

**Otimização de parâmetros na simulação de soldadura da liga de  
alumínio 6082-T6**

**Miguel Canhizares Dias Filho**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do  
Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Trabalho orientado por:

**João Eduardo Pinto Castro Ribeiro**

**Émillyn F. Trevisani Olivio**

Bragança

2018



**Otimização de parâmetros na simulação de soldadura da liga de  
alumínio 6082-T6**

**Miguel Canhizares Dias Filho**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do  
Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Trabalho orientado por:

**João Eduardo Pinto Castro Ribeiro**

**Émillyn F. Trevisani Olivio**

Bragança

2018



## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde cursei a maior parte da minha graduação e me proporcionou a possibilidade de vir a Portugal, através do acordo de Dupla Diplomação.

A Escola de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança que deu a oportunidade de estar desenvolvendo essa pesquisa durante este ano.

Ao professor Doutor João Eduardo Ribeiro, pelos ensinamentos, orientação e disponibilidade para a realização deste trabalho, e professora Emillyn Trevisani, da UTFPR, por suas contribuições.

Aos meus amigos, tanto no Brasil quanto em Portugal, pelos conselhos e por estarem presentes nesse grande desafio sempre a apoiar e animar.

Às minhas irmãs, meu sobrinho, meu pai, meus tios Bruno e Eliana, por tudo que representam, por terem acreditado, incentivado e ajudado em tudo que puderam.

Por fim, a minha esposa e minha mãe, que nunca duvidaram de mim, sempre estiveram junto comigo e fizeram muito mais que o possível para que eu conseguisse estar aqui. Nunca conseguirei agradecer todo o empenho e dificuldades que passamos, mas também todos os momentos de alegrias e risadas que partilhamos.



## Resumo

A utilização de ligas de alumínio tem tido um grande crescimento em vários setores industriais, em substituição de materiais mais clássicos, como ligas de ferro-carbono. No entanto, existem desafios relacionados aos processos de fabrico, particularmente os processos automatizados de soldadura que apresentam dificuldades em conseguir a qualidade exigida.

Com o objetivo de reduzir o nível de tensões residuais e distorções de juntas soldadas em ligas de alumínio pelo processo MIG, foram utilizados, neste estudo, ferramentas de modelação e simulação numérica associados ao método de Taguchi. Com o método de Taguchi foi possível definir a matriz ortogonal de simulações numéricas (L27). Neste caso, foram definidas 27 combinações de parâmetros e níveis de soldadura para a realização das simulações numéricas. Para a sua implementação foi utilizado um software de elementos finitos específico para simulação de processos de soldadura denominado Simufact.welding. Após a realização das 27 simulações efetuou-se o tratamento dos resultados obtidos e determinou-se a combinação ótima para a minimização do nível de tensões residuais e de distorções. Foi, também, possível determinar os parâmetros mais influentes para minimizar estes efeitos.

Foi obtida uma configuração otimizada de fatores para reduzir cada característica estudada, assim como o parâmetro de maior influência nesta redução. Para a tensão normal na direção X, o parâmetro de maior influência é velocidade de soldadura, com 56,43% de influência. Para a tensão normal na direção Y, o parâmetro mais influente foi igualmente a velocidade de soldadura, com 39,2% de influência. Para a distorção total, o parâmetro de maior influência é a corrente, com um peso de 33,59%.

O método de Taguchi mostrou-se eficaz para a determinação dos parâmetros otimizados, buscando a diminuição de possíveis defeitos.

**Palavras-chave:** GMAW robotizada; alumínio; parâmetros de soldadura; simulação numérica; método de Taguchi; análise da variância.

## Abstract

The use of aluminum alloys has increased in various industrial sectors, replacing classical materials, as iron-carbon alloys. Some manufacturing processes, specially the automatized welding processes, present some challenges related with the obtaining of the required quality.

Looking for residual stress reduction and welded joint distortions in aluminum alloys by MIG process, in this study were utilized modeling and numerical simulation tools associated with Taguchi method. With the Taguchi method, it was possible to determine the orthogonal matrix L27. In this case, 27 parameters combinations and welding levels were defined for numeric simulation realization. For implementation, a software for welding process simulation named Simufact.welding was used. After the 27 simulations, the data treatment and optimum combination for minimizing of residual stress and distortions levels were determinate. Also, it was possible to determinate the most influent parameters to minimize these effects.

An optimized combination of factors was found to reduce each characteristic, as well as the most significant parameter that influences in this stresses reduction. For X Normal Stress, the parameter with higher influence is the velocity, with 56.43% of influence. For Y Normal Stress the parameter with higher influence is the same as welding velocity, with 39.2% of influence. For total distortion, the parameter with higher influence is the current, with 33.59%.

The Taguchi method proved to be effective for the determination of the optimized parameters, aiming at reducing possible defects.

**Keywords:** Robotic GMAW; aluminum; welding parameters; numerical simulation; Taguchi method; analysis of variance.



# Índice

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Índice.....	iv
Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Figuras.....	vii
Siglas.....	x
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estrutura do Trabalho.....	4
2. Revisão Bibliográfica.....	7
2.1. Conceito de Soldadura.....	7
2.1.1. Processos de Soldadura.....	7
2.1.2. Soldadura GMAW.....	10
2.2. Alumínio e suas Ligas.....	13
2.3. Tensões Residuais.....	14
2.4. Simulações de Processos de Fabrico.....	16
Método de Elementos Finitos.....	17
2.5. Método de Taguchi.....	20
Análise de Variância.....	21
3. Simulações Numéricas.....	23
3.1. Equipamentos e Materiais.....	23
3.2. Ensaios Experimentais.....	25
3.3. Matriz Ortogonal de Taguchi.....	27
3.4. Parâmetros de Soldadura.....	29

3.5. Peças em CAD/CAE .....	30
3.6. Malha de Elementos Finitos .....	31
3.7. Simulação dos Modelos Numéricos .....	34
3.7.1. Soldadura de Topo .....	36
3.7.2. Soldadura de Canto .....	38
3.8. Tratamento de Dados / ANOVA .....	39
4. Discussões e Resultados .....	42
4.1. Soldadura de topo .....	42
4.1.1. Tensão Normal X ( $\sigma_x$ ).....	42
4.1.2. Tensão Normal Y ( $\sigma_y$ ).....	43
4.1.3. Distorção Total.....	44
4.2. Soldadura de canto .....	45
4.2.1. Tensão Normal X ( $\sigma_x$ ).....	45
4.2.2. Tensão longitudinal ( $\sigma_y$ ) .....	52
4.2.3. Distorção Total.....	59
5. Conclusão .....	65
Propostas para trabalhos futuros .....	66
Referências Bibliográficas .....	67
Anexo A.....	73

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Tipos de processos de soldadura por fusão [14].	9
Tabela 2.2: Ligas de Alumínio e suas séries.	14
Tabela 3.1: Valores dos parâmetros escolhidos para os diferentes níveis.	26
Tabela 3.2: Matriz Ortogonal L27 de Taguchi.	28
Tabela 3.3: Matriz Ortogonal L27 de Taguchi adaptada.	29
Tabela 3.4: Matriz Ortogonal L27 com valores dos parâmetros.	30
Tabela 4.1: Valores de Tensão máxima.	50
Tabela 4.2: Médias para cada grupo e seu respectivo nível.	51
Tabela 4.3: ANOVA para $\sigma_x$ .	52
Tabela 4.4: Máximos de Tensões ao longo do cordão de soldadura.	58
Tabela 4.5: Médias para cada grupo e seu respectivo nível.	58
Tabela 4.6: ANOVA para os valores de $\sigma_y$ .	59
Tabela 4.7: Valores das máximas distorções.	60
Tabela 4.8: Média das distorções por níveis.	62
Tabela 4.9: ANOVA para os valores de distorção.	63

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Esquema do equipamento de Soldadura GMAW [15].	10
Figura 2.2: Detalhe da tocha na região da soldadura [16].	11
Figura 2.3: Utilização das técnicas de soldadura na Europa [12].	11
Figura 2.4: Tipos de transferência de metal (a) Globular (b) Spray (c) Curto-circuito [11].	12
Figura 2.5: Distribuição de tensão (a) $\sigma_x$ e (b) $\sigma_y$ .	15
Figura 2.6: Elemento de hexaedro com oito nós e sistemas de coordenadas.	17
Figura 3.1: Ensaio teste com junta de topo entre as chapas.	25
Figura 3.2: Ensaio teste com junta de canto entre as chapas.	26
Figura 3.3: Inclinação da tocha de soldadura.	27
Figura 3.4: Desenho em CAD/CAE da peça a ser simulada.	31
Figura 3.5: Modelo da peça com malha de elementos finitos robusta.	32
Figura 3.6: Modelo da peça com malha de elementos finitos refinada.	33
Figura 3.7: Modelo da peça com malha de elementos finitos final.	33
Figura 3.8: Configuração da geometria da poça de fusão.	35
Figura 3.9: Modelagem do cordão de soldadura.	36
Figura 3.10: Árvore de Processo e Catálogo de Objetos.	37
Figura 3.11: Modelo com soldadura de topo.	37
Figura 3.12: Teste feito em junta de canto.	38
Figura 3.13: Modelação do arranjo com soldadura de canto.	39
Figura 4.1: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ no modelo de soldadura de topo.	42
Figura 4.2: Tensões $\sigma_x$ em soldadura de topo.	43
Figura 4.3: Tensões $\sigma_y$ no modelo de soldadura de topo.	43
Figura 4.4: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ em soldadura de topo.	44
Figura 4.5: Distorção total em soldadura de topo.	44
Figura 4.6: Variação da distorção.	45
Figura 4.7: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ no modelo.	45
Figura 4.8: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 10 mm/s e inclinação de $-30^\circ$ .	46
Figura 4.9: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 10 mm/s e inclinação de $0^\circ$ .	46

Figura 4.10: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 10 mm/s e inclinação de $30^\circ$ .....	47
Figura 4.11: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 15 mm/s e inclinação de $-30^\circ$ .....	47
Figura 4.12: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 15 mm/s e inclinação de $0^\circ$ .....	48
Figura 4.13: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 15 mm/s e inclinação de $30^\circ$ .....	48
Figura 4.14: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 20 mm/s e inclinação de $-30^\circ$ .....	49
Figura 4.15: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 20 mm/s e inclinação de $0^\circ$ .....	49
Figura 4.16: Distribuição de Tensões $\sigma_x$ para velocidade de 20 mm/s e inclinação de $30^\circ$ .....	50
Figura 4.17: Curvas dos valores médios de tensão $\sigma_x$ .....	51
Figura 4.18: Distribuição de tensões $\sigma_y$ no modelo.....	52
Figura 4.19: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 10 mm/s e inclinação de $-30^\circ$ .....	53
Figura 4.20: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 10 mm/s e inclinação de $0^\circ$ .....	53
Figura 4.21: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 10 mm/s e inclinação de $30^\circ$ .....	54
Figura 4.22: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 15 mm/s e inclinação de $-30^\circ$ .....	54
Figura 4.23: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 15 mm/s e inclinação de $0^\circ$ .....	55
Figura 4.24: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 15 mm/s e inclinação de $30^\circ$ .....	55
Figura 4.25: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 20 mm/s e inclinação de $-30^\circ$ .....	56
Figura 4.26: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 20 mm/s e inclinação de $0^\circ$ .....	56

Figura 4.27: Distribuição de Tensões $\sigma_y$ para velocidade de 20 mm/s e inclinação de 30°.....	57
Figura 4.28: Média por níveis da Tensão Normal Y. ....	59
Figura 4.29: Representação das distorções no conjunto soldado.....	60
Figura 4.30: Valores de distorções máximas em cada simulação.....	61
Figura 4.31: Resultados da simulação 9. ....	61
Figura 4.32: Resultados da simulação 14. ....	62
Figura 4.33: Média por parâmetros e níveis de distorção. ....	62

## Siglas

FEM – Finite Elements Method

DOE – Design of Experiments

ANOVA – Analysis of Variance

CAD/CAE - Computer Assisted Design/Computer Aided Engineering

AWS – American Welding Society

TWI – The Welding Institute

GMAW – Gas Metal Arc Welding

MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

CEN - Comité Européen de Normalisation

$\sigma_x$  – Tensão Normal na direção X

$\sigma_y$  – Tensão Normal na direção Y

$\delta_{th}$  - Deformação Térmica

CFD - Counterfactual Definiteness

DOF – Degrees of Freedom

A – Amperes

V – Volts

IGES - Initial Graphics Exchange Specification

AlMgSi – Liga de Alumínio, Magnésio e Silício

CSV – Comma Separated Values



# Capítulo 1

## 1. Introdução

A automatização dos processos de fabrico tem vindo a aumentar exponencialmente nas últimas décadas. Este processo permite a realização sistemática de algumas etapas que requerem um grande número de repetições, como em processos de soldadura de algumas peças industriais. Concomitantemente com o aumento da automatização, também se tem verificado a utilização cada vez maior de novos materiais que associam as boas propriedades mecânicas à baixa densidade e elevada resistência à corrosão, como é o caso das ligas de alumínio. Contudo, a substituição dos materiais metálicos mais tradicionais, ligas ferro-carbónicas, pelos novos materiais trazem grandes desafios para a automatização dos processos de fabrico, pois o seu comportamento é substancialmente diferente, o que obriga a um estudo mais pormenorizado e direcionado. Neste estudo é frequente a utilização novas ferramentas de apoio à engenharia como, por exemplo, as simulações numéricas.

A necessidade da utilização, por parte do setor industrial, de técnicas de simulação numérica tem tido um aumento significativo nos últimos anos, isso tem sido alavancado com o poder de processamento das novas tecnologias nos computadores e, também, pela competitividade atual entre as indústrias que vão em busca da diminuição de custos e processos que não agregam valor ao produto. Um dos métodos mais utilizados e que permite prever dificuldades tanto no processo de produção como na qualidade do produto final é o método de elementos finitos (FEM).

Empresas como Simufact Engineering GmbH, que é subsidiária da MSC *Software*, tem contribuído para o desenvolvimento de softwares para projeto e otimização de processos de fabrico com ajuda de simulação de diferentes técnicas de fabricação, como, processos de soldadura, conformação de chapas, forjamento a frio e a quente e tratamento térmico através da utilização de elementos finitos. No caso específico dos processos de soldadura, onde há uma grande variação do gradiente de temperatura e das características das ligas de alumínio utilizadas como metal

base, com uma elevada condutibilidade térmica, introduzem tensões internas na peça final, podendo ocorrer distorções e fissuração da junta soldada.

### **1.1. Enquadramento**

Foi proposto para obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança um estudo para otimização de características da peça final com base na modelação e análise numérica de processos de soldadura utilizando o *software* Simufact.welding.

Este estudo integra-se no projeto Portugal 2020 “APSEHAL: Automatização de Processos de Soldadura em Estruturas Hiperestáticas em Ligas de Alumínio”. Que busca desenvolver a seleção de materiais mais leves, para substituição progressiva dos materiais metálicos clássicos como o aço ou o ferro fundido, com elevada resistência mecânica mas muito densos, por materiais com uma densidade inferior com destaque para os compósitos, ligas de magnésio e ligas de alumínio [1].

Atualmente, a utilização de ligas de alumínio leva vantagem sobre os materiais anteriormente citados e têm sido largamente usadas em chapas ou estruturas soldadas. Assim, é frequente a sua utilização em vários setores industriais como é o caso da indústria de transportes, automobilística, aviação, naval, aeroespacial e partes estruturais de pontes, entre outras. As principais razões que levam à sua utilização são a sua grande leveza, quando comparada com os materiais mais clássicos como os aços, por ter excelentes propriedades mecânicas, o que leva uma melhoria da relação resistência/peso, por ter uma elevada resistência à corrosão e pela facilidade de processamento [2, 3].

O método de ligação mais usual para as ligas de alumínio é o processo de soldadura, contudo, a soldadura deste tipos de ligas é extremamente complexa e difícil. Tais dificuldades estão associadas à presença da camada de óxido de alumínio, à sua elevada condutividade térmica, ao seu alto coeficiente de expansão térmica e à grande solubilidade de hidrogênio no estado fundido [4].

Na área de projeto e investigação, a simulação tem ganho importância nos últimos anos, pois permite que os projetistas desenvolvam novos sistemas e que possam prever o seu comportamento em serviço. Por exemplo, se a análise for uma linha de produção ou um sistema que necessite de uma resposta de emergência, a

simulação pode ser usada para estudar e comparar soluções alternativas ou para solucionar problemas de sistemas existentes. Com a simulação, pode-se alterar um sistema existente ou criar um novo sistema, comparando o comportamento antes do protótipo ser concluído, economizando custos e *lead time*. Modelagem e simulação estão a emergir como as principais tecnologias para apoiar a fabricação no Século XXI.

Ela pode ser usada no campo industrial, permitindo que o comportamento do sistema seja apreendido e testado [5].

Uma das técnicas numéricas mais aplicadas para cálculo é o método dos elementos finitos (FEM), esta é empregue em várias ciências da engenharia. Assim, no caso particular da soldadura, muitos modelos foram simulados com variação de parâmetros do processo, permitindo avaliar e prever o comportamento mecânico dos elementos soldados [6]. Muitas vezes, associado aos métodos numéricos, são usadas técnicas de otimização para minimizar o tempo de cálculo ou para otimizar elementos estruturais. Das várias técnicas de otimização utilizadas pode-se destacar o método de Taguchi que permite definir um planeamento sistemático de simulações numéricas que é caracterizado pela criação de uma matriz ortogonal. Esta matriz define várias combinações de fatores e níveis característicos de cada objeto de estudo. Após a realização das simulações definidas pela matriz ortogonal é possível efetuar o tratamento dos resultados obtidos e determinar a combinação ótima para uma determinada característica de controlo [7], no exemplo da soldadura poderia ser o nível de tensões residuais.

As técnicas de Taguchi têm sido amplamente utilizadas no projeto de engenharia. O principal impulso dessas técnicas é o *design* de produtos ou processos que se concentra na determinação das configurações de parâmetros necessárias para produzir os melhores níveis de medidas de desempenho com variação mínima. A análise ANOVA é o método estatístico utilizado para interpretar dados experimentais e tomar as decisões necessárias. Ele detecta quaisquer diferenças no desempenho médio de grupos de itens testados. Houve muitas aplicações recentes das técnicas Taguchi para otimização de processos. Os métodos estatísticos e a técnica de Taguchi também foram utilizados para investigar a maquinaria e otimizar o consumo de energia [8].

## **1.2. Objetivos**

Este estudo de caráter numérico, tem como principais objetivos determinar a melhor combinação dos parâmetros de soldadura, visando a diminuição dos valores das tensões residuais transversais e longitudinais ao cordão de soldadura. Pretende-se, também, diminuir o nível de distorção na peça. Um outro objetivo deste trabalho é o de avaliar a influência dos parâmetros utilizados individualmente sobre as características citadas anteriormente.

Para atingir tais objetivos foi utilizado o método de Taguchi, os parâmetros utilizados foram definidos através de testes em laboratório e a matriz ortogonal de Taguchi foi definida a partir dos níveis dos parâmetros determinados. Para o tratamento estatístico dos resultados foi utilizada a análise de variância (ANOVA) e que permitiu determinar a influência de cada parâmetro nas características finais obtidas em cada simulação.

## **1.3. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos principais, sendo que, este primeiro capítulo faz uma breve introdução do estudo realizado. Ainda se faz uma breve contextualização do problema em estudo e o atual estado de desenvolvimento de pesquisas. É, também, no primeiro capítulo que são indicados os principais objetivos a alcançar neste trabalho.

No segundo capítulo, é mostrado a fundamentação teórica necessária para a execução desta dissertação, onde se abordam os conhecimentos prévios sobre soldadura e seus processos, assim como, uma revisão sobre o alumínio e suas ligas. As características presentes no material após os processos de soldadura, como tensões residuais e distorções na peça de trabalho. Após essas definições, são, também, apresentados os métodos de simulação e modelação de processos de fabrico, como é o método de cálculo por elementos finitos. Por último, é apresentado o método utilizado para as iterações e otimização utilizado, o Método de Taguchi com auxílio da ANOVA.

O terceiro capítulo mostra os passos que foram seguidos para a realização dos testes e das simulações, assim como, os materiais, softwares e ferramentas utilizadas. Foi também, detalhado o arranjo dos componentes, a escolha da matriz ortogonal de Taguchi e parâmetros escolhidos para os testes, criação da peça em CAD/CAE, sua malha de elementos finitos. No final, realizou-se o tratamentos dos resultados obtidos nas simulações.

O capítulo quatro apresentam-se os resultados obtidos nas simulações numéricas e que são, a variação das tensões ao longo do cordão e as distorções que ocorrem nas chapas.

No quinto e último capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas, assim como a sugestão para trabalhos futuros.



## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica dos temas abordados, expondo conceitos teóricos importantes para a compreensão do trabalho, confrontando produções recentes relacionadas aos objetos de estudo com obras de autores conceituados e já validados. Também serão apresentadas informações presentes em manuais dos equipamentos e catálogos de fabricante consideradas relevantes.

### 2.1. Conceito de Soldadura

Antes de começar a abordagem sobre as dificuldades do processo de soldadura com ligas de alumínio é necessário conhecer algumas definições de soldadura. A mais clássica, define que este processo é um método de união entre duas ou mais partes, tal como define a *American Welding Society (AWS)*, que soldadura 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” [9] e também o *slogan* que aparece no brasão do *The Welding Institute (TWI)* que diz “*e duobus unum*”, que significa “dois se tornam um”. Entretanto, muitos processos de soldadura ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais [10].

#### 2.1.1. Processos de Soldadura

Historicamente, tem-se relatos de peças soldadas datadas a mais de 3000 anos, exemplos de braceletes de tempos pré-históricos que foram feitos martelando pepitas de ouro ou prata em bastões, formando-os em círculos ou arcos e, em seguida, forjando as extremidades para formar um único anel, os métodos utilizados eram basicamente feitos através de brasagem ou forjamento. Os processos mais atuais de soldadura são relativamente novos, com pouco mais de

100 anos, onde as principais descobertas que transformaram essa arte em um processo industrial foram feitas na segunda metade do século XIX [11].

Com o arco de carbono de Miossan (1881) sendo aplicado para a soldadura de metais por Bernandos (1887) e os eletrodos de metal consumíveis de Slavianoff, Em 1889, foram concedidas as primeiras patentes por soldadura a arco para Coffin, nos Estados Unidos.

O princípio do que pode ser chamado de soldadura industrial moderna está ligado a alguns fatores. Onde um fator a ser destacado é o avanço nas fontes de energia, que conseguem produzir calor cada vez mais intensos, podendo ser aplicadas a metais e ligas de alto ponto de fusão, estruturas maiores, seções mais espessas e com maior velocidade.

O processo de soldadura é uma das técnicas mais importantes e usadas na indústria, é amplamente empregue para fabricação, recuperação e manutenção de equipamentos em peças novas ou usadas. Avalia-se que hoje em dia são utilizados mais de 70 processos de soldadura a nível mundial, sendo este um número dinâmico, devido ao fato do desenvolvimento constante de novas tecnologias aplicadas aos processos de soldadura [12].

Tais processos podem ser divididos em três famílias, que são diferenciados pelo tipo de união das peças. Sendo, soldaduras por pressão, em que o estado de ambos os materiais a serem ligados são sólidos, soldadura por fusão onde ambos os materiais a serem ligados, como também se houver material de adição, estão no estado líquido, e brasagem, onde existe o estado sólido nos materiais a serem ligados e estado líquido no material que faz a união entre eles.

Levando em consideração o objeto de estudo deste trabalho, serão abordados apenas os processos de soldadura por fusão, que são classificados em subgrupos de acordo com o tipo de fonte de energia usada para a fusão dos materiais. A Tabela 2.1, mostra os principais processos de soldadura por fusão, características e aplicações.

Entre os processos de soldadura por fusão, os mais utilizados na indústria são os que utilizam o arco elétrico como fonte de energia [13].

Tabela 2.1: Tipos de processos de soldadura por fusão [14].

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
<b>ELETRO-ESCÓRIA</b>	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática, Junta na vertical, Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão, Não existe arco	Aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Peças de grande espessura, eixos
<b>ARCO SUBMERSO</b>	Arco elétrico	Contínua ou alternada, Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática ou semi-automática, O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão Quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado em soldaduras em geral
<b>ELETRODOS REVESTIDOS</b>	Arco elétrico	Contínua ou alternada, Eletrodo + ou -	Escória gases gerados	Manual, Vareta recoberta por camada de fluxo	Aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Chapas
<b>ARAME TUBULAR</b>	Arco elétrico	Contínua, Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO <sub>2</sub>	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro, Automático ou semi-automático	Aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Chapas
<b>MIG/MAG</b>	Arco elétrico	Contínua, Eletrodo +	Argón ou Hélio, Argón + O <sub>2</sub> , Argón + CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	Automático ou semi-automático, O arame é sólido	Aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1mm. Tubos, chapas, etc. Qualquer posição
<b>PLASMA</b>	Arco elétrico	Contínua, Eletrodo -	Argón, Hélio ou Argón + Hidrogênio	Manual ou automática, O arame é adicionado separadamente, Eletrodo não consumível de tungstênio, O arco é constricto por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessuras de até 1,5 mm. Passes de raiz
<b>TIG</b>	Arco elétrico	Contínua ou alternada, Eletrodo -	Argón, Hélio ou mistura destes	Manual ou automática, Eletrodo não consumível de tungstênio, O arame é adicionado separadamente	Todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Não ferrosos e aços inoxidáveis. Passe de raiz de soldaduras em tubulações
<b>FEIXE ELETRÔNICO</b>	Feixe eletrônico	Contínua, Alta tensão, Peça +	Vácuo (>> 10 <sup>-4</sup> mmHg)	Automática, Não há transferência de metal, Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto	Todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial
<b>LASER</b>	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Automática, Não há transferência de metal, Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto	Todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial. Corte de materiais não metálicos
<b>A GÁS</b>	Chama Oxi-acetilênica		Gás (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O)	Manual, Arame adicionado separadamente	Aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

### 2.1.2. Soldadura GMAW

O processo de soldadura GMAW ou MIG/MAG, como é descrito pela AWS, é um processo que utiliza-se de um elétrodo consumível, normalmente com a mesma composição química do metal base. O arco é estabelecido entre o elétrodo, que é continuamente alimentado, e o metal base. Na Figura 2.1 encontram-se representados, esquematicamente, os principais elementos da soldadura GMAW.

Este arco e a região da soldadura são protegidos por gases (ver Figura 2.2) inertes, como argón ou hélio, no caso de MIG ou gases ativos (MAG), CO<sub>2</sub> ou mistura dele, que pode ser utilizado apenas para metais ferrosos. O processo GMAW foi baseado no processo GTAW, iniciando com a soldadura do Alumínio e também de aços inoxidáveis, que ao adicionar uma pequena quantidade de O<sub>2</sub> ao gás inerte facilita a abertura do arco.

Este é o processo de soldadura de arco mais utilizado para ligas de alumínio. Ao contrário do GTAW, no processo GMAW é usada polaridade reversa, onde o elétrodo é conectado ao polo positivo da fonte e a peça tem polaridade negativa. É possível obter um arco estável, com transferência de metal suave, com baixo índice de projeções e boa penetração de soldadura. Com polaridade direta ou corrente alternada, no entanto, a transferência de metal é desorientada.

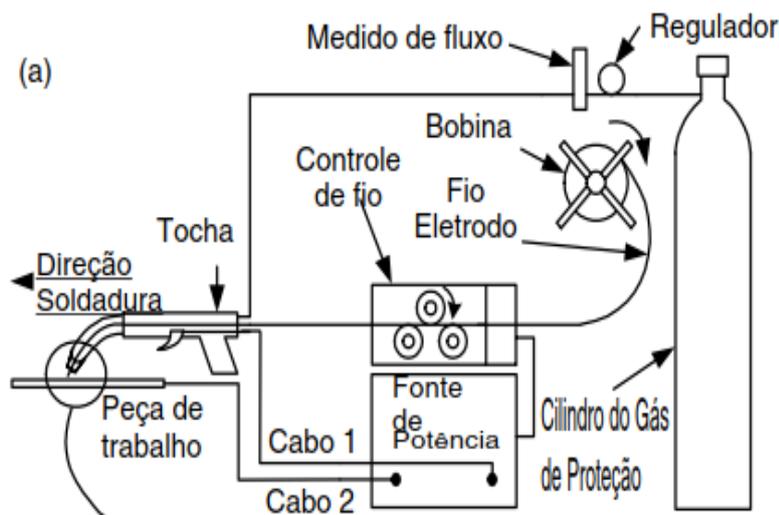


Figura 2.1: Esquema do equipamento de Soldadura GMAW [15].

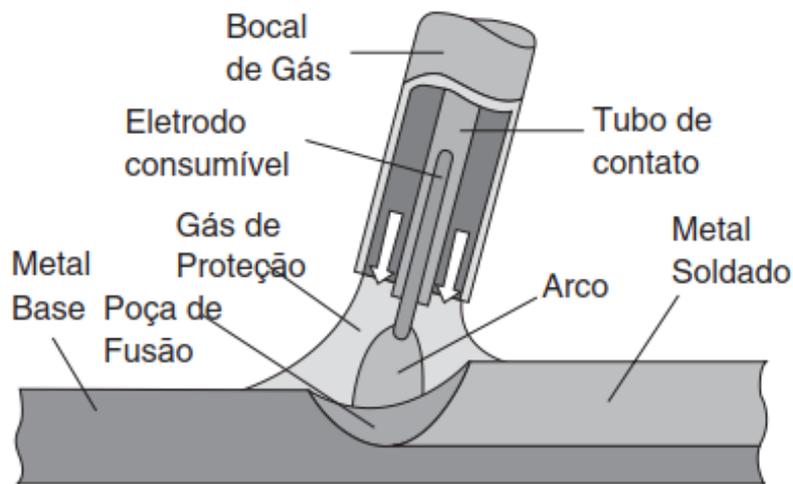


Figura 2.2: Detalhe da tocha na região da soldadura [16].

Devido a melhorias com otimização de parâmetros, tipos de arame, controle de fluxo e misturas de gás e outros, permitiram um aumento na velocidade de soldadura do processo GMAW em relação a outros processos, o que se reflete na evolução da utilização do mesmo, comparando com processos mais antigos. Como pode ser visto na Figura 2.3.

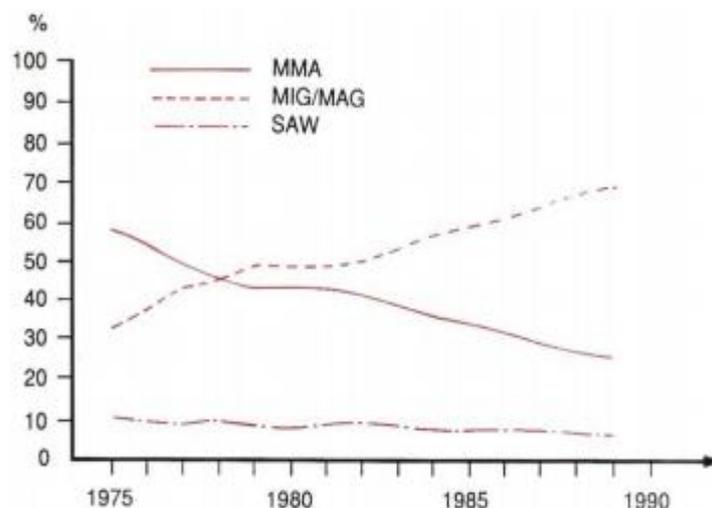


Figura 2.3: Utilização das técnicas de soldadura na Europa [12].

A transferência de metal do eletrodo para a poça de fusão pode ser feita através de três maneiras básicas. São elas, globular, spray ou por curto-circuito. Na Figura 2.4, apresenta-se uma representação esquemática de cada um dos modos de transferência referidos.

Transferência globular é obtida através de arcos longos, valores de corrente altas e utilizando gases ativos. A velocidade de deposição do material é baixa e influenciada pela gravidade e também por forças do arco. Porém, o tamanho das

gotas são aproximadamente do diâmetro ou maiores que o do eletrodo consumível. Essa deposição não é suave e, geralmente, produz mais projeções em comparação com a transferência por spray. Se for utilizado argon ou hélio devem ser usadas correntes de soldadura baixas.

Transferências por spray é caracterizada por pequenas gotas e alta velocidade comparadas com a globular. É obtida quando se excede um nível de corrente crítica de soldadura, o nível crítico depende do material a ser soldado, o diâmetro do eletrodo e dos gases de proteção. As pequenas gotas são deslocadas através do arco e sob influência de força eletromagnética e a transferência de metal é mais estável e livre de projeções.

Quando se dá um processo de soldadura com uma corrente baixa ou arco curto, o material na ponta do eletrodo pode não fundir rápido o suficiente para manter o arco, o metal fundido é atraído para a poça de fusão por efeitos de tensão superficial, sendo formado um curto-circuito. Após isto, o arco é reestabelecido e o ciclo se repete. Isto é desejado para a soldadura de chapas finas, processo de soldadura em posição sobre cabeça ou em passes de raiz com grande distância de abertura.

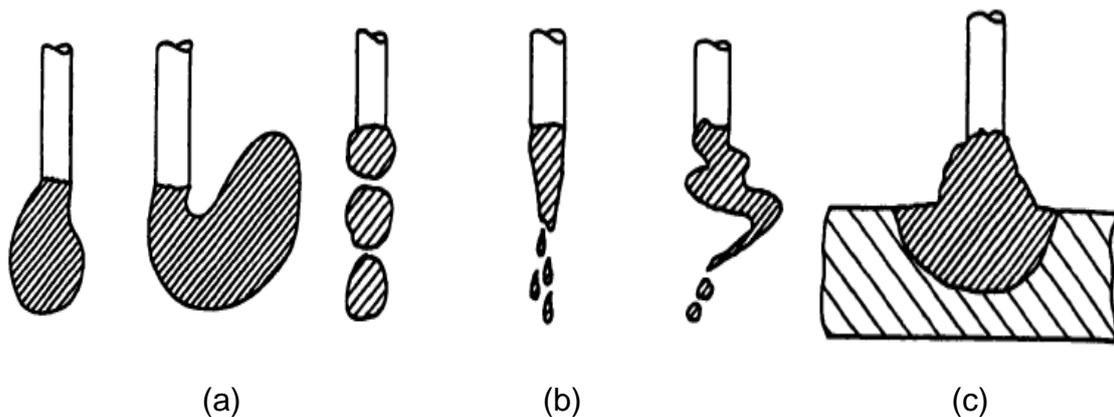


Figura 2.4: Tipos de transferência de metal (a) Globular (b) Spray (c) Curto-circuito [11].

No geral, as principais vantagens do processo GMAW são as altas taxas de deposição, variedade de espessura que podem ser aplicadas, não há necessidade de remoção de escória e alto fator de trabalho do soldador. Porém, as limitações se dão por uma grande sensibilidade na variação dos parâmetros elétricos, que têm uma grande influência na qualidade final da soldadura.

## 2.2. Alumínio e suas Ligas

O Alumínio é um elemento muito abundante no nosso planeta, encontrado na forma de bauxita, que é um minério com teor entre 35 a 45% de óxido de alumínio, também chamado alumina. Em 1886, o processo da extração do alumínio do seu minério, bauxita, tornou-se viável para uma produção comercial. Este método foi criado por Heroult, na França, e Hall, nos Estados Unidos, é o processo básico que é usado até os dias atuais [16]. É um metal que apresenta baixa densidade, alta resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, boa tenacidade, alta resistência a baixas temperaturas e excelente conformabilidade, propriedades essas sem similar na natureza.

Esse metal, em estado puro, tem utilidades muito limitadas na indústria, devido a sua baixa resistência mecânica e dureza. Porém, suas ligas são amplamente utilizadas nos mais variados setores, tais como aeronáutica, naval, automóvel. As características das ligas podem ser muito melhoradas dependendo dos elementos adicionados, melhorando a resistência mecânica, condutividades térmicas ou elétricas, dependendo do uso que será dado [17].

O comitê europeu de padronização (CEN) dividiu essas ligas em duas classes nos anos 70, de acordo com a forma que foram produzidos, por deformação ou fundição e subdivididas de acordo com a composição química. Essa designação foi definida pela *Aluminum Association*, de forma a não haver erros na identificação das ligas por parte dos engenheiros de solda. Na Tabela 2.2 encontram-se representadas as principais ligas de alumínio e suas séries. Os principais elementos de liga ao alumínio são com o cobre (Cu), silício (Si), magnésio (Mg), manganês (Mn), lítio (Li) e zinco (Zn). Onde a ligação com magnésio ou manganês favorece a capacidade de endurecimento por encruamento, com o cobre proporciona um grande aumento de força e endurecimento por precipitação, porém, reduz a resistência a corrosão, ductilidade e soldabilidade. As ligas com silício aumentam a resistência e a ductilidade, estas, quando combinadas com magnésio, sofrem um endurecimento por precipitação. Enquanto o zinco aumenta a resistência mecânica da liga da liga e permite um endurecimento por precipitação, contudo, este elemento pode originar corrosão sob tensão, característica que pode ser melhora com o crómio. E por fim, o lítio aumenta substancialmente a resistência à tração e o módulo de Young,

proporcionando um endurecimento por precipitação e a diminuição da densidade [16].

Tabela 2.2: Ligas de Alumínio e suas séries.

SÉRIE	ELEMENTOS LIGANTES	TRATAMENTOS TÉRMICOS
1XXX	Alumínio puro comercial	Não
2XXX	Cobre	Sim
3XXX	Manganês	Não
4XXX	Silício	Não
5XXX	Magnésio	Não
6XXX	Magnésio e Silício	Sim
7XXX	Zinco e Magnésio	Sim
8XXX	Outros elementos (Lítio, Ferro)	
9XXX	Grupo de ligas não atribuído	

O fato de o alumínio ter elevada condutividade térmica, alta reatividade química com oxigênio e enorme solubilidade em hidrogênio a altas temperaturas, podem induzir várias desvantagens, como formação de porosidade, falta de molhagem, redução de resistência mecânica, distorção e tensões residuais de tração [18]. Uma forma de melhorar a resistência à corrosão, é acelerar a formação da camada de óxido de alumínio na superfície da peça por meio de anodização. A alumina é transparente, inerte e estável, seu ponto de fusão é de 2040°C [19].

### 2.3. Tensões Residuais

Ao tratar-se da junção de materiais metálicos por meio de fusão do material, nota-se que a área do limite do material a ser unido sofrerá um aumento de temperatura muito grande fazendo com que esse material dilate. Na etapa inicial de arrefecimento, os materiais mais externos contraem e o endurecimento é anterior aos materiais internos, o que leva a tensões de compressão internas que são equilibradas por tensões externas. Após essa fase, os materiais internos começam a arrefecer e a contrair. Porém, o processo de contração é limitado pela vizinhança externa endurecida, o que leva a tensões de tração internas e equilibradas por esforços de compressão externos [20].

Entretanto, como essa nova junção se dá em níveis atômicos, o volume ocupado no fim do processo é o mesmo do início, o que faz que a peça sofra efeitos de elevados esforços internos, que são chamadas tensões residuais [21]. As tensões

residuais introduzidas por soldaduras devem ter atenção dos engenheiros pelas suas consequências na formação de fissuras, fratura e diminuição da vida à fadiga das estruturas soldadas, quando sujeitas a carregamento dinâmico ou ambiente agressivo [22].

Portanto, tensões residuais são aquelas que existem numa estrutura ou peça sem a presença de quaisquer cargas externas [23]. Processos como mudança brusca de temperatura, deformações plásticas ou processos mecânicos como maquinagem ou conformação podem causar tensões internas ou deformações. Assim, o nível e sinal das tensões residuais dependem tanto dos processos de fabrico quanto das propriedades do material que relacionam com o processo mecânico [24] [25].

Durante o processo de soldadura, podem surgir tensões de tração e compressão ao longo da chapa e ao longo do cordão de soldadura. A distribuição dessas tensões podem ser demonstradas de acordo com a Figura 2.5, na sequência, em (a) de acordo com o comprimento da peça e em (b) na direção da soldadura [26].

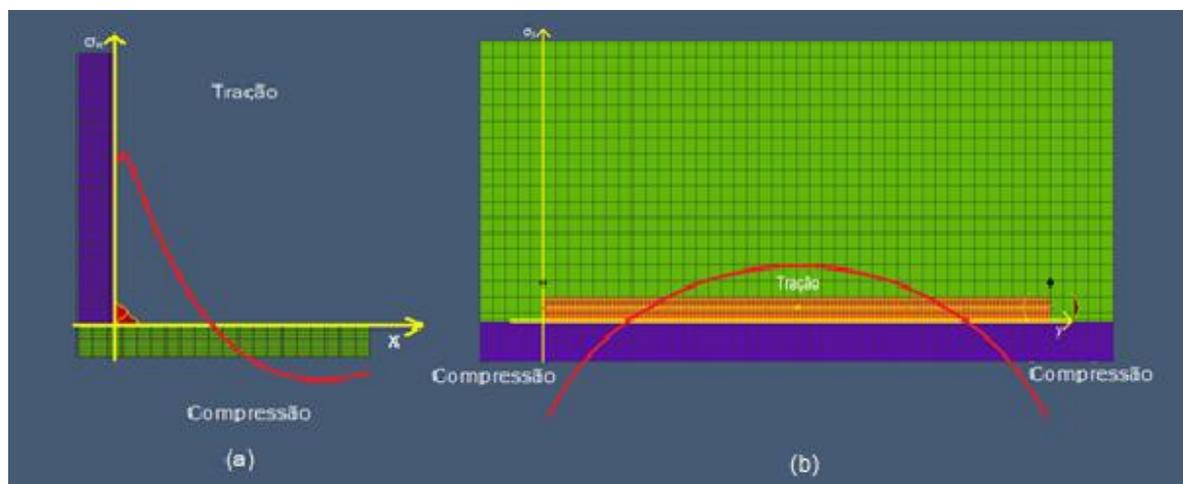


Figura 2.5: Distribuição de tensão (a)  $\sigma_x$  e (b)  $\sigma_y$ .

Como resultado das tensões residuais podem ocorrer distorções elásticas ou plástica na peça que, no limite, leva à inutilização da mesma.

Quando a maioria dos materiais é aquecido, o tamanho médio dos átomos aumenta junto com a vibração deles. Isto faz com que aumente a separação entre os átomos, estendendo as ligações moleculares, fazendo com que o material se expanda. Se o material não mudar de fase, a expansão pode ser facilmente relacionada com a

mudança de temperatura. Se a energia térmica de um material diminuir, o material encolherá. Assim, a deformação térmica de um comprimento de barra pode ser demonstrada pela equação 1.

$$\delta_{th} = \alpha. (\Delta t). L \quad (1)$$

Onde  $\delta_{th}$  é a deformação termal, L é o comprimento inicial da barra,  $\Delta t$  é a variação de temperatura e  $\alpha$  é o coeficiente linear de expansão térmica do material [27].

As tensões presentes na peça podem ultrapassar a tensão limite de cedência de tração e, novamente, o material se deforma para acomodar as tensões. Entretanto, de forma semelhante à compressão, sob tração, o material somente consegue se deformar com tensões superiores à tensão limite de cedência.

#### **2.4. Simulações de Processos de Fabrico**

Com o avanço da tecnologia na indústria, e o aumento contínuo da capacidade de processamento dos computadores, foi atingido um nível no qual a análise de soldadura através de modelação numérica pode ser usada para prever as distorções das peças soldadas, tal como, as tensões residuais das estruturas reais, buscando soluções a diversos problemas associados aos processos de fabrico. E o método numérico de elementos finitos tem aparecido como uma ótima ferramenta para a estimativa de fenómenos físicos complexos [28].

A importância da simulação tem crescido muito nos últimos anos, isso permite que os engenheiros imaginem novos sistemas e permitam qualificar e observar seu comportamento. Esses modelos, podem ser alterados e executados com um novo arranjo para observar o comportamento do protótipo antes mesmo de ser concluído, economizando custos e *lead time*. A modelação e simulação estão emergindo como tecnologias-chave para apoiar a fabricação [5].

Tais métodos podem apresentar modelos que condizem com a realidade, com cálculos mais exigentes, O método dos elementos finitos permite recriar com detalhe a geometria, considerando os comportamentos não lineares dos materiais [29]. como características que dependem da variação de temperatura, como, por exemplo, condutividade térmica e capacidade calorífica do material.

Isso sugere uma análise muito próxima a de um produto acabado, porém, sem gastos iniciais excessivos com protótipos, equipamentos de fixações, previsão de trajetórias para o processo de fabrico. Tendo em vista detectar possíveis inconveniências e desconformidades antes de o produto sair da fase de projeto.

Dessa forma, a utilização das ferramentas de análise numéricas tem sido amplamente utilizada em pesquisas nos ambientes industriais e universitários ao redor do mundo.

### Método de Elementos Finitos

Um dos métodos mais utilizados de análises numéricas é o FEM, que é uma adaptação dos métodos de aproximação utilizados em engenharia e ciência, a primeira referência a este método é aproximadamente em 1940. Este método foi simplificado através dos *softwares* de CAD/CAE, onde as análises podem ser feitas em estruturas com propriedades de materiais lineares ou não-lineares, estudos térmicas estáveis e instáveis [30].

Para cada nó de um elemento finito, existem seis graus de liberdade (DOF). É útil definir um sistema de coordenadas naturais ( $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ ) com a sua origem no centro do cubo, pois facilita a construção das funções de forma e a integração da matriz [31].

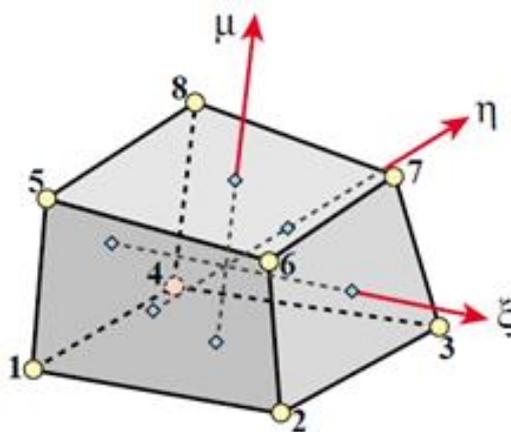


Figura 2.6: Elemento de hexaedro com oito nós e sistemas de coordenadas.

Em geral, é recomendável usar malhas hexaédricas para problemas estruturais. Essas malhas, muitas vezes, aumentam a precisão e podem representar o comportamento dos componentes da maneira mais realista [32]. No caso de um

hexaedro, que é um poliedro com seis faces, oito nós e doze arestas, também é conhecido como elemento finito *brick hex8*.

A elaboração das funções de forma desses elementos e o cálculo da matriz de rigidez foram simplificadas pelos avanços na tecnologia de elementos finitos, como as coordenadas naturais, mapeamento isoparamétrico e integração numérica, possibilitando a construção sistemática de grupos de elementos finitos.

A definição Isoparamétrica do Hex8 pode ser definido na forma de matriz por valores nodais multiplicados pelas funções de forma, mostradas na equação 2.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \\ u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_6 & z_7 & z_8 \\ u_{x1} & u_{x2} & u_{x3} & u_{x4} & u_{x5} & u_{x6} & u_{x7} & u_{x8} \\ u_{y1} & u_{y2} & u_{y3} & u_{y4} & u_{y5} & u_{y6} & u_{y7} & u_{y8} \\ u_{z1} & u_{z2} & u_{z3} & u_{z4} & u_{z5} & u_{z6} & u_{z7} & u_{z8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^e \\ N_2^e \\ \vdots \\ N_8^e \end{bmatrix} \quad (2)$$

As funções de forma são apresentadas na equação 3.

$$\begin{aligned} N_1^e &= \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \mu), & N_2^e &= \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \mu), \\ N_3^e &= \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \mu), & N_4^e &= \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \mu), \\ N_5^e &= \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \mu), & N_6^e &= \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \mu), \\ N_7^e &= \frac{1}{8}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \mu), & N_8^e &= \frac{1}{8}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \mu). \end{aligned} \quad (3)$$

Sendo que pode-se resumir essas oito equações na equação a seguir.

$$N_i^e = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \mu\mu_i) \quad (4)$$

em que  $\xi_i$ ,  $\eta_i$  e  $\mu_i$  são as coordenadas naturais do nó na posição  $i$ .

É verificado que a soma das oito funções de forma é idêntica, satisfazendo assim os requisitos de integridade.

O cálculo de derivadas parciais das funções de forma do hexaedro em relação às coordenadas cartesianas segue técnicas para os elementos quadrilaterais bidimensionais do FEM. Somente o tamanho das matrizes muda devido à aparência das três dimensões [33]. Dadas por:

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_i^e}{\partial x} &= \frac{\partial N_i^e}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial y} &= \frac{\partial N_i^e}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial z} &= \frac{\partial N_i^e}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial z} + \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial N_i^e}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial z}\end{aligned}\tag{5}$$

Reescrevendo na forma matricial. Obtém-se a equação 6.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \mu}{\partial x} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial \mu}{\partial y} \\ \frac{\partial \xi}{\partial z} & \frac{\partial \eta}{\partial z} & \frac{\partial \mu}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^e}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial \mu} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^e}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial \mu} \end{bmatrix}\tag{6}$$

Sendo que, [J] é a matriz de transformação e representa a mudança de base das derivadas de coordenadas globais para as coordenadas naturais.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \mu} & \frac{\partial y}{\partial \mu} & \frac{\partial z}{\partial \mu} \end{bmatrix}\tag{7}$$

A matriz J é a matriz jacobiana de (x, y, z) em relação a (ξ, η, μ) e J<sup>-1</sup> é a inversa da matriz jacobiana. Para cálculo com múltiplas variáveis, o jacobiano é dado por uma padronização da derivada ordinária, que reduz uma função escalar x = x (ξ) [34].

Seguindo a idealização da área de malha, a geometria pode ser engrenada de acordo com os requisitos de modelagem através de algoritmos de malha de superfície totalmente integrados. Esses algoritmos são criados para aplicações CFD, com resolução adaptada à curvatura de superfície local e caixas de tamanho flexível, cascas e malha sólida para análise estrutural e térmica, implementação de elemento de camadas de limite e malhas com elementos hexaédricos dominantes [35].

## 2.5. Método de Taguchi

O engenheiro e estatístico Genichi Taguchi (1924-2012), Tokamachi, no Japão foi o responsável por desenvolver uma metodologia, propôs métodos baseados em estatísticas matemáticas para que exista a menor variação possível entre os produtos industriais. Chegando a um padrão de produção e qualidade oferecida aos clientes, conseguindo ser lucrativa e competitiva a nível mundial.

A ideologia de Taguchi está criando uma classe totalmente diferente de engenheiros que pensam, respiram e vivem qualidade. Ele criou uma nova cultura de qualidade. A Ford Motor Company, por exemplo, decretou no início da década de 1990 que todos os engenheiros da Ford Motor e fornecedores são treinados na metodologia Taguchi. A filosofia tem consequências a longo prazo, mas seus três alicerces são conceitos muito simples. Esses conceitos são, que a qualidade deve ser projetada no produto e não inspecionada, a qualidade é alcançada minimizando o desvio de um alvo e o custo da qualidade deve ser medido em função do desvio padrão, e as perdas devem ser medidas em todo o sistema [36].

Ao utilizar de matrizes ortogonais, seguindo os estudos de Ronald Aylmer Fisher na área do planejamento de experimentos. Suas vantagens são o uso sem grande conhecimento de estatística e matemática sofisticada e a coleta de um grande número de dados com custos reduzidos e pequeno número de experimentos.

Para a concepção das análises através do Método de Taguchi, são sugeridas oito etapas. Sendo a primeira, definir o problema, em seguida, determinar o objetivo, determinar parâmetros e identificar ruídos, os níveis devem também ser definidos, selecionar a matriz adequada e as interações entre colunas, proceder com os experimentos e reunir os dados, analisar-los com a metodologia adequada, interpretar os resultados, definir a condição ótima e realizar os testes de confirmação [37, 38].

Cada característica, pelo método de Taguchi, é avaliada por separado, sendo assim, a otimização de várias características em simultâneo se torna uma limitação para o método. Outros pesquisadores basearam-se em Taguchi sugerindo métodos adicionais para esses problemas, entres eles Grey é o mais notável.

A busca é por uma redução das variações nos produtos, de forma a aumentar a qualidade, diminuindo defeitos ou descarte de peças. De acordo com as características avaliadas, os valores podem ser qualificados em três categorias diferentes, sendo elas, quanto maior melhor, quanto menor melhor e nominal é melhor [39].

### **Análise de Variância**

O objetivo de utilizar a análise de variância (ANOVA) neste trabalho é o de investigar quais parâmetros do processo de soldadura que afetam mais significativamente as características de qualidade. Isto é conseguido ao separar a variabilidade total dos valores obtidos, que é medida pela soma dos desvios quadrados da média total dos valores, em contribuições por cada parâmetro do processo de soldadura e o erro. O teste de significância do modelo de regressão, o teste de significância em coeficientes de modelo individuais e o teste de falta de ajuste foram realizados usando o *software* Microsoft Office Excel 2016.

Como desejamos diminuir as características inseridas pelo processo de soldadura, o nível ótimo dos parâmetros do processo é o nível com o menor valor. Além disso, uma análise estatística de variância é realizada para cada resposta individualmente para ver quais parâmetros do processo são estatisticamente significativos. A combinação ideal dos parâmetros do processo pode então ser prevista [40].



## 3. Simulações Numéricas

As simulações numéricas do processo de soldadura foram realizadas recorrendo a um *software* comercial específico para este tipo de processo de fabrico, denominado Simufact.Welding® da MSC Software Company. Com este *software* é possível simular diferentes processos de soldadura, nomeadamente o processo MIG/MAG que foi analisado no âmbito deste trabalho. Foram efetuadas simulações para dois tipos de juntas, topo-a-topo e de canto. Tal como referido no primeiro capítulo, este trabalho encontra-se inserido num projeto de maior dimensão e, nesse sentido, há um maior interesse em analisar juntas de canto e, por essa razão, as simulações centram-se, predominantemente, neste tipo de juntas.

### 3.1. Equipamentos e Materiais

Os elementos necessários para a realização deste estudo podem ser divididos em *Software*, equipamentos, materiais e ferramentas.

*Software*:

- SOLIDWORKS Student Design Kit (2017-2018), ©2018 Dassault Systemes, SolidWorks Corporation;
- Simufact.welding 6.0.0 (v6.0.0.47279.x64 (Windows) 2016), Copyright © 2002-2016 simufact engineering gmbh, Hamburg;
- ANSA v15.1.0 64-bit (2014), @ Copyright 2014 BETA CAE Systems SA.

Equipamentos:

- Máquina Virtual com processador Intel® Core™ i7-4790K CPU @ 4.00GHz 4.00 GHz, memória instalada (RAM) 8.00GB, sistema operando em 64-bit e sistema operativo Windows 7 Professional Copyright © 2009 Microsoft Corporation, Service Pack 1;
- Robô YASKAWA MOTOMAN MA2010 tipo YR-MA02010-A01, adquirido em junho de 2016, capacidade de carga útil de 10 Kg, massa de 280 Kg, com 6 graus de liberdade, número de série R16479-749-4, número de pedido

- S62N96-1-6, máxima pressão pneumática de 490 kPa, tensão de alimentação AC 400V trifásico, 50/60 Hz, e potência consumida de 2,0 kVA;
- Controlador YASKAWA DX200, adquirido em setembro de 2016, fonte de alimentação trifásica: 400/415/440 V, 50/60 Hz, potência consumida 2,0 kVA, corrente de carga total de 5,8 A, corrente de curto circuito 2,5 kA, desenho número 349854210, número de série 162017, tipo ERES-MA02010-E00, tipo do robô YR-MA02010-A00;
- Mesa móvel MOTOMAN MT1-250 S2CX, número da máquina 315128, fabricada em 2003-01, com 2 graus de liberdade e 250 Kg;
- Fonte de Solda MIG/MAG FRONIUS TransPuls Synergic 4000 CMT R, número de série 28078438, em conjunto com um robô de avanço de arame VR 1550 4R/F++ Roboter, número de série 28096066, uma unidade de refrigeração FK4000 R FC, com bomba centrífuga e sensor de fluxo com filtro de refrigerador, número de série 28096065, e uma tocha de soldadura Robacta Drive CMT-PAP W, número de série 28096067 com bocal 34,0305,1974,630 Robacta 5000 36° OVT L=224 mm e H=86mm.
- Exaustor para fumos PEGAS P-001 MF- FILTER, número de série 201604429-2016 alimentação AC 230 V, 5,15 A, 50Hz, 0,75 Kw;
- Guillotina hidráulica MINI 320, número 021854, 1988, pressão máxima de 250 bar;
- Máquina de corte de mesa Struers Labotom;
- Microscópio Veho VMS-005-LCD, ampliação digital de 1200x e ampliação ótica de 300x e software Veho PortableCapture Pro version 3.0.0.

#### Materiais:

- Liga de alumínio 5754 em fio de 1 mm de diâmetro AlcoTec Wire Corporation;
- Liga de alumínio 6082-T6 em chapas de 5 mm de espessura;
- Argón comprimido PRAXAIR.

#### Ferramentas:

- Suporte para fixação das peças na mesa;
- Máscara de solda automática ANSI/ISEA Z87.1-2010;

- Paquímetro;
- Régua;
- Escova de aço.

### 3.2. Ensaio Experimentais

Para efetuar as simulações numéricas com maior acuidade é necessário conhecer alguns parâmetros geométricos do cordão de soldadura. Assim, efetuaram-se ensaios experimentais para o tipo de juntas que se pretendeu simular numericamente. Como tal, foi possível determinar as dimensões dos protótipos, pontos de fixação, tipos de juntas, trajetórias do robô e também os parâmetros em comum entre o software e os equipamentos de soldadura, de modo a verificar quais são passíveis de variação.

Como ponto de partida utilizou-se os parâmetros ótimos definidos em estudos anteriores, descritos nas referências [41] e [42]. Após o primeiro ensaio, que foi determinado como parâmetro médio, foram definidos novos intervalos de intensidade de corrente, tensão do arco, velocidade de soldadura e inclinação da tocha.



Figura 3.1: Ensaio teste com junta de topo entre as chapas.

Para o primeiro teste foram usadas chapas de Liga de Alumínio AL 6082-T6, com as dimensões de  $100 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ , soldadura de junta de topo, com fixações em ambos os lados feitas com chapas de aço CK45 e dimensões de  $60 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$ , os parâmetros utilizados corresponderam à intensidade de corrente de 170 A, Tensão de 21,1 V, inclinação da tocha de  $0^\circ$  em relação ao centro do cordão de soldadura

e velocidade de soldadura de 15 mm/s. A junta soldada pode ser observada na Figura 3.1.

No ensaio seguinte, foram usadas chapas com as mesmas dimensões, porém, o tipo de junta usada foi a de canto. Os fixadores tiveram dimensões distintas, assim, a chapa superior tem as dimensões de 80x30x3 mm<sup>3</sup> e o suporte inferior mede 60x30x3 mm<sup>3</sup>, os parâmetros de soldadura utilizados foram os mesmos do teste anterior. Na Figura 3.2 é possível observar o provete obtido.

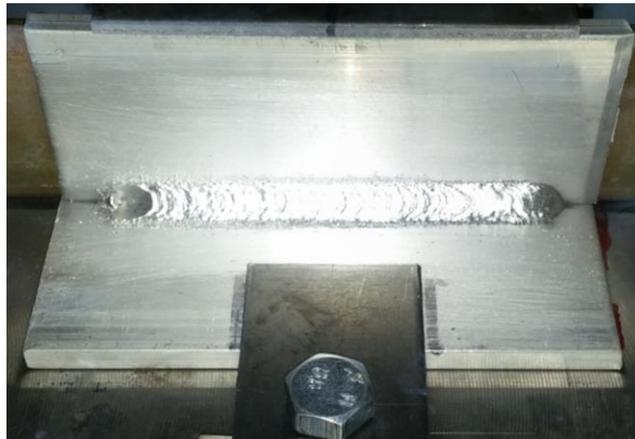


Figura 3.2: Ensaio teste com junta de canto entre as chapas.

Com a realização destes testes experimentais e conhecendo os materiais utilizados, foram escolhidos os parâmetros de soldadura para este estudo. Os parâmetros foram divididos em três níveis, originando a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores dos parâmetros escolhidos para os diferentes níveis.

NÍVEIS	PARÂMETROS			
	Corrente (A)	Velocidade (mm/s)	Inclinação (°)	Tensão (V)
1	151	10	-30	19.7
2	170	15	0	21.1
3	190	20	30	22.7

Referindo a inclinação da tocha, os ângulos apresentados na Tabela 3.1, estão ordenados seguindo a Figura 3.3.

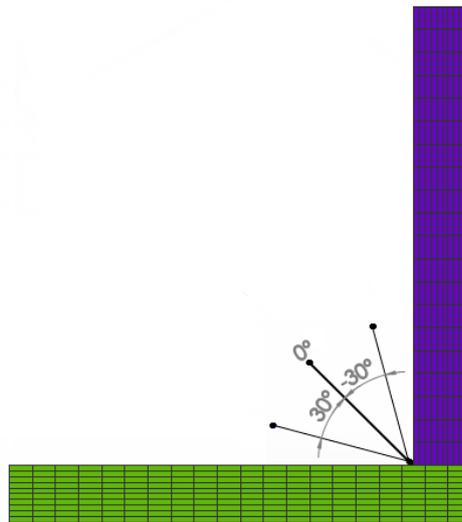


Figura 3.3: Inclinação da tocha de soldadura.

Sendo que, o eixo principal é determinado pela posição da tocha, que é perpendicular a superfície central do cordão de soldadura, sendo este valor igual a  $0^\circ$ . Os outros dois ângulos são posicionados com  $30^\circ$  em relação ao principal, em ambas as direções.

### 3.3. Matriz Ortogonal de Taguchi

O grande objetivo num novo projeto é o reduzir o tempo, os gastos e erros, que causam retrabalhos de peças. Para isso, uma ótima ferramenta no apoio a esse processo é o recurso a um *software* de simulação utilizados em engenharia. Recorrendo a estas ferramentas numéricas, é possível simular características mecânicas, análises cinemáticas, características geométricas, entre outros atributos relacionados com o produto final.

Nesta etapa do trabalho, sabendo quais os parâmetros que serão variáveis e os valores para os níveis, pode-se definir a composição da matriz ortogonal de Taguchi adequada. Neste caso, foram selecionados quatro parâmetros e três níveis, o arranjo ortogonal mais adequado é dado pela matriz L27. Isso representa a necessidade de 27 combinações diferentes entre os parâmetros, como é visto na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Matriz Ortogonal L27 de Taguchi.

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2
	a	b	a b	a b <sup>2</sup>	c	a c	a c <sup>2</sup>	b c	a b c	a b <sup>2</sup> c <sup>2</sup>	b c <sup>2</sup>	a b <sup>2</sup> c	a b <sup>2</sup> c <sup>2</sup>
<b>GRUPOS</b>	1	2			3								

Como o equipamento utilizado é sinérgico, logo, a intensidade de corrente e a tensão estão diretamente dependentes, isto é, ao alterar a intensidade de corrente a tensão do arco muda, de forma automática, numa proporção constante. Assim, apenas se poderá escolher um dos dois parâmetros e, no presente trabalho, optou-se por selecionar a intensidade de corrente.

Como tal, os parâmetros escolhidos foram, a velocidade de soldadura, a inclinação da tocha e intensidade de corrente.

Após a matriz de Taguchi estar definida, os três níveis foram substituídos pelos valores escolhidos.

Tabela 3.3: Matriz Ortogonal L27 de Taguchi adaptada.

Nº	1	2	5
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	2	1	1
11	2	1	2
12	2	1	3
13	2	2	1
14	2	2	2
15	2	2	3
16	2	3	1
17	2	3	2
18	2	3	3
19	3	1	1
20	3	1	2
21	3	1	3
22	3	2	1
23	3	2	2
24	3	2	3
25	3	3	1
26	3	3	2
27	3	3	3
	a	b	c
<b>GRUPOS</b>	1	2	3

Foi utilizado o primeiro parâmetro de cada grupo, como pode ser visto na Tabela 3.3, a Matriz L27 adaptada com as colunas utilizadas.

### 3.4. Parâmetros de Soldadura

Após a matriz de Taguchi estar definida e adaptada ao modelo em estudo, os três níveis foram substituídos pelos valores escolhidos, originando a Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Matriz Ortogonal L27 com valores dos parâmetros.

L_27	CORRENTE [A]	VELOCIDADE [MM/S]	ÂNGULO TOCHA [°]	TENSÃO [V]
S_01	151	10	-30	19.7
S_02	151	10	0	19.7
S_03	151	10	30	19.7
S_04	151	15	-30	19.7
S_05	151	15	0	19.7
S_06	151	15	30	19.7
S_07	151	20	-30	19.7
S_08	151	20	0	19.7
S_09	151	20	30	19.7
S_10	170	10	-30	21.1
S_11	170	10	0	21.1
S_12	170	10	30	21.1
S_13	170	15	-30	21.1
S_14	170	15	0	21.1
S_15	170	15	30	21.1
S_16	170	20	-30	21.1
S_17	170	20	0	21.1
S_18	170	20	30	21.1
S_19	190	10	-30	22.7
S_20	190	10	0	22.7
S_21	190	10	30	22.7
S_22	190	15	-30	22.7
S_23	190	15	0	22.7
S_24	190	15	30	22.7
S_25	190	20	-30	22.7
S_26	190	20	0	22.7
S_27	190	20	30	22.7

Como se pode observar na Tabela 3.4, os valores para tensão variam de acordo com a corrente, ou seja, não é um valor fixo em cada simulação, porém, não entra como parâmetro variável na análise.

### 3.5. Peças em CAD/CAE

Após a escolha da Matriz de Taguchi, pode-se começar modelar as peças utilizadas nas simulações. Foram tomadas por base as chapas de Liga de Alumínio 6082-T6 presentes no laboratório de Eletrotécnica, com dimensões de 100x40x5 mm<sup>3</sup>.

Para a realização de uma simulação bem sucedida é necessário o auxílio de um software CAD/CAE. Para isso recorreu-se ao Software SOLIDWORKS® Student Edition, da Dassault Systèmes, disponibilizado pelo Instituto Politécnico de

Bragança, para realizar a modelação das peças a serem soldadas. Os arquivos criados foram exportados para a extensão do tipo Entidades de sólido/superfície IGES (\*.igs) com superfície aparada (tipo 144), que é um tipo arquivo comum a vários Software de modelação 3D, para que o software de geração da malha de elementos o pudesse ler.

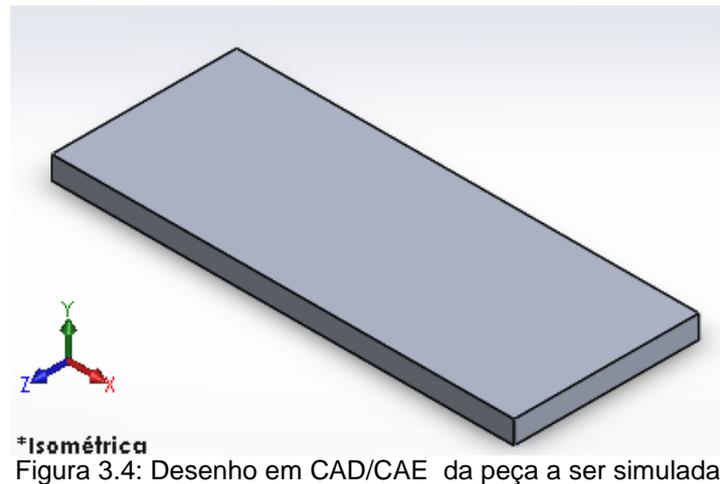


Figura 3.4: Desenho em CAD/CAE da peça a ser simulada.

Na Figura 3.4 encontra-se representado o modelo tridimensional da chapa utilizada na simulação numérica.

### 3.6. Malha de Elementos Finitos

Foi necessário a geração de uma malha de elementos finitos nas peças. Essa malha, de acordo com a geometria das peças devem ser mais refinada, isso influencia os resultados obtidos. Porém, uma malha de elementos finitos muito refinada pode fazer com que a simulação seja mais lenta e exija muito do hardware de processamento.

Assim, a MSC dá alguns critérios a ter em consideração para a geração de malhas. Tetraedros lineares devem ser evitados sempre que possível em análises não lineares pois apenas apresentam 1 ponto de integração, já os hexaedros lineares com 8 nós têm 8 pontos de integração o que permite uma melhor convergência de resultados. Elementos lineares têm bom desempenho em análises térmicas e são, assim, recomendados, assumindo que a densidade da malha é suficientemente alta. As oscilações térmicas ocorrem menos para malhas mais refinadas e podem ser evitadas com refinamentos locais. Os elementos lineares não refletem bem os modos de encurvadura em análises mecânicas, e assim os elementos quadráticos

com integração reduzida são recomendados, como os hexaedros. O número de nós não deve ser excessivo, tanto para a análise térmica como mecânica.

O Simufact.Welding é um software que só faz o processamento de uma malha previamente gerada em outro programa. Assim, foi necessário gerar a malha de elemento finitos em outro programa, neste caso, foi utilizado o ANSA v15.1.0, da BETA CAE Systems SA, onde foi necessário definir o tipo de elemento finito a ser utilizado no estudo. Para modelos em três dimensões o indicado são elementos de volume, nesse caso, foi definido uma malha com elementos como hexaedros, onde cada elemento tem seis faces, oito nós e doze arestas.

Primeiramente, foi criada uma malha mais robusta com 3.750 elementos, essa malha foi utilizada para fazer as primeiras simulações com um tempo menor, com o objetivo de conhecer e explorar o software em questão. Como pode ser vista na Figura 3.5.

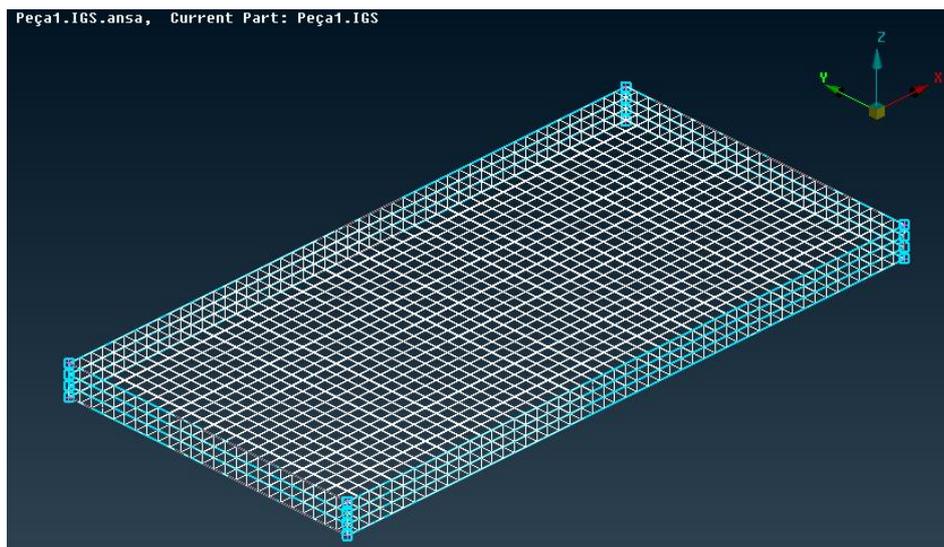


Figura 3.5: Modelo da peça com malha de elementos finitos robusta.

Com o intenção de melhorar os resultados, foi feito refinamento da malha de elementos finitos. Porém, o processamento foi mais exigente, deixando o funcionamento do computador instável, com reinicializações do software e até mesmo do próprio computador. A malha gerada pode ser vista na Figura 3.6.

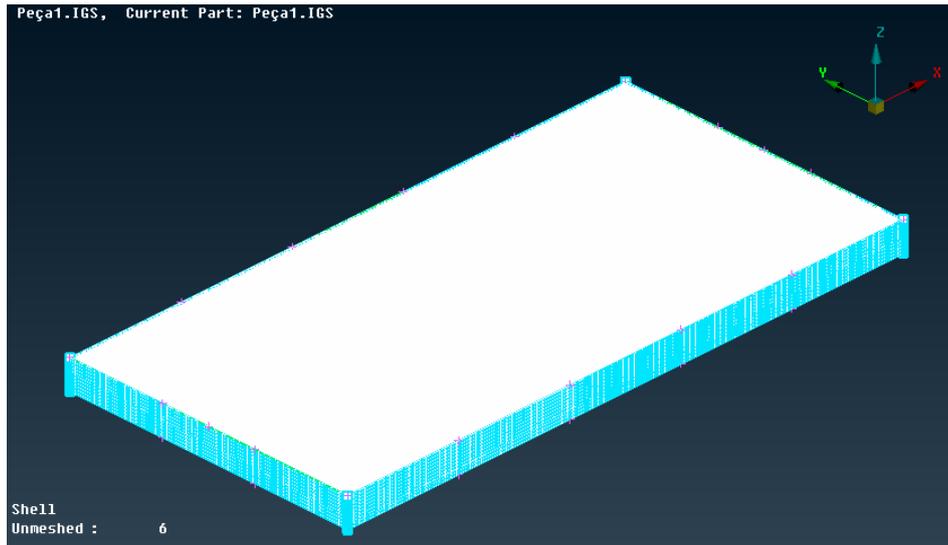


Figura 3.6: Modelo da peça com malha de elementos finitos refinada.

Com o intuito de melhorar o processamento, foi gerada uma malha com 10.000 elementos e 11.781 nós em cada peça, os resultados obtidos foram satisfatórios. Criada a malha, foi feito *backup* desses arquivos, em seguida o arquivo foi exportado para a extensão de arquivos Nastran (\*.bdf) e escolher a opção *model* antes de finalizar este procedimento. Na Figura 3.7, mostra interface do software ANSA v15.1.0.

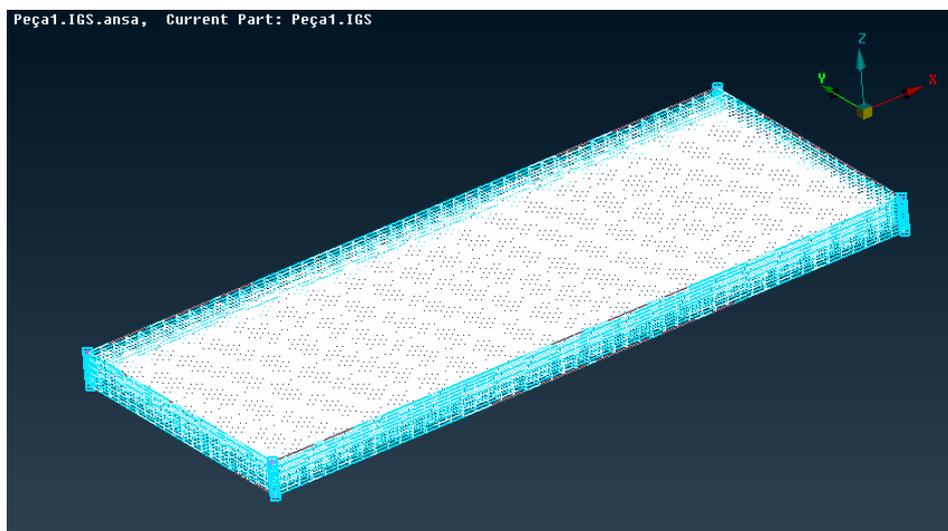


Figura 3.7: Modelo da peça com malha de elementos finitos final.

A geração da malha de elementos finitos na geometria do cordão de soldadura é feita automaticamente pelo *software* Simufact.welding, dando apenas a opção de escolher três níveis de refinamento da mesma.

### 3.7. Simulação dos Modelos Numéricos

O *software* utilizado é o Simufact.Welding® da MSC Software Company, é utilizado para modelar e simular uma ampla gama de processos de união térmica, incluindo os processos usuais de soldadura. Além disso, o *software* oferece possibilidades para modelar tratamento térmico e variações de modos de arrefecimento, bem como as cargas mecânicas nas estruturas soldadas.

Tendo sido gerada previamente a malha de elementos finitos no *software* ANSA, é possível simular o processo de soldadura no Simufact.Welding. O estudo foi iniciado com soldaduras de topo, onde ambas as chapas foram fixadas na horizontal.

A utilização deste programa é iniciada pela criação de um novo projeto, nesta fase, abrirá uma guia para a configuração do processo de soldadura. Então, deve-se escolher o tipo de soldadura a ser utilizada, neste caso selecionou-se *Arc Welding*, indicar a direção e sentido da aceleração da gravidade, o número de componentes que serão soldados, definir os *Bearings* que corresponde à base ou mesa onde serão alocados os componentes, definir os fixadores das peças das peças a soldar, que *software* utilizado tem a designação de *Clampings* e, por fim, é necessário indicar o número de robôs que serão utilizados.

A modelação deve ser iniciada com a importação das geometrias previamente malhadas, escolher as unidades de comprimento de trabalho, neste caso, milímetros e aplicar a todas as peças importadas para o programa.

Em seguida, deve-se escolher o material dos componentes que serão soldadas através da biblioteca do *software*, o mesmo é feito para a escolha do material de adição utilizado no robô, o material utilizado na simulação foi AlMgSi0-5 (Al 6082) e o material de adição usado foi AlMgSi1 (Al 6060).

O passo seguinte foi o da definição da trajetória que a tocha deve percorrer, esse trajeto é feito através da escolha de um conjunto de nós de elementos finitos. Para uma trajetória mais precisa são ocultados todos os componentes com exceção de uma das chapas, são escolhidos os pontos na aresta que entra em contato com a outra chapa.

A fonte de calor é o próximo item a ser configurado, porém, nesse passo já é necessário colocar alguns dos parâmetros escolhidos para as iterações através da matriz de Taguchi. O primeiro parâmetro a ser inserido é a velocidade do robô, em milímetros por segundo, ao longo da trajetória, seguido da intensidade de corrente em Amper e o valor da tensão do arco em Volt.

Um passo fundamental para a configuração da fonte de calor é a geometria da poça de fusão. Neste caso, com base nos provetes realizados nos ensaios experimentais foram medidos os cordões de soldadura. Utilizando o microscópio, mediu-se o comprimento anterior ( $a_f$ ) e posterior ( $a_r$ ), profundidade ( $d$ ) e lateral ( $b$ ), como está indicado na Figura 3.8.

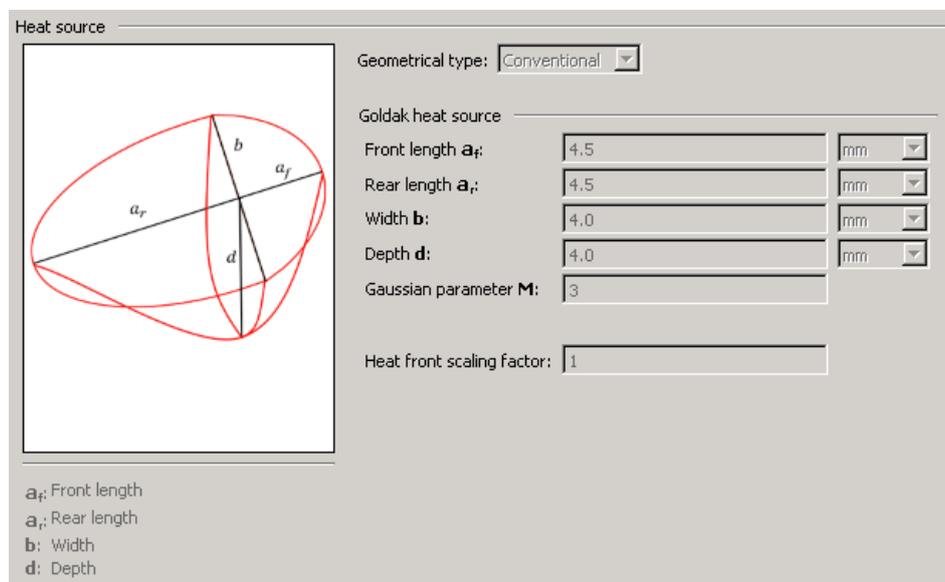


Figura 3.8: Configuração da geometria da poça de fusão.

Os dados introduzidos na secção do robô, são os tempos do início do ciclo, tempo de espera até abertura do arco, tempo de acompanhamento e tempo de pausa final. Os detalhes para o cordão de soldadura são inseridos na secção seguinte, esses dados são a projeção na superfície onde o cordão será criado, a orientação que deve ser seguida e o ângulo de inclinação desejada da tocha.

A geometria do cordão de soldadura, assim como a qualidade da malha de elementos finitos, são, também, definidos nesta fase do estudo. A malha é gerada de forma automática pelo *software*, de acordo com a trajetória escolhida e a qualidade definida anteriormente.

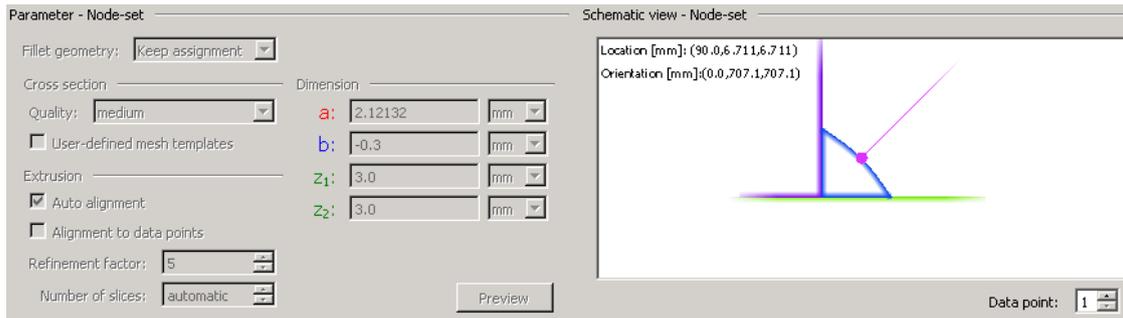


Figura 3.9: Modelagem do cordão de soldadura.

Por último, antes de iniciar a fase do processamento é efetuada a escolha do número de núcleos do processador, de acordo com o tipo de licença que foi adquirida. Assim, para a licença adquirida pelo IPB, é possível selecionar até 5 processadores em simultâneo e, desta forma aumentar significativamente a velocidade de cálculo. Na fase seguinte, é indicado o tempo de análise e o número de incrementos dos resultados para soldadura e para o arrefecimento.

Finalmente, o processo de análise pode ser iniciado. Em média o tempo de duração de cada simulação foi de quatro horas e trinta minutos.

### 3.7.1. Soldadura de Topo

No contexto do presente estudo, um dos propósitos é a análise de soldadura de topo na união entre as chapas. Deve-se seguir o processo descrito no tópico anterior.

Entretanto, a modelação desse arranjo no *software* necessita de alguns passos a mais na criação do cordão de soldadura e sua respectiva malha.

É necessário, no item *Robot* da Árvore de Processo (Figura 3.10), criar a metade do cordão, com suas características geométricas em apenas uma das chapas, em seguida suprimi-las da árvore de processo. Então, cria-se a segunda metade do cordão, com os mesmos parâmetros que o anterior, porém, para a outra chapa. Em seguida o primeiro cordão é novamente introduzido na árvore de processo, sendo assim, formado o cordão de soldadura completo.

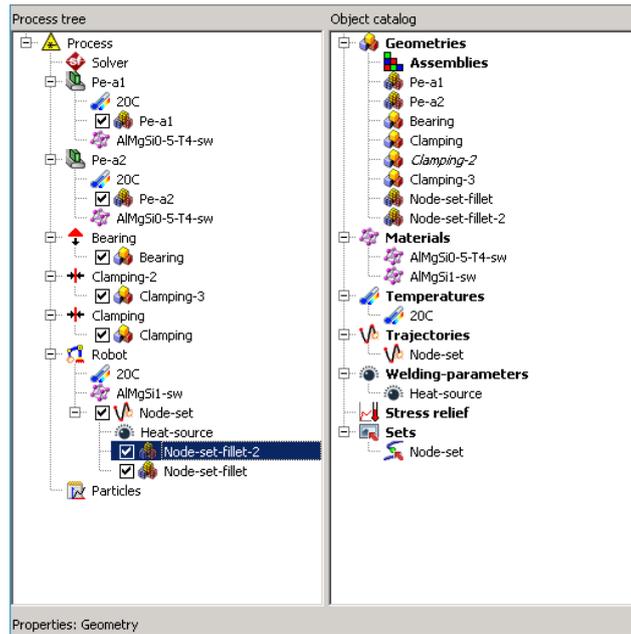


Figura 3.10: Árvore de Processo e Catálogo de Objetos.

Pode-se observar na Figura 3.11 que a inclinação da tocha fica definida em relação ao último cordão de soldadura criado, impossibilitando posicionar a tocha na posição perpendicular do arranjo. Isso impede a alteração dos valores de um dos parâmetros que está sendo analisado, o que pode introduzir erros e variações do resultado.

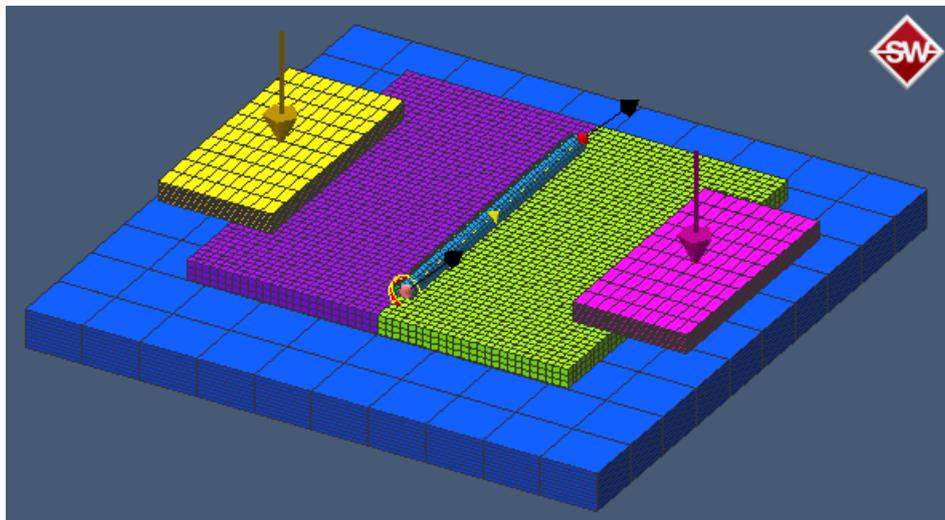


Figura 3.11: Modelo com soldadura de topo.

Como este estudo está inserido no âmbito de um projeto maior, ao qual o objetivo é a melhoria de qualidade numa soldadura robotizada em liga de alumínio para estruturas hiperestáticas tubulares. Apresentando apenas soldaduras com juntas de canto nas intersecções entre os componentes, nesse sentido, optou-se por

efetuar um estudo mais aprofundado para este tipo de junta soldada. Por essa razão, a simulação de juntas de topo, neste trabalho, teve um caracter preliminar e muito superficial.

### 3.7.2. Soldadura de Canto

A modelação do arranjo de chapas com soldaduras de canto foi iniciada seguindo o modelo experimental realizado com um dos testes iniciais. As duas chapas, com dimensões iguais de  $100 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ . As duas chapas a soldar encontram-se posicionadas entre si com um ângulo de  $90^\circ$ , a chapa horizontal está presa por um fixador com dimensões de  $60 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$  e a chapa vertical está encostada e para que não se mova durante o processo de soldadura é restringida por um fixador de  $80 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$ . As Figuras 3.12 e 3.13 mostram o modelo experimental e numérico, respetivamente.



Figura 3.12: Teste feito em junta de canto.

Para a assemblagem dos componentes no *software*, é necessário inserir uma peça de cada vez. Após isso, deve-se criar o *bearing*, que equivale à mesa, onde as peças são fixadas e indicar a direção e sentido da ação da gravidade. Em seguida, passa-se para a criação dos *clampings*, que são os fixadores. Estes são

posicionados com 20 milímetros sobre a chapa horizontal. O outro *clamping* é posicionado na chapa vertical, ambos são determinados com uma carga de 100 N.

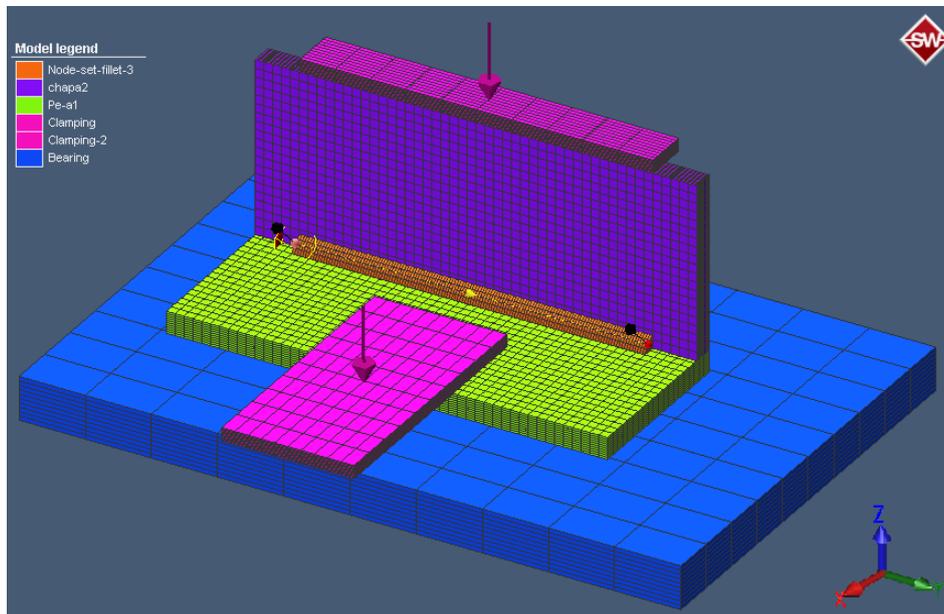


Figura 3.13: Modelação do arranjo com soldadura de canto.

Nas análises, o comprimento do cordão de soldadura é de 80 milímetros, posicionado no centro da junta a ser soldada.

Dando continuidade a esses passos foi possível variar todos os parâmetros escolhidos, essenciais para as 27 simulações, exigidas pelo método de Taguchi.

### 3.8. Tratamento de Dados / ANOVA

Como os dados a serem analisados são exportados para um arquivo de valores separados por vírgula (\*.csv), não houve a necessidade de repetir as simulações mais de uma vez. Pois como os parâmetros inseridos e as condições de contorno são exatamente as mesmas, os resultados também são iguais. Como é habitual para experimentos de Taguchi, a análise dos dados foi feita com auxílio de *software* Microsoft Office 365 Excel 2016 para, mais adiante, realizar as análises de influência dos parâmetros.

Para as Tensões Residuais Normais na direção X ( $\sigma_x$ ) ao longo da chapa, foi determinado que quanto menor o valor obtido melhor será o resultado, pois a intenção é minimizar a resposta, ou seja, que fosse o mais próximo possível de zero, o que significa que quanto menor forem as tensões residuais geradas durante

o processo de soldadura maior será a qualidade da soldadura. Para as outras duas características mecânicas a avaliar, Tensões Residuais Normais na direção Y ( $\sigma_y$ ) ao longo do cordão e as distorções, utilizou-se a mesma função objetivo, quando menor melhor.

Foi atribuído a cada parâmetro uma letra de A a D, sequencialmente, e aos níveis os respectivos números um, dois e três. Após finalizada a análise para cada uma das 27 combinações de parâmetros, calculou-se a média simples dos valores de Tensões máximas de  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , e distorções máximas, no instante final da simulação, que foi considerado 30 segundos após a realização da soldadura e que corresponde ao final da solidificação de poça de fusão.

Em seguida, foi criado um gráfico do valor médio das tensões  $\sigma_x$ , das tensões  $\sigma_y$  e das distorções para cada nível dos parâmetros. A combinação dos 3 valores mais baixos em cada análise, indica a combinação ótima para atingir a característica procuradas.

Com base nos resultados obtidos nas simulações numéricas, foi realizada a análise da variância (ANOVA), com isso, pode-se determinar quais os parâmetros com maior influência nas propriedades avaliadas.



# Capítulo 4

## 4. Discussões e Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas 27 simulações numéricas. Estes foram separados em três partes, de acordo com as propriedades escolhidas, sendo elas, Tensão Residual transversal ( $\sigma_x$ ), Tensão Residual longitudinal ( $\sigma_y$ ) e Distorção Total. Todos os valores máximos obtidos são referentes ao último instante da simulação, ou seja, após 30 segundos do fim da soldadura.

### 4.1. Soldadura de topo

O presente item apresenta a análise para a simulação do arranjo com soldadura de topo.

#### 4.1.1. Tensão Normal X ( $\sigma_x$ )

As análises feitas para a soldadura de topo, mostram que na região do cordão de soldadura ocorrem tensões de tração. Este comportamento já era esperado, pois é a região que sofre maior mudança de temperatura e acaba por arrefecer mais tarde, sofrendo uma limitação espacial pela vizinhança que não teve mudança drástica de temperatura. Ao afastar da área do cordão, há uma diminuição dos valores de tensão, passando a ter tensões de compressão. A área analisada pode ser vista destacada em vermelho, na Figura 4.1.

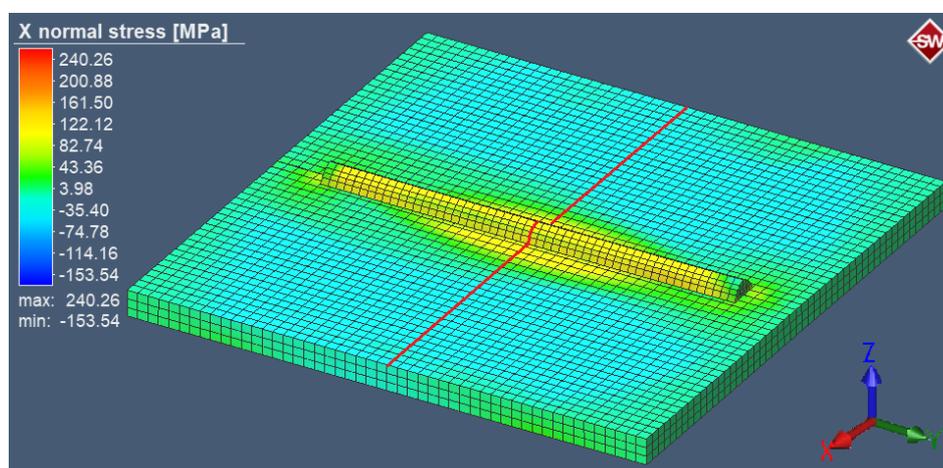


Figura 4.1: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  no modelo de soldadura de topo.

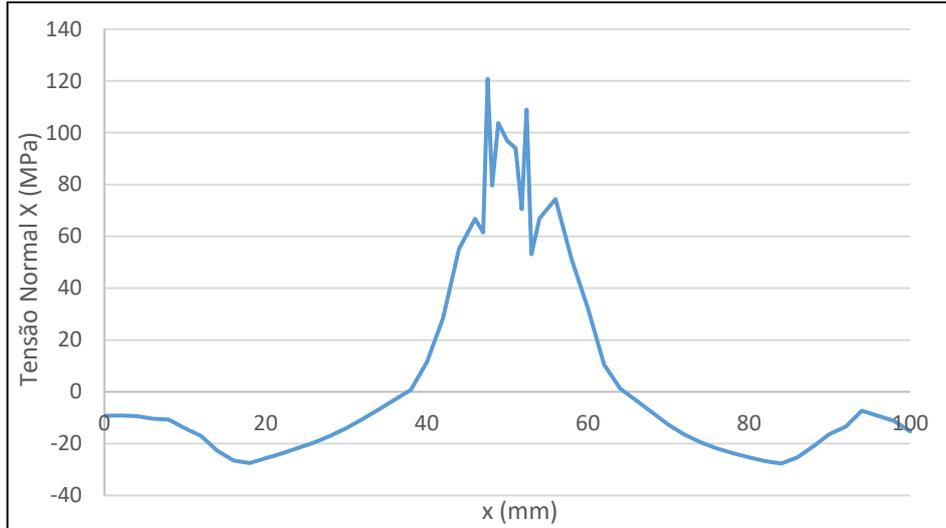


Figura 4.2: Tensões  $\sigma_x$  em soldadura de topo.

A faixa com maiores valores de tensão encontra-se na área do cordão de soldadura, entre 40 e 60 mm, como pode ser observado na curva de tensões da Figura 4.2.

#### 4.1.2. Tensão Normal Y ( $\sigma_y$ )

A distribuição de tensões  $\sigma_y$  no modelo com soldadura de topo, assim como, a região onde é feita a análise pode ser vista na Figura 4.3.

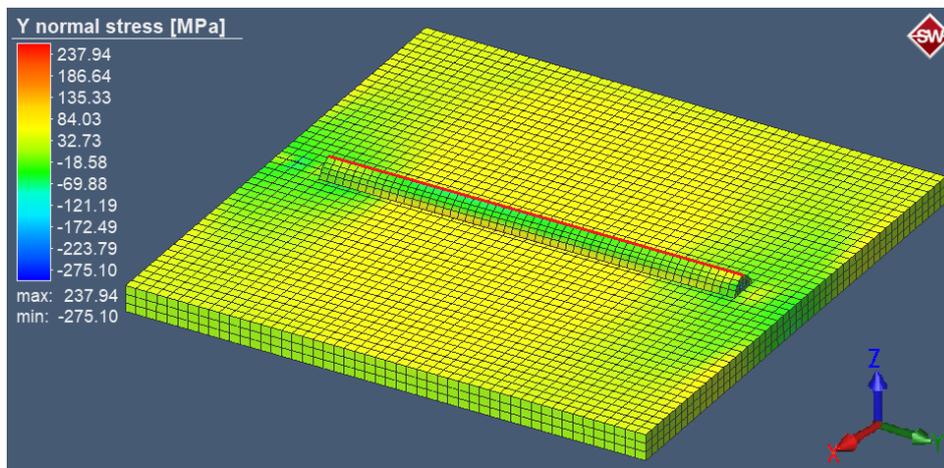


Figura 4.3: Tensões  $\sigma_y$  no modelo de soldadura de topo.

A variação da tensão residual longitudinal ao longo do cordão de soldadura pode ser vista na Figura 4.4.

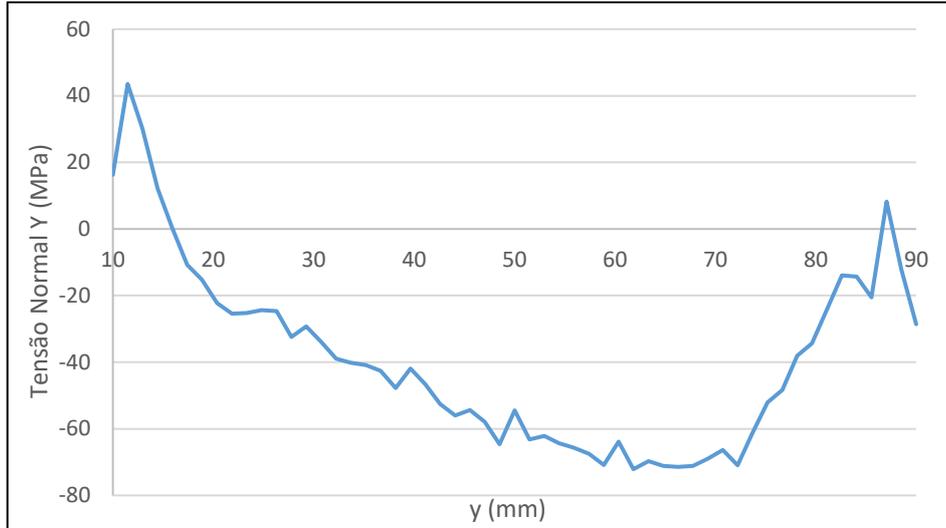


Figura 4.4: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  em soldadura de topo.

Sendo que as tensões na região inicial e final são de tração e, quando se aproximam da região central do cordão, mudam de sinal, passando para tensões de compressão.

#### 4.1.3. Distorção Total

A Figura 4.5, mostra a região de estudo de distorções totais para soldadura de topo.

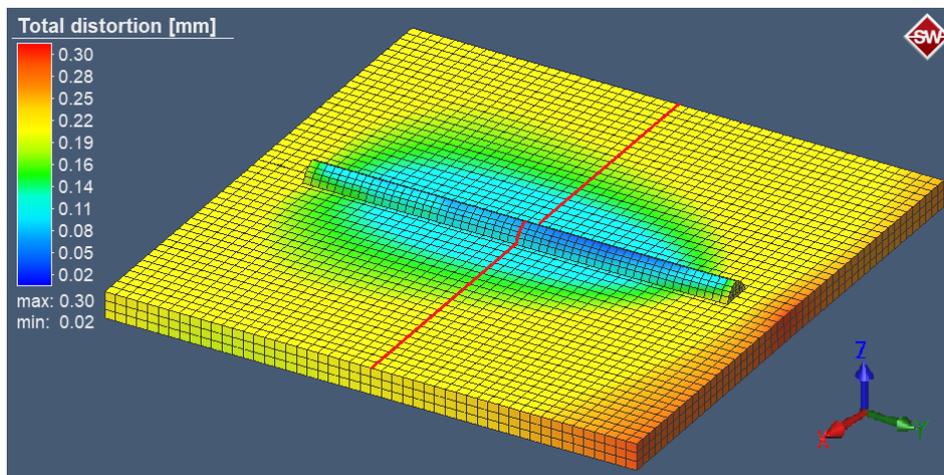


Figura 4.5: Distorção total em soldadura de topo.

A distorção na região central do arranjo simulado é mostrada através da curva na Figura 4.6, nota-se que as maiores distorções estão nas regiões periféricas das chapas.

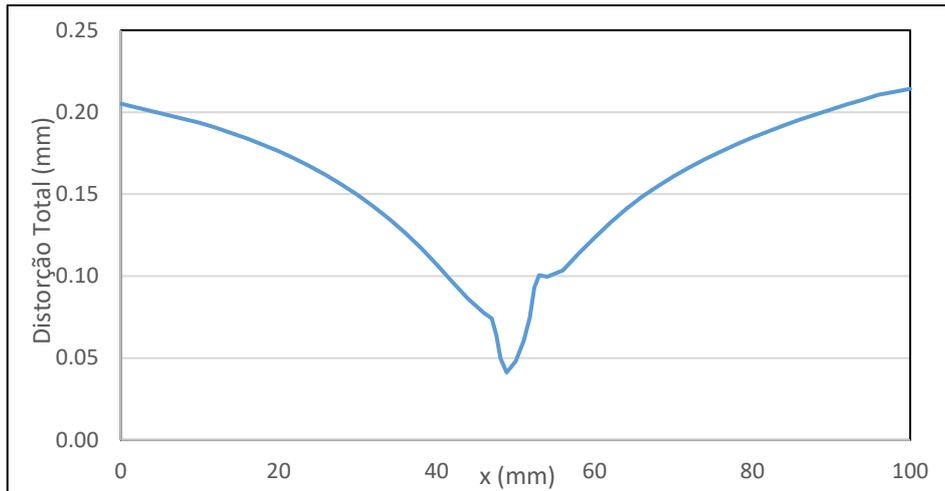


Figura 4.6: Variação da distorção.

Da Figura 4.6 pode-se observar que a distorção ocorre de forma simétrica em relação à linha do cordão de soldadura, sendo o valor máximo de, aproximadamente, 0,21 mm. Verifica-se, também, que na região central tem um valor quase nulo, inferior a 0,05 mm.

## 4.2. Soldadura de canto

Nesta seção são analisados os arranjos com soldadura de canto.

### 4.2.1. Tensão Normal X ( $\sigma_x$ )

É possível representar graficamente os resultados obtidos nas simulações numéricas, variando o valor da corrente de soldadura, mantendo constante os valores da velocidade de soldadura e inclinação da tocha. A Figura 4.7 mostra, a vermelho, a linha onde foram obtidos os valores da tensão residual.

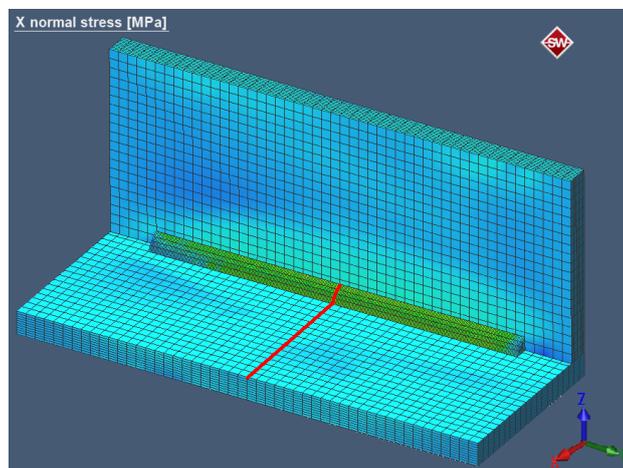


Figura 4.7: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  no modelo.

Na Figura 4.8 estão representadas as curvas da variação de  $\sigma_x$  para velocidade de 10 mm/s e inclinação de  $-30^\circ$ , presentes nas simulações 1, 10 e 19, com correntes de 151 A, 170 A e 190 A, respectivamente. Pode-se notar que as tensões residuais máximas são mais elevadas para correntes mais baixas, esse comportamento repete-se nas Figuras 4.9 e 4.10.

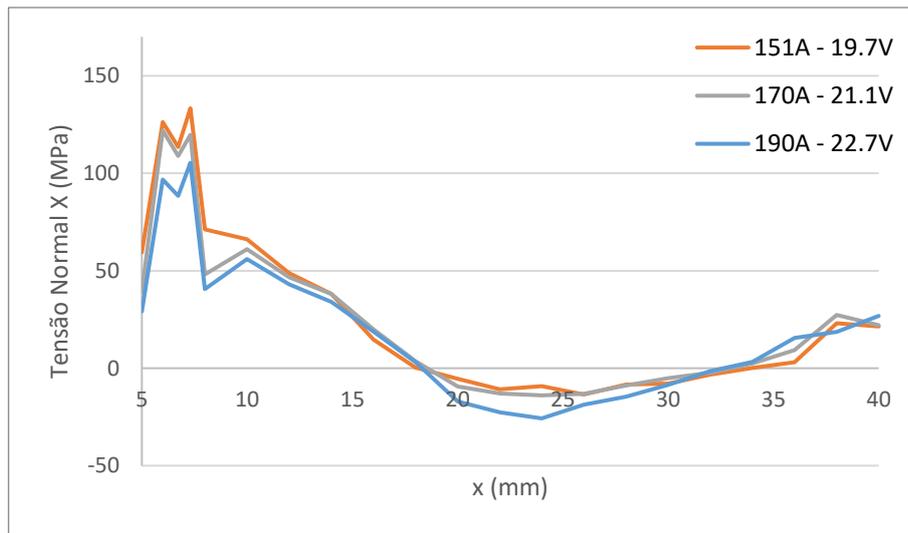


Figura 4.8: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 10 mm/s e inclinação de  $-30^\circ$ .

Para velocidade de 10 mm/s e inclinação de  $0^\circ$ , tem-se as curvas das simulações 2, 11 e 20, mostradas na Figura 4.9. Nota-se que na curva de 151 A, apenas na extremidade da chapa apresenta tensão de compressão, tendo comportamento de tração no restante da mesma.

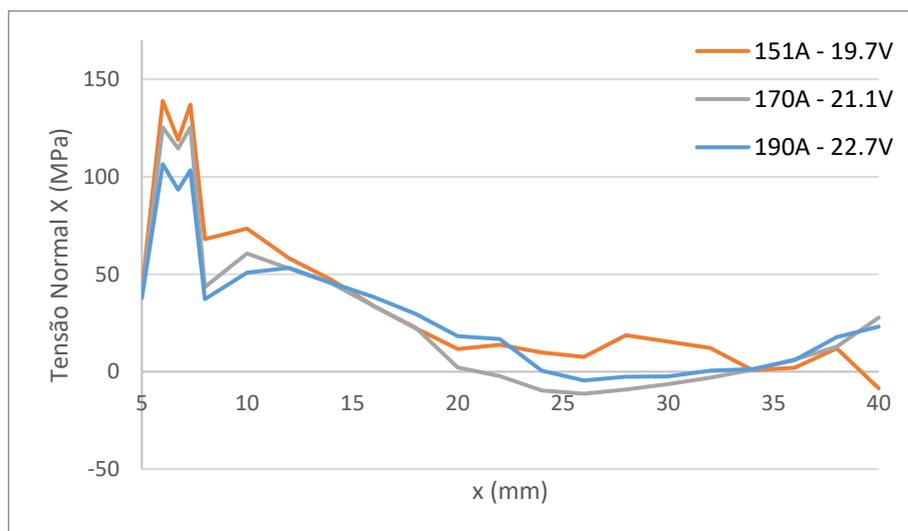


Figura 4.9: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 10 mm/s e inclinação de  $0^\circ$ .

Para velocidade de 10 mm/s e inclinação de 30°, tem-se as simulações 3, 12 e 21. Na Figura 4.10, mostra a curva de 190 A, que apresenta o menor valor de  $\sigma_x$  entre as 27 simulações.

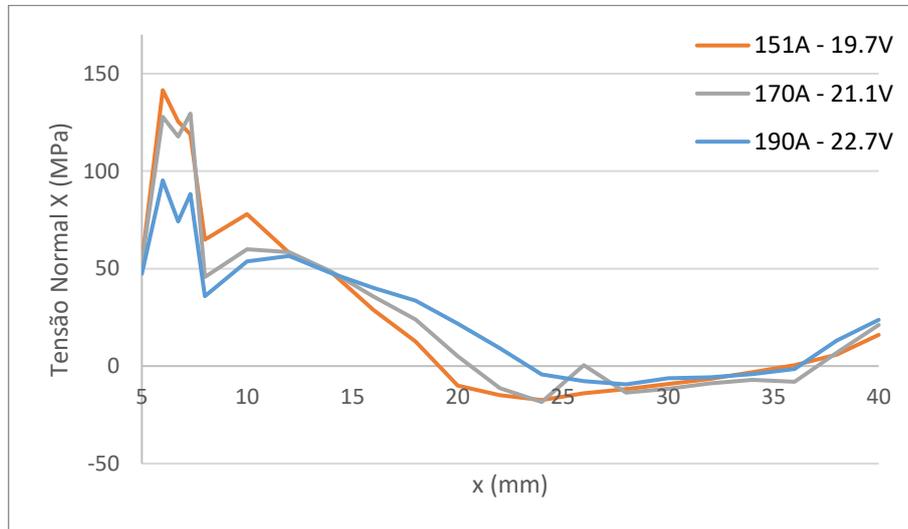


Figura 4.10: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 10 mm/s e inclinação de 30°.

Para velocidade de 15 mm/s e inclinação de -30°, tem-se as simulações 4, 13 e 22. Na Figura 4.11, os máximos de tensão, neste caso se dá com uma corrente de soldadura de 170 A.

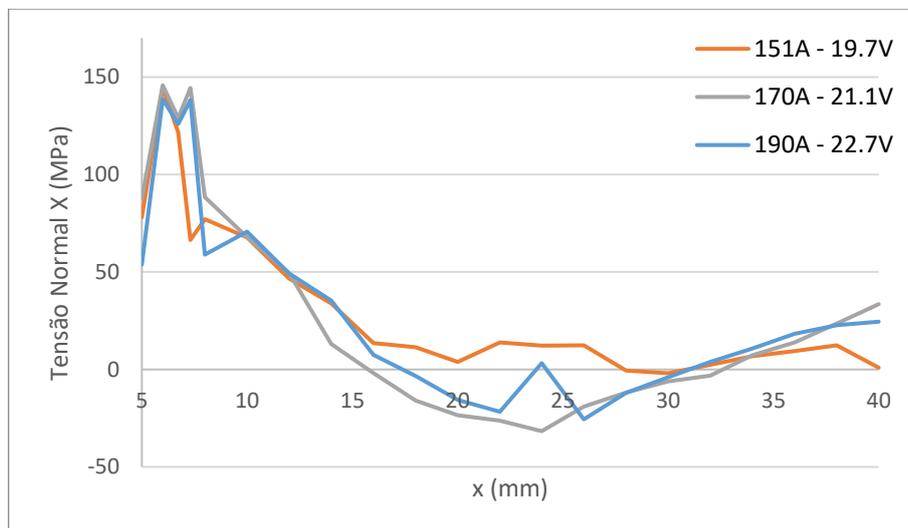


Figura 4.11: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 15 mm/s e inclinação de -30°.

Para velocidade de 15 mm/s e inclinação de 0°, tem-se as simulações 5, 14 e 23, mostradas na Figura 4.12. Sendo que, a simulação realizada com corrente de 151 A obtém valores de tensão máximas mais elevados.

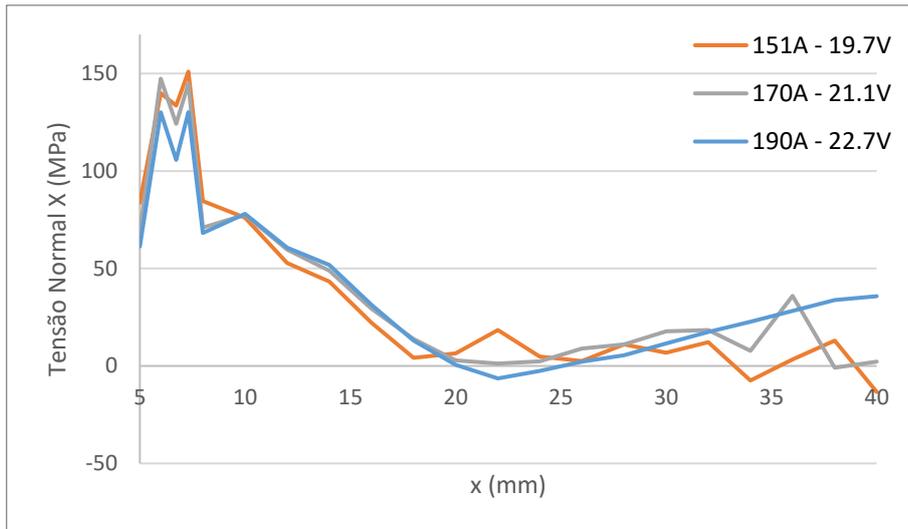


Figura 4.12: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 15 mm/s e inclinação de 0°.

A Figura 4.13 mostra as simulações 6, 15 e 24, com velocidade de 15 mm/s e inclinação de 30°. Estes parâmetros são os que apresentam valores mais próximos entre si, mesmo com a variação de corrente.

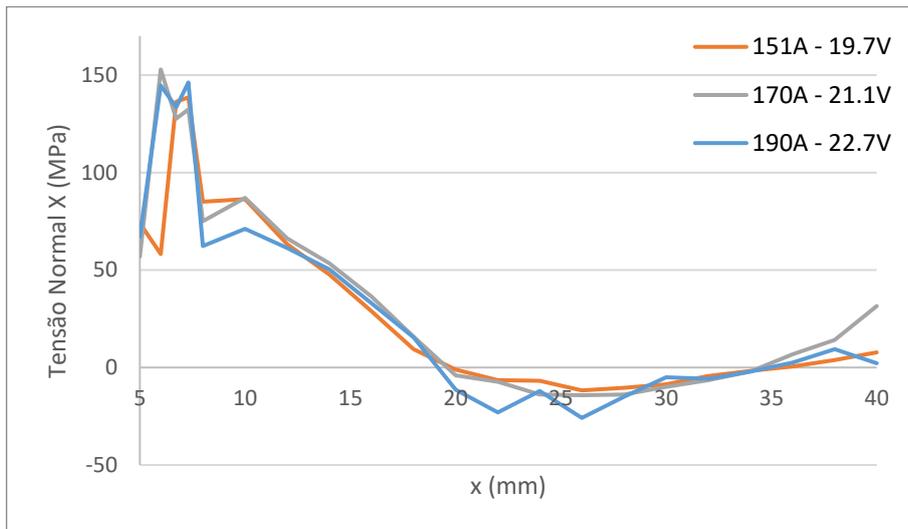


Figura 4.13: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 15 mm/s e inclinação de 30°.

Para velocidade de 20 mm/s e inclinação de 30°, foram feitas as simulações 7, 16 e 25, mostradas na Figura 4.14. Estas, apresentam tensões máximas entre 147,3 MPa e 153,5 MPa.

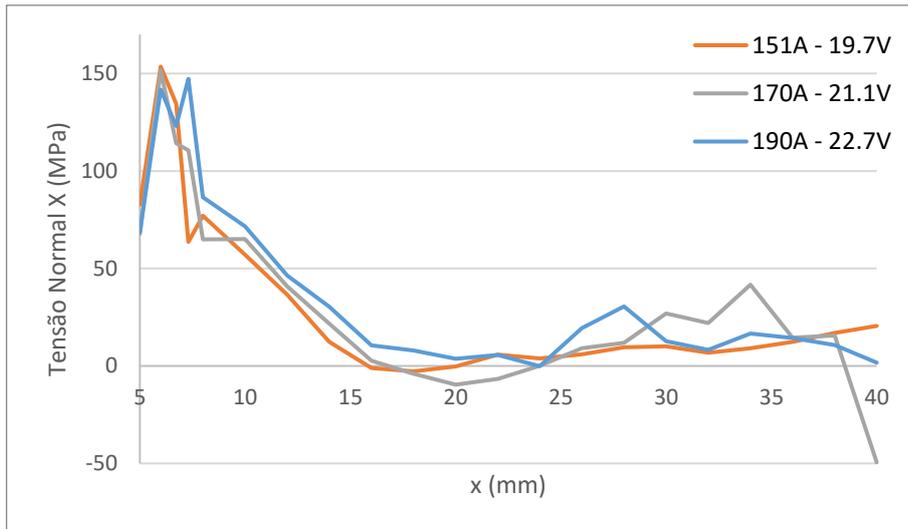


Figura 4.14: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 20 mm/s e inclinação de  $-30^\circ$ .

Para velocidade de 20 mm/s e inclinação de  $0^\circ$ , tem-se as simulações S8, S17 e S26.

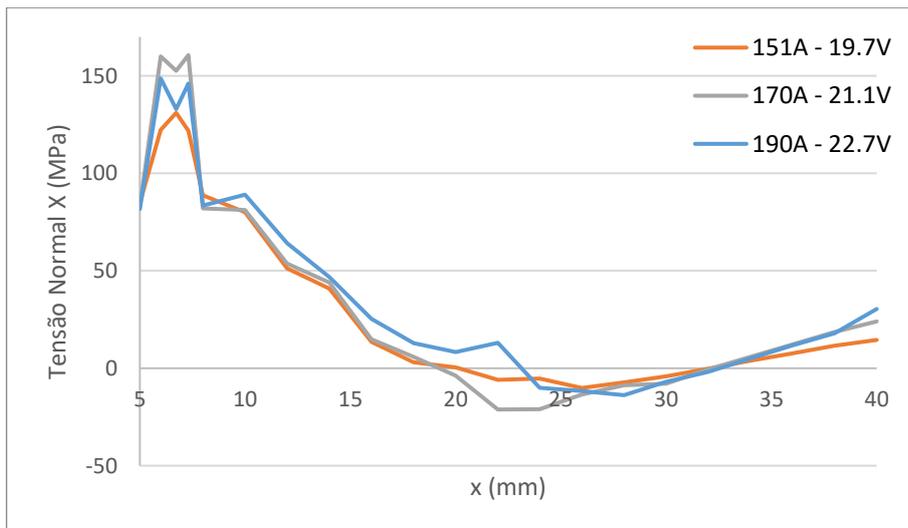


Figura 4.15: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 20 mm/s e inclinação de  $0^\circ$ .

Para velocidade de 20 mm/s e inclinação de  $30^\circ$ , tem-se as simulações S9, S18 e S27. Na Figura 4.16 é mostrada a curva de 170 A, que obteve o maior valor para  $\sigma_x$  entre as 27 simulações, 163,7 MPa.

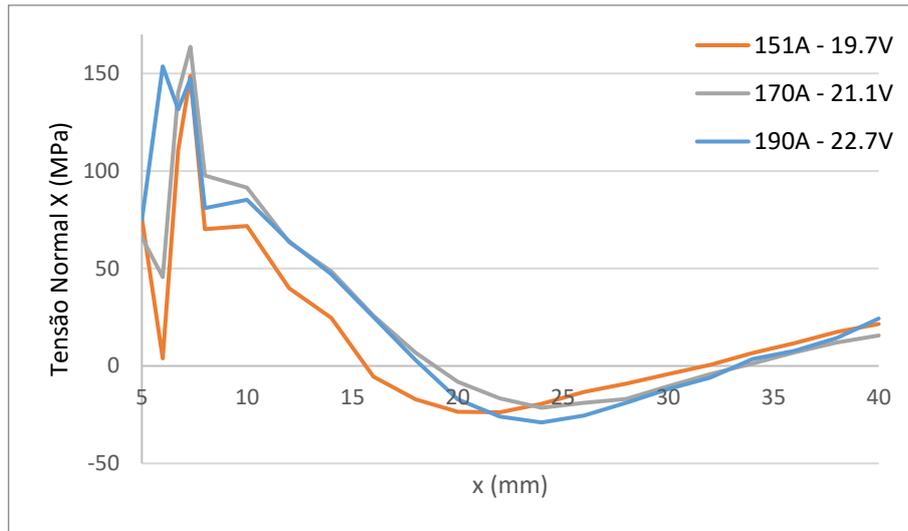


Figura 4.16: Distribuição de Tensões  $\sigma_x$  para velocidade de 20 mm/s e inclinação de 30°.

Nota-se que os valores de tensão são máximos na região do cordão de soldadura, que está entre 5 e 10 mm, tendo essas um comportamento de tração, em seguida, aproximadamente na região central da chapa, o comportamento passa a ser de compressão. Em seguida, mais no limite da chapa as tensões voltam a apresentar comportamento de tração. Um fato que fica evidente, ao observar as Figuras 4.8 a 4.16, nas simulações com corrente de 190 A observa-se que em nenhum caso apresentou o maior valor de tensão.

Com esses dados, que estão presentes no Anexo 1, pode-se chegar aos valores máximos de tensão, a Tabela 4.1 foi gerada a partir desses valores.

Tabela 4.1: Valores de Tensão máxima.

<b>SIMULAÇÃO</b>	<b><math>\sigma_x</math> (MPa)</b>
1	133.313
2	138.871
3	141.542
4	144.613
5	150.963
6	138.574
7	153.535
8	131.001
9	148.873
10	121.977
11	125.383
12	129.513
13	145.787
14	147.343
15	152.866
16	151.491
17	160.617
18	163.739

SIMULAÇÃO	$\sigma_x$ (MPa)
19	105.379
20	106.451
21	95.259
22	138.719
23	130.183
24	146.230
25	147.284
26	148.667
27	153.681

A Tabela 4.2 mostra as médias de tensão para cada parâmetro, em seus respectivos níveis.

Tabela 4.2: Médias para cada grupo e seu respectivo nível.

PARÂMETRO	NÍVEL	$\sigma_x$ (MPa)
A	1	142.365
	2	144.30
	3	130.21
B	1	121.97
	2	143.92
	3	150.99
C	1	138.01
	2	137.72
	3	141.14

A tabela anterior está representada graficamente a seguir, na Figura 4.17.

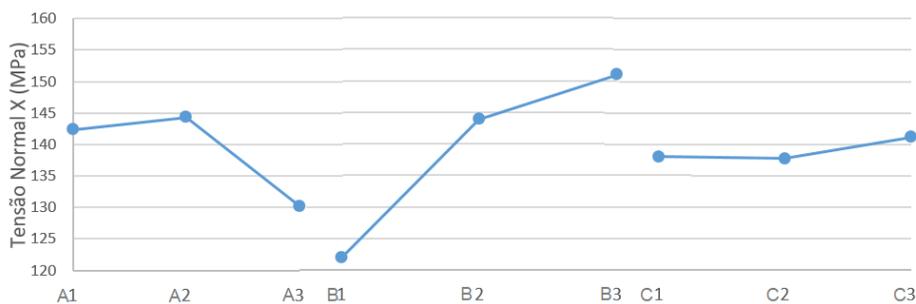


Figura 4.17: Curvas dos valores médios de tensão  $\sigma_x$ .

Diante da Figura 4.17, é verificado que a combinação ótima para essa análise é dada por A3B1C2. Sendo que A3 representa o valor de corrente de 190 A e tensão 22,7 V, B1 representa a velocidade de soldadura de 10 mm/s e C2 representa a inclinação da tocha de 0°.

Na tabela 4.3 são apresentados os resultados da análise de variância para  $\sigma_x$ .

Tabela 4.3: ANOVA para  $\sigma_x$ .

Parâmetro	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P	Contribuição (%)
Corrente	2	1050,87	525,43	5,08	0,016	14,38
Velocidade	2	4122,72	2061,36	19,94	0,000	56,43
Ângulo Tocha	2	64,79	32,40	0,31	0,734	0,89
Erro	20	2067,18	103,36			28,30
Total	26	7305,56				

A Tabela 4.3 mostra que o parâmetro mais influente para a análise de  $\sigma_x$ , é a velocidade com contribuição de 56,43%. O parâmetro que menos influencia essa característica é a inclinação da tocha, com apenas 0,89% de contribuição. O erro de 28.3% evidência que o refinamento da malha poderia ser maior, contudo, o custo do processamento seria muito maior por cada iteração, outra razão para justificar o elevado valor do erro, prende-se com facto de o número de graus de liberdade do erro ser muito maior do que cada um dos parâmetros, isto é, a influência de todos os parâmetros que não foram avaliados encontram-se diluídos no erro.

#### 4.2.2. Tensão longitudinal ( $\sigma_y$ )

Para analisar a tensão por toda a extensão do cordão de soldadura, foi definido o trajeto ao longo dos nós desses elementos finitos, como se pode observar na Figura 4.18, e encontra-se destacada com uma linha vermelha.

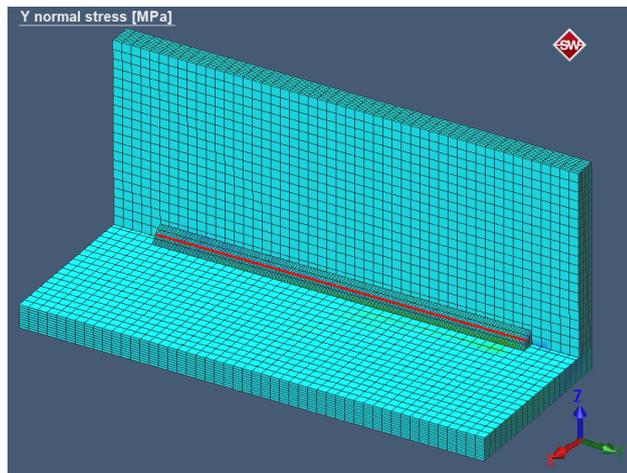


Figura 4.18: Distribuição de tensões  $\sigma_y$  no modelo.

Os resultados das simulações referentes a  $\sigma_y$  estão representados das Figuras 4.19 até à 4.27.

Ao observar os três primeiros gráficos, pode-se notar que os valores de tensão no início dos cordões de soldadura são maiores para a inclinação de  $-30^\circ$  e corrente

de 151 A, confrontando com as inclinações de 0° e 30°, para esta mesma região da soldadura. Também, observou-se que, para as correntes de 170 A e 190 A, verifica-se uma distribuição de tensões mais homogênea na região central do cordão, quando comparada com as simulações em que a corrente é de 151 A. Para a região final do cordão, nos três primeiros gráficos, as simulações com corrente de 151 A foi a que obteve maiores valores de tensão  $\sigma_y$ .

Sendo, na Figura 4.19, mostradas as simulações 1, 10 e 19, com velocidades de soldadura de 10 mm/s e inclinação da tocha de -30°.

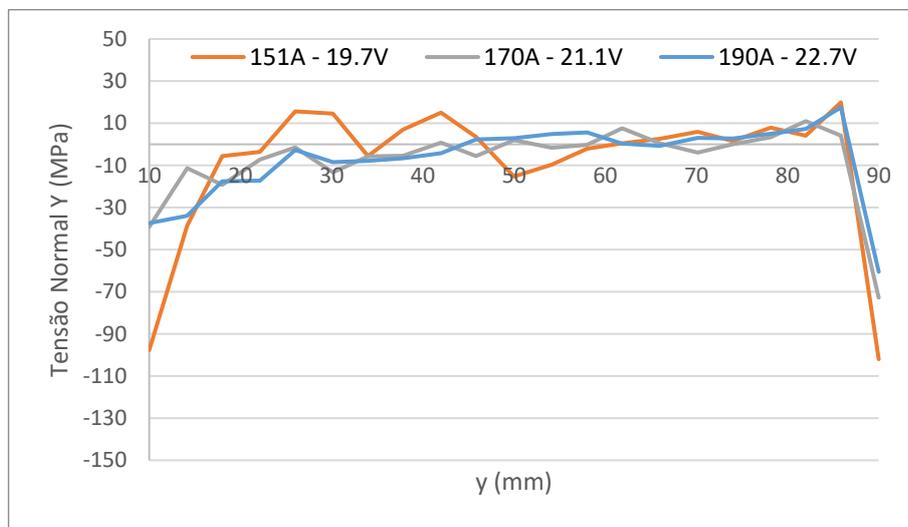


Figura 4.19: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 10 mm/s e inclinação de -30°.

As simulações 2, 11 e 20, que apresentam velocidade de 10 mm/s e inclinação de 0°, são representadas na Figura 4.20.

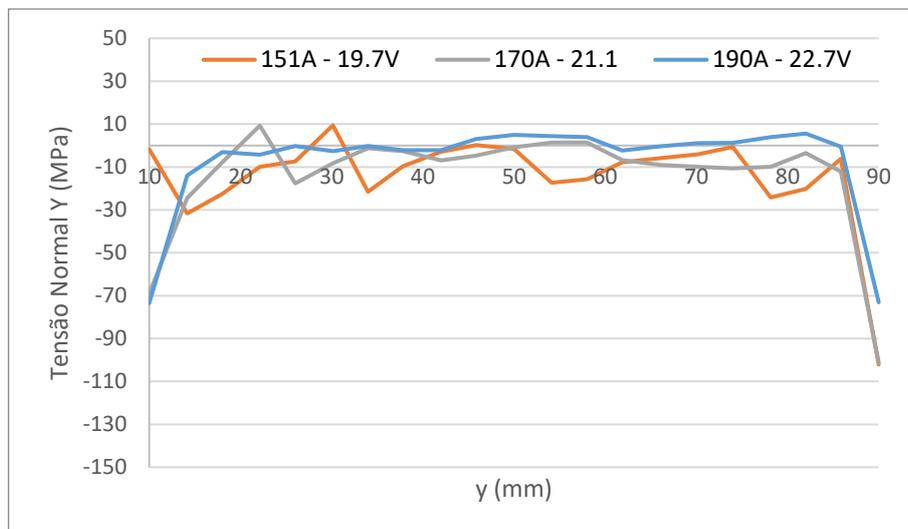


Figura 4.20: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 10 mm/s e inclinação de 0°.

Na Figura 4.21, mostra o comportamento das tensões nas simulações 3, 12 e 21, nas quais a velocidade é de 10 mm/s e a inclinação é de 30°.

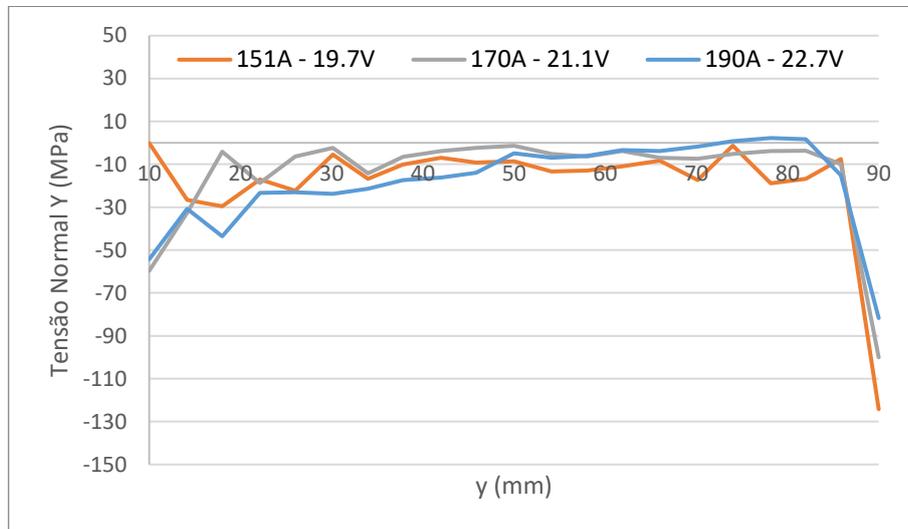


Figura 4.21: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 10 mm/s e inclinação de 30°.

Este segundo grupo de gráficos, com as Figuras 4.22, 4.23 e 4.24, mantém o mesmo comportamento do grupo anterior. Onde, a simulação com corrente de 151 A e inclinação de -30° é a que apresenta maior valor de tensão  $\sigma_y$ , se comparada com as inclinações 0° e 30°. Na região central da soldadura, com as correntes de 170 A e 190 A, ocorre uma menor variação dos valores de tensão.

As simulações com 15 mm/s e -30° são mostradas na Figura 4.22. Contendo as simulações 4, 13 e 22.

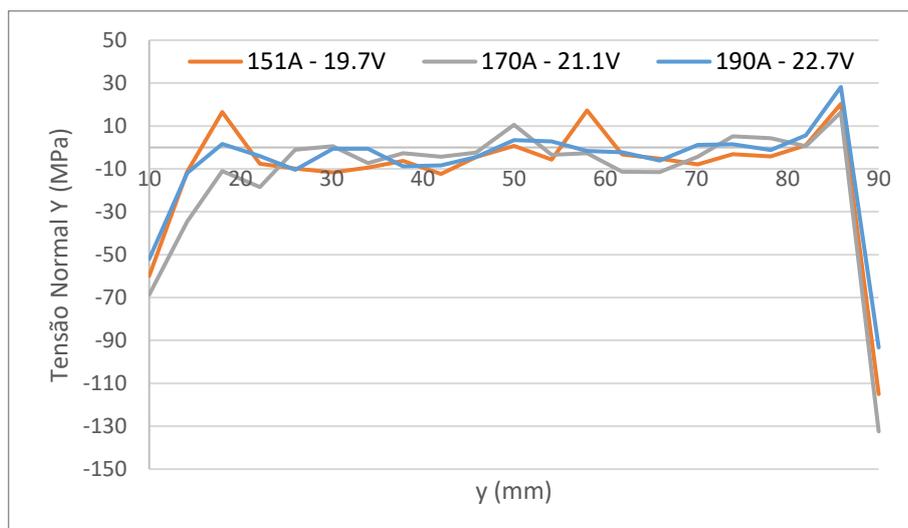


Figura 4.22: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 15 mm/s e inclinação de -30°.

As curvas das simulações 5, 14 e 23, com velocidade de 15 mm/s e inclinação da tocha de 0° são mostrados na Figura 4.23.

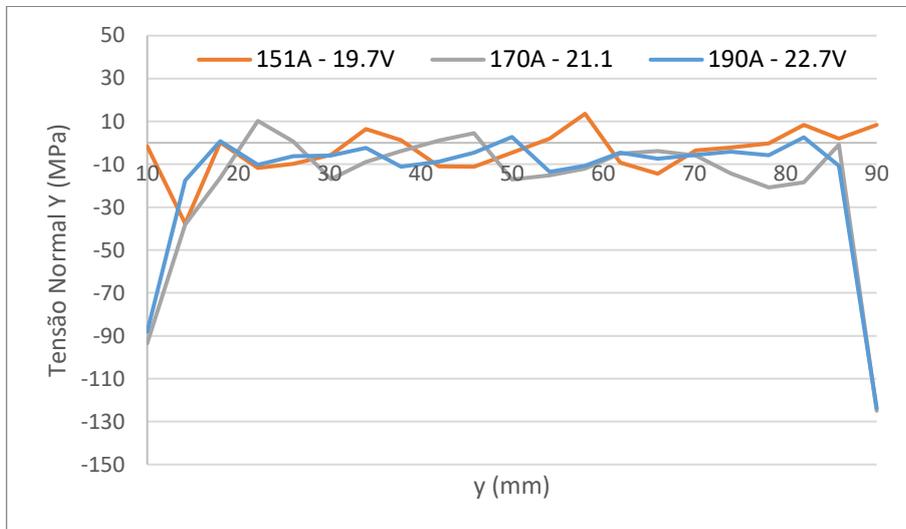


Figura 4.23: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 15 mm/s e inclinação de 0°.

Na Figura 4.24, com velocidade de 15 mm/s e inclinação de 30° da tocha, ocorreu com as simulações 6, 15 e 24.

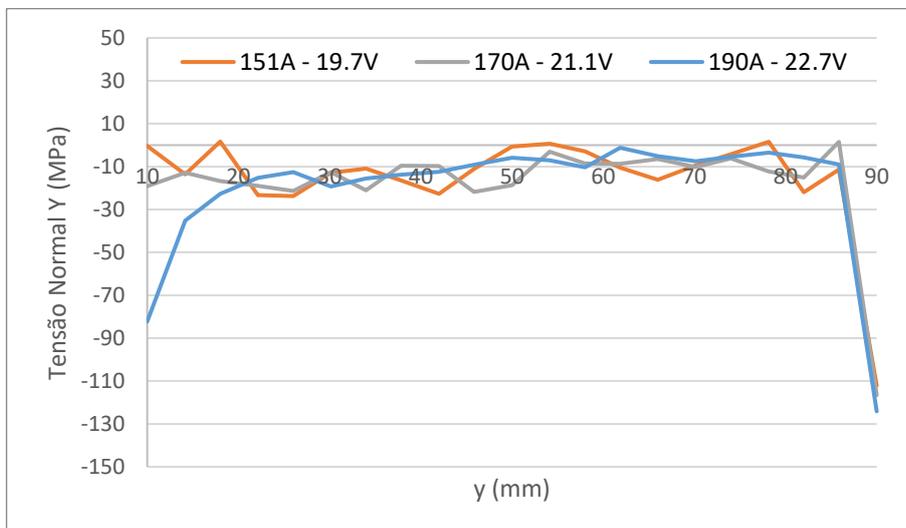


Figura 4.24: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 15 mm/s e inclinação de 30°.

O último grupo de imagens para a distribuição de  $\sigma_y$ , ao contrário dos anteriores, as simulações com 151 A ocorre uma tensão pequena no início da soldadura, independente da inclinação da tocha. Porém, a irregularidade ao longo do cordão é nítida. Na região final, nota-se que os valores de tensão são elevados.

Na Figura 4.25, apresentam-se as variações da tensão  $\sigma_y$  para a velocidade de soldadura de 20 mm/s e inclinação da tocha de  $-30^\circ$ , sendo estas curvas obtidas nas simulações 7, 16 e 25.

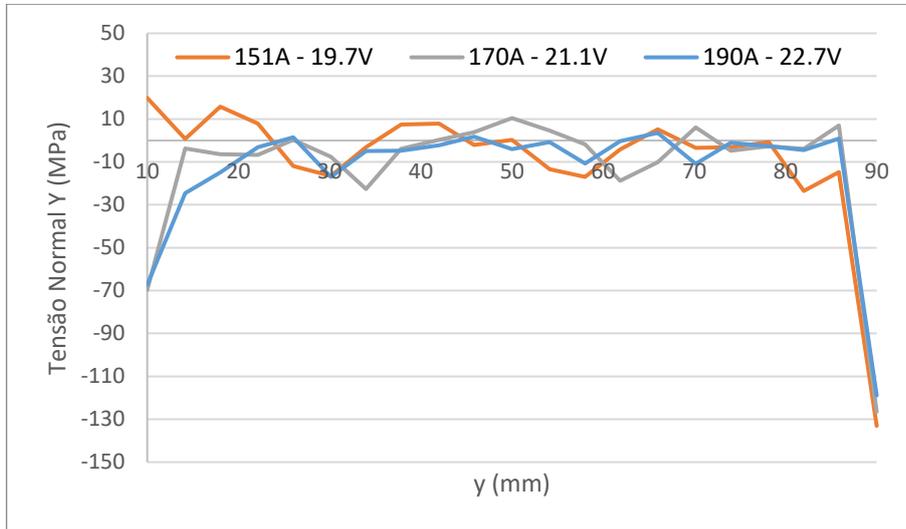


Figura 4.25: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 20 mm/s e inclinação de  $-30^\circ$ .

A Figura 4.26, contém as simulações 8, 17 e 26, apresentam velocidade de 20 mm/s e inclinação da tocha de  $0^\circ$ .

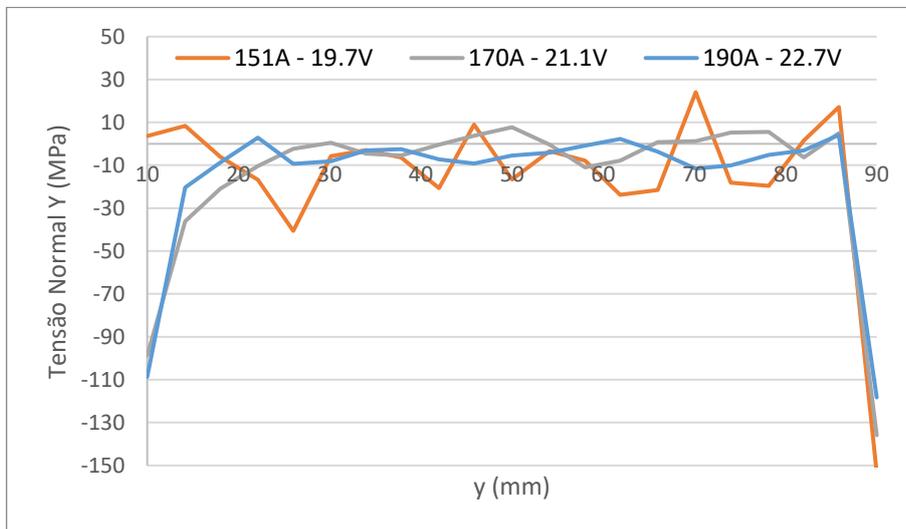


Figura 4.26: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 20 mm/s e inclinação de  $0^\circ$ .

Por fim, a Figura 4.27 mostra as simulações 9, 18 e 27, onde a inclinação da tocha é de  $30^\circ$  e a velocidade é 20 mm/s.

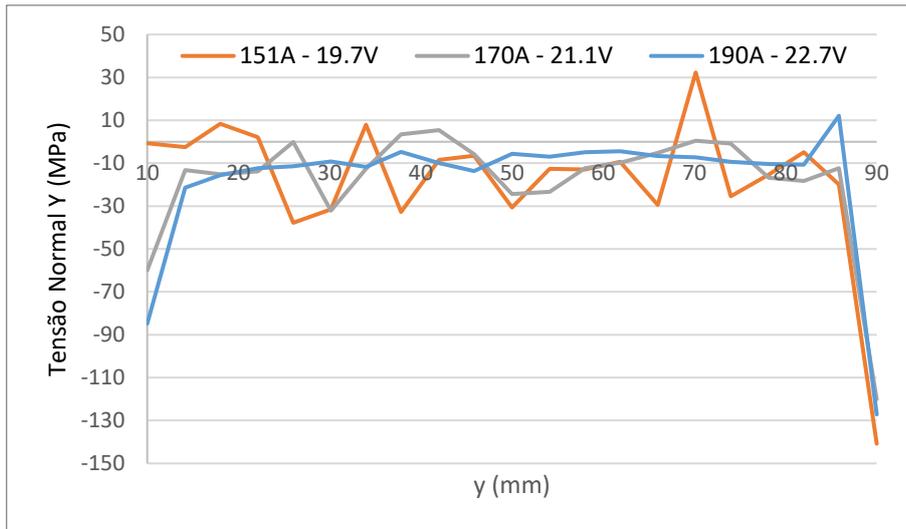


Figura 4.27: Distribuição de Tensões  $\sigma_y$  para velocidade de 20 mm/s e inclinação de  $30^\circ$ .

Como era previsto, o comportamento da tensão  $\sigma_y$ , nos topos do cordão de soldadura (início e fim) ocorre compressão e na região central do cordão prevalecem as tensões de tração.

Foi possível verificar, através das análises que para inclinação da tocha de  $-30^\circ$ , os valores de tensão são mais altos para as velocidades de 10 e 15 mm/s. Isto pode ser justificado pela direção do arco elétrico estar mais orientada para a chapa da base, em contrapartida, se a inclinação da tocha tiver um ângulo de  $0^\circ$  ou  $30^\circ$ , o arco fica direcionado para a região da interseção das duas chapas, originando um nível de tensões inferior. Esta diminuição do nível de tensões é devida ao facto de, com a inclinação de  $0^\circ$  ou  $30^\circ$ , o escoamento do calor na zona afetada pelo calor (ZAC) ocorrer ao longo das duas chapas soldadas o que origina uma temperatura local mais baixa e, conseqüentemente, um menor valor de tensões residuais. Já no caso da inclinação de  $-30^\circ$ , o calor é escoado apenas por uma chapa, o que vai resultar em uma temperatura maior na ZAC e, como tal, maiores níveis de tensões residuais.

Os valores máximos, são tensões de compressão em todos os casos analisados nesta seção, mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Máximos de Tensões ao longo do cordão de soldadura.

<b>L_27</b>	<b><math>\sigma_y</math> (MPa)</b>
1	-101.995
2	-102.098
3	-124.201
4	-115.033
5	-37.6441
6	-112.123
7	-133.082
8	-153.541
9	-140.791
10	-72.7965
11	-101.165
12	-100.05
13	-132.409
14	-124.942
15	-116.568
16	-126.534
17	-135.891
18	-120.066
19	-60.509
20	-73.4669
21	-81.7201
22	-93.2757
23	-123.732
24	-124.135
25	-118.934
26	-118.266
27	-127.162

Diante dos resultados obtidos, foi feita a média dos valores de tensão para cada parâmetro em seus respectivos níveis, mostrados na Tabela 4.5. Dados que são representados na Figura 4.28.

Tabela 4.5: Médias para cada grupo e seu respectivo nível.

<b>PARÂMETRO</b>	<b>NÍVEL</b>	<b><math>\sigma_y</math> (MPa)</b>
A	1	-113.390
	2	-114.49
	3	-102.36
B	1	-90.89
	2	-108.87
	3	-130.47
C	1	-106.06
	2	-107.86
	3	-116.31



Figura 4.28: Média por níveis da Tensão Normal Y.

Os parâmetros ótimos de soldadura, sendo levado em consideração a diminuição de  $\sigma_y$ , deve ser obtido com a composição A2B3C3, onde A2 é a corrente de 170 A, B3 é a velocidade de 20 mm/s e C3 é a inclinação de 30° da tocha.

A análise de variância dos resultados das simulações para as tensões  $\sigma_y$  são mostrados na tabela 4.6.

Tabela 4.6: ANOVA para os valores de  $\sigma_y$ .

Parâmetro	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P	Contribuição (%)
Corrente	2	810,7	405,4	0,84	0,445	4,49
Velocidade	2	7071,0	3535,5	7,35	0,004	39,20
Ângulo Tocha	2	539,2	269,6	0,56	0,580	2,99
Erro	20	9618,3	480,9			53,32
Total	26	18039,2				

No caso de  $\sigma_y$ , a Tabela 4.6 indica o parâmetro 2, correspondente à velocidade de soldadura, como o de maior influência, com 39,20% de contribuição. A inclinação da tocha, é o fator que menos age sobre o resultado, com contribuição de 2,99%.

### 4.2.3. Distorção Total

Os valores de deformação total na região transversal, como destacado em vermelho na Figura 4.29, foi obtido as medidas em milímetros.

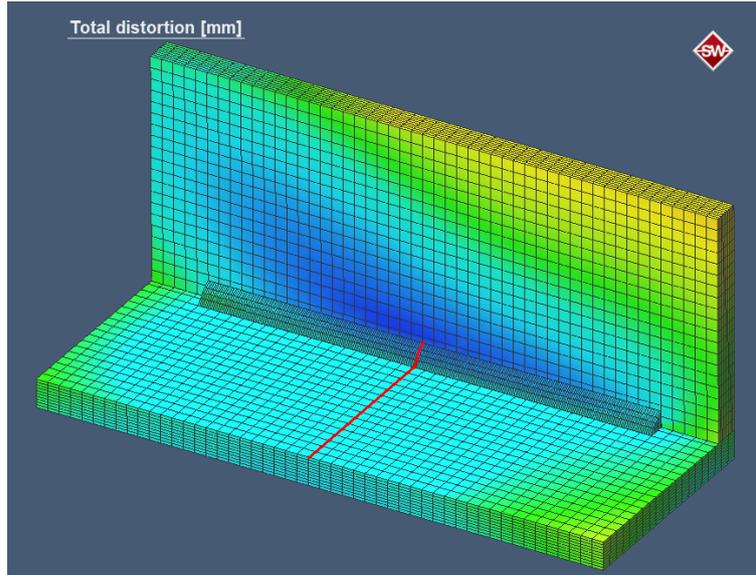


Figura 4.29: Representação das distorções no conjunto soldado.

Os resultados, para a máxima distorção, são mostrados na Tabela 4.7. E, para uma melhor visualização, encontram-se representados sob a forma de gráfico na Figura 4.30.

Tabela 4.7: Valores das máximas distorções.

<b>L_27</b>	<b>DISTORÇÃO TOTAL (mm)</b>
1	0.281218
2	0.254730
3	0.170802
4	0.210728
5	0.202663
6	0.167274
7	0.161057
8	0.163326
9	0.096891
10	0.244394
11	0.281853
12	0.258509
13	0.246750
14	0.328755
15	0.173012
16	0.315040
17	0.191137
18	0.201774
19	0.270784
20	0.309244
21	0.251027
22	0.250979
23	0.243683
24	0.239876
25	0.308042
26	0.268947
27	0.228385

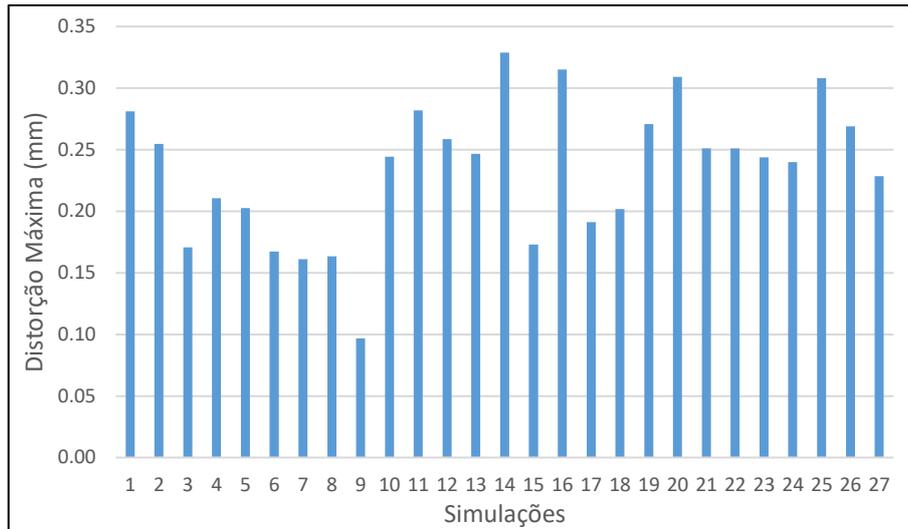


Figura 4.30: Valores de distorções máximas em cada simulação.

Estão representadas nas Figuras 4.31 e 4.32 as simulações 9 e 14, onde estão presentes os casos com menores e maiores distorções, respectivamente.

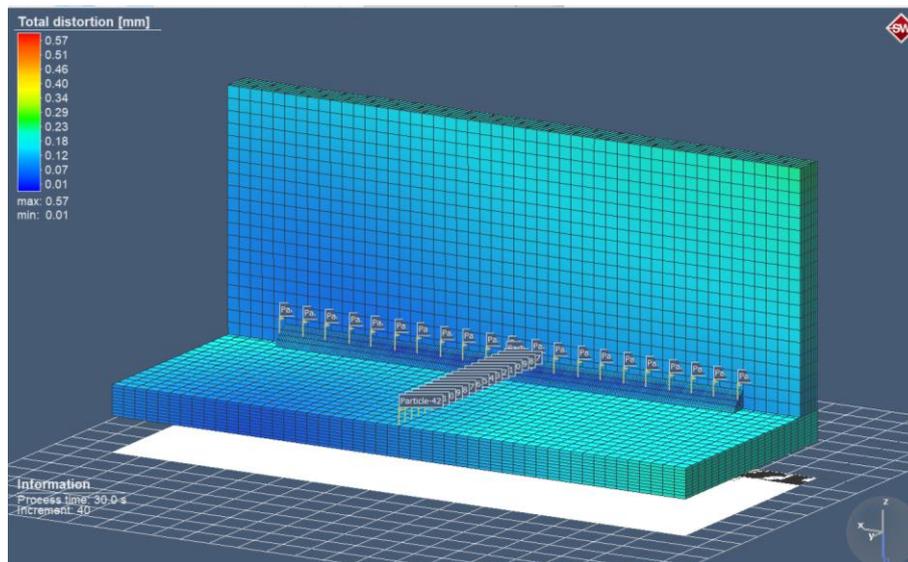


Figura 4.31: Resultados da simulação 9.

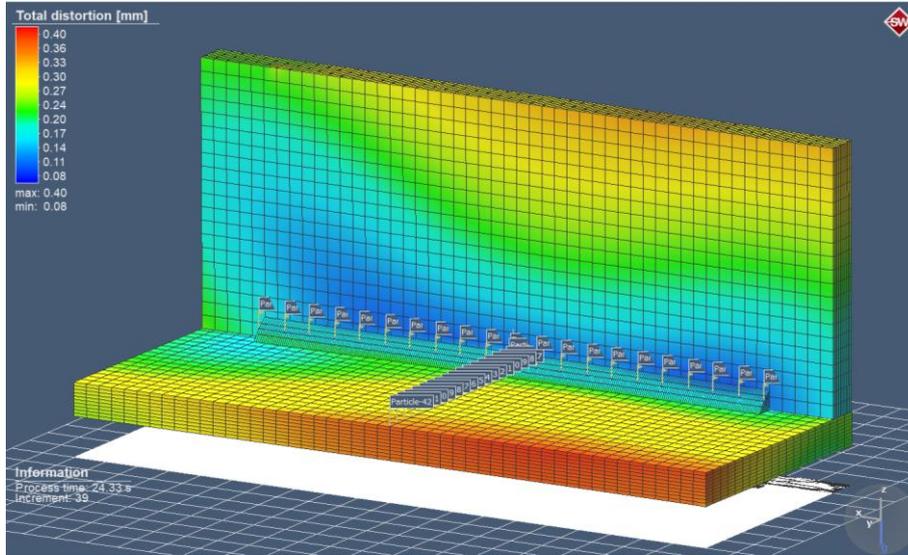


Figura 4.32: Resultados da simulação 14.

A média dos valores para cada nível são apresentados na Tabela 4.8 e reproduzidos na Figura 4.33.

Tabela 4.8: Média das distorções por níveis.

PARÂMETRO	NÍVEL	DISTORÇÃO (mm)
A	1	0.1899
	2	0.2490
	3	0.2634
B	1	0.2581
	2	0.2293
	3	0.2150
C	1	0.2543
	2	0.2494
	3	0.1986

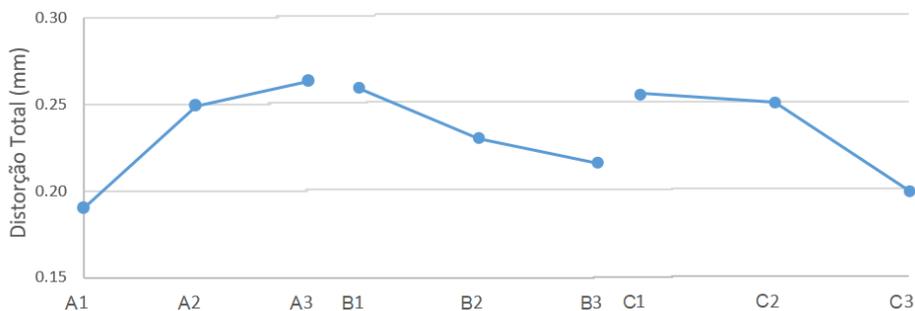


Figura 4.33: Média por parâmetros e níveis de distorção.

Parâmetros ótimos para distorção máxima são obtidos para a combinação A1B3C3, onde A1 é a corrente de 151 A, B3 é a velocidade de soldadura de 20 mm/s e C3 é a inclinação da tocha de 30°.

A tabela 4.9 indica os valores obtidos através da análise de variância para os resultados de distorção total.

Tabela 4.9: ANOVA para os valores de distorção.

Parâmetro	GL	SQ	QM	Valor F	Valor-P	Contribuição (%)
Corrente	2	0,027372	0,013686	9,66	0,001	33,59
Velocidade	2	0,008674	0,004337	3,06	0,069	10,64
Ângulo Tocha	2	0,017115	0,008557	6,04	0,009	21,00
Erro	20	0,028342	0,001417			34,77
Total	26	0,081502				

Como evidencia a Tabela 4.9, a corrente, apresenta maior influência sobre as distorções, com uma contribuição de 33,59%. Já o parâmetro velocidade, mostra menor influência nessa característica, com 10,64% de contribuição.



## 5. Conclusão

O principal objetivo deste trabalho foi a simulação numérica do processo de soldadura MIG da liga de alumínio 6082-T6. Recorrendo a essa ferramenta numérica foi efetuada a otimização, com o método de Taguchi, do processo de soldadura para minimizar as tensões residuais e distorções numa junta de canto. Aproveitando os resultados obtidos na simulação e, recorrendo à análise da variância (ANOVA), determinaram-se os parâmetros mais influentes na geração das tensões residuais e na ocorrência de distorções da junta soldada.

Para o controlo de tensões residuais foram analisados os resultados na região central da junta soldada, na direção transversal ao cordão ( $\sigma_x$ ), também foram obtidos os resultados ao longo do cordão de soldadura ( $\sigma_y$ ) e, por fim, as distorções causadas pelo processo de soldadura ao longo da secção transversal da soldadura.

A configuração ótima dos parâmetros de soldadura para minimizar as tensões  $\sigma_x$  foi a A3B1C2, isto é, intensidade de corrente de 190 A, tensão do arco de 22,7 V, velocidade de soldadura de 10 mm/s e inclinação da tocha de 45°. Essa parametrização é coincidente com os parâmetros e níveis utilizados na simulação 20. A análise ANOVA, permitiu determinar a influência que cada um desses parâmetros sobre a variação das tensões  $\sigma_x$ , assim, a velocidade de soldadura foi o parâmetro mais influente, com um peso de 56,43% e a inclinação da tocha o menos influente, com 0,89% de influência.

Visando reduzir as tensões  $\sigma_y$ , determinou-se a combinação ótima dos parâmetros de soldadura e que correspondeu a A2B3C3, que corresponde a uma intensidade de corrente com o valor de 170 A, a tensão do arco de 21,1 V, velocidade de soldadura de 20 mm/s e inclinação de 30° da tocha, configuração que coincide com a simulação 18. Tal como nas tensões  $\sigma_x$ , o parâmetro mais influente foi a velocidade, porém, com 39,2% e o de menor influência foi a inclinação da tocha com 2,99%.

Finalizando, para a distorção total da peça soldada verificou-se que a combinação ótima foi A1B3C3, sendo a intensidade de corrente de 151 A, a tensão do arco de 19,7 V, a velocidade de soldadura de 20 mm/s e a inclinação da tocha de 30°, combinação esta que coincide com a simulação 9. Ao observar a ANOVA, nota-se que o parâmetro mais influente foi a intensidade de corrente, com 33,59% e a velocidade como o parâmetro de menor influência, com 10,64%.

### **Propostas para trabalhos futuros**

Quanto a trabalhos futuros, seria interessante realizar uma análise para o arranjo feito a partir de tubos de ligas de alumínio. Também, simulações para procedimentos posteriores ao processo de soldadura com o intuito da redução de tensões, como tratamentos térmicos.

Outra linha bastante interessante para trabalhos futuros é a execução de análises experimentais, podendo ser usado métodos semi-destrutivo como Método do furo com extensômetros elétricos, ou não destrutivos, como difracção de raios X ou ultra-sons para a medição das tensões residuais e comparar os valores medidos com resultados obtidos numericamente. Podia-se, também, utilizar técnicas de levantamento de forma para a medição global da junta soldada e medir a sua distorção total.

## Referências Bibliográficas

- [1] J. E. Ribeiro, J. Gonçalves e N. Mineiro, “Projeto de automatização de processos de Soldadura de Estruturas Hiperestáticas em ligas de alumínio,” *Revista robótica.pt*, vol. 106, nº 1, pp. 6-9, 2017.
- [2] G. Mi, C. Li, Z. Gao, D. Zhao e J. Niu, “Finite Element Analysis Of Welding Residual Stress Of Aluminum Plates Under Different Butt Joint Parameters,” *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građe*, vol. 34, nº 3, pp. 161-166, 2014.
- [3] M. W. Dewan, J. Liang, M. A. Wahab e A. M. Okeil, “Post-weld residual stresses and heat treatments of Gas Tungsten Arc Welded aluminum alloy AA6061-T651,” *World Journal of Engineering*, vol. 10, nº 1, pp. 11-22, 2013.
- [4] A. K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian e K. Elangovan, “Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, nº 3-4, p. 286–296, 2009.
- [5] F. Hosseinpour e H. Hajhosseini, “Importance of Simulation in Manufacturing,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 3, nº 3, pp. 292-295, 2009.
- [6] S. Baharnezhad e A. P. Golhin, “In-Situ Measurement And Finite Element Simulation Of Thermo-Mechanical Properties Of Aa 6063 Aluminum Alloy For Mig Weldment,” *Materials Physics & Mechanics*, vol. 32, nº 2, pp. 222-236, 2017.

- [7] H. Ye, S. Xue, L. Zhang, F. Ji e W. Dai, "Reliability evaluation of CSP soldered joints based on FEM and Taguchi method," *Computational Materials Science*, vol. 48, nº 3, pp. 509-512, 2010.
- [8] A. Qasim, S. Nisar, A. Shah, M. S. Khalid e M. A. Sheikh, "Optimization of process parameters for machining of AISI-1045 steel using Taguchi design and ANOVA," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 59, pp. 36-51, 2015.
- [9] AWS, Structural Welding Code, American Welding Society, 1985.
- [10] H. Granjon, Fundamentals of Welding Metallurgy, Michigan: Abington, 1991.
- [11] R. W. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, John Wiley & Sons, 2008.
- [12] M. M. Neris, "Soldagem dos Metais," UNISANTA, Santos, 2012.
- [13] P. J. Modenesi, P. V. Marques e D. B. Santos, "Introdução à Metalurgia da Soldagem," UFMG, 2012.
- [14] L. C. Andrade, M. D. Horta, A. G. Filho e R. M. Trazzi, *Noções Básicas de Processos de Soldagem e Corte*, Vitória: SENAI/CST, 1996.
- [15] S. Kou, Welding Metallurgy, John Wiley & Sons, 2003.
- [16] G. Mathers, Welding of Aluminum & Its Alloys, Woodhead publishing, 2002.
- [17] C. G. D. Marco, V. A. Guimarães, W. Haupt, P. H. S. Cardoso e C. L. Israel, "Porosidades em Solda Automatizada em Ligas De Al-Mg," em *21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Cuiabá, 2014.
- [18] S. Caruso, E. Sgambitterra, S. Rinaldi, A. Gallone, L. Viscido, L. Filice e D. Umbrello, "Experimental Comparison of the MIG, Friction stir welding, cold metal transfer and hybrid laser-MIG processes for AA 6005-T6 aluminium alloy," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1769, nº 1, p. 100004, 2016.

- [19] D2442, Standard Specification for Alumina Ceramics for Electrical and Electronic Applications, ASTM, 2016.
- [20] J. Li e S. Wang, "Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, nº 1-4, pp. 997-1012, 2017.
- [21] H. França, *Tensões Residuais e Distorções em Soldagem: Processos de Fabricação e Tecnologia Mecânica III*, UNIESP, 2015.
- [22] Z. Feng, *Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion*, Cambridge: Elsevier, 2005.
- [23] J. E. Ribeiro, M. A. P. Vaz, P. A. G. Piloto e J. M. Monteiro, "Técnicas de Medição de Tensões Residuais," em *6º Congresso Nacional em Mecânica Experimental*, Ponta Delgada, 2005.
- [24] W. Cheng e I. Finnie, *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*, LLC ed., Springer Science & Business Media, 2007.
- [25] P. Šarga, P. Senko e F. Trebuña, "Verification of Equation for Determining Non-uniform Residual Stresses by FEM," *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, nº 7, pp. 169-172, 2013.
- [26] G. R. Bradley e M. N. James, "Residual Stresses/Strains Induced by the Metal Inert Gas and Friction Stir Welding Processes," *University of Plymouth*, Fevereiro 2000.
- [27] T. Chipanga, "Determination of the accuracy of non-destructive residual stress measurement methods," *CPUT Theses & Dissertations*, 2009.
- [28] Murakawa, H. e V. Ma, "Research on welding simulation methods and software development," *China Welding*, vol. 23, pp. 19-26, 2014.
- [29] S. Matias, "Modelação numérica e dimensionamento de vias-férreas em laje de betão," Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

- [30] P. Piloto, "Lecture (CU) Computational Mechanics," IPB, 2017.
- [31] WWH, "FEM for 3D Solids - Part 2," What When How, [Online]. Available: <http://what-when-how.com/the-finite-element-method/fem-for-3d-solids-finite-element-method-part-2/>. [Acesso em 06 Outubro 2017].
- [32] Simufact.welding Engineering GmbH, "Infosheet Meshing," MSC Software Company, 2016.
- [33] C. A. Felippa, "ASEN 6367 — Advanced Finite Elements Methods," 19 Janeiro 2017. [Online]. Available: <https://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/AFEM.d/Home.html>. [Acesso em 29 Dezembro 2017].
- [34] A. C. Miranda, "Elementos Finitos Isoparamétricos," 2004. [Online]. Available: <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/~amiranda/>. [Acesso em 03 Janeiro 2018].
- [35] ANSA Pre Processor, "Quality and Performance in Automatic Mesh Generation," 2017. [Online]. Available: [https://www.beta-cae.com/brochure/ansa\\_for\\_automatic\\_meshing.pdf](https://www.beta-cae.com/brochure/ansa_for_automatic_meshing.pdf). [Acesso em 09 Outubro 2017].
- [36] R. K. Roy, A Primer on the Taguchi Method, SME, 2010.
- [37] S. Pal, S. K. Malviya, S. K. Pal e A. K. Samantaray, "Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, nº 11, pp. 1250-1260, 2009.
- [38] G. Taguchi e S. Konishi, Taguchi Methods: Orthogonal Arrays and Linear Graphs-Tools for Quality Engineering, American Supplier Institute, Center for Taguchi Methods, 1987.
- [39] J. R. Phillip, Taguchi techniques for quality engineering, Michigan: McGraw-Hill, 1988.

- [40] E. M. Anawa e A. G. Olabi, "Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components," *Optics & Laser Technology*, vol. 40, nº 2, pp. 379-388, 2008.
- [41] V. A. Cecilio, "Testes de Soldadura MIG Standard e CMT Pulsado Robotizada em Liga de Alumínio 6082-T6 para Otimização de Penetração, Largura de Cordão e Reforço," Escola Superior de Tecnologia e Gestão - IPB, Bragança, 2017.
- [42] G. Simonato, "Otimização de soldagem robotizada em ligas de alumínio com modo de transferência Pulsado e CMT+P através do método Taguchi," Escola Superior de Tecnologia e Gestão - IPB, Bragança, 2017.
- [43] G. Taguchi, Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes, The Organization, 1986.
- [44] P. J. Ross, Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade, São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.
- [45] ASM, Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International, 2002.
- [46] ALCAN, Manual de soldagem, São Paulo: ALCAN Alumínio do Brasil, S. A., 1993.
- [47] R. F. Costa, *Tensão Residual e Distorção Induzidas Por Soldagem Em Uma Viga T*, Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2017.
- [48] P. V. Marques, P. J. Modenesi e A. Q. Bracarense, Soldagem: Fundamentos e tecnologia, UFMG, 2005.
- [49] P. J. Modenesi, "Introdução à Física do Arco Elétrico Soldagem I," UFMG, 2001.
- [50] WHITE MARTINS, Informe Técnico: Soldagem do Alumínio e suas Ligas, 2002.



## Anexo A

Tabela com os valores de tensão normal X obtidos nas simulações.

X (mm)	5	5.996	6.73	7.31	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
S_01	59.414	126.213	113.451	133.313	71.294	66.071	48.744	38.053	14.709	0.333	-5.428	-10.858	-9.262	-13.484	-8.398	-7.967	-3.280	0.159	3.005	23.077	21.467
S_02	41.842	138.871	118.913	136.996	67.924	73.355	58.231	47.165	33.702	22.257	11.587	13.736	9.866	7.566	18.643	15.375	12.221	0.918	2.010	12.042	-8.555
S_03	53.458	141.542	125.400	118.841	64.756	77.875	58.177	48.163	28.821	12.640	-10.014	-14.848	-17.422	-13.982	-11.848	-9.231	-6.565	-3.211	0.443	5.932	16.000
S_04	77.996	144.613	121.654	66.451	77.146	67.779	46.551	33.780	13.507	11.443	3.891	13.816	12.169	12.437	-0.512	-1.928	2.450	6.811	9.450	12.327	0.981
S_05	83.792	139.953	133.527	150.963	84.561	76.078	52.834	43.334	22.258	4.242	6.436	18.339	4.790	2.566	11.103	6.769	12.121	-7.480	3.300	12.931	-13.358
S_06	74.062	58.174	136.241	138.574	85.072	86.429	63.298	47.671	28.923	9.439	-1.122	-6.550	-6.784	-11.747	-10.412	-8.618	-4.390	-1.779	0.586	3.809	7.821
S_07	82.729	153.535	134.550	63.625	77.023	57.092	36.513	12.350	-1.001	-2.767	-0.231	5.809	3.840	5.994	9.516	10.014	6.750	9.054	12.298	16.904	20.570
S_08	84.848	122.253	131.001	121.798	88.801	80.082	51.279	40.881	13.478	3.146	0.370	-5.896	-5.312	-10.102	-7.173	-4.102	-0.240	3.936	7.674	11.639	14.514
S_09	75.816	3.805	110.767	148.873	70.088	71.816	39.816	24.713	-5.464	-17.203	-23.461	-23.785	-19.347	-13.441	-9.130	-4.142	0.556	6.558	11.675	17.414	21.465
S_10	39.339	121.977	108.930	119.732	48.096	61.091	46.619	38.201	19.964	3.645	-9.441	-12.986	-13.927	-13.114	-8.883	-5.058	-2.267	2.412	9.259	27.355	22.006
S_11	38.942	125.318	114.568	125.383	43.450	60.554	52.994	45.423	33.732	22.546	2.219	-2.330	-9.673	-11.327	-9.130	-6.357	-3.062	0.987	6.213	12.873	27.702
S_12	52.729	127.951	117.728	129.513	45.648	59.854	58.370	48.490	35.606	23.862	5.115	-11.402	-18.413	0.466	-13.537	-11.707	-8.835	-7.007	-8.012	6.861	21.175
S_13	87.745	145.787	128.936	144.389	88.313	67.872	49.461	13.113	-1.839	-15.860	-23.424	-26.262	-31.649	-19.106	-11.806	-6.078	-3.240	7.392	13.949	23.586	33.490
S_14	69.052	147.343	124.181	144.867	70.910	77.540	59.758	48.836	29.336	13.770	2.813	1.246	2.439	8.893	11.010	17.742	18.367	7.729	35.858	-0.901	2.216
S_15	56.827	152.866	127.657	132.440	75.019	87.047	66.238	53.396	36.369	15.843	-4.116	-7.252	-13.942	-14.210	-13.802	-9.935	-6.502	-2.080	6.828	14.110	31.524
S_16	67.774	151.491	114.146	110.621	64.961	65.035	40.807	21.642	2.631	-4.064	-9.643	-6.621	0.081	9.156	11.924	26.997	22.066	41.652	14.495	15.660	-49.433
S_17	82.936	160.017	152.526	160.617	82.065	81.256	53.738	43.975	14.905	5.906	-3.776	-21.159	-21.028	-13.517	-8.719	-7.892	-0.561	5.919	12.195	18.651	24.062
S_18	65.972	45.661	140.238	163.739	97.760	91.490	63.377	48.536	25.746	6.820	-8.102	-16.684	-21.475	-18.914	-17.020	-10.465	-4.172	1.214	6.896	12.060	15.655
S_19	29.158	96.848	88.450	105.379	40.655	55.955	43.004	34.068	18.878	3.011	-17.130	-22.591	-25.735	-18.642	-14.655	-8.498	-1.430	3.328	15.497	18.621	26.756
S_20	37.717	106.451	93.372	103.367	37.265	50.868	53.317	45.478	38.402	29.734	18.145	16.686	0.501	-4.503	-2.550	-2.388	0.528	1.276	5.971	17.652	23.054
S_21	47.275	95.259	74.183	88.184	35.804	53.714	56.524	47.604	40.055	33.516	21.731	9.219	-4.237	-7.673	-9.381	-6.216	-5.764	-4.109	-1.500	13.106	23.735
S_22	53.902	138.719	125.834	138.132	58.908	70.677	49.313	35.282	7.549	-3.332	-15.594	-21.691	3.228	-25.572	-12.081	-4.032	3.948	10.807	18.243	22.727	24.588
S_23	61.401	130.076	105.635	130.183	68.138	78.034	60.739	51.840	31.334	12.948	0.593	-6.405	-2.622	2.213	5.479	11.555	17.475	22.732	28.247	33.771	35.803
S_24	67.023	144.658	133.571	146.230	62.263	71.067	61.346	50.288	32.905	15.375	-11.403	-23.011	-12.066	-25.862	-14.940	-4.949	-5.759	-2.057	2.460	9.408	2.145
S_25	68.630	141.810	123.087	147.284	86.590	71.616	46.411	30.322	10.483	7.968	3.660	5.572	-0.122	19.377	30.474	12.749	8.230	16.624	14.261	10.660	1.625
S_26	81.693	148.667	132.923	146.116	83.494	88.971	64.098	46.720	25.422	12.954	8.297	13.014	-10.030	-11.701	-13.795	-6.885	-1.783	4.988	11.711	17.944	30.341
S_27	74.813	153.681	131.623	147.279	81.035	85.230	63.992	47.107	25.146	3.076	-17.187	-26.001	-28.990	-25.503	-19.007	-11.963	-6.060	3.427	7.761	14.355	24.318

Tabela com os valores de tensão normal Y obtidos nas simulações.

y (mm)	10	14.148	18	22.148	26	30.148	34	37.852	42	45.852	50	54.148	58	61.852	66	70.148	74	78.148	82	85.852	90
S_01	-97.677	-38.564	-5.592	-3.550	15.619	14.607	-5.530	7.054	15.089	3.554	-15.240	-9.697	-2.055	0.493	2.657	5.866	1.505	7.937	4.161	19.952	-101.995
S_02	-1.784	-31.645	-22.497	-9.916	-7.370	9.404	-21.518	-9.541	-2.869	0.235	-1.613	-17.400	-15.754	-7.870	-5.825	-4.107	-0.613	-24.151	-20.257	-6.191	-102.098
S_03	-0.138	-26.681	-29.630	-17.140	-22.282	-5.407	-16.728	-10.100	-6.949	-9.130	-8.607	-13.315	-12.930	-10.938	-8.378	-17.332	-1.317	-18.906	-16.861	-7.589	-124.201
S_04	-59.890	-11.281	16.561	-7.619	-9.897	-11.687	-9.333	-6.321	-12.389	-4.501	0.671	-5.619	17.288	-3.338	-5.260	-7.969	-3.126	-4.148	1.016	20.300	-115.033
S_05	-1.596	-37.644	0.207	-11.771	-9.806	-5.658	6.418	1.293	-10.927	-11.159	-4.657	1.917	13.537	-9.161	-14.483	-3.593	-2.205	-0.321	8.349	1.920	8.365
S_06	-0.407	-13.639	1.684	-23.349	-23.688	-12.832	-10.930	-16.521	-22.755	-11.135	-0.726	0.748	-2.904	-10.507	-16.122	-9.447	-4.193	1.518	-21.944	-11.323	-112.123
S_07	19.856	0.740	15.798	7.922	-11.989	-16.499	-3.099	7.469	7.847	-2.055	0.267	-13.443	-16.941	-4.101	5.272	-3.393	-3.197	-0.703	-23.570	-14.710	-133.082
S_08	3.579	8.396	-6.028	-16.821	-40.663	-5.797	-2.860	-6.290	-20.630	8.963	-16.650	-3.360	-7.870	-23.744	-21.498	24.056	-18.188	-19.569	1.545	17.111	-153.541
S_09	-0.779	-2.429	8.377	2.116	-37.746	-31.527	7.862	-32.718	-8.519	-6.465	-30.582	-12.667	-12.881	-9.372	-29.462	32.281	-25.491	-15.370	-4.860	-19.938	-140.791
S_10	-39.269	-11.399	-19.148	-7.279	-1.417	-13.308	-5.689	-5.434	0.758	-5.601	2.052	-1.677	-0.252	7.651	0.507	-3.844	0.090	3.336	11.002	4.171	-72.797
S_11	-69.035	-24.443	-7.852	9.287	-17.639	-8.231	-1.286	-2.680	-6.922	-4.693	-0.795	1.382	1.388	-6.761	-9.036	-9.978	-10.712	-9.946	-3.482	-12.137	-101.165
S_12	-59.718	-32.515	-4.193	-18.657	-6.307	-2.360	-14.221	-6.559	-3.879	-2.313	-1.380	-5.184	-6.372	-3.874	-6.971	-7.388	-5.117	-3.820	-3.698	-9.895	-100.050
S_13	-68.614	-34.481	-11.081	-18.413	-1.066	0.610	-7.295	-2.728	-4.315	-2.391	10.531	-3.503	-2.703	-11.249	-11.487	-4.360	5.195	4.240	0.560	16.343	-132.409
S_14	-93.502	-38.136	-16.284	10.222	0.563	-16.905	-8.913	-3.807	1.053	4.560	-17.037	-15.206	-11.976	-4.996	-3.891	-5.985	-14.195	-20.850	-18.463	-0.922	-124.942
S_15	-19.174	-12.829	-16.740	-18.907	-21.331	-12.583	-21.035	-9.616	-9.766	-21.782	-18.643	-2.986	-8.533	-8.660	-6.530	-10.126	-6.241	-12.319	-15.080	1.518	-116.568
S_16	-69.669	-3.719	-6.376	-6.723	0.247	-7.534	-22.705	-3.946	0.261	3.906	10.455	4.542	-1.861	-18.765	-10.076	6.041	-4.697	-2.615	-3.811	7.055	-126.534
S_17	-98.777	-36.074	-20.936	-10.345	-2.330	0.420	-4.540	-5.488	-0.356	3.763	7.740	-0.359	-10.974	-7.831	0.762	1.181	5.194	5.614	-6.325	4.973	-135.891
S_18	-59.894	-13.216	-15.113	-13.864	-0.163	-32.108	-12.562	3.390	5.424	-5.710	-24.370	-23.403	-12.385	-9.821	-5.212	0.519	-0.854	-16.721	-18.212	-12.340	-120.066
S_19	-37.363	-33.952	-17.559	-17.178	-2.653	-8.400	-7.897	-6.596	-4.276	2.326	2.844	4.937	5.668	0.318	-0.674	2.985	2.777	5.079	7.359	17.532	-60.509
S_20	-73.467	-13.860	-3.115	-4.246	-0.291	-2.606	-0.278	-2.143	-2.208	2.977	5.028	4.440	3.942	-2.312	-0.425	1.056	1.195	3.921	5.580	-0.489	-73.079
S_21	-54.259	-30.783	-43.574	-23.348	-23.060	-23.790	-21.360	-17.437	-16.226	-13.903	-4.857	-6.965	-6.014	-3.350	-3.820	-1.709	0.839	2.240	1.663	-15.157	-81.720
S_22	-51.955	-11.923	1.648	-4.087	-10.391	-0.602	-0.540	-8.738	-8.386	-4.527	3.349	2.870	-1.706	-2.209	-6.136	1.123	1.462	-1.145	5.669	28.191	-93.276
S_23	-88.164	-17.549	0.835	-10.237	-6.212	-5.980	-2.409	-11.067	-8.719	-4.561	2.721	-13.515	-10.706	-4.629	-7.413	-5.642	-4.104	-5.743	2.504	-10.619	-123.732
S_24	-82.208	-35.249	-22.629	-15.245	-12.599	-19.242	-15.616	-13.765	-12.379	-9.084	-5.903	-7.012	-10.386	-1.218	-5.090	-7.580	-5.366	-3.560	-5.706	-9.056	-124.135
S_25	-67.370	-24.611	-14.826	-3.164	1.529	-16.908	-4.974	-4.703	-2.193	1.775	-4.044	-0.706	-10.679	-0.358	3.559	-10.854	-1.054	-2.697	-4.422	0.887	-118.934
S_26	-108.679	-20.363	-8.807	2.837	-9.281	-8.194	-3.118	-2.513	-7.211	-9.217	-5.469	-4.191	-0.907	2.347	-3.693	-11.510	-10.059	-5.160	-3.040	4.134	-118.266
S_27	-84.776	-21.390	-15.543	-12.287	-11.354	-9.223	-11.671	-4.692	-9.960	-13.606	-5.668	-7.017	-4.876	-4.391	-6.601	-7.210	-9.346	-10.417	-10.684	12.101	-127.162

Tabela com os valores de distorção total, obtidos nas simulações.

x (mm)	5	5.996	6.73	7.31	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
S_01	0.224	0.244	0.204	0.184	0.195	0.201	0.210	0.217	0.223	0.229	0.234	0.239	0.243	0.247	0.252	0.256	0.261	0.266	0.271	0.276	0.281
S_02	0.109	0.150	0.172	0.170	0.234	0.239	0.243	0.246	0.248	0.250	0.251	0.253	0.253	0.254	0.254	0.255	0.253	0.252	0.251	0.250	0.250
S_03	0.145	0.130	0.161	0.134	0.171	0.158	0.157	0.155	0.153	0.151	0.148	0.146	0.144	0.143	0.143	0.143	0.144	0.145	0.147	0.149	0.152
S_04	0.101	0.119	0.119	0.127	0.192	0.197	0.201	0.203	0.206	0.208	0.209	0.210	0.211	0.209	0.208	0.207	0.206	0.205	0.205	0.205	0.203
S_05	0.112	0.118	0.133	0.123	0.174	0.179	0.182	0.185	0.188	0.190	0.192	0.195	0.195	0.197	0.199	0.200	0.201	0.203	0.203	0.202	0.203
S_06	0.146	0.128	0.142	0.123	0.143	0.146	0.151	0.154	0.157	0.159	0.160	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.162	0.163	0.164	0.166	0.167
S_07	0.127	0.116	0.108	0.102	0.105	0.108	0.112	0.117	0.122	0.127	0.131	0.135	0.138	0.142	0.145	0.148	0.150	0.153	0.156	0.158	0.161
S_08	0.067	0.066	0.079	0.097	0.155	0.160	0.163	0.163	0.163	0.162	0.161	0.159	0.157	0.154	0.152	0.150	0.148	0.146	0.145	0.143	0.142
S_09	0.073	0.045	0.034	0.048	0.086	0.092	0.096	0.097	0.096	0.093	0.090	0.088	0.086	0.084	0.082	0.080	0.079	0.078	0.078	0.077	0.077
S_10	0.147	0.182	0.176	0.187	0.236	0.241	0.244	0.244	0.243	0.241	0.238	0.236	0.233	0.232	0.230	0.230	0.230	0.230	0.232	0.233	0.235
S_11	0.171	0.207	0.219	0.230	0.280	0.280	0.281	0.282	0.281	0.280	0.278	0.275	0.273	0.271	0.269	0.268	0.267	0.267	0.267	0.268	0.269
S_12	0.139	0.152	0.182	0.195	0.257	0.259	0.257	0.257	0.254	0.251	0.247	0.242	0.238	0.235	0.231	0.229	0.227	0.225	0.224	0.223	0.223
S_13	0.200	0.183	0.201	0.147	0.194	0.203	0.206	0.212	0.215	0.219	0.221	0.223	0.225	0.228	0.230	0.232	0.235	0.238	0.241	0.244	0.247
S_14	0.122	0.152	0.172	0.169	0.223	0.230	0.241	0.250	0.258	0.264	0.271	0.277	0.284	0.290	0.297	0.303	0.310	0.315	0.322	0.328	0.329
S_15	0.126	0.109	0.141	0.119	0.173	0.168	0.170	0.172	0.173	0.172	0.171	0.170	0.168	0.167	0.166	0.165	0.165	0.165	0.166	0.166	0.167
S_16	0.117	0.145	0.148	0.171	0.206	0.216	0.226	0.235	0.244	0.252	0.259	0.266	0.274	0.281	0.288	0.295	0.301	0.307	0.315	0.315	0.315
S_17	0.101	0.107	0.131	0.126	0.176	0.181	0.186	0.189	0.191	0.191	0.191	0.190	0.189	0.187	0.186	0.185	0.184	0.183	0.183	0.182	0.182
S_18	0.125	0.112	0.139	0.136	0.192	0.196	0.200	0.201	0.202	0.201	0.199	0.197	0.195	0.193	0.191	0.189	0.188	0.187	0.186	0.185	0.184
S_19	0.167	0.201	0.211	0.234	0.271	0.264	0.260	0.256	0.252	0.249	0.245	0.242	0.240	0.239	0.239	0.239	0.240	0.241	0.243	0.246	0.250
S_20	0.168	0.199	0.219	0.242	0.304	0.304	0.307	0.309	0.309	0.309	0.307	0.305	0.303	0.301	0.299	0.298	0.297	0.297	0.297	0.298	0.300
S_21	0.134	0.150	0.171	0.180	0.243	0.250	0.249	0.250	0.250	0.249	0.248	0.247	0.245	0.244	0.243	0.242	0.243	0.244	0.246	0.248	0.251
S_22	0.145	0.190	0.192	0.201	0.243	0.246	0.249	0.251	0.251	0.250	0.249	0.248	0.246	0.245	0.244	0.243	0.243	0.243	0.243	0.244	0.244
S_23	0.197	0.209	0.216	0.198	0.232	0.215	0.217	0.219	0.221	0.222	0.223	0.224	0.225	0.226	0.228	0.230	0.232	0.234	0.237	0.240	0.244
S_24	0.137	0.145	0.184	0.179	0.232	0.232	0.235	0.239	0.240	0.239	0.237	0.234	0.231	0.229	0.227	0.225	0.224	0.223	0.223	0.223	0.224
S_25	0.159	0.190	0.201	0.221	0.263	0.270	0.277	0.284	0.289	0.294	0.297	0.300	0.303	0.305	0.308	0.307	0.306	0.306	0.306	0.306	0.303
S_26	0.154	0.171	0.182	0.198	0.251	0.254	0.261	0.265	0.267	0.269	0.269	0.268	0.267	0.265	0.263	0.261	0.260	0.258	0.257	0.256	0.256
S_27	0.137	0.129	0.157	0.163	0.220	0.222	0.226	0.228	0.228	0.227	0.224	0.220	0.217	0.215	0.212	0.210	0.208	0.206	0.205	0.204	0.203