

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS E SISTEMAS
DE INFORMAÇÃO

THIAGO TADAO ALVES KURIMOTO

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
DIDÁTICA PARA ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR
EM JUNTA SOLDADA**

Santo André

2024

THIAGO TADAO ALVES KURIMOTO

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL
DIDÁTICA PARA ESTUDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR
EM JUNTA SOLDADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de pós-graduação em TSI - Tecnologia e Sistemas da Informação, da Universidade Federal do ABC, como requisito parcial para a conclusão do curso.

Orientador: Prof. Dr. Mario Gazziro

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above the text 'Assinatura do Orientador'.

Assinatura do Orientador

Santo André

2024

RESUMO

As técnicas tradicionais de estudo da transferência de calor em juntas soldadas, como ensaios experimentais em corpos de prova reais, são dispendiosas e demoradas. O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma simulação computacional para ser utilizada de modo didático para o estudo da transferência de calor em junta soldada. Um script em Python foi elaborado para a simulação de um processo de soldagem com ativação e desativação progressiva de fontes de calor. A visualização detalhada da distribuição de temperatura na junta soldada e a identificação das diferentes zonas afetadas pelo calor, demonstraram a aplicabilidade da ferramenta na previsão do comportamento térmico durante a soldagem.

Palavras-chave: soldagem; simulação; MEF; *Abaqus FEA*®.

ABSTRACT

Traditional approaches for investigating heat transfer in welded joints, such as experimental testing on actual material samples, are often cost-prohibitive and time-intensive. This work aims to develop a computational simulation framework for the didactic study of heat transfer phenomena during welding. A Python script was developed to simulate the welding process, incorporating the progressive activation and deactivation of heat sources. Detailed visualization of the transient temperature distribution within the welded joint and identification of distinct heat-affected zones demonstrate the efficacy of this tool in predicting thermal behavior during welding.

Keywords: welding; simulation; FEM; Abaqus FEA®.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Motivação e justificativa	6
2	OBJETIVO	7
3	METODOLOGIA	7
3.1	Soldagem e processos de soldagem	7
3.2	Transferência de calor em juntas soldadas	10
3.3	Método dos elementos finitos	11
3.4	Simulação computacional de processos de soldagem	12
3.5	Software Abaqus FEA®	14
3.6	Obtenção e Instalação do software <i>Abaqus FEA®</i>	16
3.6.1	Obtenção do Software	16
3.6.2	Requisitos de Sistema	16
3.6.3	Instalação	17
3.7	Modelagem 3D da Junta Soldada	17
3.7.1	Aquisição de dados geométricos.....	17
3.7.2	Seleção do Software CAD	18
3.7.3	Modelagem da Junta Soldada	18
3.8	Simulação do Processo de Soldagem por Elementos Finitos	19
3.8.1	Definição das Propriedades dos Materiais	19
3.8.2	Definição das Condições de Contorno e definição da Malha	19
3.8.3	Simulação da Soldagem.....	21
3.8.4	Validação com Resultados Experimentais	26
4	RESULTADOS	26
5	DISCUSSÃO	31
6	CONCLUSÃO	32
	BIBLIOGRAFIA	34

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e justificativa

A soldagem é um processo de união de materiais, com ou sem a presença de pressão, amplamente utilizado em diversos setores industriais, como construção civil, automotivo, aeroespacial e naval, para o corte de peças, bem como recuperação de peças desgastadas e recobrimento de superfícies metálicas que necessitam de características especiais. A qualidade da junta soldada é fundamental para garantir a segurança e confiabilidade estrutural, pois, as temperaturas utilizadas durante a operação de soldagem causam alterações bruscas – pontuais ou não – no material soldado, ocasionando alterações tanto estruturais, quanto nas propriedades do material [1]. Tais mudanças acarretam a degradação das propriedades do material utilizado, ocasionando a perda na confiabilidade na utilização do material em estruturas [2]. O estudo da transferência de calor dentro dos processos de soldagem é crucial para o controle das características físico-químicas tanto do material base quanto do cordão de solda, o que garante a obtenção de juntas com propriedades adequadas [3].

As técnicas tradicionais de estudo da transferência de calor em juntas soldadas, como ensaios experimentais em corpos de prova reais, são dispendiosas e demoradas. Tais técnicas podem ser de difícil acesso para quem visa estudar o comportamento de juntas complexas [4][5].

A simulação numérica computacional surge como uma alternativa promissora para o estudo da transferência de calor em juntas soldadas. A simulação permite analisar o comportamento do processo em detalhes e identificar os parâmetros que mais influenciam a qualidade da junta [6][7].

De acordo com a AWS – American Welding Society [8], soldagem é a “operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição.”, tendo por consequência a solda como produto do processo. Com o avanço das áreas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), foram criados novos métodos de união de materiais, tanto para os métodos de união por forças mecânicas – exemplos como rebiteamento e parafusamento, quanto para união por forças intermoleculares ou interatômicas – fusão ou colagem, fazem com que seja extremamente difícil não termos ao nosso redor peças que não estejam unidas de algum modo.

A união de metais já ocorria desde os anos 3000 a.C, onde a brasagem era a utilizada para a fabricação de ligas (ouro, cobre, chumbo, estanho), onde somente o calor gerado por carvão ou lenha era utilizado como fonte de energia principal [9]. Somente no final do século 19, com o advento da descoberta da energia elétrica, que os processos de soldagem por arco elétrico foram desenvolvidos e passaram a ser empregados mais no reparo do que na fabricação de estruturas, mesmo que de modo rudimentar. Com a eclosão da 1ª Guerra Mundial, os processos de soldagem passaram a ser amplamente utilizados como meio de fabricação de estruturas metálicas [9].

2 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma simulação computacional para ser utilizada de modo didático para o estudo da transferência de calor em junta soldada.

Os objetivos específicos são:

- I. Criar um modelo de corpo de prova em 3D que representa uma junta soldada real;
- II. Simular o processo de soldagem utilizando o método dos elementos finitos via software *Abaqus Finite Element Analysis®* ou *Abaqus FEA®*;
- III. Analisar a distribuição de temperatura na junta soldada;
- IV. Validar a simulação com resultados experimentais de trabalhos acadêmicos já consolidados;
- V. Desenvolver um material didático que utilize a simulação para o ensino da transferência de calor em juntas soldadas e quais são suas implicações práticas nas transformações do material base.

3 METODOLOGIA

3.1 Soldagem e processos de soldagem

Mais do que uma simples técnica de união, a soldagem envolve um conjunto complexo de princípios físicos, químicos e metalúrgicos que garantem a qualidade e confiabilidade das juntas soldadas.

De acordo com Houldcroft [10], o processo de soldagem deve respeitar quatro

requisitos:

- I. Gerar energia suficiente para ser capaz de unir dois materiais, sendo similares ou não;
- II. Limpeza das superfícies que serão unidas, para remover contaminação;
- III. Evitar a contaminação atmosférica da região da soldagem;
- IV. Assegurar o controle da transformação de fase, de modo a solda alcançar propriedades físicas, químicas ou mecânicas desejadas.

Além dos requisitos, existem alguns fatores que são determinantes para a escolha do processo de soldagem, destacando [2]:

- Material a ser soldado: cada material possui características físico-químicas específicas que influenciam na escolha do processo;
- Espessura da chapa: a espessura da chapa a ser soldada determina a necessidade de um processo com penetração adequada;
- Geometria da junta: a geometria da junta soldada pode influenciar na escolha do processo e na técnica de soldagem;
- Nível de precisão desejado: o nível de precisão desejado na solda determina a escolha de um processo mais preciso;
- Produtividade: a produtividade desejada para o processo de soldagem influencia na escolha do processo e na automatização do processo;
- Custo: o custo do processo de soldagem deve ser considerado na escolha do processo, dos equipamentos e consumíveis.

A soldagem por fusão oferece um leque de opções para atender às mais variadas demandas, cada processo com suas características, vantagens e desvantagens. Destacamos 3 processos por arco elétrico mais conhecidos [1]:

- I. *Shielded Metal Arc Welding* ou Soldagem com eletrodo revestido (SMAW): processo versátil e de fácil aprendizado, onde a solda é obtida a partir do aquecimento do eletrodo com um arco elétrico. O eletrodo é formado por uma “alma” metálica e revestido por um misto de materiais e minerais que formam a escória e estabilizam o arco, gerando proteção da poça de fusão, homogeneidade e influencia na composição química e nas características metalúrgicas do cordão de solda;
- II. *Gas Metal Arc Welding* (GMAW): processo semiautomático ou automático de alta produtividade, ideal para soldagem de chapas finas e médias. O arco

elétrico é estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo que também é um consumível. A proteção da poça de fusão e do arco elétrico é feita através de um gás ou uma mistura de gases que podem ser inertes em um processo chamado MIG (*Metal Inert Gas*) ou ativos em um processo chamado MAG (*Metal Active Gas*);

- III. *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW): conhecido como processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), a solda é gerada a partir do arco gerado por um eletrodo de tungstênio não consumível e metal base. O gás inerte (Argônio ou uma mistura entre Argônio e Hélio) funciona como proteção ao eletrodo e a zona da solda, que pode utilizar ou não de metal de adição (autógena). Preciso e de alta qualidade, ideal para soldagem de metais exóticos e tubos finos;

A soldabilidade é a facilidade com que um material se une por meio da soldagem, formando uma junta contínua e resistente, sem alterar significativamente as propriedades mecânicas originais do material. É como se fosse a "capacidade de soldagem" do material [1][2]. Diversos fatores influenciam a soldabilidade, incluindo:

- Composição química: A composição química do material desempenha um papel fundamental. Alguns elementos, como o enxofre e o fósforo, podem prejudicar a soldabilidade, tornando o material mais propenso a trincas e fragilidade;
- Propriedades físicas: A condutividade térmica, o coeficiente de dilatação térmica e o ponto de fusão do material também influenciam a soldagem. Materiais com alta condutividade térmica dissipam calor rapidamente, dificultando a fusão e a formação de uma solda adequada;
- Processo de soldagem: A escolha do processo de soldagem é importante. Alguns processos, como a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), são mais tolerantes a variações na soldabilidade do material do que outros, como a soldagem a laser.

Materiais classificados como tendo alta soldabilidade requerem menos cuidados durante a soldagem para se obter uma junta de boa qualidade. Por outro lado, materiais com baixa soldabilidade exigem técnicas e procedimentos específicos, como pré-aquecimento, pós-aquecimento e uso de metais de solda especiais, para garantir uma solda bem-sucedida. A avaliação da soldabilidade de um material é crucial para a seleção do processo de soldagem adequado e para o desenvolvimento de procedimentos de soldagem seguros e confiáveis [1][2].

3.2 Transferência de calor em juntas soldadas

A metalurgia da soldagem aplica princípios metalúrgicos bem-estabelecidos para entender as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante a soldagem. É considerada uma área separada devido à natureza única da soldagem. Dentro de um processo de soldagem, diversos fenômenos ocorrem e podem ser mensurados, onde destacamos [3][7][11]:

- Zona Afetada pelo Calor (ZAC): região do metal base que sofre alterações microestruturais devido ao calor da soldagem;
- Penetração: profundidade da solda no metal base;
- Dilatação térmica: aumento do volume do material devido ao aumento da temperatura;
- Tensão residual: tensão interna presente na junta soldada após a solidificação do metal fundido.

Ao contrário da produção ou fabricação de metais, a soldagem envolve reações rápidas em uma pequena área de metal exposta a temperaturas extremas. Por exemplo, a soldagem de aço se caracteriza por [7]:

- Temperaturas de pico muito altas, atingindo milhares de graus Celsius;
- Altos gradientes térmicos, localmente ultrapassando 10.000 graus Celsius por milímetro.;
- Rápidas flutuações de temperatura, localmente excedendo 10.000 graus Celsius por Segundo;

Compreender o histórico térmico de uma solda é crucial para analisar as reações metalúrgicas que ocorrem [3], que podem ser:

- Zona Afetada pelo Calor (ZAC): Região do metal base que sofre alterações microestruturais devido ao calor da soldagem;
- Penetração: Profundidade da solda no metal base;
- Dilatação térmica: Aumento do volume do material devido ao aumento da temperatura;
- Tensão residual: Tensão interna presente na junta soldada após a solidificação do metal fundido.

No entanto, a complexidade do fenômeno de fluxo de calor exige a verificação dessas previsões com dados mais confiáveis obtidos de cálculos numéricos e

medições reais de temperatura. Embora os modelos analíticos tenham suposições simplificadoras, muitas vezes fornecem uma boa imagem qualitativa do histórico térmico durante a soldagem [3][7].

Esta explicação enfatiza o uso de grupos adimensionais, uma ferramenta útil para resumir a distribuição de temperatura na soldagem. Embora tenha desafios, essa abordagem reduz o número de variáveis e nos permite condensar informações sobre o perfil térmico em diagramas bidimensionais.

3.3 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) se consolidou como uma ferramenta fundamental na engenharia e na ciência, permitindo a simulação computacional de diversos fenômenos físicos com alta precisão e eficiência. Sua aplicação abrange uma ampla gama de áreas, desde a análise estrutural de componentes mecânicos até a modelagem de fluxos de fluidos e campos eletromagnéticos [12].

O MEF se baseia na discretização de um problema contínuo em um conjunto de elementos finitos interconectados [13]. Cada elemento possui propriedades geométricas e materiais definidas, e as equações diferenciais que governam o problema original são aproximadas por equações algébricas simples para cada elemento [14]. A solução final é obtida pela montagem e resolução do sistema de equações algébricas global, levando em consideração as condições de contorno e as cargas aplicadas [15]. Suas vantagens são:

- Versatilidade: O MEF pode ser aplicado a uma ampla gama de problemas físicos, com geometrias e condições de contorno complexas;
- Precisão: A precisão da solução pode ser aprimorada pelo refinamento da malha de elementos finitos;
- Eficiência: O MEF é um método computacional eficiente, permitindo a análise de problemas complexos em tempo hábil;
- Visualização: Os resultados da simulação podem ser facilmente visualizados e interpretados por meio de ferramentas de pós-processamento.

Podemos listar como suas principais aplicações:

- Análise Estrutural: O MEF é amplamente utilizado na análise de estruturas, como pontes, edifícios, máquinas e componentes aeroespaciais. Permite determinar tensões, deformações, deslocamentos e outros parâmetros

importantes para avaliar a segurança e o desempenho estrutural [12];

- Mecânica dos Fluidos: O MEF também é utilizado na simulação de fluxos de fluidos, como escoamento em tubulações, aerodinâmica e hidrodinâmica. Permite analisar a velocidade, pressão, temperatura e outras propriedades do fluido [13];
- Transferência de Calor: O MEF pode ser aplicado na simulação de transferência de calor por condução, convecção e radiação. É utilizado em diversos campos, como engenharia térmica, eletrônica e processamento de alimentos [14];
- Eletromagnetismo: O MEF também é utilizado na simulação de campos eletromagnéticos, como campos em motores elétricos, antenas e dispositivos médicos. Permite analisar a distribuição de campos elétricos e magnéticos, tensões e outras propriedades relevantes [15].

Diversos softwares comerciais e de código aberto estão disponíveis para a aplicação do MEF. Alguns exemplos populares incluem *ANSYS*, *Abaqus*, *COMSOL Multiphysics* e *FreeFEM++*. A escolha do software adequado depende das características específicas do problema a ser analisado e das necessidades do usuário.

O Método dos Elementos Finitos se tornou uma ferramenta essencial para a simulação computacional em diversas áreas da engenharia e da ciência. Sua versatilidade, precisão, eficiência e capacidade de visualização o tornam uma ferramenta poderosa para a análise e o projeto de sistemas complexos [12]. A contínua evolução do MEF, aliada ao desenvolvimento de softwares cada vez mais robustos e amigáveis, garante que essa ferramenta continuará a desempenhar um papel fundamental na pesquisa e no desenvolvimento tecnológico nos próximos anos [13][14][15].

3.4 Simulação computacional de processos de soldagem

A soldagem é um processo fundamental na indústria metalúrgica, utilizado para unir peças de metal de forma permanente. A qualidade da solda é crucial para a segurança e confiabilidade das estruturas soldadas, tornando a simulação computacional de processos de soldagem uma ferramenta valiosa para otimizar parâmetros de soldagem, prever defeitos e garantir a qualidade final da solda [16].

Diversos métodos de simulação computacional podem ser aplicados à análise de processos de soldagem, cada um com suas vantagens e desvantagens. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica versátil e poderosa para simular a distribuição de temperatura, tensões e deformações na peça soldada [16]. É amplamente utilizado para prever defeitos como trincas e distorções, além de analisar o comportamento mecânico da solda.

A simulação computacional tem sido aplicada em diversas áreas da soldagem, incluindo:

- Desenvolvimento de novos processos de soldagem: A simulação pode auxiliar no desenvolvimento de novos processos de soldagem mais eficientes e com menor risco de defeitos [16];
- Otimização de parâmetros de soldagem: A simulação pode ser utilizada para otimizar parâmetros de soldagem, como corrente, voltagem e velocidade de soldagem, para obter a melhor qualidade de solda com o menor custo possível;
- Análise de defeitos: A simulação pode ajudar a identificar as causas de defeitos de soldagem, como trincas, distorções e porosidades, e a desenvolver soluções para evitá-los;
- Previsão de propriedades mecânicas: A simulação pode ser utilizada para prever as propriedades mecânicas da solda, como resistência à tração, ductilidade e tenacidade à fratura [17].

A simulação computacional oferece diversos benefícios para a indústria de soldagem, incluindo:

- Redução de custos: A simulação pode ajudar a reduzir custos com testes experimentais e retrabalho, pois permite avaliar diferentes cenários de soldagem sem a necessidade de realizar testes físicos [16];
- Melhoria da qualidade da solda: A simulação pode ajudar a melhorar a qualidade da solda, pois permite identificar e corrigir potenciais problemas antes da soldagem real;
- Aumento da segurança: A simulação pode ajudar a aumentar a segurança das estruturas soldadas, pois permite prever o comportamento da solda sob diferentes cargas e condições de serviço [17].

Apesar dos muitos benefícios, a simulação computacional de processos de soldagem ainda enfrenta alguns desafios, como:

- Modelagem precisa de materiais e processos: O desenvolvimento de modelos precisos de materiais e processos de soldagem é fundamental para obter resultados confiáveis de simulação [16];
- Poder de computação: A simulação de processos de soldagem complexos pode exigir alto poder de computação, o que pode ser um obstáculo para algumas empresas;
- Integração com software CAD/CAM: A integração da simulação computacional com software CAD/CAM pode facilitar o processo de design e fabricação de peças soldadas [17].

A simulação computacional tem se tornado uma ferramenta cada vez mais importante para a indústria de soldagem. Oferece diversas vantagens, como redução de custos, melhoria da qualidade da solda e aumento da segurança. À medida que os métodos de simulação se tornam mais precisos e eficientes, e a integração com outras tecnologias avança, a simulação computacional desempenhará um papel ainda mais crucial no desenvolvimento e aplicação de processos de soldagem inovadores e confiáveis [16][17].

3.5 Software Abaqus FEA®

O software *Abaqus FEA® (Finite Element Analysis)* é uma ferramenta poderosa utilizada para simular o comportamento mecânico de componentes e estruturas. Através da análise por elementos finitos (FEA), o *Abaqus FEA®* permite aos engenheiros prever como um objeto se comportará sob diferentes cargas e condições, fornecendo informações valiosas para o projeto e desenvolvimento de produtos. O *Abaqus FEA®* é utilizado em diversos setores da engenharia, incluindo:

- Engenharia aeroespacial: Análise de estruturas de aeronaves e foguetes;
- Engenharia automotiva: Análise de componentes de veículos, como carrocerias e motores;
- Engenharia civil: Análise de pontes, edifícios e outras estruturas civis;
- Engenharia biomédica: Análise de implantes médicos e outros dispositivos biomédicos;
- Engenharia de manufatura: Análise de ferramentas e processos de manufatura.

O *Abaqus FEA*® oferece diversos benefícios, como: Redução de tempo e custo: pode ser usado para testar virtualmente protótipos, o que pode reduzir significativamente o tempo e o custo do desenvolvimento de produtos; Melhoria da qualidade do produto: pode ajudar a identificar e corrigir problemas de design antes que eles resultem em falhas no produto; Aumento da inovação: permite aos engenheiros explorar novos designs e materiais que antes não eram possíveis.

Exemplos de Aplicações do *Abaqus FEA*® em diferentes setores: Na indústria aeroespacial: usado para analisar a estrutura da fuselagem do Airbus A380, o maior avião de passageiros do mundo; Na indústria automotiva: usado para analisar a carroceria do Ford Mustang, ajudando a melhorar sua rigidez e segurança; Na engenharia civil: usado para analisar a ponte Golden Gate, ajudando a garantir sua segurança sob cargas de vento e terremoto; Na engenharia biomédica: usado para analisar o design de implantes médicos, ajudando a melhorar sua biocompatibilidade e desempenho; Na engenharia de manufatura: usado para analisar ferramentas de estampagem, ajudando a melhorar a qualidade das peças estampadas.

A FEA divide um objeto em pequenos elementos finitos, cada um com propriedades e geometrias definidas. O software então resolve um conjunto de equações matemáticas para determinar a resposta de cada elemento às cargas e restrições aplicadas. A combinação das respostas dos elementos finitos fornece uma solução completa para o comportamento do objeto [18].

O *Abaqus FEA*® oferece uma ampla gama de recursos para análise de elementos finitos, incluindo:

- Análise multifísica: Simula a interação entre diferentes campos físicos, como mecânica, térmica e eletromagnética [18];
- Análise estática: Simula o comportamento de um objeto sob cargas estáticas, como peso próprio ou pressão [19];
- Análise dinâmica: Simula o comportamento de um objeto sob cargas dinâmicas, como vibração ou impacto [20];
- Análise não linear: Simula o comportamento de um objeto com materiais ou geometrias não lineares [21].

O *Abaqus FEA*® é uma ferramenta poderosa que pode ser utilizada para simular o comportamento mecânico de componentes e estruturas. O software oferece

uma ampla gama de recursos para análise estática, dinâmica, não linear e multifísica, e é utilizado em diversos setores da engenharia. O *Abaqus FEA®* pode ajudar a reduzir o tempo e o custo do desenvolvimento de produtos, melhorar a qualidade do produto e aumentar a inovação.

3.6 Obtenção e Instalação do software *Abaqus FEA®*

O *Abaqus FEA®* é um software de análise por elementos finitos (FEA) amplamente utilizado por engenheiros e pesquisadores para simular o comportamento de materiais e estruturas sob diversas cargas e condições. Sua capacidade abrangente e recursos robustos o tornam uma ferramenta valiosa para uma ampla gama de aplicações em diversos setores, incluindo engenharia mecânica, aeroespacial, civil e biomédica.

3.6.1 Obtenção do Software

O *Abaqus FEA®* está disponível para compra através do site da *Dassault Systèmes®*, desenvolvedora do software. É importante escolher a versão adequada às suas necessidades e orçamento, considerando fatores como o tipo de análise que você deseja realizar, o tamanho dos seus modelos e os recursos de que você precisa. Para fins educacionais, a empresa disponibiliza a versão educacional – *Learning Edition* – sendo necessário a criação de uma conta educacional para a liberação do *download*.

3.6.2 Requisitos de Sistema

- I. Os requisitos específicos podem variar de acordo com a versão do software, para a versão educacional, os requisitos são:
- II. Sistema operacional: somente Windows 64-bit são permitidos, mínimo a versão 10;
- III. Processador: Intel ou AMD com velocidade mínima de 2 GHz;
- IV. Memória RAM: 8 GB mínimo, 16 GB ou mais recomendado;
- V. Espaço em disco: 10.5 GB mínimo, mais espaço livre recomendado para armazenamento de modelos e resultados;

VI. Placa de vídeo: Placa gráfica compatível com OpenGL 3.3 ou superior.

3.6.3 Instalação

- I. Baixe o software: acesse o site da *Dassault Systèmes®*, faça o cadastro e execute download do instalador do *Abaqus FEA® Learning Edition*;
- II. Execute o instalador: siga as instruções na tela para concluir a instalação do software. Certifique-se de selecionar o local de instalação desejado e aceitar os termos da licença;
- III. Ative a licença: após a instalação não é necessário o licenciamento, pois o software já vem atrelado a conta educacional;
- IV. Verifique a instalação: inicie software e verifique se está executando de modo correto, sem mensagens de erro aparentes.

3.7 Modelagem 3D da Junta Soldada

3.7.1 Aquisição de dados geométricos

Obter as dimensões e geometria da junta soldada real, incluindo espessura das peças, tipo de chanfro, processo de soldagem e parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem). De modo inicial, utilizaremos dados dimensionais padrão para o material base (Figura 1) para modelar um chanfro simples (Figura 2) e atestar o bom funcionamento do software.

Figura 1 – Dimensões padrão – Peça. Fonte: Autor, 2024.

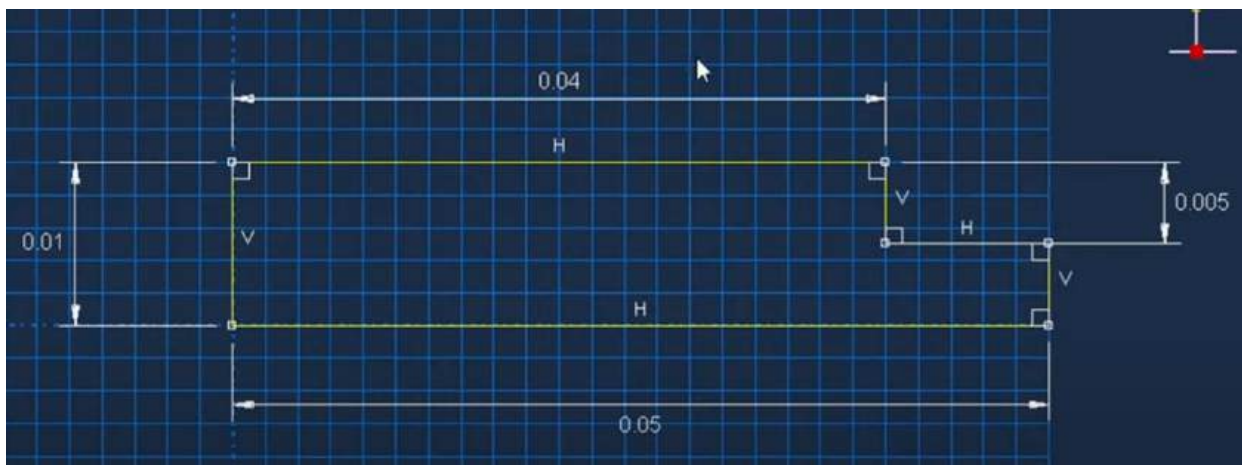
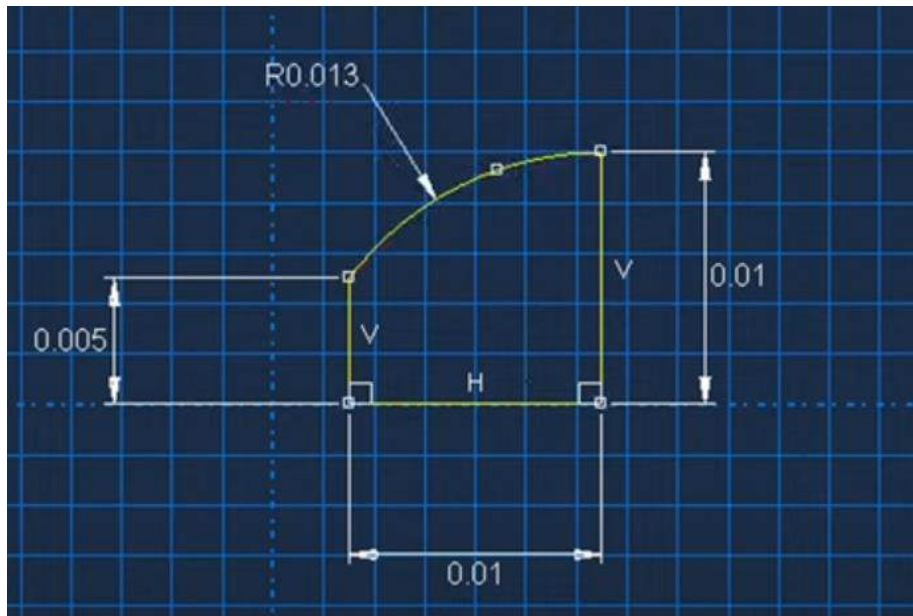


Figura 2 – Dimensões padrão – Chanfro. Fonte: Autor, 2024.



Para os materiais das peças soldadas, como propriedades mecânicas e térmicas (condutividade térmica, densidade, calor específico), utilizaremos como base as propriedades do aço AISI 1050. Consultar normas e procedimentos técnicos relevantes para a soldagem do material específico.

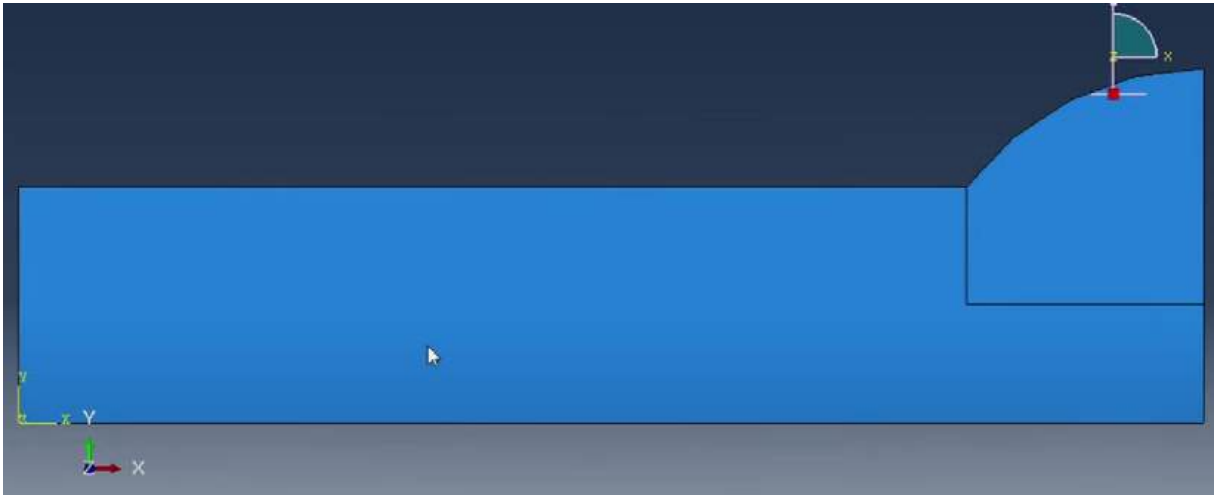
3.7.2 Seleção do Software CAD

Podemos utilizar softwares voltados para a modelagem CAD (*Computer - aided design and drafting*) ou projeto e desenho assistido por computador para a modelagem precisa da junta soldada e posterior importe para o *Abaqus FEA®*. Pelo fato de o *Abaqus FEA®* trabalhar com a modelagem para além da simulação, não será necessário a modelagem externa.

3.7.3 Modelagem da Junta Soldada

Para criar um modelo 3D preciso da junta soldada, incluindo todas as dimensões, geometrias e detalhes relevantes, utilizaremos as seções modeladas de modo individual para no final uni-las (Figura 3). Tal processo torna-se essencial para o trabalho, pois assegura a qualidade da malha 3D, bem como a personalização item a item, o que garante resultados mais precisos na análise por elementos finitos e melhor controle dos parâmetros individuais.

Figura 3 – Montagem material base e junta soldada. Fonte: Autor, 2024.



3.8 Simulação do Processo de Soldagem por Elementos Finitos

3.8.1 Definição das Propriedades dos Materiais

Incluir no software as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais das peças soldadas, obtidas na etapa de coleta de dados, bem como definir as propriedades de soldagem, como condutividade térmica, densidade e calor específico do cordão de solda.

3.8.2 Definição das Condições de Contorno e definição da Malha

Especificar as condições de contorno da simulação, incluindo temperatura inicial das peças, fonte de calor (corrente e voltagem da soldagem) e condições de contorno térmico (convecção, radiação). Considerar as perdas de calor por convecção e radiação durante o processo de soldagem.

Gerar uma malha 3D de elementos finitos no modelo da junta soldada, com base na geometria e nos requisitos de precisão da análise. Refinar a malha nas regiões de interesse, como o cordão de solda e a zona termicamente afetada (ZTA) (Figuras 4a, 4b e 4c). Por estarmos utilizando a versão acadêmica, a peça não pode ultrapassar 1 mil nós na malha.

Figura 4a – Malha 3D – Cordão de Solda. Fonte: Autor, 2024.

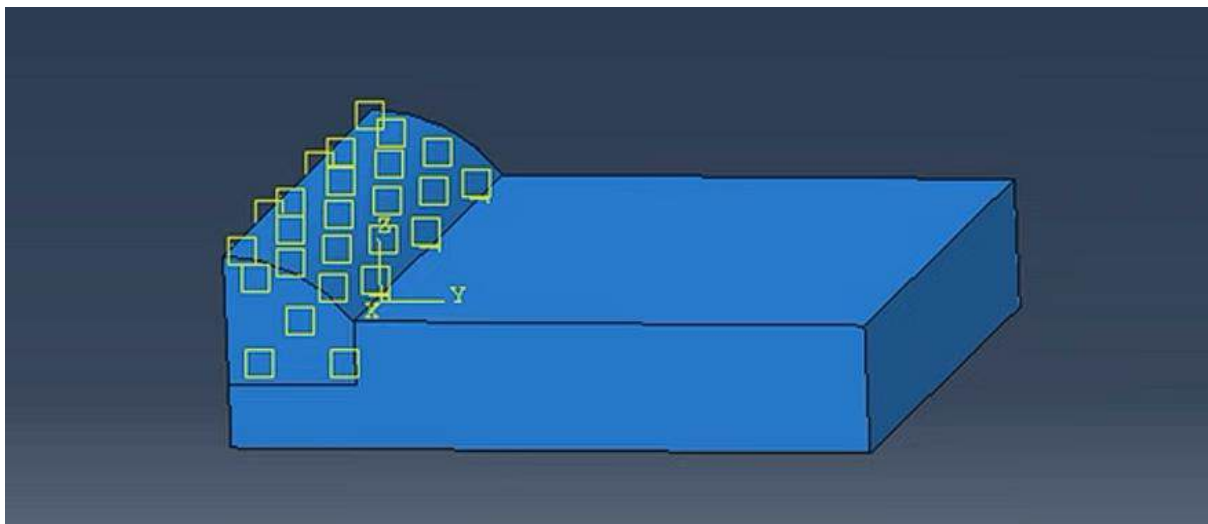


Figura 4b – Malha 3D – Metal Base e Cordão de Solda. Fonte: Autor, 2024.

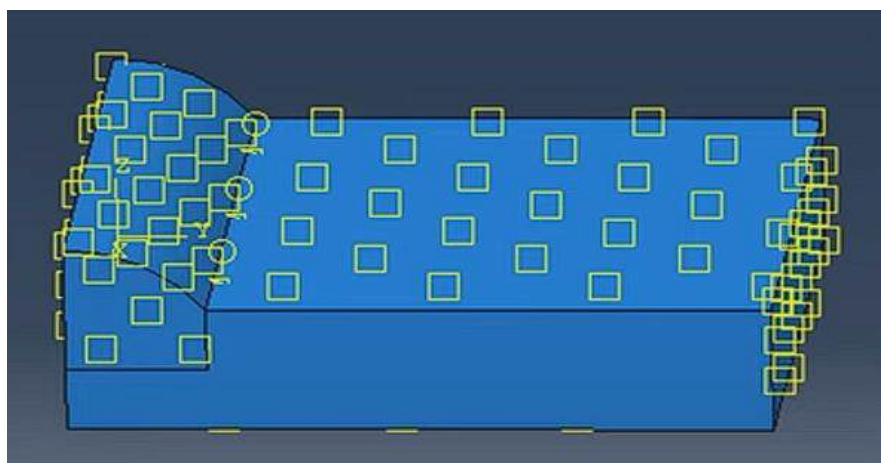
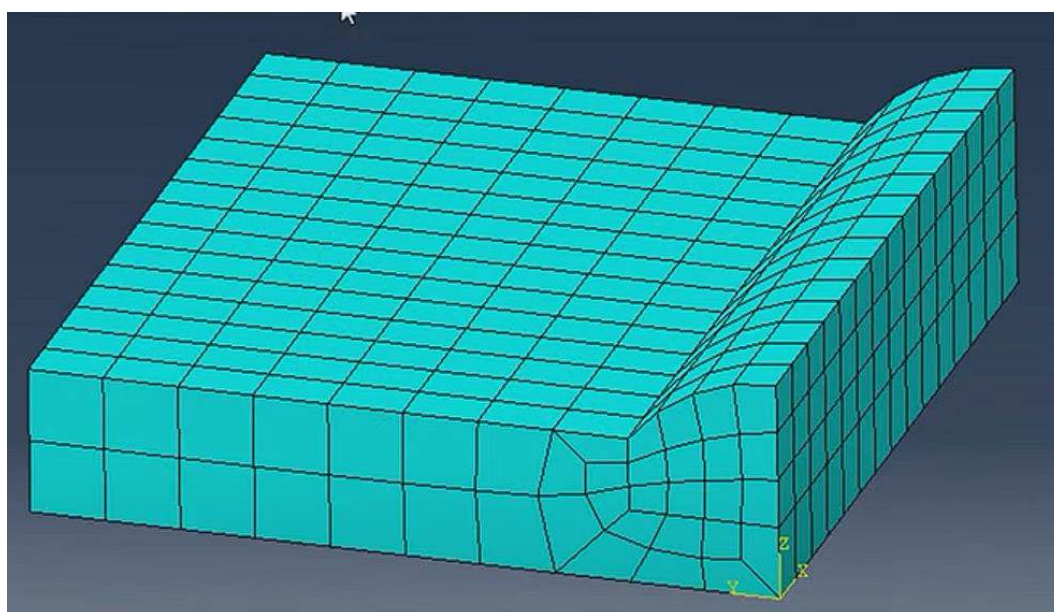


Figura 4c – Malha 3D – Peça única. Fonte: Autor, 2024.

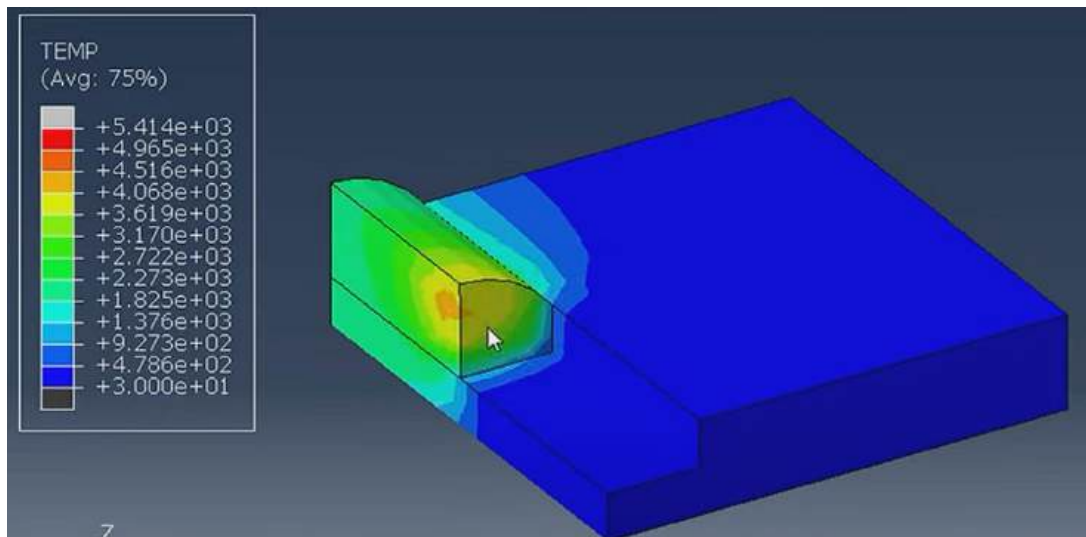


3.8.3 Simulação da Soldagem

Executar a simulação por elementos finitos do processo de soldagem, utilizando o software *Abaqus FEA®* e as condições definidas nas etapas anteriores.

Monitorar a distribuição de temperatura na junta soldada durante o processo de soldagem (Figura 5).

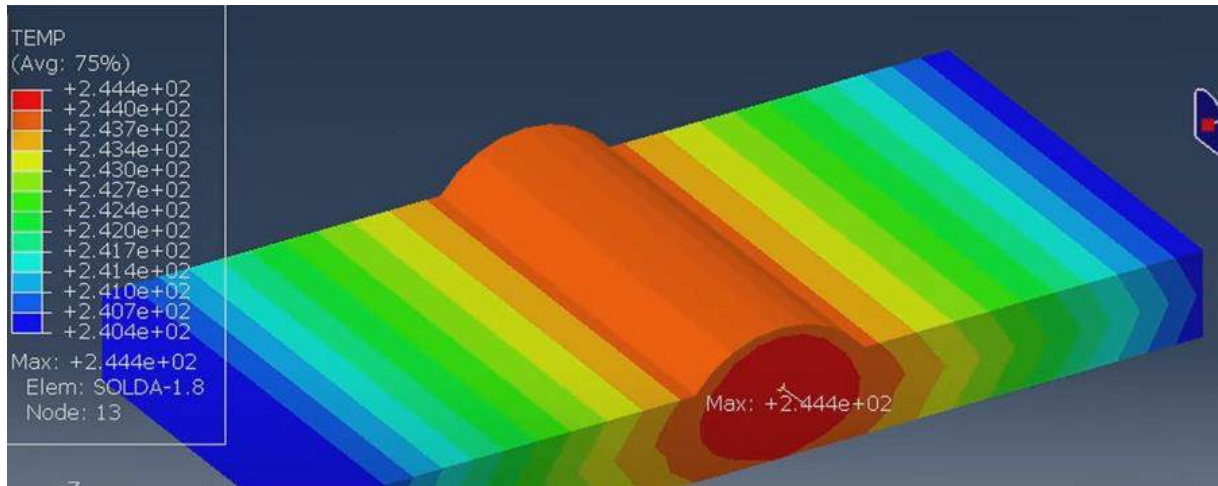
Figura 5 – Simulação. Fonte: Autor, 2024.



Utilizando como base os dados obtidos ao fim do ciclo de simulação, podemos partir para o pós-processamento dos resultados, onde iremos analisar o resultado dos dados de temperatura gerados em pontos específicos da junta soldada e na ZTA, assim podemos visualizar a distribuição da temperatura através de gráficos e mapas de temperatura, identificando as zonas críticas da junta soldada como pontos de máxima temperatura e zonas de alta gradiente térmico (Figura 6).

Podemos relacionar as zonas críticas com os possíveis defeitos de soldagem e transformações do material base, bem como tensões residuais decorrentes, bem como as transformações que podem ocorrer no material base.

Figura 6 – Gradiente de temperatura. Fonte: Autor, 2024.



Utilizar os resultados da distribuição de temperatura para prever as transformações do material base na ZTA, como fusão, solidificação e transformações microestruturais utilizando diagramas de fase e modelos de transformação de fase para o material específico da junta soldada (Figuras 7a e 7b).

Figura 7a – Regiões de uma solda por fusão (esquemática). A – Zona Fundida (ZF), B – Zona afetada pelo calor (ZAC) e C – Metal de base (MB). Fonte: Autor, 2024.

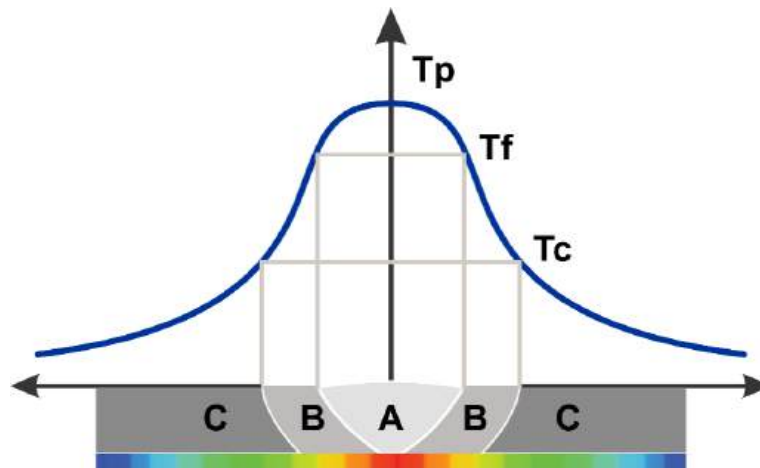
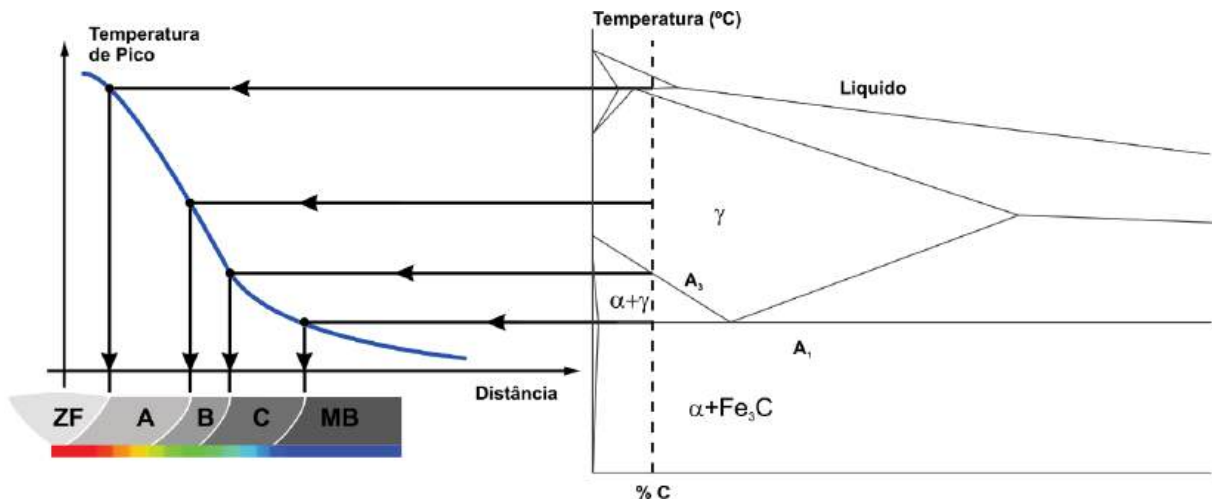


Figura 7b – Estrutura da ZAC de um aço de baixo carbono (esquemática). ZF – Zona fundida. A – Região de crescimento de grão. B – Região de refino de grão. C – Região intercrítica. Fonte: Autor, 2024.



De modo a validar a simulação, utilizamos os dados da tabela 1 como parâmetro inicial para o processo. Consideramos o processo de soldagem por fusão GMAW para estimar o coeficiente de eficiência.

Tabela 1 – Dados reais para cálculo. Fonte: Autor, 2024

Espessura (mm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Eficiência (η)
10	30	200	0,8

Utilizando os dados da tabela 1, podemos estimar numericamente o fluxo de calor do processo, sendo um parâmetro vital para o bom andamento de todo o processo. O fluxo de calor (q) representa a taxa de transferência de energia térmica por unidade de área, expressando a quantidade de calor que atravessa uma determinada área por unidade de tempo. A unidade de medida no Sistema Internacional (SI) é o Watt por metro quadrado (W/m^2).

O fluxo de calor desempenha um papel crítico nos processos de soldagem, influenciando diretamente diversos aspectos, tais como:

- Dimensão e formato da poça de fusão: Fluxos de calor mais elevados aceleram o processo de fusão, o que pode resultar em poças de fusão maiores.
- Velocidade de resfriamento: Altas taxas de resfriamento, frequentemente associadas a fluxos de calor elevados, podem impactar a microestrutura e as

propriedades mecânicas dos materiais soldados.

- Distorção e tensões residuais: A aplicação e dissipação desigual de calor, decorrentes de variações no fluxo de calor, contribuem para a ocorrência de distorções e o desenvolvimento de tensões residuais na junta soldada.

Para melhor compreensão, podemos traçar um paralelo com a água fluindo em um cano: o fluxo de calor seria análogo à vazão da água, indicando o volume de água que passa por uma seção transversal do cano em um determinado intervalo de tempo. Analogamente, o fluxo de calor descreve a quantidade de energia térmica que atravessa uma área específica em um dado período.

Matematicamente, o fluxo de calor (q) pode ser expresso pela seguinte equação:

$$q = Q / A$$

Onde:

q representa o fluxo de calor (W/m^2);

Q corresponde à taxa de transferência de calor (Watts, W);

A é a área através da qual o calor está sendo transferido (metros quadrados, m^2).

De modo a calcular de modo correto o fluxo de calor, devemos dimensionar a entrada de energia ou *power input*, comumente simbolizada pela letra P, constitui um conceito fundamental em diversos campos do conhecimento, e assume particular relevância no contexto da soldagem. Em linhas gerais, a entrada de energia representa a taxa com que a energia é transferida para um sistema ou convertida dentro dele.

No âmbito da soldagem, a entrada de energia assume um papel crucial, pois influencia diretamente a quantidade de calor fornecida à peça de trabalho. Tal influência se manifesta em diversos aspectos, como a geometria do cordão de solda, a microestrutura da região soldada e suas propriedades mecânicas.

Para uma gama significativa de processos de soldagem, a entrada de energia pode ser determinada por meio da seguinte equação:

$$P = V \times I \times \eta$$

Onde:

P denota a entrada de energia, expressa em Watts (W);

V representa a tensão elétrica presente no arco de soldagem, medida em Volts (V);

I corresponde à corrente elétrica de soldagem, expressa em Amperes (A);

η é um fator adimensional denominado eficiência do arco, que varia entre 0 e 1 e representa a fração da energia elétrica convertida em calor efetivamente utilizada para fundir o material.

A entrada de energia exerce um papel determinante nos resultados finais da soldagem, impactando:

- Penetração da Solda: Uma maior entrada de energia geralmente resulta em uma maior penetração da solda.
- Formato e Dimensões do Cordão de Solda: A entrada de energia influencia diretamente as dimensões e o formato do cordão de solda, afetando sua largura, altura e geometria geral.
- Zona Afetada pelo Calor (ZAC): A extensão e as propriedades da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) são influenciadas pela entrada de calor, que, por sua vez, está diretamente relacionada à entrada de energia.
- Taxa de Resfriamento: Entradas de energia mais elevadas tendem a reduzir a taxa de resfriamento da solda, o que pode impactar a microestrutura da ZAC e as propriedades mecânicas da junta soldada.
- Distorção e Tensões Residuais: A aplicação de uma entrada de energia excessiva pode resultar no aumento da distorção e das tensões residuais presentes na junta soldada.

Considerando os parâmetros informados na tabela 1, temos:

Power Input (P):

$$P = 30 \times 200 \times 0,8P = 4800W$$

Heat Flux (q):

$$q = \frac{4800}{10 \times 10^{-3}} (2)$$

$$q = 960,000 \text{ W/m}^2$$

ou

$$q = 9.6 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

Com o parâmetro do fluxo de calor definido em $960,000 \text{ W/m}^2$, partimos para a parametrização do modelo através do script em *Python*.

3.8.4 Validação com Resultados Experimentais

Através da Equação da temperatura máxima, estimar a largura da ZAC de acordo com os parâmetros de soldagem predefinidos e comparar aos dados gerados através da simulação de vários materiais. Criar uma tabela comparativa para validar o modelo 3d.

4 RESULTADOS

O script em *Python* automatiza a simulação de um processo de soldagem com ativação e desativação progressiva de fontes de calor no *Abaqus FEA®*. Vamos analisar o código passo a passo:

1 - Inicialização e Definição da Geometria, Todos os itens iniciais definidos conforme listagem 1.

- I. Importações: O código começa importando os módulos necessários da biblioteca do Abaqus
- II. Variáveis de Geometria: Variáveis como x_ini , x_fin , y_ini , etc., definem a caixa delimitadora da zona de soldagem.
- III. Parâmetros do Processo:
 - o qtd_partes : Número de incrementos de soldagem.

- step_final: Número total de etapas (incrementos de soldagem + 1 para resfriamento).
- element_inf: Valor pequeno para ajustar as caixas delimitadoras de seleção de elementos.
- variacao: Comprimento do incremento ao longo do eixo x para cada etapa de soldagem.
- tempo_step_solda: Duração de cada etapa de soldagem.
- tempo_resfriamento: Duração da etapa de resfriamento.
- magnitude_T_solda: Magnitude do fluxo de calor aplicado durante a soldagem.

Listagem 1 – Código de automação – Parte 1. Fonte: Autor, 2024.

```

1  # -*- coding: mbc8 -*-
2  # Do not delete the following import lines
3  from abaqus import *
4  from material import *
5  from section import *
6  from assembly import *
7  from step import *
8  from interaction import *
9  from load import *
10 from mesh import *
11 from optimization import *
12 from job import *
13 from sketch import *
14 from visualization import *
15 from connectorBehavior import *
16
17 x_ini=0
18 x_fin=50.E-03
19 y_ini=0
20 y_fin=10.E-03
21 z_ini=5.E-03
22 z_fin=15.E-03
23 qtd_partes=15
24 step_final=qtd_partes+1
25 element_inf=0.0000001
26 variacao=x_fin/qtd_partes
27 tempo_step_solda=1
28 tempo_resfriamento=600
29
30 magnitude_T_solda=9.6E+05
31

```

A listagem 2 indica o restante das ações na automação.

2- Configuração do Modelo e Criação da Etapa

- I. Desativar Elementos de Solda Iniciais: Todos os elementos dentro da zona de soldagem são desativados inicialmente. Isso assume que você tem uma peça predefinida chamada "Solda-1" representando o material de adição de solda.
- II. Criar Etapas de Soldagem: O script itera para criar várias etapas de

transferência de calor chamadas "Soldagem-1", "Soldagem-2", e assim por diante. Cada etapa representa um incremento do processo de soldagem.

- III. Criar Etapa de Resfriamento: Uma etapa final de transferência de calor chamada "Resfriamento" é criada para a fase de resfriamento.

3- Ativação do Elemento e Aplicação da Fonte de Calor

- I. Reativar Elementos de Solda: Dentro de cada etapa de soldagem, o script reativa progressivamente os elementos na zona de solda de acordo com o incremento atual. Isso simula a deposição do material de solda.
- II. Aplicar Fluxo de Calor: Um fluxo de calor concentrado (BodyHeatFlux) é aplicado aos elementos recém-ativados em cada etapa de soldagem, representando a entrada de calor do arco de soldagem.

4- Desativação e Resfriamento

- I. Desativar Fontes de Calor: Após cada etapa de soldagem, a carga de fluxo de calor correspondente é desativada para simular o movimento do arco de soldagem.
- II. Desativação Final: A última fonte de calor é desativada antes da etapa de resfriamento.
- III. Fase de Resfriamento: A etapa "Resfriamento" permite que o modelo esfrie sem nenhuma fonte de calor ativa.

Listagem 2 – Código de automação – Parte 2. Fonte: Autor, 2024.

```
31
32
33 ##Criando Interação que desativa toda a solda
34 mdb.models['Model-1'].NodeChange(activateInStep=False, createStepName='Apagar elementos',
35 includeStrain=False, name='Elementos apagados', region=Region(
36 elements=mdb.models['Model-1'].rootAssembly.instances['Solda-1'].elements.getByBoundingBox(
37 (x_ini+element_inf), (y_ini+element_inf), (z_ini+element_inf),
38 (x_fin+element_inf), (y_fin+element_inf), (z_fin+element_inf))), regionType=ELEMENTS)
39
40 ##Criando os Steps para cada incremento de solda
41 for i in range(2, step_final):
42     mdb.models['Model-1'].HeatTransferStep(deltmx=1000, initialInc=0.05, maxInc=tempo_step_solda,
43     maxNumInc=1000000, minInc=1.E-11, name='Soldagem-'+str(i), previous='Soldagem-'+str(i-1), timePeriod=tempo_step_solda)
44
45 ##Criar o step de resfriamento
46 mdb.models['Model-1'].HeatTransferStep(deltmx=1000, initialInc=0.05, maxInc=tempo_resfriamento,
47     maxNumInc=1000000, minInc=1.E-11, name='Resfriamento', previous='Soldagem-'+str(i), timePeriod=tempo_resfriamento)
48
49 ##Ativando todos os elementos que foram desativados na interação do step 'Apagar elementos'
50 for i in range(1, step_final):
51     mdb.models['Model-1'].NodeChange(activateInStep=True, createStepName='Soldagem-'+str(i),
52     includeStrain=False, name='Soldagem-'+str(i), region=Region(
53     elements=mdb.models['Model-1'].rootAssembly.instances['Solda-1'].elements.getByBoundingBox(
54     ((variacao*(i-1))+element_inf), (y_ini+element_inf), (z_ini+element_inf),
55     ((variacao*(i))+element_inf), (y_fin+element_inf), (z_fin+element_inf))), regionType=ELEMENTS)
56
57 ## Criar o fluxo de solda na peça
58 for i in range(1, step_final):
59     mdb.models['Model-1'].BodyHeatFlux(createStepName='Soldagem-'+str(i), magnitude=magnitude_T_solda,
60     name='Ponto Solda-'+str(i), region=Region(
61     elements=mdb.models['Model-1'].rootAssembly.instances['Solda-1'].elements.getByBoundingBox(
62     ((variacao*(i-1))+element_inf), (y_ini+element_inf), (z_ini+element_inf),
63     ((variacao*(i))+element_inf), (y_fin+element_inf), (z_fin+element_inf)))
64
65 ## Desativando os pontos de solda para os outros steps
66 for i in range(1, step_final-1):
67     mdb.models['Model-1'].loads['Ponto_Solda-'+str(i)].deactivate('Soldagem-'+str(i+1))
68
69 ## Desativar o ultimo carregamento para deixar livre o step de resfriamento
70 mdb.models['Model-1'].loads['Ponto_Solda-'+str(qtd_partes)].deactivate('Resfriamento')
```

Após a parametrização da automação, é necessário a parametrização do material da placa base e da solda – AISI 1050 aço de baixo carbono (tabela 2). Estamos partindo de um material que está a temperatura ambiente de 30°C e um coeficiente de 10 W/m².K.

Tabela 2 – AISI 1050. Fonte: Autor, 2024

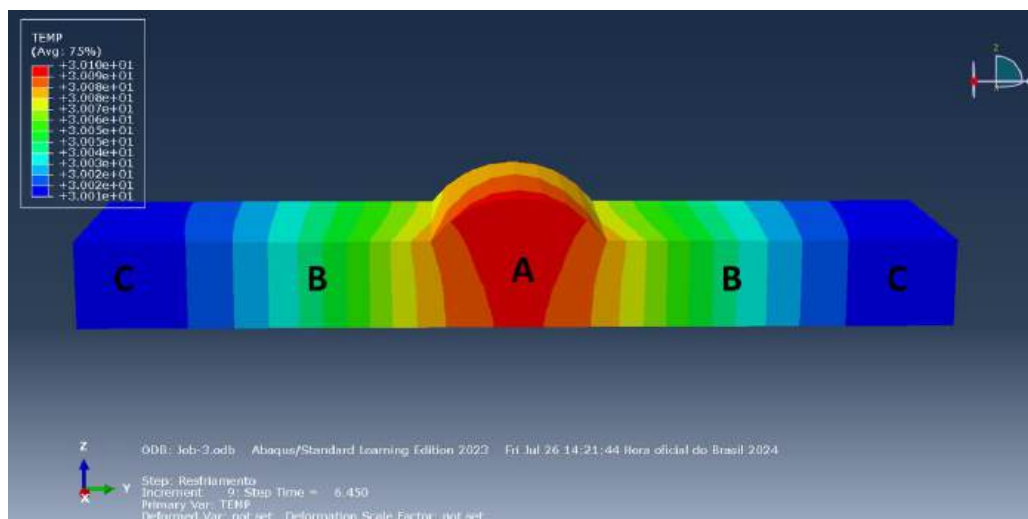
Material	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.°C)
AISI 1050	54	7833	465

Por ser um software com licença educacional, alguns parâmetros são simplificados de modo a gerar uma simulação acessível para fins de estudo e interpretação.

A figura 8a nos traz o resultado da simulação, onde de modo claro podemos identificar a formação das regiões de uma solda por fusão: A – Zona Fundida (ZF), B – Zona afetada pelo calor (ZAC) e C – Metal de base (MB) bem como a estrutura da ZAC de um aço carbono na figura 8b: ZF – Zona fundida. A – Região de crescimento de grão. B – Região de refino de grão. C – Região intercrítica.

A figura 9 demonstra a evolução do processo em uma região relacionando temperatura por tempo. Através deste gráfico podemos estimar as transformações de fase do material comparando com o diagrama de ferro-carbono do aço AISI 1050.

Figura 8a – Simulação – Regiões. Fonte: Autor, 2024.



5 DISCUSSÃO

O Capítulo 4 apresentou os resultados obtidos através da simulação computacional do processo de soldagem, utilizando o software *Abaqus FEA*® e um script em Python para automatizar a análise. A simulação teve como objetivo principal demonstrar, de forma didática, a distribuição de temperatura durante o processo de soldagem e a formação da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), aspectos críticos para a qualidade final da junta soldada.

A utilização do script em Python se mostrou crucial para a eficiência da análise, permitindo a parametrização e execução automatizada das etapas de soldagem e resfriamento. A segmentação do processo em etapas discretas, com ativação e desativação da fonte de calor em cada incremento, possibilitou a representação detalhada da evolução da temperatura na junta soldada ao longo do tempo.

A análise visual da distribuição de temperatura, apresentada através de mapas de cores, evidenciou a formação de um gradiente térmico concentrado na região da solda, com temperaturas máximas atingindo valores significativamente superiores à temperatura inicial do material base. Essa concentração de calor é responsável pela fusão localizada do material e pela formação da poça de fusão, elemento fundamental para a união das peças.

A região adjacente à zona de fusão, conhecida como ZAC, também apresentou um aumento significativo de temperatura, embora em níveis inferiores aos observados na poça de fusão. É importante destacar que, mesmo sem sofrer fusão, a ZAC passa por transformações microestruturais significativas devido ao ciclo térmico da soldagem. Essas transformações podem alterar as propriedades mecânicas do material base na região próxima à solda, impactando a resistência, ductilidade e tenacidade da junta.

A Figura 8a, ilustrando as diferentes regiões da junta soldada, confirma a formação das zonas características do processo: a Zona Fundida (ZF), a Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e o Metal de Base (MB). A Figura 8b detalha ainda a estrutura da ZAC, evidenciando as sub-regiões com diferentes níveis de alteração microestrutural, como a região de crescimento de grão, a região de refino de grão e a região intercrítica.

O gráfico da Figura 9, representando a evolução da temperatura em função

do tempo em um ponto específico da ZAC, fornece informações importantes para a compreensão das transformações de fase que ocorrem no material durante o processo de soldagem. Através da correlação entre a curva de temperatura e o diagrama de fase ferro-carbono, é possível estimar a ocorrência de transformações de fase, como a austenitização e a subsequente transformação em microestruturas como ferrita, perlita e bainita, dependendo da velocidade de resfriamento e da composição do material.

Em suma, a simulação computacional, utilizando o *Abaqus FEA®* e o script em Python, permitiu visualizar e analisar de forma abrangente a transferência de calor durante o processo de soldagem, demonstrando a sua influência direta na formação da ZAC e nas transformações microestruturais do material base. A compreensão desses fenômenos é crucial para a otimização dos parâmetros de soldagem, visando garantir a qualidade final da junta e evitar a ocorrência de defeitos. É importante ressaltar que este trabalho teve um caráter introdutório e didático, utilizando modelos simplificados para facilitar a compreensão dos conceitos básicos. Para análises mais aprofundadas e aplicações industriais, modelos mais complexos, considerando fatores como a transferência de calor tridimensional, a fluidodinâmica da poça de fusão e a metalurgia de solidificação, se fazem necessários.

6 CONCLUSÃO

A presente discussão sobre os resultados da simulação computacional do processo de soldagem, utilizando o software *Abaqus FEA®* e um script em Python, permitiu elucidar a importância da análise da transferência de calor nesse tipo de processo. A visualização detalhada da distribuição de temperatura na junta soldada e a identificação das diferentes zonas afetadas pelo calor, como a ZF e a ZAC, demonstraram a aplicabilidade da ferramenta na previsão do comportamento térmico durante a soldagem.

A identificação precisa das regiões de temperatura crítica, em conjunto com a análise do histórico térmico em pontos específicos da ZAC, fornece subsídios para a compreensão das transformações de fase que ocorrem no material base. A partir dessas informações, torna-se possível prever a formação de diferentes microestruturas na região da solda e, conseqüentemente, estimar as propriedades mecânicas da junta.

É importante reconhecer que o modelo utilizado neste trabalho, embora eficaz para fins didáticos e introdutórios, apresenta limitações inerentes à sua natureza simplificada. A complexidade dos fenômenos físicos envolvidos na soldagem, como a fluidodinâmica da poça de fusão, a interação metalúrgica entre os materiais e a influência das condições ambientais, demanda a incorporação de modelos mais robustos para análises de maior fidelidade.

Em suma, a simulação computacional se consagra como uma ferramenta poderosa para o estudo e otimização de processos de soldagem. A possibilidade de visualizar e analisar a influência de diferentes parâmetros, como a energia de soldagem, a velocidade de deslocamento do arco e as propriedades térmicas dos materiais, contribui para o desenvolvimento de juntas soldadas de maior qualidade, com propriedades mecânicas otimizadas e menor susceptibilidade a defeitos. A busca por modelos cada vez mais sofisticados, capazes de representar a física da soldagem de forma mais abrangente, impulsiona o avanço dessa área de pesquisa e contribui para o desenvolvimento de tecnologias de união de materiais cada vez mais eficientes e confiáveis.

BIBLIOGRAFIA

1. MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2024.
2. WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, Fábio D. H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 1º ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.
3. KOU, Sindo. **Welding metallurgy**. 2º ed. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. 2003.
4. FERREIRA, Dario M. **Metodologia para simulação computacional da distribuição de temperaturas para identificar sub-regiões reaquecidas da ZAC e avaliar suas influencias nas propriedades mecânicas na soldagem multipasse de aço API 5L x80**, 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-08012018-110211/publico/DarioMagnoBatistaFerreiraCorr17.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2024.
5. Nart, E., & Celik, Y. **A practical approach for simulating submerged arc welding process using FE method**. Journal of Constructional Steel Research, 84, 2013, pgs 62–71.
6. Wen, S. W., Hilton, P., & Farrugia, D. C. J. (2001). **Finite element modelling of a submerged arc welding process**. Journal of Materials Processing Technology, 119(1-3), 2001, pgs 203–209.
7. GRONG, O. **Metallurgical Modelling of Welding**, The Institute of Materials, Londres, 1997.
8. AWS, **Welding Handbook, Welding Processes**, vol. 1, 9a ed., 2001 pg 806.
9. OKUMURA, T., TANIGUCHI, C., **Engenharia de Soldagem e Aplicações**, LTC, Rio de Janeiro, 1982.
10. HOULDCROFT, Peter T. **Welding process technology**, Cambridge University Press, 1977.
11. TRESA M. Pollock et al. **Metallurgical and materials transactions: physical metallurgy and material science**. Vol. 31, 6º ed. Santa Barbara, Springer: 2000 pgs. 1953-1354. Acesso em 31 mar. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-000-0022-2>. Hora: 14:30.
12. ZIENKIEWICZ, O. C., & TAYLOR, R. L. **The finite element method for solid and structural mechanics**, 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2005.
13. BATHE, K.-J. **Finite element procedures**. Prentice Hall, 2002.

14. CHANDRUPATLA, T. R., & BELEGUNDU, A. D. Introduction to finite elements in engineering, 3rd ed. Prentice Hall, 2001.
15. COOK, R. D., MALKUS, D. S., & PLESSET, M. E. Computers in structural analysis. 2004.
16. GOLDAK, John A., AKHLAGHI, Mehdi. Computational Welding Mechanics. New York, Springer. 2005.
17. LINDGREN, Lars-Erik. Computational Welding Mechanics. Woodhead Publishing. 2007.
18. DASSAULT SYSTÈMES, Abaqus FEA. Acesso em 25 de abr. 2023. Disponível em <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus>. Hora: 15:00.
19. LEE, Ryan. Abaqus FEA for engineers. BW Publications, 2018.
20. MACIEL, Thais M. M. GIDRÃO, Gustavo M. S. BOSSE, Rubia M. COSTA, Patrick O. B. Modelagem computacional em Abaqus: Aplicações educacionais para engenharia civil de mecanica. Atenda Editora, 2022.
21. BARBERO, Ever J. Finite Element Analysis of Composite Materials using. Boca Raton: CRC Press, 2013.