C_F \quad (\text{AP.1})$$

Onde:

C : custo Stotal;

C_C : custo total do concreto, dado pela Equação AP.2;

$$C_C = bhLc_c \quad (\text{AP.2})$$

C_A : custo total do aço, dado pela Equação AP.3;

$$C_A = \left(\frac{\pi \phi_t^2}{4} L \rho c_{\phi t} \right) + \left(\frac{\pi \phi_c^2}{4} L \rho c_{\phi c} \right) + \left\{ \frac{\pi \phi_e^2}{4} [2(h + b) - 8c] n_e \rho c_{\phi p} \right\} + \left(\frac{\pi \phi_p^2}{4} L \rho c_{\phi p} \right) \quad (\text{AP.3})$$

C_F : custo total da forma, dado pela Equação AP.4;

$$C_F = (b + 2h)L c_f \quad (\text{AP.4})$$

$c_{\phi t}$: custos unitários das barras tracionadas;

$c_{\phi c}$: custos unitários das barras comprimidas;

$c_{\phi e}$: custos unitários dos estribos;

$c_{\phi p}$: custos unitários das barras de pele;

ρ : massa específica do aço;

c : cobrimento;

n_e : quantidade de estribos na viga;

Nas tabelas AP.1 e AP.2, vê-se as restrições impostas para otimização de vigas em situação convencional e em situação de incêndio, respectivamente.

Tabela AP.1: Restrições implementadas no AG na situação convencional

Nº	Restrição
1	Soma da armadura de tração e compressão $\leq 4\%$ área de concreto da seção
2	Distância do centro de gravidade das barras mais afastadas $\leq 10\%h$
3	Flecha total \leq valor limite = $L/250$
4	Tamanho das aberturas de fissuras \leq valor limite de norma = 0,3mm
5	$\frac{x}{d} \leq 0,45$
6	Força cortante solicitante \leq força resistente de cálculo
7	Área de aço tracionado e comprimido \geq área de aço mínima de tração
8	Espaçamento entre os estribos \geq espaçamento mínimo entre os estribos
9	Quantidade de barras tracionadas \geq quantidade de barras comprimidas
10	Diâmetro das barras tracionadas \geq diâmetro das barras comprimidas
11	Momento solicitante \leq Momento resistente
12	12 cm $\leq b \leq 25$ cm
13	25cm $\leq h \leq 100$ cm

Fonte: Autor (2025)

Tabela AP.2: Restrições implementadas no AG na situação de incêndio

Nº	Restrição
1	Soma da armadura de tração e compressão $\leq 4\%$ área de concreto da seção
2	Distância do centro de gravidade das barras mais afastadas $\leq 10\%h$
3	Flecha total \leq valor limite = $L/250$
4	Tamanho das aberturas de fissuras \leq valor limite de norma = 0,3mm
5	$\frac{x}{d} \leq 0,45$
6	Força cortante solicitante \leq força resistente de cálculo
7	Área de aço tracionado e comprimido \geq área de aço mínima de tração
8	Espaçamento entre os estribos \geq espaçamento mínimo entre os estribos
9	Quantidade de barras tracionadas \geq quantidade de barras comprimidas
10	Diâmetro das barras tracionadas \geq diâmetro das barras comprimidas
11	Momento solicitante na situação de incêndio \leq Momento resistente
12	12 cm $\leq b \leq 25$ cm
13	25cm $\leq h \leq 100$ cm
14	Distância da face exposta até o eixo da armadura no sentido vertical \geq distância imposta pelo método tabular
15	Distância da face exposta até o eixo da armadura no sentido horizontal \geq distância imposta pelo método tabular
16	Largura mínima \geq largura imposta pelo método tabular / método isoterma

Fonte: Autor (2025)

Na tabela AP.3, mostra-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 AP.3: Custos unitários do concreto, aço e formas

Concreto com bombeamento		
Fonte	Tipo	Custo (R\$/m³)
94964 – SINAPI PE 06/2025	C20	487,90
94965 – SINAPI PE 06/2025	C25	503,10
94966 – SINAPI PE 06/2025	C30	518,22
INTERPOLAÇÃO	C35	554,27
94967 – SINAPI PE 06/2025	C40	585,08
AÇO CA-50		
Fonte	Diâmetro (mm)	Custo (R\$/kg)
-	5,0	13,57
92760 – SINAPI PE 06/2025	6,3	13,57
92761 – SINAPI PE 06/2025	8,0	12,65
92762 – SINAPI PE 06/2025	10,0	11,24
92763 – SINAPI PE 06/2025	12,5	9,40
92764 – SINAPI PE 06/2025	16,0	9,06
92765 – SINAPI PE 06/2025	20,0	10,30
92766 – SINAPI PE 06/2025	25,0	10,18
Fórm		
Fonte	Custo (R\$/m²)	
92448 – SINAPI PE 06/2025	178,31	

Fonte: Autor (2025)

ANEXO A – TABELAS E FIGURAS DOS FATORES DE REDUÇÃO

Tabela A.1: Deformação do concreto em função da temperatura elevada

TEMPERATURA DO CONCRETO (°C)	$\varepsilon_{c1,0} \%$	$\varepsilon_{cu,0} \%$
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	-

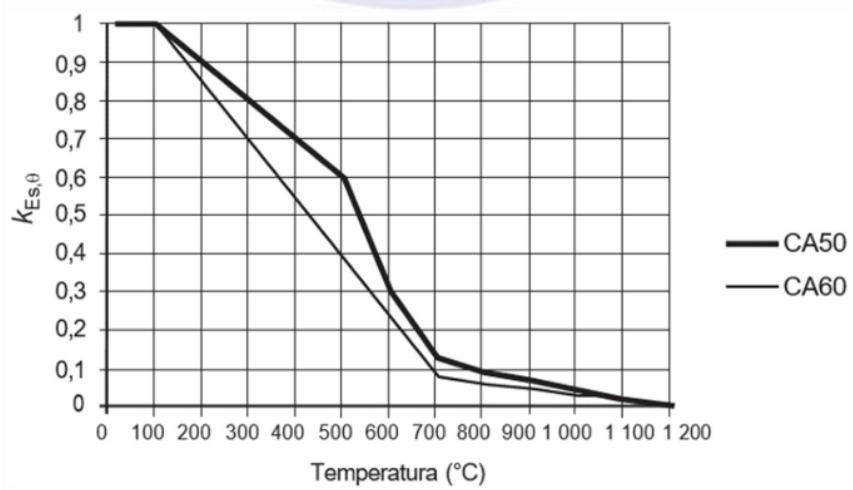
Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT 2024)

Tabela A.2: Valores da relação $k_{Es,0} = E_{s,0}/E_s$

TEMPERATURA DO AÇO (°C)	$k_{Es,0}$	
	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 2024)

Figura A.1: Fator de redução do módulo de elasticidade do aço de armadura passiva em função da temperatura



Fonte: NNB 15200 (ABNT 2024)

ANEXO B – DIMENSÕES MÍNIMAS PARA SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Este anexo apresenta as dimensões mínimas para as vigas simplesmente apoiadas em situação de incêndio, conforme a NBR 15200 (ABNT, 2024) 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 vigas biapoiadas

TRRF min	Combinações de b_{min}/c_1 mm/mm				b_{wmin} mm
	1	2	3	4	
30	80/25	120/20	160/15	190/15	80
60	120/40	160/35	190/30	300/25	100
90	140/60	190/45	300/40	400/35	100
120	190/68	240/60	300/55	500/50	120
180	240/80	300/70	400/65	600/60	140

Fonte: Adaptado da NBR 15200 (ABNT 2024).

Tabela B.2: Largura mínima da seção transversal do método da Isoterma de 500°C

TRRF (min)	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).

OTIMIZAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao 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 12 de setembro de 2025.

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