



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DENNIS ALVES DE MENEZES BRITO

**MANUAL PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS TÍPICOS DE
NATUREZA FLUIDA, FLUIDO-TÉRMICA E ESTRUTURAL, POR MEIO DO
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DO NX SIEMENS**

JOÃO PESSOA - PB

2024

Trabalho de Conclusão de Curso que
objetiva submeter-se a aprovação da
banca para obter o título de Bacharel
em Engenharia Mecânica na
Universidade Federal da Paraíba
UFPB.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de
Lima Júnior

JOÃO PESSOA - PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B862m Brito, Dennis Alves de Menezes.
MANUAL PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS TÍPICOS DE
NATUREZA FLUIDA, FLUIDO-TÉRMICA E ESTRUTURAL, POR MEIO
DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DO NX SIEMENS /
Dennis Alves de Menezes Brito. - João Pessoa, 2024.
78 f. : il.

Orientação: José Lima Júnior.
TCC (Graduação) - UFPB/Tecnologia.

1. Elementos Finitos, Nx Siemens, CFD. I. Lima
Júnior, José. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

DENNIS ALVES DE MENEZES BRITO

MANUAL PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS TÍPICOS
DE NATUREZA FLUIDA, FLUIDO-TÉRMICA E
ESTRUTURAL, POR MEIO DO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS ATRAVÉS DO NX SIEMENS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca
examinadora do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como
parte das exigências à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Aprovada em João Pessoa, 8 de maio de 2024.

José Carlos de Lima Júnior

Dr. José Carlos de Lima Júnior
Universidade Federal da Paraíba
Professor orientador

Mar. Cavalcanti Rodrigues

Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues
Universidade Federal da Paraíba
Examinador

João Bosco de Aquino Silva

Dr. João Bosco de Aquino Silva
Universidade Federal da Paraíba
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a minha família, especialmente ao meu pai Antônio, a minha mãe Maria de Jesus, ao meu irmão Iury e a sua esposa Layssa, as minhas tias Maria das Dores, Marconilda, Damiana e Jucileide. Agradeço também a todos os meus amigos e colegas de graduação com os quais compartilhei os últimos 5 anos de minha vida. Agradeço ainda a todos os professores que tive e em especial ao meu orientador Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior, pelos ensinamentos passados, pelo apoio prestado e por manifestar em mim a vontade de aprender cada vez mais, qualidade indispensável de um engenheiro.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o método dos elementos finitos e discutida a sua importância como forma de auxiliar os engenheiros mecânicos desde sua graduação. É mostrado um breve histórico, como o método funciona, e como pode ser aplicado através do software NX Siemens. Além disso, foram resolvidos exemplos de natureza térmica, fluido-térmica e estrutural de referências bibliográficas consagradas no ensino de engenharia mecânica. Esses exemplos foram apresentados analiticamente e em seguida através de simulações no Nx Siemens e os resultados obtidos são comparados e discutidos com o objetivo de validar e formentar o uso destas ferramentas. A escolha deste tema foi motivada devido a falta do uso de ferramentas computacionais nas disciplinas da graduação. Desta forma, tem-se como objetivo apresentar o passo a passo para a resolução de problemas vistos na graduação por meio de simulações, com base em elementos finitos, usando o NX Siemens.

Palavras-chaves: Elementos Finitos, Nx Siemens, CFD, Análise não-linear

ABSTRACT

In this work, the finite element method is presented and its importance as a way of helping mechanical engineers since graduation is discussed. A brief history is shown, how the method works, and how it can be applied through the NX Siemens software. In addition, examples of thermal, fluid-thermal and structural nature from bibliographical references established in the teaching of mechanical engineering were solved. These examples were presented analytically and then through simulations in Nx Siemens and the results obtained are compared and discussed with the aim of validating and promoting the use of these tools. The choice of this topic was motivated by the lack of use of computational tools in undergraduate courses. This way up, the objective is to present a step-by-step guide to solving problems seen in undergraduate studies through simulations, based on finite elements, using NX Siemens.

Key words: Finite Elements, Nx Siemens, CFD, Non-linear analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1–Gráfico tensão deformação	14
Figura 2 –Viga engastada com carga aplicada à extremidade livre.....	17
Figura 3 –Bocal convergente e gráfico ilustrativo dos efeitos da contrapressão.	17
Figura 4 –Bocal convergente com dados do problema.....	25
Figura 5 – Dados para interpolação.	27
Figura 6 – Modelo 3D de um bocal convergente.....	28
Figura 7– Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 1.	29
Figura 8 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 2.	30
Figura 9 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 3	30
Figura 10 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 4	31
Figura 11 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 5	31
Figura 12 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 6	32
Figura 13 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 7....	32
Figura 14 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 8	33
Figura 15 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 9	33
Figura 16 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 10 ...	34
Figura 17 – Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Resultado.	35
Figura 18 – Viga engastada com iminente carga de impacto na extremidade livre.....	36
Figura 19 – Carregamento de impacto: Passo 1.....	37
Figura 20 – Carregamento de impacto: Passo 2.....	38
Figura 21 – Carregamento de impacto: Passo 3.....	38
Figura 22 – Carregamento de impacto: Passo 4.....	39
Figura 23 – Carregamento de impacto: Passo 5.....	39
Figura 24 – Carregamento de impacto: Passo 6.....	40
Figura 25 – Carregamento de impacto: Passo 7.....	40
Figura 26 – Carregamento de impacto: Passo 8.....	41
Figura 27 – Carregamento de impacto: Passo 9.....	41
Figura 28 – Carregamento de impacto: Passo 10 e 11.....	42
Figura 29 – Carregamento de impacto: Passo 12.....	43
Figura 30 – Carregamento de impacto: Passo 13.....	43
Figura 31 – Carregamento de impacto: Passo 14.....	44
Figura 32 – Carregamento de impacto: Passo 15.....	44

Figura 33 – Carregamento de impacto: Passo 16.....	45
Figura 34 – Carregamento de impacto: Passo 17.....	45
Figura 35 – Carregamento de impacto: Passo 18	46
Figura 36 – Carregamento de impacto: Passo 19.....	46
Figura 37 – Carregamento de impacto: Passo 20	47
Figura 38– Carregamento de impacto: Passo 21.....	47
Figura 39 – Carregamento de impacto: Passo 22	48
Figura 40 – Carregamento de impacto: Passo 23.....	48
Figura 41 – Carregamento de impacto: Passo 24	49
Figura 42 – Carregamento de impacto: Passo 25	49
Figura 43 – Carregamento de impacto: Passo 26	50
Figura 44 – Carregamento de impacto: Passo 27.....	50
Figura 45 – Carregamento de impacto: Passo 28	51
Figura 46 – Carregamento de impacto: Passo 29.....	51
Figura 47 – Carregamento de impacto: Passo 30	52
Figura 48 – Carregamento de impacto: Passo 31	52
Figura 49 – Carregamento de impacto: Passo 32	53
Figura 50 – Carregamento de impacto: Passo 33.....	54
Figura 51 – Carregamento de impacto: Passo 34	54
Figura 52 – Carregamento de impacto: Passo 35	55
Figura 53 – Carregamento de impacto: Passo 36	55
Figura 54 – Carregamento de impacto: Passo 37.....	56
Figura 55 – Carregamento de impacto: Passo 38	57
Figura 56 – Carregamento de impacto: Passo 39.....	58
Figura 57 – Carregamento de impacto: Passo 40	58
Figura 58 – Carregamento de impacto: Passo 41	59
Figura 59 – Carregamento de impacto: Passo 42	59
Figura 60 – Carregamento de impacto: Passo 43.....	60
Figura 61 – Carregamento de impacto: Passo 44	60
Figura 62 – Carregamento de impacto: Resultado	61
Figura 63 – Caixa de transmissão de um automóvel	62
Figura 64 – Modelo 3D de caixa de transmissão	63
Figura 65 – Criação do bloco que representa a caixa de transmissão	64
Figura 66 – Parâmetros para criação do bloco que representa a caixa de transmissão....	64
Figura 67 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 1.....	65
Figura 68 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 2	65

Figura 69 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 3.....	66
Figura 70 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 4	66
Figura 71 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 5.....	67
Figura 72 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 6	67
Figura 73 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 7	68
Figura 74 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 8	68
Figura 75 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 9.....	69
Figura 76 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 10	69
Figura 77 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 11.....	70
Figura 78 – Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Resultado.....	70

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	12
1.1Importância do método dos elementos finitos.....	13
2.Motivação e Objetivos.....	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1 Energia de deformação	14
3.2 Teorema de Castigliano	17
3.2.1 Critério de Courant	18
3.3 Escoamento Isentrópico Através de Bocais	19
3.3.1 Entalpia de Estagnação	19
3.3.2 Temperatura e Pressão de Estagnação	20
3.4 Lei de Newton do resfriamento.....	22
3.5 Abordagem matemática do métodos dos elementos finitos: método direto de equilíbrio.....	23
4. O NX NASTRAN SIEMENS	25
5. MODELAMENTO DOS PROBLEMAS.....	26
5.1 Exemplo bocal convergente	26
5.1.1 Bocal convergente - solução analítica	28
5.1.2 Solução do bocal convergente através do mef no nx siemens	30
5.1.3 Configuração da solução e do controle de convergência.....	36
5.2 Análise de Carregamento de Impacto em viga engastada.....	38
5.2.1 Carregamento de impacto em viga engastada - Solução analítica.....	38
5.2.2 Carregamento de impacto em viga engastada - NX Siemens.....	40
5.3 Análise de transferência de calor por convecção forçada na caixa de transmis são de um automóvel.....	65
5.3.1 análise de transferência de calor por convecção forçada na caixa de transmissão de um automóvel – solução analítica.....	65
5.3.2 análise de transferência de calor por convecção forçada na caixa de transmissão de um automóvel - através do mef no nx siemens.....	66
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
7.CONCLUSÃO	77
8.REFERÊNCIAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

Ao final do século XVIII o matemático Gauss propôs a utilização de funções algébricas como meio de aproximação para a solução de problemas complexos que, analiticamente, demandariam grande esforço e tempo para serem resolvidos (AZEVEDO, 2003). Por volta de 1955, sobretudo, auxiliados pelo advento da computação, Turner, Clough, Martins e Topp, propuseram um método de análise estrutural que viria a ser aplicado em projeto de aeronaves para a Boeing. Alguns anos depois esse método, melhor descrito e definido por dezenas de autores incluindo-se este grupo, foi batizado como o Método dos Elementos Finitos (MEF), (LOTTI, 2006) .

O método consiste em uma simulação computacional na qual um corpo de geometria arbitrária, contruído ou não de múltiplos materiais e sujeito a qualquer tipo de carregamento de qualquer natureza física, é subdividido em pequenas partes que irão representar o domínio contínuo do problema. Esta divisão possibilita a conversão de um problema complexo em vários problemas menores, facilitando sua resolução (SOUZA, 2003).

O fundamento desta divisão consiste em uma Equação integral (Eq. (1.1)), operada sobre um domínio complexo (de volume V), tal que seja possível substituí-la por um somatório de integrais estendidos a sub domínios de geometria simples, de volume V_i .

$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (1.1)$$

A partir desta formulação percebe-se que ao calcular-se todos as integrais estendidos aos sub domínios V_i , basta efetuar o somatório correspondente ao segundo membro (1) para se obter a integral estendido a todo o domínio. Cada valor V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples, triângulo, quadrilátero, tetraedro (AZEVEDO, 2003). Por fim, cada um dos segmentos são conectados uns aos outros através de nós formando uma malha de elementos.

A qualidade de uma análise depende da quantidade, tamanho e tipo de malha. Em outras palavras, quanto menor forem seus tamanhos e em maior quantidade estiverem os elementos de uma malha, melhores resultados serão obtidos na análise. No entanto, há sempre uma relação de “ Trade off ” pois apesar de uma maior

quantidade de elementos promoverem um resultado mais fidedigno, por outro lado, o custo computacional para que cada um destes elementos sejam processados também aumenta.

1.1 QUANTO A IMPORTÂNCIA DO MEF NA ENGENHARIA MODERNA.

Nesta seção são apresentados alguns dos fatores que tornaram o MEF indispensável na indústria moderna.

Em um mundo pautado pelo desenvolvimento de novas tecnologias de uma forma cada vez mais abrupta e um mercado deveras competitivo, as empresas que as desenvolvem buscam, cada vez mais, diminuir seus custos e horas de trabalho associados ao desenvolvimento de seus projetos. A Análise por Elementos Finitos (AEF) contribui nesse sentido pois reduz a necessidade de elaboração de protótipos para seus modelos, uma vez que consegue simular o comportamento destes modelos, bem como de seus materiais, com precisão e segurança em um menor tempo (AZEVEDO, 2003).

Além disso, apesar de tratar-se de um método cujo funcionamento cerne consiste em uma aproximação numérica, o MEF possui uma porcentagem de erros associados as interpolações que é mínima, sobretudo nos casos em que as malhas, seus elementos escolhidos, suas dimensões, e todos os outros parâmetros foram bem definidos.

Fora isto, é ainda destacável sua pluralidade de funções que permitem ao projetista realizar análises de naturezas diversas como: Estrutural, Térmica, Fluido-Térmica, Vibracional, etc. Na seção 5 deste trabalho serão apresentados alguns exemplos.

2. QUANTO A MOTIVAÇÃO E AOS OBJETIVOS

A concepção deste trabalho surge a partir de uma constatação corriqueira: estudantes de engenharia normalmente empenham-se em resolver os problemas aos quais são apresentados ao longo de sua graduação somente de maneira analítica, negligenciando, desta forma, tanto ao poder computacional já disponível a eles quanto ao nível de produtividade imposto pelas indústrias competitivas que necessitam de resultados rápidos e fidedignos, conquistados de forma mais ágil através de recursos

computacionais como é o MEF.

Dessa maneira, este trabalho objetiva apresentar um manual, como o passo a passo para a resolução de problemas vistos ao longo da graduação das mais diversas áreas tais como: Fluida, Fluido-Térmica, e Estrutural através do Software Nx Siemens por meio do MEF. Além disso, serão resolvidos estes mesmos problemas de maneira analítica e, em seguida, comparados seus resultados e métodos de resolução para servirem como guia aos leitores estudantes de engenharia que se dispuserem a avaliar os benefícios provenientes da aplicação de uma Análise por Elementos Finitos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados alguns fundamentos de engenharia que governam o funcionamento das grandezas físicas e servirão de base nas resoluções dos problemas que serão apresentados ao longo deste trabalho.

3.1 ENERGIA DE DEFORMAÇÃO

No estudo das tensões e deformações em vigas há dois conceitos fundamentais: a Energia de Deformação e o Teorema de Castigliano. Estes conceitos relacionam-se para determinar analiticamente o comportamento das vigas.

Ao aplicar uma tensão normal σ em um corpo de prova objetivando medir seu alongamento, é possível elaborar um gráfico que relaciona a tensão σ aplicada e o alongamento ϵ sofrido pelo corpo, como mostra a Figura 1:

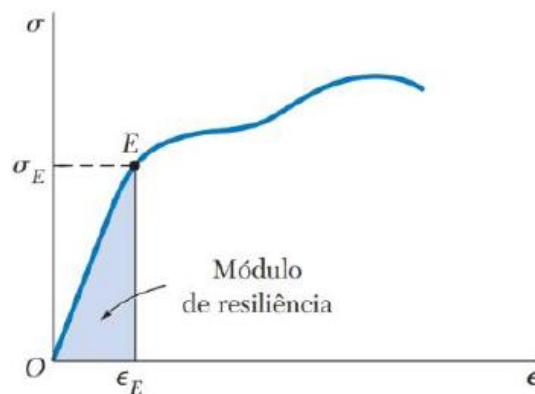


Figura 1: Gráfico tensão deformação.

Fonte: Shigley, 8ª edição.

Segundo (SHIGLEY, 2016) no projeto de vigas é crucial que a deformação sofrida não ultraprasse o limite elástico, que, em termos de energia elástica armazenada, é o valor correspondente a área sombreada da Figura 1, e que recebe o nome de módulo de resiliência. Essa quantidade de energia por unidade de volume, será denotada por u e para calcular seu valor será realizada uma integral na função $\sigma(\epsilon)$ tal que:

$$u = \int_0^{\epsilon_x} (\sigma_x) d\epsilon_x \quad (3.1)$$

Pela Lei de Hooke tem-se que:

$$\sigma_x = E\epsilon_x \quad (3.2)$$

Então,

$$u = \int_0^{\epsilon_x} (E\epsilon_x) d\epsilon_x = \frac{E\epsilon_x^2}{2} \quad (3.3)$$

Integrando até o ponto ϵ_E mostrado na Figura 1 e utilizando a lei de Hooke novamente, tem-se que:

$$u = \frac{E\epsilon_E^2}{2} = \frac{(\sigma_E)^2}{2E} \quad (3.4)$$

O valor de u representa a quantidade de energia armazenada em uma unidade de volume (v) do corpo. Dessa forma, para que tenhamos a energia de deformação armazenada em todo o volume (V), nos basta calcular uma integral em todo o volume, o que nos fornecerá a Equação (3.5):

$$\int_V u = U = \int_V \frac{\sigma^2}{2E} dV \quad (3.5)$$

E , para o caso em que a tensão normal é de flexão, tem-se que a tensão σ vale:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (3.6)$$

Onde:

M é o momento fletor da viga (N/m²)

y é a distância da superfície da viga até a linha neutra (m)

I = é o momento de inércia de área da viga (m⁴)

$$I = \int_A y^2 dA \quad (3.6.1)$$

Dessa forma, levando (3.6) em (3.5) tem-se a Equação (3.7):

$$U = \int_V \frac{(\frac{My}{I})^2}{2E} dV \quad (3.7)$$

Onde: $dV = dA dx$, e a expressão (3.7) torna-se :

$$U = \int_V \frac{(M)^2}{2E} (\int_A y^2 dA) dx \quad (3.8)$$

Onde verifica-se que a integral entre parenteses trata-se do Momento de Inercia I, logo, substituindo o valor I (3.6.1) em (3.8):

$$U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx \quad (3.9)$$

E como o momento M é uma função de x, para resolver a integral é necessário saber qual a função M (x), que, por exemplo, para uma viga engastada em uma das extremidades e uma carga aplicada na extremidade livre, como mostra a Figura (2). O M(x) é dado pela Equação (3.10).

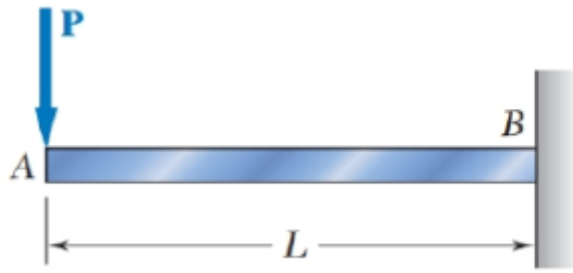


Figura 2: Viga engastada com carga aplicada à extremidade livre.

Fonte: (Shigley, 2016)

$$M(x) = -Px \quad (3.10)$$

Levando (3.10) em (3.9), tem-se:

$$U = \int_0^L \frac{(-Px)^2}{2EI} dx = \frac{P^2 L^3}{6EI} \quad (3.11)$$

Com o resultado da Equação (3.11), é viável agora elucidar o teorema de Castigliano e calcular as deformações de uma viga carregada como a da Figura (2)

3.2 TEOREMA DE CASTIGLIANO

Segundo o Teorema de Castigliano: “Se a energia de deformação de uma estrutura linear elástica pode ser expressa como uma função da força generalizada P_i , então a derivada parcial de energia de deformação (∂U) em relação à força generalizada fornece o deslocamento generalizado y_i na direção de P_i ”. Dessa forma, tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial P_i} = y_i \quad (3.12)$$

E substituindo (3.11) em (3.12), objetivando obter o deslocamento y no ponto A (y_a) To resultado é dado pela Eq.(3.13).

$$\frac{\partial(\frac{P^2 L^3}{6EI})}{\partial P_i} = y_a \quad (3.13)$$

$$y_a = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3.14)$$

Onde: P é a carga aplicada (N);
L é o comprimento da viga (m);
E é o módulo de elasticidade (Pa);
I é o momento de inercia de área (m⁴).

3.2.1 CRITÉRIO DE COURANT

Por fim, para encerrar esta seção, é crucial a definição e o entendimento do Critério de Courant para a análise que será realizada posteriormente neste trabalho na seção 5.2.2.

Em uma análise do tipo não-linear como a de um peso que é solto do repouso e cai em uma superfície, o “time step” ou, em tradução literal, “passo de tempo” deve ser na ordem de microsegundos para que o software consiga resolver adequadamente as equações diferenciais ordinárias que governam fisicamente o problema analisado.

O critério de Courant é uma condição que estabelece uma relação a ser respeitada na determinação do “time step” em análises não lineares. O critério pode ser expresso por:

$$\Delta t < t_{crit} \quad (3.14.0)$$

Onde:

Δt — é o tamanho do “time step”

$$t_{critico} = \frac{L}{c} \quad (3.14.1)$$

A Equação (3.14.1) representa o tamanho critico de “time step” e nela o valor de L depende da dimensão da malha utilizada e o valor de c é a velocidade de propagação de uma onda sonora no material do corpo analisado.

Particularmente, analisaremos na seção 5.2 uma viga engastada cuja malha tem

duas dimensões (2D), e o valor de c para este caso vale:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (3.14.2)$$

Onde:

ρ —é a densidade do material (kg/m³);

E —é o modulo de elasticidade(Pa);

ν —é o coeficiente de Poisson(adimensional).

3.3 ESCOAMENTO COMPRESSÍVEL EM BOCAIS CONVERGENTES: ESCOAMENTO ISENTRÓPICO ATRAVÉS DE BOCAIS

Os bocais convergentes estão presente em diversas aplicações de engenharia, incluindo as turbinas a vapor, os bocais de jato de areia para operações de jateamento, e nos bocais de maçarico (ÇENGEL, 2012). Neste tópico, serão discutidos os efeitos da contrapressão (pressão aplicada na descarga dos bocais) sobre a velocidade e vazão mássica nos bocais convergentes. Além disso, será brevemente discutido as características de um escoamento compressível, já que nesses dispositivos há variações significativas da massa específica e os efeitos da termodinâmica na dinâmica dos fluidos não pode ser desprezada.

3.3.1 PROPRIEDADES DE ESTAGNAÇÃO: ENTALPIA DE ESTAGNAÇÃO

Na análise de um volume de controle é pratico avaliar a energia do fluído por meio da entalpia específica h que é a soma da energia interna (propriedade termodinâmica) e da energia de escoamento (propriedade da dinâmica do fluido). Sendo assim, a entalpia pode ser expressão através da Equação (3.15.0).

$$h = u + \frac{P}{\rho} \quad (3.15.0)$$

Onde:

h é a entalpia específica (J/kg);

u é a energia interna (J/kg);

P é a pressão do fluído (Pa);

ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3).

Para escoamentos em altas velocidades e quase horizontais, como o que acontece em um bocal convergente, a energia potencial pode ser desprezada mas a cinética não. Sendo assim, para fins práticos é conveniente ainda, a definição da **entalpia de estagnação** h_0 , combinando a entalpia e a energia cinética do fluido, onde, definida por unidade de massa é expressa através da Equação (3.15):

$$h_0 = h + \frac{v^2}{2} \quad (3.15)$$

Onde:

h_0 é a entalpia de estagnação (J/kg)

h é entalpia específica (J/kg);

V é a velocidade do fluido (m/s)

Além da entalpia de estagnação é importante definir a temperatura de estagnação e a pressão de estagnação. Estas duas grandezas serão apresentadas na seção (3.3.2)

3.3.2 PROPRIEDADES DE ESTAGNAÇÃO: TEMPERATURA E PRESSÃO DE ESTAGNAÇÃO

Quando um fluido pode ser aproximado como um gás ideal, sua temperatura de estagnação pode ser definida pela Eq.(3.16).

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2C_p} \quad (3.16)$$

Onde:

T_0 é a temperatura de estagnação (K);

T é a temperatura do fluido (K);

V é a velocidade do fluido (m/s);

C_p é o calor específico a pressão constante (J/kg.K).

Sendo essa a temperatura atingida por esse fluido ao ser levado ao repouso (fluido estagnado) de forma adiabática. Além disso, para gases ideais com calores específicos constantes, tem-se também que sua pressão de estagnação é expressa pela Equação (3.17).

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{k/(k-1)} \quad (3.17)$$

Onde:

P é a pressão do fluido (Pa);

P_0 é a pressão de estagnação(Pa);

T_0 é a temperatura de estagnação (K);

T é a temperatura do fluido (K);

k é a razão entre calores específicos para o Ar modelado como gás ideal (adimensional).

Ao observar-se o escoamento no bocal da Figura 3, e considerar que este seja insentrópico e esteja ligado a um reservatório grande o suficiente para que a velocidade do fluido seja aproximadamente **0 m/s**, ao tomar como P_r e T_r a pressão e temperatura respectivamente no reservatório, conclui-se que em qualquer seção transversal ao longo do bocal, a pressão e temperatura de estagnação são as mesmas do reservatório.

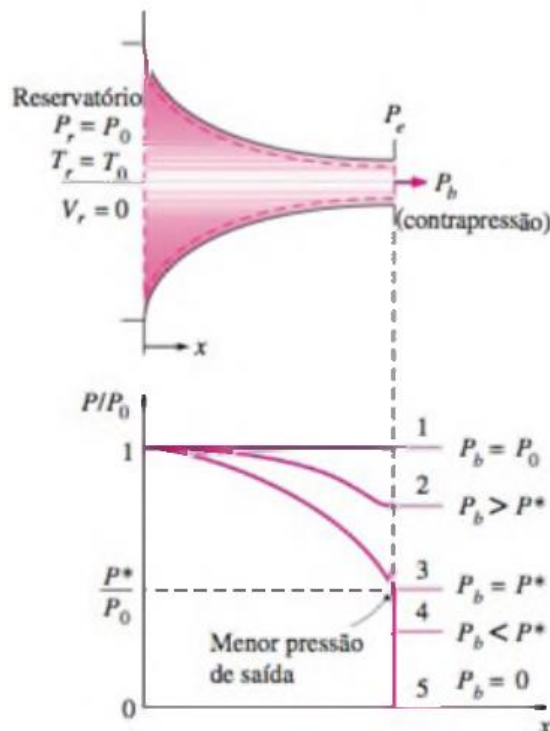


Figura 3: Bocal convergente e gráfico ilustrativo dos efeitos da contrapressão

Fonte: (Çengel, 2007)

A Figura 3 mostra uma redução sucessiva de pressão na saída do bocal (P_b). Em 1, tem-se $P_b = P_r$, logo não há escoamento (pois não há diferença de pressão para tal). Já em 2, quando há uma redução de pressão ainda maior, o fluido começa a escoar e a pressão torna-se menor a cada seção transversal ao longo do escoamento. No ponto 3, a contrapressão é reduzida para o valor de P^* (que é a pressão crítica, pressão na qual o número de Mach é 1), a vazão mássica atinge seu valor máximo e o escoamento é estrangulado. A partir desse ponto, reduções de pressão não acarretarão em variações de pressão ou fluxo de mássica em qualquer parte do bocal.

Dessa forma, o escoamento a partir desse ponto passa a acontecer sob condições de regime permanente e, portanto, a vazão de massa através do bocal é constante e expressa através da Equação (3.18).

$$\dot{m} = \rho AV = \left(\frac{P}{RT}\right)A(Ma\sqrt{kRT}) \quad (3.18)$$

3.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO FORÇADA: LEI DE NEWTON DO RESFRIAMENTO.

Para INCROPERA (2011), calor é “energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura” e para quando há uma transferência de temperatura entre um corpo sólido e um fluido dar-se o nome de transferência de calor por convecção. Neste modo, há dois mecanismos pelos quais o calor é transferido: difusão e advecção. Na difusão, a energia transferida dar-se devido ao movimento molecular aleatório das partículas que formam o corpo, onde as moléculas mais energéticas transferem calor as menos energéticas devido as interações entre elas. Já na advecção, a transferência dar-se pelo movimento agregado (macroscópico) das moléculas que compõem o fluido, na presença de um gradiente de temperatura.

A transferência de calor por convecção pode ser ainda classificada com forçada ou

natural. É forçada quando o fluido recebe energia de escoamento de um ventilador, bomba, ou ventos atmosférico por exemplo. Por outro lado, é natural quando o escoamento acontece devido a forças de empuxo originadas pela diferença de massa específica causada por um gradiente de temperatura no próprio fluido.

A transferência de calor por convecção é governada pela Lei de Newton do Resfriamento que é expressa através da Eq.(3.19).

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (3.19)$$

Onde:

q'' = fluxo de calor por convecção (W/m²);

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²°C);

T_s = Temperatura da superfície do corpo sólido (°C);

T_∞ = Temperatura do fluído (°C).

3.5 ABORDAGEM MATEMÁTICA DO MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS: MÉTODO DIRETO DE EQUILÍBRO

A utilização dos software como o Nx Nastran que será apresentado na seção 4 deste trabalho tem papel fundamental na ampliação do uso da Análise por Elementos Finitos, já que eles dispõem de uma interface homem-máquina amigável sem prejudicar a qualidade da análise. No entanto, há sempre um risco associado a utilização de um software sem entender propriamente a teoria de funcionamento por trás dessas ferramentas computacionais (NAM H.KIM). Dessa forma, esta seção aborda, através de um exemplo, um dos métodos usados para conceber as equações de elementos finitos para um dado problema, o “The Direct Method”, ou, em tradução livre, “Método Direto de Equilíbrio”.

De acordo com este método, a matriz de rigidez e as equações dos elementos relacionando as forças nodais aos deslocamentos nodais são obtidas usando condições de equilíbrio de força para um elemento básico, juntamente com relações de força e deformação. As equações produzidas por este e qualquer um dos outros métodos descrevem, portanto, o comportamento de um elemento (LOGAN, 6ª edição). Essas equações são escritas em forma matricial (Eq. (3.20))

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \cdots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \cdots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} \quad \text{Eq.(3.20)}$$

Ou escritas de forma abreviada:

$$K^e u^e = f^e \quad \text{Eq. (3.21)}$$

Onde:

K representa a matriz das rigidezas;

u representa os deslocamentos nodais;

f_n representa as forças nodais;

e indica que as grandezas envolvidas na equação estão sendo analisadas para um único elemento.

A (Eq. (3.20)) demonstra uma quantidade “n” de equações e “n” incógnitas (colunas u_n e k_n respectivamente) que, para uma análise estrutural, como a que será realizada na seção 5.2 (carregamento de impacto), representam, respectivamente os deslocamentos nodais e as constantes de rigidez dos elementos. A coluna f_n, lado direito da (Eq. (3.20)) representa, portanto, as forças nodais (LOGAN, 6ª edição).

Após encontrar a matriz de rigidez, como a da (Eq.(3.20)), para cada um dos elementos, deve-se prosseguir para a sobreposição das equações dos elementos e a aplicação das condições de contorno. Após a realização da sobreposição das equações, as Equações Globais podem ser escritas na forma matricial (Eq. (3.22))

$$Ku = f \quad \text{Eq. (3.22)}$$

Onde:

K representa a matriz de rigidez global;

u representa o vetor de deslocamentos;

f_n representa as forças globais.

O determinante da matriz K (Eq. (3.22)) é nulo, já que se trata de um movimento de corpo rígido, logo, não há restrições ao movimento do corpo. Neste caso, como a matriz K possui determinante nulo, seria impossível encontrar os vetores de deslocamentos desconhecidos, u_n. Surge, então, a necessidade de aplicação das condições de contorno para que a estrutura tenha seu movimento restringido ao invés de um movimento de translação de corpo rígido (LOGAN, 6ª edição). Nesse ponto, após impostas as devidas condições de contorno

no sistema descrito pela Eq. (3.22) o sistema pode ser resolvido, fornecendo a Equação (3.23):

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

Resolvendo então o sistema descrito pela Eq (3.23) para u_n são encontrados os deslocamentos desconhecidos do sistema físico. Com os valores dos deslocamentos pode-se determinar, de maneira análoga, as tensões e deformações do problema analisado (LOGAN, 6ª edição). Para um caso uni-dimensional, por exemplo, tem-se as Equações (3.24) e (3.25).

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (3.24)$$

Onde:

ϵ_x representa a deformação nos nós da estrutura

$\frac{du}{dx}$ representa a taxa de variação do deslocamento em relação a x

$$\sigma_x = E\epsilon_x \quad (3.25)$$

Onde:

σ_x é a tensão no elemento

E é o módulo de elasticidade

É resolvendo um sistema como o descrito através Eq. (3.23) que se baseia o funcionamento geral de um software de análise por elementos finitos, como o NX Siemens.

4. O NX NASTRAM SIEMENS

O *Nx Nastran da Siemens Digital Industries Software* será utilizado neste trabalho para realizar as simulações propostas. Nesta seção serão apresentados de forma breve a história do software, o contexto de sua criação e sua arquitetura.

Por volta da década de 1960 a Agência Espacial Norte Americana (NASA), recebeu financiamento dos Estados Unidos para que elaborasse um Software de simulação estrutural que fosse capaz de suprir de maneira mais adequada as suas necessidades. O programa NASTRAN (NASa STRuctural ANalysis) foi finalmente lançado em 1968 gerando desenvolvimento tecnologico ao setor aeroespacial americana e retorno financeiro na ordem de \$700 milhões de dólares. Em 1988 o Nx Nastran recebeu umas das maiores honrarias da prestigiada *U.S. Space Foundation's Space Technology* como forma de reconhecimento de sua grande contribuição para o setor Aeroespacial (MACNEAL, 1972).

Inicialmente, o programa foi pensado e desenvolvido para ser de uso exclusivo deste setor, no entanto, o seu sucesso e desempenho foram tão significativos que suas próximas atualizações passaram a oferecer ferramentas que poderiam ser usadas para realizar simulações em quaisquer áreas da engenharia.

A arquitetura do Nx Nastran foi desenvolvida por dois membros da NASA, Mule e Gerald Sandler e por um professor da Universidade de Rochester, Stephen Bruns. O software foi escrito em FORTRAN e é capaz de realizar diversas análises de naturezas distintas. Algumas destas serão aplicadas em problemas propostos na seção seguinte deste trabalho.

5. MODELAMENTO DOS PROBLEMAS

Nesta seção serão apresentados e resolvidos os problemas escolhidos tanto de maneira analítica quanto através do Método dos Elementos Finitos por meio do NX Siemens. Os problemas do Bocal Convergente (seção 5.1) e do Carregamento de Impacto em viga engastada (seção 5.2) foram escolhidos devido a sua dificuldade e grande quantidade de equações a serem aplicadas para obter-se suas resoluções analíticas. Já o problema de Transferência de calor por convecção forçada na caixa de transmissão de um automóvel (seção 5.3) foi escolhido para que seja possível avaliar o efeito das considerações feitas para que se possa obter a resposta via solução analítica.

5.1 BOCAL CONVERGENTE

Na engenharia a resolução de problemas que envolvem a mecânica dos fluidos são de grande importância. Estudos realizados em bocais convergentes e seus efeitos nos escoamentos desempenham papel crucial na tomada de decisões em projetos de Engenharia Mecânica (MORAN, 2006). Desta forma, será resolvido um dos exemplos pertencente a literatura (ÇENGEL, 2007) apresentado na Figura 4.

O problema em questão trata-se de um Bocal Convergente onde são fornecidos os dados de entrada do Ar dispostos ao lado da face maior do Bocal na Figura 4 e a área em cm^2 de saída (face menor), e é requerido o valor da taxa mássica para quando a pressão na saída é $P_t=0,7$ MPa. Analiticamente, para determinarmos a vazão mássica através do bocal para quando a contrapressão é de $P_t=0,7$ MPa, assume-se que:

- O ar é um gás ideal;
- O escoamento através do bocal se dá em regime permanente, unidimensional;

- Não há variação de entropia.



Figura 4: Bocal convergente com dados do problema.

Fonte: ÇENGEL (2007).

5.1.1 – BOCAL CONVERGENTE - SOLUÇÃO ANALÍTICA

O primeiro passo é determinar a temperatura de estagnação e a pressão de estagnação, as quais são obtidas pelas Eq.(3.16) e (3.17), respectivamente.

a) Determinação da temperatura de estagnação

$$T_{0i} = T_i + \frac{V_i^2}{2C_p} \quad (3.16)$$

Onde:

T_{0i} é a temperatura de estagnação na entrada do bocal;

T_i é a temperatura na entrada do bocal (face esquerda, Figura 4);

V_i é a velocidade na entrada do bocal (face esquerda, Figura 4);

C_p é o calor específico a pressão constante ($1,005 \frac{kJ}{kgK}$, (ÇENGEL, 2012)).

Logo,

$$T_{0i} = T_i + \frac{V_i^2}{2C_p} = 873K + \frac{\left(150 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(1,005 \frac{kJ}{kgK}\right)} = 884 K \quad (5.1)$$

b) Determinação da pressão de estagnação

$$P_{0i} = P_i \left(\frac{T_{0i}}{T_i}\right)^{k/(k-1)} \quad (3.17)$$

Onde:

P_{0i} é a pressão de estagnação na entrada do bocal

P_i é a pressão na entrada do bocal (face esquerda, Figura 4)

k razão de calor específico (1,4. (ÇENGEL,2012))

Portanto,

$$P_{0i} = P_i \left(\frac{T_{0i}}{T_i} \right)^{k/(k-1)} = 1(\text{MPa}) \left(\frac{884 \text{ K}}{873 \text{ K}} \right)^{1,4/(1,4-1)} = 1,045 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

Os valores obtidos pelas Equações (5.1) e (5.2), permanecem constantes através do bocal uma vez que é considerado como escoamento isentrópico. Sendo assim, a temperatura de estagnação T_0 em um local qualquer do bocal e a pressão de estagnação P_0 em um local qualquer do bocal são, respectivamente, iguais a temperatura de estagnação na entrada do bocal T_{0i} e a pressão de estagnação na entrada do bocal p_{0i} .

$$T_0 = T_{0i} = 884 \text{ K} \quad (5.3)$$

$$P_0 = p_{0i} = 1,045 \text{ MPa} \quad (5.4)$$

c) Determinação da pressão crítica Eq.(3.17) e da Contrapressão Eq.(5.5).

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} = 0,512 \quad (3.17)$$

Onde:

P^* é a pressão crítica (pressão necessária para aumentar a velocidade de um fluido até a velocidade do som em um plano de saída de um bocal)

P_0 é a pressão de estagnação

k razão de calor específico (1,4 ,(ÇENGEL,2012))

$$\frac{P_b}{P_0} = \frac{0,7 \text{ MPa}}{1,045 \text{ MPa}} = 0,670 \quad (5.5)$$

Como a contrapressão é maior do que a pressão crítica, tem-se que a pressão na saída P_t é igual a contrapressão, em outras palavras, $P_t = P_b = 0,7 \text{ MPa}$ e $P/P_0 = 0,670$. Logo, conclui-se que o escoamento não sofre estrangulamento. Agora, precisa-se saber o valor do número de Mach na saída (Ma_t) e a temperatura na saída (T_t). Obtem-se estes valores consultando a Figura 5 e interpolando entre os valores destacados.

Ma	Ma*	A/A*	P/P_0	ρ/ρ_0	T/T_0
0	0	∞	1,0000	1,0000	1,0000
0,1	0,1094	5,8218	0,9930	0,9950	0,9980
0,2	0,2182	2,9635	0,9725	0,9803	0,9921
0,3	0,3257	2,0351	0,9395	0,9564	0,9823
0,4	0,4313	1,5901	0,8956	0,9243	0,9690
0,5	0,5345	1,3398	0,8430	0,8852	0,9524
0,6	0,6348	1,1882	0,7840	0,8405	0,9328
0,7	0,7318	1,0944	0,7209	0,7916	0,9107
0,8	0,8251	1,0382	0,6560	0,7400	0,8865
0,9	0,9146	1,0089	0,5913	0,6870	0,8606
1,0	1,0000	1,0000	0,5283	0,6339	0,8333
1,2	1,1583	1,0304	0,4124	0,5311	0,7764
1,4	1,2999	1,1149	0,3142	0,4374	0,7184
1,6	1,4254	1,2502	0,2353	0,3557	0,6614
1,8	1,5360	1,4390	0,1740	0,2868	0,6068
2,0	1,6330	1,6875	0,1278	0,2300	0,5556
2,2	1,7179	2,0050	0,0935	0,1841	0,5081
2,4	1,7922	2,4031	0,0684	0,1472	0,4647
2,6	1,8571	2,8960	0,0501	0,1179	0,4252
2,8	1,9140	3,5001	0,0368	0,0946	0,3894
3,0	1,9640	4,2346	0,0272	0,0760	0,3571
5,0	2,2361	25,000	0,0019	0,0113	0,1667
∞	2,2495	∞	0	0	0

Figura 5: Dados para interpolação .
Fonte: ÇENGEL (2012)

Após as interpolações realizadas com bases nos dados da Figura 5 os valores de Ma_t e a relação de temperaturas T_t/T_0 obtidos são:

$$Ma_t = 0,778$$

(5.6)

$$T_t/T_0 = 0,892. \quad (5.7)$$

Por fim, a vazão mássica pode através do bocal pode ser calculada pela Equação (3.18), onde cada termo separadamente é calculado da seguinte forma:

$$T_t = 0,892T_0 = 0,892(884 \text{ K}) = 788,5 \text{ K} \quad (5.8)$$

$$\rho_t = \frac{P_t}{RT_t} = \frac{700kPa}{(0,287kPa \frac{m^3}{kgK})(788,5K)} = 3,093 kg/m^3$$

(5.9)

Onde:

ρ_t é a massa específica do fluído na saída do bocal

$$V_t = Ma_t \cdot c_t = Ma_t \cdot \sqrt{kRT_t} = (0,778) \sqrt{(1,4)(0,287kJ/kgK)(788,5K)(\frac{1000m^2}{kg})} = 437,9m/s$$

(5.10)

Onde:

V_t é a velocidade na saída do bocal

c_t é a velocidade do som no ar

R é a constante do gás, que para o Ar vale (0,287kJ/kgK) vide (ÇENGEL, 2012)

Logo, substituindo as Equações (5.9) e (5.10) em (3.18) tem-se o resultado final do problema do Bocal Convergente:

$$\dot{m} = \rho_t A_t V_t = (3,093 kg/m^3)(50 \times 10^{-4} m^2)(437,9 m/s) = 6,77 kg/s \quad (3.18)$$

Onde:

A_t é a área de seção transversal na saída do bocal (ver Figura 4)

5.1.2 SOLUÇÃO DO BOCAL CONVERGENTE ATRAVÉS DO MEF NO NX SIEMENS

Inicialmente, deve-se abrir NX Siemens onde será feito o modelo 3D do Bocal Convergente, seguindo as instruções da Figura 6.



Figura 6: Modelo 3D de um bocal convergente.

Fonte: AUTOR

A seguir, deve-se prosseguir para a aplicação da malha na aba **Application** → **Advanced**. Na nova tela, selecionar **New FEM and Simulation** e seguir os passos mostrados nas Figura 7 e Figura 8 para uma correta configuração inicial da Solução.

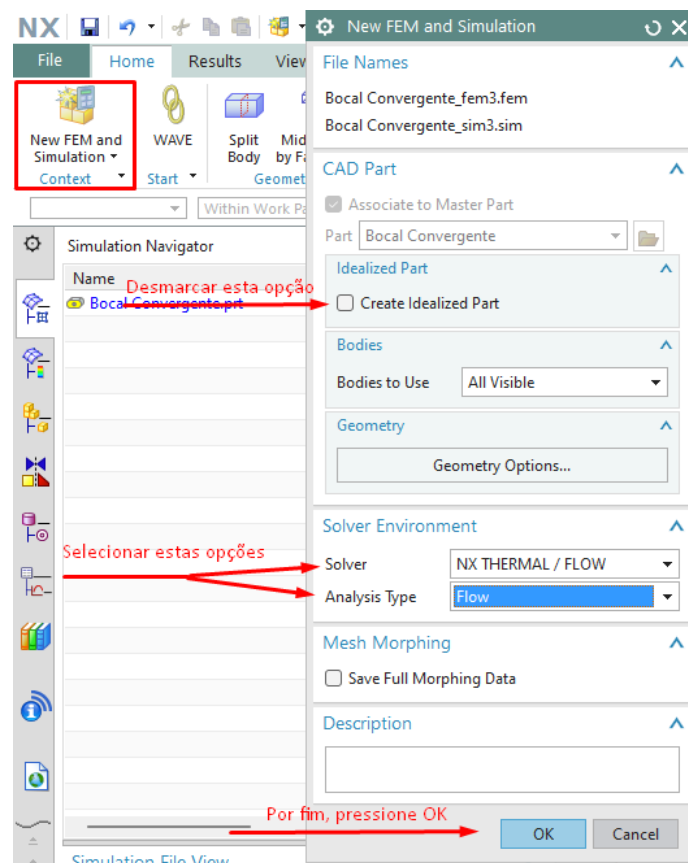


Figura 7: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 1.

Fonte: AUTOR

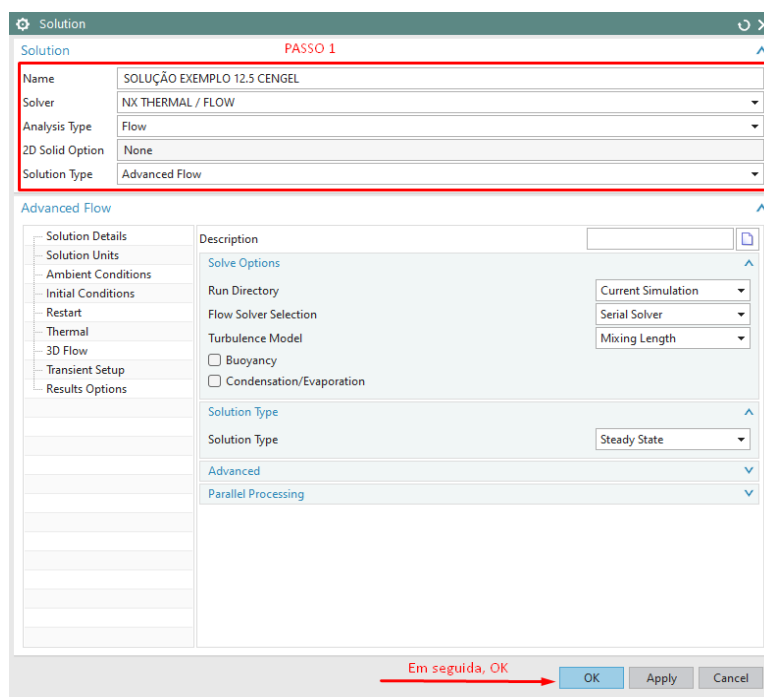


Figura 8: Simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 2.

Fonte: AUTOR

No ambiente de Modelo de Elemento Finito (**Finite Element Model FEM**) deve-se prosseguir como indicado na Figura 9:

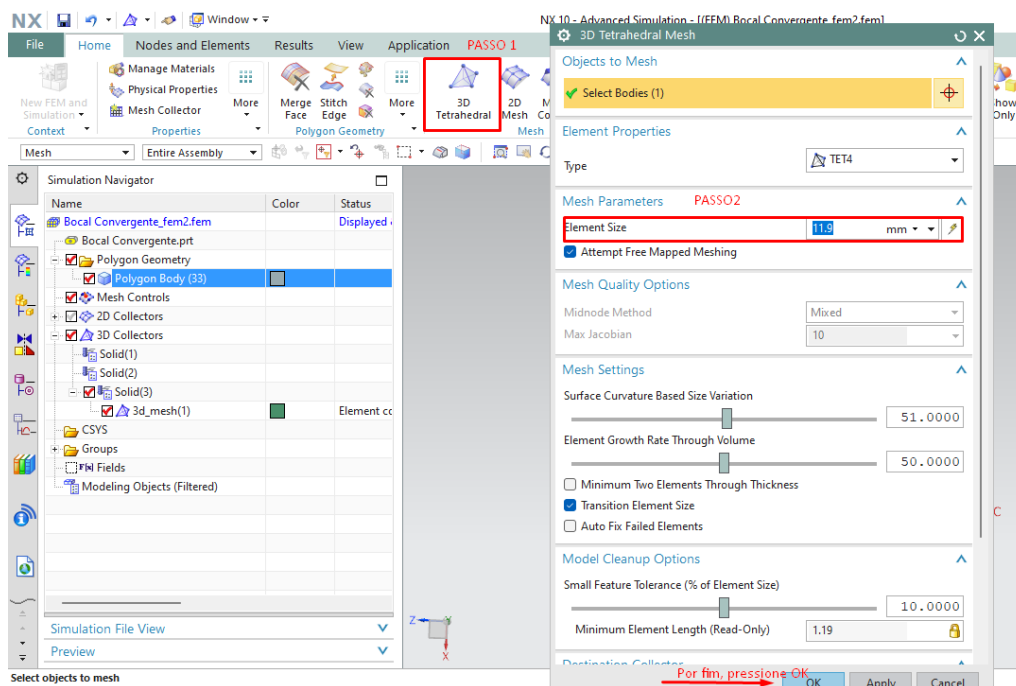


Figura 9: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 3

Fonte: AUTOR

Após a criação da malha ser realizada, é necessário atribuir um material ao corpo do Bocal Convergente que será analisado, e para isso basta prosseguir à opção **3D Collectors** → selecionar botão direito do mouse em **Solid** → **edit**. Nas propriedades do Mesh Collector deve-se pressionar o ícone  e então prosseguir como indica a Figura 10.

Em seguida, deve-se prosseguir para o ambiente de Simulação (arquivo.sim) através da aba **Window** (canto superior esquerdo da tela). O ambiente de simulação é responsável por computacionalmente impor as condições reais do problema e mostrar qual o comportamento das grandezas envolvidas nessa situação.

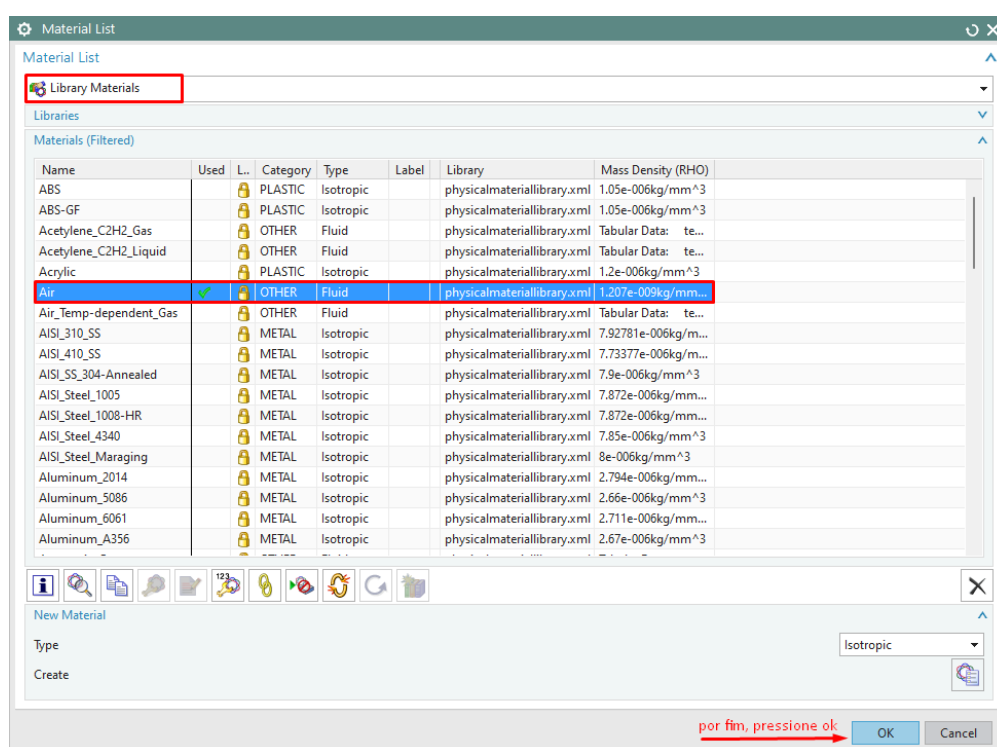
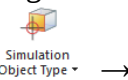


Figura 10: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 4.
Fonte: AUTOR

Inicialmente, deve-se prosseguir atribuindo as grandezas mostradas na Figura 11.

Para isso deve-se selecionar com botão esquerdo do mouse nos seguintes ícones:  **Flow Boundary Condition** e em seguida deve-se atribuir os valores destacados na Figura 11:



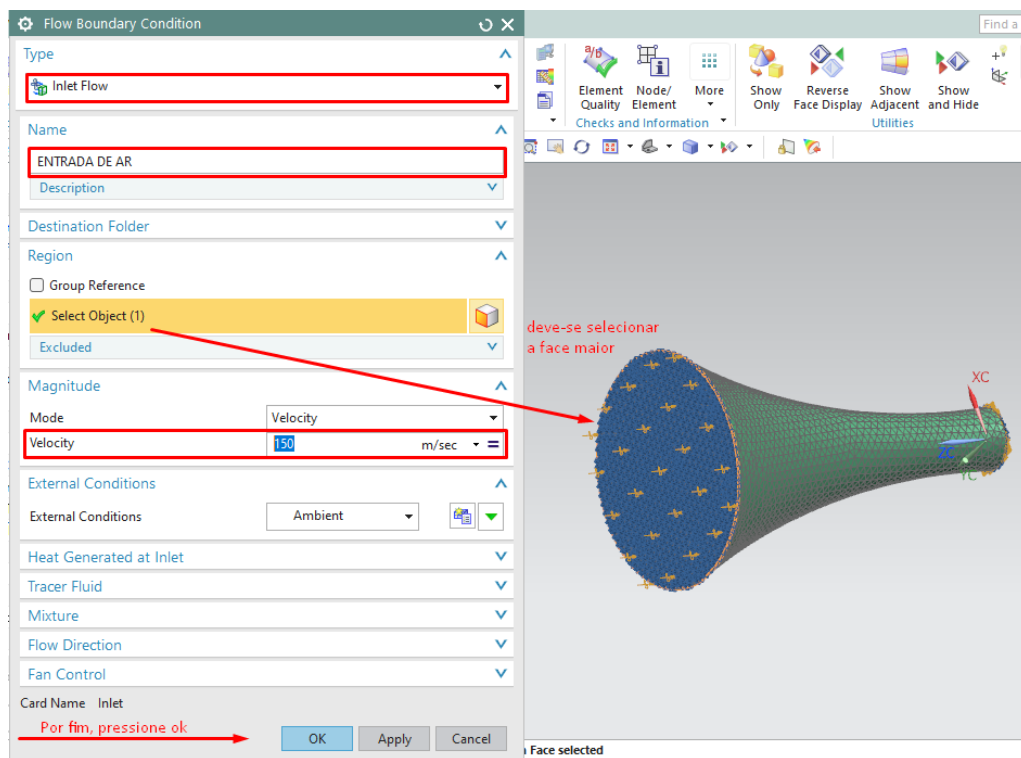


Figura 11: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 5.

Fonte: AUTOR

Logo após, deve-se selecionar com botão esquerdo do mouse nos seguintes ícones:

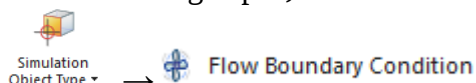


Figura 12:

e em seguida deve-se atribuir os valores destacados na

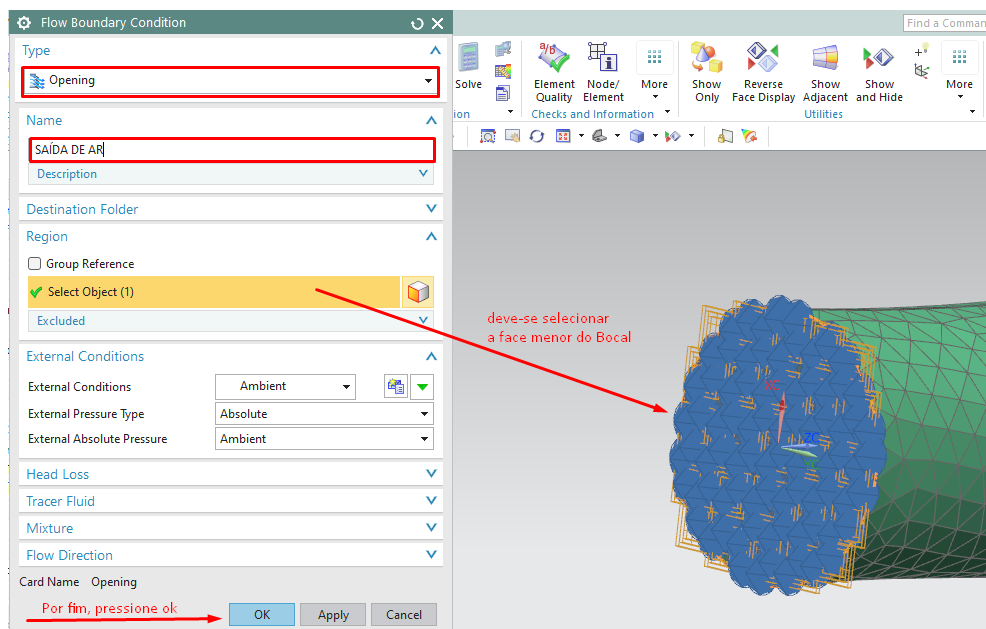
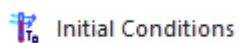


Figura 12: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 6.

Fonte: AUTOR

Agora, deve-se aplicar as restrições (Constraints) que caracterizam este problema. Neste

caso são duas: a pressão de entrada e saída do Bocal. Para isso, deve-se selecionar



e configurar as opções conforme Figura 13.

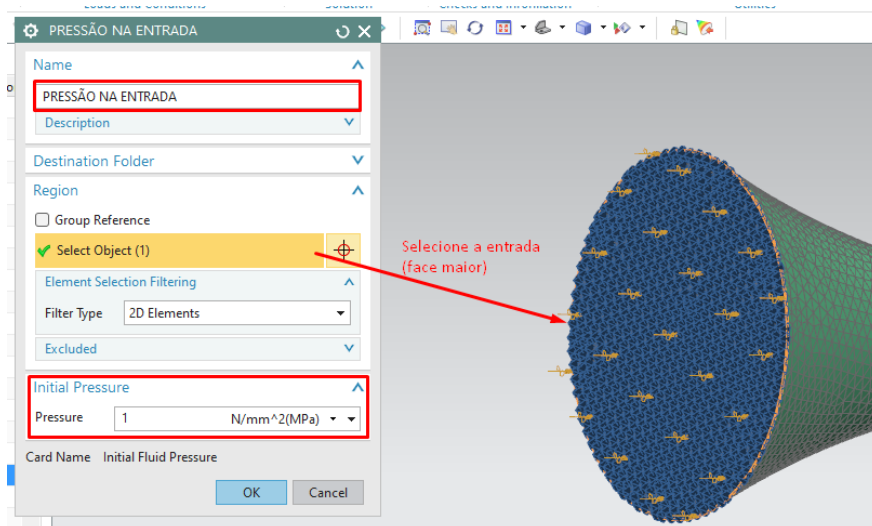
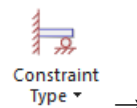


Figura 13: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 7.

Fonte: AUTOR

Analogamente, deve-se realizar o mesmo procedimento para a outra face:

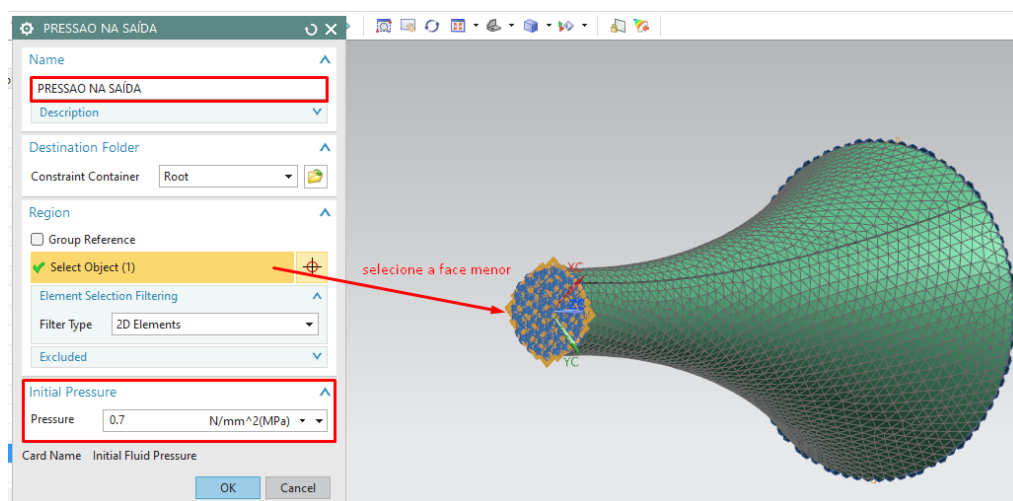


Figura 14: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 8.

Fonte: AUTOR

Por fim, deve-se atribuir um **Simulation Object** do tipo **Report** à saída do bocal sob as especificações ilustradas na Figura 15.

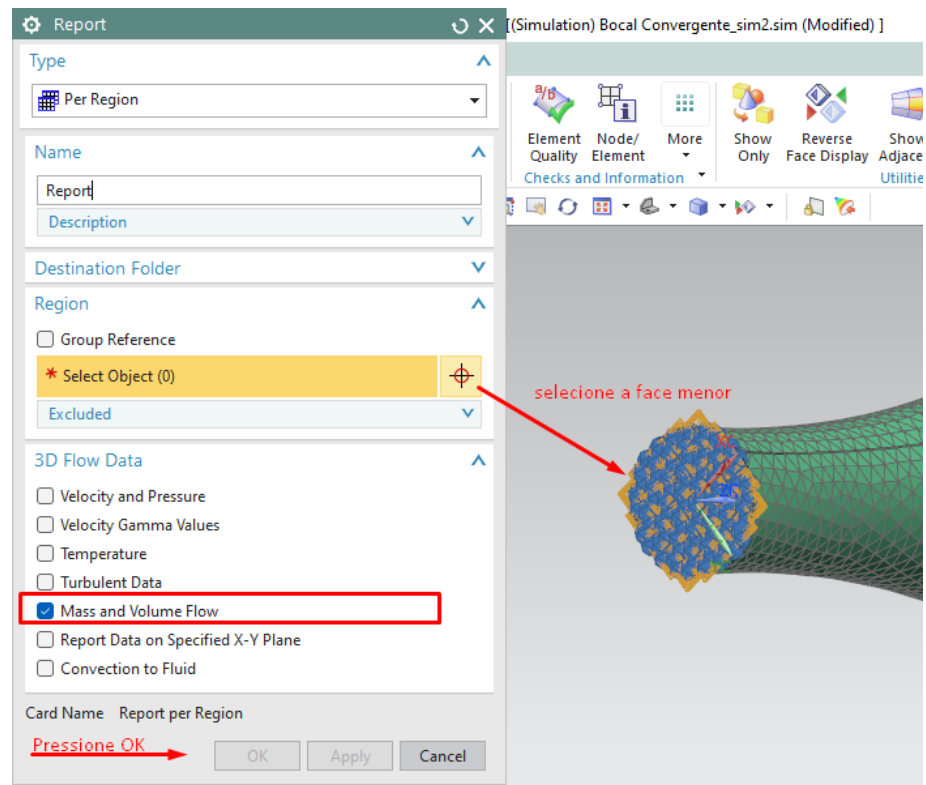
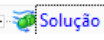


Figura 15: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 9.

Fonte: AUTOR

Este Simulation Object é responsável por reportar o fluxo de massa e volume naquela área de secção transversal especificada, fornecendo assim o resultado procurado para este problema. No entanto, antes de prosseguir para a solução, deve-se configura-lá da maneira correta. A seção 5.1.2 a seguir mostra o passo a passo de como configurar a Solução deste problema.

5.1.3 CONFIGURAÇÃO DA SOLUÇÃO E DO CONTROLE DE CONVERGÊNCIA

Nesta seção será explicado como deve-se ser configurado o controle de convergência. Inicialmente deve-se selecionar com o botão direito do mouse em  e em seguida em  Edit Solver Parameters... → 3D Flow Solver . Nesta aba deve-se configurar a solução como indica a Figura 16.

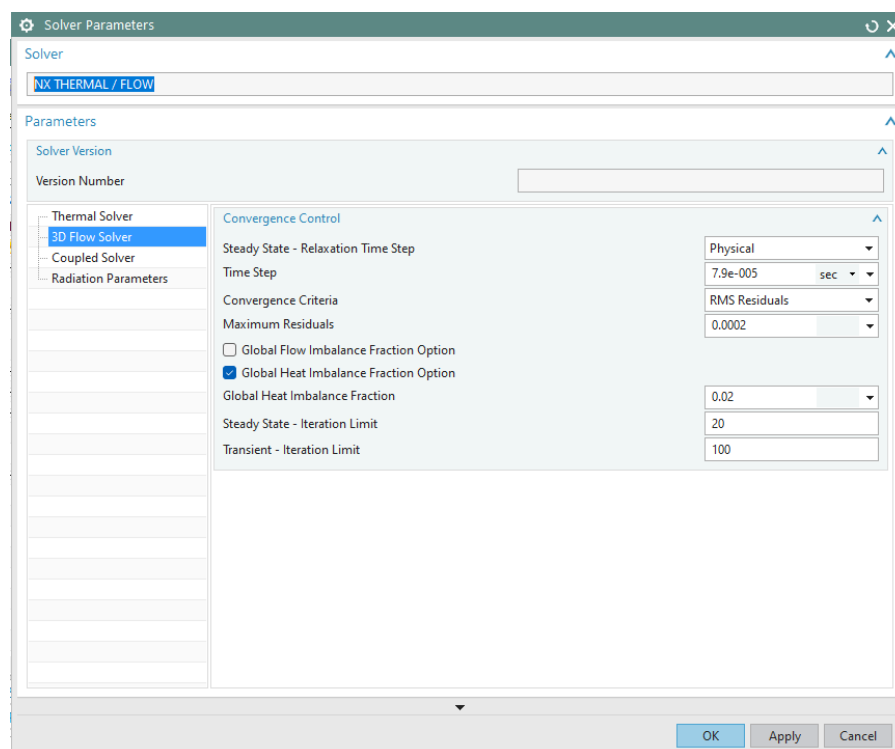


Figura 16: simulação dos efeitos da contrapressão em bocal convergente: Passo 10.

Fonte: AUTOR

Por fim, para consultar o valor do fluxo de massa solicitado no exemplo, deve-se ir na pasta na qual esta salvo o arquivo da solução e abrir o arquivo **Bocal_Convergente_sim-Solução_GroupReport**. O valor encontrado é bastante próximo daquele calculado analiticamente e o sinal negativo somente indica que o escoamento ocorre no sentido oposto a um dos eixos do Nx Siemens, haja visto que fluxo de massa é uma grandeza escalar e não vetorial.



NX Thermal/Flow Report

Simulation: C:/Users/Pessoal/Desktop/TCC/tentativa 2 análise bocal convergente/Bocal_Convergente_sim2.sim
 Solution: Solução_
 Author: Pessoal
 Company: MAYA
 Date: 2-Jan-2024 - 16:23:03
 Software: NX 10.0.112

TOC
Units

Length	Temperature	Pressure	Force	Velocity	Volume Flow Rate	Mass Flow Rate	Heat Load	Heat Flux	Heat Transfer Coeff.
m	C	N/m²	N	m/s	m³/s	kg/s	W	W/m²	W/m²·C

Mass Volume Flow

Group	Time	Mass Flow	Volume Flow
Report(1)	0	-6.58597	-3.30786

Figura 17: Resultado.

Fonte: AUTOR

O valor encontrado para a taxa mássica por meio da solução análítica Eq (3.18) foi **6,77 kg/s** e o obtido através da solução no Nx Siemens foi de -6.58 kg/s conforme Figura 17. O sinal negativo mostrado na solução através do MEF somente indica que o escoamento ocorre no sentido contrário de um dos eixos cartesianos definidos pelo NX Siemens. De forma alguma este sinal indica valor negativo para a taxa mássica, já que trata-se de uma grandeza escalar e não vetorial. Os valores são, portanto, muito próximos e as razões pelas quais ligeiramente diferem foram discutidas na seção 6 deste trabalho.

5.2 ANÁLISE DE CARREGAMENTO DE IMPACTO EM VIGA ENGASTADA

O problema mostrado na Figura 18, trata-se de uma viga em balanço, engastada em uma de suas extremidades (A), que sofrerá o impacto de uma carga na extremidade livre (B). A seção transversal da viga é quadrada (50x50 cm) e seu módulo de elasticidade é de $E=79\text{GPa}$. Além disso, um objeto de 750N de peso é solto a partir do repouso a uma altura de 1 m da viga. É solicitado o valor da **máxima flexão** da viga.

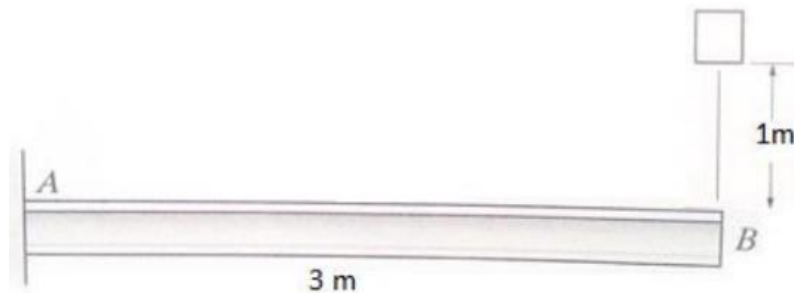


Figura 18: Viga engastada com iminente carga de impacto na extremidade livre.

Fonte: (FEEVALE, 2016)

5.2.1 – CARREGAMENTO DE IMPACTO EM VIGA ENGASTADA - SOLUÇÃO ANALÍTICA

Analiticamente, deve-se calcular o deslocamento estático pelo Teorema de Castigliano (Eq.(3.14)):

$$y = \frac{1}{EI} \int_0^L \frac{M \partial M}{\partial P} dx = \frac{1}{EI} \int_0^L -Px(-x)dx = \frac{Px^3}{3EI} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3.14)$$

Onde o momento de inércia I é calculado através da Equação (5.7).

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{50 \times 10^{-2} m (50 \times 10^{-2} m)^3}{12} = 5,2 \times 10^{-3} m^4 \quad (5.7)$$

Onde:

b é a base da viga (m);

h é a altura da viga (m);

I é o momento de inércia (m⁴).

Substituindo (5.7) em (3.14) tem-se:

$$y = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{750N(3)^3m}{3(79 \times 10^9)Pa (5,2 \times 10^{-3}) m^4} = 1,64 \times 10^{-2} mm \quad (5.8)$$

Agora, deve-se calcular o Fator de Impacto **K** que, de (SHIGLEY,2016) tem-se:

$$K = 1 + \left(\sqrt{\frac{1+2H}{y}} \right) = 1 + \left(\sqrt{\frac{1+2(1000)mm}{1,64 \times 10^{-2} mm}} \right) = 350 \quad (5.9)$$

Onde:

H é a altura da qual é solto o bloco (Figura 18);

y é o resultado da Equação (5.8);

K é o fator de impacto.

Por fim,

$$\delta_{max} = K (\delta_{est}) = 350 (1,64 \times 10^{-2} mm) = 5,70 mm \quad (5.10)$$

O deslocamento máximo δ_{max} solicitado no enunciado do exercício é o resultado analítico obtido através da Eq. (5.10).

5.2.2 – CARREGAMENTO DE IMPACTO EM VIGA ENGASTADA - ATRAVÉS DO MEF NO NX SIEMENS

Agora, será realizada a solução via Análise por Elementos Finitos no Nx Siemens. Inicialmente, deve-se modelar uma viga de seção transversal quadrada (50x50 cm) e um bloco de massa de 5 cm de lado, como o mostrado na Figura 19.

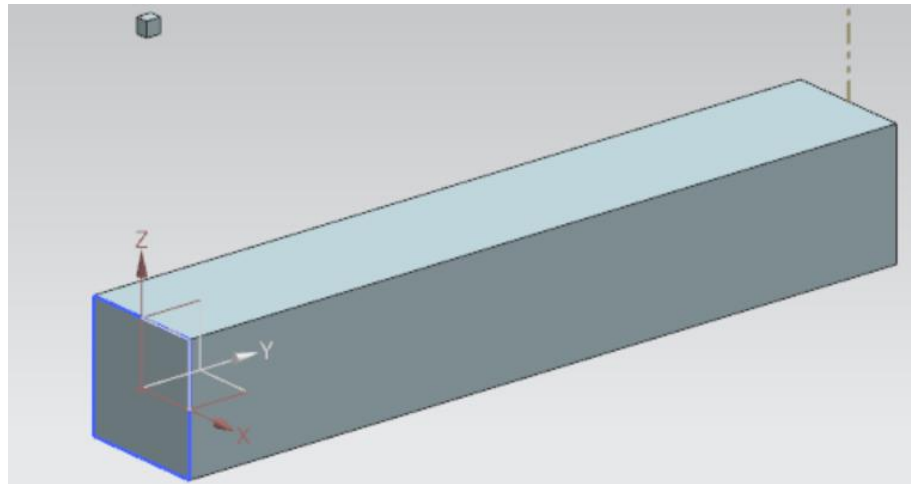


Figura 19: Carregamento de impacto: Passo 1.
Fonte: AUTOR

Além disso, o bloco deve estar a 1 metro de altura de uma das extremidades da viga e centralizado no meio dela, como mostra a Figura 20.

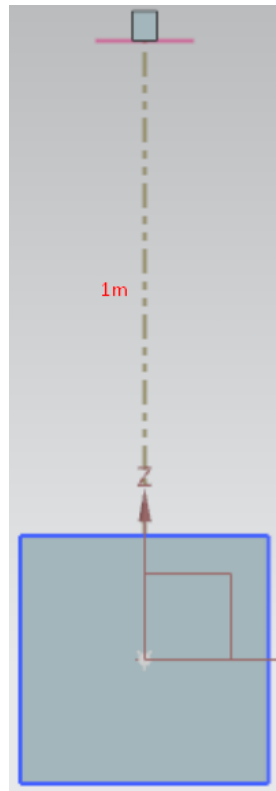


Figura 20: Carregamento de impacto: Passo 2.
Fonte: AUTOR

Nesse ponto, já podemos prosseguir para a criação da malha e atribuição das espessuras, materiais e propriedades dos corpos. Para isso, deve-se prosseguir para aba **Application** e em seguida **Advanced** como mostra a Figura 21.

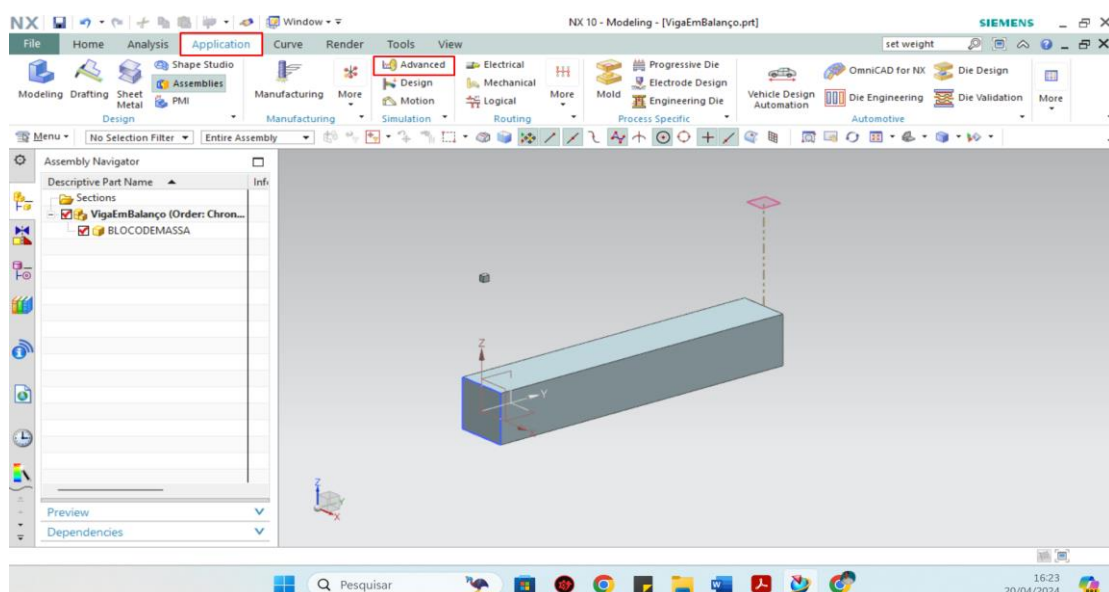


Figura 21: Carregamento de impacto: Passo 3.
Fonte: AUTOR

Logo após, deve-se prosseguir a criação dos arquivos .fem e .sim.

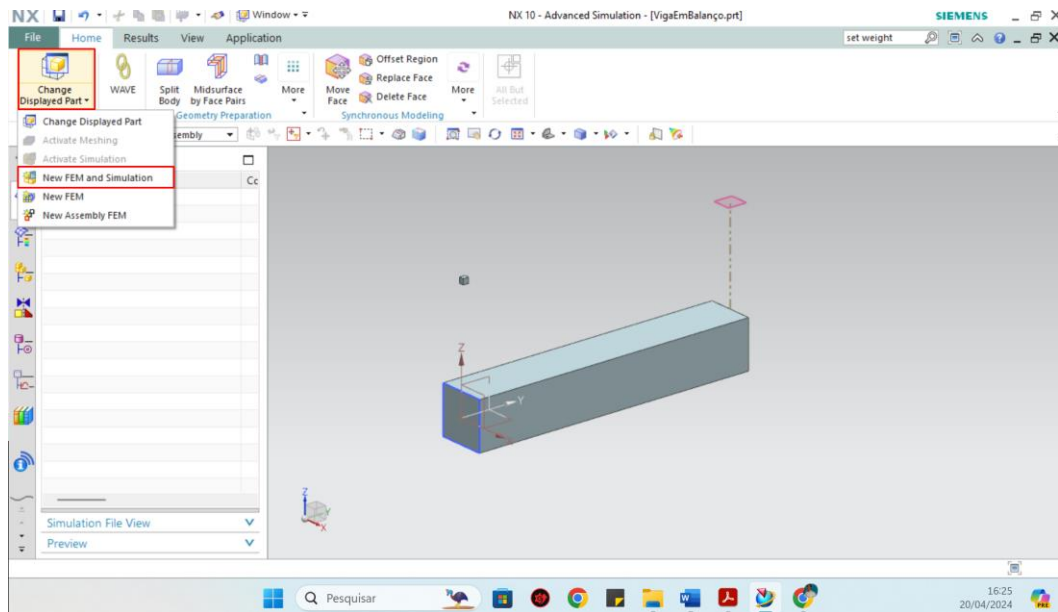


Figura 22: Carregamento de impacto: Passo 4.

Fonte: AUTOR

Na próxima janela deve-se pressionar ok, e após isso uma nova janela será aberta. Esta deve ser configurada como a Figura 23.

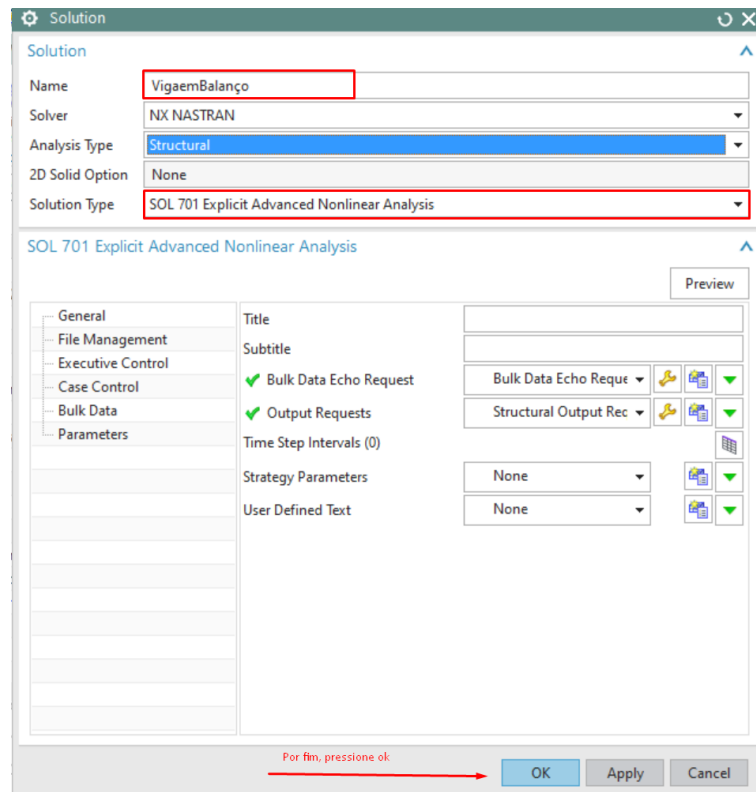


Figura 23: Carregamento de impacto: Passo 5.
Fonte: AUTOR

A partir de agora, deve-se atribuir a malha e as características dos corpos no ambiente .fem. Inicialmente, deve-se selecionar Window (canto superior esquerdo) e ir até o arquivo .fem .

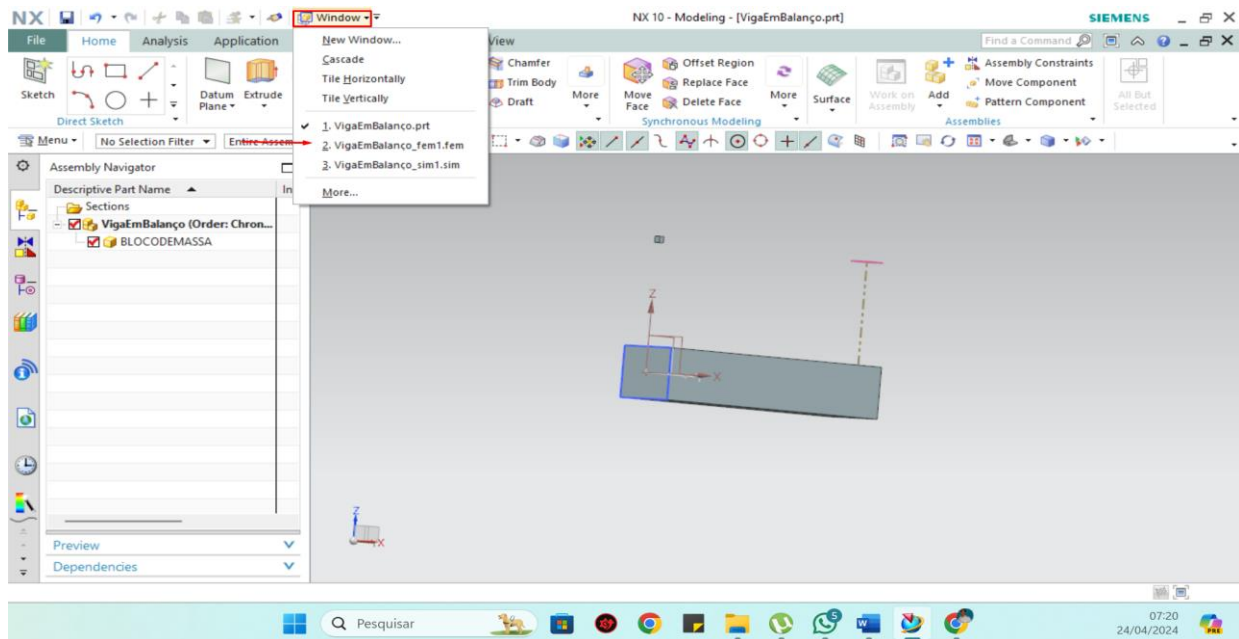


Figura 24: Carregamento de impacto: Passo 6.
Fonte: AUTOR

Neste ambiente deve-se prosseguir na criação da malha 2D como mostram as Figuras 25 e 26.

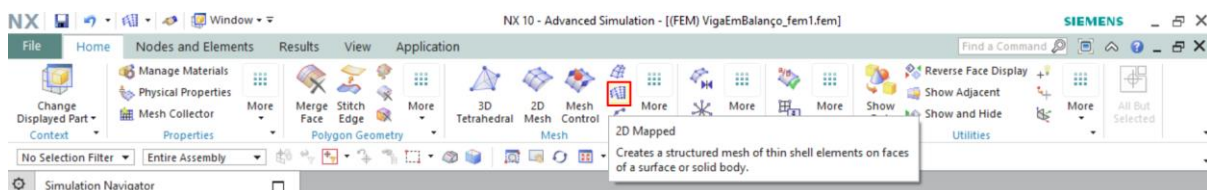


Figura 25: Carregamento de impacto: Passo 7.
Fonte: AUTOR

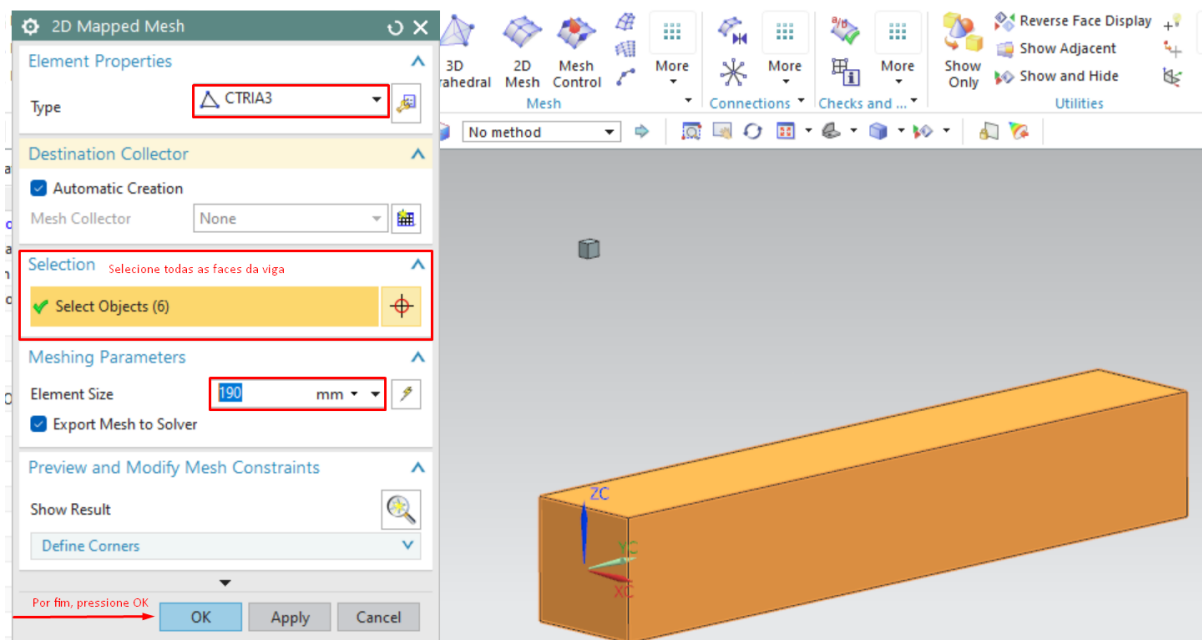


Figura 26: Carregamento de impacto: Passo 8.
Fonte: AUTOR

Neste ponto, tem-se a malha da viga criada, agora deve-se fazer o mesmo para a malha do bloco de massa. Inicialmente selecionar (como mostra na Figura 27) e em seguida configurar como apresenta a Figura 28.

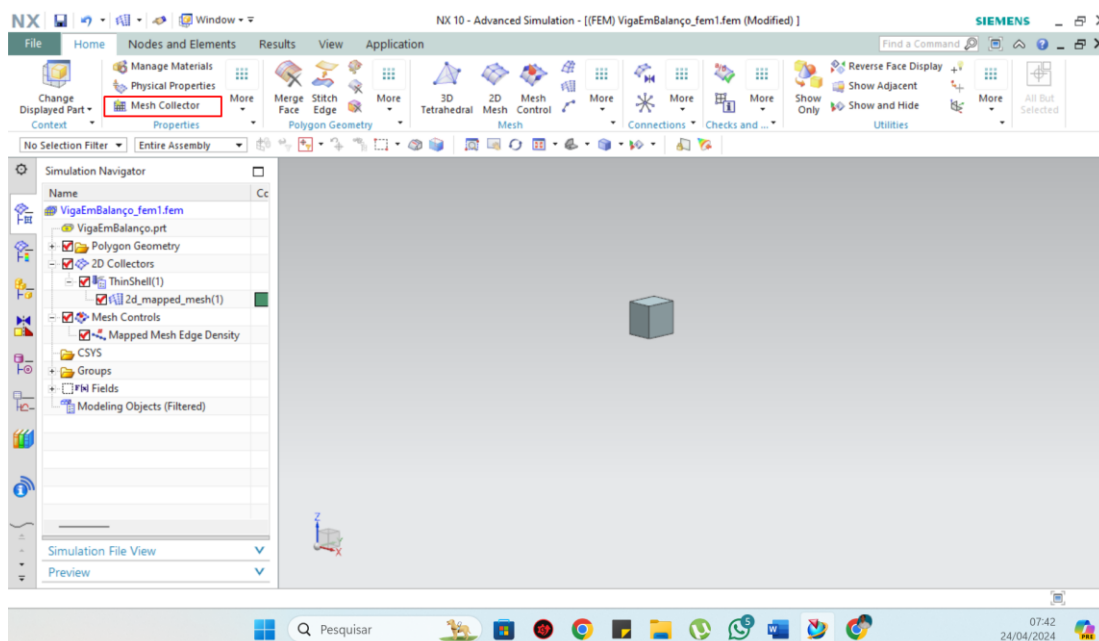


Figura 27: Carregamento de impacto: Passo 9.
Fonte: AUTOR

A figura 28 mostra a criação do coletor do bloco e o ícone para abrir a aba para a criação da malha 2D Mapped Mesh:

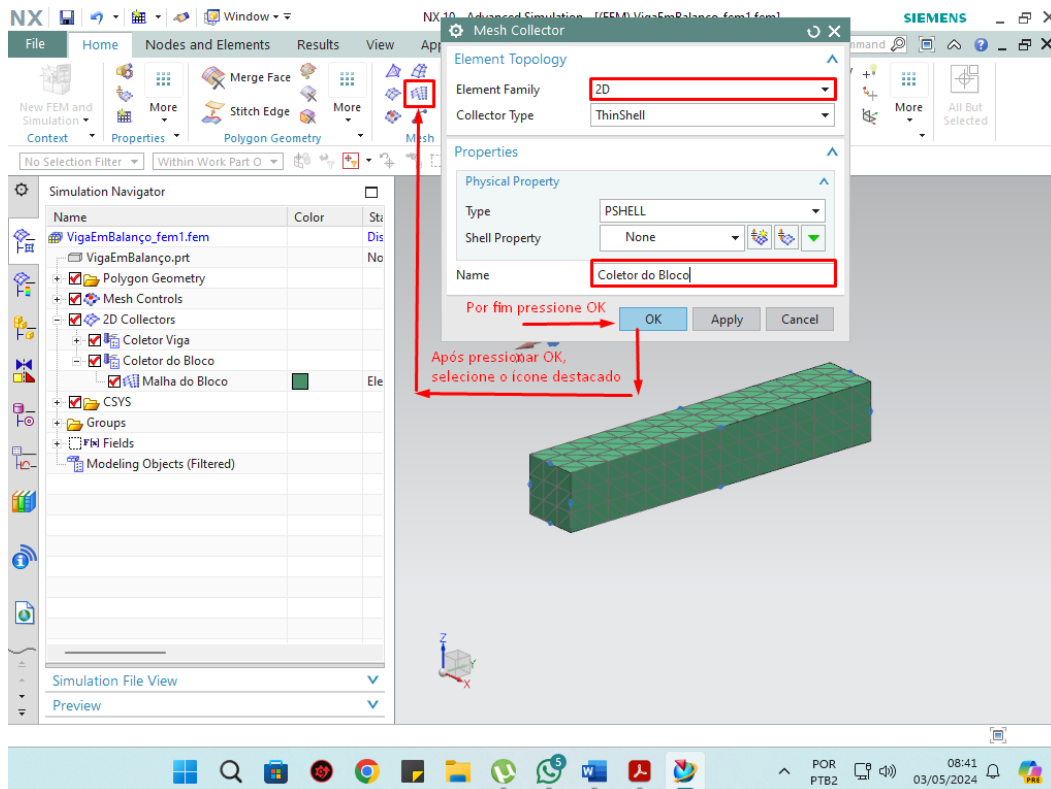


Figura 28: Carregamento de impacto: Passos 10 e 11 .
Fonte: AUTOR

Nesta janela, deve-se configurar a malha do bloco da forma mostrada na Figura 29.

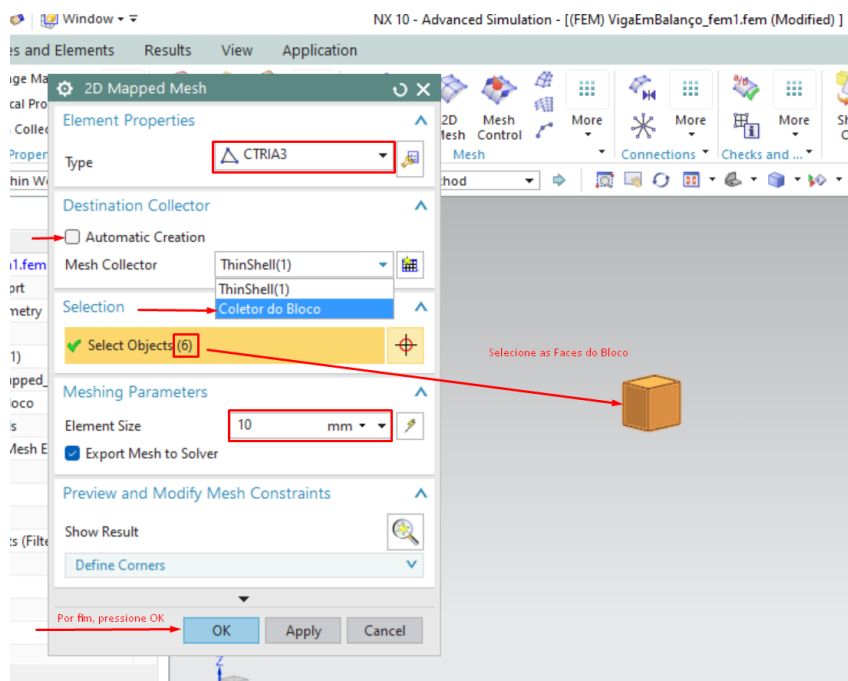


Figura 29: Carregamento de impacto: Passo 12.
Fonte: AUTOR

Agora, com as malhas e coletores dos corpos criadas deve-se atribuir a espessura da malha e o material dela. No entanto, antes disso deve-se renomear o coletor da Viga para: “Coletor Viga”, como apresenta a Figura 30.

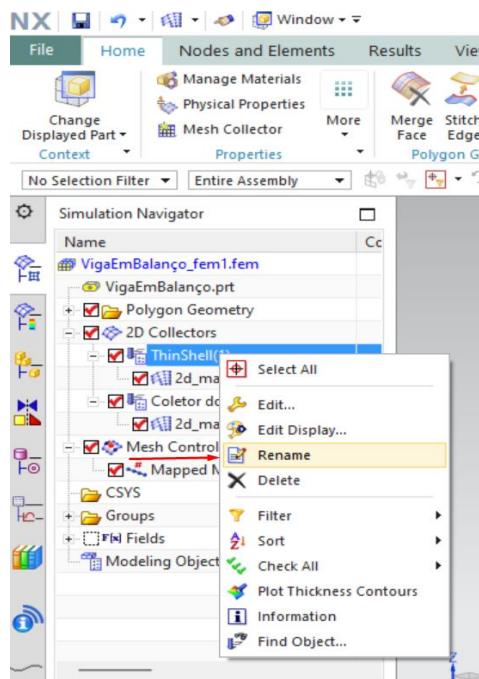


Figura 30: Carregamento de impacto: Passo 13.
Fonte: AUTOR

Neste ponto, deve-se selecionar o “Coletor da Viga” e prosseguir como mostram as Figuras 31, 32 e 33:

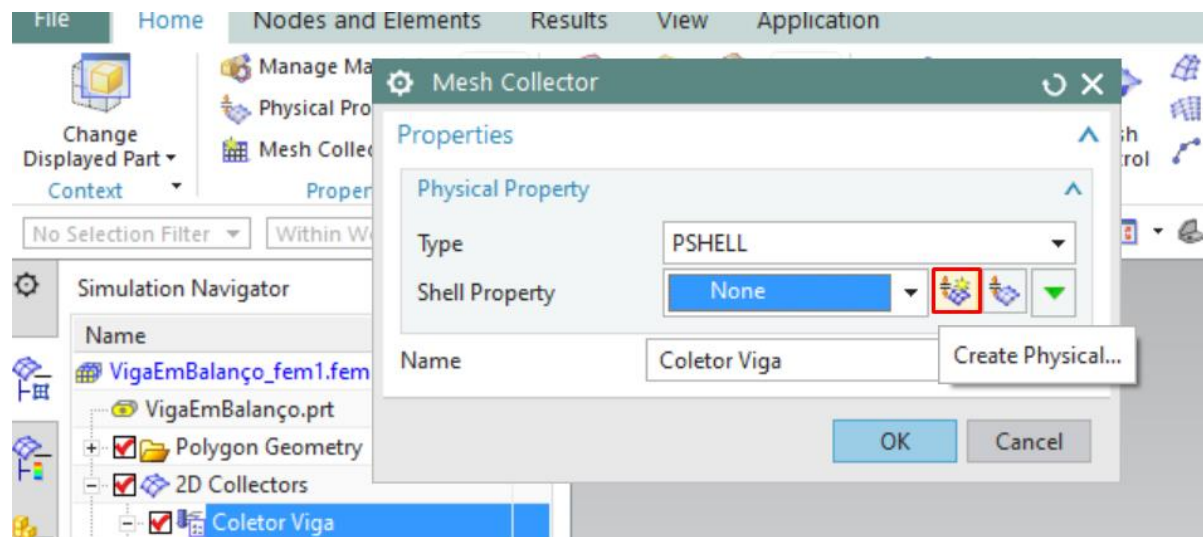


Figura 31: Carregamento de impacto: Passo 14.

Fonte: AUTOR

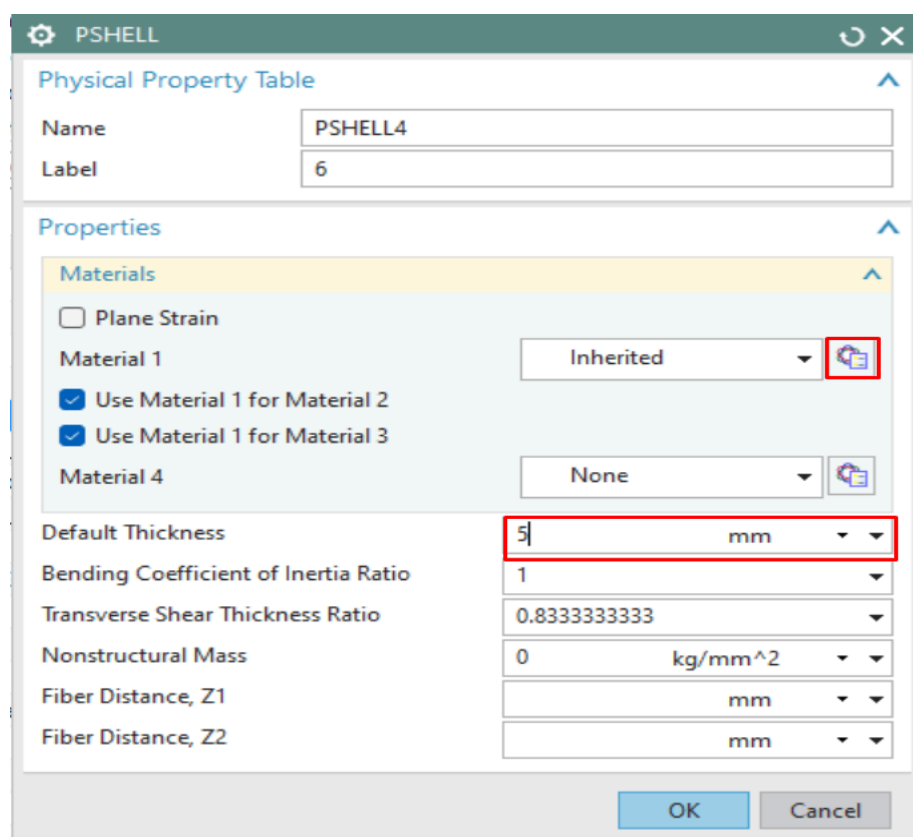


Figura 32: Carregamento de impacto: Passo 15.

Fonte: AUTOR

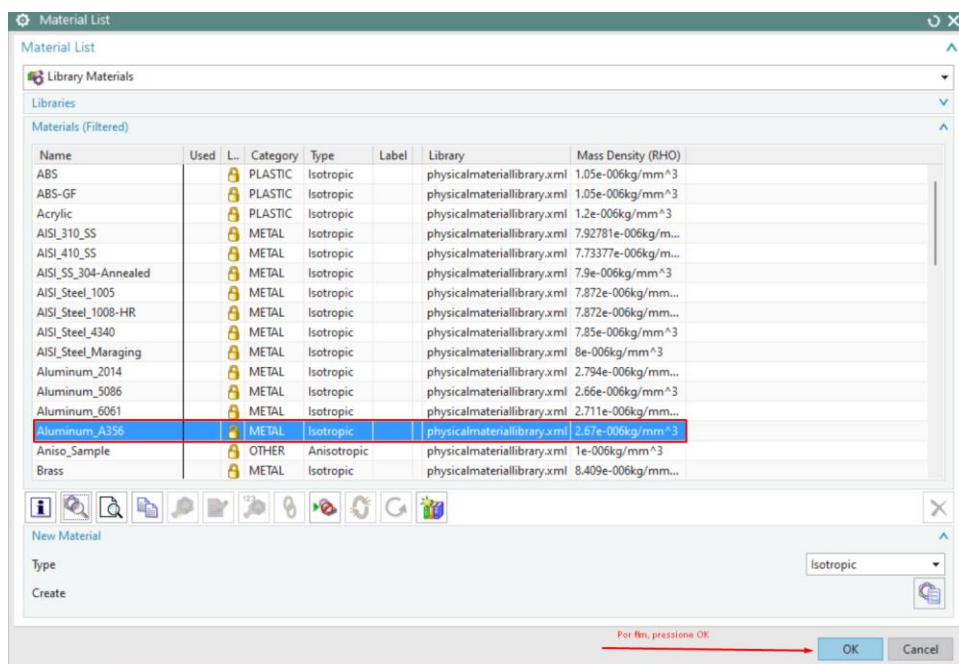


Figura 33 Carregamento de impacto: Passo 16.
Fonte: AUTOR

Em seguida, deve-se fazer um procedimento semelhante para o bloco:

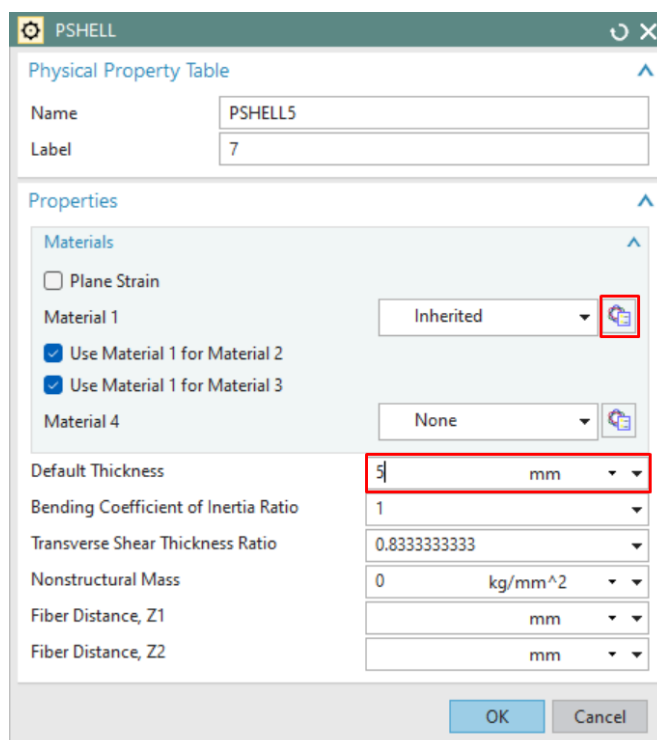


Figura 34: Carregamento de impacto: Passo 17.
Fonte: AUTOR

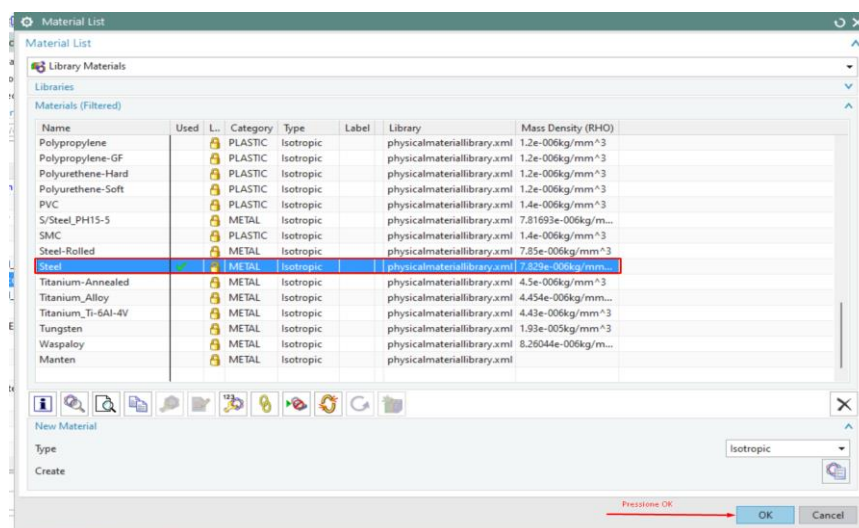


Figura 35: Carregamento de impacto: Passo 18.
Fonte: AUTOR

Neste ponto tem-se configurado tudo o que é necessário no arquivo .fem . Agora, deve-se Salvar (canto superior esquerdo ) e prosseguir para o arquivo de simulação .sim, como mostra a Figura 36.

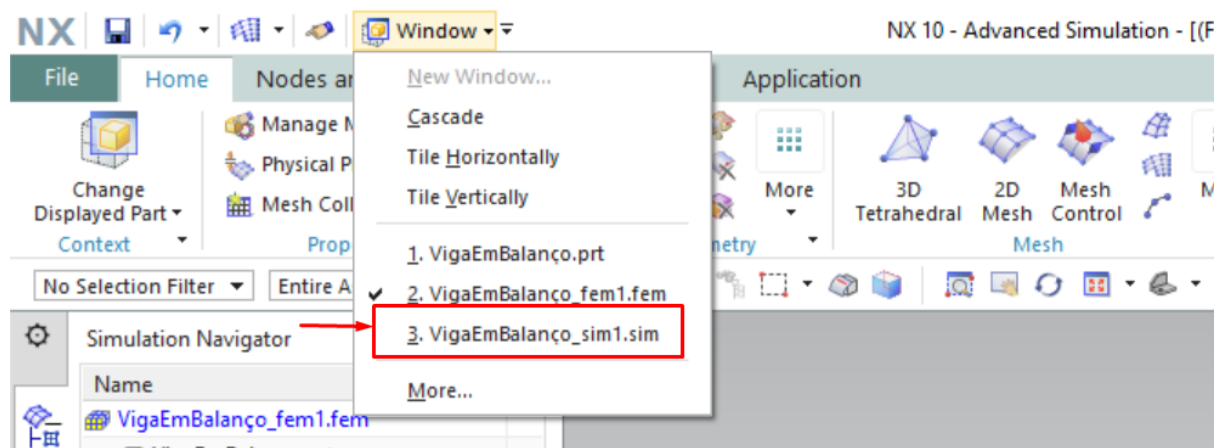


Figura 36: Carregamento de impacto: Passo 19.
Fonte: AUTOR

Já no ambiente de simulação, deve ser feita a configuração das cargas, das restrições, e o contato entre o bloco e a viga e, por fim, a solução. Como mencionado na seção (5.2) a carga no bloco é de 750 N. Para adicionar essa carga na solução do sistema proposto deve-se seguir o procedimento apresentado nas Figuras 37 e 38.

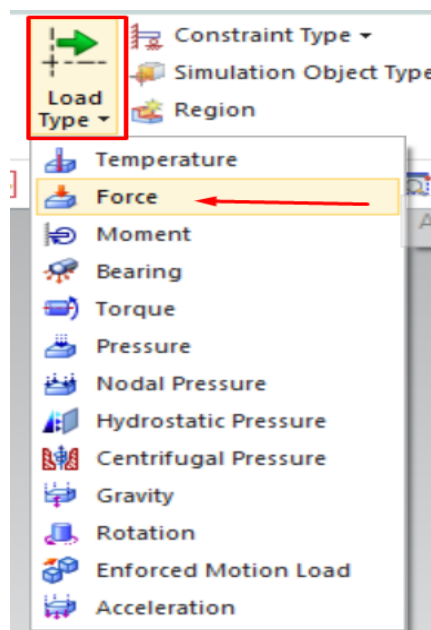


Figura 37: Carregamento de impacto: Passo 20.
Fonte: AUTOR

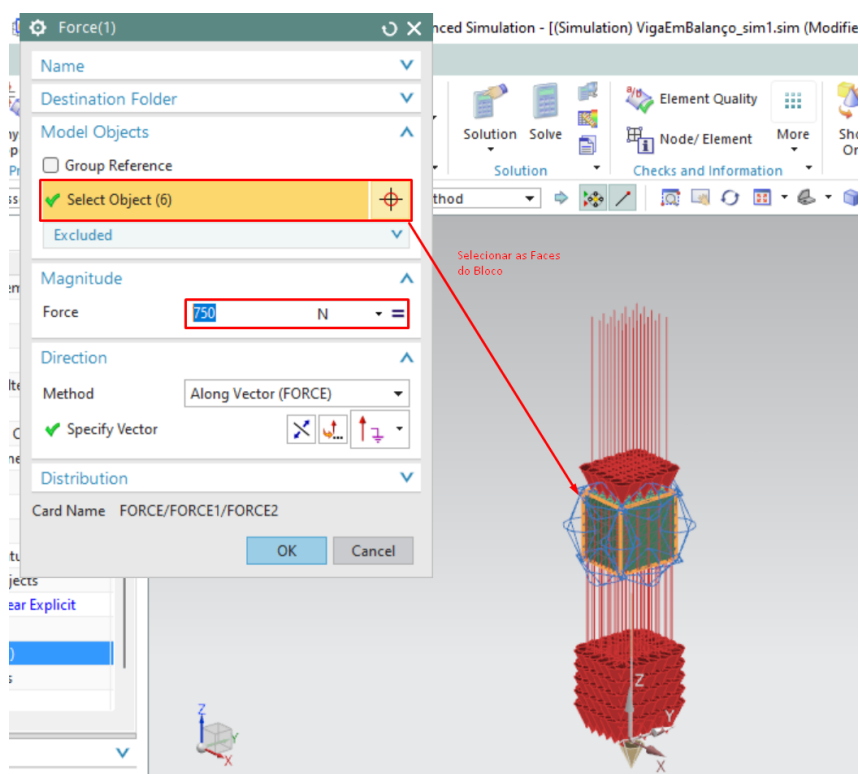


Figura 38: Carregamento de impacto: Passo 21.
Fonte: AUTOR

Na seção '**Direction**' da Figura 39 deve-se selecionar o eixo que é normal a face inferior do bloco:

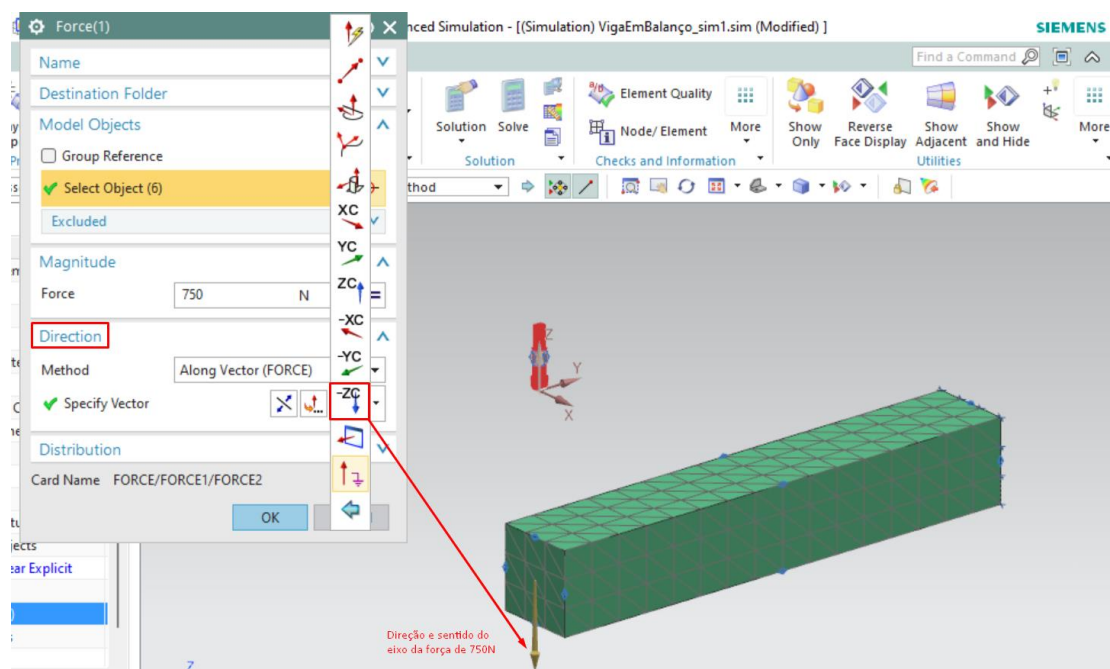


Figura 39: Carregamento de impacto: Passo 22.

Fonte: AUTOR

Dessa forma a força aplicada movimenta o bloco na direção da viga para que haja o impacto entre eles. Logo após isso, deve-se aplicar a restrição de movimento (engastar a viga na extremidade oposta a do bloco) como mostram as Figuras 40 e 41.

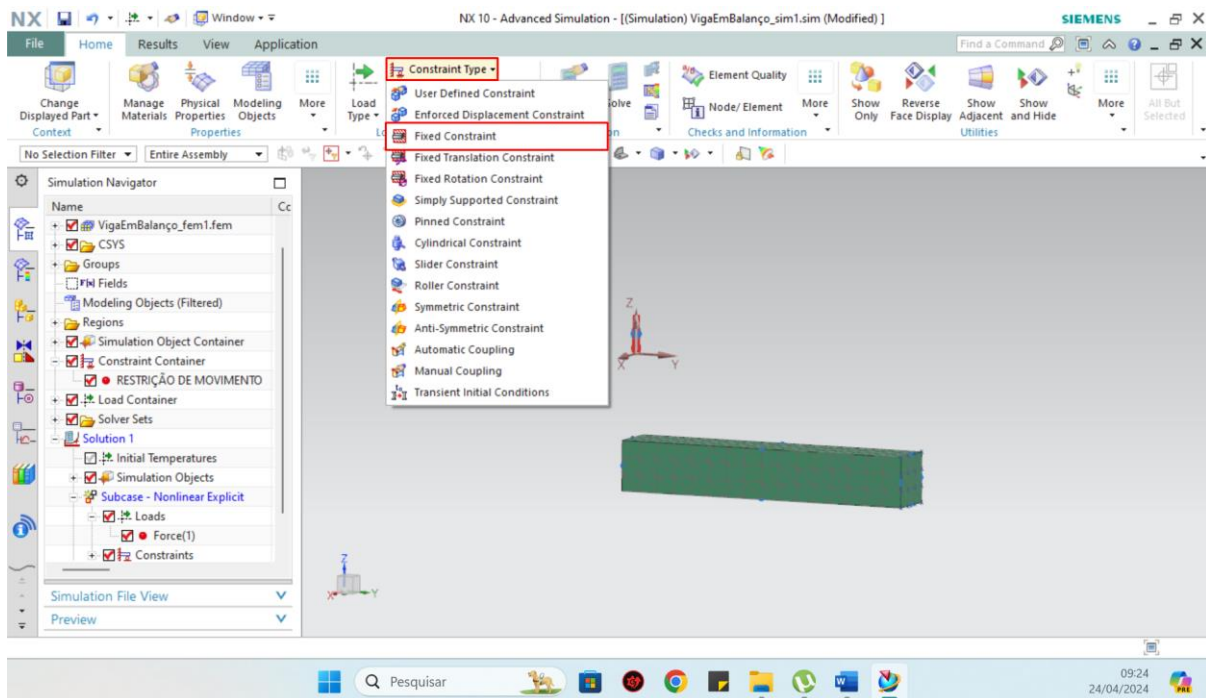


Figura 40: Carregamento de impacto: Passo 23.
Fonte: AUTOR

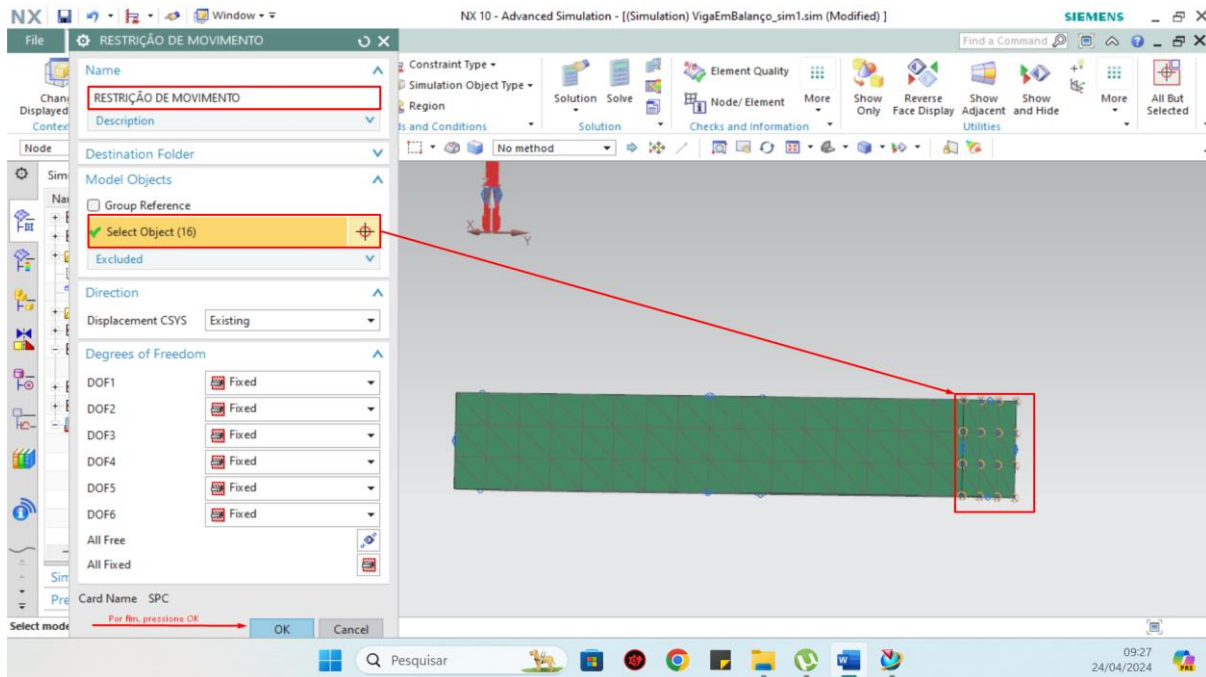


Figura 41: Carregamento de impacto: Passo 24.
Fonte: AUTOR

Neste ponto, com a carga e a restrição de movimento aplicados, deve-se configurar o contato entre o bloco e a viga. Nesse caso, para a realização correta deste procedimento deve-se seguir os passos apresentados nas Figuras 42 a 44.

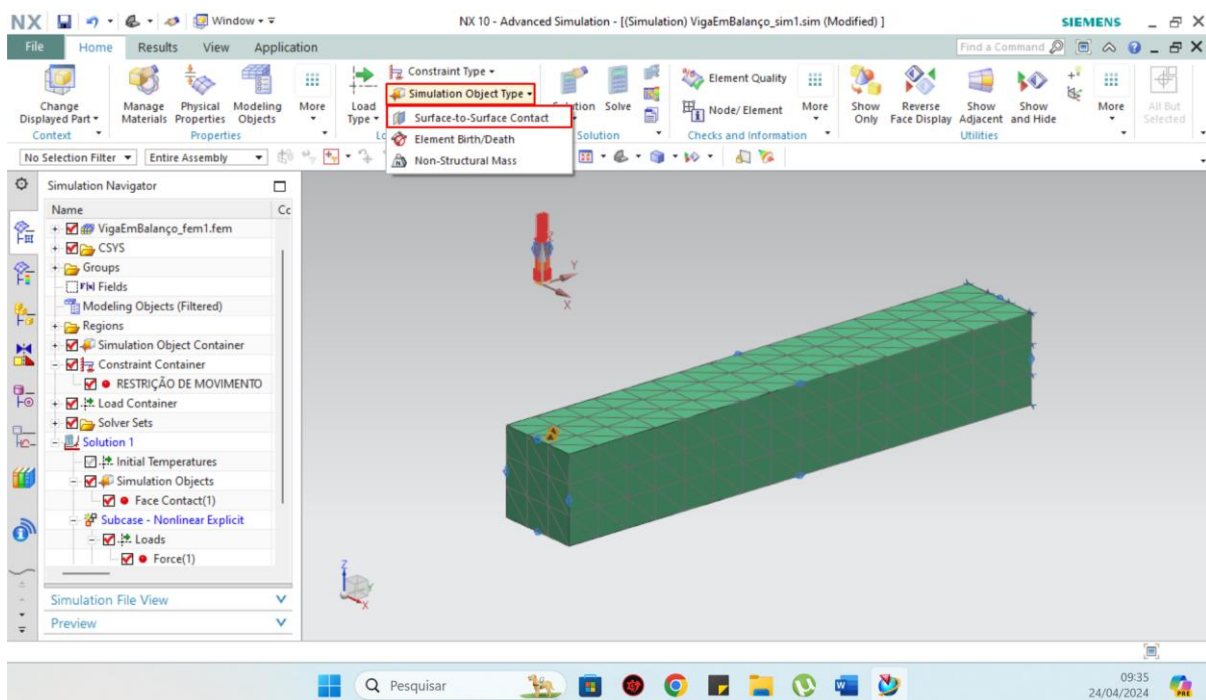


Figura 42: Carregamento de impacto: Passo 25.
Fonte: AUTOR

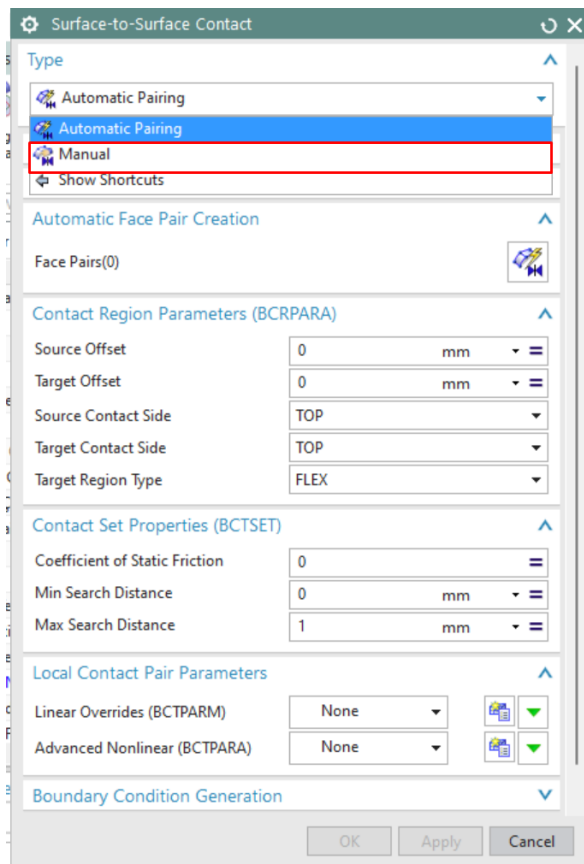


Figura 43: Carregamento de impacto: Passo 26.
Fonte: AUTOR

Em “**Source Region** “ prosseguir para:

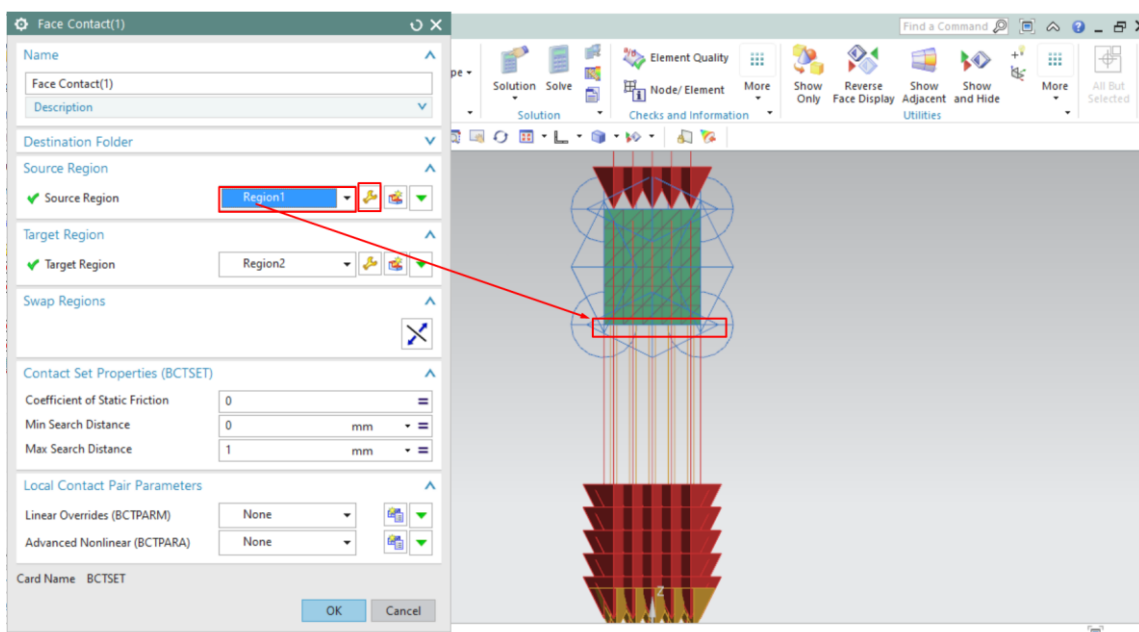


Figura 44: Carregamento de impacto: Passo 27.
Fonte: AUTOR

E em seguida, selecionar os nós da face inferior do bloco, como mostra a Figura 45.

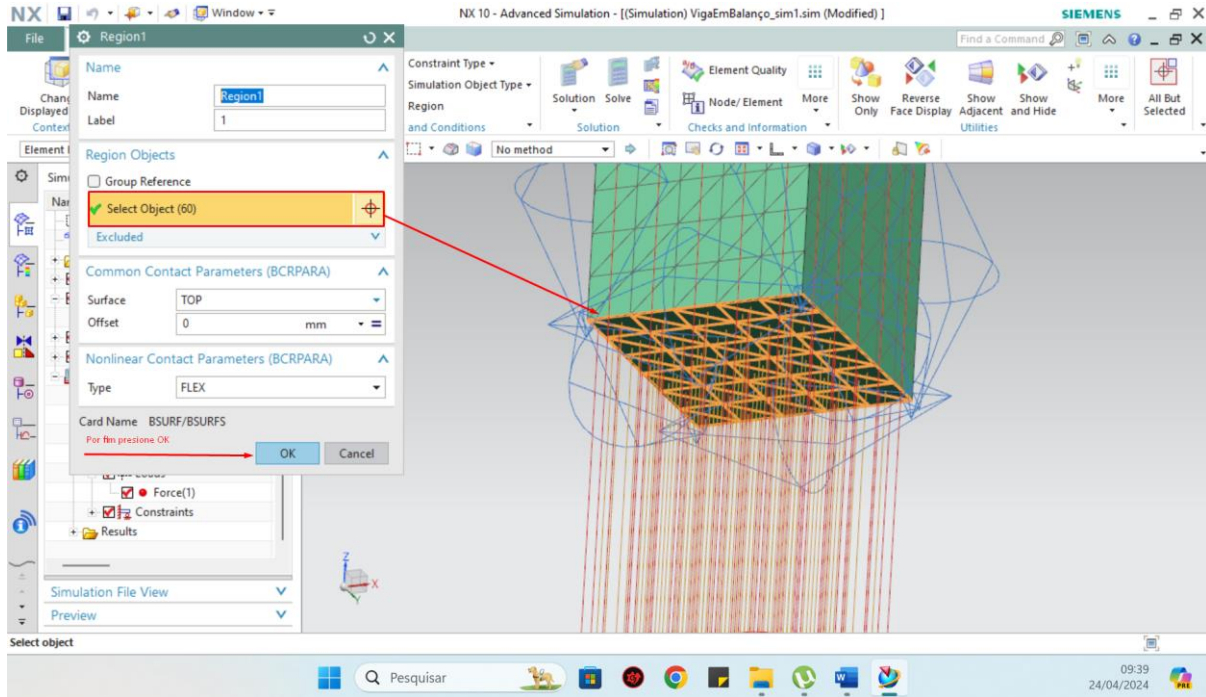


Figura 45: Carregamento de impacto: Passo 28.
Fonte: AUTOR

Logo após pressionar “OK” como indica a Figura 45, deve-se selecionar o item “Region 2” para, semelhantemente ao procedimento realizado na Figura 45, configurar o contato com os nós da viga que foram destacados conforme Figura 46.

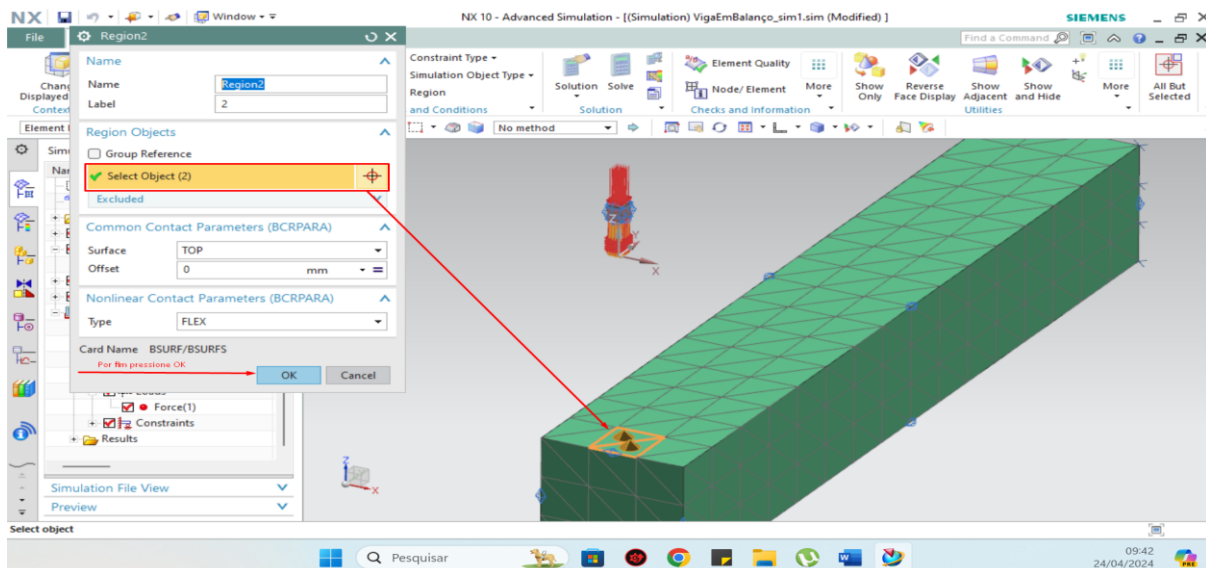


Figura 46: Carregamento de impacto: Passo 29.
Fonte: AUTOR

E “OK” novamente para fechar a janela de configuração do contato. Nesta fase, deve-se ainda configurar a solução. Dessa forma, prosseguir conforme as Figuras 47 e 48.

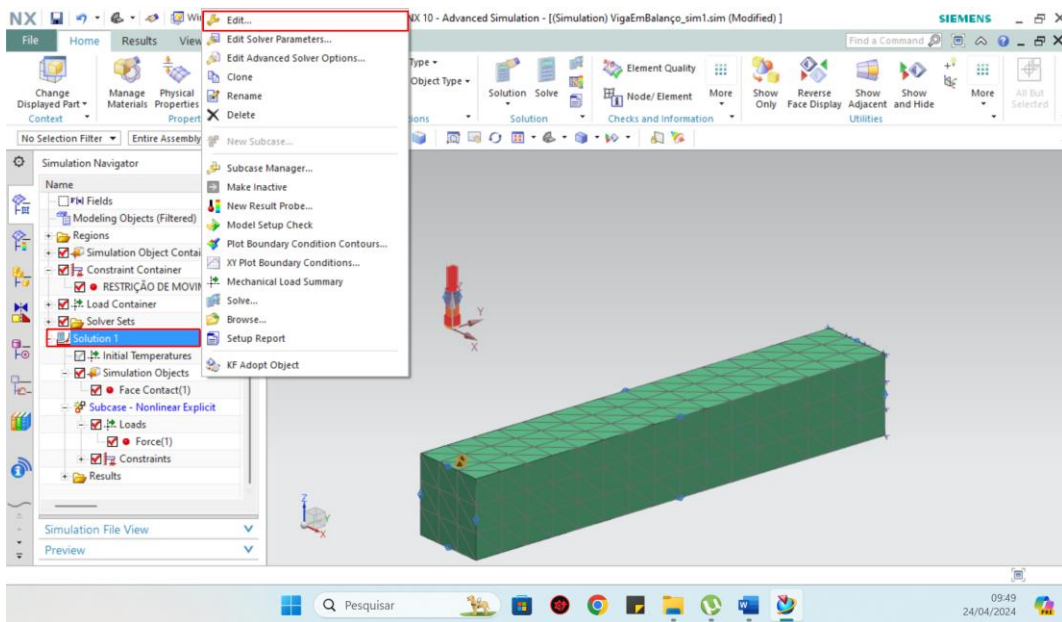


Figura 47: Carregamento de impacto: Passo 30.
Fonte: AUTOR

E logo após:

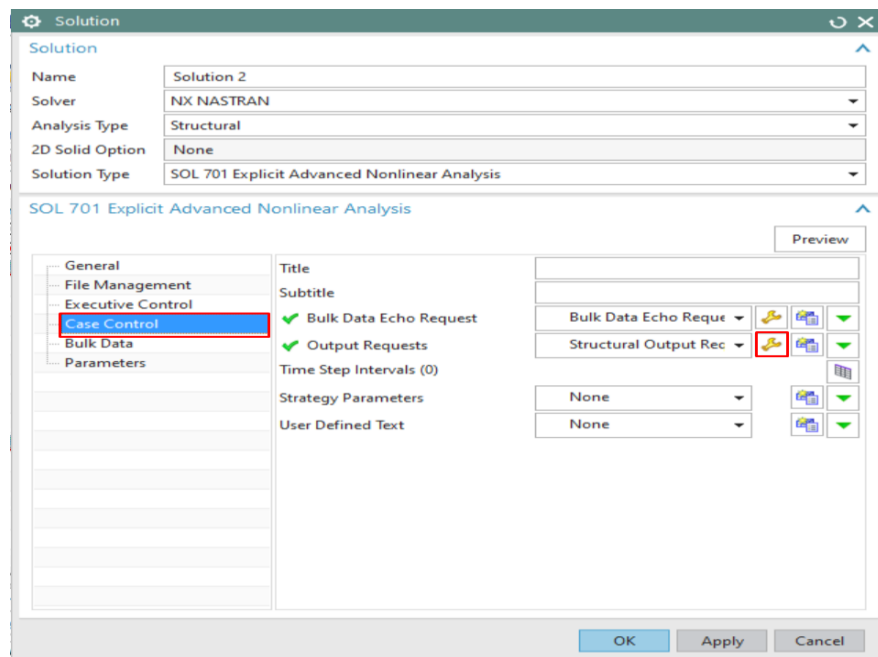


Figura 48: Carregamento de impacto: Passo 31.

Fonte: AUTOR

Os “**Output Requests**” representam os resultados de interesse que o engenheiro quer obter nessa análise. Neste caso, o problema proposto pede o deslocamento na extremidade livre da viga, dessa forma deve-se habilitar e configurar a aba “**Displacement**”, como mostra a Figura 49.

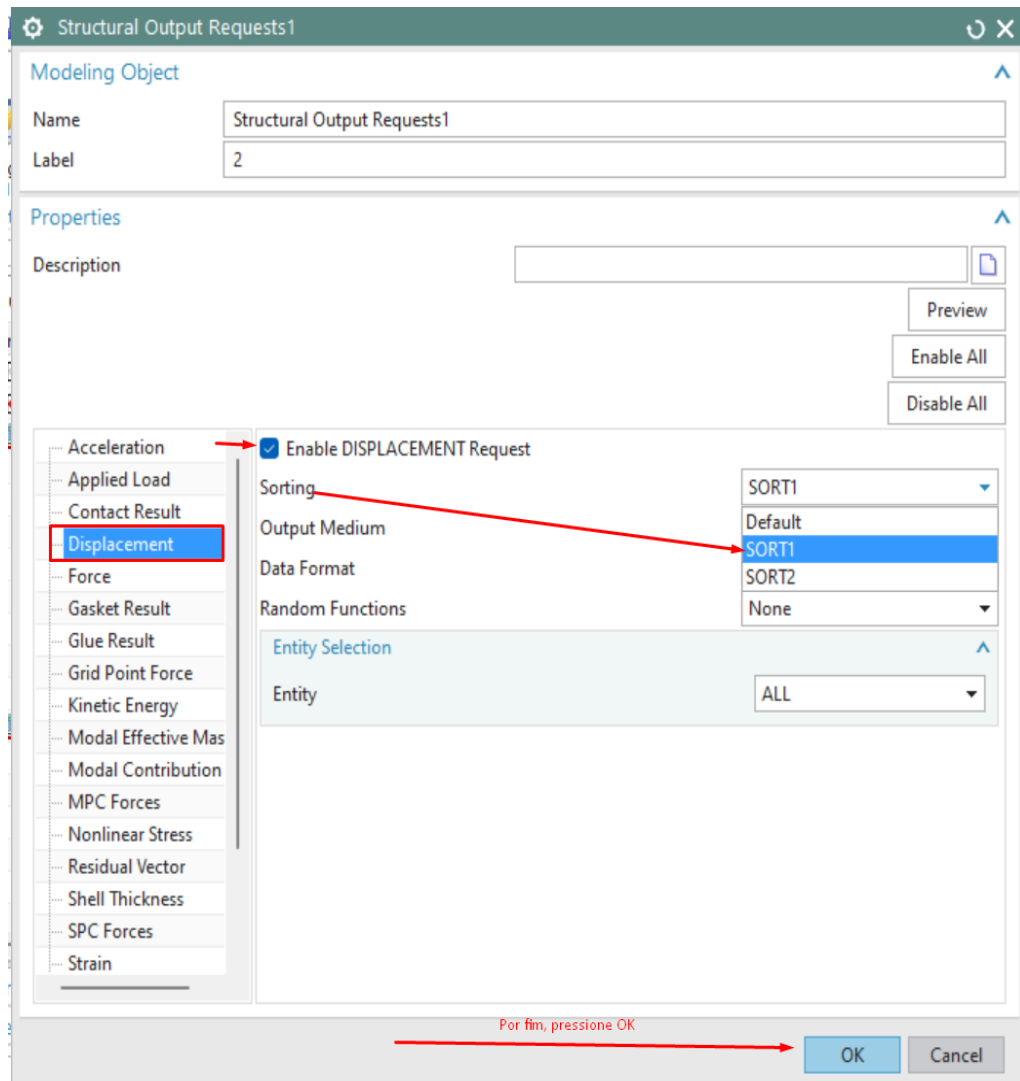


Figura 49: Carregamento de impacto: Passo 32.

Fonte: AUTOR

Agora, na janela da Figura 50, prosseguir para a aba “**Strategy Parameters**”. Nesta janela (Figura 50), estão todas as configurações possíveis de serem modificadas para que se obtenha êxito na convergência da solução. Inicialmente, deve-se prosseguir a aba “**SOL 701 Time Stepping**” e em seguida modificar o Parâmetro **XSTEP** como mostra a Figura 51.

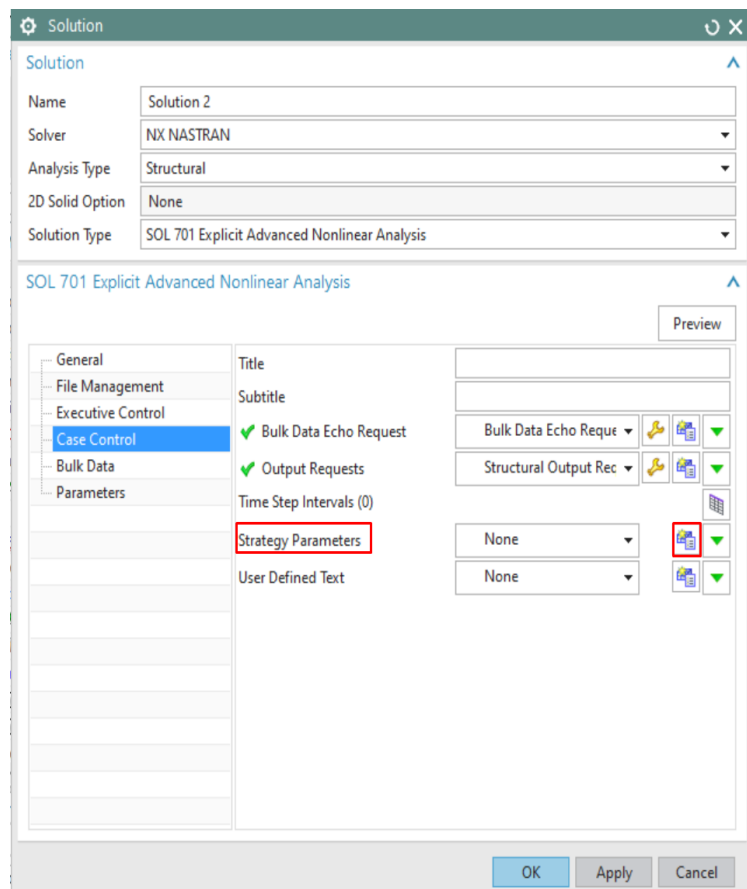


Figura 50: Carregamento de impacto: Passo 33.
Fonte: AUTOR

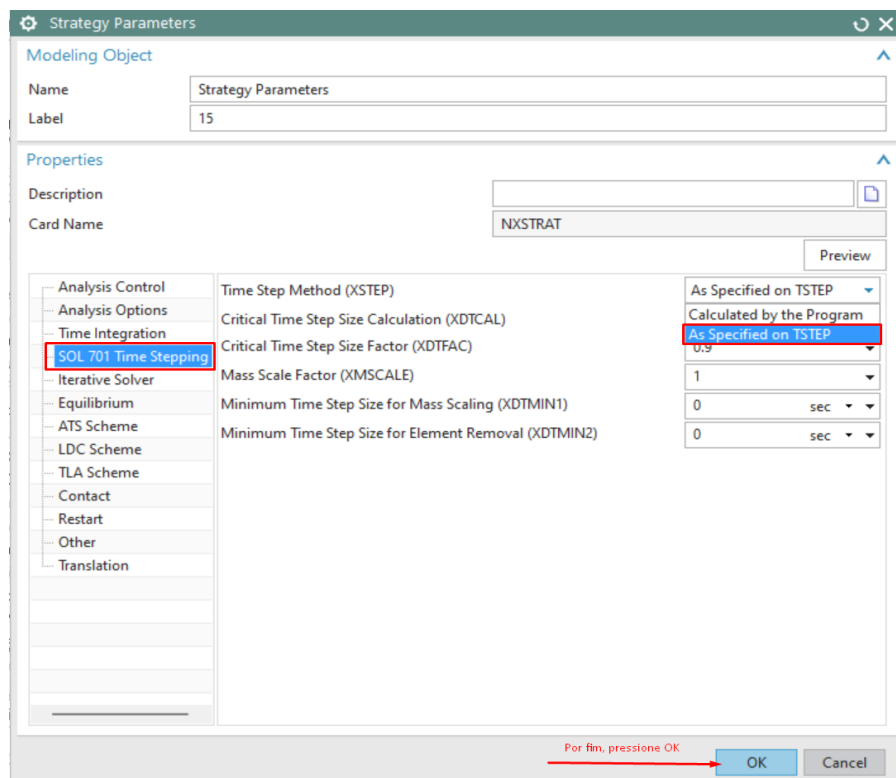


Figura 51: Carregamento de impacto: Passo 34.

Fonte: AUTOR

Esta modificação é responsável por indicar ao NX Siemens que o “Time Stepping” a ser usado nesta solução será aquele especificado manualmente pelo usuário. Sendo assim, deve-se agora seguir os procedimentos das Figura 52 e 53 para atribuir o valor de “Time Stepping” adequado.

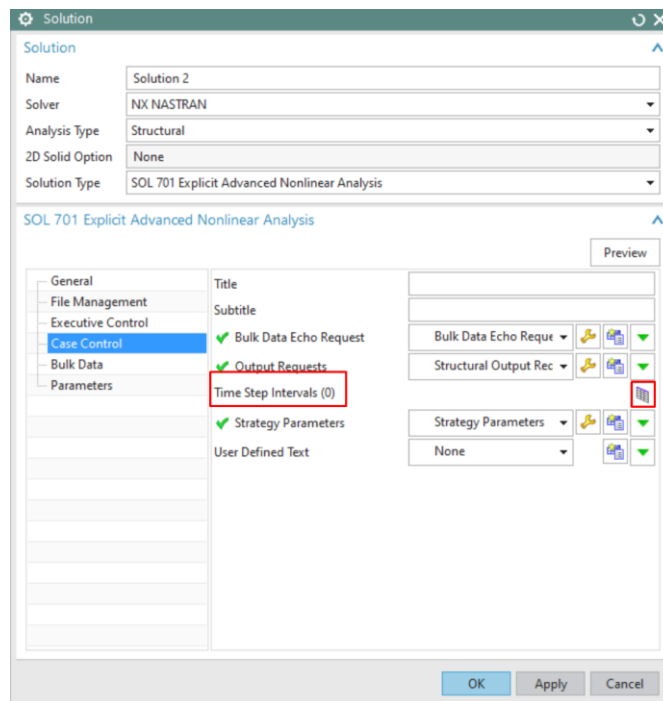


Figura 52: Carregamento de impacto: Passo 35.

Fonte: AUTOR

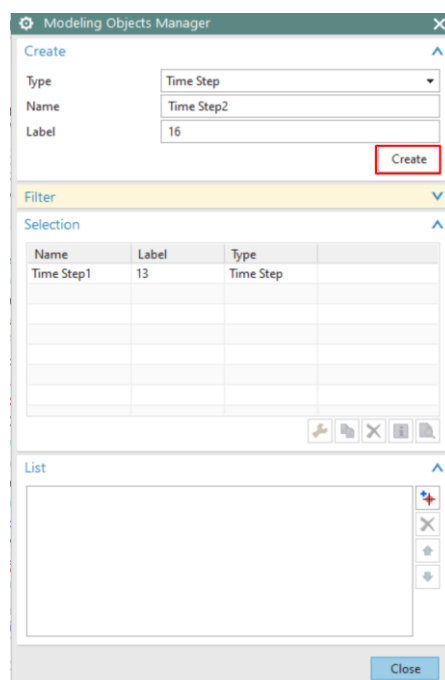


Figura 53: Carregamento de impacto: Passo 36.

Fonte: AUTOR

Neste ponto, é importante recorrer a cinemática do movimento para saber o tempo em que este impacto acontece. Precisa-se saber a velocidade inicial, e o tempo levado pelo bloco para atingir a viga. Sendo assim, usa-se a Equação (5.11).

$$v_f^2 = v_i^2 + 2g\Delta x \quad (5.11)$$

Onde:

v_f – velocidade final (imediatamente antes do impacto);

v_i – velocidade inicial (é nula já que o corpo é solto do repouso);

g – valor da aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

Δx – distância da qual o bloco é solto (1 metro, fornecido no enunciado do problema).

Substituindo os valores, isolando o tempo t e o calculando em seguida, tem-se, através da Equação do movimento unidimensional retilíneo uniformemente variado (Eq (5.12)), logo:

$$\Delta x = \frac{gt^2}{2} \quad (5.12)$$

$$t = \sqrt{\frac{2\Delta x}{g}} = 0,45 \text{ s} \quad (5.13)$$

Com o resultado da Equação (5.13), deve-se agora aplicar o Critério de Courant seção (3.2.1) para determinar o “time step” através da Equação (3.14.2). Para isto, deve-se abrir o arquivo .fem e consultar o valor do tamanho da malha, do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade do alumínio, que foi o material atribuído a viga analisada. Para fazer este procedimento ver a Figura 54.

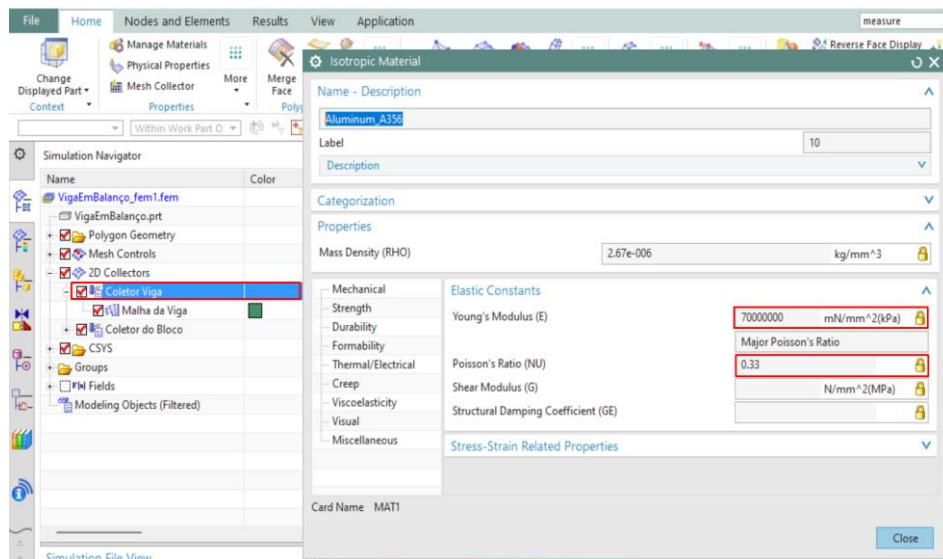


Figura 54: Carregamento de impacto: Passo 37.

Fonte: AUTOR

A malha da viga foi escolhida na Figura 26 e vale 190 mm. Desta forma, através dos valores consultados é possível calcular a velocidade do som c por meio da Equação (3.14.2):

$$c = \sqrt{\frac{70 \times 10^9 \text{ pa}}{2600(1-0.33^2)}} = 5497 \text{ m/s} \quad (3.14.2)$$

Levando este valor na Equação (3.14.1), tem-se:

$$t_{critico} = \frac{190 \times 10^{-3} \text{ m}}{5497 \text{ m/s}} = 3,45 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (3.14.1)$$

Como o critério estabelece que a relação $\Delta t < t_{critico}$ deve ser obedecida, é razoável desprezar os algarismos que acompanham a ordem de grandeza e atribuir o valor de Δt como 10 vezes menor do que $t_{critico}$, sendo assim, $\Delta t = 10^{-6}$ s. Por fim, com o resultado da Equação (5.13) (tempo físico em que acontece o problema) deve-se, para garantir que a análise aconteça, atribuir o “**Number of Time Steps**” ou (quantidade de “passos de tempo”) conforme Equação (5.14).

$$\text{Numero de Time Steps} = \frac{t}{\Delta t} = \frac{0,45}{10^{-6}} = 450000 \quad (5.14)$$

Sendo assim, continuando na tela da Figura 55 que surgiu após os procedimentos realizados conforme Figura 54.

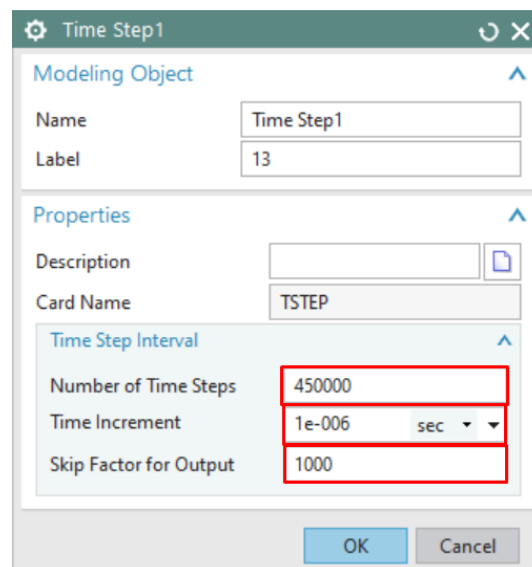


Figura 55: Carregamento de impacto: Passo 38.

Fonte: AUTOR

Na tela que irá aparecer, após pressionar “OK” na Figura 55, deve-se prosseguir da maneira mostrada na Figura 56.

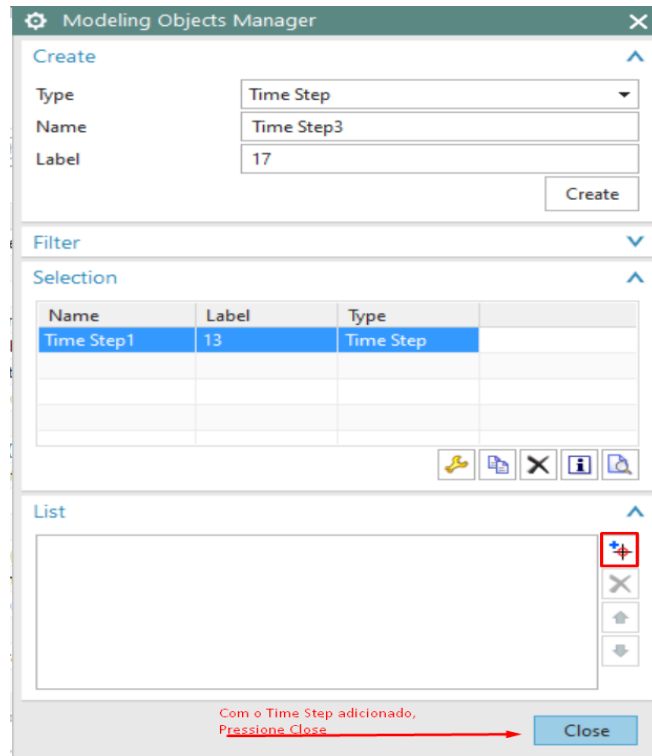


Figura 56: Carregamento de impacto: Passo 39.

Fonte: AUTOR

Por fim, antes de prosseguir para o processamento da solução, é importante salvar o arquivo no canto superior esquerdo . Após isso deve-se prosseguir como indica a Figura 57 para obter a solução do problema por meio do MEF.

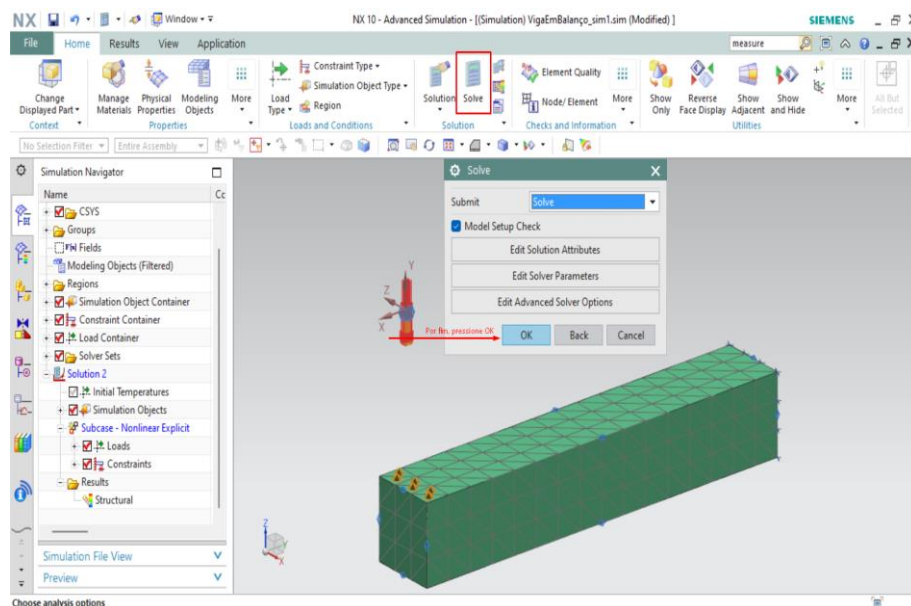


Figura 57: Carregamento de impacto: Passo 40.

Fonte: AUTOR

Após isso, deve-se esperar o Nx Siemens processar toda a solução. O tempo de espera depende da capacidade de processamento do computador usado. Ao fim do processamento uma tela com o nome “**Job Done**” no canto inferior esquerdo aparecerá indicando que a análise está pronta. Após isso, deve-se processar os resultados seguindo o indicado nas Figuras 58 a 60.

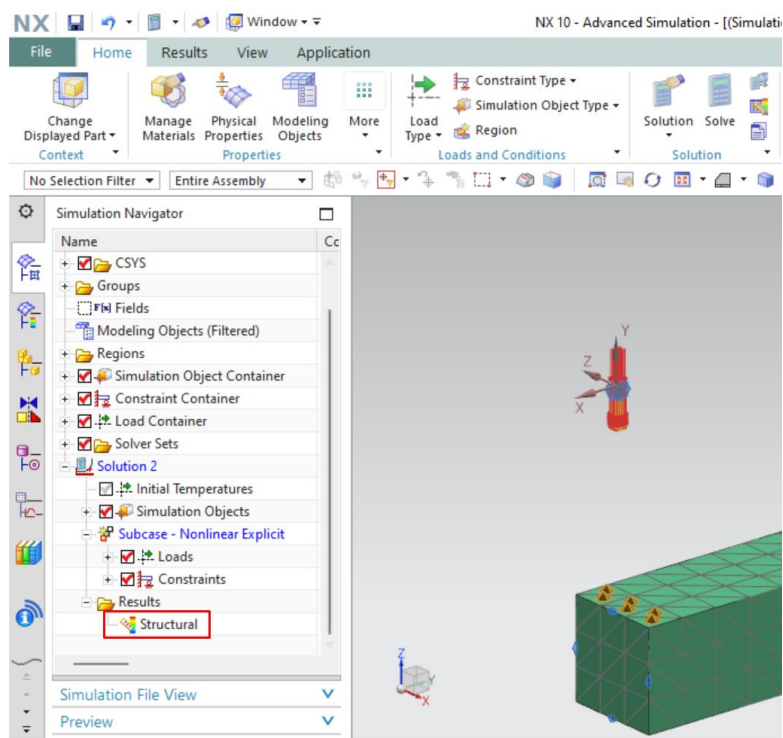


Figura 58: Carregamento de impacto: Passo 41.

Fonte: AUTOR

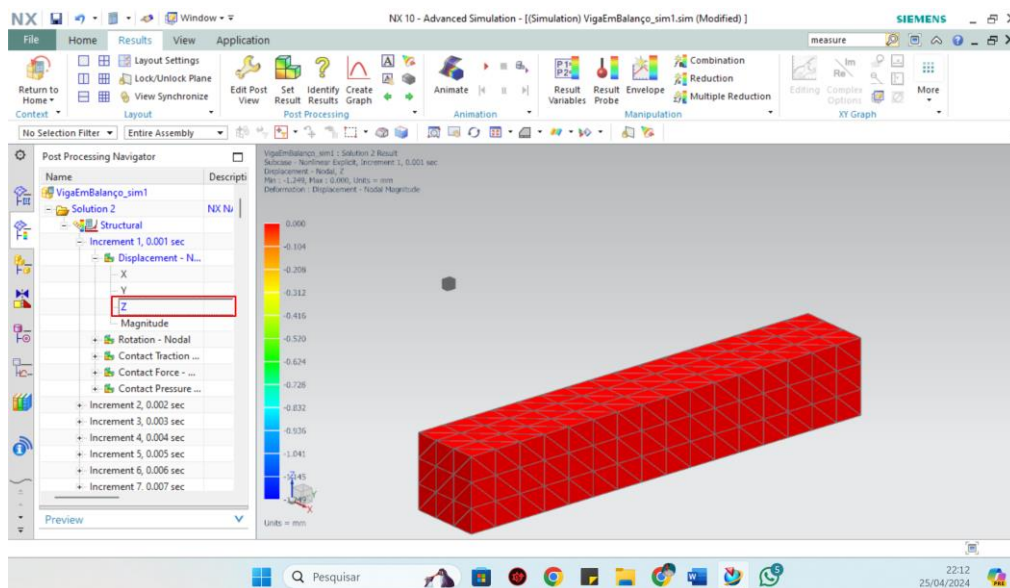


Figura 59: Carregamento de impacto: Passo 42.
Fonte: AUTOR

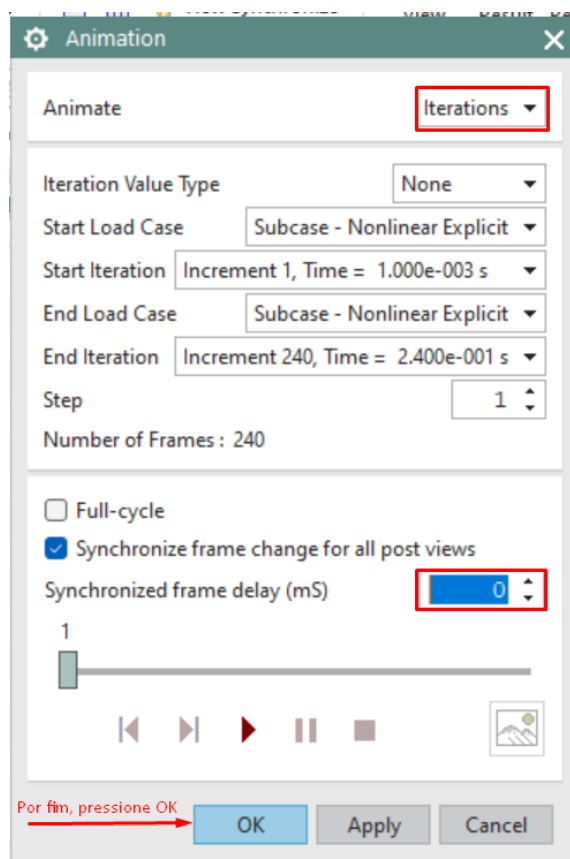


Figura 60: Carregamento de impacto: Passo 43.
Fonte: AUTOR

Neste ponto, para melhor visualização da deformação na viga deve-se prosseguir conforme a Figura 61.

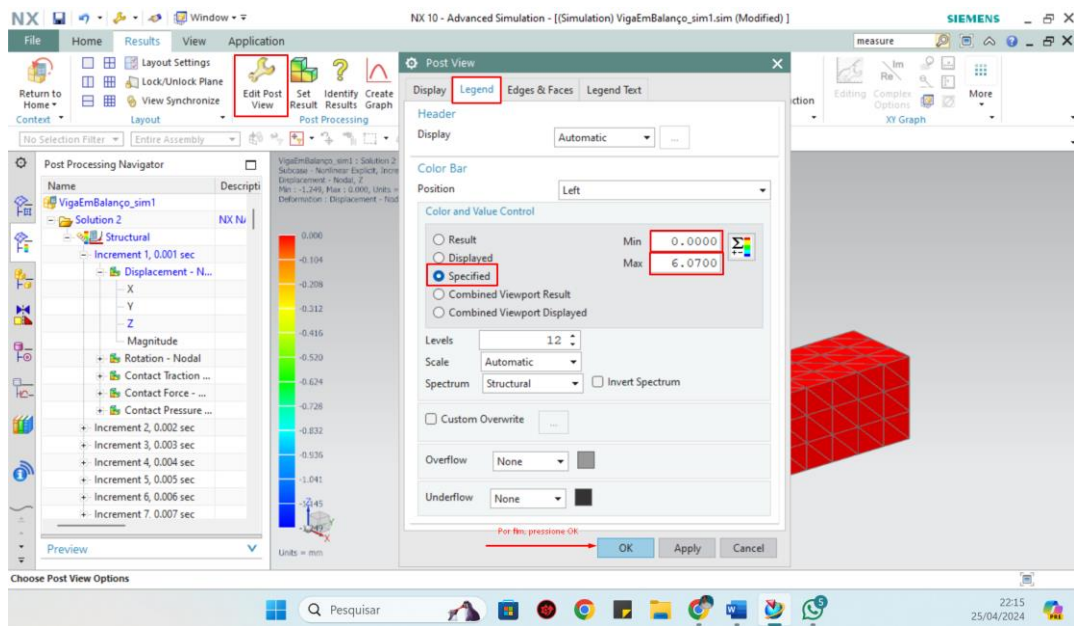


Figura 61: Carregamento de impacto: Passo 44.
Fonte: AUTOR

Por fim, ao selecionar “Animate” e “OK” em seguida, tem-se o resultado final como mostra a Figura 62.

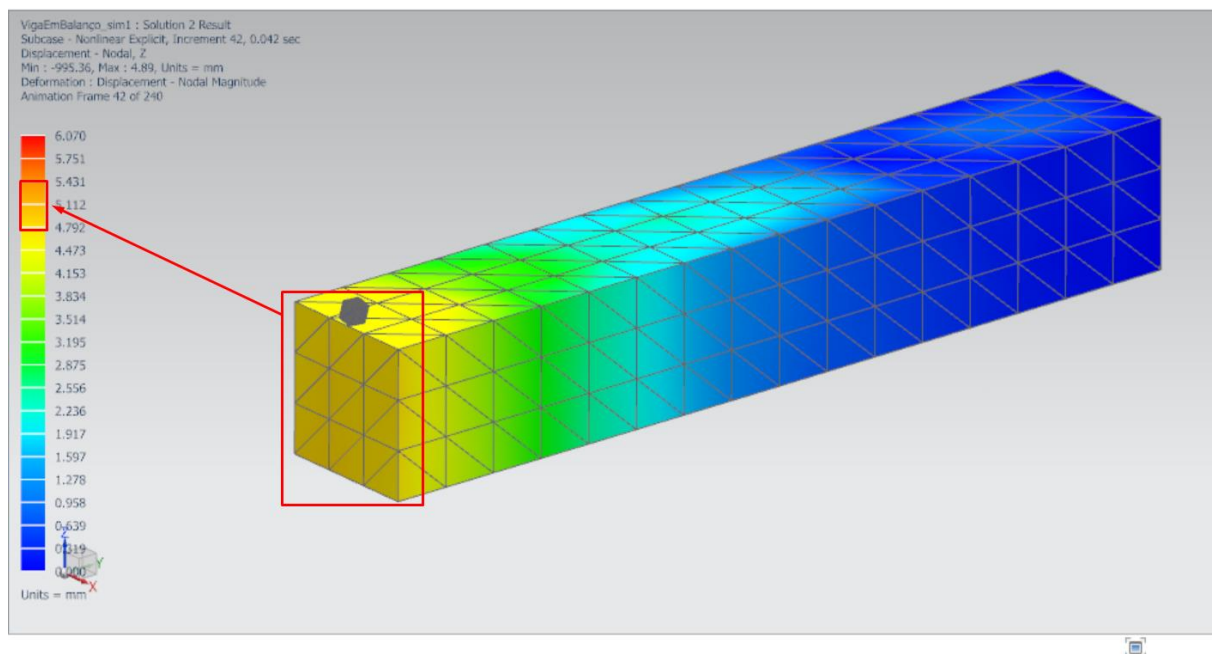


Figura 62: Carregamento de impacto: Resultado.
Fonte: AUTOR

O valor encontrado através do Nx Siemens para o deslocamento na extremidade livre da viga é de aproximadamente 5 mm. O valor calculado analiticamente, Eq (5.10) foi de

5,74 mm . Os resultados encontrados são próximos e na seção (6) deste trabalho serão discutidas as possíveis causas para explicar o porquê destes valores não serem exatamente iguais.

5.3 ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO FORÇADA NA CAIXA DE TRANSMISSÃO DE UM AUTOMÓVEL

Neste último problema, será resolvido um exercício da referência (INCROPERA, 2019). Este caso trata-se de uma caixa de transmissão de um automóvel de lados $W = 0,30$ m que recebe uma potência de eixo de $P = 150$ hp do motor do carro. Levando em conta que a eficiência da transmissão é de $\eta = 0,93$ é que a energia dissipada dará-se exclusivamente na forma de calor, qual a temperatura superficial da caixa de transmissão para quando o ar que escoar sobre ela tem uma temperatura $T_{\infty} = 30^{\circ}\text{C}$ e um coeficiente convectivo de $h = 200$ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. O esquema do sistema a ser analisado é mostrado na Figura 63.

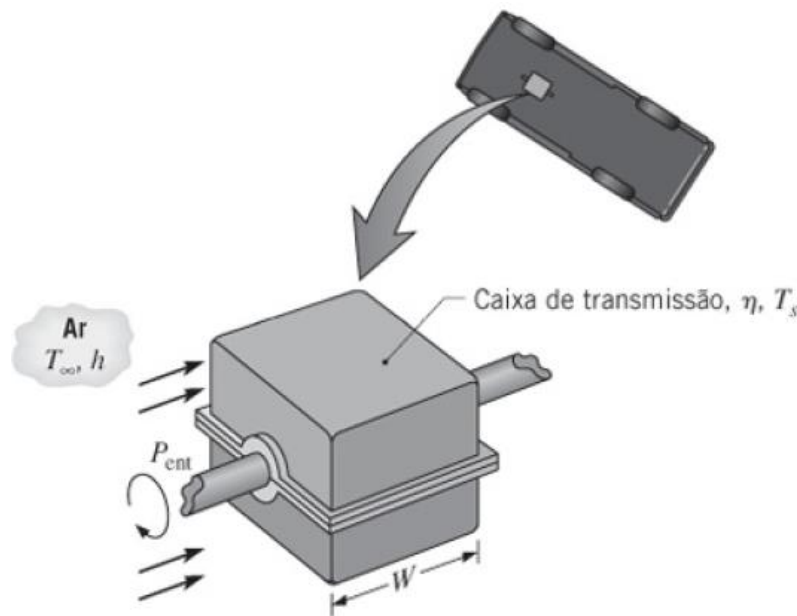


Figura 63: Caixa de transmissão de um automóvel.
Fonte: Incropera, 8ª edição

5.3.1 ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO FORÇADA NA CAIXA DE TRANSMISSÃO DE UM AUTOMÓVEL – SOLUÇÃO ANALÍTICA

Para resolver este problema de maneira analítica deve-se fazer algumas considerações. A primeira é que o escoamento do ar dar-se em regime permanente, ou seja, a quantidade em

fluxo de massa avaliada no tempo é sempre a mesma. Além disso, deve-se considerar que o coeficiente convectivo h e a temperatura da superfície da caixa de transmissão são constantes. E, por fim, que a transmissão de energia por radiação é suficientemente pequena para ser desprezada. Sendo assim, a partir da Equação (3.19).

$$q = hA (Ts - T_{\infty}) = 6hW^2(Ts - T_{\infty}) \quad (3.19)$$

Onde a energia perdida na forma de calor é dada pela Eq. (5.15).

$$q = P_{entra} - P_{sai} = P_{entra} (1 - \varphi) = \frac{150hp \times 746W}{hp} 0.07 = 7833 W \quad (5.15)$$

Dessa forma, esta quantidade de calor “q” é aquele que será retirado da superfície da caixa de transmissão pelo ar. Sendo assim, substituindo “q” e os valores de W , h e T_{∞} fornecidos no enunciado em (5.3) e isolando o valor da temperatura na superfície T_s , tem-se:

$$T_s = T_{\infty} + \frac{q}{6hW^2} = 30^{\circ} C + \frac{7833 W}{6 \times 200 W / m^2 K \times (0.3m)^2} = 102.5^{\circ} C \quad (5.16)$$

O valor encontrado na Equação (5.16) é o resultado solicitado no enunciado do problema.

5.3.2 – ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO FORÇADA NA CAIXA DE TRANSMISSÃO DE UM AUTOMÓVEL - ATRAVÉS DO MEF NO NX SIEMENS

Agora, será o problema será resolvido através de simulação pelo método dos elementos finitos no NX Siemens. Inicialmente, deve-se modelar um bloco com as mesmas dimensões (0.3 m de lado), como mostra Figura 64.

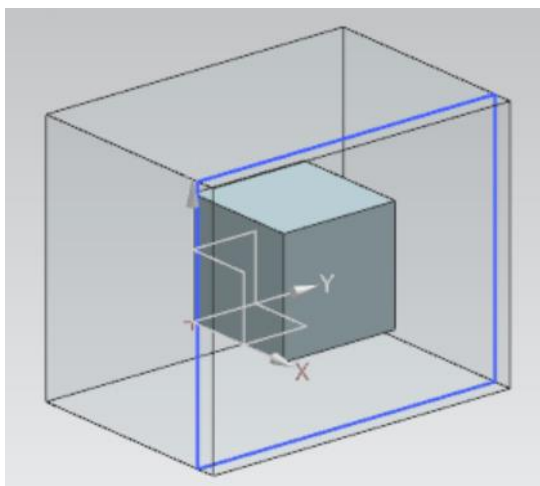


Figura 64: modelo 3D de caixa de transmissão.
Fonte: AUTOR

Para fazer isto deve-se prosseguir como mostram as Figuras 65 e 66:

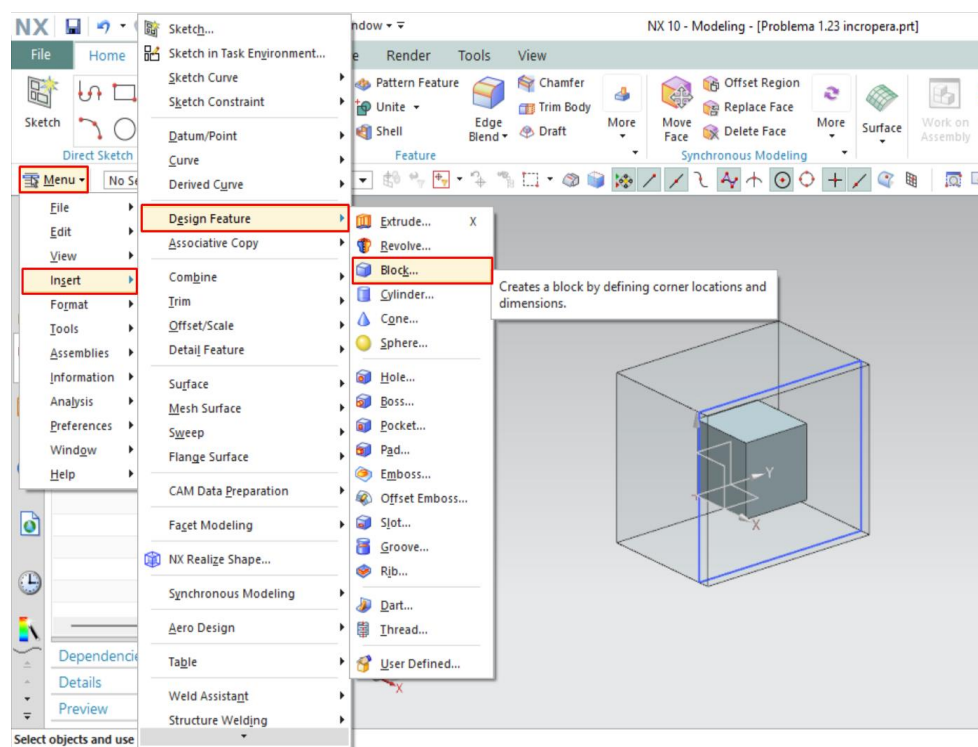


Figura 65: Criação do bloco que representa a caixa de transmissão.
Fonte: AUTOR

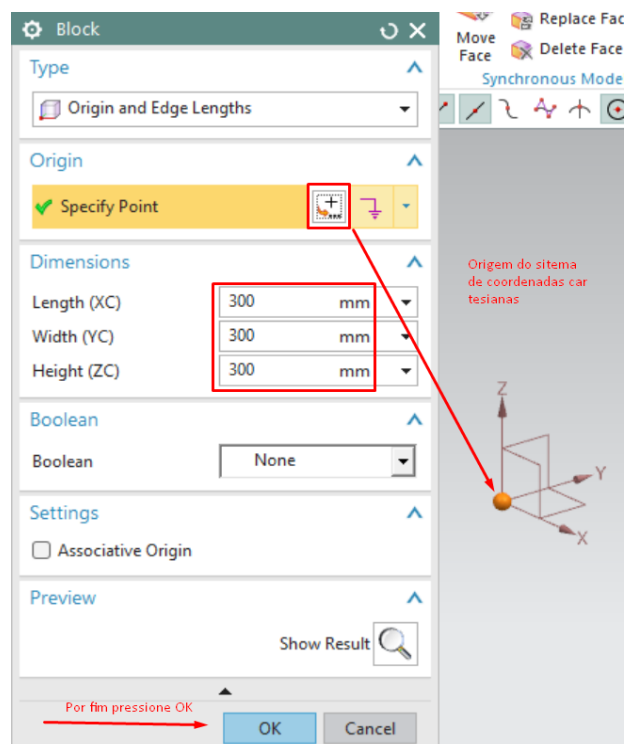


Figura 66: Parâmetros para criação do bloco que representa a caixa de transmissão.
Fonte: AUTOR

Com o modelo 3D criado deve-se prosseguir para a aba **Application** > **Advanced** para serem criados os arquivos .fem e .sim, como indicam as Figuras 67 e 68.

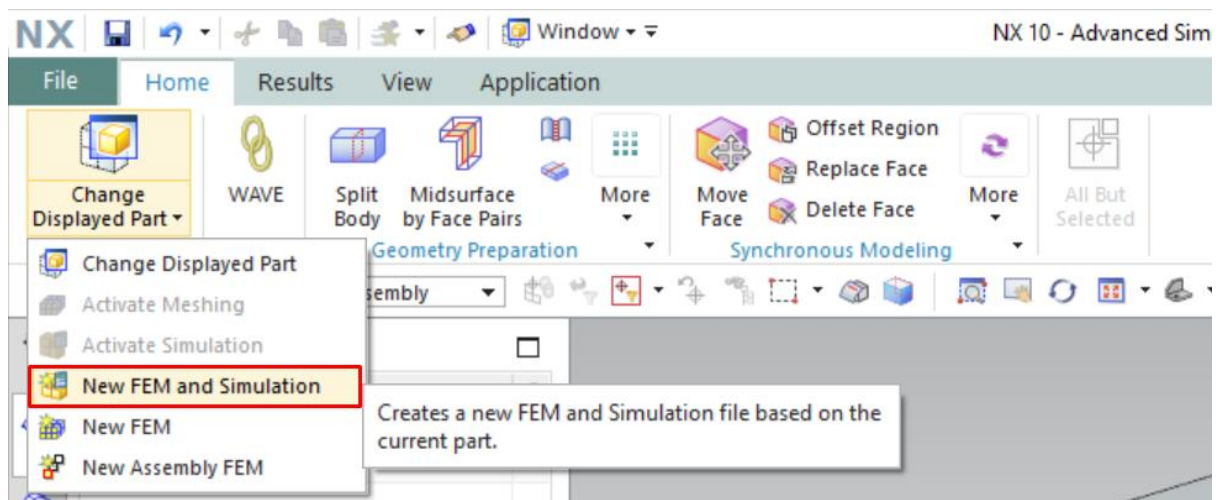


Figura 67: Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo1.
Fonte: AUTOR

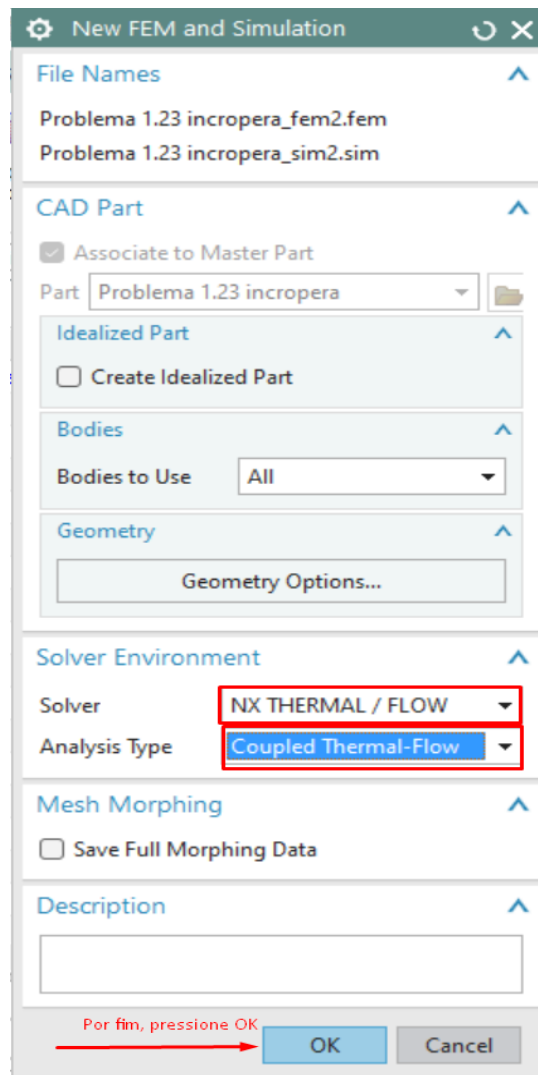


Figura 68: Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 2.
Fonte: AUTOR

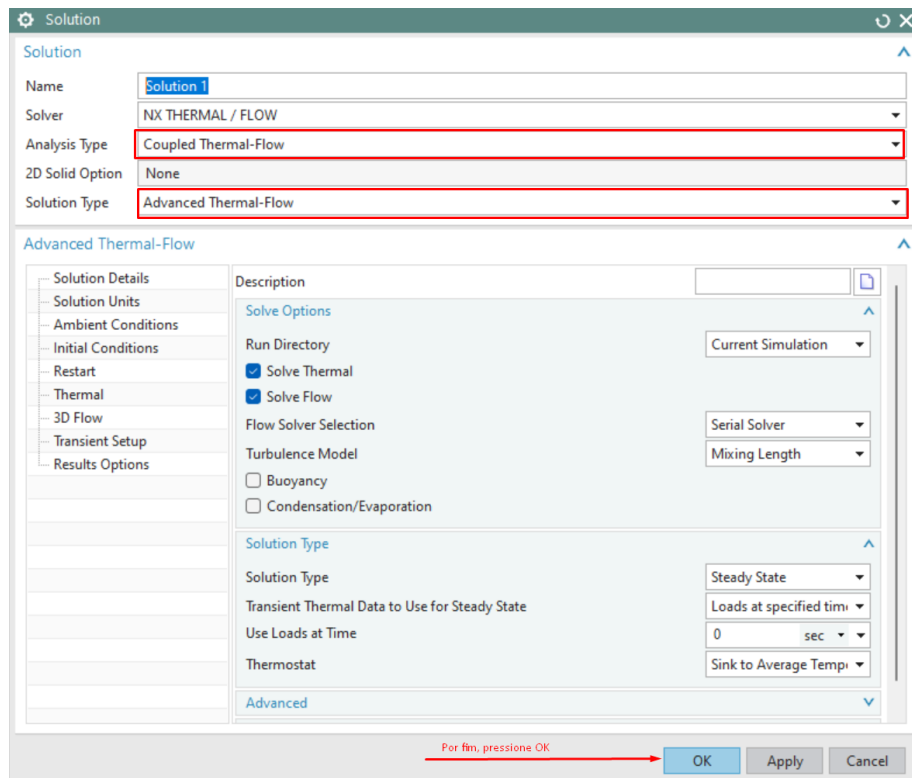


Figura 69: Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 3.
Fonte: AUTOR

Neste ponto, deve-se prosseguir para a criação da malha como é mostrado na Figura 70.

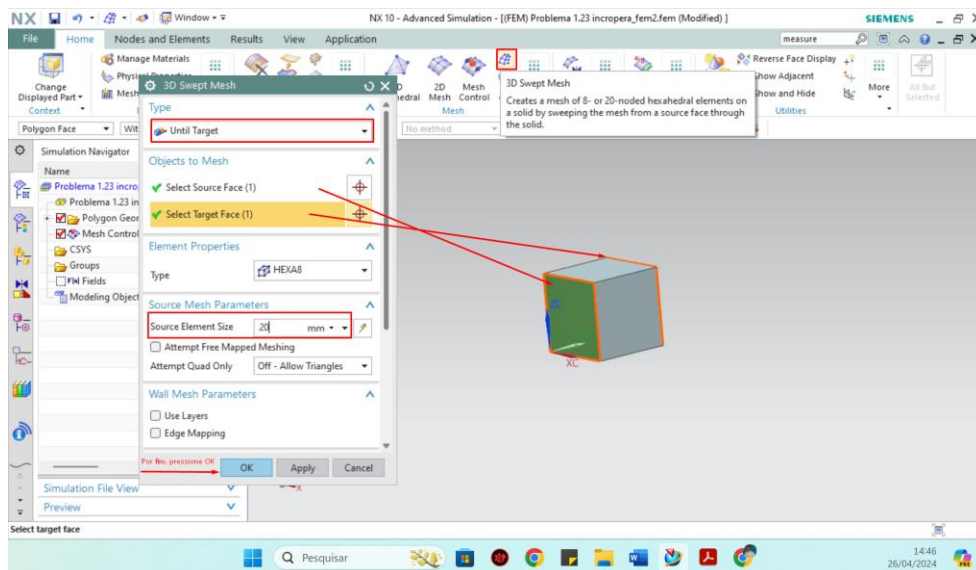


Figura 70: : Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 4.
Fonte: AUTOR

Agora, deve-se prosseguir para o arquivo .sim através da aba  **Window** no canto superior esquerdo da tela. Neste ponto, serão aplicadas as cargas térmicas e a solução será configurada. Logo, deve-se prosseguir como mostram as Figura 71 e 72.

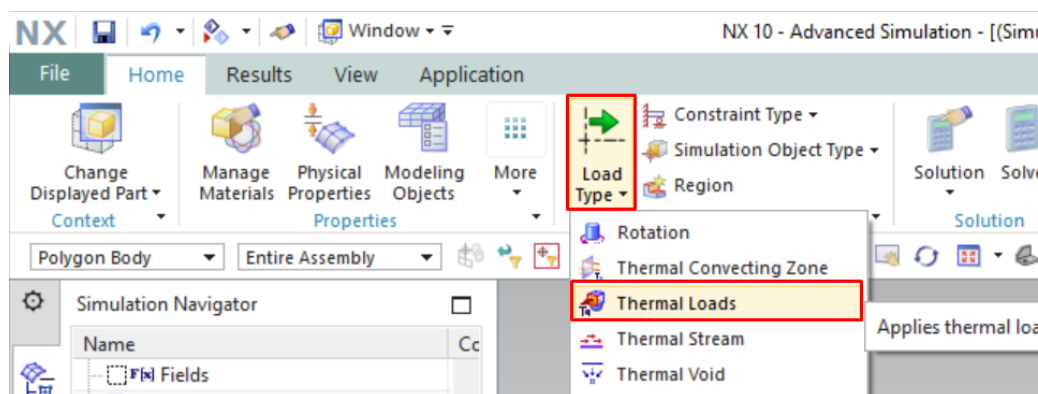


Figura 71: : Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 6.
Fonte: AUTOR

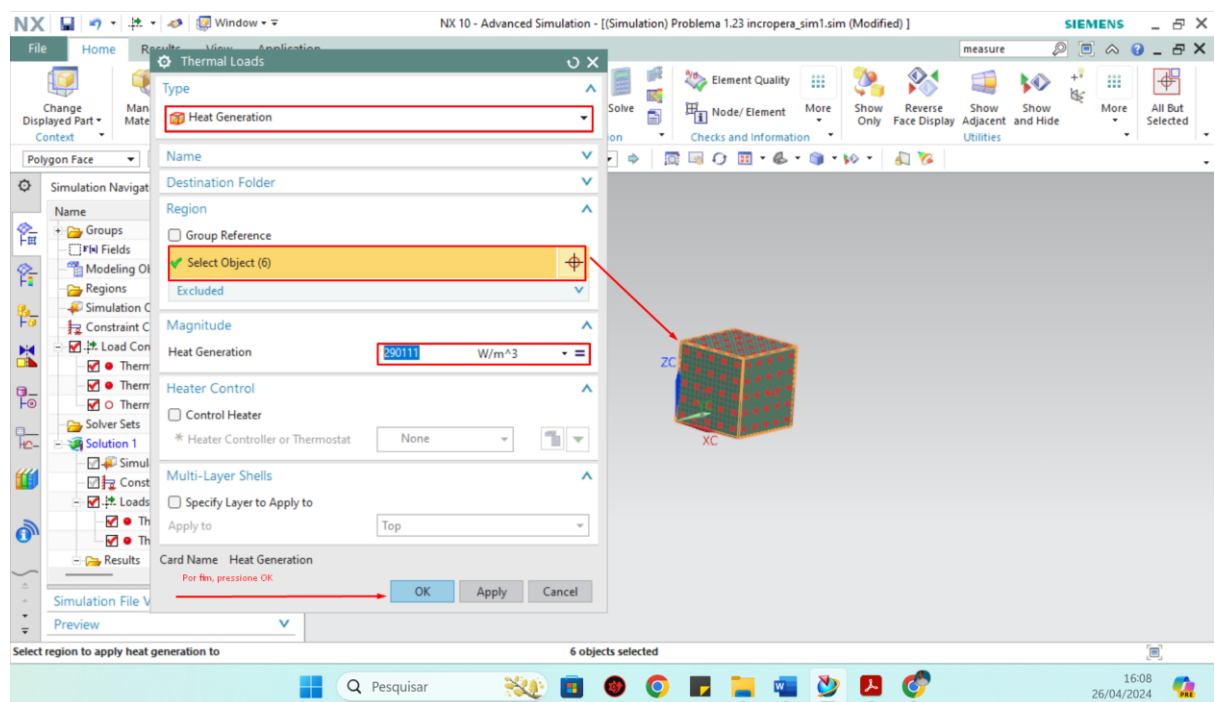


Figura 72: : Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 7.
Fonte: AUTOR

O valor de 290111 W/m^3 de calor gerado corresponde aos 7833 W de calor gerados pela caixa de transmissão distribuídos no volume de 0.3 m^3 , ou seja:

$$\text{Calor gerado} = \frac{7833 \text{ W}}{0.027 \text{ m}^3} = 290111 \text{ W/m}^3 \quad (5.17)$$

Logo após isso, deve-se aplicar uma carga conforme Figuras 73 a 76 que simulam as condições do ambiente em torno da caixa de transmissão.

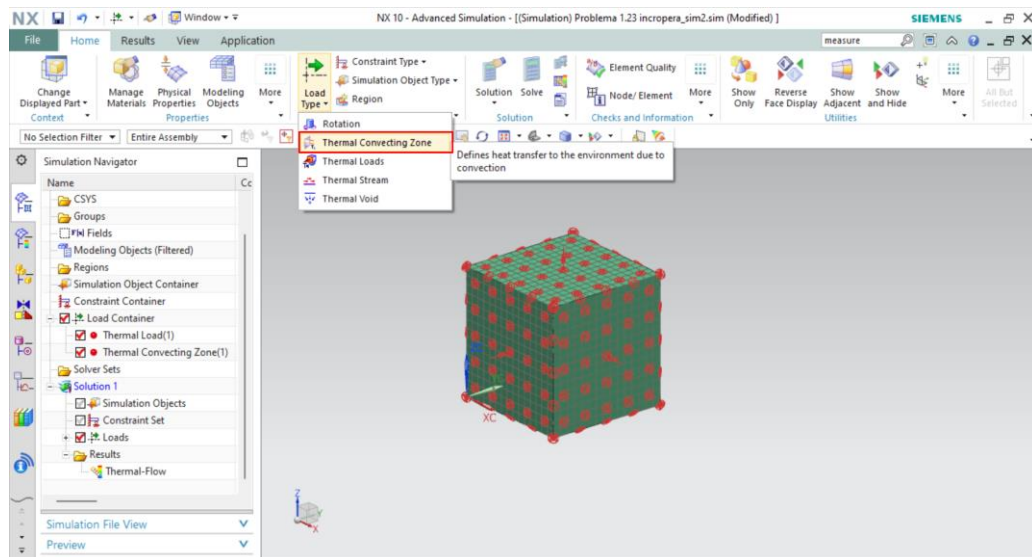


Figura 73: : Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 8.
Fonte: AUTOR

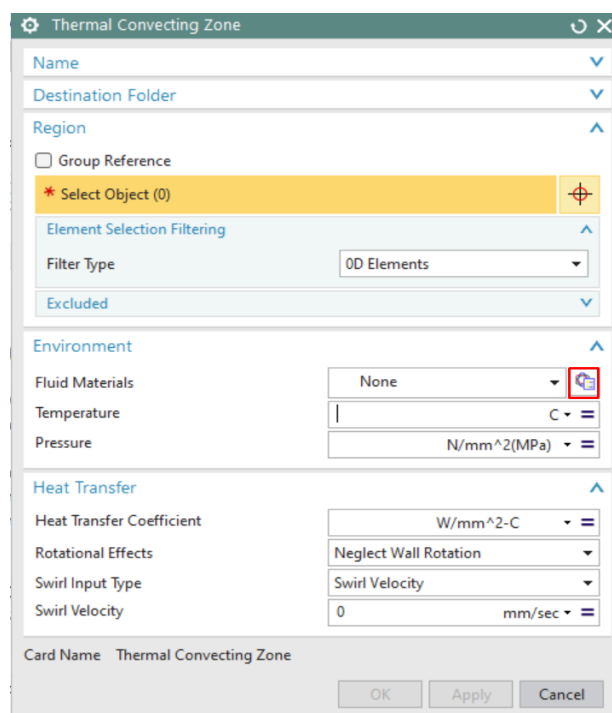


Figura 74: : Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 9.
Fonte: AUTOR

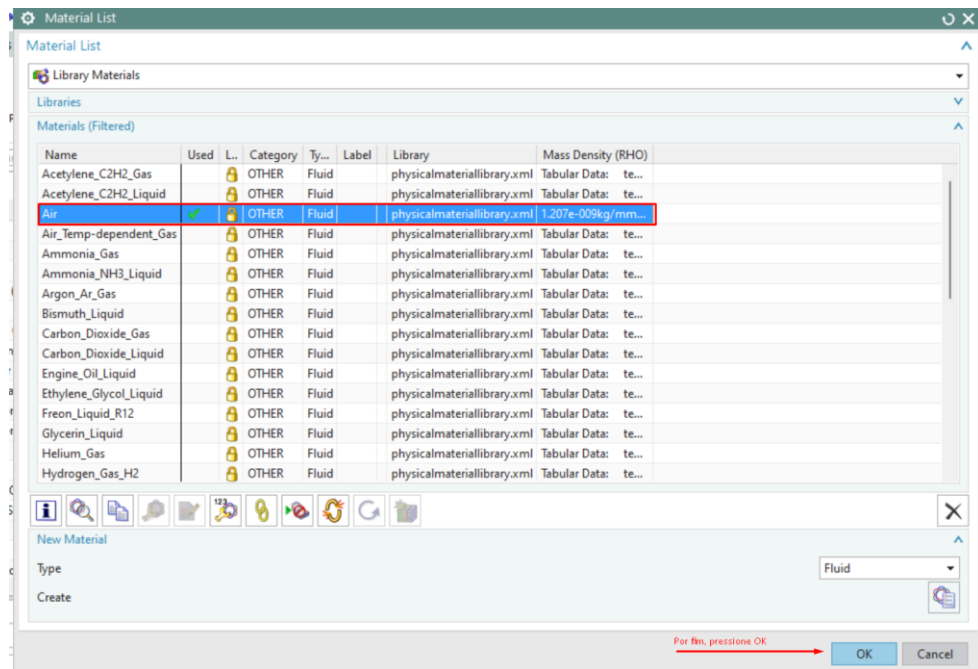


Figura 75: : Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 10.
Fonte: AUTOR

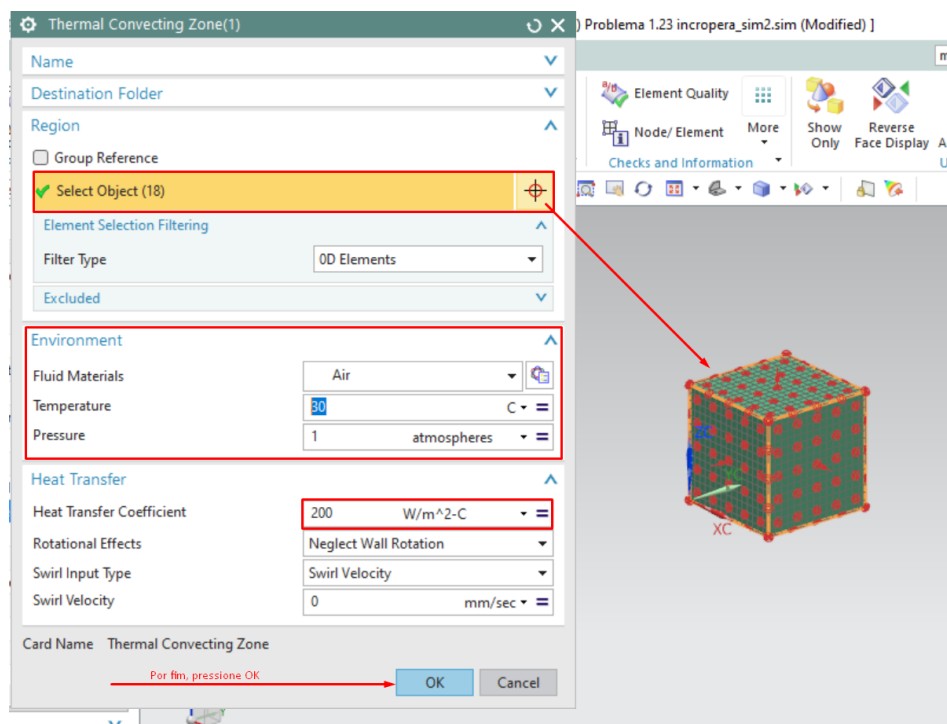


Figura 76: : Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 11.
Fonte: AUTOR

Por fim, deve-se processar a solução conforme Figura 77.

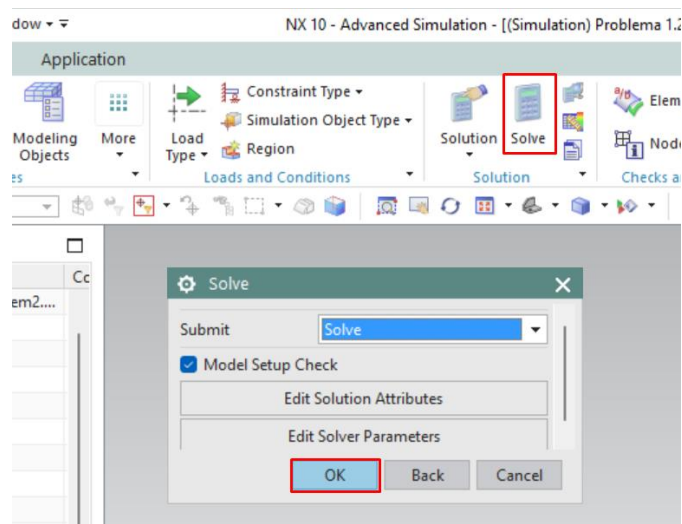


Figura 77: : Análise de transferência de calor em caixa de transmissão: Passo 12.
Fonte: AUTOR

Com a solução processada, deve-se ir a aba Results e em seguida a Temperature – Nodal Scalar:

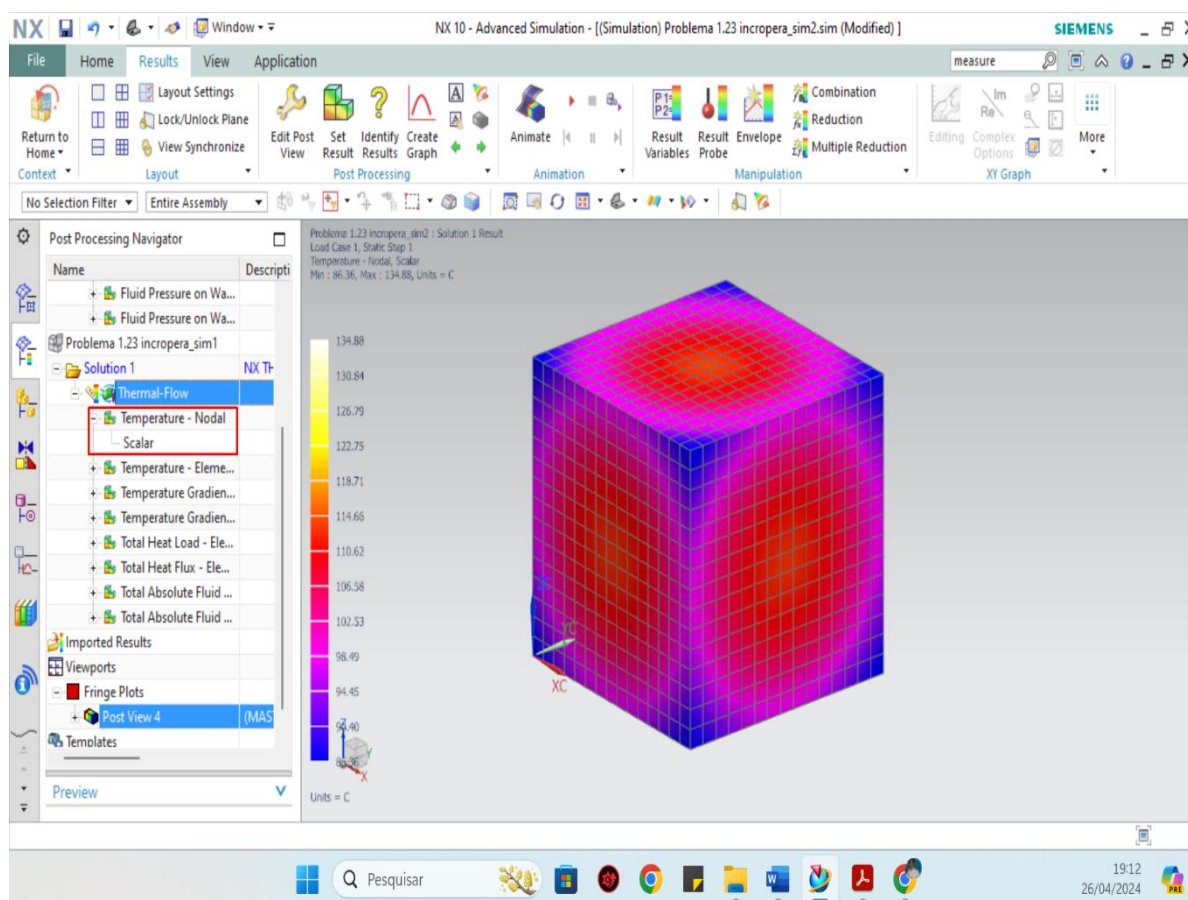


Figura 78: Análise de transferência de calor em caixa de transmissã: resultado.
Fonte: AUTOR

A temperatura média na superfície da caixa de transmissão, conforme solução no Nx Siemens (Figura 79) é muito próxima daquela calculada analiticamente através da Equação (5.16). As razões pelas quais ligeiramente diferem têm relação com capacidade do material da caixa de transmissão em conduzir calor do seu interior para a sua periferia, mantendo assim a temperatura da superfície constante. O número de Biot é um adimensional utilizado para realizar este estudo. Na seção (6) deste trabalho o número de Biot será apresentado e calculado e seu resultado discutido para melhor elucidar este exemplo.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No caso do Bocal Convergente, o valor do fluxo de massa calculado pela teoria foi de $\dot{m} = 6,77 \text{ kg/s}$ e o encontrado através da simulação realizada no Nx Siemens foi de $\dot{m} = 6,58 \text{ kg/s}$. A diferença percentual entre os valores é de aproximadamente 2.8% e pode ser entendida por alguns fatores:

1. No calculo teórico, o ar é considerado um gás ideal;
2. Possui propriedades constantes ;
3. O escoamento se da em regime permanente, unidimensional, e é isentrópico;

Como no ambiente de simulação o problema é resolvido sob condições reais, sem considerar as hipóteses citadas acima, sobretudo a que assume o escoamento como unidimensional, é razoável atribuir esta diferença percebida pelo fato de que no ambiente de simulação a velocidade do fluido na seção transversal de saída não é constante em toda a seção e da-se nas três direções do plano cartesiano, fazendo com que haja uma queda pequena na quantidade da taxa mássica.

No caso da viga engastada, o valor calculado para o deslocamento na extremidade livre da viga pela teoria foi de $y = 5,74 \text{ mm}$ e o obtido através da simulação foi de aproximadamente $5,00 \text{ mm}$. A diferença percentual entre os valores é de 13.78% e pode ser explicada por alguns fatores:

1. A malha foi criada em duas dimensões (2D) e o refinamento da malha, para diminuir o custo computacional da análise, foi mantido a um valor razoavelmente elevado.
2. No cálculo teórico, pressupõe-se que toda energia associada a colisão é armazenada na viga, uma vez que o bloco que cai é completamente rígido e livre de sofrer qualquer deformação. Na prática, no entanto, a colisão não é

perfeitamente inelástica e parte da energia que seria armazenada elasticamente na viga é armazenada no próprio bloco.

Por fim, no caso da caixa de transmissão, tem-se que pela resolução analítica a temperatura superficial da caixa é de 102,5 °C e pela simulação no NX Siemens tem-se a caixa com uma temperatura média de 100 °C. No entanto, a temperatura superficial da caixa, observando-se diferentes pontos, varia em até 24°C na simulação feita no Nx Siemens, e isso pode ser explicado porque no cálculo teórico são assumidas as hipóteses:

1. Coeficiente de convecção constante
2. Transferência de calor por radiação desprezível
3. Temperatura da superfície constante

Este terceiro ponto é aquele que contribui mais significativamente para as diferenças observadas, uma vez que assumir a temperatura da superfície como constante corresponde a assumir que o material de que é feita a caixa de transmissão é um condutor ideal, ou seja, é um condutor que consegue expelir todo o calor gerado no centro da caixa para a sua periferia. Nas ciências térmicas o adimensional de Biot relaciona o calor transferido por convecção e o calor conduzido no corpo que sofre a convecção:

$$Biot = \frac{hL_c}{k_b} \quad (6.1)$$

Onde:

- i. h é o coeficiente de convecção térmica (W/m²°C)
- ii. k_b é o coeficiente de condução térmica (W/m/K)
- iii. $L_c = \frac{\text{Volume}}{\text{AreaSuperficie}}$

Na caixa de transmissão analisada, tem-se um volume de 0.3m³ e uma área superficial de 0,54m², além disso é fornecido um $h = 200 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$ e será tomado um k médio para o aço de $k = 52 \text{ W/m °C}$. Dessa forma o valor de L_c é de 0,55m e o número de Biot vale 2,1. Segundo (INCROPERA, 2019), para valores de Biot $\gg 0,1$ a resistência à condução no interior do corpo é maior do que a resistência à convecção através da camada limite do fluido. Dessa forma, a

hipótese de distribuição de temperaturas uniformes no corpo analisado não deve ser assumida.

7.CONCLUSÃO

A partir do exposto pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram atingidos e que a análise por elementos finitos pode tornar-se uma ferramenta importante de aprendizado e produtividade na carreira do engenheiro mecânico desde sua graduação. Os resultados obtidos por meio das simulações no Nx Siemens foram bastante próximos daqueles obtidos analiticamente. Além disso, as resoluções por meio das simulações permitiu ao leitor tanto perceber particularidades práticas e suas influências na solução final, quanto muni-lo de conhecimento prático no software NX Siemens que o encoraje e permita replicar os passos trabalhados nestes exemplos em outros problemas que vierem a resolver ao longo de sua graduação e vida profissional.

8. REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Alvaro. Método dos elementos finitos. Porto: faculdade de engenharia da universidade de porto, 2003.

LOTTI, Raquel. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. R Dental Press Ortodon Ortop Facial 35 Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, mar./abril 2006.Disponível em:www.scielo.br/j/dpress/a/6WCw3yW7WhXWnRYJRGtYzPq/?format=pdf&lang=pt

SOUZA, Remo. O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor.05/2003

ÇENGEL,Y.A.eCimbala,J.M. Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações, 2007.

TICKOO, Sham. NX Nastran 9.0 for Designers, 2016.

MORAN, H. N. S. M. J. Princípios de termodinâmica para engenharia. 5. ed. [S.l.]: Rio de Janeiro, RJ : LTC, 2006.

MACNEAL, Richard H., "The NASTRAN Theoretical Manual", 1972.

SHIGLEY, J. E., BUDYNAS, R. G., KEITH, J. N. Elementos de máquinas. 10 ed,

2016.

INCROPERA, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L. & Lavine, A. S. - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 2019.

NAM H. KIM, BHAVANI V. SANKAR, ASHOK V. KUMAR. Introduction to finite element analysis and design. 2º edição, 2017.

DARYL L. LOGAN. A First Course in the Finite Eelement Method, 6º edição, 2015.