

DAVI GUILHERME DOURADO BORGES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO
DE FERRAMENTAIS DE MONTAGEM DE ESTRUTURAS
AERONÁUTICAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2025

DAVI GUILHERME DOURADO BORGES

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DE
FERRAMENTAIS DE MONTAGEM DE ESTRUTURAS
AERONÁUTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Aeronáutica. *VERSÃO REVISADA*

Orientadora: Profa. Dra. Priscila Ferreira Barbosa
de Sousa

Coorientador: M.e. Adriano Passini

Uberlândia - MG

2025

DAVI GUILHERME DOURADO BORGES

**STUDY OF THE THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF
AERONAUTICAL STRUCTURE ASSEMBLY TOOLING**

Final Paper submitted to the Faculty of Mechanical Engineering from Federal University of Uberlândia in partial fulfillment of the requirements for the degree of Aeronautical Engineer. *FINAL VERSION*

Advisor: Profa. Dra. Priscila Ferreira Barbosa de Sousa

Co-advisor: M.e. Adriano Passini

Uberlândia - MG

2025

*Este trabalho é dedicado primeiramente à Deus, a minha família, noiva,
e por fim a todos que me apoiaram durante a jornada da graduação.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o fim de uma jornada de 6 anos para a conquista do tão sonhado bacharel em engenharia aeronáutica. Na verdade, este trabalho representa mais, o amor e cuidado de muitas pessoas em minha vida, o qual sem elas não haveria de finalizá-lo. Dessa forma, primeiramente agradeço a Deus por permitir-me e dar-me graça para cursar esta graduação desafiadora. Agradeço à minha família, em especial meus pais que sempre entregaram-me segurança e estabilidade durante esses anos, e muito além disso sustentaram-me com amor, carinho e zelo em abundância o qual serei eternamente grato. Agradeço à minha noiva que apoiou-me e incentivou-me nessa jornada tão importante da minha vida, à minha irmã que igualmente esteve ao meu lado nesse tempo.

Diante o ambiente acadêmico, deixo meus agradeciements ao meus colegas de curso e professores que ajudaram-me e ensinaram-me no dia a dia da graduação. Agradeço à professora doutora Priscila Ferreira que não apenas ajudou-me na confecção deste trabalho como sempre portou-se a mim com muito respeito e atenção. Faço menção aos professores Giuliano, Higor e Tobias que apoiaram-me em diferentes fases da graduação.

Por fim agradeço a Embraer e aos meus colegas de trabalho que permitiram e ajudaram-me neste trabalho, principalmente ao engenheiro e mestre Adriano Passini que orientou-me nesse desenvolvimento.

*“As invenções são, sobretudo,
o resultado de um trabalho de teimoso.”
(Santos Dumont)*

RESUMO

BORGES, D. G. D. Estudo do Comportamento Termomecânico de Ferramentais de Montagem de Estruturas Aeronáuticas. 2025. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2025.

O presente trabalho investiga o comportamento termomecânico de ferramentais de montagem de componentes críticos para o voo, com foco nas superfícies de comando e nos efeitos da dilatação térmica sobre as tolerâncias do produto. A análise realizada é extremamente útil para processos de montagem situados em ambientes não controlados termicamente. Foram realizadas medições de temperatura nos gabaritos de montagem de superfícies de controle de duas aeronaves durante dois dias quentes, incluindo temperaturas do ambiente e do teto no hangar onde esses ferramentais estão localizados. Modelos estruturais foram desenvolvidos para realizar análises por elementos finitos (MEF), revelando deslocamentos significativos nas direções vertical e transversal, impactando diretamente as tolerâncias das dobradiças e provocando atrasos na montagem na ausência de calços corretivos. Para generalizar a análise, foi criado um modelo térmico baseado no Método da Capacitância Global (MCG) para estimar as temperaturas das superfícies a partir das condições ambientais. O modelo apresentou um erro médio abaixo de 10%, e as análises estruturais subsequentes confirmaram os resultados de deslocamento com um erro baixo e diferenças entre os modelos construídos em torno de 0,06 mm, validando a metodologia para futuras avaliações em processos de montagem.

Palavras-chave: Ferramental, Método da Capacitância Global, Dilatação Térmica, Método de Elementos Finitos, Tolerância, Montagem.

ABSTRACT

BORGES, D. G. D. Study of the Thermomechanical Behavior of Aeronautical Structure Assembly Tooling. 2025. 51 p. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Aeronautical Engineering) – Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia - MG, 2025.

The present work investigates the thermomechanical behavior of assembly tooling for flight-critical components, focusing on control surfaces and the effects of thermal expansion on product tolerances. The analysis carried out is extremely useful for assembly processes located in thermally uncontrolled environments. Temperature measurements were performed on the assembly jigs of control surfaces from two aircraft during two hot days, including ambient and ceiling temperatures in the hangar where these tools were located. Structural models were developed to perform finite element analyses (FEA), revealing significant displacements in the vertical and transverse directions, directly impacting hinge tolerances and causing assembly delays in the absence of corrective shims. To generalize the analysis, a thermal model based on the Lumped Capacitance Method (LCM) was created to estimate surface temperatures from environmental conditions. The model showed an average error below 10%, and the subsequent structural analyses confirmed the displacement results with a low error and differences between the built models around 0.06 mm, validating the methodology for future evaluations in assembly processes.

Keywords: Tooling, Lumped Capacitance Method, Thermal Expansion, Finite Element Method, Tolerance, Assembly.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Causas e consequências de variações dimensionais no processo produtivo.	16
Figura 2 – Ferramental de montagem de asa na Embraer.	19
Figura 3 – Ferramental de montagem.	20
Figura 4 – Curva de MacLeamy.	21
Figura 5 – Custo de desenvolvimento de um produto.	21
Figura 6 – Parede plana com convecção na superfície.	22
Figura 7 – Superfície de controle para análise geral via capacitância global.	24
Figura 9 – Partes do gabarito 1.	29
Figura 10 – Partes do gabarito 2.	29
Figura 11 – Malha do modelo do gabarito 2.	34
Figura 12 – Fixações do gabarito 2.	34
Figura 13 – Qualidade da malha 2D via <i>Aspect Ratio</i>	35
Figura 14 – Qualidade da malha 3D via <i>Aspect Ratio</i>	35
Figura 15 – Qualidade da malha 2D via <i>Skewness</i>	36
Figura 16 – Qualidade da malha 3D via <i>Skewness</i>	36
Figura 17 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: coluna esquerda do gabarito 1.	38
Figura 18 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: coluna direita do gabarito 1.	38
Figura 19 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: base do gabarito 1.	38
Figura 20 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: viga superior do gabarito 1.	39
Figura 21 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: posicionadores do gabarito 1.	39
Figura 22 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: coluna esquerda do gabarito 2.	39
Figura 23 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: coluna direita do gabarito 2.	40
Figura 24 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: base do gabarito 2.	40
Figura 25 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: viga superior do gabarito 2.	40
Figura 26 – Deslocamentos resultantes do gabarito 1 com temperaturas medidas.	42
Figura 27 – Deslocamentos resultantes do gabarito 1 com temperaturas estimadas.	43
Figura 28 – Deslocamentos resultantes do gabarito 2 com temperaturas medidas.	43
Figura 29 – Deslocamento no eixo vertical de um posicionador do gabarito 2 com temperaturas medidas.	44
Figura 30 – Deslocamentos resultantes do gabarito 2 com temperaturas estimadas.	44

Figura 31 – Deslocamentos resultantes do gabarito 2 com gradiente de temperatura. . . . 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperatura do gabarito 1 no dia 1 [°C].	30
Tabela 2 – Temperatura do gabarito 2, teto e ambiente no dia 1 [°C].	30
Tabela 3 – Temperatura do gabarito 1 no dia 2 [°C].	31
Tabela 4 – Temperatura do gabarito 2, teto e ambiente no dia 2 [°C].	31
Tabela 5 – Gabarito 1 - MAE e MAPE	41
Tabela 6 – Gabarito 2 - MAE e MAPE	41
Tabela 7 – Deslocamentos [mm] de cada posicionador do gabarito 1 com temperaturas medidas e erro relativo em relação à temperatura estimada.	43
Tabela 8 – Deslocamentos [mm] de cada posicionador do gabarito 2 com temperaturas medidas e erro relativo em relação à temperatura estimada.	45
Tabela 9 – Deslocamentos [mm] de cada posicionador do gabarito 2 com gradiente de temperatura.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1D	Uma Dimensão
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
FEA	<i>Finite Elements Analysis</i>
LCM	<i>Lumped Capacitance Method</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
MCG	Método da Capacitância Global
MEF	Método de Elementos Finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s — Área superficial do sólido

$A_{s,c}$ — Área de uma parede plana sob fluxo térmico convectivo

$A_{s,h}$ — Área de uma parede plana

$A_{s,r}$ — Área de uma parede plana sob fluxo térmico radiativo

Bi — Número de Biot

$Bi_{G,1}$ — Número de Biot do gabarito 1

$Bi_{G,2}$ — Número de Biot do gabarito 2

c — Calor específico do sólido

$\dot{E}_{acum}$ — Energia acumulada pelo sistema

$\dot{E}_{ent}$ — Energia absorvida pelo sistema

$\dot{E}_g$ — Energia gerada no interior do sólido

$\dot{E}_{st}$ — Taxa de variação da energia interna do sólido

$\dot{E}_{sai}$ — Energia emitida pelo sistema

ε — Emissividade da superfície do sólido

h — Coeficiente de transferência de calor por convecção

h_r — Coeficiente de transferência de calor por radiação

$h_{r,1}$ — Coeficiente de transferência de calor por radiação no gabarito 1

$h_{r,2}$ — Coeficiente de transferência de calor por radiação no gabarito 2

k — Condutividade térmica do sólido

L — Comprimento da parede plana

L_c — Comprimento característico

$L_{c,1}$ — Comprimento característico do gabarito 1

$L_{c,2}$ — Comprimento característico do gabarito 2

m_G — Massa do gabarito

n — Número de medições

ρ — Densidade do sólido

q''_{conv} — Fluxo térmico convectivo

q''_{rad} — Fluxo térmico radiativo

q''_s — fluxo térmico imposto

σ — Constante de Stefan-Boltzmann

T — Temperatura da superfície do sólido

T_G — Temperatura da parte analisada do gabarito

T_{G_x} — Temperatura do gabarito no início do período analisado

$T_{G_{x+1}}$ — Temperatura do gabarito no final do período analisado

$T_{G,1}$ — Temperatura do gabarito 1

$T_{G,2}$ — Temperatura do gabarito 2

T_∞ — Temperatura do fluido

T_{∞_m} — Temperatura média do fluido durante o período analisado

$T_{s,1}$ — Temperatura da superfície de uma parede plana

$T_{s,2}$ — Temperatura da superfície oposta de uma parede plana

T_{teto} — Temperatura do teto do hangar

T_{teto_m} — Temperatura média do teto do hangar durante o período analisado

T_{viz} — Temperatura da vizinhança

V — Volume do sólido

y_i — Valor de temperatura medido

$\hat{y}_i$ — Valor de temperatura estimado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	Conceito de ferramental	18
2.2	Importância da Antecipação na Identificação de Problemas	20
2.3	Método da capacitância global (MCG)	22
2.4	Método de elementos finitos (MEF)	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	Caracterização dos ferramentais	27
3.2	Medições de temperatura	28
3.3	Modelo térmico	31
3.3.1	<i>Método da capacitância global (MCG)</i>	31
3.3.2	<i>Análise discreta</i>	33
3.4	Modelo estrutural numérico	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Modelo térmico	37
4.2	Modelo estrutural numérico	42
5	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	50

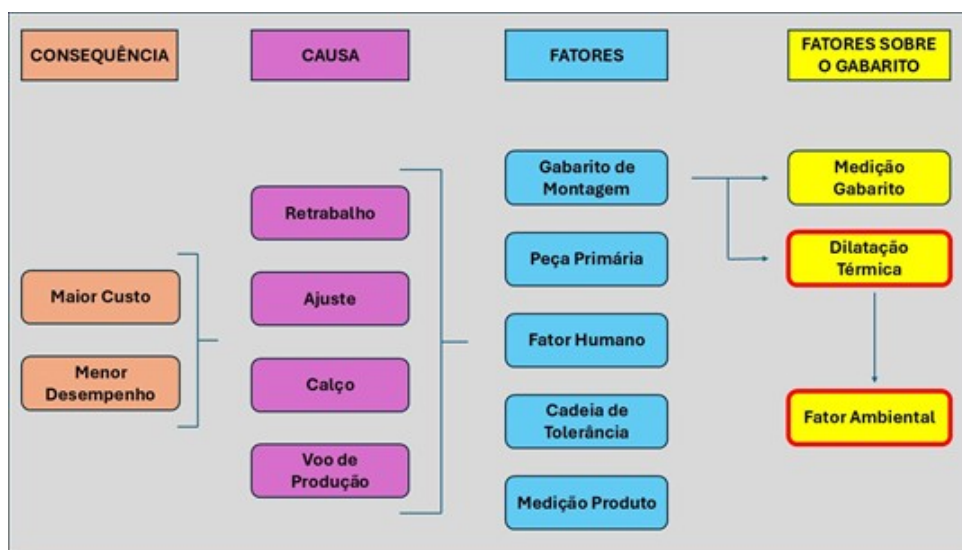
INTRODUÇÃO

A fabricação aeronáutica é um macroprocesso que gera um produto aeronáutico através de inúmeros processos menores, como fabricação e conformação mecânica, medição tridimensional, montagem etc. Esse processo produtivo deve gerar um produto aeronáutico conforme projeto dentro de uma certa tolerância, a fim de se cumprir uma série de requisitos de performance e segurança. Quanto aos requisitos em meio à produção, um dos mais essenciais é o dimensional pois possibilitará a montagem do produto e suas partes, as quais são em maioria componentes complexos e de grande porte, o que frequentemente gera desafios relacionados a deslocamentos indesejados como folgas, interferências excessivas ou desalinhamentos. Para garantir a precisão na montagem, são desenvolvidos ferramentais específicos que consideram desde os requisitos geométricos do produto, como o posicionamento de furos e superfícies, até aspectos ergonômicos e de acessibilidade dos operadores. Além disso, esses dispositivos devem atender a critérios estruturais, sendo projetados com base em análises analíticas e por simulações numéricas para assegurar sua integridade, segurança e requisitos dimensionais.

O processo produtivo de um produto aeronáutico possui uma série de fatores que adicionam variações às suas dimensões, desde a fabricação de peças primárias até sua montagem. Alguns desses fatores são as variações inerentes aos métodos de fabricação das peças primárias, incertezas nas medições do produto, incertezas da cadeia de tolerâncias, fatores humanos, entre outros. Outra fonte de incertezas é o próprio gabarito de montagem, uma vez que possui erros inerentes à sua construção e este se não possuir controle de suas dimensões potencializará as variações do produto. O que, por fim, pode significar um produto fora dos requisitos de performance e segurança ou com maior custo e tempo de manufatura devido retrabalhos e ajustes. A Figura 1 mostra alguns fatores que promovem variações dimensionais do produto e do gabarito de montagem.

Nesse interim, o processo produtivo de montagem sobre um gabarito pode ocorrer em um ambiente termicamente controlado ou não, essa última se tornando suscetível aos efeitos de

Figura 1 – Causas e consequências de variações dimensionais no processo produtivo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

variação térmica. Para o caso que não possui esse controle é essencial prever a dilatação térmica da estrutura do ferramental, uma vez que variações de temperatura no ambiente de montagem podem gerar deslocamentos acima dos permitidos, comprometendo a precisão do gabarito e, consequentemente, a qualidade do produto final. Uma vez confirmados que esses deslocamentos são danosos às peças e ao processo produtivo, faz-se necessário o levantamento e implementação de contenções a fim de mitigar estes efeitos tanto em ferramentais já implementados como em futuros projetos.

A fim de compreender os efeitos de variações térmicas sobre um gabarito de montagem do caixão de asa de um avião comercial, (SILVA, 2024) analisou dados de temperatura do ferramental e do hangar em que estava instalado, além de medições tridimensionais, concluindo que, em situações de grandes variações térmicas em relação ao padrão de medição, o gabarito sofre deslocamentos mecânicos consideráveis que comprometem as tolerâncias de montagem da asa. No caso do estudo, verificou-se que a radiação proveniente do teto, cuja temperatura estava consideravelmente acima da temperatura da superfície do ferramental, é a principal fonte responsável por tamanhas variações. Assim, é esperado que gabaritos expostos a condições semelhantes sofram efeitos similares aos estudados por (SILVA, 2024), mesmo que em escalas diferentes.

Assim sendo, este trabalho possui o objetivo de estudar a contribuição do fator ambiental (Figura 1), nas variações dimensionais de ferramentais de montagem e propor meios para o desenvolvimento de soluções de forma mais eficiente. Dessa forma, foi analisado dois gabaritos de montagem de superfícies de comando, os quais, mesmo estando em um hangar diferente, encontram-se em condições análogas ao estudado por (SILVA, 2024).

Ao contrário de (SILVA, 2024), este estudo não se ateve somente à análise da dilatação

do ferramental, mas também propõe a utilização do método da Capacitância Global, de (INCROPERA *et al.*, 2014), para estruturar um modelo de transferência de calor por convecção e radiação dos gabaritos em relação ao hangar. O objetivo desse modelo é estimar, com boa precisão, a temperatura do ferramental ao longo do dia, apenas monitorando as temperaturas do teto e do ambiente do hangar. O resultado alcançado ao final dessa estimativa representa um avanço para a engenharia de manufatura, principalmente durante a fase de projeto de novos ferramentais, haja vista não ter necessidade de uma estrutura física para compreender o seu comportamento térmico. Dessa forma, será possível analisar se ocorrerão problemas de dilatação térmica excessiva do ferramental e implementar as devidas soluções ainda em fases iniciais de concepção, o que diminui seu custo e esforço de implementação além de melhorar a qualidade do processo produtivo.

REVISÃO DE LITERATURA

O Trabalho de (SILVA, 2024) investigou os efeitos da dilatação térmica em um gabarito de montagem do caixão de asa de uma aeronave comercial. Foram realizadas medições de temperatura do gabarito e do hangar durante um período de seis meses, por meio de termômetros convencionais e câmeras termográficas. Também foi feita a medição tridimensional do ferramental, constatando-se desvios nos requisitos dimensionais.

Com base nas medições realizadas, foi desenvolvido um modelo para simulação em MEF. Esse modelo, ajustado por meio de pós-processamento dos dados, apresentou boa correspondência com as medições tridimensionais, comprovando os deslocamentos mensurados no gabarito devido às variações de temperatura dentro do hangar.

Segundo (SILVA, 2024), um modelo construído em MEF pode auxiliar na análise térmica de ferramentais e prever suas variações dimensionais ainda na fase de projeto. Dessa forma, é possível propor contramedidas antes mesmo da fabricação do gabarito, reduzindo custos com modificações, correções posteriores e atrasos na linha de produção. Outra constatação do autor foi que dias quentes promovem as maiores variações de temperatura no hangar e no ferramental, sendo que, principalmente nesses dias, a troca de calor por radiação entre o teto do hangar e o gabarito é preponderante, embora a convecção também atue de forma significativa.

2.1 Conceito de ferramental

O ambiente de manufatura da indústria aeroespacial é extremamente complexo, composto por processos voltados à manutenção da qualidade, segurança e precisão dos produtos fabricados, estejam eles em estágio inicial ou final de produção. Nesse contexto, entre os principais componentes estão os instrumentos, máquinas e dispositivos usados para moldar, fabricar e montar partes do produto.

Ferramental aeroespacial é todo dispositivo projetado para atender aos requisitos de

fabricação, montagem, transporte e instalação de produtos do setor, garantindo diretamente as características e a qualidade do produto (MANUFACTURING, 2025). Esses dispositivos são compostos por gabaritos de montagem, de transporte, içamento, moldes, apoios para usinagem e tubulações, entre outros. A definição do ferramental adequado para cada fase do processo produtivo é importante para manter a eficiência e a precisão da manufatura, ao mesmo tempo em que se preservam altos padrões de qualidade.

No contexto deste trabalho, é essencial estabelecer análises de engenharia que resguar-dem a integridade do ferramental e atenda aos requisitos de segurança, estruturais, térmicos, dimensionais, entre outros. Estas análises são fundamentais, pois indicam possíveis problemas e suas causas ainda na fase de projeto, e possibilitam a proposição de soluções para os eventuais problemas venham a surgir nesses dispositivos, principalmente os gabaritos de montagem, os quais são vitais na manufatura de segmentos críticos como asas, empenagens e superfícies de comando.

Figura 2 – Ferramental de montagem de asa na Embraer.



Fonte: Aero flap (2016).

Figura 3 – Ferramental de montagem.

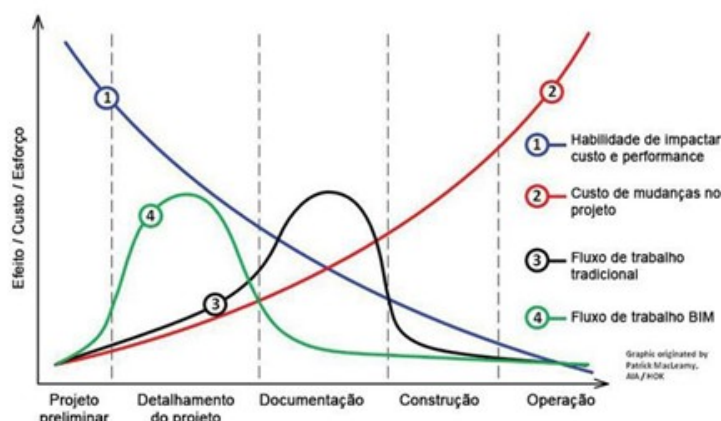


Fonte: Aerospace (2019).

2.2 Importância da Antecipação na Identificação de Problemas

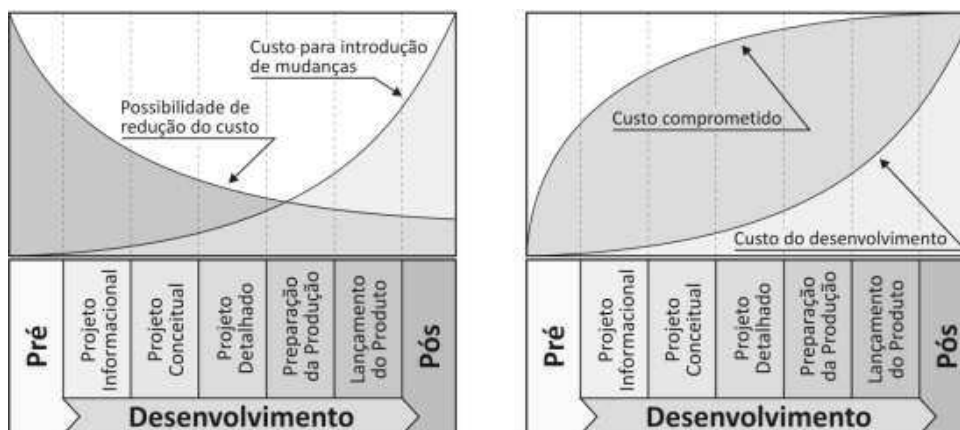
No gerenciamento de projetos, a capacidade de identificar e corrigir potenciais problemas ainda nas fases iniciais do ciclo de vida é determinante para a redução de custos e esforços. Isso se deve ao fato de que, segundo (STECKLEIN *et al.*, 2004), à medida que o projeto avança em direção à produção, os custos associados à implementação de mudanças crescem exponencialmente. Como demonstrado na Figura 4, uma alteração realizada durante a fase de concepção tem impacto financeiro significativamente menor do que se fosse implementada na fase de produção. Esse comportamento está diretamente relacionado ao acúmulo de decisões técnicas e operacionais que se consolidam ao longo do desenvolvimento, tornando cada modificação mais complexa e custosa.

Figura 4 – Curva de MacLeamy.



Fonte: CBIC (2023).

Figura 5 – Custo de desenvolvimento de um produto.



Fonte: Mello e Silva (2013).

A Figura 5 reforça essa relação ao evidenciar que cerca de 90% do custo comprometido de um produto é definido ainda durante o projeto detalhado. Assim, embora nas fases posteriores exista maior clareza sobre o produto, a oportunidade de reduzir ou controlar custos torna-se drasticamente limitada. Em outras palavras, após o início da produção, as possibilidades de ajustes de baixo custo praticamente desaparecem, restando apenas a absorção dos impactos financeiros das decisões já tomadas. Portanto, prever variações dimensionais, problemas de manufatura ou riscos estruturais ainda na fase de concepção e projeto não apenas aumenta a eficiência do processo, mas também evita retrabalhos, atrasos e comprometimento da qualidade final do produto. Isso ressalta a importância de ferramentas analíticas, simulações computacionais e técnicas de engenharia preventiva, que permitem antecipar cenários críticos, minimizando os custos e garantindo maior confiabilidade ao longo do ciclo de vida do projeto.

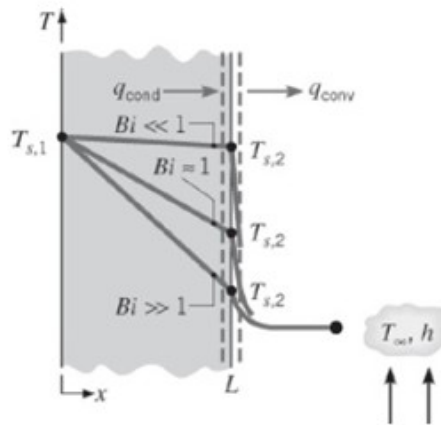
2.3 Método da capacitância global (MCG)

Segundo (INCROPERA *et al.*, 2014), o Método da Capacitância Global é a formulação de um balanço de energia global de um sólido para a resposta transiente da sua temperatura. Tal método é empregado quando a hipótese de temperatura uniforme no interior do sólido é válida, ou seja, quando os gradientes de temperatura internos são desprezíveis. Essa condição é aproximada quando a resistência à condução no interior do sólido é pequena em comparação à resistência à transferência de calor entre o sólido e sua vizinhança.

Certamente, o MCG é o método mais simples e conveniente para ser utilizado na solução de problemas transientes de aquecimento e resfriamento. Contudo, é necessário verificar as condições do problema para aplicá-lo com precisão satisfatória.

Para formular um critério adequado à primeira condição já apresentada, considera-se a condução de calor em regime estacionário através de uma parede plana com área $A_{s,h}$, ilustrado na Figura 6. Embora a análise seja feita para condições constantes, esse critério pode ser facilmente aplicado a situações transientes. Uma das superfícies da parede é mantida a uma temperatura $T_{s,1}$, enquanto a outra está em contato com um fluido cuja temperatura é T_{∞} , sendo $T_{\infty} < T_{s,1}$. A temperatura dessa segunda superfície assume um valor intermediário, denominado $T_{s,2}$, que satisfaz a condição $T_{\infty} < T_{s,2} < T_{s,1}$.

Figura 6 – Parede plana com convecção na superfície.



Fonte: Incropera *et al.* (2014).

Dessa forma, para o regime estacionário, o balanço de energia na superfície, representado pela equação 2.1, simplifica-se para:

$$\frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) = hA (T_{s,2} - T_{\infty}) \quad (2.1)$$

Sendo k a condutividade térmica do sólido, A a área da parede, L o comprimento dela e h

o coeficiente de transferência de calor por convecção. Rearranjando, obtém-se:

$$\frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{T_{s,2} - T_{\infty}} = \frac{\frac{L}{kA}}{\frac{1}{hA}} = \frac{R_{t,\text{cond}}}{R_{t,\text{conv}}} = \frac{hL}{k} = \text{Bi} \quad (2.2)$$

A formulação resulta no parâmetro adimensional chamado número de Biot, o qual fornece uma medida da queda de temperatura no interior do sólido em relação à diferença de temperaturas entre sua superfície e o fluido. De acordo com a equação 2.2, é possível interpretar o número de Biot como uma razão de resistências térmicas. Assim, se $\text{Bi} \ll 1$, a resistência à condução no interior do sólido é muito menor do que a resistência à convecção, sendo válida a hipótese de distribuição de temperatura uniforme no interior do sólido, o que justifica o uso do método da capacitância global.

Segundo (INCROPERA *et al.*, 2014), o erro associado à utilização do método da capacitância global é pequeno se:

$$\text{Bi} = \frac{hL}{k} < 0,1 \quad (2.3)$$

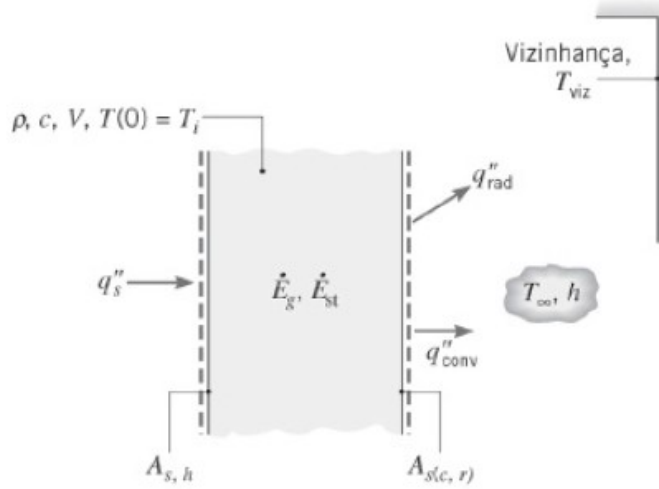
Sendo o comprimento característico L_c , para formas complexas, comumente definido como:

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (2.4)$$

Isto é, a razão entre o volume do sólido e sua área superficial.

A condução transiente em um sólido pode ser iniciada por outros processos de transferência de calor que não a convecção, como a troca radiativa com uma vizinhança de temperatura diferente, a aplicação de um fluxo térmico sobre uma superfície ou a geração interna de energia. Figura 7 mostra um exemplo em que todas essas situações ocorrem simultaneamente.

Figura 7 – Superfície de controle para análise geral via capacitância global.



Fonte: Incropera *et al.* (2014).

O fluxo térmico imposto q''_s ocorre na superfície de área $A_{s,h}$, enquanto a convecção e radiação na superfície de área $A_{s(c,r)}$, sendo essa última não necessariamente iguais ($A_{s,c} \neq A_{s,r}$), a geração de energia interna $\dot{E}_g$ e a taxa de variação da energia interna $\dot{E}_{st}$ dentro do sólido. Aplicando a conservação de energia em qualquer instante t , tem-se:

$$q''_s A_{s,h} + \dot{E}_g - [q''_{conv} A_{s,c} + q''_{rad} A_{s,r}] = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (2.5)$$

Utilizando as formulações do fluxo térmico convectivo e radiativo, obtém-se:

$$q''_s A_{s,h} + \dot{E}_g - [h(T - T_{\infty}) A_{s,c} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{viz}^4) A_{s,r}] = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (2.6)$$

sendo ε a emissividade da superfície do sólido (cinza e difusa) e σ a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$).

Para o caso simplificado, em que se consideram apenas trocas convectivas e radiativas, a partir do balanço de energia para condições transientes:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \dot{E}_{acum} \quad (2.7)$$

A equação 2.6 reduz-se a:

$$- [h(T - T_{\infty}) A_{s,c} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{viz}^4) A_{s,r}] = \rho V c \frac{dT}{dt} \quad (2.8)$$

A equação 2.8 é uma equação diferencial ordinária, não linear, de primeira ordem e não homogênea, que não pode ser integrada diretamente para obter uma solução exata, sendo necessário utilizar soluções numéricas ou aproximações.

Neste caso apresentado, para determinar se a troca radiante entre o sólido e sua vizinhança é significativa e se deve ser considerada, o coeficiente de transferência de calor por radiação deve ser comparável ao coeficiente por convecção. Esse coeficiente radiativo é dado por:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T + T_{\text{viz}})(T^2 + T_{\text{viz}}^2) \quad (2.9)$$

2.4 Método de elementos finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente utilizada na engenharia para a solução aproximada de problemas complexos, especialmente aqueles que envolvem equações diferenciais parciais. Sua aplicação é bastante abrangente, contemplando áreas como análise estrutural, transferência de calor, eletromagnetismo e dinâmica de fluidos (COOK, 1995). Na engenharia estrutural, em particular, trata-se de uma ferramenta essencial para a avaliação de tensões, deformações e deslocamentos em componentes submetidos a diversas condições de carregamento.

O princípio fundamental do MEF consiste na discretização da geometria de um problema contínuo em subdomínios menores e finitos, chamados elementos. Esses elementos são interligados por pontos denominados nós, que armazenam as principais informações do modelo, como deslocamentos e forças. A partir dessa malha de elementos, o problema físico é convertido em um sistema de equações algébricas, que pode ser resolvido computacionalmente.

A precisão do MEF está diretamente relacionada à qualidade da discretização. Elementos menores e mais refinados tendem a gerar resultados mais próximos da solução exata, embora também aumentem significativamente o tempo de processamento. Na prática, busca-se um equilíbrio entre a precisão desejada e os recursos computacionais disponíveis (FILHO, 2000).

Os elementos podem ser classificados de acordo com sua dimensionalidade e aplicação: elementos de barra (1D), utilizados em estruturas como treliças e vigas; elementos de casca e placa (2D), aplicados na modelagem de superfícies e estruturas planas; e elementos sólidos (3D), empregados em componentes que exigem uma representação volumétrica completa ou possuem geometria complexa.

O processo de análise pelo MEF é composto por três etapas principais. Na fase de pré-processamento, o usuário define a geometria, os materiais, as propriedades físicas, as condições de contorno e os carregamentos. Em seguida, na etapa de processamento (ou solver), o software resolve o sistema de equações gerado a partir da discretização e da formulação matemática do problema. Por fim, no pós-processamento, os resultados obtidos são interpretados, geralmente apresentados em formatos gráficos, como mapas de tensões, deformações e deslocamentos.

O MEF se destaca frente aos métodos analíticos tradicionais, uma vez que permite a análise de geometrias complexas, materiais anisotrópicos e condições de contorno variadas,

situações muitas vezes inviáveis ou extremamente trabalhosas de serem tratadas de forma analítica. Atualmente, existem diversos softwares especializados que implementam essa metodologia, como ferramentas comerciais robustas, por exemplo o software APEX, da empresa Hexagon, que permite tanto a criação de malhas quanto a resolução de problemas bidimensionais e tridimensionais.

Dessa forma, o Método dos Elementos Finitos se consolida como uma das principais ferramentas de simulação e análise na engenharia moderna, oferecendo suporte essencial para o desenvolvimento de projetos mais seguros, eficientes e otimizados.

METODOLOGIA

3.1 Caracterização dos ferramentais

Os ferramentais analisados são dois gabaritos de montagem de superfície de comando: o primeiro, de uma aeronave executiva, e o segundo, de uma aeronave comercial. O gabarito 1 é menor, fabricado em aço e pintado com tinta sintética azul; contudo, seus posicionadores, que suportam e posicionam o produto, são de alumínio e estão fixados na viga superior da estrutura. O gabarito 2 é maior, também feito de aço, assim como seus posicionadores, e pintado com tinta sintética branca. A principal diferença entre as duas estruturas é a presença de guias lineares que fornecem um grau de liberdade de translação na direção longitudinal no gabarito 2, as quais fazem a conexão dos posicionadores à estrutura, compensando a dilatação no sentido longitudinal. As guias lineares atuam de forma que os deslocamentos do gabarito nessa direção não afetem as tolerâncias de posição do produto.

O equacionamento do modelo térmico requer informações sobre a massa e a área superficial dos ferramentais, que foram obtidas com base nos projetos no ambiente virtual do software de CAD *CATIA*. O calor específico do aço e do alumínio são, respectivamente, $486 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ e $900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, enquanto os valores de condutividade térmica do aço e alumínio são, respectivamente, $52 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ e $247 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, de acordo com (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). O coeficiente de transferência de calor por convecção foi adotado como $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, valor dentro da faixa aceitável, 5 - 10, segundo (NETO, 2010). Por fim, um parâmetro muito importante para o equacionamento é a emissividade térmica das superfícies dos gabaritos, considerada como 0.85, valor dentro da faixa aceitável, 0.85 - 0.95, segundo as referências consultadas (CONTEMP, 2022) e (TRANSMETRA, 2025).

Os coeficientes de emissividade térmica e transferência de calor por convecção impactam diretamente os resultados da 2.8, e são parâmetros de difícil aferição experimental. Dessa forma, após um ajuste dos resultados de acordo com os possíveis valores dentro das faixas disponíveis,

eles foram definidos respectivamente como 0.85 e 5 W/(m² · K).

3.2 Medições de temperatura

As temperaturas reais das superfícies dos ferramentais analisados, do teto e do ambiente, são o parâmetro básico tanto para a análise da dilatação térmica da estrutura quanto para o ajuste do modelo térmico. As medições dessas temperaturas foram realizadas nos dias 18/02/2025 e 19/02/2025, entre as 6h e as 17h, em intervalos de uma hora. Ambos os dias foram ensolarados, com poucas nuvens, e, segundo a meteorologia, registraram temperaturas máximas acima de 30°C e mínimas próximas de 20°C. Esses dias foram escolhidos por representarem condições muito quentes, que poderiam elevar criticamente as temperaturas do gabarito.

Para a medição da temperatura ambiente dentro do hangar, foi utilizado o *data logger* Testo 175T2 (Figura 8a), com sensor interno NTC. Já para o teto e as superfícies dos ferramentais, foi utilizado o termômetro digital infravermelho *Fluke 62 Mini* (Figura 8b). Durante esse processo, o valor medido pelo *data logger* foi considerado após 10 minutos de estabilização no local, enquanto os valores aferidos pelo infravermelho foram registrados após a fixação da mira laser em um ponto.



(a) Data logger testo 175T2.

Fonte: Testo (2024).



(b) Termômetro digital infravermelho Fluke 62 Mini.

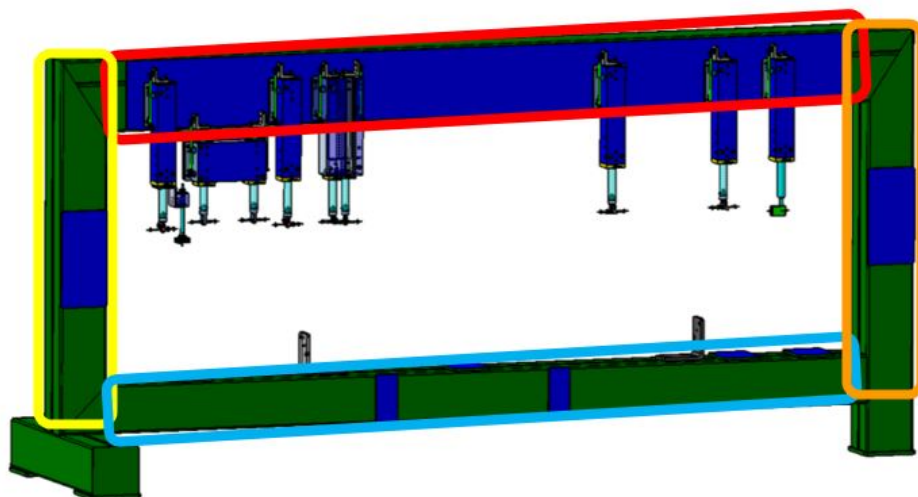
Fonte: Instrumart (2025).

A utilização do termômetro infravermelho requer padronizações específicas de tempo e estabilização entre medições, que foram seguidas conforme orientação do fabricante, para garantir a confiabilidade da medição. O processo mais crítico foi a medição da temperatura do teto, pois este se encontrava a uma distância de aproximadamente 10 metros do termômetro. Por isso, foram realizados testes com o instrumento em diferentes superfícies e distâncias, não sendo encontradas divergências nos valores lidos.

A fim de simplificar a análise e as medições, as estruturas foram divididas, de maneira semelhante ao proposto por (SILVA, 2011), em quatro partes principais conforme Figura 9

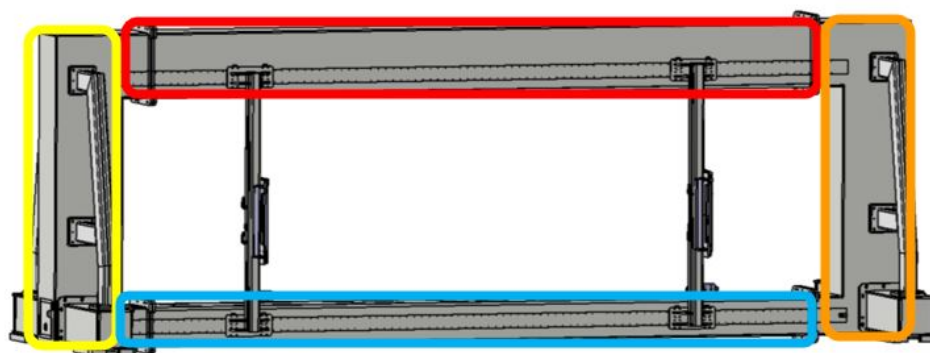
e Figura 10, além dos posicionadores: base (azul), coluna esquerda (amarelo), coluna direita (laranja) e viga superior (vermelho).

Figura 9 – Partes do gabarito 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 10 – Partes do gabarito 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em cada parte, foram obtidos valores de temperatura em no mínimo três pontos; para o teto do hangar, foram registrados seis pontos. Todo o procedimento de medição e os pontos de aferição na estrutura foram mantidos em cada intervalo de tempo.

As tabelas a seguir compilam todas as medições de temperatura realizadas durante os dois dias especificados. Como as medições foram realizadas em vários pontos, foi calculada a média aritmética e os resultados disponibilizados nas tabelas. Os dados estão organizados por horário de aferição, por gabarito e por suas partes, indicando se as temperaturas se referem ao teto ou ao ambiente.

Tabela 1 – Temperatura do gabarito 1 no dia 1 [°C].

Horário	Coluna Esquerda	Coluna Direita	Base	Viga Superior	Posicionadores
06:00	25,7	26,1	25,8	26,1	25,9
07:00	25,6	25,6	26,3	25,9	25,9
08:00	26,3	26,1	26,0	26,4	26,6
09:00	27,4	27,4	27,4	27,6	28,3
10:00	29,0	29,0	28,9	29,2	29,6
11:00	30,7	30,9	30,9	31,1	31,4
12:00	32,6	32,7	32,8	33,1	33,5
13:00	34,3	34,4	34,7	34,9	36,0
14:00	35,6	35,8	35,6	36,6	37,9
15:00	36,4	36,5	36,4	37,3	38,0
16:00	36,2	36,4	36,4	37,1	37,5
17:00	35,2	35,3	35,3	36,2	35,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Temperatura do gabarito 2, teto e ambiente no dia 1 [°C].

Horário	Coluna Esquerda	Coluna Direita	Base	Viga Superior	Teto	Ambiente
06:00	25,9	26,2	26,6	26,3	24,7	23,1
07:00	25,7	25,8	26,4	26,0	27,3	24,2
08:00	26,5	26,4	26,8	26,7	29,5	25,4
09:00	27,3	27,5	27,5	27,7	33,0	27,1
10:00	28,7	28,9	28,4	29,0	37,1	29,0
11:00	30,3	30,6	29,6	30,8	40,5	30,3
12:00	32,1	32,3	30,8	32,4	44,1	32,0
13:00	33,7	33,9	32,2	34,2	46,9	33,8
14:00	35,2	35,3	33,2	35,5	48,1	34,2
15:00	36,1	36,0	33,9	36,2	44,4	34,0
16:00	36,2	36,1	34,3	36,4	42,4	33,0
17:00	35,2	35,0	33,9	35,2	38,5	32,8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Temperatura do gabarito 1 no dia 2 [°C].

Horário	Coluna Esquerda	Coluna Direita	Base	Viga Superior	Posicionadores
06:00	24,3	24,5	24,4	24,3	24,5
07:00	24,2	24,1	24,2	24,1	24,2
08:00	24,7	24,6	24,6	24,6	24,7
09:00	26,0	26,1	26,1	25,9	26,2
10:00	27,4	27,5	27,5	27,4	27,7
11:00	29,3	29,3	29,5	29,5	30,0
12:00	31,3	31,5	31,6	31,7	32,2
13:00	32,4	32,8	32,8	33,1	34,6
14:00	33,8	34,1	34,1	34,5	36,2
15:00	35,4	35,8	35,7	36,3	37,1
16:00	34,4	34,7	34,6	35,3	34,4
17:00	32,2	32,2	32,1	32,7	31,9

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Temperatura do gabarito 2, teto e ambiente no dia 2 [°C].

Horário	Coluna Esquerda	Coluna Direita	Base	Viga Superior	Teto	Ambiente
06:00	23,3	23,6	23,8	23,6	23,3	21,0
07:00	23,8	24,2	24,3	24,2	24,4	22,6
08:00	24,6	24,7	24,9	24,6	26,6	24,2
09:00	25,6	25,6	25,6	25,6	29,4	25,7
10:00	26,7	26,7	26,6	26,9	32,7	27,0
11:00	28,5	28,4	27,9	28,7	36,8	28,6
12:00	30,2	30,2	29,4	30,5	41,1	30,0
13:00	31,4	31,4	30,2	31,0	43,9	31,5
14:00	32,6	32,5	31,3	33,2	45,9	33,0
15:00	34,0	33,9	32,6	34,6	45,7	33,5
16:00	33,6	33,5	32,2	34,0	38,0	31,0
17:00	32,2	32,1	31,3	32,5	33,1	29,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Modelo térmico

3.3.1 Método da capacitância global (MCG)

Inicialmente, é necessário verificar a aplicabilidade do método à proposta de análise deste trabalho. Para isso, calcula-se o número de Biot para os gabaritos em questão, conforme a equação 2.3. Como os ferramentais são sólidos de geometria extremamente complexa, os comprimentos característicos de ambos são calculados conforme a equação 2.4. Os volumes

ocupados pelo material de cada estrutura foram medidos a partir do projeto virtual no CATIA.

$$Bi_{G,1} = \frac{hL_{c,1}}{k} = \frac{5.0,059}{247} = 0,0012 < 0,1 \quad (3.1)$$

$$Bi_{G,2} = \frac{hL_{c,2}}{k} = \frac{5.0,074}{247} = 0,0015 < 0,1 \quad (3.2)$$

De acordo com os resultados, o MCG mostra-se aplicável, pois o gradiente ao longo da espessura do material é desprezível, ou seja, a condução interna pode ser desconsiderada no modelo — o que é plausível, uma vez que a maior parte das estruturas é composta por chapas de espessura relativamente fina.

(SILVA, 2011) concluiu que a transferência de calor por radiação influenciava diretamente o ferramental estudado em seu trabalho. Dessa forma, para verificar se a mesma condição se aplica aos gabaritos aqui analisados, é necessário calcular, por meio da equação 2.9, o coeficiente de transferência de calor por radiação. As temperaturas da superfície e da vizinhança utilizadas são as maiores temperaturas medidas nas vigas superiores dos gabaritos e no teto no dia 18/02/2025, pois essa é a situação em que se espera a maior influência dessa forma de troca térmica.

$$h_{r,1} = \varepsilon \sigma (T_{G,1} + T_{\text{teto}})(T_{G,1}^2 + T_{\text{teto}}^2) = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3.3)$$

$$h_{r,2} = \varepsilon \sigma (T_{G,2} + T_{\text{teto}})(T_{G,2}^2 + T_{\text{teto}}^2) = 5,97 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (3.4)$$

O coeficiente de transferência de calor por radiação encontrado é comparável ao de convecção em escala, portanto ambas as formas de troca térmica devem ser consideradas no MCG.

Confirmadas as condições esperadas, pode-se aplicar a equação 2.8 à situação estudada, obtendo-se a equação 3.5. É importante salientar que a análise do método é realizada separadamente para cada parte da estrutura, tanto para simplificação dos cálculos quanto para a melhor aplicação do método:

$$- [h(T_G - T_{\infty})A_{s,c} + \varepsilon \sigma (T_G^4 - T_{\text{teto}}^4)A_{s,r}] = m_G c \frac{dT}{dt} \quad (3.5)$$

Em que T_G é a temperatura da parte da estrutura analisada, e m_G sua respectiva massa. As áreas superficiais nas quais ocorrem trocas convectiva e radiativa não são necessariamente iguais para cada gabarito, devido a área do gabarito que recebe incidência do teto do hangar não ser necessariamente a mesma de convecção com o ar ambiente, sendo determinadas conforme a disposição do ferramental no hangar e aferidas por meio do projeto virtual no CATIA.

3.3.2 Análise discreta

Considerando os intervalos de medição de uma hora, pode-se aplicar uma solução analítica discreta, transformando o termo da derivada da temperatura em função do tempo em uma razão entre a diferença das temperaturas do gabarito em uma hora, isto é, 3600 segundos. Cabe salientar que, por se tratar de um balanço de energia acumulada durante uma hora, as temperaturas do teto e do ambiente utilizadas no equacionamento são as médias nesse intervalo.

Essa abordagem considera que, dentro do período analisado, o gabarito recebe uma quantidade constante de energia térmica do teto e do ambiente, enquanto na realidade, em um processo de aquecimento, por exemplo, a quantidade de energia absorvida é menor no início do período e maior ao final, pois a temperatura do sistema é menor no início do intervalo que no final.

A equação 3.6 é determinada sendo $T_{G_{x+1}}$ a temperatura do gabarito ao final do período, a incógnita:

$$- \left[h(T_{G_{x+1}} - T_{\infty_m})A_{s,c} + \varepsilon\sigma(T_{G_{x+1}}^4 - T_{\text{teto}_m}^4)A_{s,r} \right] = m_{GC} \frac{T_{G_{x+1}} - T_{G_x}}{3600} \quad (3.6)$$

Reorganizando na forma de polinômio de quarto grau, tem-se a 3.7:

$$(\varepsilon\sigma A_{s,r}) T_{G_{x+1}}^4 + \left(\frac{m_{GC}}{3600} + hA_{s,c} \right) T_{G_{x+1}} - \left(\frac{m_{GC}T_{G_x}}{3600} + \varepsilon\sigma A_{s,r}T_{\text{teto}_m}^4 + hA_{s,c}T_{\infty_m} \right) = 0 \quad (3.7)$$

Dentre os parâmetros de entrada está a temperatura do gabarito no início do período, T_{G_x} , que é fornecida pela medição ou arbitrada para o primeiro período a ser analisado. Para os períodos seguintes, esse valor é o resultado da análise anterior. Por exemplo, a primeira hora analisada é das 6 às 7 horas, o dado de entrada T_{G_6} é a temperatura do gabarito às 6 horas e o resultado é a temperatura às 7 horas, T_{G_7} . Já no período seguinte entre as 7 horas e 8 horas, o resultado anterior torna-se a nova entrada, e assim por diante.

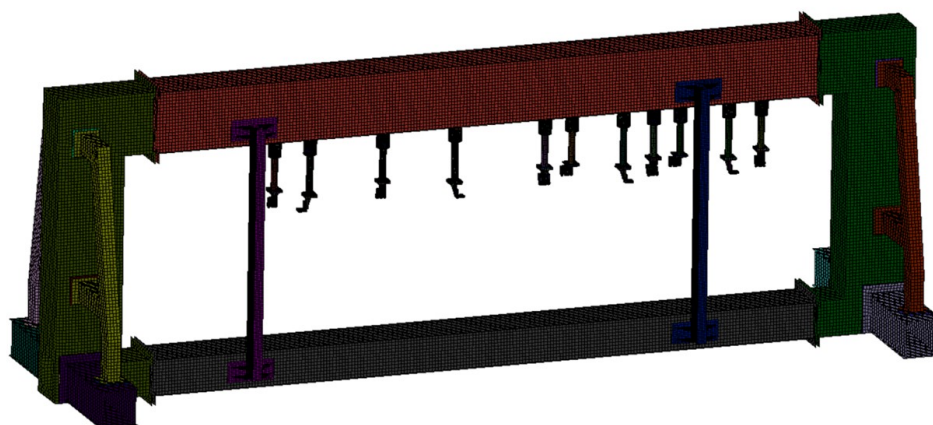
3.4 Modelo estrutural numérico

Para simular a dilatação dos ferramentais com base nas temperaturas medidas e estimadas, foi construído um modelo em elementos finitos de cada estrutura. Utilizou-se o software APEX da empresa Hexagon como ambiente de simulação.

Como as estruturas são compostas principalmente por chapas metálicas e tubos quadrados, além de parafusos como elementos de ligação, ambos os modelos empregaram malhas de elementos de placa 2D com espessura aplicada. Os posicionadores, por serem maciços, foram modelados com elementos 3D.

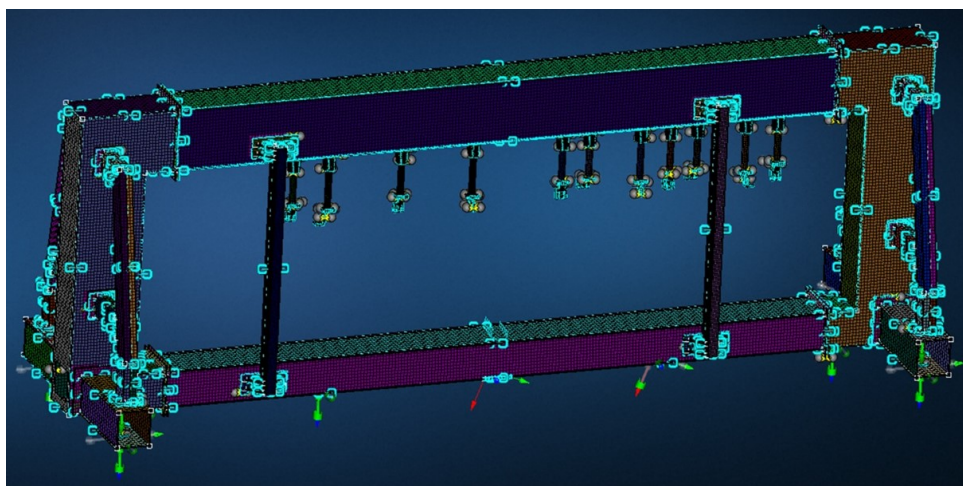
A conexão entre as malhas e seus graus de liberdade foi realizada por meio de elementos rígidos RBE3, respeitando as fixações e os eixos livres de cada gabarito. Foram escolhidos três nós centrais na base de cada modelo e, utilizando os mesmos elementos rígidos, estes nós tiveram todos seus graus de liberdade restringidos, a fim de representar a dilatação em relação ao centro de gravidade da estrutura. Haja vista que o centro de gravidade está localizado no centro do ferramental onde não há material, foram escolhidos esses nós centrais da base que estão na mesma cota longitudinal para fazer essa representação.

Figura 11 – Malha do modelo do gabarito 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Fixações do gabarito 2.



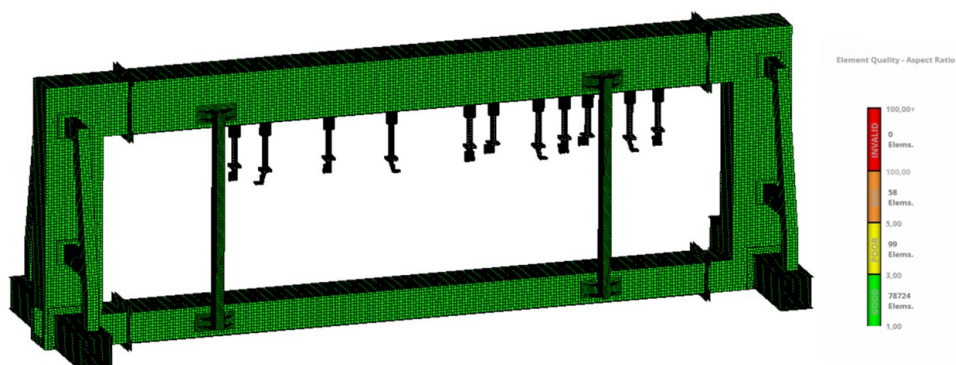
Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto à verificação da qualidade das malhas empregadas, foram considerados dois critérios: *aspect ratio* e *skewness*. O critério *aspect ratio* estabelece uma relação entre a maior e menor dimensão de cada elemento, essa relação indica o nível de distorção do mesmo, valores próximos de 1 são considerados ideais pois estes elementos distribuem melhor a informação e minimizam erros. O critério *skewness* calcula o desvio de cada elemento em relação a um

formato ideal, quadrado equiangular ou triângulo equilátero por exemplo, e valores altos indicam alto nível de distorção.

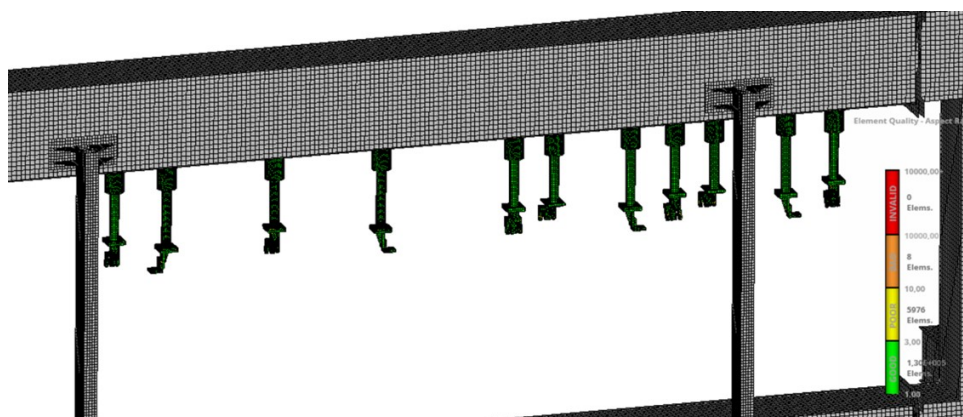
Em todas as malhas não foram detectados elementos inválidos, sendo a maioria de ótima qualidade. Considerou-se a gravidade nos dois modelos. Por fim, cada malha recebeu um valor de temperatura inicial e final, complementando assim as condições de contorno do modelo.

Figura 13 – Qualidade da malha 2D via *Aspect Ratio*.

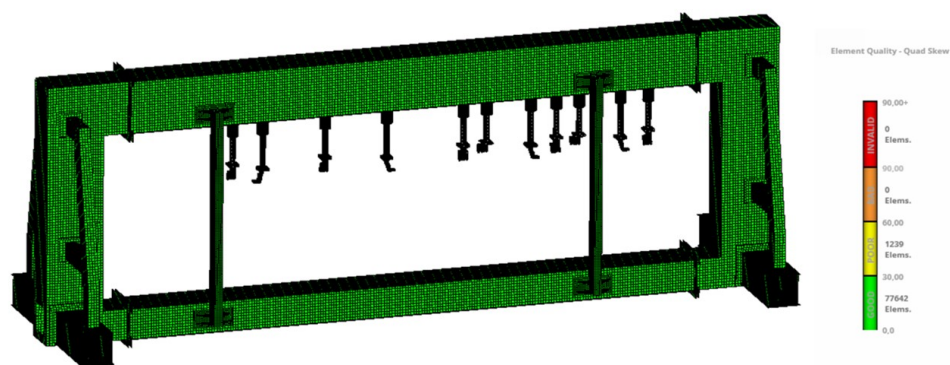


Fonte: Elaborada pelo autor.

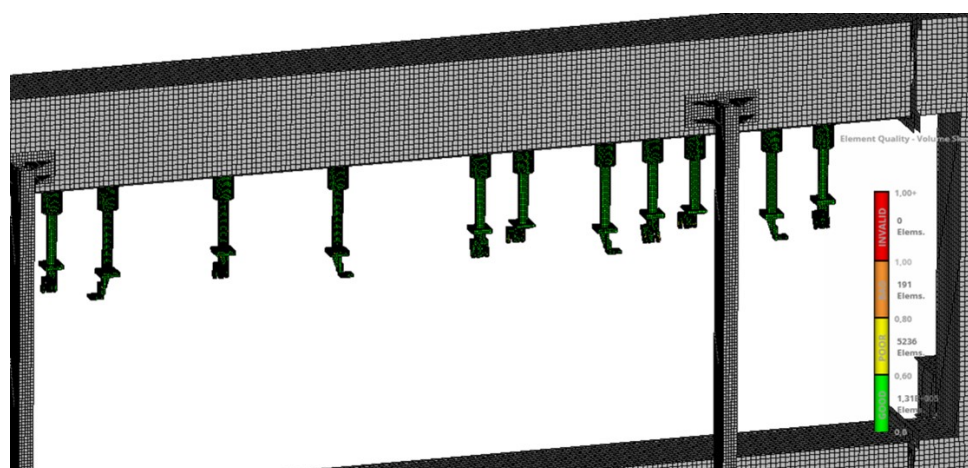
Figura 14 – Qualidade da malha 3D via *Aspect Ratio*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 – Qualidade da malha 2D via *Skewness*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Qualidade da malha 3D via *Skewness*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

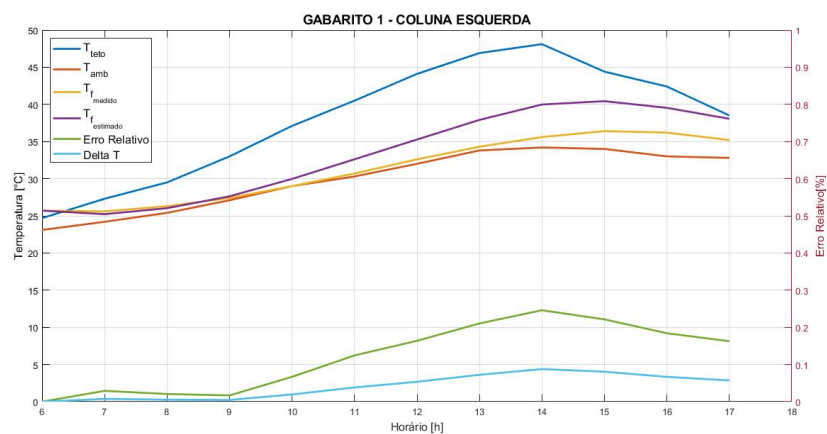
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modelo térmico

De acordo com o procedimento apresentado, a equação 3.7 foi aplicada separadamente à cada parte dos ferramentais. Nas tabelas e gráficos a seguir, apresentam-se os resultados obtidos com os dados do primeiro dia de medição. As temperaturas medidas do teto, ambiente e ferramental são, respectivamente, as linhas azul escuro, laranja e amarela, a linha cor roxa indica a temperatura do ferramental calculada pelo modelo da equação 3.7. Além desses dados, foram calculados o erro relativo e o módulo da diferença de temperatura entre os valores medidos e estimados, representados pelas linhas verde e azul claro respectivamente.

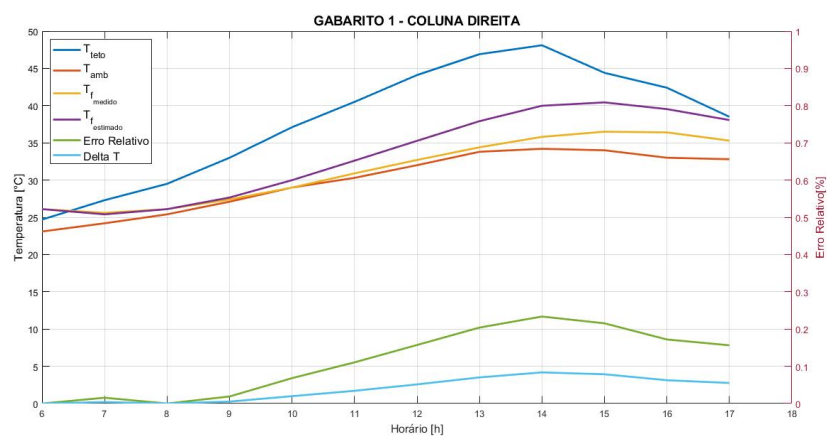
O erro relativo foi calculado a fim de investigar a assertividade do modelo térmico em relação a realidade. O erro médio encontrado foi abaixo de 10%, uma vez que o objetivo do modelo é fazer uma representação geral da variação de temperatura do gabarito durante um dia quente, o erro é extremamente satisfatório. Concomitantemente, o monitoramento da diferença de temperatura é importante para compreensão se os valores estimados se mantêm coerentes à realidade, mesmo se houver um erro baixo. A diferença média encontrada foi de 2 °C, valor aceitável diante a proporção da estrutura.

Figura 17 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: coluna esquerda do gabarito 1.



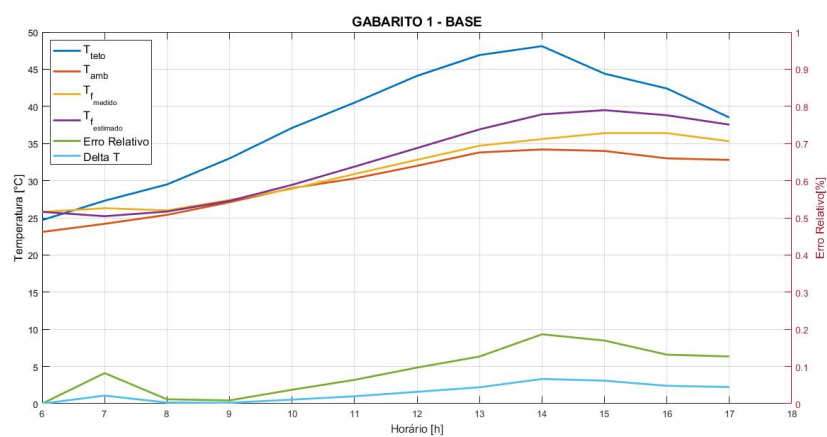
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 18 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: coluna direita do gabarito 1.



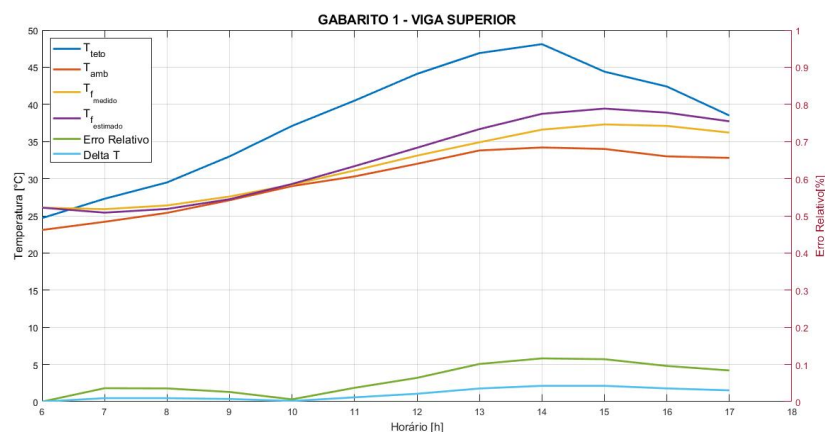
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: base do gabarito 1.



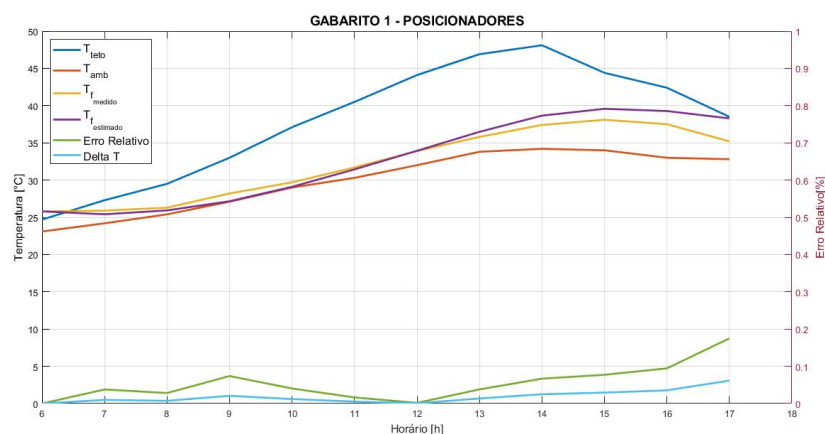
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: viga superior do gabarito 1.



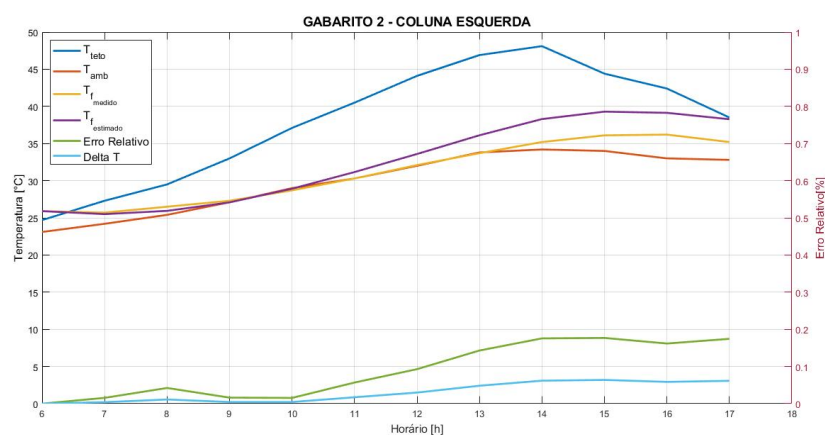
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: posicionadores do gabarito 1.



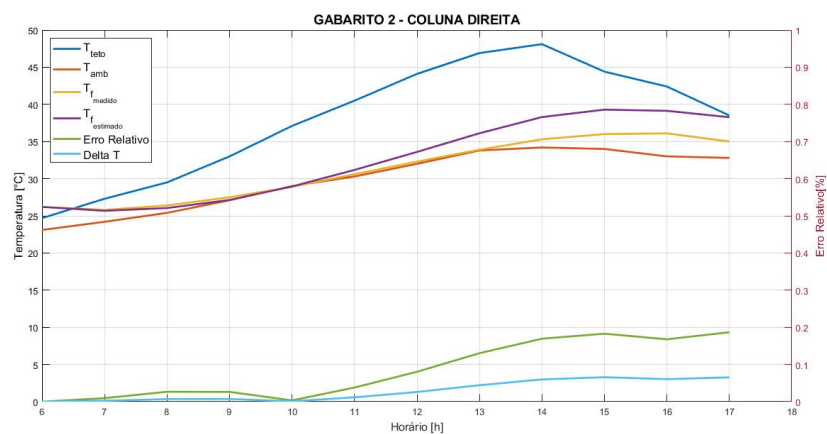
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: coluna esquerda do gabarito 2.



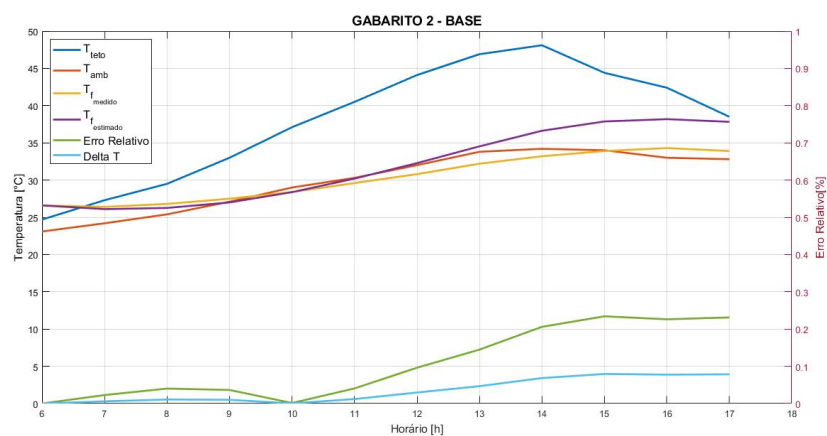
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: coluna direita do gabarito 2.



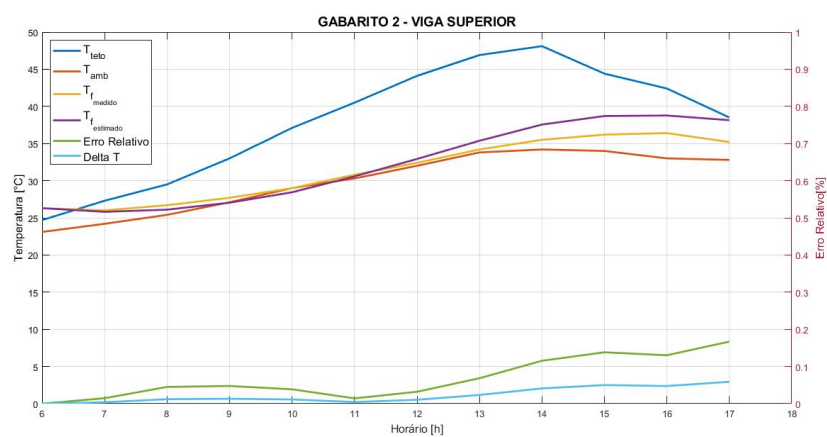
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: base do gabarito 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 – Temperaturas medidas, estimadas e erro entre elas: viga superior do gabarito 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É extremamente importante salientar que o modelo formulado através da equação 3.7 é uma simplificação da realidade, o método da capacitância global foi escolhido pois possui uma formulação relativamente simples e de fácil manipulação. Contudo, essa metodologia possui erros associados: não consideração de outras trocas térmicas, aproximação de certos parâmetros de entrada do modelo e propagação de erro a cada iteração.

A fim de quantificar o valor de erro médio que represente a magnitude dos desvios de cada parte dos gabaritos, foram escolhidos as métricas de Erro Médio Absoluto (MAE) e Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE), apresentados na equação 4.1 e equação 4.2 respectivamente, segundo (HYNDMAN; KOEHLER, 2006).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.1)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4.2)$$

O qual y_i é o valor de temperatura medido, $\hat{y}_i$ o valor de temperatura estimado e n o número de medições feito.

Essas métricas foram escolhidas por tratarem os erros de forma linear e não ponderada, ou seja, possuírem uma baixa sensibilidade e alta robustez. Como o objetivo das análises é representar, de forma geral, a tendência da variação de temperatura da estrutura e não otimizá-la, além de apresentar o erro na mesma unidade dos dados, as métricas escolhidas são coerentes. Os erros na estimativa de temperatura de cada parte dos gabaritos foram calculados e apresentados na Tabela 5 e Tabela 6. Para o objetivo deste trabalho os resultados encontrados mostraram-se suficientemente representativos uma vez que o maior Erro Percentual Absoluto Médio é de 6%.

Tabela 5 – Gabarito 1 - MAE e MAPE

Tipo de Erro	Coluna Esquerda	Coluna Direita	Base	Viga Superior	Posic.
MAE	2,05 °C	1,94 °C	1,48 °C	1,03 °C	0,92 °C
MAPE	6,02%	5,63%	4,34%	2,99%	2,71%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Gabarito 2 - MAE e MAPE

Tipo de Erro	Coluna Esquerda	Coluna Direita	Base	Viga Superior
MAE	1,52 °C	1,46 °C	1,75 °C	1,15 °C
MAPE	4,46%	4,25%	5,33%	3,38%

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Modelo estrutural numérico

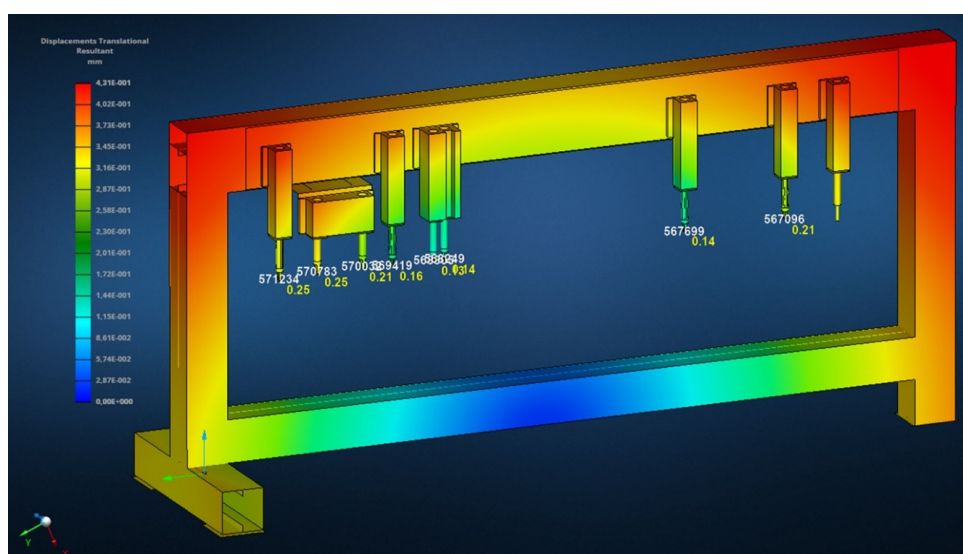
Uma vez medidas e estimadas todas as temperaturas dos ferramentais, foram realizadas as simulações de dilatação térmica nos modelos estruturais. O principal interesse dessa análise é verificar os consequentes deslocamentos dos posicionadores dos gabaritos, responsáveis pelo suporte e posicionamento do produto dentro da tolerância geométrica. Esses deslocamentos, se excessivos, contribuem significativamente para o não atendimento de requisitos.

Os deslocamentos foram analisados conforme eixos de referência alinhados com o ferramental: eixo Z (vertical), eixo X (transversal) e eixo Y (longitudinal). No caso do gabarito 2, devido à presença de guias lineares que compensam os deslocamentos longitudinais, a dilatação no eixo Y não foi considerada. Para fins de comparação, foram realizadas duas simulações por modelo: uma com a maior temperatura medida e outra com a maior estimada pelo modelo térmico. A temperatura inicial foi considerada como 20 °C, o padrão de medições tridimensionais, para desconsiderar quaisquer deslocamentos iniciais.

Os posicionadores são identificados por uma numeração crescente da esquerda para a direita, ou seja, o posicionador mais à esquerda é o de número 1, o próximo de número 2, e assim por diante.

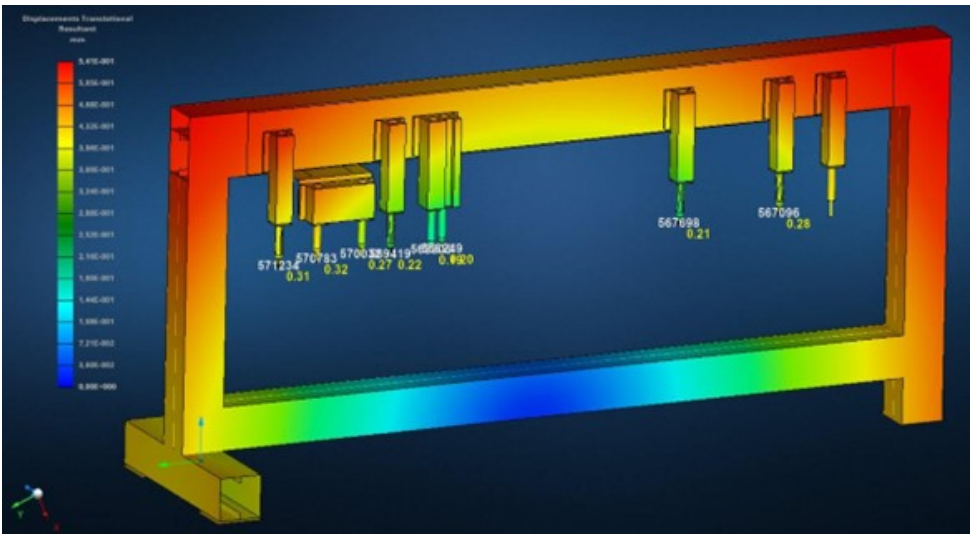
Os resultados são apresentados nas figuras e tabelas a seguir. Os dados das tabelas referem-se aos valores de deslocamento de cada posicionador encontrados nas simulações feitas com a temperatura medida dos gabaritos, e para o cálculo do erro relativo foi utilizado o valor do deslocamento resultante da simulação feita com a temperatura medida em relação ao valor do deslocamento resultante da simulação feita com a temperatura estimada.

Figura 26 – Deslocamentos resultantes do gabarito 1 com temperaturas medidas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – Deslocamentos resultantes do gabarito 1 com temperaturas estimadas.



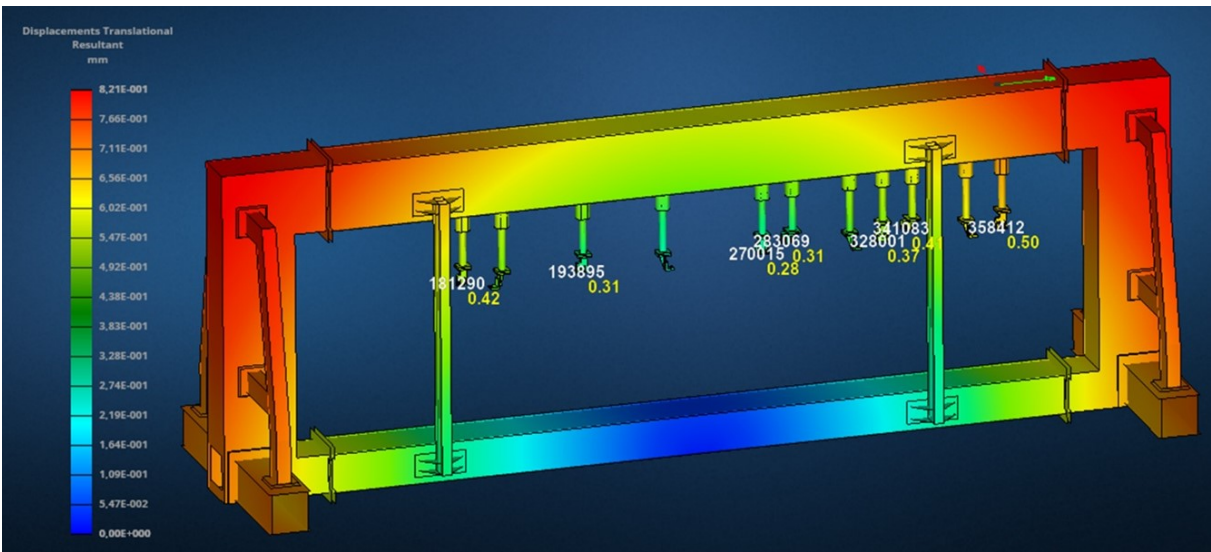
Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Deslocamentos [mm] de cada posicionador do gabarito 1 com temperaturas medidas e erro relativo em relação à temperatura estimada.

Eixo	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7	Pos. 8
Transversal (X)	-0,17	-0,21	-0,19	-0,14	-0,12	-0,12	-0,05	-0,02
Longitudinal (Y)	0,17	0,14	0,09	0,09	0,04	0,05	-0,13	-0,21
Vertical (Z)	0,04	0,01	0,00	-0,02	-0,03	-0,04	-0,02	0,03
Resultante	0,25	0,25	0,21	0,16	0,13	0,4	0,14	0,21
Erro	24%	28%	28%	37%	46%	43%	50%	33%

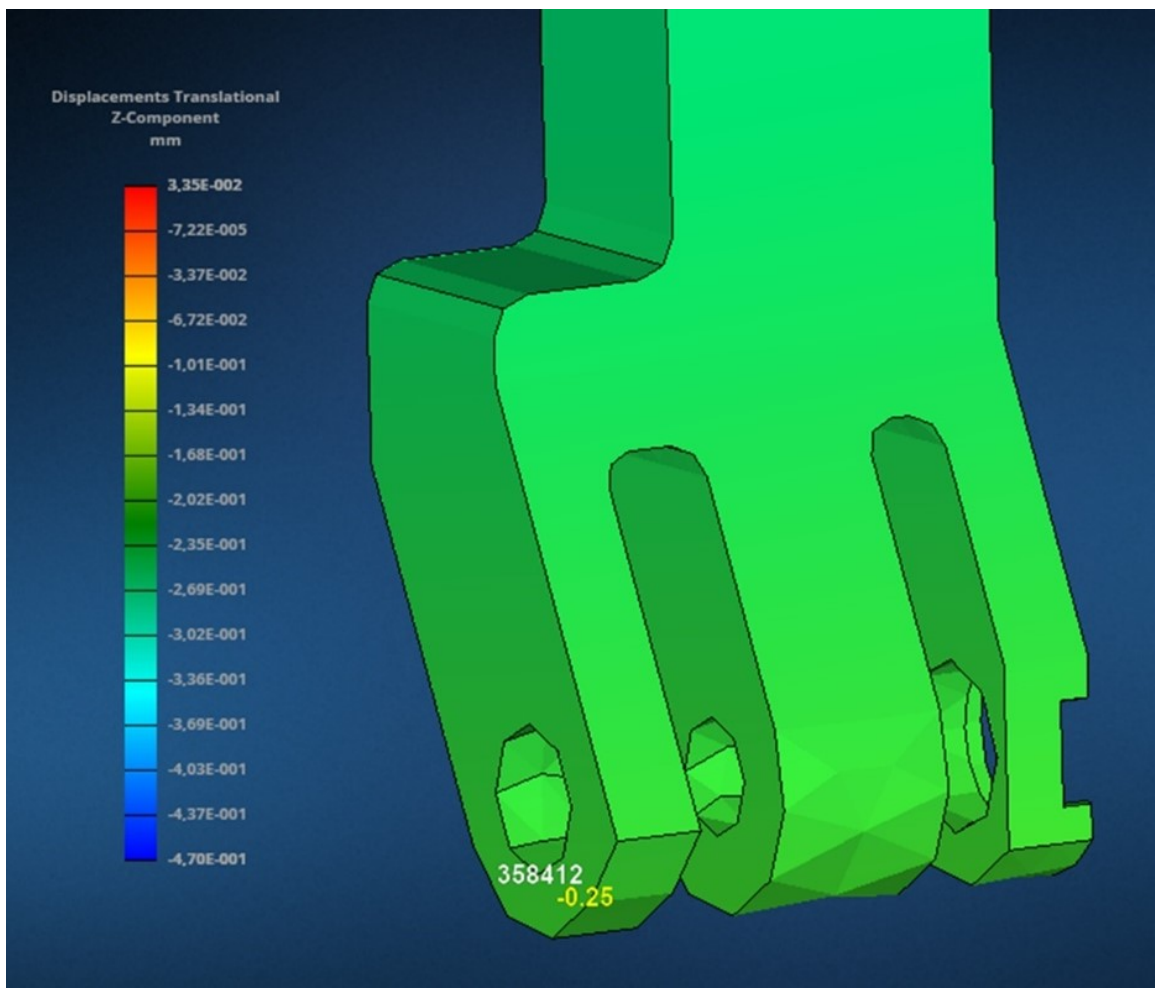
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Deslocamentos resultantes do gabarito 2 com temperaturas medidas.



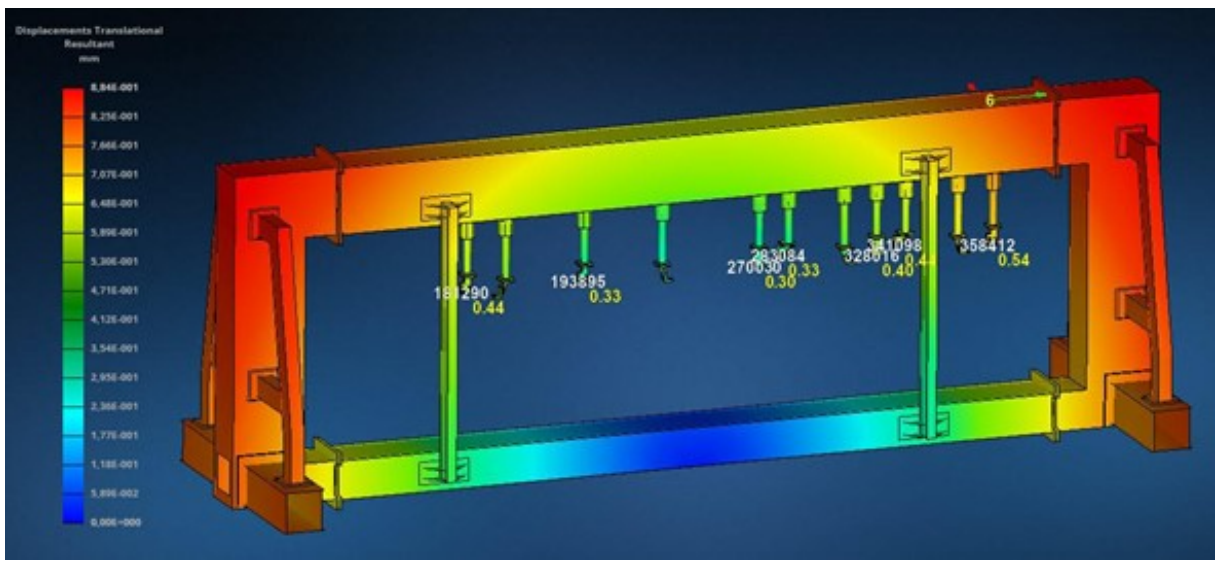
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29 – Deslocamento no eixo vertical de um posicionador do gabarito 2 com temperaturas medidas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Deslocamentos resultantes do gabarito 2 com temperaturas estimadas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Deslocamentos [mm] de cada posicionador do gabarito 2 com temperaturas medidas e erro relativo em relação à temperatura estimada.

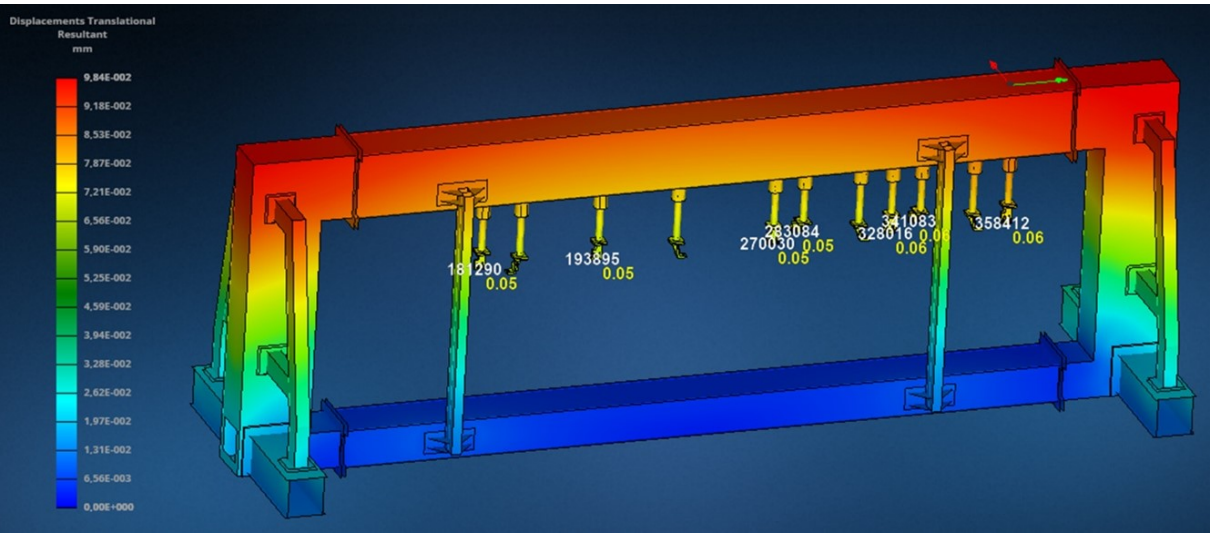
Eixo	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7
Transversal (X)	0,03	-0,01	-0,06	-0,05	-0,10	-0,09	-0,14
Vertical (Z)	-0,26	-0,27	-0,26	-0,27	-0,26	-0,27	-0,25
Resultante	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29
Erro	8%	4%	7%	7%	7%	7%	14%

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante ressaltar que nos resultados apresentados na Figura 28 e Figura 30 foi considerado os deslocamentos na direção longitudinal (Y) no cálculo dos deslocamentos resultantes, enquanto na Tabela 8 não foi considerado pois nessa direção há guias lineares que compensam os deslocamentos.

Ao verificar os dados de temperatura medidos no gabarito 2, Figura 24 e Figura 25, observa-se uma diferença de 2 °C entre a viga superior/colunas e a base. Essa diferença de temperatura entre partes da estrutura, segundo (SILVA, 2024), pode amplificar os efeitos da dilatação do ferramental. Para entender se esse fenômeno, por si só, provoca deslocamentos excessivos nos posicionadores, realizou-se uma simulação aplicando temperatura final de 22 °C na viga superior e colunas, e 20 °C na base, mantendo a diferença observada. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 9, sendo o maior deslocamento resultante de 0,05 mm o qual é um valor baixo, haja vista a magnitude dos deslocamentos devido a dilatação durante o dia.

Figura 31 – Deslocamentos resultantes do gabarito 2 com gradiente de temperatura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 9 – Deslocamentos [mm] de cada posicionador do gabarito 2 com gradiente de temperatura.

Eixo	Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5	Pos. 6	Pos. 7
Transversal (X)	-0,03	-0,04	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
Vertical (Z)	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02
Resultante	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Fonte: Elaborada pelo autor.

CONCLUSÕES

EM primeiro lugar, os efeitos de um dia quente sobre os gabaritos em questão, conforme evidenciado pelos resultados das simulações, são significativamente elevados. Os deslocamentos observados, devido à dilatação térmica da estrutura, estão na mesma ordem de grandeza, décimos de milímetros, do requisito dimensional de posição (linha de *hinge*), o que dificulta atingir o requisito estabelecido.

Essas variações dimensionais, quando somadas aos desvios acumulados ao longo das etapas de fabricação, medição e montagem do produto, comprometem a precisão do processo e exigem ações corretivas por parte da equipe de produção. Isso implica em retrabalhos frequentes, consumo adicional de tempo e recursos, além de paralisações na linha de montagem. Tais interrupções não apenas afetam a eficiência operacional, mas também impactam diretamente a qualidade final do produto. Considerando que se trata de um componente crítico para o controle em voo da aeronave, qualquer comprometimento dimensional pode elevar os riscos à segurança operacional, além de custos oriundos de voos de produção adicionais para verificação da qualidade do produto.

Em segundo lugar, a análise dos deslocamentos causados pela diferença de temperatura entre as próprias partes dos gabaritos indicou um impacto reduzido, da ordem de 0,05 mm, o que é pequeno em relação à magnitude das tolerâncias envolvidas. Isso demonstra que, para gradientes térmicos na faixa de 2 °C, as variações estruturais são limitadas e não representam, isoladamente, um fator crítico para o desempenho dimensional dos gabaritos. No entanto, é importante destacar que, mesmo com impacto individual reduzido, a diferença de temperatura contribui para a acumulação de desvios ao longo do processo produtivo.

Por fim, o modelo térmico proposto, baseado no Método da Capacitância Global, demonstrou boa aderência ao comportamento térmico real dos ferramentais analisados, o que é coerente com a natureza simplificada, porém eficaz, da abordagem adotada. As temperaturas simuladas dos gabaritos apresentaram o comportamento esperado, permanecendo entre os valores medidos

no teto e no ambiente do hangar, com variações ao longo do dia que seguiram a mesma tendência observada experimentalmente.

As maiores discrepâncias entre os valores estimados e medidos, conforme apresentado na Seção 3.2, foram da ordem de 4 °C, o que representa um erro relativo de aproximadamente 12%. Ainda assim, o maior Erro Absoluto Médio entre as temperaturas simuladas e registradas foi de apenas 2 °C, o qual representa o maior Erro Percentual Absoluto Médio de 6%, o que reforça a representatividade e a confiabilidade do modelo térmico.

Este poderá ser aplicado em gabaritos com características físicas e localizados em hangares diferentes, contudo em condições ambientais semelhantes aos analisados por este trabalho. Para o ajuste do modelo em demais situações deve-se realizar as devidas alterações das características do ferramental em questão e aferição das temperaturas do teto e ambiente do hangar. Dois parâmetros extremamente importantes para a análise são a emissividade do ferramental e o coeficiente de convecção do hangar. O primeiro poderá ser um intervalo de valores registrado em tabelas conforme a característica da superfície do dispositivo, se houver a estrutura física e medições sobre ela o valor de emissividade a ser escolhido deve ser o que melhor ajustar o modelo a realidade, caso contrário o valor médio é indicado. O segundo é indicado seguir os valores apresentados por (NETO, 2010), caso o local não apresente ventilação excessiva.

As simulações estruturais realizadas com base nas temperaturas estimadas pelo modelo e nas temperatura medidas também apresentaram resultados consistentes entre elas. O gabarito 2, por exemplo, apresentou uma diferença máxima entre os deslocamentos obtidos das duas simulações de 0,04 mm — erro relativo inferior a 14%. Já o gabarito 1, embora tenha apresentado erros relativos maiores, manteve uma diferença média de 0,06 mm, valor ainda considerado baixo e compatível com os requisitos de projeto.

Dessa forma, conclui-se que o modelo térmico proposto não apenas representa adequadamente o comportamento térmico dos dispositivos, como também mantém essa precisão na estimativa das variações dimensionais induzidas por dilatação térmica. Isso valida sua aplicação para prever o comportamento de outros gabaritos localizados no mesmo local em dias de altas temperaturas. Com base nesses dados, é possível estimar se os requisitos geométricos desses dispositivos serão comprometidos e, por consequência, se haverá impacto no processo de montagem.

Além disso, o modelo permite ser utilizado de forma preventiva na análise de novos gabaritos ainda em fase de projeto, uma vez que os únicos dados de entrada necessários são as temperaturas do teto e do ambiente do hangar. Essa abordagem possibilita antecipar possíveis desvios dimensionais, viabilizando a implementação de soluções de engenharia ainda na etapa de desenvolvimento, contribuindo para a redução de retrabalhos, aumento da eficiência produtiva e mitigação de riscos à qualidade e à segurança do produto.

Por fim, uma vez aplicado o método e observado que a montagem dos gabaritos pode ser comprometida devido a dilatação térmica da estrutura, faz-se necessário a aplicação de soluções para manter a confiabilidade do processo. Primeiramente, pode-se aplicar no projeto dos gabarito guias lineares compostas de materiais com baixíssimo coeficiente de dilatação, essas guias servem como um apoio intermediário entre os posicionadores e a estrutura as quais compensam os deslocamentos naturais da estrutura devido a variação de temperatura. Outras possibilidades são a aplicação de uma manta térmica sobre a estrutura que diminui a área de troca radiativa e convectiva entre o gabarito e o ambiente/teto, ou a climatização completa do hangar.

REFERÊNCIAS

- AEROFLAP. 2016. Disponível em: <<https://www.aeroflap.com.br/embraer-avanca-para-montagem-final-do-e-jet-e2/>>. Acesso em: 15/04/2025. Citado na página 19.
- AEROSPACE, A. 2019. Disponível em: <<https://www.aeroflap.com.br/embraer-avanca-para-montagem-final-do-e-jet-e2/>>. Acesso em: 15/04/2025. Citado na página 20.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Citado na página 27.
- CBIC. 2023. Disponível em: <<https://www.labzeb.com/post/a-temida-curva-de-macleamy>>. Acesso em: 15/05/2025. Citado na página 21.
- CONTEMP. 2022. Disponível em: <http://contemp.com.br/api/arquivos/tabela_de_emissividade_2022_nova_identidade.pdf>. Acesso em: 06/03/2025. Citado na página 27.
- COOK, R. D. **Finite Element Modeling for Stress Analysis**. Madison: University of Wisconsin, 1995. Citado na página 25.
- FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: Érica, 2000. Citado na página 25.
- HYNDMAN, R. J.; KOEHLER, A. B. Another look at measures of forecast accuracy. **International Journal of Forecasting**, 2006. Citado na página 41.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2014. Citado nas páginas 17, 22, 23 e 24.
- INSTRUMART. 2025. Disponível em: <https://www.instrumart.com/products/10114/fluke-62-mini-infrared-thermometer?srsId=AfmBOorQuGlGdwsxwvPIQaYuMEwBLf_X128cwo2sUk-iPGEMXfaF3g>. Acesso em: 06/05/2025. Citado na página 28.
- MANUFACTURING, C. 2025. Disponível em: <<http://carrlane.com/engineering-resources/industry-insights/key-considerations-for-selecting-aerospace-tooling>>. Acesso em: 06/03/2025. Citado na página 19.
- MELLO, C. H. P.; SILVA, C. E. S. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Custos-e-beneficios-nas-diferentes-fases-do-PDP_fig1_274282010>. Acesso em: 15/05/2025. Citado na página 21.
- NETO, C. B. **TRANSFERÊNCIA DE CALOR (TCL): Volume 1 – Parte 3**. Santa Catarina, 2010. Citado nas páginas 27 e 48.

SILVA, F. **Análise da deformação de ferramental de montagem de asa por dilatação térmica resultante da variação de temperatura**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2024. Citado nas páginas 16, 18 e 45.

SILVA, J. **Título da dissertação**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal Minas Gerais - Campus Bambuí, Bambuí, 2011. Citado nas páginas 28 e 32.

STECKLEIN, J. M.; DABNEY, J.; DICK, B.; HASKINS, B.; LOVELL, R.; MORONEY, G. Error cost escalation through the project life cycle. **NTRS - NASA Technical Reports Server**, 2004. Citado na página 20.

TESTO. 2024. Disponível em: <<https://testo-incoterminas.com.br/produto/data-logger-de-temperatura-com-sensor-interno-externo-e-2-canais-testo-175-t2/>>. Acesso em: 06/05/2025. Citado na página 28.

TRANSMETRA. 2025. Disponível em: <https://www.transmetra.ch/images/transmetra_pdf/publikationen_literatur/pyrometrie-thermografie/emissivity_table.pdf>. Acesso em: 06/03/2025. Citado na página 27.