

LEANDRO COUTINHO VIEIRA

**METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE
ESTRUTURAS SOLDADAS VIA ELEMENTOS
FINITOS COM SOFTWARE SYSWELD®**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2008

LEANDRO COUTINHO VIEIRA

**METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESTRUTURAS
SOLDADAS VIA ELEMENTOS FINITOS COM SOFTWARE
SYSWELD®**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Co-Orientador: Prof. Dr. Domingos Alves Rade

Uberlândia – MG

2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

- V658m Vieira, Leandro Coutinho, 1981-
 Metodologia para simulação numérica de estruturas soldadas via elementos finitos com Software Sysweld / Leandro Coutinho Vieira. - 2008. 75 f. : il.
- Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
 Co-Orientador: Domingos Alves Rade.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
 Inclui bibliografia
1. Soldagem - Teses. 2. Tensões residuais - Teses. 3. Método dos elementos finitos - Teses. 4. Deformações e tensões - Teses. I. Vilarinho, Louriel Oliveira. II. Rade, Domingos Alves. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.791



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. João Naves de Ávila, 2121 - 38400-902 Fone: 0XX(34)32394149 Ramal 42
FAX: 0XX(34)32394282 – Campus Santa Mônica - Uberlândia MG



ALUNO: Leandro Coutinho Vieira

NÚMERO DE MATRÍCULA: 89203

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

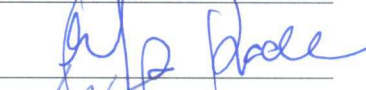
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“Metodologia para Simulação Numérica de Estruturas Soldadas via Elementos Finitos com Software Sysweld”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Domingos Alves Rade

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada no Anfiteatro do Bloco 1X, Campus Santa Mônica, em 22 de agosto de 2008, às 14:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho	UFU 
Prof. Dr. Domingos Alves Rade	UFU 
Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi	UFU 
Prof. Dr. Fábio Martins	UTFPR 
Dr. Camilo Carletti	Benteler Comp. Automotivos 

Uberlândia, 22 de agosto de 2008.

A Deus,
À minha esposa Hérika e minhas filhas Angélica e Amanda,
À minha mãe e irmãos.
E à memória de meu pai.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que ocorreu em minha vida até hoje.

À minha mãe Ana, meus irmãos Tatiane, Leônidas, Leonardo e Thais, minha esposa Hérika, que possuem um papel fundamental em minha formação e sempre fizeram o possível para que este curso pudesse ter continuidade e chegar até o fim desde a graduação até o mestrado.

Tenho um profundo agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Domingos Alves Rade, que desde os tempos de IC, quando me deu uma oportunidade e acreditou em mim, tem me ensinado muito sobre dedicação, disciplina, respeito, ou seja, muito além da orientação profissional e que, junto com a prof. Raquel, tenho o prazer de tê-los como meus padrinhos.

Gostaria de agradecer muito também ao meu orientador, Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, que através de sua inteligência, agilidade e dinamismo me ensinou muito sobre ser prático e objetivo características que pretendo levar sempre comigo.

Aos meus amigos do Laboratório de Mecânica e Estruturas (Lmest) Prof. José Eduardo Tannús Reis e do Laboratório para Desenvolvimento de Processos de Soldagem (Laprosolda), que sempre contribuíram de forma significativa para a realização deste trabalho.

À Benteler Automotive Ltda que acreditou na possibilidade de realização deste projeto fornecendo suporte financeiro, material e de informações.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este mestrado.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

E a todos àqueles que me apoiaram de alguma forma na realização deste trabalho.

VIEIRA, L. V. **Metodologia para Simulação Numérica de Estruturas Soldadas via Elementos Finitos com Software Sysweld®**. 2008. 75 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

O estabelecimento de processos de fabricação cada vez mais produtivos e de maior qualidade é um requerimento constante do meio industrial. Neste sentido, uma das metodologias possíveis para a busca pela otimização de processos é através do uso de simulações numérico-computacionais. Em específico para processos de soldagem, um software comercial de simulação numérico-computacional de desenvolvimento recente vem chamando a atenção por parte do setor industrial e meio acadêmico: o Sysweld®. Este software tem a capacidade de simular diferentes processos de soldagem, incluindo movimento da fonte de calor, deposição de material, as propriedades dos materiais dependentes da temperatura, transformações de fase e ainda tratamentos térmicos e superficiais. Como resultados, o Sysweld® é capaz de prever campos de temperatura, tensões residuais, deformações e porcentagem de fases (microconstituintes). Entretanto, apesar da grande possibilidade de uso deste software, ele demanda uma calibração experimental para garantir a confiabilidade dos resultados. Com base neste contexto, foi realizado um estudo de caso em um componente automotivo fabricado nacionalmente, de maneira a delimitar uma metodologia de condução de simulação numérico-computacional para fabricação por soldagem no software comercial Sysweld®. Foram realizadas as simulações de todas as soldas do eixo traseiro de veículo do tipo *hatch*, como resultados foram obtidos o campo de temperatura, as deformações geradas no componente, as tensões residuais e a porcentagem de cada fase. Os resultados térmicos e de deslocamentos foram comparados experimentalmente através de medições realizadas com termopares e mesa tridimensional na indústria, onde não apresentaram boa correlação. Em uma segunda etapa foi realizado um estudo numérico-estatístico sobre a influência de parâmetros (folga, espessura, fonte de calor e sistema de fixação) sobre as tensões residuais, o deslocamento máximo e a variação do resfriamento entre as temperaturas de 800°C e 500°C ($\Delta T_{8/5}$). Os resultados obtidos ficaram em conformidade com a literatura.

Palavras-chave: Soldagem, Elementos Finitos, Tensões Residuais, Deformações.

VIEIRA, L. C., **Methodology for Numerical Simulation of Welded Structures via Finite Elements with Sysweld®**. 2008. 75 f. M.Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The establishment of manufacturing process with high productivity and quality is a constant requirement of the industrial sector. A possible methodology for carrying on this need of process optimization can be achieved by numerical-computational simulation. Specifically for welding processes, recently developed commercial software has called the attention in both academic and industrial sectors: the Sysweld®. This software has the capacity of simulating different welding processes, including heat source movement, material deposition, transient material properties as a function of temperature, phase transformation and also thermal and superficial treatments. As result, Sysweld® is capable of predicting temperature field, residual stress, distortion and phase proportion (microconstituents). However, despite the great possibility of the software usage, it demands an experimental calibration to assure confidentiality on the results. Therefore, within this context, a case study was performed in an automotive component nationally fabricated to delimitate a methodology for carrying out the numerical-computational simulation for the welding process using the commercial software Sysweld®. Simulations were done for the welds made in a part of the rear axle of a hatch car and the results are shown for the temperature field, generated distortion in the part, residual stresses and phase proportion. The thermal results and displacements were experimentally compared to measurements done by thermocouples and three-dimensional table in the partner industry. This comparison led to a poor correlation between numerical and experimental data. In a second stage, a numerical-statistical study was carried out for assessing the parameters influence (gap, thickness, heat source level and clamping system) on the residual stress, maximum displacement and cooling rate between 800°C e 500°C ($\Delta T_{8/5}$). The obtained results are in agreement with technical literature.

Keywords: Welding, Finite Elements, Residual stress, Distortion.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Tensões em soldagem.....	4
2.2. Caracterização da distribuição de tensões.....	5
2.3. O uso de simulações numéricas.....	9
2.4. O Sysweld®	18
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA NUMÉRICO-EXPERIMENTAL.....	23
3.1. Avaliações preliminares.....	23
3.1.1 <i>Descrição.....</i>	23
3.1.2 <i>Levantamento de dados.....</i>	25
3.1.3 <i>Execução dos Desenhos.....</i>	26
3.1.4 <i>Obtenção das Macrografias.....</i>	27
3.1.5 <i>Importação do Modelo.....</i>	28
3.1.6 <i>Importação das Malhas.....</i>	29
3.1.7 <i>Geração das Malhas no Visual Mesh®</i>	31
3.1.8 <i>Criação do Sistema de Fixação.....</i>	32
3.1.9 <i>Importação para o Sysweld®</i>	33
3.1.10 <i>Grupos Restantes.....</i>	33
3.1.11 <i>Welding Wizard.....</i>	36
3.1.12 <i>Problemas Encontrados, Soluções Propostas, Testadas e Funcionais.....</i>	36
3.2. Estudo de Juntas.....	40
3.2.1 <i>Planejamento Estatístico.....</i>	42
3.2.2 <i>Simulação.....</i>	44
CAPITULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1. Resultados para a Simulação do Componente.....	47
4.1.1 <i>Simulação das Macrografias.....</i>	47
4.1.2 <i>Simulação do Componente.....</i>	53
4.2. Resultados para o Estudo das Juntas de Topo.....	62

CAPITULO V - CONCLUSÃO.....	68
CAPITULO VI - PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	70
CAPITULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

SIMBOLOGIA

ARBL : Aço de Alta Resistência e Baixa Liga.

CCT : Transformação em resfriamento contínuo (*continuous cooling transformation*).

EBW: Soldagem por Feixe de Elétrons.

FCAW: Soldagem com Arame Tubular.

FRF : Função de Resposta em Frequência.

GMAW: Processo de soldagem MIG/MAG.

GTAW: Processo de soldagem TIG.

Hz: unidade de frequência Hertz.

LBW: Soldagem a laser.

LVDT: *Linear Variable Differential Transformer*.

RSW: Soldagem a Ponto.

SAW: Processo de soldagem a arco submerso

UX: Deslocamento na direção X.

UY: Deslocamento na direção Y.

UZ: Deslocamento na direção Z.

ZAC: Zona Afetada pelo calor

$\Delta t_{8/5}$: Tempo de resfriamento entre as temperaturas de 800 a 500°C.

σ : Tensão

σ_x : Tensão Longitudinal.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Em um mercado cada vez mais exigente, os preceitos sobre a qualidade do produto oferecido se tornam cada vez maiores, demandando, portanto, melhor conhecimento e controle do que se fabrica. Em específico, numa linha de produção onde se fabricam componentes soldados, uma maneira de se atingir este melhor conhecimento é através da realização de vários testes até se chegar ao ponto ótimo. Entretanto, esta técnica demanda um custo bastante elevado.

Com o intuito de minimizar o número de testes e se conhecer melhor o produto fabricado, uma técnica interessante é a utilização de modelo em elementos finitos, que traduza numericamente a realidade do produto fabricado. A modelagem computacional de geometrias complexas é sempre uma tarefa difícil e trabalhosa, porém em mercados atuais é extremamente necessária. Devido à grande complexidade do processo de soldagem, há uma dificuldade muito grande em sua modelagem, necessitando, portanto, de softwares bastante robustos e específicos.

Normalmente estruturas soldadas apresentam, devidas ao ciclo térmico do processo, tensões internas (residuais), que são as tensões que permanecem na peça na ausência de forças externas e gradientes térmicos (Kandil *et al.*, 2001). Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com base neste tema como o de Brand e Siegele (2007), que estudaram as distorções e tensões residuais em um aço bifásico utilizado na indústria automotiva com o auxílio do programa Sysweld®, o qual também foi utilizado por Mochizuki *et al.* (2005) para análise das relações entre transformação de fase e tensões residuais. Diversas simulações de soldagem foram realizadas por Francis (2002) para juntas de topo e em T através do método dos elementos finitos também usando o Sysweld®. O método dos elementos finitos também foi utilizado por Tsirkas (2002) para simular as distorções provocadas pela solda a laser através do método Keyhole, uma análise de transferência de calor não linear e acoplada a análise termo-mecânica transiente.

Bezerra (2006), utilizou elementos finitos para realizar a simulação, através do software Ansys®, da soldagem TIG de uma chapa de aço inoxidável, obtendo excelentes resultados térmicos e estruturais quando comparados a resultados experimentais obtidos por Depradeux (2004), que utilizou termopares para medição de temperatura e difração de raios-X para medição das tensões residuais.

Dentre os vários ramos industriais onde a simulação de processos de soldagem pode ser implementada, destaca-se o setor automotivo devido ao aumento de peças produzidas e sua importância econômica, que cresceu 29,93% nos primeiros quatro meses de 2008, segundo a Fenabreve (Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores). Assim, justifica-se um estudo detalhado neste setor de grande importância com foco na delimitação de uma metodologia de condução de simulação numérico-computacional para fabricação por soldagem, de forma a obter resultados confiáveis e que representem a realidade. Dentre os possíveis softwares disponíveis, destaca-se o Sysweld® pelo número de informações e desenvolvimento dedicado à soldagem.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo a criação e validação de uma metodologia para condução de simulações de um componente automotivo utilizando-se o Sysweld®, de modo a conhecer o comportamento do mesmo quando submetido ao processo de soldagem, com o intuito de predizer o campo de temperatura, campo de deslocamentos e tensões residuais e ainda o percentual de cada fase remanescente no material. Tem como objetivo ainda, em um segundo estágio, um estudo mais abrangente de juntas, onde se pretende mostrar a influência de alguns parâmetros de soldagem, como espessura do material, folga da junta, fonte de calor e sistema de fixação, no deslocamento máximo, nas tensões residuais de soldagem e na velocidade de resfriamento do material.

Cronologicamente, o primeiro passo da sistemática de trabalho foi a escolha do componente automotivo a ser simulado, onde foi escolhido um componente em linha de produção na indústria automotiva e que corresponde a um eixo traseiro de um veículo do tipo *hatch*. O segundo passo foi a execução do desenho do eixo através do software Catia®, procurando-se aproximar-se ao máximo da peça real atentando-se para detalhes da mesma. Como o Sysweld® não apresenta muitos recursos para a geração de malhas, um novo software foi utilizado, denominado Visual Mesh®, utilizado na geração de malhas e grupos de trabalho para o Sysweld®. Ressalta-se a facilidade de troca de dados entre estes dois últimos programas.

O Sysweld® necessita ainda de uma calibração de sua fonte de calor, o que ocorre através de uma comparação de macrografias experimentais e simuladas. O programa possui uma interface exclusiva para este fim. Procedeu-se em seguida à

simulação do componente, que foi confrontada com dados experimentais obtidos a partir de medições realizadas no chão de fábrica, com uso de termopares (medição de temperatura) e de uma mesa tridimensional (medição do deslocamento final).

Ao se realizar este procedimento, observou-se a necessidade de se conhecer e prever aspectos mais locais, como configuração de junta, de forma a se entender o resultado global do componente. Desta forma, foram realizadas simulações, com uso de planejamento estatístico, para definir tais efeitos locais.

Esta sistemática de trabalho descrita pode ser sumarizada pela Figura 1.1.

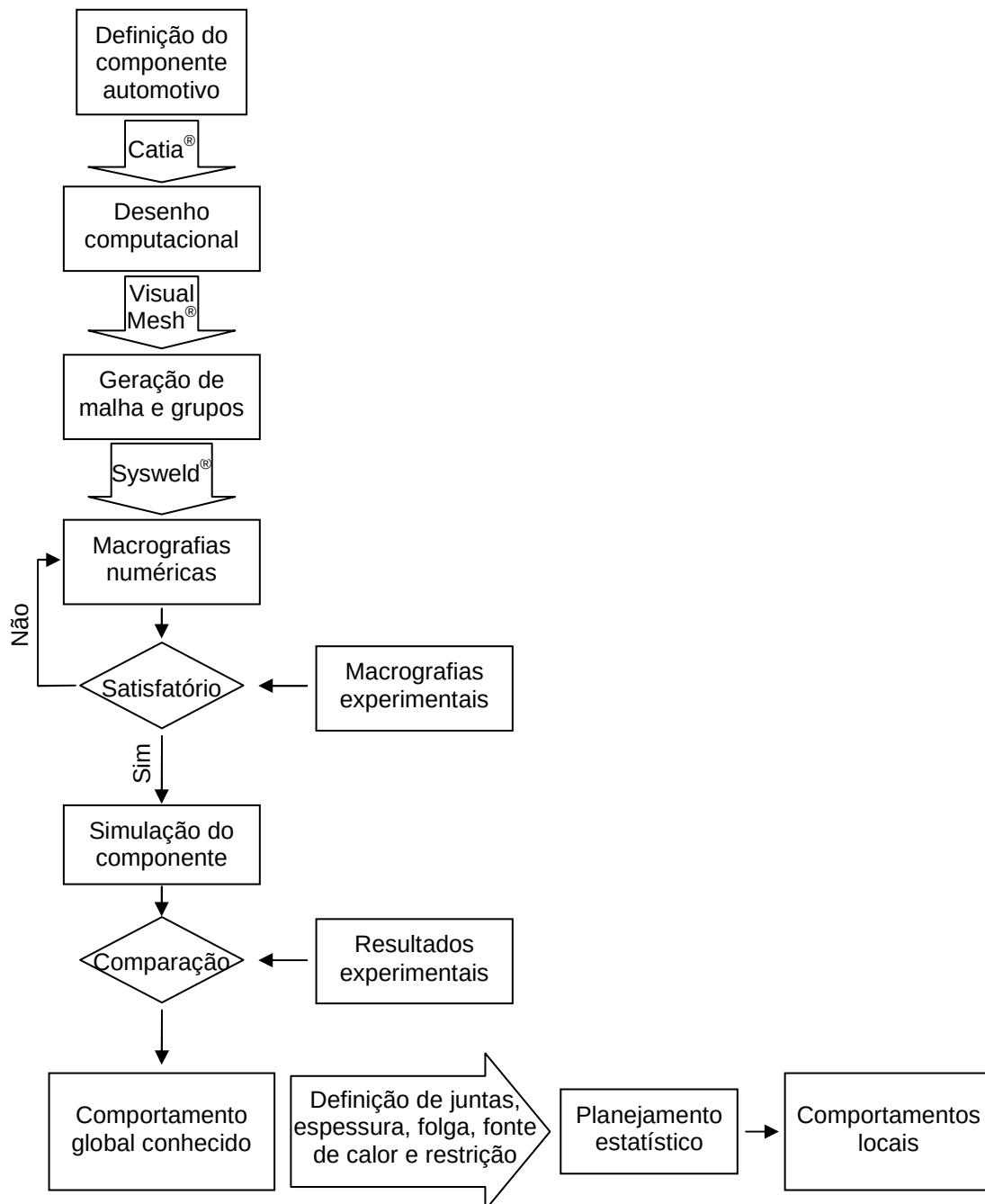


Figura 1.1 – Sistemática de trabalho adotada.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tensões em soldagem

A soldagem é amplamente aplicada na realização de projetos de engenharia. Durante o processo de soldagem ocorre um forte aquecimento de certas regiões das peças a serem unidas, enquanto que as partes restantes permanecem a temperaturas bem inferiores, havendo assim uma distribuição de temperatura não-uniforme e transiente (variável com o tempo). Desta forma, com a dilatação natural das partes metálicas aquecidas, a qual é restringida pelas regiões adjacentes menos aquecidas, são geradas deformações elásticas e plásticas não uniformes. Estas últimas são responsáveis por grande parte das tensões residuais de soldagem. Outro fator que pode levar ao aparecimento de tensões residuais são as variações de volume (expansão ou contração) que ocorrem durante as transformações de fase no estado sólido.

Estas tensões residuais são entendidas como tensões que permanecem na peça na ausência de forças externas e gradientes térmicos (Kandil *et al.*, 2001), e podem ser agrupadas em três tipos principais de acordo com a porção de material na qual elas podem ser observadas, sendo elas as tensões residuais do tipo I ou tensões macroscópicas, onde é observada em uma região maior que o tamanho de grão do material, as tensões do tipo II ou microestruturais que cobrem a distância de um grão ou parte de um grão, este tipo pode ocorrer, por exemplo, entre diferentes fases que têm diferentes propriedades físicas ou entre partículas precipitadas, tais como inclusões e a matriz e ainda as tensões do tipo III também conhecida como micro-localizadas as quais ocorrem entre várias distâncias atômicas dentro de um grão e são equilibradas sobre uma pequena parte do grão e são resultado da presença de discordâncias e outros defeitos cristalinos (Lu *et al.*, 1996).

Em muitos casos estas tensões são indesejáveis devido à possibilidade de prejudicar a qualidade de componentes soldados (Parlane *et al.*, 1981), influenciando na produtividade e funcionalidade de estruturas soldadas (Radaj D., 2003) e fazendo-se necessários tratamentos térmicos para alívio de tensões. Entretanto, este tipo de tratamento, além da dificuldade técnica, pode tornar-se economicamente inviável, havendo a necessidade de consideração destas em projeto.

A redução das distorções, bem como a redução das tensões residuais de estruturas soldadas é uma tarefa muito importante. Muitos parâmetros tais como método de soldagem, preparação de juntas, velocidade de soldagem, transformação de fase, sistema de fixação etc., apresentam condições de influenciar nos resultados de distorções e tensões residuais de soldagem (Brand e Siegele, 2007).

2.2 Caracterização da distribuição de tensões

A caracterização destas tensões foi o objeto de diversos estudos experimentais ou numéricos (Withers e Badeshia, 2001a e 2001b). Entretanto, as técnicas experimentais para medição de tensões residuais apresentam sérias limitações, como, em muitos casos, serem destrutivas, como o método da remoção de camada, métodos do furo cego (*hole-drilling*) e do anel (*ring core*), ou semi-destrutivas, como o método de difração de raios-x e método de difração de nêutrons. Outras desvantagens típicas são que, dependendo da técnica empregada, as medidas de tensão devem ser realizadas em um ponto por vez, podem ser restritas a alguns tipos de materiais específicos e podem até mesmo fornecer resultados incorretos quando ocorrerem deformações plásticas (Cullity, 1978).

Em sua maioria, componentes soldados fazem parte de outros componentes que podem ser encaixados ou parafusados, um dos principais problemas encontrados na engenharia é garantir que após a soldagem as distorções provocadas nestas estruturas não afetarão a montagem final dos equipamentos. Com este intuito Masubuchi (1980) discute os vários tipos de distorções provocadas pela soldagem, incluindo técnicas de controle e alívio em seções finas freqüentemente utilizadas nas construções navais, ferroviárias, aeroespaciais, automotivas e de indústrias. O autor estudou a flexão como sendo um tipo de distorção, que quando ocorrida, sua magnitude tende a ser muito grande. Além disso, a instabilidade reduz a integridade de uma estrutura soldada. O uso de ferramentas de análise preditivas pode

determinar a susceptibilidade de um projeto para os diversos tipos de distorção, e ajudar a seleção da geometria e processos de fabricação adequados e que minimizam distorções. O autor apresenta de forma simplificada as soluções analíticas para a avaliação de condições de soldagem sensíveis à flexão, porém estas soluções estão disponíveis apenas para geometrias simplificadas.

Vários estudos vêm sendo realizados com o intuito de avaliar o comportamento mecânico de estruturas soldadas mediante aços com microestruturas diferentes, oferecendo melhores propriedades mecânicas e em alguns casos podendo ser mais leves que o aço carbono, avaliando se a substituição causará alterações nas distorções e tensões residuais geradas pelo processo de soldagem. Este tipo de estudo foi realizado por Fonseca *et al.* (2007) o qual avaliou as propriedades mecânicas (microdureza, tenacidade e resistência à tração) e microestruturais de um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), em juntas soldadas pelo processo de soldagem a arco elétrico TIG autógeno e com metal de adição, comparando-as com as propriedades apresentadas pelo metal de base. Foram utilizadas microscopia eletrônica de varredura e a microestrutura, tanto do metal de base quanto das juntas soldadas, foi analisada por microscopia ótica. O estudo incluiu ainda a análise do comportamento das tensões residuais geradas pelo processo de soldagem através de difração de raios-X. Os valores da microdureza do metal analisado se mostraram acima daquela do metal base, já os resultados da tenacidade não sofreram alterações expressivas, a tensão de ruptura se mostrou menor e as tensões residuais resultaram em altos valores de tração na região do metal de solda, o que parece estar de comum acordo com o que se vê na literatura.

O surgimento destas tensões de tração nas regiões dos cordões de solda pode levar ao surgimento de trincas nas proximidades. Estudos como os de Brown e Song (1992) mostraram que a interação entre a zona soldada e a estrutura pode ter um efeito drástico sobre as distorções acumuladas. Em muitos casos, a contribuição da estrutura é maior sobre o estado de tensão e distorção. Sendo este um estado muito diferente do previsto por uma simulação apenas do cordão de solda. Alguns modos de distorção, mais observados é a flexão causada pela tensão longitudinal, porém esta não pode ser representada por modelos bidimensionais no plano perpendicular à direção da solda. No entanto, a utilização de um modelo totalmente tridimensional para executar a simulação termo-mecânica de estruturas complexas era impraticável computacionalmente segundo o autor.

De acordo com Francis (2002), outro aspecto muito importante, que tem chamado cada vez mais a atenção da comunidade científica, é a transformação de fase no estado sólido. A

deformação plástica que surge devido à transformação de fase é conhecida por plasticidade de transformação. Esta deformação é irreversível porque o retorno à fase original não desfaz esta deformação, podendo, inclusive, aumentá-la. O mecanismo primário responsável por esta plasticidade de transformação é a variação de volume que ocorre durante a transformação.

Uma nova maneira de se caracterizar o estado de tensão de estruturas soldadas é o estudo de seu comportamento dinâmico, que pode ser alterado mediante a inclusão de tensões residuais de soldagem como mostrado no trabalho de Bezerra (2006) que estudaram o comportamento dinâmico destas estruturas através de simulações numéricas, considerando vários tipos de componentes estruturais (placas finas retangulares, chapas retangulares com reforço, cilindros moderadamente finos e grossos). A caracterização dinâmica das placas foi realizada através de testes de vibração com o uso de martelo de impacto e sistema de aquisição, como visualizado na figura 2.1. Um conjunto de funções de respostas em frequência (FRF's) relaciona as vibrações transversais através das transformadas de Fourier na entrada (forças de impacto) e na saída (acelerações).



Figura 2.1 – Montagem experimental para aquisição de FRF (Bezerra, 2006).

A Figura 2.2 mostra os resultados obtidos por Bezerra (2006) para as FRF's antes e depois da soldagem, onde os picos de amplitude mostram as frequências naturais do modelo. Os resultados obtidos confirmam a influência das tensões residuais de soldagem sobre o comportamento dinâmico de componentes.

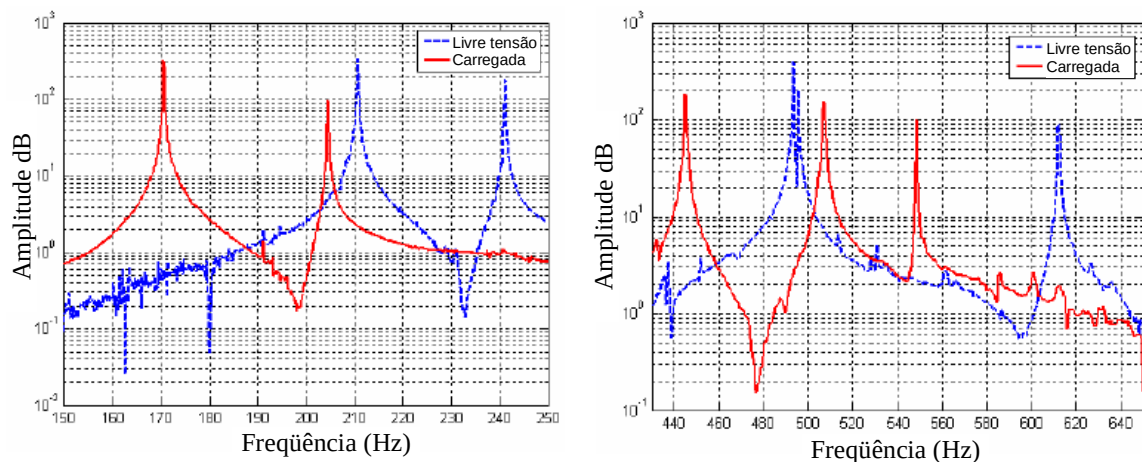


Figura 2.2 – Amplitudes das FRF's para situação sem tensões residuais e com tensões residuais (Bezerra, 2006).

Vários problemas podem ser encontrados durante a medição de temperatura em componentes soldados. Slania *et al.* (2007) apontam como principais problemas encontrados a temperatura máxima atingida, a variação dinâmica da temperatura e a dificuldade de se garantir a repetibilidade das medições.

Por outro lado a caracterização de tensões residuais utilizando modelos analíticos e numéricos têm crescido muito ultimamente, sendo eles estudados por Fassani e Trevisan (2003) nas configurações uni e bidimensionais, em regime transiente, e também para as configurações bi e tridimensionais, em regime quase-estacionário, para processos de soldagem com múltiplos passes. A distribuição da fonte de calor e as perdas superficiais foram consideradas nos modelos analíticos. Nos modelos numéricos, além das perdas por convecção e radiação, foi analisado o efeito da variação das propriedades físicas com a variação da temperatura. A comprovação dos modelos analíticos foi feita através da comparação entre os ciclos térmicos simulados por estes modelos com aqueles obtidos pelas soluções numéricas. No caso das configurações unidimensional transiente e bidimensional quase-estacionário, os ciclos térmicos analíticos e numéricos foram comparados também com os ciclos térmicos obtidos experimentalmente. Os autores consideram que a concordância entre os resultados analíticos, teóricos e experimentais foi suficiente para a validação modelos analíticos propostos.

Uma solução analítica para a temperatura transiente de um corpo semi-infinito, sujeito a uma fonte de calor elipsoidal dupla em movimento, foi proposta por Nguyen *et al.* (1999) e utilizada para avaliação de tensões residuais de soldagem. Esta solução analítica foi utilizada

para obter a história térmica de uma simples deposição numa placa e, em seguida, avaliar as tensões residuais por deformações inerentes e método dos elementos finitos. Uma soldagem foi realizada em um corpo de prova de aço HT780 e usada para medição de tensões residuais por meio de extensômetros. Resultados satisfatórios foram obtidos comparando simulação e experimento. Os autores concluíram que a solução analítica proposta tem muito potencial para a avaliação de tensões residuais em placas.

2.3 O uso de simulações numéricas

Com a evolução da tecnologia computacional os métodos numéricos vêm sendo cada vez mais utilizados, apesar das dificuldades em se conseguir modelar exatamente fenômenos complexos tais como o comportamento da plasticidade, das propriedades dos materiais em relação à temperatura, deposição de material e transformações metalúrgicas.

Ao se realizar uma simulação termo-mecânica, normalmente é necessária a realização de uma análise térmica e, em seguida, uma análise estrutural. Isto porque é considerado que uma mudança no estado térmico causa uma mudança no estado de tensões e deformações de um determinado componente, enquanto que mudanças no estado mecânico de um componente não causam mudanças no estado térmico, ou seja, uma variação na tensão e deformação não causa uma variação na temperatura (desprezam-se os efeitos mecânicos dissipativos). Assim, é primeiramente realizado o cálculo da história térmica da soldagem e, em seguida, este campo de temperatura transiente é aplicado ao modelo estrutural para obtenção das tensões residuais (Francis, 2002).

A obtenção do campo transiente de temperatura é um passo importante para a determinação das distorções e do campo de tensões residuais em componentes soldados, sua determinação na soldagem através de métodos numéricos tem sido largamente utilizada atualmente. Alguns métodos numéricos permitem levar em consideração as variações das propriedades do material com a temperatura e trocas de calor com o meio.

A análise estrutural constitui um problema cuja resolução é bem mais complexa e demorada do que a análise térmica. Isto se deve a diversos fatores, tais como o maior número de graus de liberdade por nó dos elementos estruturais e o fato do problema ser fortemente não-linear (não-linearidade de material e geométrica, além da dependência das propriedades com temperatura). Além disso, existem problemas de instabilidade numérica devido ao fato de o

material apresentar rigidez muito baixa em altas temperaturas. Isto é muitas vezes um motivo de não-convergência do algoritmo de resolução das equações não lineares (Bezerra, 2006).

Um dos métodos numéricos utilizados na simulação de soldagem é a técnica das diferenças finitas, que é um método de resolução de equações diferenciais que se baseia na aproximação de derivadas por diferenças finitas. Este método foi utilizado por Vieira Jr. (2003) para mostrar numericamente a influência das tensões residuais de soldagem em placas finas sobre as frequências naturais de vibração. As frequências naturais foram determinadas empregando o método dos modos assumidos. A Figura 2.3a ilustra um resultado obtido pelo autor, mostrando uma superfície de variação de uma função de resposta em frequência (FRF) pontual com relação à potência térmica aplicada durante a soldagem. O autor chegou à conclusão de que esta influência é significativa para alguns modos quando comparados com os resultados experimentais obtidos. Na Figura 2.3b é mostrada uma comparação das amplitudes de duas Funções Resposta em Frequência (FRF's) para uma placa estudada em duas condições: livre de tensões residuais (antes da soldagem) e sujeitas a tensões residuais induzidas por um carregamento térmico similar ao ocorrido em uma soldagem TIG sem adição de material.

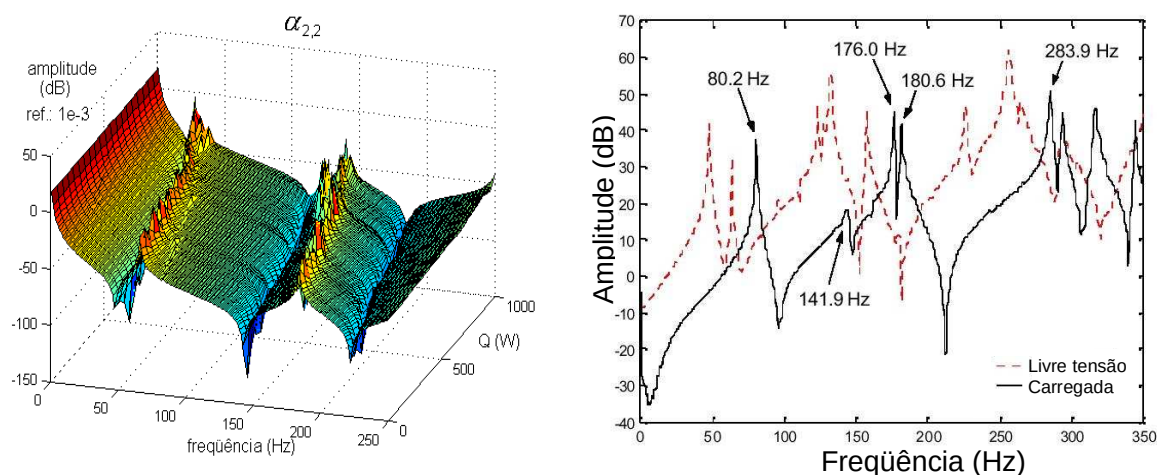


Figura 2.3 – (a) Superfície de variação da FRF pontual com a potência térmica; (b) amplitudes das FRF's obtidas experimentalmente na condição livre de tensões e com tensões residuais após soldagem (Vieira Jr., 2003).

Em uma linha de pesquisa semelhante, o trabalho de Kamtekar (1978) apresentou uma formulação para a resolução do problema de previsão de tensões residuais de soldagem utilizando o método das diferenças finitas. A evolução temporal da distribuição de temperatura

sobre a placa foi determinada através das fórmulas analíticas desenvolvidas por Rosenthal (1941). Neste estudo, o tempo foi discretizado e, para cada instante considerado, o campo de temperatura foi atualizado e as deformações plásticas foram recalculadas utilizando o método das soluções elásticas sucessivas (Mendelson, 1968). Foi considerado que apenas a tensão de escoamento variava com a temperatura, permanecendo as outras propriedades constantes. A Figura 2.4 mostra os resultados obtidos com a técnica apresentada e a comparação com o método dos elementos finitos.

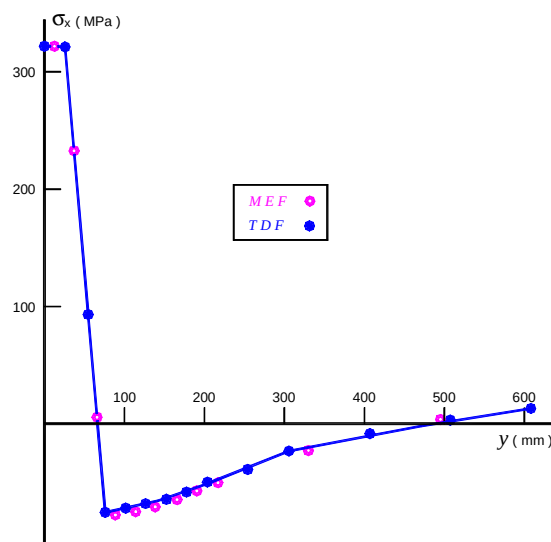


Figura 2.4 – Comparação entre o resultados obtidos por Kamtekar e MEF (Kamtekar, 1978).

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica destinada à obtenção de soluções aproximadas de problemas regidos por equações diferenciais. O MEF permite levar em consideração as não-linearidades introduzidas pela dependência das propriedades termofísicas do material (condutividade térmica, calor específico e densidade) em relação à temperatura, os diferentes mecanismos de troca de calor com o meio (convecção e radiação), além de possibilitar a modelagem de estruturas de geometrias complexas. Utilizando propriedades termofísicas dependentes da temperatura em seus estudos Vieira *et al.* (2005) realizaram a caracterização numérica do campo de temperatura transiente devido a um processo de soldagem TIG autógeno (sem material de adição) em uma placa de aço inoxidável austenítico AISI 316L, o método dos elementos finitos foi empregado através do software Ansys® e uma comparação com resultados de Depradeux (2004) foi realizada. É possível

verificar, através da Figura 2.5 uma ótima concordância entre os resultados numéricos e experimentais, havendo um desvio máximo de 3,68 % para o resultado no ponto a 10 mm, 2,52% para o ponto a 20 mm e 2,11 % para o ponto a 30 mm da linha central.

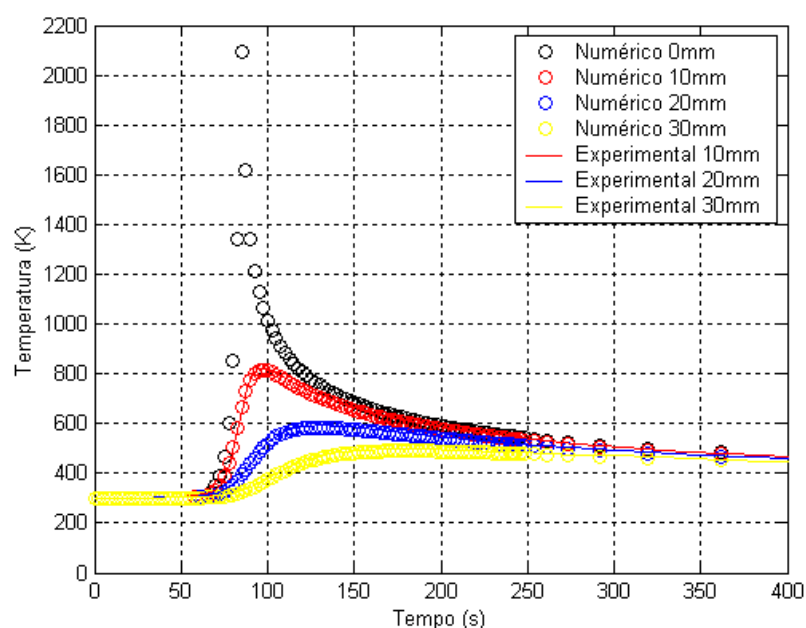


Figura 2.5 – Evolução da temperatura em função do tempo para a seção transversal nos pontos $y=0$; 10 mm; 20 mm; 30 mm (Vieira *et al.*,2005).

O campo de temperatura na placa pode ser ilustrado na forma de linhas isotermas, para diferentes instantes de tempo. A Figura 2.6 mostra a evolução deste campo de temperatura.

O efeito da variação das propriedades do material com a temperatura na simulação da soldagem foi estudado por Zhu e Chao (2002) em termos do campo de temperatura transiente, tensões residuais e distorções. Três ajustes para os valores das propriedades do material foram testados computacionalmente: valores em função da temperatura, valores constantes e iguais aos correspondentes na temperatura ambiente e valores constantes e iguais às médias na faixa de temperatura alcançada. Os autores concluíram que, com exceção da tensão de escoamento, o uso de propriedades de material constantes na temperatura ambiente gera resultados razoáveis para os campos de temperatura transiente, tensões residuais e distorções.

Em uma segunda fase de seu trabalho Vieira *et al* (2006), realizaram a caracterização numérica do campo de tensões residuais devidas às respostas térmicas de seu trabalho citado anteriormente. A mesma malha da análise térmica foi utilizada porém com o uso de elementos

com possibilidade de deslocamento nas direções X, Y e Z. O campo de tensões residuais na direção longitudinal (σ_x) está ilustrado na Figura 2.7 em um gráfico de isovalores, onde é confirmada a ocorrência de tensões de tração elevadas na direção longitudinal próximo ao cordão de solda.

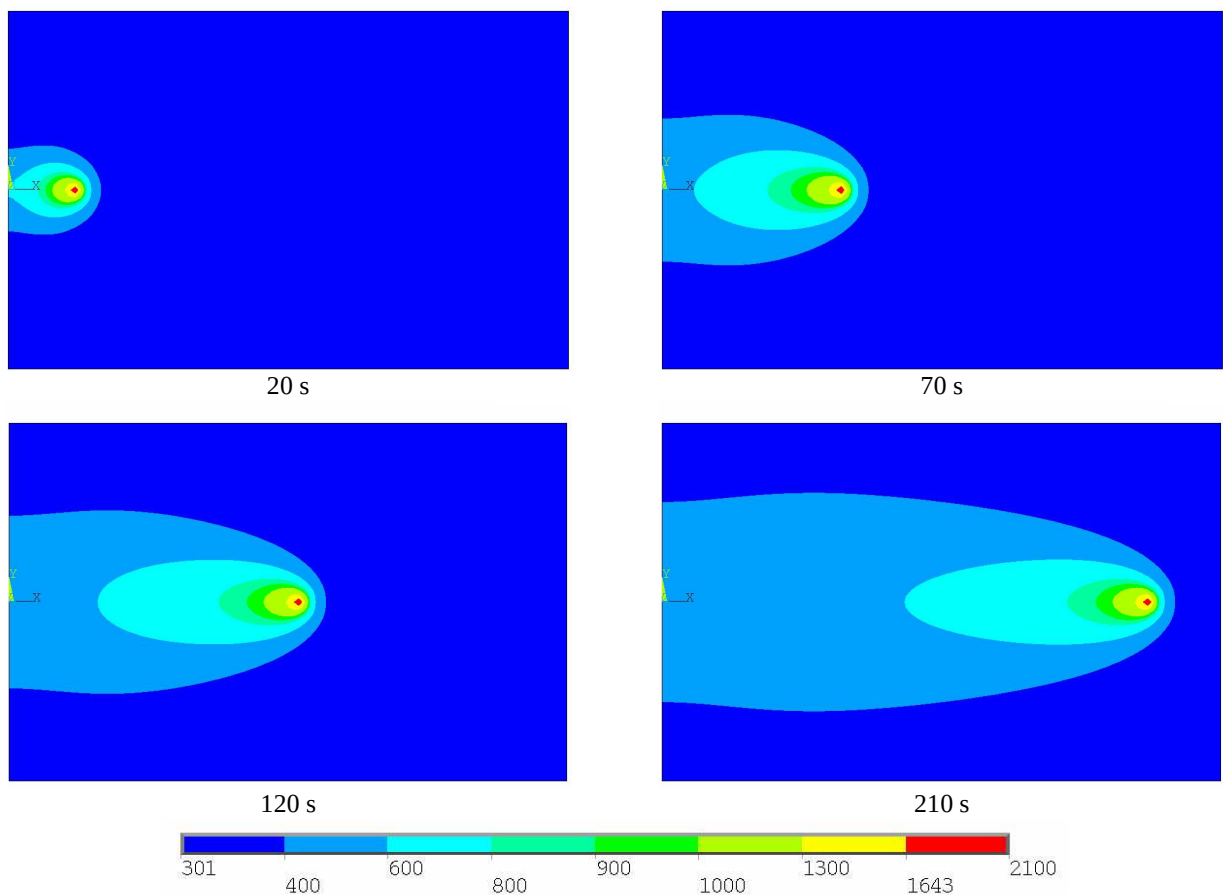


Figura 2.6 – Campos de temperatura na placa modelada em diferentes tempos (Vieira *et al.*, 2005).

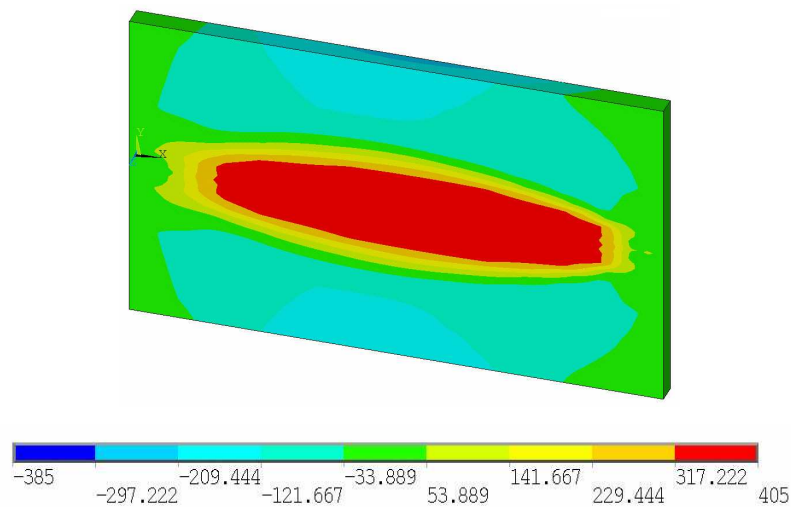


Figura 2.7 – Campo de tensões residuais (em MPa) na direção longitudinal (Vieira *et al.*, 2006).

A Figura 2.8 mostra os resultados numéricos e experimentais que descrevem a evolução dos deslocamentos perpendiculares ao plano da placa em função da temperatura para 3 pontos na parte superior da placa à esquerda da figura e 3 pontos na parte inferior da placa à direita da figura. É possível verificar uma boa concordância entre os resultados tanto durante a soldagem (até 230 s) quanto durante o resfriamento.

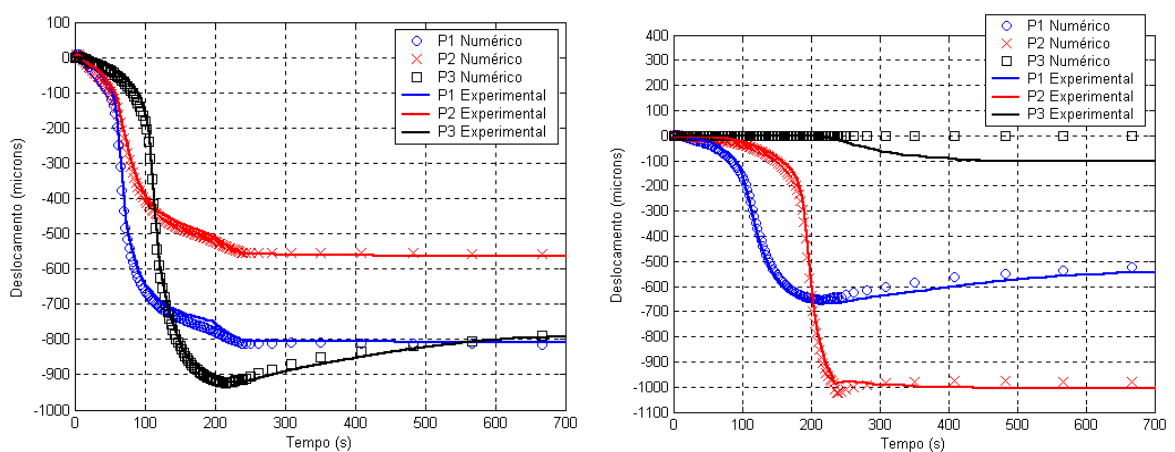


Figura 2.8 – Evolução dos deslocamentos em função do tempo na parte superior e inferior da placa nos pontos P1 a P3 (Vieira *et al.*, 2006).

Uma confrontação entre os resultados numéricos e experimentais de tensões na face inferior na seção $x=150$ mm é apresentada na Figura 2.9. Pode ser visto que, para as tensões na direção longitudinal existe uma boa concordância entre os resultados apenas para pontos afastados de mais de 20 mm do eixo x . Isto pode ser explicado pelo fato de a técnica experimental usada ser a de difração de raios-X, a qual, de acordo com Cullity (1978), não indica uma tensão verdadeira em pontos onde deformação plástica tenha ocorrido, o que é o caso da região próxima ao cordão de solda.

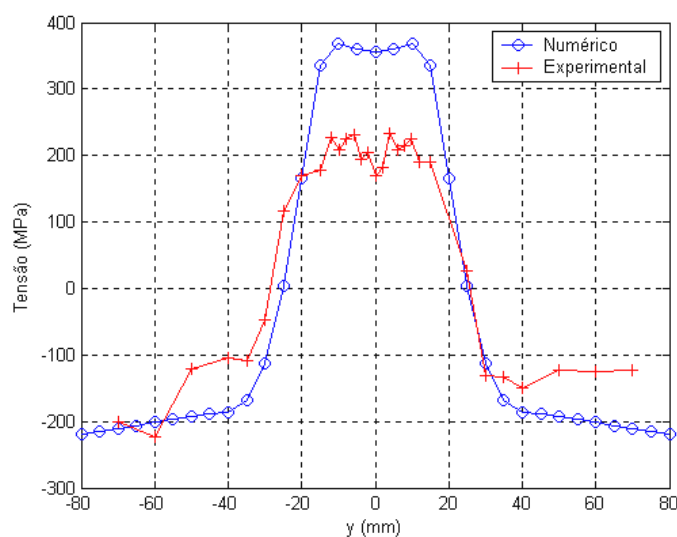


Figura 2.9 – Tensões residuais na face inferior na direção longitudinal na seção $x=150$ mm (Vieira *et al.*, 2006).

Uma das maiores dificuldades encontradas na simulação de soldagem é a deposição de material. Em seu trabalho Iwaki (1971), citado por Masubuchi (1980), desenvolveu um programa em elementos finitos para análise da deposição simples de cordão em uma chapa. Em seguida Muraki e Toshioka (1971), citados por Masubuchi (1980), desenvolveram o programa inicial de Iwaki para possibilitar análises de soldas de topo introduzindo uma característica mais prática ao programa. Os autores incluíram os efeitos das transformações metalúrgicas no programa inicialmente desenvolvido por Iwaki. Basicamente eles utilizaram os diagramas CCT (continuous cooling transformation) juntamente com os resultados da análise térmica transiente para a determinação das propriedades do material juntamente com as deformações decorrentes das mudanças de fase.

A simulação de soldagem com deposição de material foi estudada também por Rodeiro (2002) visando obter a distribuição de temperatura e tensões residuais geradas na soldagem do tipo *ring-weld*. Um modelo tridimensional em elementos finitos foi gerado no software Ansys®. Para a simulação do material de deposição foi utilizada uma ferramenta do software chamada *birth and death elements* que permite a ativação e desativação dos elementos. Os resultados térmicos foram comprovados através do uso de termopares enquanto que os resultados estruturais não foram comprovados experimentalmente, sendo apenas comparados com os resultados analíticos de Masubuchi (1980).

O uso de técnicas experimentais em conjunto com técnicas numéricas para a validação de softwares têm sido fortemente empregadas nas simulações de soldagem, como no estudo de Depradeux (2004) que realizou simulações numéricas de soldagem utilizando o código de cálculo Code_Aster®. O processo de soldagem adotado foi o TIG em uma placa de aço inoxidável austenítico AISI 316L. Um aparato experimental incluindo termopares e extensômetros foi construído a fim de validar os resultados numéricos. Foram gerados diferentes modelos: tridimensional completo, bidimensional da seção transversal e bidimensional do plano médio da placa.

A soldagem TIG, com adição de material, em um aço inoxidável austenítico também foi estudada por Blom e Church (2003). A soldagem multipasse foi utilizada e modelada em elementos finitos. O campo de temperatura experimental foi obtido com o uso de termopares para comparação e validação do modelo numérico.

A soldagem multipasse foi utilizada também por Barsoum (2007) que considerou como satisfatórios os resultados que obteve em seu estudo de tensões residuais e fadiga em estruturas tubulares. Um modelo bidimensional axisimétrico de elementos finitos foi desenvolvido para o cálculo da distribuição de temperatura, da ZAC (Zona Afetada pelo Calor), penetração máxima e distribuição da tensão residual. Experimentalmente as tensões residuais foram obtidas através da técnica de difração de raio-x e o método de elementos finitos utilizado para o cálculo da tensão foi comparado com o de Free e Goff (1989). Estes por sua vez também realizaram um estudo da previsão de tensões residuais de soldagem multipasse com o uso da técnica de elementos finitos. Em sua análise não foram consideradas as transformações de fase do material e a variação da tensão de escoamento com a temperatura ocorreu de forma bem simplificada. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios pelos autores. A soldagem multipasse foi utilizada ainda por Ramsay e Maunder (2006) que utilizou elementos

finitos para a simulação da soldagem em estrutura de navios, um modelo tridimensional foi gerado, porém os resultados se mostraram imperfeitos quando comparados com a literatura.

Procedimentos de modelagem bidimensionais foram realizados por Hong *et al.* (1998) para previsão de tensões residuais de soldas multipasse. Foi gerado um modelo de deformação plana generalizada, com uma solda de cinco passes numa placa, e um modelo axissimétrico com uma solda circunferencial de seis passes num tubo. Nos dois casos, os resultados foram comparados com dados experimentais. Os autores consideraram as variações das propriedades termomecânicas com a temperatura, além de um encruamento até um máximo de 20 % da tensão de escoamento. Os efeitos da magnitude da entrada de calor e temperatura inicial sobre as tensões residuais também foram analisados e se mostraram pouco influentes.

Dois processos de soldagem foram modelados por Roberts *et al.* (2000), a soldagem por feixe de elétrons e a soldagem TIG (Tungsten Inert Gás). O método dos elementos finitos foi utilizado para criar um modelo para a soldagem de uma superliga a base de níquel, comum em alguns componentes de motores de aeronaves. Os autores consideraram os resultados térmicos excelentes quando comparados com medições através de termopares. Para a validação do campo de tensões residuais os autores utilizaram difração de raio-x, difração de nêutrons e a técnica do furo cego obtendo bons resultados.

A técnica do furo cego também foi utilizada por Smith *et al.* (2000) para a medição das tensões residuais de soldagem, e ainda uma simulação da soldagem utilizando o software Abaqus® foi realizada obtendo a medição e previsão de tensões residuais na soldagem multipasse em componentes espessos de aço inoxidável. Os resultados medidos e simulados foram comparados e se mostraram bem próximos.

As distorções provocadas pela soldagem foram estudadas por Michaleris e DeBiccari (1997) que realizaram uma análise térmica para a sua determinação. Duas análises foram realizadas sendo uma bidimensional e uma tridimensional. Para a análise bidimensional foram obtidos bons resultados quando comparados ao da literatura, para a análise tridimensional os resultados não se mostraram eficientes.

O alívio de tensões através de tratamentos térmicos foi estudado por Cho *et al.* (2004) os quais investigaram as tensões residuais após a soldagem e após um tratamento térmico pós-soldagem utilizando o método dos elementos finitos. Foi realizada uma análise bidimensional térmica seguida de uma análise mecânica com o programa Ansys®. Os resultados numéricos de tensões residuais numa solda multipasse foram comparados a resultados experimentais de tensão residual superficial usando a técnica do furo cego.

Um estudo mais geral foi realizado por Fricke *et al.* (2001) os quais desenvolveram um programa de elementos finitos, baseado no código comercial Abaqus®, para a simulação de soldagem. Segundo os autores, este programa pode ser utilizado para melhorar o processo de soldagem, fornecer informação sobre a possibilidade de sensitização da zona afetada pelo calor, avaliar efeito da folga nas tensões residuais resultantes, dentre outras características. Os autores realizaram uma simulação de soldagem circunferencial de um tubo de aço inoxidável austenítico.

A escolha da malha a ser utilizada na simulação é um passo importante durante uma modelagem. Uma malha mais refinada implica em resultados mais robustos, porém quanto maior o número de elementos maior será o número de graus de liberdade do modelo e conseqüentemente maior será o custo computacional para a solução, havendo assim a necessidade de uma ponderação durante a escolha da malha. Neste sentido alguns autores optam por modelos simplificados como no caso de Wang *et al.* (2007) que realizaram uma análise em elementos finitos da soldagem de viga em coluna de liga de alumínio. Um modelo shell, anisotrópico e não homogêneo foi utilizado e os resultados comparados aos da literatura. Uma análise experimental também foi realizada e a zona afeta pelo calor foi comparada. Os autores concluíram que os resultados são fortemente dependentes da malha.

A transformação de fase de um material dificilmente vem sendo levada em consideração nas análises de simulação de soldagem devido à complexidade de sua modelagem e da dificuldade de se obter as propriedades termofísicas dos materiais variando com a temperatura para cada fase do material. Ainda assim Papazoglou e Masubuchi (1982) descrevem uma técnica para analisar temperaturas, tensões térmicas e tensões residuais que ocorrem na soldagem utilizando o método dos elementos finitos. Foi incluído na análise o efeito das transformações de fase que ocorrem durante o processo. Os autores verificaram a grande importância da transformação de fase no resultado, principalmente quando se trata da soldagem de aços temperados e revenidos.

Um software que trabalha com o método dos elementos finitos tem chamado bastante a atenção de especialistas em simulação de soldagem, o Sysweld®, que permite levar em consideração a transformação de fase dos materiais, trabalhar com geometrias bastante complexas sendo dedicado à predição de tensões residuais e distorções provocadas pela soldagem.

2.4 O Sysweld®

O Sysweld® é um software dedicado à previsão de tensões residuais de soldagem e distorções. Sobretudo, ele leva em consideração as transformações metalúrgicas durante a soldagem e sua influência sobre o comportamento mecânico da estrutura. Novas capacidades foram recentemente adicionadas como o acoplamento de elementos de volume com elementos shell possibilitando a modelagem de estruturas mais complexas, o movimento automático do refino de malha na sequência da soldagem diminuindo assim o custo computacional. Além disso, a simulação de soldagem de alumínio foi reforçada com novos modelos metalúrgicos dedicados às ligas de alumínio. A arquitetura geral do Sysweld® é apresentada na Figura 2.10.

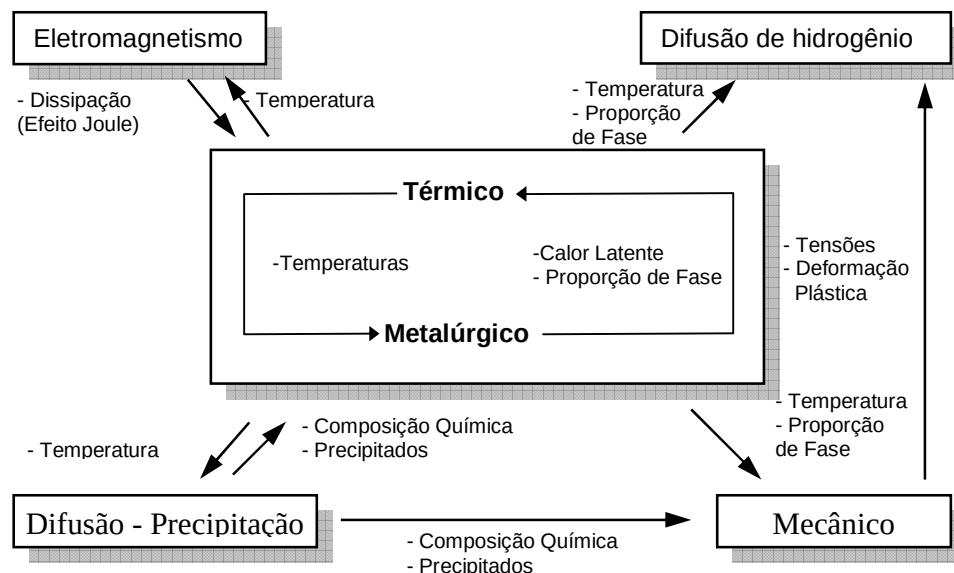


Figura 2.10 – Arquitetura geral do Sysweld® (Manual de Referência, 2006).

O programa Sysweld® foi utilizado por Mochizuki et al. (2005) para estudar a geração de tensões residuais durante a soldagem e sua relação com as transformações de fase. Na modelagem foram utilizados elementos isoparamétricos axisimétricos de quatro nós. Para comparação foi utilizado um simulador experimental de ciclos térmicos de soldagem. As transformações de fase e a taxa de resfriamento influenciaram de forma expressiva a geração de tensões residuais segundo os autores.

A indústria automotiva vem realizando parcerias com instituições de ensino e pesquisa visando encontrar melhorias em seus produtos através do uso de simulações de soldagem. É o

caso de Brand e Siegele (2007) que realizaram um estudo numérico e experimental de distorções e tensões residuais em um aço bifásico utilizado na indústria automotiva. Uma solda a laser foi realizada para a validação da simulação com elementos finitos. A evolução da temperatura foi obtida através do uso de termopares e os deslocamentos através do uso de transdutores de posição. O processo de soldagem foi simulado utilizando o programa Sysweld® e foram consideradas as transformações de fase do material. A medição da temperatura para alguns pontos é mostrada na Figura 2.11, enquanto que a comparação entre a macrografia obtida pode ser visualizada na Figura 2.12. Em ambas figuras, é possível notar uma boa correlação entre os resultados obtidos.

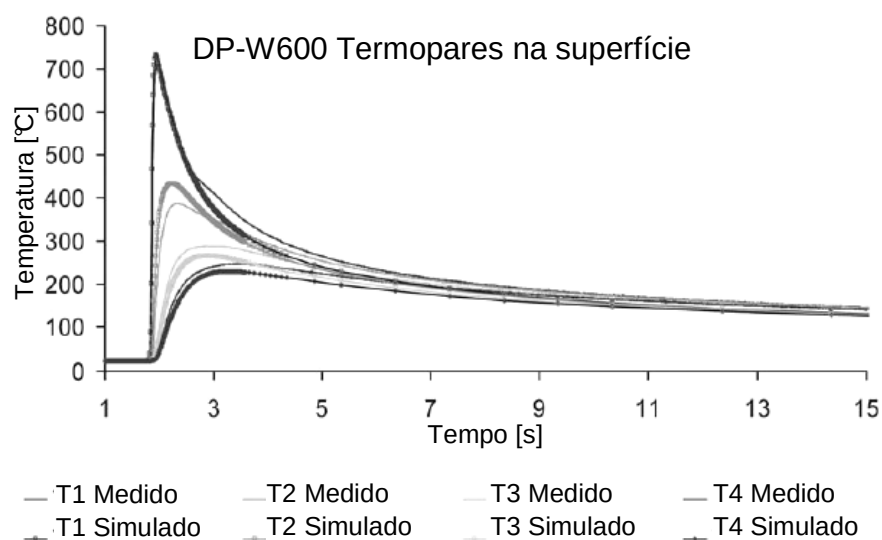


Figura 2.11 – Temperaturas obtidas experimentalmente e calculadas (Brand e Siegele, 2007).

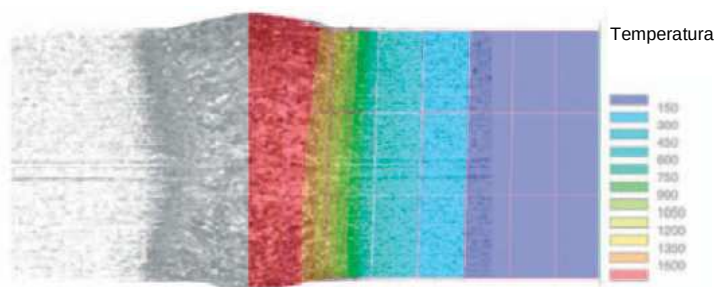


Figura 2.12 – Comparação da macrografia experimental e simulada (Brand e Siegele, 2007).

Os resultados estruturais obtidos por Brand e Siegele (2007) mostraram uma boa correlação na direção longitudinal da placa enquanto que na direção transversal um desvio maior foi notado.

O processo de soldagem a laser também foi objeto de estudo de Tsirkas *et al.* (2002) que desenvolveram um modelo tridimensional em elementos finitos para prever as distorções inerentes a esse tipo de processo. Os cálculos foram realizados através do software Sysweld®, levando-se em conta os aspectos térmicos, metalúrgicos e mecânicos. A simulação do processo de soldagem a laser foi desenvolvida segundo uma análise de transferência de calor não linear, baseado no método keyhole, a acoplada a uma análise termo-mecânica transiente. Para a análise foram consideradas as transformações metalúrgicas, utilizando as propriedades dos materiais variando com a temperatura e a curva CCT. Para validação de seu trabalho dois transdutores foram utilizados para a medição dos deslocamentos na superfície inferior da peça. A comparação dos resultados pode ser visualizada através da Tabela 2.1, onde um desvio máximo de 13% é mostrado em relação à medição de deslocamento com uso de LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*).

Tabela 2.1 – Comparação dos deslocamentos experimentais e simulados (adaptado de Tsirka *et al.*, 2002).

Caso	Deslocamento [mm]		Desvio (%)
	Modelo	Média Experimental	
1A	1475	1697	13,1
1B	429	384	10,5
2A	336	318	5,4
2B	197	178	9,6
3A	3113	3282	5,2
3B	377	366	2,9

Um estudo de dois tipos de juntas foi realizado por Francis (2002). Ele utilizou o método dos elementos finitos para simulação da soldagem em juntas de topo e em “T” usando o software Sysweld®. Primeiramente foram realizadas as análises térmicas para que em seguida fossem realizadas as análises mecânicas com base no histórico térmico. O autor obteve resultado satisfatório apenas para a junta de topo onde em sua análise 3D quase-estacionária os resultados apresentaram um desvio de 3,6 %, enquanto que para uma análise transiente completa o desvio foi de 13 %. Para a junta em “T”, os resultados da análise quase-estacionária apresentaram tensão residual longitudinal de compressão para o primeiro passe e de tração para o segundo passe. Para investigar esta discrepância uma análise transiente completa foi

tentada, porém não foi obtido sucesso nesta análise devido aos grandes tempos de cálculo. Um modelo solid-shell foi gerado para este caso, mas a análise mecânica não convergiu.

As distorções angulares provocadas pela soldagem de filete em juntas do tipo “T” foram estudadas por Mikami *et al.* (2007) realizando uma análise numérica. Para a análise numérica o software Sysweld® foi utilizado e as transformações de fase foram consideradas. Os resultados obtidos foram comparados entre si e se mostraram precisos.

Uma técnica bastante interessante para a redução do custo computacional de uma simulação de soldagem é o uso da técnica da malha adaptativa utilizada por Lindgren *et al.* (1997). Os autores verificaram que esta técnica se mostrou eficiente, reduzindo em 60% o tempo computacional sem nenhuma perda em precisão dos resultados. Lindgren e Josefson (2000) utilizaram métodos simplificados através do software Sysweld® para a simulação de tensões residuais de soldagem e distorções obtendo bons resultados.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

3.1 – Avaliações preliminares

Uma vez que este projeto visa a criação de uma metodologia para simulação da soldagem de um componente automotivo através do software Sysweld®, o primeiro passo é a definição de qual componente utilizar e estratégias de modelagem. Nesta metodologia deve-se conter desde a execução dos desenhos, passando por execução e importação das malhas, softwares utilizados durante o processo, até a simulação final com resultados e tratamento de dados.

Desta forma, objetivou-se simular todas as soldas de uma parte do eixo traseiro de um veículo nacional do tipo *hatch*, direcionando-se os esforços na obtenção dos campos de temperatura em função do tempo, deslocamentos/deformações, tensões e microestrutura final do material soldado para comparação com resultados experimentais.

3.1.1 - Descrição

O primeiro passo foi escolher a partir de qual componente automotivo seria realizada a simulação. Este componente foi escolhido pela empresa parceira que fabrica o mesmo e visava um melhor conhecimento do produto fabricado objetivando possíveis melhorias no componente. Definido o componente, realizou-se um levantamento acerca do processo de soldagem utilizado e suas variáveis, tomando-se nota dos parâmetros utilizados: voltagem, corrente, velocidade de soldagem, tempo de soldagem, comprimento do cordão de solda, ângulo da tocha e intervalos entre uma solda e outra.

Outro fator a ser definido diz respeito aos materiais utilizados, devem ser descritas as porcentagens de cada componente de maneira a se obter no banco de dados do Sysweld® o material que mais se aproxime daqueles utilizados.

Inicialmente foi realizada uma visita a uma empresa do setor automobilístico para observação do processo de fabricação de um eixo traseiro (Figura 3.1) de veículo nacional de passeio do tipo *hatch*. Neste eixo são realizadas em torno de 66 soldas. Como a modelagem de todo o componente é de grande complexidade, viu-se a necessidade de efetuar a simulação numérica de uma peça menor. Assim, durante a visita foi possível selecionar um componente (detalhe da Figura 3.1) fabricado de modo independente, mas pertencente ao conjunto do eixo traseiro. Neste componente são realizadas 5 soldas sendo uma delas dividida em duas partes, estas soldas foram denominadas como: solda 3A e 3B, solda 5, solda 7, solda 21 e solda 23. Estes nomes foram escolhidos de acordo com nomes adotados pela empresa durante seu o processo de fabricação do componente. Na Figura 3.2 é possível observar os cordões de solda nas fotos e ainda o modelo CAD representante para estas soldas.



Figura 3.1 – Eixo traseiro mostrando o componente selecionado.

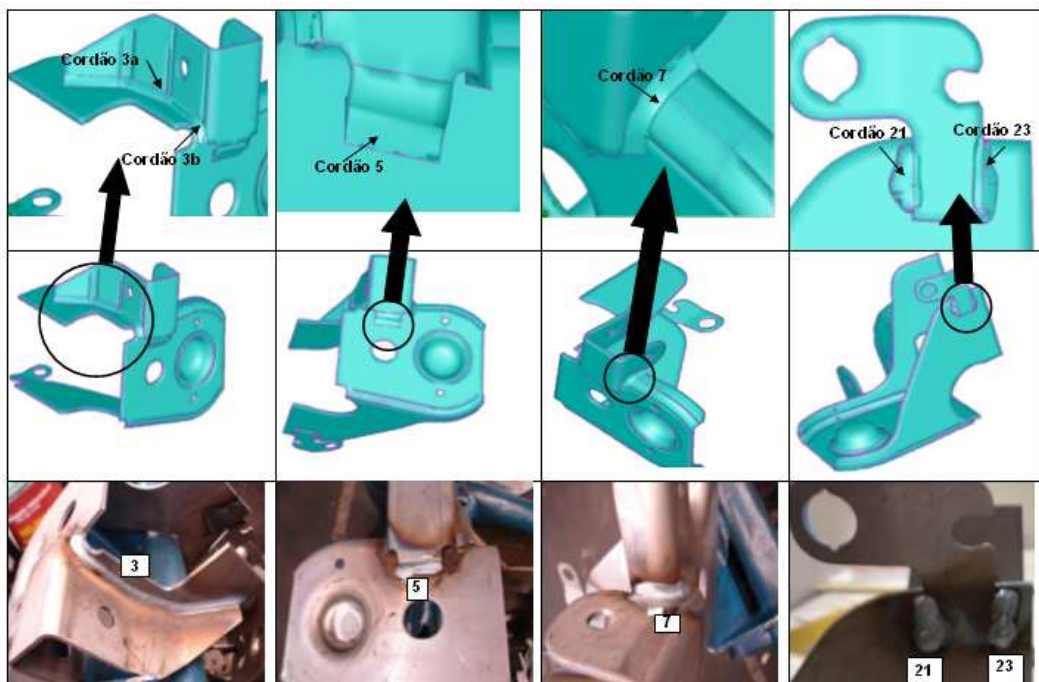


Figura 3.2 – Detalhes das posições das soldas.

3.1.2 – Levantamento de dados

Após definir o componente a ser modelado, uma verificação do processo de soldagem foi realizada. Para o componente escolhido utiliza-se o processo de soldagem MAG automatizado por dois robôs. Alguns parâmetros de soldagem utilizados os quais servem de entrada para o modelo numérico foram adquiridos, tais como: velocidade de soldagem, tensão, corrente e comprimento de cordão. Esta tarefa ficou a cargo da empresa e estes parâmetros podem ser observados através da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem do componente.

	Vel. soldagem (mm/s)	Tensão (V)	Corrente (A)	Comprimento do cordão (mm)
Solda 3a	9,8	24,2	244	120
Solda 3b	11,7	24,2	244	30
Solda 5	7,5	21,2	228	30
Solda 7	10,4	26,8	286	35
Solda 21	8,0	21,2	228	20
Solda 23	7,1	21,2	228	20

Um levantamento de todos os materiais utilizados e composição química de cada um também foram fornecidos para que, através de comparação com os materiais presentes na biblioteca de materiais do Sysweld®, se utilizasse os materiais mais próximos àqueles utilizados pela empresa. Ressalta-se que a obtenção de todas as propriedades reais destes materiais para cada fase seria uma tarefa muito complicada e dispendiosa, não sendo objeto desta dissertação. A Tabela 3.2 mostra o comprimento de cada solda bem como o nome do material de cada peça a ser soldada, pode-se observar ainda a espessura da peça soldada e seu respectivo nome. Já a Tabela 3.3 ilustra a composição química dos materiais utilizados em porcentagem.

Tabela 3.2 – Comprimento, espessura e material de cada solda.

Cordão de Solda	Nome Peça 1	Espessura	Material	Comprimento do cordão [mm]	Nome Peça 2	Espessura	Material
3	Assento de Mola	3,5 mm	QStE340	150	Suporte Amortecedor	3 mm	QStE340
5	Assento de Mola	3,5 mm	QStE340	30	Suporte Amortecedor	3 mm	QStE340
7	Assento de Mola	3,5 mm	QStE340	35	Suporte Amortecedor	3 mm	QStE340
21	Suporte Cabo ABS	2 mm	NBR5906 EPA	20	Assento de Mola	2,5 mm	QStE340
23	Suporte Cabo ABS	2 mm	NBR5906 EPA	20	Assento de Mola	2,5 mm	QStE340

Tabela 3.3 – Composição química dos materiais utilizados em porcentagem.

Material	Material Equivalente	C (%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Al(%)	Si(%)	Nb(%)	Ti(%)	N (%)	V(%)
SAE 1010 / 1015	C10, 1.0301	0,1	0,45	0,045	0,045	-	0,25	-	-		-
DIN EN 10305-3 + N	E355+N	0,22	1,6	0,025	0,025	-	0,55	-	-	-	-
LNE 420	S420MC	<0,12	<1,6	<0,025	<0,015	<0,015	<0,5				<0,2
St37.2NBK (SAE 1020)	S 235 JR	0,17	1,4	0,03	0,03	-	-	-	-	0,012	-
LNE 340	QStE340/ S340MC	0,12	1,3	0,025	0,02	0,015	0,5	-	0,15		-
NBR 5906 EPA	DD12 ou DD13	0,08	0,5	0,03	0,03	0,02	-	-	-	-	-
LNE 380	S355MC	<0,12	<1,5	<0,025	<0,02	<0,015	<0,5	<0,09	0,15		0,2

3.1.3 Execução dos Desenhos

Os desenhos das peças do componente foram criados no software Catia® e representam o modelo real com bastante cuidado em relação às formas e dimensões das peças. É importante que cada peça seja criada em separado para que ao exportá-lo para o software que fará a malha, tenha-se uma maior autonomia para criação da mesma. Como o Sysweld® é um software que necessita de uma calibração, pois não gera automaticamente os cordões de solda, necessita-se também do desenho dos cordões de solda para a

geração das malhas no mesmo. Estes também devem ser criados em separado, mas sempre obedecendo às coordenadas onde estariam caso o desenho estivesse sendo feito todo em conjunto. Este cuidado deve ser tomado para que posteriormente ao agrupar os desenhos todos estejam na posição correta.

Os desenhos devem ser exportados no formato IGS ou IGES para que possam ser importados pelo software Visual Mesh® onde será gerada a malha. Este software também faz parte do pacote do Sysweld®.

3.1.4 Obtenção das Macrografias

De posse dos parâmetros de soldagem, foi escolhido aleatoriamente um componente soldado e retirada dele macrografias completas das soldas, e medição da perna, altura profundidade, largura, e penetração das mesmas, como mostrado nas Tabelas 3.4 a 3.7. A Tabela 3.4 trás ainda uma identificação de cores que relacionam a nomenclatura utilizada com a medição na peça.

Tabela 3.4 – Macrografias para o cordão 3.

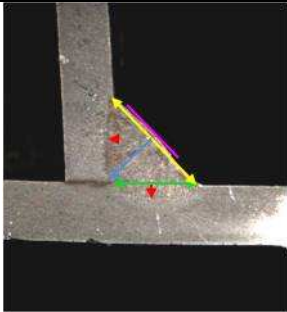
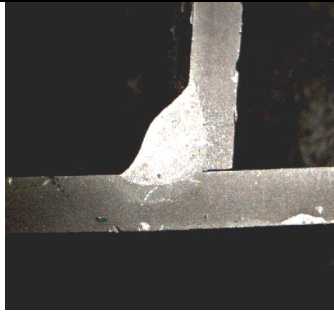
					
Cordão 3a	penetração	perna	Cordão 3b	penetração	perna
Assento Mola	1,07	5,67	Assento Mola	0,82	5,01
Suporte Amortecedor	2,1	4,84	Suporte Amortecedor	1,23	5,64
largura	6,50		largura	7,76	
profundidade	4,16		profundidade	4,15	
Altura	0,26		Altura	0,33	

Tabela 3.5 – Macrografias para o cordão 5.

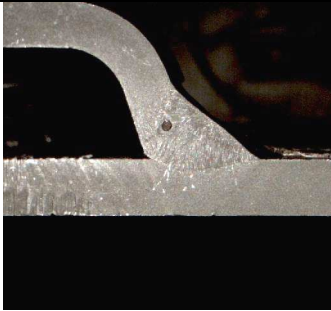
					
Cordão 5a	penetração	perna	Cordão 5b	penetração	perna
Assento Mola	0,86	5,67	Assento Mola	0,82	7,25
Suporte Amortecedor	3,07	4,84	Suporte Amortecedor	3,42	3,21
largura	5,96		largura	8,49	
profundidade	3,66		profundidade	5,2	
Altura	0,14		Altura	1,08	

Tabela 3.6 – Macrografias para o cordão 7.

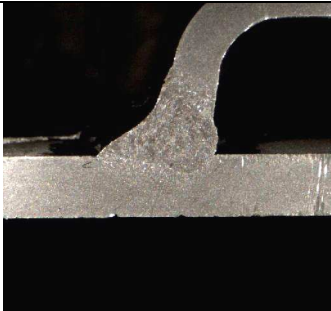
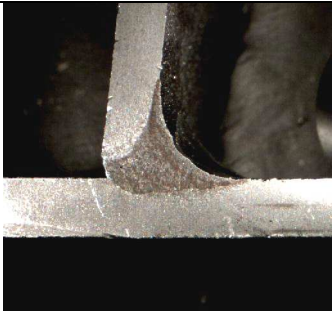
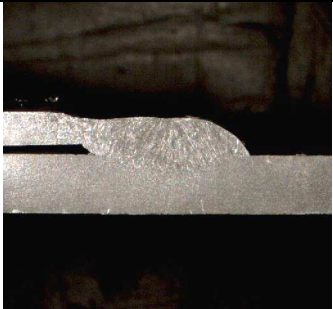
					
Cordão 7a	penetração	perna	Cordão 7b	penetração	perna
Assento Mola	1,23	7,42	Assento Mola	1,15	8,77
Suporte Amortecedor	3,36	2,94	Suporte Amortecedor	1,52	6,37
largura	7,66		largura	8,40	
profundidade	5,8		profundidade	6,81	
Altura	0,81		Altura	2,15	

Tabela 3.7 – Macrografias para o cordão 21 e 23.

		
Cordão 21	penetração	perna
Assento Mola		
Suporte Amortecedor	1,8	9,47
largura	12,2	
profundidade	2,19	
Altura	1,59	

		
Cordão 23	penetração	perna
Assento Mola		
Suporte Amortecedor	1,07	5,2
largura	7,47	
profundidade	1,71	
Altura	1,07	

3.1.5 Importação do Modelo

Para importar os desenhos das peças e dos cordões de solda com o auxílio do software Visual Mesh[®] basta abrir os arquivos .igs/iges gerados no Catia[®].

A importação do desenho completo está mostrada na Figura 3.3. Entretanto, para o Sysweld[®] foi necessária a criação de desenhos nos quais também representassem os cordões de solda, como pode ser observado na Figura 3.4.

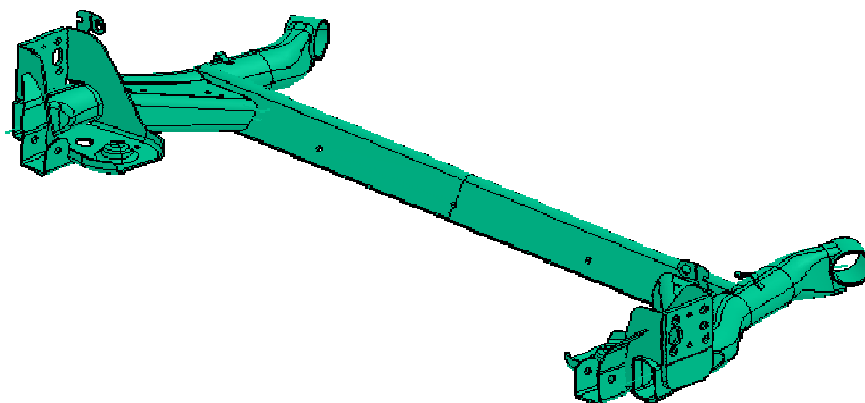


Figura 3.3 – Desenho completo do conjunto traseiro.

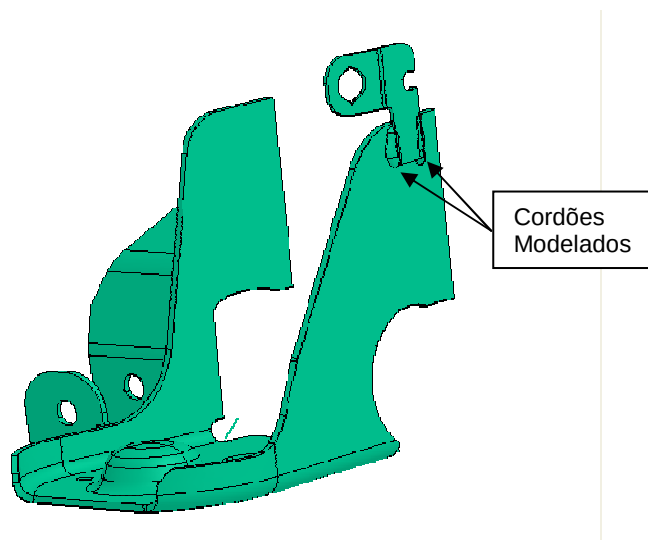


Figura 3.4 – Desenho do componente a ser simulado e os cordões existentes.

3.1.6 Importação das Malhas

Após o ajuste das macrografias e importação do desenho o passo seguinte foi trabalhar na importação da malha para em seguida criar no Visual Mesh® todos os grupos necessários para que o Sysweld® consiga resolver as soldas.

Uma malha com elementos solid-shell foi fornecida e está ilustrada na Figura 3.5.

Esta malha foi importada para o Visual Mesh® e os grupos necessários foram criados. No entanto ao importar para o Sysweld® houve dificuldade em importar alguns grupos criados, e principalmente em reconhecer os elementos Shell criados. Portanto, depois de algumas tentativas, uma nova malha foi gerada assim como também o desenho com os cordões para que, paralelamente, fosse possível criar aqui uma malha no Visual Mesh®.

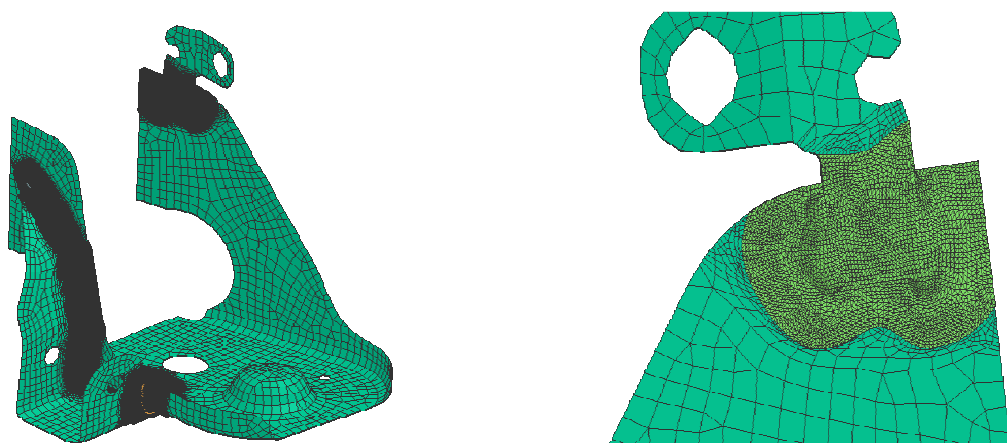


Figura 3.5 – Malha Shell-Solid criada inicialmente.

Nesta nova tentativa uma malha com elementos 3D foi fornecida e os mesmos grupos criados, esta nova malha estava bastante refinada com mais de 1,8 milhões de elementos e pode ser vista na Figura 3.6.

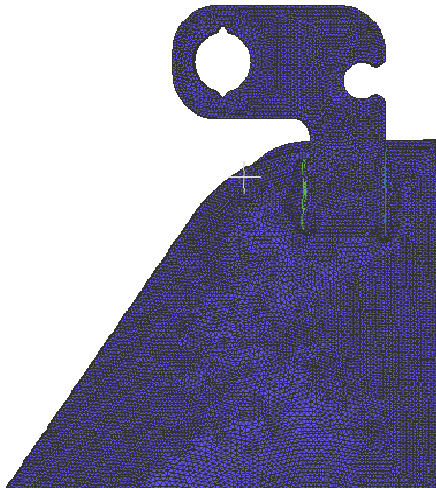


Figura 3.6 – Detalhe da Malha Solid com 1,8 milhões de elementos.

Como a malha estava bastante refinada o Sysweld[®] não conseguiu importar perfeitamente todos os elementos e grupos criados, mais uma vez várias tentativas foram feitas com a intenção de simplificar o modelo e ainda aproveitar a parte refinada da região a ser soldada, porém não se teve sucesso nesta etapa.

3.1.7 Geração das Malhas no Visual Mesh[®]

O processo foi reiniciado do zero e uma malha Shell foi gerada no programa Visual Mesh[®] com a intenção de rodar toda a simulação com elementos Shell. A Figura 3.7 mostra a malha Shell gerada e ainda um exemplo da árvore de grupos do programa. Para gerar esta malha basta utilizar o comando 2D *layer* do Visual Mesh[®] e ele realiza a malha na superfície escolhida onde você entra com o número de elementos em cada linha desta superfície.

Neste caso houve um erro ao importar os elementos de Shell que seriam usados na simulação da convecção e radiação e ao realizar a simulação da solda, a peça aqueceu muito e não resfriou adequadamente devido a falta destes elementos.

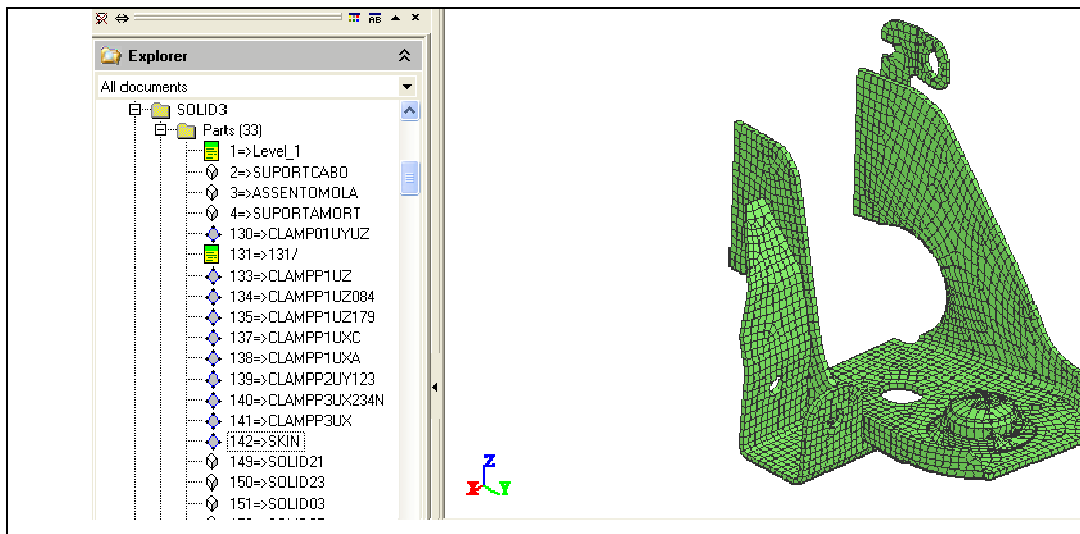


Figura 3.7 – Malha Shell com elementos 2D.

Na tentativa de resolver este problema foi criado um novo modelo agora solid-3D e foram criados elementos de superfície para gerar efeito de convecção e radiação.

A malha pode ser criada de duas maneiras, através do método *Grow* e do método *Map*. Através do método *grow* você deve escolher uma superfície, o tamanho e a espessura do elemento assim como o numero de linhas na espessura do elemento. Para o método *map* escolhe-se a superfície superior e inferior e a trajetória pela qual seguirá a criação dos elementos, escolhe-se também o tamanho do elemento e o numero de linhas na espessura.

A malha pode ser gerada peça a peça e depois todos os componentes podem ser agrupados para a geração dos demais grupos necessários ou pode ser ainda criada a malha no conjunto como um todo, tomando-se o cuidado de um elemento de uma peça não ultrapassar as dimensões da mesma e coincidir com elementos de outra peça.

É necessário ainda que se criem os elementos 2D que serão responsáveis pela troca de calor com o meio, para isso basta selecionar todos elementos 3D e pedir para que se criem elementos SKIN.

Após a geração da malha, deve-se criar grupos necessários para que o Sysweld® realize a solda. Para cada solda cria-se um grupo de elementos chamado *weldline* que será a linha pela qual irá passar a fonte de calor, tomando-se o cuidado de que a mesma tenha o comprimento da solda. A *weldline* deve ser criada em elementos 1D e sobre uma curva que pode ser gerada anteriormente através do comando *curve/sketch* que cria linha entre alguns pontos que você escolhe.

A malha 3D das três peças geradas no Visual Mesh® pode ser observada na Figura 3.8 em cores deferentes.

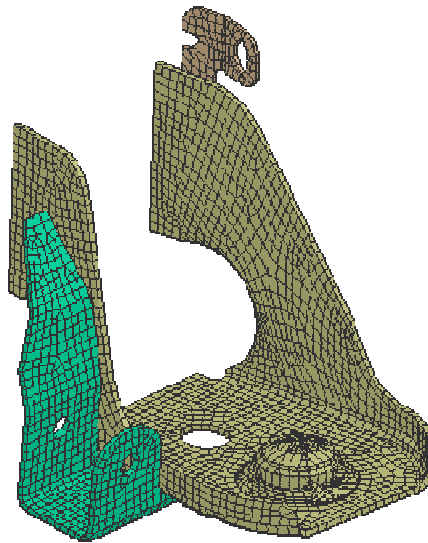


Figura 3.8 – Malha solida com elementos 3D.

3.1.8 Criação do Sistema de Fixação

O sistema de fixação pode também ser criado no Visual Mesh[®], pois este permite maior mobilidade com o desenho. Para cada ponto de fixação deve-se criar um grupo de elementos nos quais as restrições de deslocamento ou força aplicada sejam colocadas posteriormente no Sysweld[®]. Para criar estes grupos, basta ir em 3D e escolher a opção “node” que irá criar elementos a partir de nós seleccionados.

Com todos os grupos criados deve-se então exportar o arquivo no formato .pc, pois nesta extensão o Sysweld[®] consegue ler todos os grupos separadamente.

Para o sistema de fixação foram criados grupos de elementos de forma a se aproximarem dos pontos de fixação reais. Para a etapa posterior do trabalho, estes grupos poderão ser melhorados, mas devido ao interesse imediato, isto não será feito agora.

Na Figura 3.9 os desenhos da esquerda são os pontos de fixação e os desenhos da direita (em vermelho) são os criados no Visual Mesh[®].

3.1.9 Importação para o Sysweld[®]

Para a importação para o Sysweld[®] deve-se, ao abri-lo, certificar-se de que ele está no modo solver, e em seguida em “load” abrir arquivos .pc. Dependendo do tamanho do arquivo pode levar algum tempo. Ao encerrar a importação deve-se verificar se todos os grupos criados estão corretos.

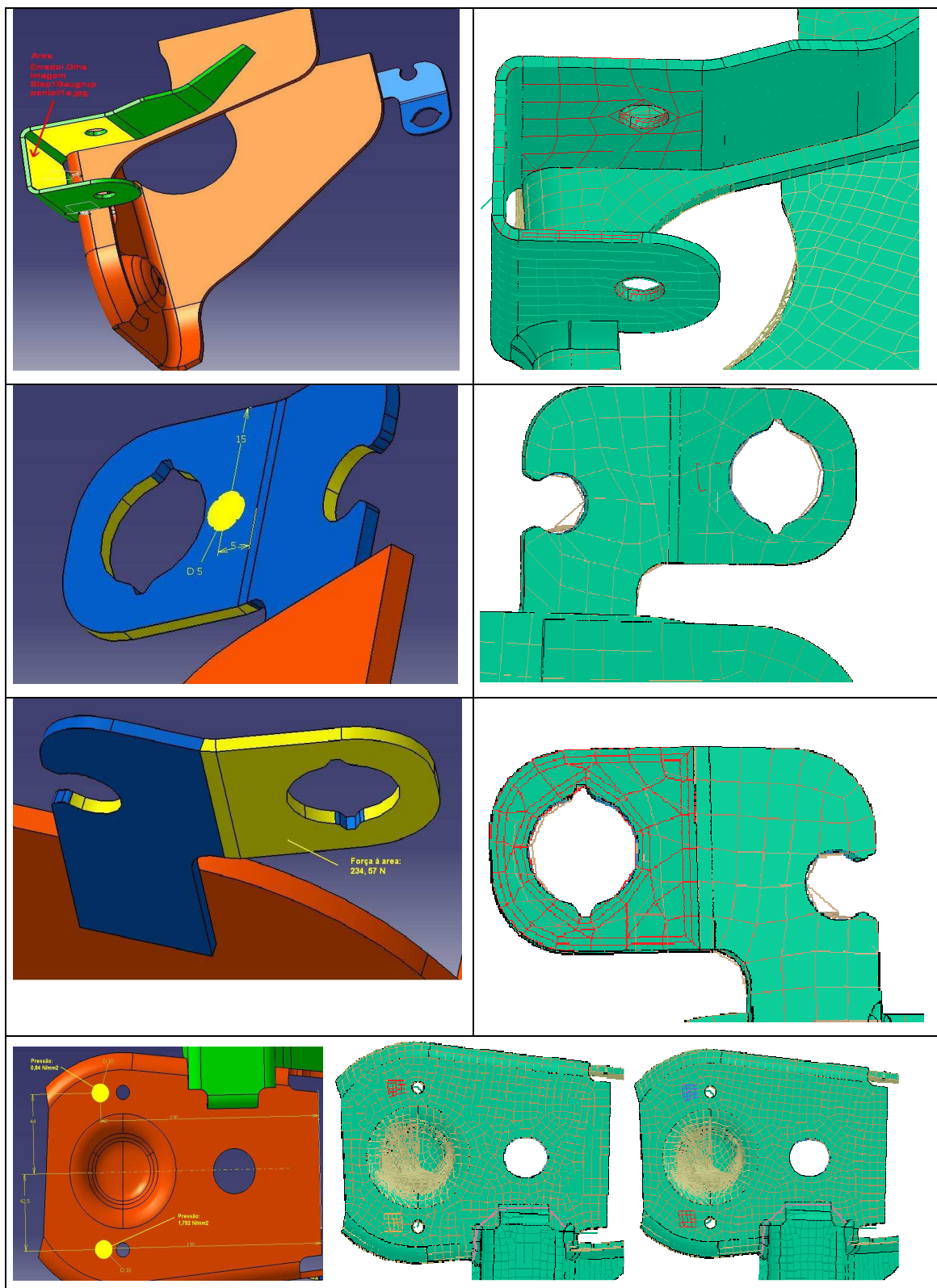


Figura 3.9 – Sistemas de fixação simulados.

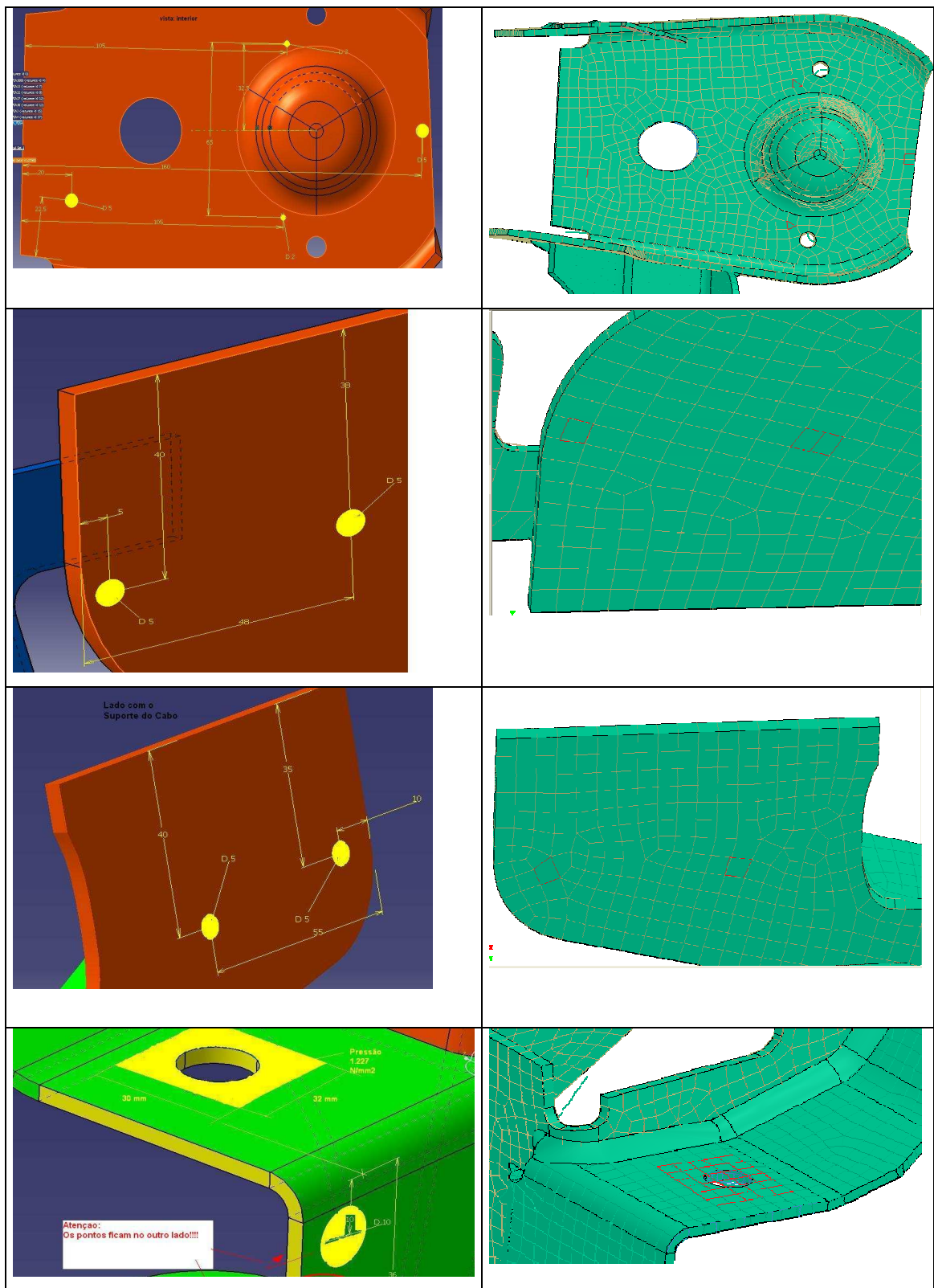


Figura 3.9 – Sistemas de fixação simulados (continuação).

3.1.10 Grupos Restantes

Alguns grupos que não são possíveis de serem criados no Visual Mesh® e necessários ao Sysweld® devem agora ser criados. Para cada weldline criada, outros três grupos devem ser criados, um contendo o nó inicial, outro contendo o nó final e um outro contendo o elemento inicial da weldline.

Um novo grupo mais abrangente denominado *local* contendo todos os elementos que sofrerão influência durante o processo de soldagem, este grupo deverá ser utilizado no campo Welding Group do Welding Wizard para todas as weldlines utilizadas. Estes grupos devem ser criados para cada nova tentativa de simulação em que se necessite importar a malha novamente.

3.1.11 Welding Wizard

A ferramenta *welding wizard* é utilizada para a entrada de todos os grupos e parâmetros para a realização da solda, para utilizá-la é necessário que a fonte de calor já esteja calibrada, o que ocorre ao comparar as macrografias reais com as simuladas.

No campo *reference* dá-se um nome ao projeto que será salvo no formato .prj, em seguida em Material DB deve-se ler os materiais welding_steel, onde se encontram todos os materiais para a soldagem de aço. Em seguida em Function DB deve-se ler o arquivo .fct que contém todas as fontes ajustadas para os cordões.

Em *material properties* adiciona-se o material com propriedades térmicas e mecânicas de cada fase do material de cada peça a ser soldada inclusive dos cordões depositados.

No campo *welding operation description* deve-se entrar em welding group o grupo *local* em weldline entra-se a trajetória e em startnode o grupo *startnode*, em endnode o grupo *stopnode*, em startelements o grupo *startlms*, entra-se ainda a velocidade de soldagem, em welding starttime o tempo em que aquela solda iniciará, e ainda a estimativa do tamanho da zona fundida. No campo material deposit deve-se entrar com o grupo que representa o cordão de solda e entrar a função que ativa estes elementos durante a soldagem.

O campo seguinte é o *heat exrange*, no qual você entra com os elementos skin que trocarão calor com o meio, por meio de radiação e convecção para uma dada temperatura externa.

As restrições de deslocamento para cada grupo de fixação criado devem ser colocadas em *clamp condition*, tomando sempre o cuidado de garantir que a peça não poderá ter movimento de corpo rígido.

Em *solver* adiciona-se a proporção de fases para cada peça, e ainda o tempo final da solda assim como os critérios de convergência para a simulação.

Neste mesmo campo encontra-se a opção de *restart* que será utilizada para cada continuação que se queira fazer a partir dos resultados térmicos e mecânicos anteriores.

3.1.12 Problemas Encontrados, Soluções Propostas, Testadas e Funcionais

Durante a execução dos procedimentos para a simulação da soldagem do componente diversos problemas foram encontrados e varias soluções foram propostas e testadas na tentativa de resolvê-los. Alguns destes problemas estão relacionados a seguir.

Inicialmente houve um problema na importação dos desenhos, pois recebeu-se os arquivos no formato .CATIApart, porém para que o Visual Mesh[®] consiga importar este tipo de arquivo era necessário uma nova licença da ESI – Group liberando as funções compatíveis com o Catia[®] o que não está incluso no pacote. Foi proposto exportar os desenhos no formato igs ou ainda importar para o Ansys e depois exportar para uma extensão compatível com o Visual Mesh[®]. Foram testadas as duas propostas. Para o caso de importar para o Ansys não deu certo pois houve um erro e somente algumas linhas foram importadas, mas quando os arquivos foram salvos no formato igs a importação ocorreu de forma perfeita para o Visual Mesh[®]. Portanto a solução funcional para este problema é os arquivos de desenho serem exportados no formato igs para serem importados pelo software Visual Mesh[®] de maneira correta e completa.

Uma malha com elementos solid-shell foi gerada através do software HyperMesh[®] e fornecida na extensão do nastran (.nas) e importada para o Visual Mesh[®]. Esta malha apresentava elementos sólidos nas regiões das soldas e elementos shell nas demais regiões. Para a importação para o Visual Mesh[®] não houve problemas e nele os grupos de elementos necessários ao Sysweld[®] foram criados. Ao exportar o arquivo no formato .PC e tentar importar para o Sysweld[®], o mesmo não conseguiu importar todos os grupos. A solução proposta foi de diminuir o número de elementos e tentar novamente. A solução proposta foi realizada com sucesso e a importação dos grupos ocorreu de forma correta. É possível importar para o Sysweld[®] elementos solid-shell desde de que não ultrapasse 500.000 elementos com o microcomputador disponível, um Core2 Duo com 2 Gb de RAM.

Realizada a importação dos elementos e grupos, o próximo passo foi realizar no Sysweld® os procedimentos necessários para simular a soldagem. No entanto ocorreu um erro na hora de executar e o Sysweld® não aceitou elementos solid-shell juntos. As propostas para a solução deste problema foram a de realizar uma nova tentativa considerando como elementos materiais somente os elementos solid, fazer toda a malha somente com elementos solid ou ainda fazer toda a malha com elementos shell. A hipótese de testar somente os elemento solid como elementos matérias também não deu certo e partiu-se para a segunda opção. Como a tentativa de utilizar elementos shell juntamente com elementos solid não se mostrou funcional então uma nova malha toda com elementos solid foi gerada e testada.

Uma malha somente com elementos solid foi gerada através do HyperMesh®. No entanto a malha estava muito refinada com quase 2 milhões de elementos e apesar de conseguir a importação para o Visual Mesh® o mesmo não foi possível para o Sysweld®, possivelmente devido à limitações da máquina. A solução proposta para este caso foi a de gerar no Visual Mesh® a malha utilizada. Para tanto seria necessário o fornecimento dos desenhos com os cordões de solda que não estavam no desenho anterior.

A partir da nova malha gerada com elementos bastante grosseiros, para obtenção dos primeiros resultados, foi possível obter o campo térmico. As malhas geradas no Visual Mesh® através do método grow e map se mostraram a princípio funcionais.

Um novo problema foi encontrado ao analisar os resultados térmicos obtidos. Estava ocorrendo um acúmulo de energia ao final do primeiro cordão de solda enquanto que os demais não eram feitos. A primeira solução proposta para este caso foi refazer a malha e tentar novamente, testada esta hipótese o problema persistiu o que demonstrou não ser a malha o problema, a segunda solução proposta seria a de modificar a entrada de dados das weldlines onde foi criada uma etapa de execução para cada cordão de solda e não todas juntas como estava antes, esta solução se mostrou bastante funcional e obteve-se assim os primeiros resultados térmicos, mas sem sucesso na parte estrutural.

Ao analisar os primeiros resultados térmicos notou-se que a temperatura nos cordões não diminuía e suspeitou-se de que por este motivo não conseguiu resolver a parte estrutural. A solução proposta para este problema foi verificar se os elementos de casca estavam corretos, pois são estes elementos que retiram calor da peça por convecção e radiação. Foi verificado que o grupo de elementos de casca criado recobria apenas os elementos solid das peças fixas e não englobavam os cordões, o problema foi então solucionado ao criar, para os cordões de solda, um novo grupo contendo elementos de casca que retiravam calor dos mesmos durante a soldagem.

Obtido o campo completo de temperatura, com todas as partes aquecendo e resfriando ao final, observou-se que para alguns cordões a temperatura subia muito necessitando de um novo ajuste da fonte de calor, notou-se ainda que a parte estrutural não havia sido resolvida. Mais uma vez foi proposto checar se a malha e mesmo fazendo isto nenhum resultado estrutural foi obtido.

Depois de algumas tentativas sem sucesso decidiu-se por enviar o problema ao suporte técnico, que por sua vez teve de enviar o problema ao pessoal da França para que eles resolvessem o problema.

Enquanto o resultado do suporte técnico não chegava decidiu-se recomeçar o projeto do zero refazendo toda a malha com elemento Shell (2D) e tentando executar no Sysweld®, nesta tentativa um novo problema foi encontrado, como os elementos de casca são criados no Visual Mesh® a partir dos elementos solid, não foi possível criá-los e tentou-se gerar a convecção e radiação a partir dos próprios elementos das peças. Esta tentativa também não apresentou resultado, pois o Sysweld® não aceitou entrar os elementos das peças como elementos que trocariam calor. Depois de algumas tentativas notou-se que não seria possível trabalhar neste projeto com elementos Shell e foi descartada esta hipótese.

Decidiu-se então voltar a fazer as simulações com elementos solid e depois de alguns dias a resposta do suporte técnico finalmente chegou, e a única coisa que fizeram foi mandar um exemplo de uma solda multipasse, mas foi útil para perceber que uma entrada de dados estava errada, ao entrar os grupos de elementos que sofreriam influência durante a solda estava entrando cada peça como um grupo, e o Sysweld® não aceita que isto seja feito. A solução proposta foi então a de criar um grupo que contenha todos os elementos de todas as peças, assim seria necessário entrar somente um grupo no campo welding group. Criado o novo grupo que foi denominado “local” todos os procedimentos foram repetidos e mais uma vez obteve-se somente resultados térmicos e a parte estrutural teve sua solução somente iniciada para o primeiro time.

Em reunião com os professores que participam do projeto, os mesmos observaram que mesmo com o sistema de fixação poderia, de alguma maneira, estar ocorrendo algum tipo de movimento de corpo rígido, e por este motivo as matrizes criadas através do método de elementos finitos não conseguem resolver o problema estrutural, enquanto que para a parte térmica não leva em conta este tipo de movimento. A solução proposta então foi de modificar as restrições de maneira a garantir que não houvesse nenhum tipo de movimento de corpo rígido.

Para cada peça adotou-se três pontos e restringiu-se os deslocamentos em X, Y e Z de maneira a garantir que nenhum tipo de movimento de corpo rígido fosse possível. Com a nova configuração do sistema da fixação foram obtidos os resultados térmicos completos e

quanto a parte estrutural foram obtidos os resultados estruturais para os primeiros tempos. Como os primeiros resultados estruturais foram obtidos, persistiu-se em continuar a modificar o sistema de fixação. Quanto mais pontos se acrescentavam ao sistema de fixação mais passos eram resolvidos na análise estrutural. No entanto a solução não convergia após a passagem pelo último cordão.

Ao se observar os resultados estruturais do último instante resolvido, percebeu-se que deslocamentos de cerca de um metro estavam acontecendo. Como de experiências anteriores acreditava-se que estes deslocamentos deveriam estar em torno de um milímetro suspeitou-se de que poderia haver alguma parte do modelo que não estava devidamente acoplado à peça, para verificar esta hipótese plotou-se os deslocamentos em uma escala de 0 a 1 mm (zero a um milímetro) e constatou-se que algumas áreas do modelo realmente não estavam devidamente acopladas à peça e por este motivo elas não estavam englobadas pelo sistema de fixação, o que as leva a gerar um movimento de corpo rígido não permitindo a solução do problema. Um teste foi realizado restringindo o movimento de corpo rígido de cada uma das áreas que se encontravam soltas e para este caso todos os resultados estruturais foram obtidos, ou seja, o problema realmente estava na execução dos desenhos.

Constatado o problema uma nova observação foi realizada para a parte térmica onde foi possível notar que também para os cordões de solda havia uma pequena distância entre as áreas que os compunham fazendo com que o calor não se distribuisse de forma correta.

A solução definitiva encontrada para este problema foi a fusão dos elementos próximos que estavam sendo gerados em duplicidade no modelo. Cumprida esta etapa, as soluções térmica e estrutural convergiram sem maiores problemas.

3.2 – Estudo de Juntas

O comportamento de uma junta soldada é em muitos casos inesperado dificultando assim um melhor planejamento de uma determinada estrutura soldada, o que pode comprometer um projeto de um determinado componente a ser soldado. Uma maneira de evitar que as deformações provocadas durante a soldagem não influenciem as montagens de equipamentos seria a realização de vários testes visando buscar uma configuração de parâmetros que menos compromettesse sua forma original, o que nem sempre é possível devido ao custo e a complexidade de uma soldagem.

Visando um melhor conhecimento do comportamento de juntas soldadas, um estudo da soldagem de alguns tipos de juntas foi sugerido. Para tanto o método dos elementos finitos foi utilizado juntamente com o programa Sysweld[®], um programa desenvolvido

especificamente para a simulação de soldagem. Como o programa Sysweld® não oferece muitos artifícios para a modelagem dos desenhos, os modelos foram criados no programa e depois exportados e manipulados no programa Visual Mesh® o qual apresenta maior mobilidade com os desenhos para a inserção de modificações dos parâmetros de soldagem. A malha foi realizada no próprio Sysweld® com elementos 3D e apresentou em media 9222 elementos.

Dentre os tipos de juntas para mais utilizados na indústria, três foram escolhidas para que fossem realizadas as simulações, sendo elas: junta tipo T mostrada na Figura 3.10, junta de topo mostrada na Figura 3.11 e junta sobreposta visualizada na Figura 3.12.

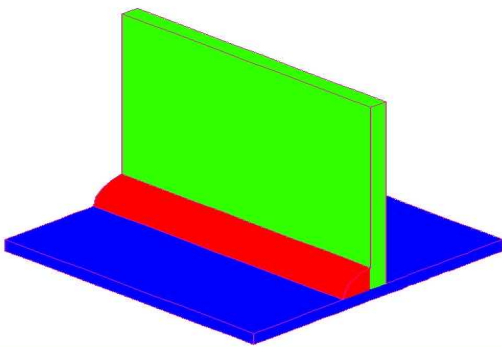


Figura 3.10 – Junta do Tipo T.

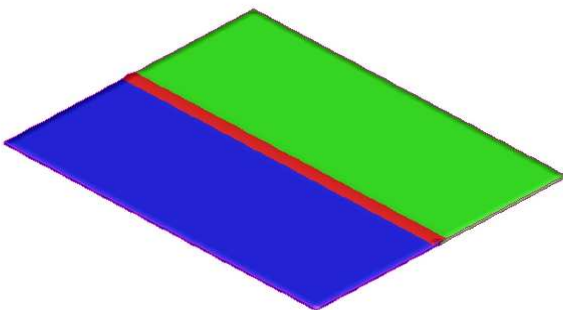
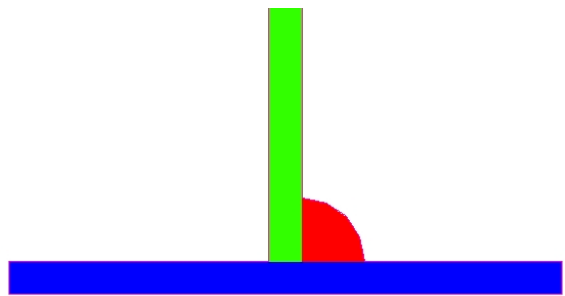


Figura 3.11 – Junta de Topo.

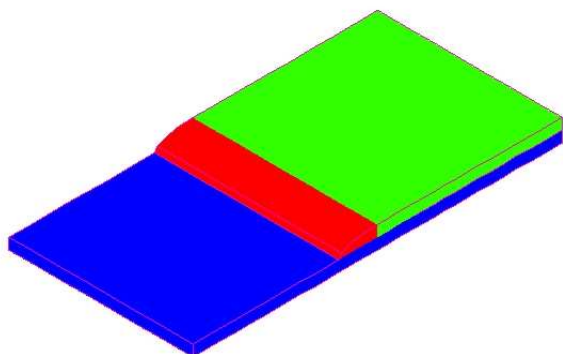
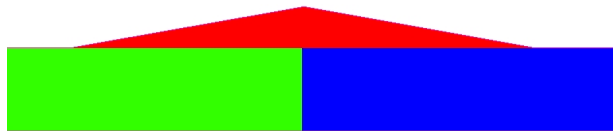


Figura 3.12 – Junta Sobreposta.



Para cada tipo de junta ocorreria ainda a variação de quatro diferentes parâmetros de soldagem, sendo eles: o tipo de fonte, o sistema de fixação, a espessura do material soldado e a folga entre as peças soldadas.

3.2.1 – Planejamento Estatístico

Um planejamento fatorial completo foi realizado de modo a garantir que todas as combinações de parâmetros possíveis fossem realizadas para cada tipo de junta. Neste planejamento foram considerados três tipos de juntas, dois tipos de fonte, três sistemas de fixação, duas espessuras de placas e três folgas entre as peças. Resultando assim em $3 \times 2 \times 3 \times 2 \times 3 = 108$ simulações necessárias para a realização do estudo nas três juntas.

Iniciando as simulações foi percebido que 108 simulações levariam muito mais tempo do que se imaginou inicialmente (cada simulação, sem contar a modelagem prévia e análise posterior, levou de três a quatro horas), principalmente pelo fato de se estar trabalhando com dois programas ao se realizar modificações dos parâmetros no Visual Mesh® e depois importar o desenho e os elementos para o Sysweld®, qualquer erro ocorrido e percebido somente durante a simulação era necessário voltar ao programa anterior para corrigir o erro e exportar o desenho novamente.

Por este motivo ficou decidido que somente seriam realizados os estudos para a junta de topo ficando as demais juntas como proposta de continuação do trabalho. Com esta redução o numero de simulações reduziu-se a um terço, caindo para 36 simulações, as quais o planejamento experimental pode ser observado na Tabela 3.8, comentada e mostrada a seguir.

A variação da espessura ocorreu em dois níveis -1 e 1 sendo elas 2 ou 3 mm, a fonte de calor imposta às juntas também foram variadas em dois níveis sendo elas definidas como alta ou baixa, para a folga utilizou-se uma variação de três níveis -1, 0 e 1, sendo as situações em que não ocorria folga, folga de 0,5 mm e folga de 1 mm, o sistema de fixação também foi variado em três níveis sendo eles a situação em que não havia nenhum grampo prendendo a peça, uma situação com quatro grampos prendendo a peça em suas extremidades e uma com seis grampos .

Tabela 3.8 – Planejamento estatístico para junta de topo (níveis codificados à esquerda e não-codificados à direita).

	Espessura	Fonte	Folga	Fixação		Espessura (mm)	Fonte	Folga (mm)	Fixação (Grampos)
1	-1	1	-1	-1	1	2	ALTA	0,0	0
2	-1	1	-1	0	2	2	ALTA	0,0	4
3	-1	1	-1	1	3	2	ALTA	0,0	6
4	-1	1	0	-1	4	2	ALTA	0,5	0
5	-1	1	0	0	5	2	ALTA	0,5	4
6	-1	1	0	1	6	2	ALTA	0,5	6
7	-1	1	1	-1	7	2	ALTA	1,0	0
8	-1	1	1	0	8	2	ALTA	1,0	4
9	-1	1	1	1	9	2	ALTA	1,0	6
10	-1	-1	-1	-1	10	2	BAIXA	0,0	0
11	-1	-1	-1	0	11	2	BAIXA	0,0	4
12	-1	-1	-1	1	12	2	BAIXA	0,0	6
13	-1	-1	0	-1	13	2	BAIXA	0,5	0
14	-1	-1	0	0	14	2	BAIXA	0,5	4
15	-1	-1	0	1	15	2	BAIXA	0,5	6
16	-1	-1	1	-1	16	2	BAIXA	1,0	0
17	-1	-1	1	0	17	2	BAIXA	1,0	4
18	-1	-1	1	1	18	2	BAIXA	1,0	6
19	1	1	-1	-1	19	3	ALTA	0,0	0
20	1	1	-1	0	20	3	ALTA	0,0	4
21	1	1	-1	1	21	3	ALTA	0,0	6
22	1	1	0	-1	22	3	ALTA	0,5	0
23	1	1	0	0	23	3	ALTA	0,5	4
24	1	1	0	1	24	3	ALTA	0,5	6
25	1	1	1	-1	25	3	ALTA	1,0	0
26	1	1	1	0	26	3	ALTA	1,0	4
27	1	1	1	1	27	3	ALTA	1,0	6
28	1	-1	-1	-1	28	3	BAIXA	0,0	0
29	1	-1	-1	0	29	3	BAIXA	0,0	4
30	1	-1	-1	1	30	3	BAIXA	0,0	6
31	1	-1	0	-1	31	3	BAIXA	0,5	0
32	1	-1	0	0	32	3	BAIXA	0,5	4
33	1	-1	0	1	33	3	BAIXA	0,5	6
34	1	-1	1	-1	34	3	BAIXA	1,0	0
35	1	-1	1	0	35	3	BAIXA	1,0	4
36	1	-1	1	1	36	3	BAIXA	1,0	6

3.2.2 – Simulação

Foram simuladas várias combinações de parâmetros de maneira a se obter aquelas que mais influenciam o campo de deslocamento e deformações, os microconstituintes finais e as tensões residuais durante a soldagem. Os parâmetros variados durante as simulações podem ser visualizados nas figuras a seguir onde as Figura 3.13a e 3.13b mostram as duas espessuras utilizadas 2 e 3 mm.

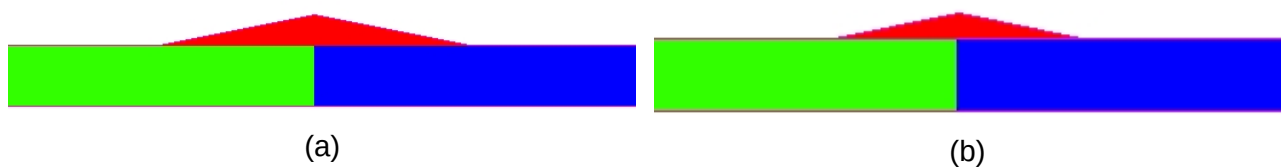


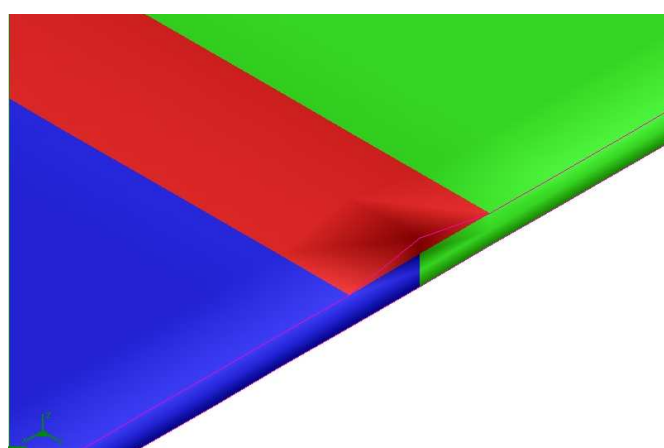
Figura 3.13 – Visualização dos dois tipos de espessuras utilizados, (a) 2mm e (b) 3mm.

A Figura 3.14 mostra uma visualização das folgas utilizadas durante a simulação sendo a Figura 3.14a sem folga, onde se considerou que as placas estavam juntas, Figura 3.14b com folga de 0,5mm e Figura 3.14c com folga de 1 mm.

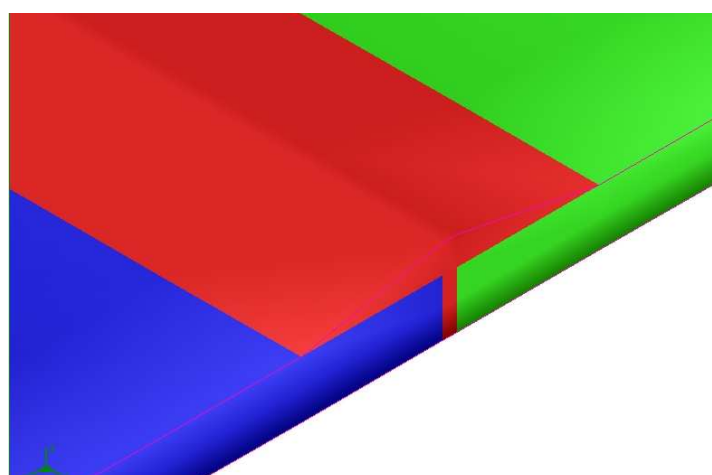
Já a Figura 3.15 mostra uma visualização do sistema de fixação utilizado durante a simulação onde pode se observar três tipos de configurações sendo elas sem grampo na Figura 3.15a, com quatro grampos na Figura 3.15b e com seis grampos na Figura 3.15c.

Para a fonte foram utilizadas uma do tipo alta e uma baixa onde a variação se deu na entrada de calor, sendo modificada apenas a energia de entrada nas placas.

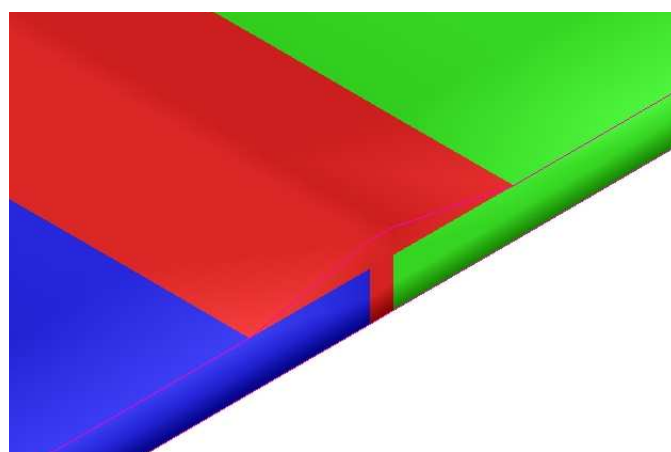
Cada simulação teve um tempo de duração entre três e quatro horas e os resultados obtidos foram a tensão residual máxima segundo critério de Von Mises, o deslocamentos máximo e a variação do tempo de resfriamento entre as temperaturas de 800 e 500°C intervalo de ocorrência de transformações microestruturais nas peças. Os resultados são mostrados e discutidos nos capítulos que se seguem.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.14 – Visualização dos três tipos de folgas considerados durante a simulação, (a) considerado sem folga, (b) com folga de 0,5mm e (c) com folga de 1mm.

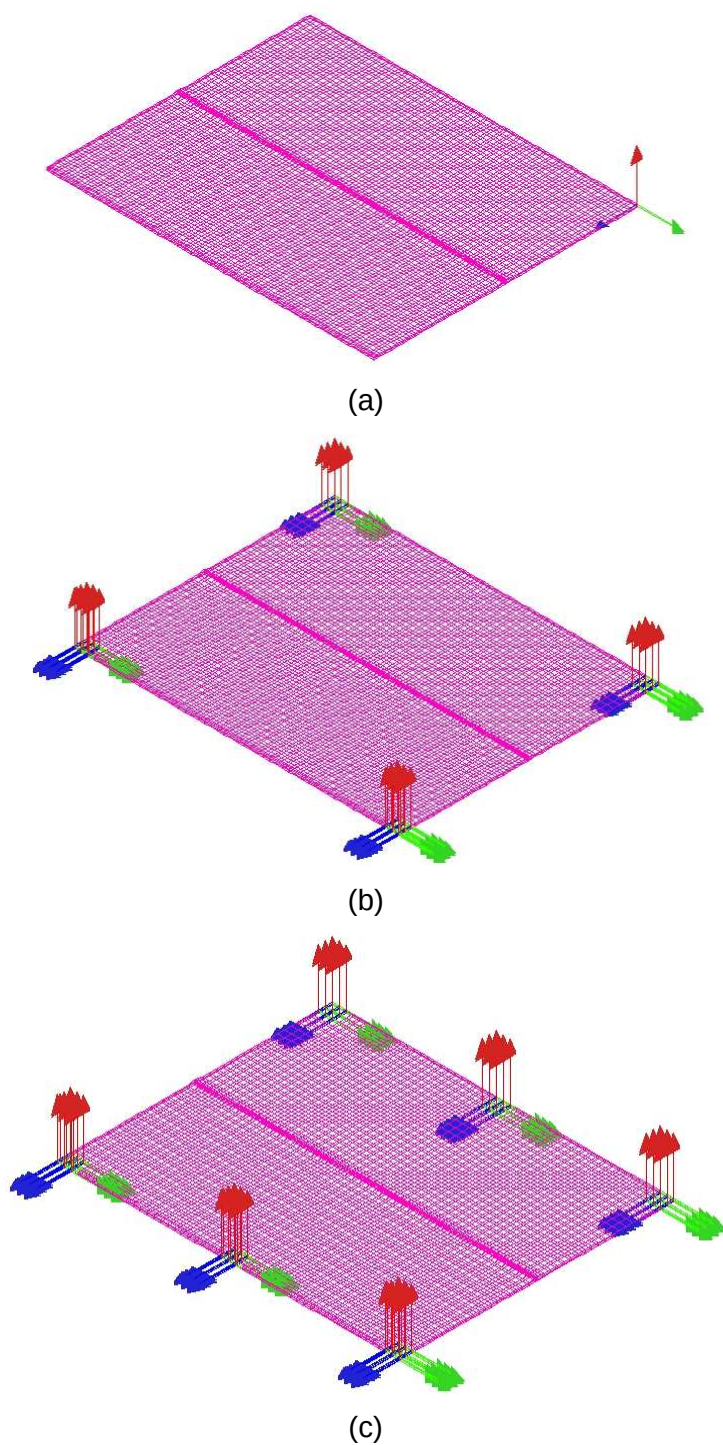


Figura 3.15 – Visualização dos três tipos de sistema de fixação utilizados durante a simulação, (a) sem grampo, (b) com quatro grampos e (c) com seis grampos.

CAPITULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na modelagem descrita anteriormente, foram obtidos resultados referentes à simulação de soldagem do componente automotivo selecionado, com a utilização do Sysweld®. Foram também colhidos dados experimentais na empresa, a fim de se realizar uma comparação numérico-experimental das macrografias das soldas realizadas, bem como uma análise do perfil de temperatura e também comparação estrutural (deformações).

Em uma visão mais local, os resultados referentes às simulações das soldas das juntas de topo com diferentes combinações de parâmetros também são mostradas a seguir. Como respostas procurou-se obter o deslocamento máximo, a tensão residual máxima segundo o critério de Von Mises e a variação do tempo de resfriamento entre as temperaturas de 800 e 500°C ($\Delta T_{8/5}$).

4.1 – Resultados para a Simulação do Componente

4.1.1 – Simulação das Macrografias

Para se utilizar o Sysweld®, é necessária uma calibração da fonte de calor utilizada pelo programa. Desta forma cada solda realizada possui uma calibração específica. Para que isto possa ocorrer, são realizados ajustes de parâmetros internos do *solver* do Sysweld®. Para cada uma das macrografias dos cordões de solda simulados, estes ajustes foram realizados e estes parâmetros serão mostrados a seguir. Esta calibração da macrografia de cada solda permite um ganho computacional muito grande, reduzindo o número de simulações de testes necessárias até o perfeito ajuste do modelo. Com os parâmetros de soldagem em mãos foram simuladas as macrografias e estas comparadas com a macrografia real como mostrado nas figuras a seguir.

Após o ajuste de todas as macrografias, um arquivo contendo o ajuste da fonte de calor para cada cordão foi gerado e utilizado durante a simulação de soldagem do mesmo.

A Figura 4.1(a) e (b) ilustra uma comparação da macrografia simulada e real para o cordão 3. Vale lembrar que a simulação foi realizada seguindo uma média de cada medida para as várias macrografias fornecidas. Pode-se observar ainda na Figura 4.2 os parâmetros da fonte de calor utilizada para obter este resultado e que foi utilizada durante a simulação completa da soldagem. Sendo assim estes parâmetros não podem ser modificados, sendo esta fonte fixa para o cordão 3. Uma modificação implicaria em uma mudança na macrografia obtida.

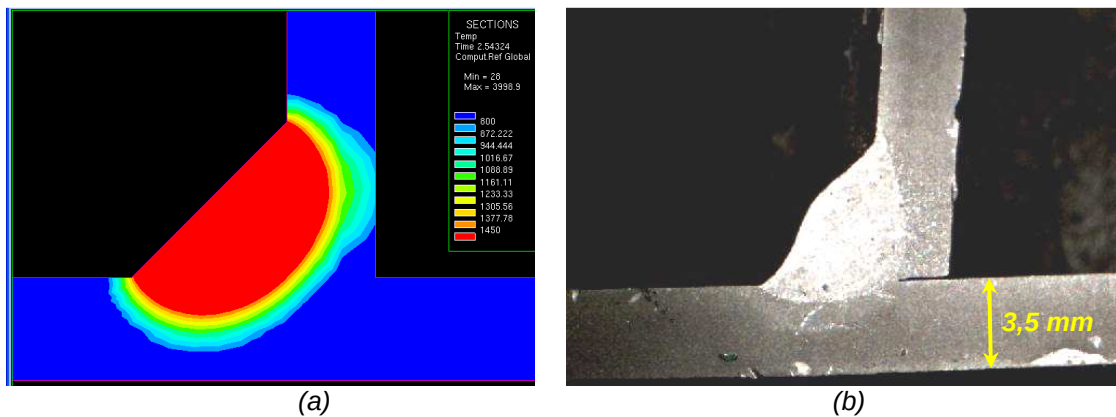


Figura 4.1 – Comparação das macrografias (a) simulada e (b) real para o cordão 3.

Figure 4.2 shows the Syswel software interface for setting weld parameters. The 'Process type' is set to '2D Gaussian'. The 'Function name' is 'solda3'. The equations for the heat source are displayed: $QR = Qf \cdot \exp(-y^2/af^2) \cdot A$ and $A = \exp(-x^2/b^2) \cdot \exp(-z^2/c^2)$. The parameters are as follows:

Parameter	Value
Qf	105.19
af	2
b	3.1
xo	2.64
yo	0
zo	2.64
Qr	105.19
ar	2
c	2.7
ay	45
ay	1
Power (Total*Efficiency)	5000

The bottom of the window shows a summary line: 'solda3 (4), E: 5000, Qf: 105.19, af: 2, b: 3.1, xo: 2.64, yo: 0, zo: 2.64'. Buttons for 'Add', 'Replace', 'OK', 'Close', and 'Help...' are visible at the bottom.

Figura 4.2 – Parâmetros de ajuste no Syswel® para a simulação da fonte para solda 3.

A Tabela 4.1 mostra as medidas para comparação com a macrografia real. A variação entre os valores médios e simulados pode ser explicada pelo fato de que os cordões não

são exatamente iguais, tornando-se necessária as comparações das áreas fundidas de cada cordão. É importante lembrar aqui que este ajuste é apenas para calibrar a fonte de calor que foi usada durante a simulação final da soldagem do cordão 3 do componente, e que no componente os cordões estão modelados de forma a se aproximarem ao máximo dos cordões reais, não justificando portanto, maiores ajustes destas macrografias.

Tabela 4.1 – Comparação das medidas para a macrografia do cordão 3.

Simulação Cordão 3			Médias Cordão 3		
	Penetração (mm)	Perna (mm)		Penetração (mm)	Perna (mm)
Ass. Mola	1,18	5,18	Ass. Mola	1,06	5,28
Sup. Amort.	1,18	5,18	Sup. Amort.	1,06	5,28
Largura	7,46	----	Largura	7,53	----
Profundidade	3,73		Profundidade	4,13	
Altura	----		Altura	0,54	

A Figura 4.3(a) e (b) ilustra uma comparação da macrografia simulada e real para o cordão 5, pode-se observar ainda na Figura 4.4 os parâmetros da fonte de calor utilizada para obter este resultado e que foi utilizada durante a simulação completa da soldagem. A Tabela 4.2 mostra as medidas para comparação com a macrografia real.

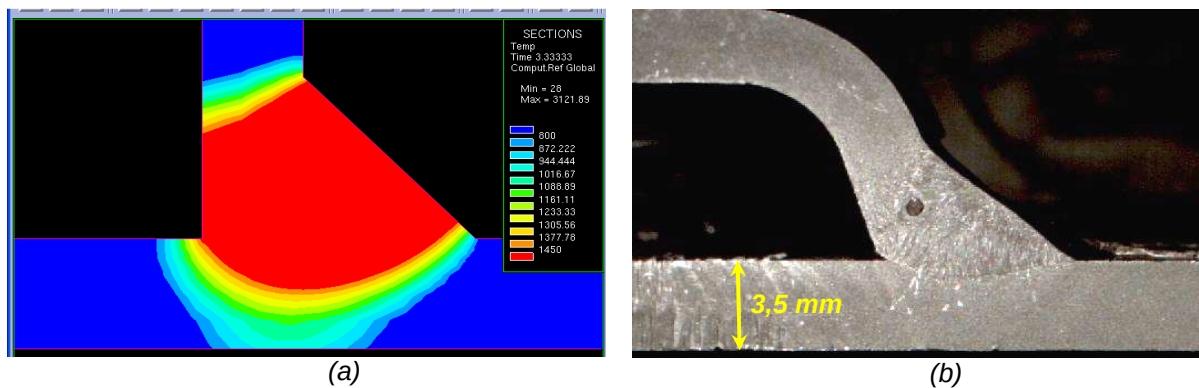


Figura 4.3 – Comparação das macrografias (a) simulada e (b) real para o cordão 5



Figura 4.4 – Parâmetro de ajuste no Syswel® para a simulação da fonte para solda 5

Tabela 4.2 – Comparação das medidas para a macrografia do cordão 5 em mm.

Simulação Cordão 5			Médias Cordão 5		
	Penetração (mm)	Perna (mm)		Penetração (mm)	Perna (mm)
Ass. Mola	1,83	5,10	Ass. Mola	1,19	6,38
Sup. Amort.	3,00	----	Sup. Amort.	3,11	----
Largura	6,68	----	Largura	6,91	----
Profundidade	5,30		Profundidade	4,24	
Altura	----		Altura	0,17	

A Figura 4.5(a) e (b) ilustra uma comparação da macrografia simulada e real para o cordão 7, pode-se observar ainda na Figura 4.6 os parâmetros da fonte de calor utilizada para obter este resultado e que será utilizada durante a simulação completa da soldagem. A Tabela 4.3 mostra as medidas para comparação com a macrografia real.

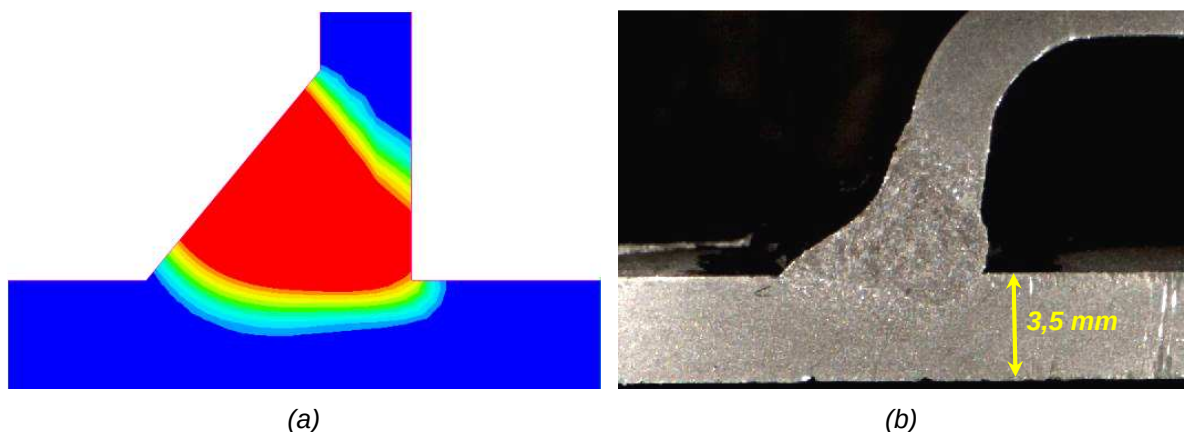


Figura 4.5 – Comparação das macrografias (a) simulada e (b) real para o cordão 7

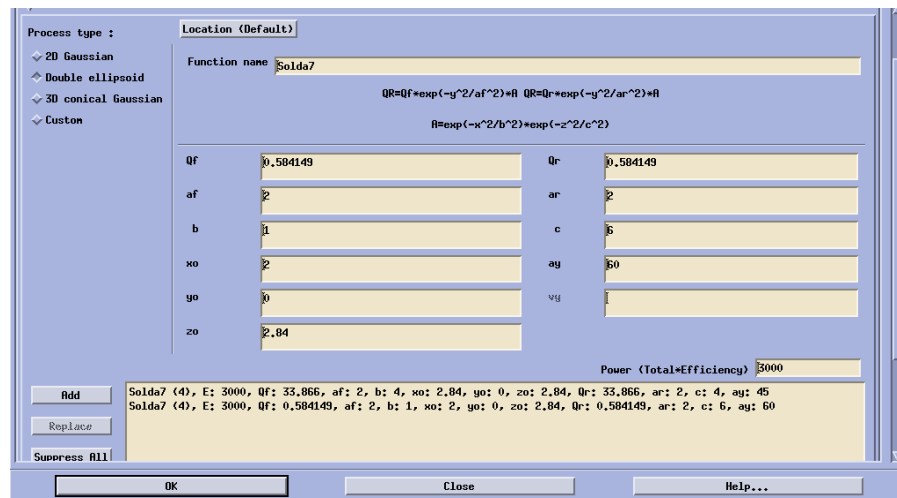
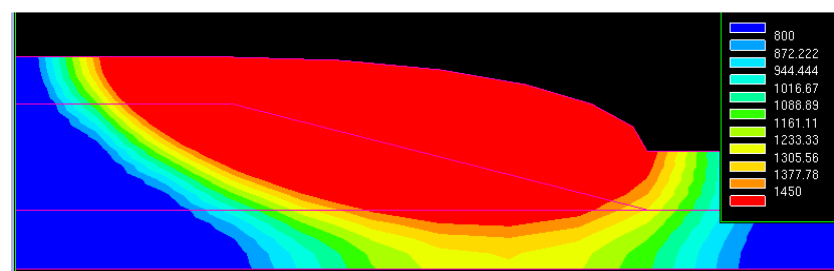


Figura 4.6 – Parâmetro de ajuste no Syswel® para a simulação da fonte para solda 7.

Tabela 4.3 – Comparação das medidas para a macrografia do cordão 7.

Simulação Cordão 7			Médias Cordão 7		
	penetração	perna		penetração	perna
Ass. Mola	0,98	7,66	Ass. Mola	1,19	8,09
Sup. Amort.	2,90	----	Sup. Amort.	2,44	----
Largura	6,82	----	Largura	8,03	----
Profundidade	5,45		Profundidade	6,30	
Altura	----		Altura	1,48	

A Figura 4.7(a) e (b) ilustra uma comparação da macrografia simulada e real para o cordão 21.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Comparação das macrografias (a) simulada e (b) real para o cordão 21.

Pode-se observar ainda na Figura 4.8 os parâmetros da fonte de calor utilizada para obter este resultado e que será utilizada durante a simulação completa da soldagem. A Tabela 4.4 mostra as medidas para comparação com a macrografia real.

Process type :

Function name: Solda21

$$QR=Qf \cdot \exp(-y^2/af^2) \cdot R \quad QR=Qr \cdot \exp(-y^2/ar^2) \cdot R$$

$$R=\exp(-x^2/b^2) \cdot \exp(-z^2/c^2)$$

Qf: 83.3337 Qr: 83.3337

af: 2 ar: 2

b: 9 c: 1

xo: 0 ay: 14

yo: 0

zo: 1.73

Power (Total*Efficiency): 4500

Add Solda21 (4), E: 4500, Qf: 83.3337, af: 2, b: 9, xo: 0, yo: 0, zo: 1.73, Qr: 83.3337, ar: 2, c: 1, ay: 14

Replace

Suppress

OK Close Help...

Figura 4.8 – Parâmetro de ajuste no Syswel® para a simulação da fonte para solda 21

Tabela 4.4 – Medidas para a macrografia simulada

Simulação Cordão 21			Médias Cordão 21		
	Penetração (mm)	Perna (mm)		Penetração (mm)	Perna (mm)
Ass. Mola			Ass. Mola		
Sup. Amort.	1,56	10,00	Sup. Amort.	1,8	9,47
Largura	12,46	----	Largura	12,38	----
Profundidade	2,46		Profundidade	2,19	
Altura	1,12		Altura	1,59	

A Figura 4.9(a) e (b) ilustra uma comparação da macrografia simulada e real para o cordão 23, pode-se observar ainda na Figura 4.10 os parâmetros da fonte de calor utilizada para obter este resultado e que será utilizada durante a simulação completa da soldagem.

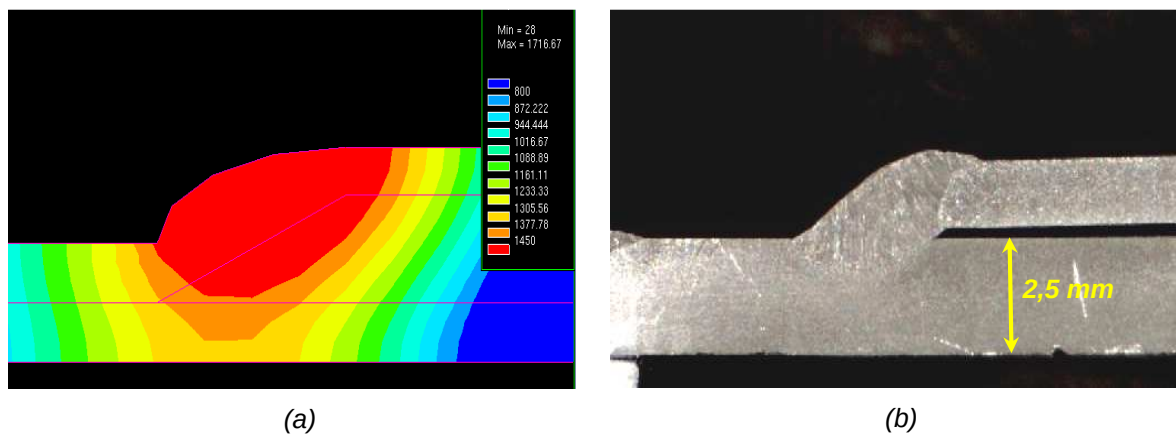


Figura 4.9 – Comparação das macrografias (a) simulada e (b) real para o cordão 23

Process type : **Location (Default)**

Function name: **Solda23**

QR=Qf*exp(-y^2/af^2)*A QR=Qr*exp(-y^2/ar^2)*A

A=exp(-x^2/b^2)*exp(-z^2/c^2)

Qf	13,5879	Qr	13,5879
af	5	ar	7
b	9,5	c	3
xo	1,8	ay	10
yo	0	zy	
zo	2		

Power (Total*Efficiency) 4100

Add Replace Suppress

Solda23 (4), E: 4100, Qf: 13,5879, af: 5, b: 9,5, xo: 1,8, yo: 0, zo: 2, Qr: 13,5879, ar: 7, c: 3, ay: 10

Figura 4.10 – Parâmetro de ajuste no Syswel® para a simulação da fonte para solda 23

A Tabela 4.5 mostra as medidas para comparação com a macrografia real.

Tabela 4.5 – Medidas para a macrografia simulada

Simulação Cordão 23			Médias Cordão 23		
	Penetração (mm)	Perna (mm)		Penetração (mm)	Perna (mm)
Ass. Mola			Ass. Mola		
Sup. Amort.	1,25	5,22	Sup. Amort.	1,07	5,2
Largura	6,82	----	Largura	7,47	----
Profundidade	2,25		Profundidade	1,71	
Altura	1,02		Altura	1,07	

Para a calibração das fontes de calor, o Sysweld® só permite o uso de juntas que ele possui em sua biblioteca, sendo assim esta calibração é realizada por aproximação de juntas ligeiramente diferentes, sendo comparadas portanto as zonas fundidas de cada uma. Portanto, quando se compara a macrografia simulada com a real encontram-se erros em torno de 12%. Considera-se neste trabalho uma aproximação satisfatória dada as simplificações inerentes a um modelo numérico. Para a simulação do componente, estas fontes foram utilizadas e os cordões modelados dimensionalmente.

4.1.2 – Simulação do Componente

Ao partir-se para a simulação do componente, ocorreu um erro durante a modelagem, onde não foi garantido o total contato (falta de acoplamento) entre as subpartes (abas e corpo) do modelo do componente. Apesar de parecer óbvio, este problema pode não ser facilmente detectado no início da simulação por usuários mais desavisados. Esta falta de acoplamento permitiu um movimento relativo destas subpartes em relação ao componente, gerando falsos resultados. A solução para o problema foi a criação de uma nova malha em todo o modelo de forma individual para cada subparte e em seguida verificar a existência de possíveis falhas. A solução se mostrou funcional e foram obtidos novos resultados térmicos e estruturais completos os quais são mostrados a seguir.

A seguir são mostrados os campos de temperatura com a evolução do tempo para cada cordão de solda do componente. É possível notar que na região onde a fonte de calor está passando ocorre um forte aquecimento que se espalha pela peça soldada e logo que termina a passagem da fonte inicia-se o resfriamento do cordão enquanto que as demais regiões continuam se aquecendo.

A Figura 4.11 mostra o campo de temperatura para o instante 3,56 s para o cordão 21, o qual é o primeiro a ser soldado. A Figura 4.12 mostra o campo de temperatura para o instante 6,13 s para o cordão 23. A Figura 4.13 mostra o campo de temperatura para o instante 25 s para o cordão 3. A Figura 4.14 mostra o campo de temperatura para o instante 37 s para o cordão 5. A Figura 4.15 mostra o campo de temperatura para o instante 41 s para o cordão 7.

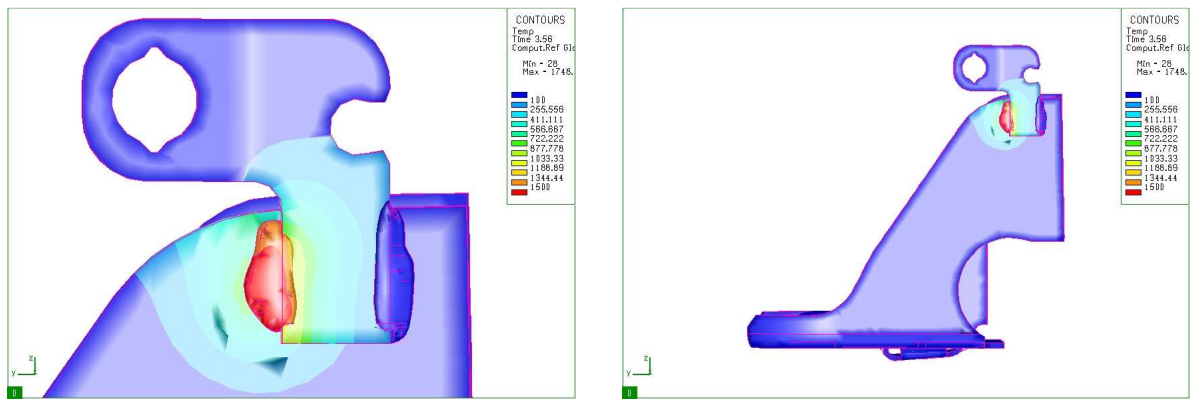


Figura 4.11 – Campo de temperatura para o cordão 21.

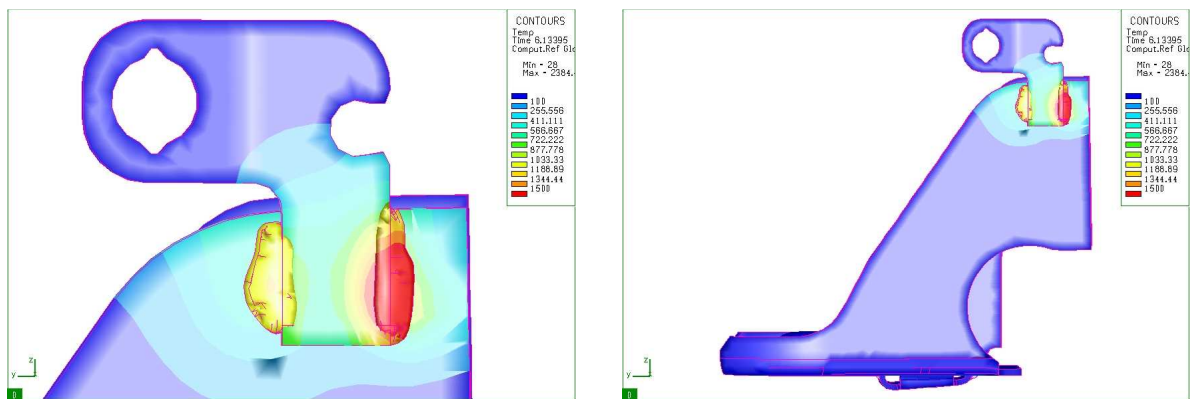


Figura 4.12 – Campo de temperatura para o cordão 23

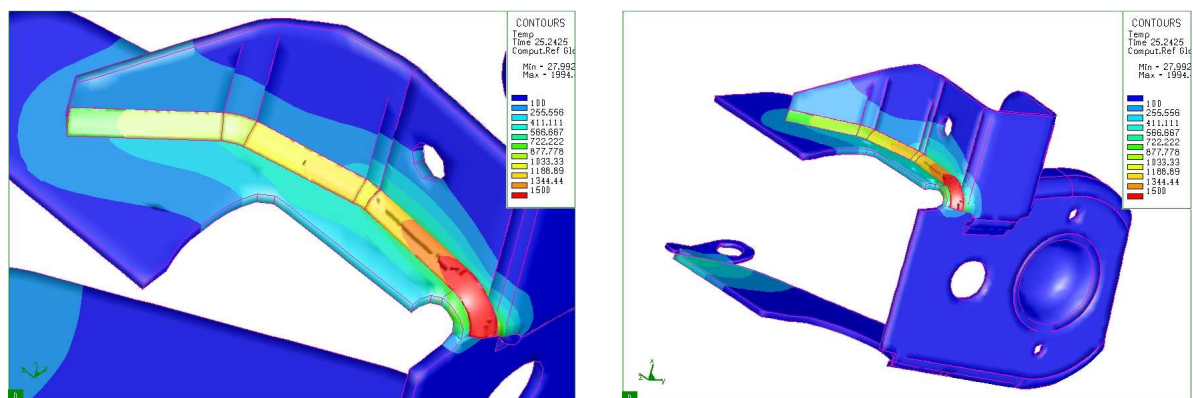


Figura 4.13 – Campo de temperatura para o cordão 3.

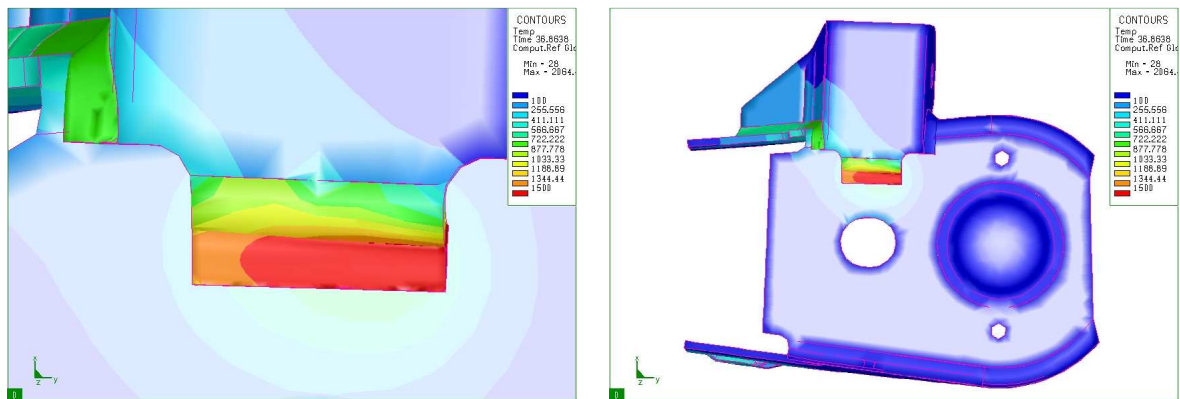


Figura 4.14 – Campo de temperatura para o cordão 5.

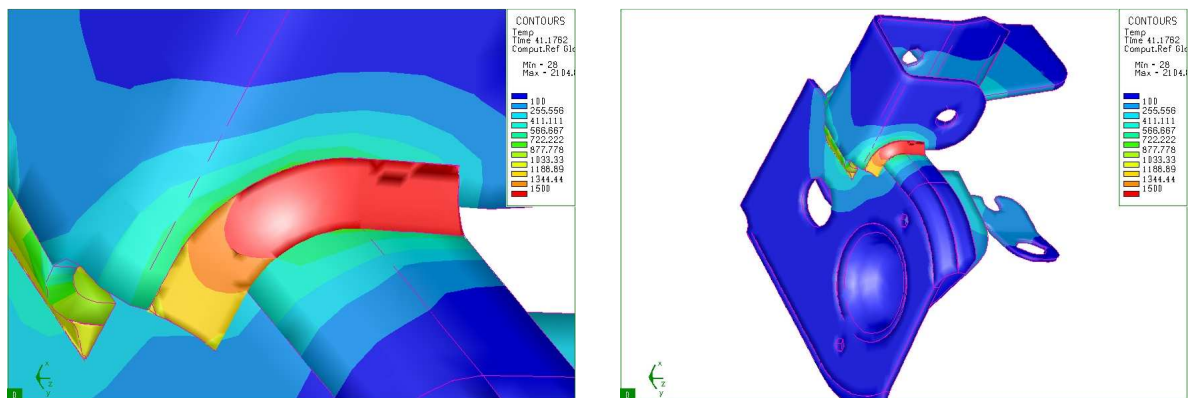


Figura 4.15 – Campo de temperatura para o cordão 7.

Para a verificação dos dados obtidos numericamente, realizou-se medições de temperatura através de termopares tipo K em alguns pontos do componente com uma frequência de aquisição de 10 Hz, via sistema de aquisição de dados HBM/MGC plus. A posição dos termopares foi escolhida de modo a se aproximarem ao máximo das zonas mais quentes de cada peça. Todas as soldas foram realizadas pela própria empresa em sua linha de produção que foi interrompida para realizar as medições. Todos os dados obtidos pelos colaboradores da empresa foram repassados para nossa análise.

Na Figura 4.16 estão ilustrados os seis pontos da peça onde foram fixados os termopares para aquisição das temperaturas durante a soldagem. As posições dos números são as posições dos termopares e estes números indicam quais os termopares.

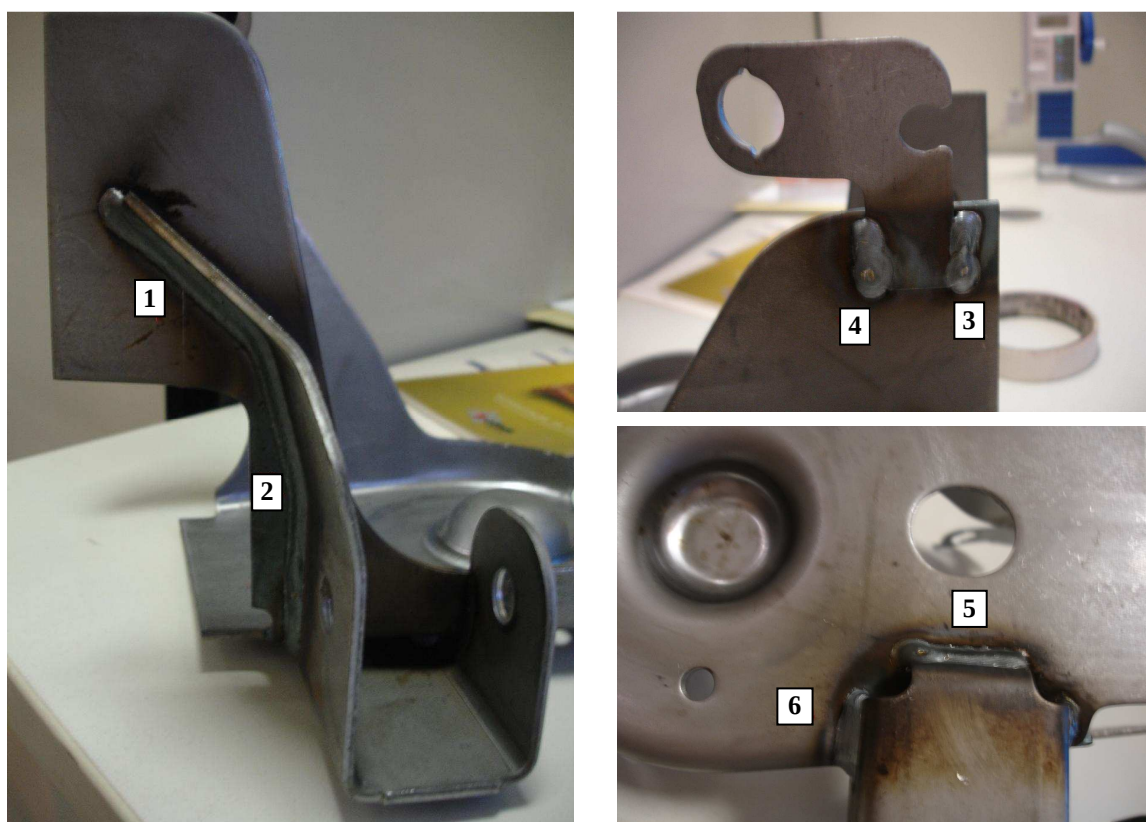


Figura 4.16 – Pontos utilizados para aquisição de temperaturas.

A comparação numérico-experimental dos resultados térmicos pode ser observada através da Fig. 4.17 que representa a evolução da temperatura com o tempo para os pontos 1, 3 e 4. Os demais pontos apresentaram problemas durante a medição experimental, não sendo possível refazer sua medição.

A melhor correlação foi obtida para o termopar número 3 (solda 23). Para o termopar 1 (solda 3) a temperatura de pico numérica ficou próxima da experimental, mas o ciclo térmico experimental teve menor taxa de resfriamento. O contrário foi apresentado pelo termopar 4 (solda 21), onde se esperava que o ciclo térmico fosse próximo daquele obtido pelo termopar 3 (solda 23). Estes resultados evidenciam a dificuldade de se realizar medições de temperatura em soldagem, agravadas pelo fato de se estar numa linha de produção, ou seja, com todos os ruídos inerentes a uma indústria (Slania *et al.* 2007).

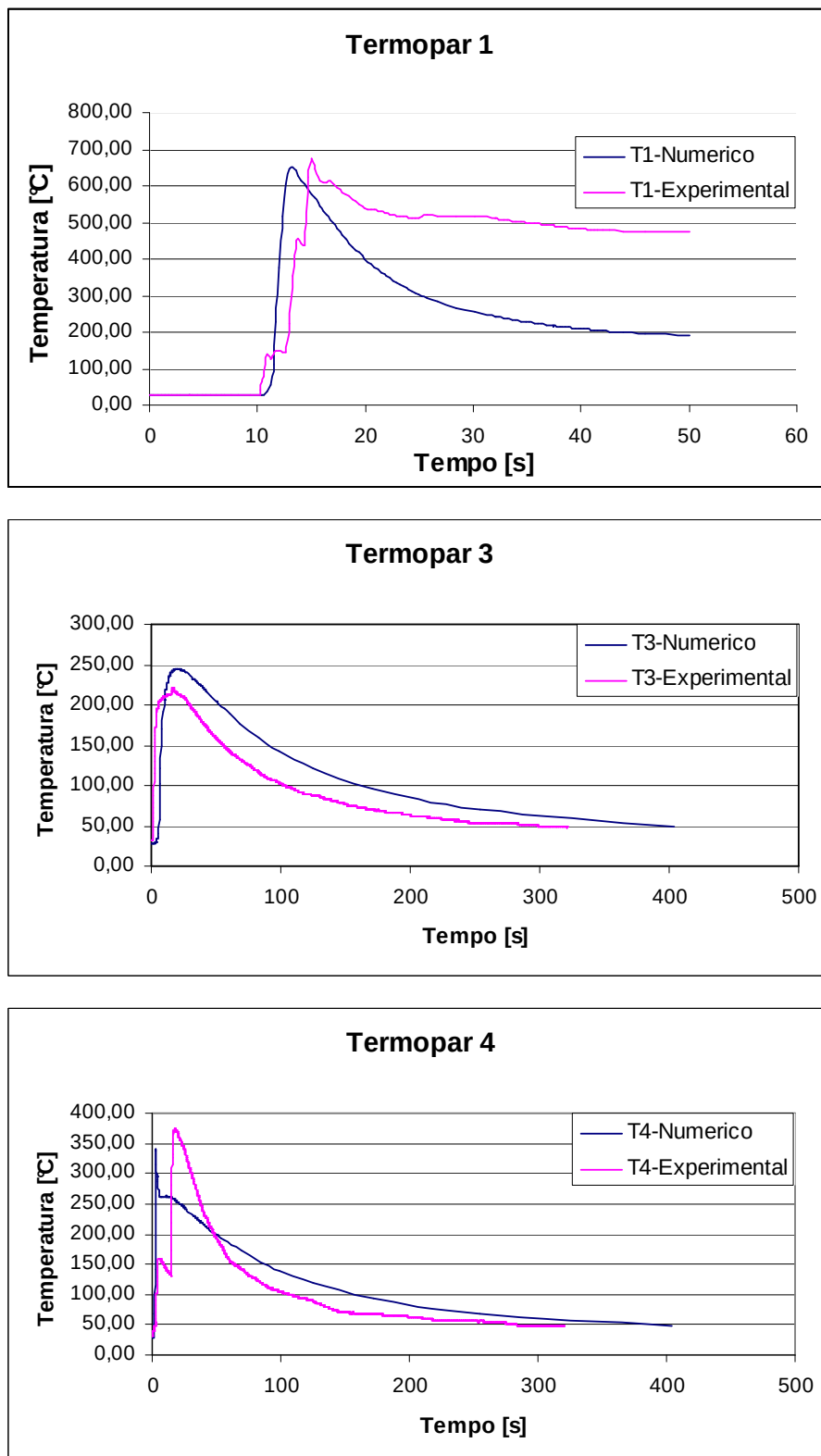


Figura 4.17 – Comparação do campo de temperatura para os pontos selecionados.

A Figura 4.18 mostra os deslocamentos com a evolução do tempo para o conjunto como um todo, enquanto que a Fig. 4.19 mostra o deslocamento final após o resfriamento.

Em azul observa-se deslocamento zero que aumento até o tom de vermelho onde o deslocamento é máximo.

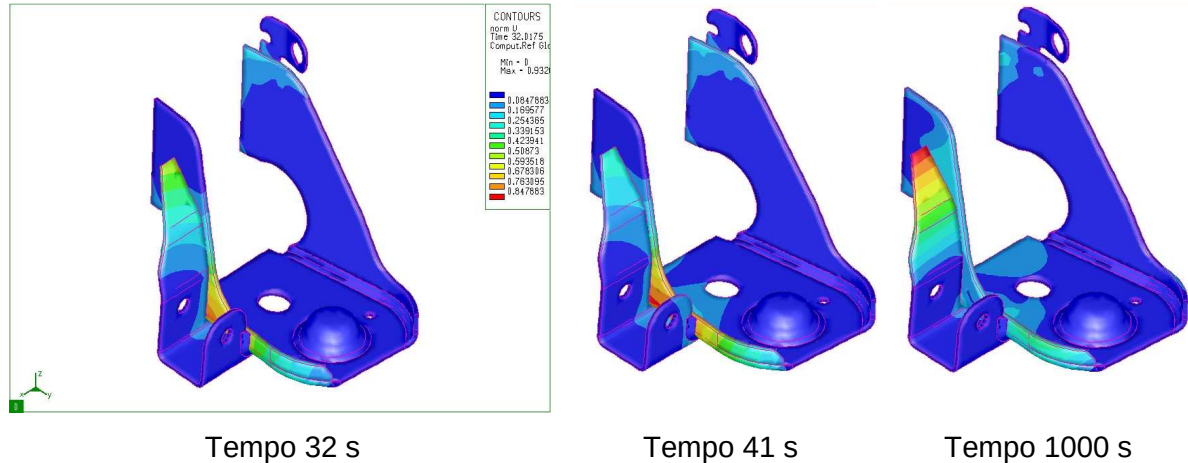


Figura 4.18 – Campo de deslocamento em alguns instantes de tempo (mm).

Para a comprovação dos resultados numéricos obtidos para o deslocamento final e apresentados na Figura 4.19, utilizou-se de uma mesa de medição tridimensional (DEA/Image Global). Nestas medições foram obtidos os deslocamentos finais de alguns pontos em relação à condição inicial.

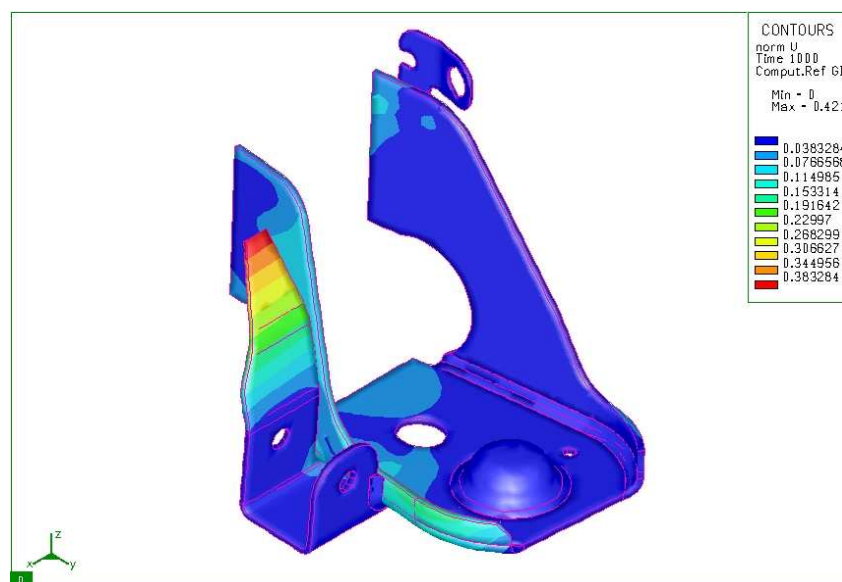


Figura 4.19 – Deslocamento após resfriamento (mm).

A comparação entre os pontos medidos e os pontos simulados pode ser observada através da Figura 4.20 nas direções X, Y e Z.

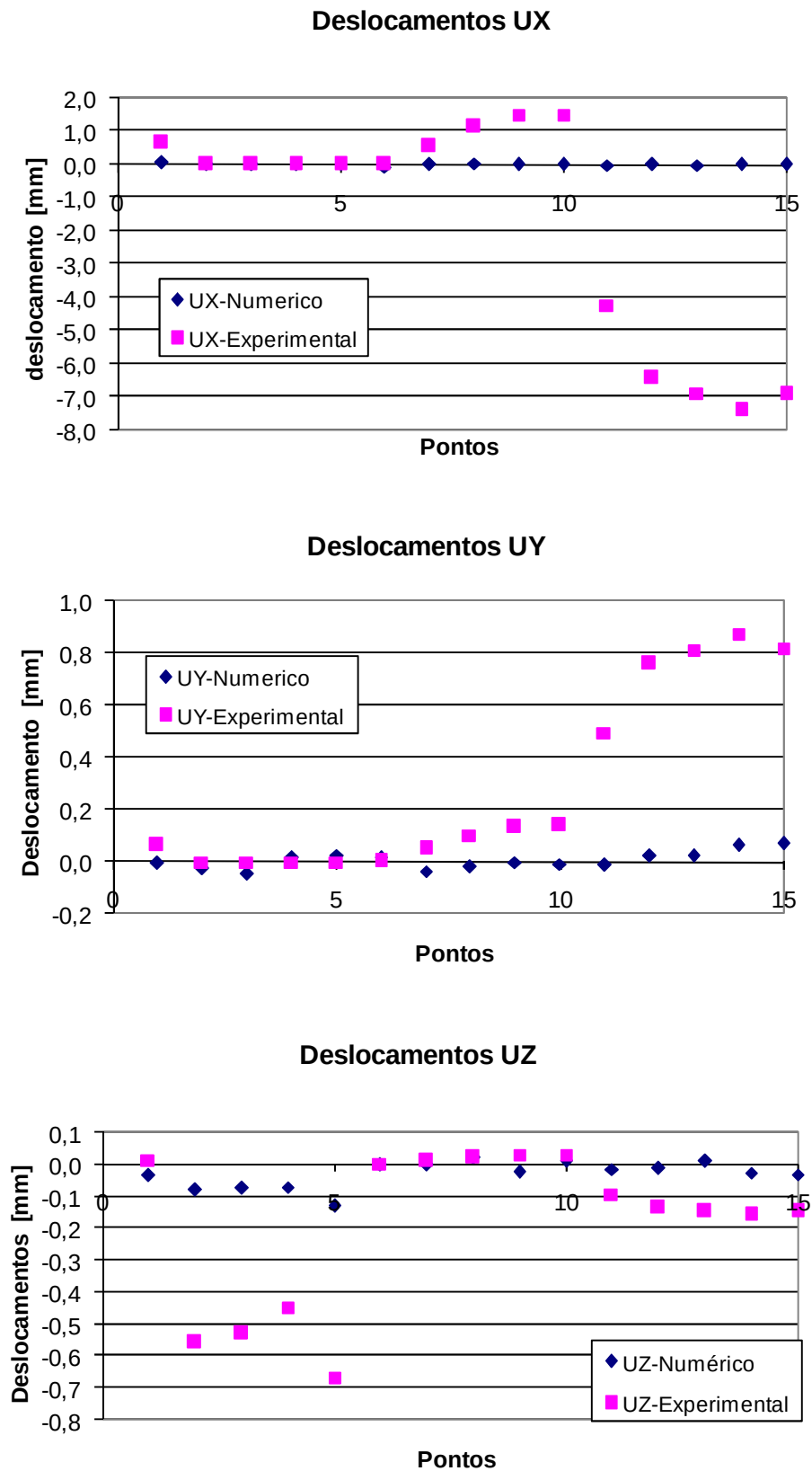


Figura 4.20 – Comparação numérico-experimental dos deslocamentos para alguns pontos nas direções X, Y e Z.

Como observado através da Figura 4.20, os resultados obtidos experimentalmente se mostraram bastante discordantes daqueles obtidos numericamente impossibilitando uma análise detalhada dos mesmos. Ressalta-se que as diferenças obtidas são de mais de uma ordem de grandeza. Na literatura (Tsirkas et al. 2002), as deformações estão numa faixa 0 a 4 mm.

Também foram obtidas as tensões residuais no componente devido à soldagem. Como esperado nas regiões dos cordões de soldas, podem ser observadas tensões residuais de tração conforme Fig. 4.21 a seguir. As tensões residuais não foram avaliadas experimentalmente por não haver recursos disponíveis para tal.

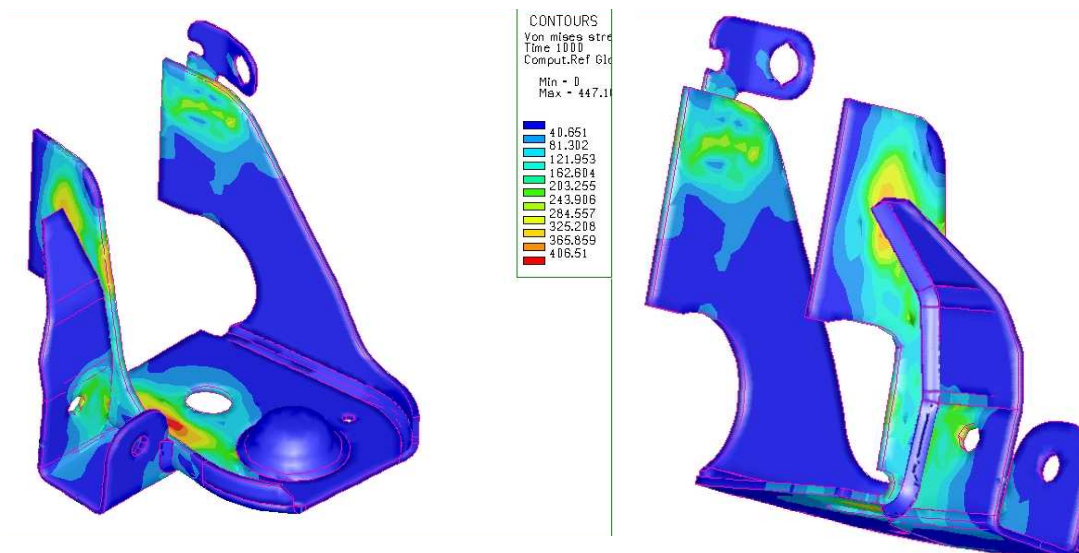


Figura 4.21 – Tensões Residuais de Soldagem.

Nas Figuras 4.22 e 4.23 observa-se a proporção de fases no componente após a soldagem para as fases 1 e 2 respectivamente. A fase 1, ferrita, é observada em quase todo o material exceto nos cordões enquanto que a fase 2, bainita, pode ser observada em todos os cordões de solda. Este resultado é esperado, haja vista o aço baixo carbono utilizado (Kou, 2003). Entretanto, não foi avaliado experimentalmente.

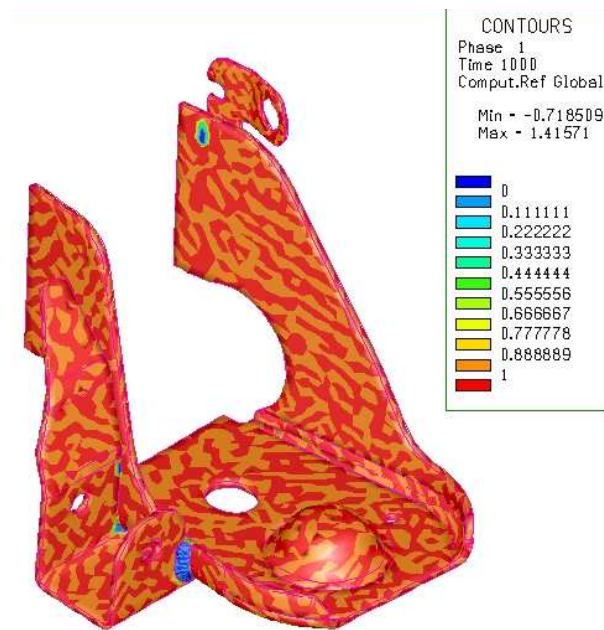


Figura 4.22 – Proporção de Ferrita no componente após soldagem.

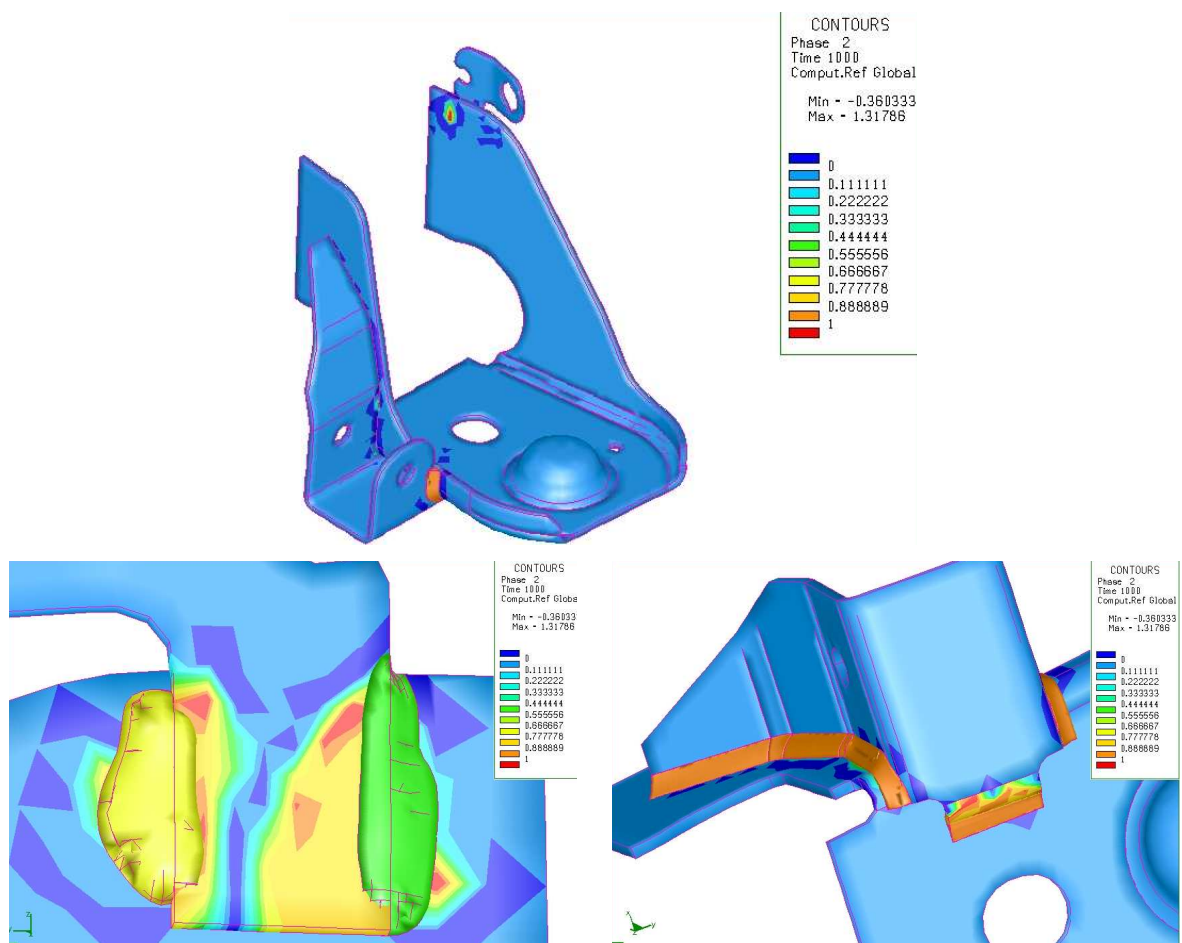


Figura 4.23 – Proporção de bainita nos cordões após soldagem.

4.2 – Resultados para o Estudo das Juntas de Topo

Os resultados obtidos para o estudo das juntas de topo estão mostrados através da Tabela 4.5, construída a partir dos resultados de cada uma das simulações realizadas. Na tabela $\Delta T_{8/5}$ (°C) é o tempo de resfriamento entre 800 e 500°C.

Tabela 4.5 – Resultados obtidos para as 36 simulações.

Parâmetros					Resultado		
	Espessura (mm)	Fonte	Folga (mm)	Fixação (Grampos)	Deslocamento Max (mm)	Tensão Max (MPa)	$\Delta T_{8/5}$ (°C)
1	2	ALTA	0,0	0	0,68	312	11,4
2	2	ALTA	0,0	4	0,78	318	11,2
3	2	ALTA	0,0	6	1,33	316	11,2
4	2	ALTA	0,5	0	2,17	244	10,5
5	2	ALTA	0,5	4	0,84	240	10,5
6	2	ALTA	0,5	6	0,81	309	11,2
7	2	ALTA	1,0	0	0,91	239	10,8
8	2	ALTA	1,0	4	0,98	238	10,7
9	2	ALTA	1,0	6	1,31	235	10,7
10	2	BAIXA	0,0	0	0,60	332	9,4
11	2	BAIXA	0,0	4	0,47	339	9,2
12	2	BAIXA	0,0	6	0,70	341	9,2
13	2	BAIXA	0,5	0	1,17	262	8,8
14	2	BAIXA	0,5	4	0,93	263	8,8
15	2	BAIXA	0,5	6	0,77	266	8,8
16	2	BAIXA	1,0	0	0,68	266	8,9
17	2	BAIXA	1,0	4	0,78	263	9,0
18	2	BAIXA	1,0	6	5,35	267	9,0
19	3	ALTA	0,0	0	0,45	335	10,4
20	3	ALTA	0,0	4	0,38	343	10,5
21	3	ALTA	0,0	6	3,08	347	10,5
22	3	ALTA	0,5	0	1,80	260	10,1
23	3	ALTA	0,5	4	0,82	258	10,0
24	3	ALTA	0,5	6	2,15	260	10,0
25	3	ALTA	1,0	0	1,05	262	10,0
26	3	ALTA	1,0	4	0,92	260	10,1
27	3	ALTA	1,0	6	2,58	261	10,1
28	3	BAIXA	0,0	0	0,71	344	8,1
29	3	BAIXA	0,0	4	2,00	352	8,1
30	3	BAIXA	0,0	6	2,05	354	8,1
31	3	BAIXA	0,5	0	2,00	258	7,9
32	3	BAIXA	0,5	4	0,71	258	7,9
33	3	BAIXA	0,5	6	0,65	260	7,9
34	3	BAIXA	1,0	0	3,15	229	13,9
35	3	BAIXA	1,0	4	2,38	229	13,9
36	3	BAIXA	1,0	6	1,78	256	8,1

A seguir são descritas as análises estatísticas com o auxílio do software Statistica®, visando obter os parâmetros que mais influenciam em cada resposta.

Os resultados da análise de variância são mostrados na Tabela 4.6 para o deslocamento máximo, onde se obteve um ajuste $R^2=0,28547$, de baixa representatividade e melhor visualizado na Figura 4.23. Na Figura 4.24a pode ser visualizada a influência da variação da espessura sobre o deslocamento máximo. Dentre as influências observadas, a mais notada é o aumento do deslocamento com o aumento na folga (Figura 4.24c), porém com um nível de significância estatística de 92,8%, ou seja, menor que 95%. Isto pode ser justificado pelo fato de que quanto maior a folga, maior a quantidade de material depositado, direcionando para uma maior deformação (Lucas, 2004). Pode se também traçar considerações sobre o efeito da fixação no deslocamento máximo (Figura 4.24d). Este efeito se apresentou de forma quadrática, onde o maior deslocamento obtido (maior deformação) ocorreu com o maior número de restrições.

Tabela 4.6 – Resultado da análise de variância para o deslocamento máximo.

Fator	P	Coeficiente
Média	0,000000	1,06564
Espessura (L)	0,199973	-0,23074
Fonte (L)	0,504742	-0,85561
Folga (L)	0,071752	-0,06787
Folga(Q)	0,501266	-0,90936
Fixação (L)	0,130619	-0,18854
Fixação (Q)	0,092221	-1,26305

"L" se refere à componente linear do efeito, ao passo que "Q" ao seu termo quadrático.

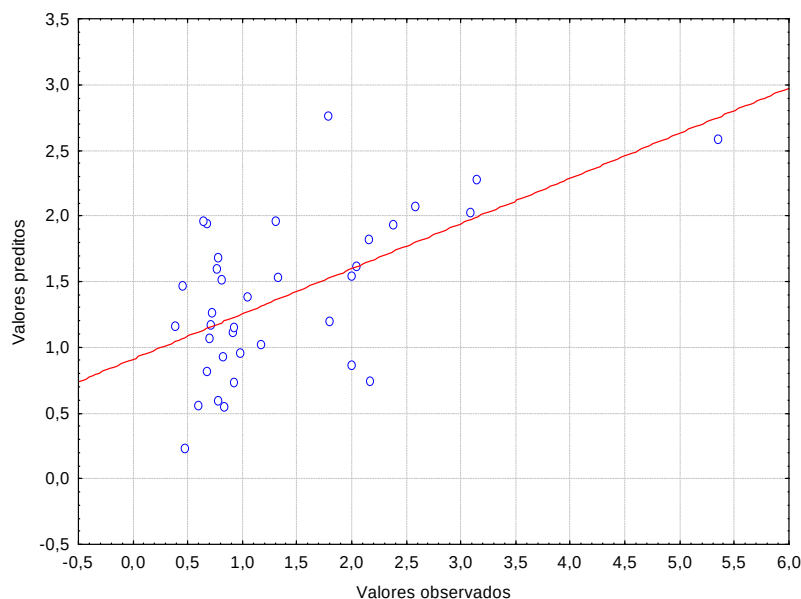


Figura 4.23 – Valores observados versus preditos para o deslocamento máximo.

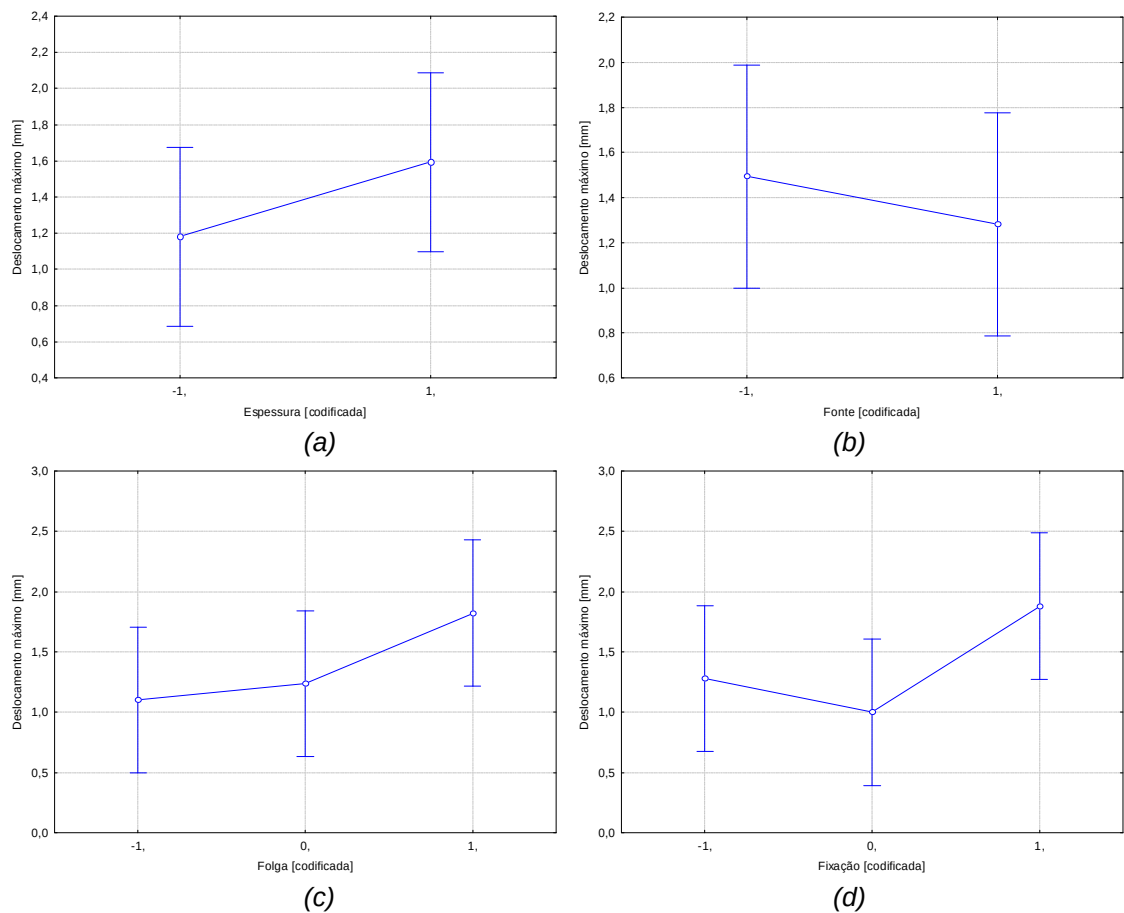


Figura 4.24 – Efeitos médios observados para o deslocamento máximo.

Os resultados da análise de variância são mostrados na Tabela 4.7 para o $\Delta T_{8/5}$, com um ajuste $R^2=0,35$. Este ajuste ruim pode ser comprovado pela Figura 4.25. Na Figura 4.26a pode ser visualizada a influência da variação da espessura sobre o $\Delta T_{8/5}$. Dentre as influências observadas, a mais notada é o aumento da variação da temperatura de resfriamento entre 800 °C e 500 °C com o aumento da fonte de calor (Figura 4.26b), ocorrendo com um nível de significância estatística de 99,6%. Isto pode ser justificado pelo fato de que, quanto maior a fonte, maior a quantidade de calor que deve ser liberada, direcionando para um maior tempo de resfriamento (Poorhaydari, *et al.*, 2005). Os demais fatores não apresentaram efeito significativo sobre o $\Delta T_{8/5}$.

Tabela 4.7 – Resultado da análise de variância para o $\Delta T_{8/5}$.

Fator	P	Coeficiente
Média	0,000000	9,850644
Espessura (L)	0,638546	-0,102505
Fonte (L)	0,003029	0,698672
Folga (L)	0,233503	0,321785
Folga(Q)	0,112121	-0,375266
Fixação (L)	0,398881	-0,226443
Fixação (Q)	0,668810	0,098981

“L” se refere à componente linear do efeito, ao passo que “Q” ao seu termo quadrático.

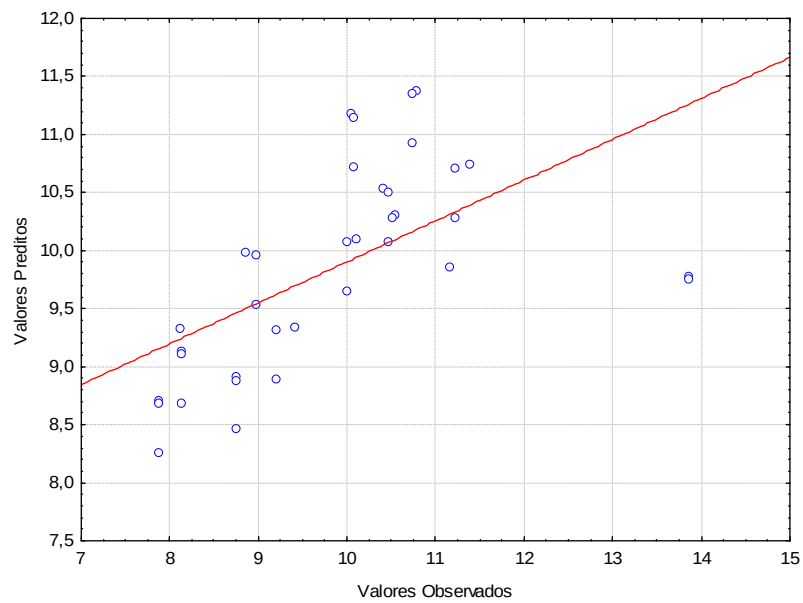


Figura 4.25 – Valores observados versus preditos para o $\Delta T_{8/5}$.

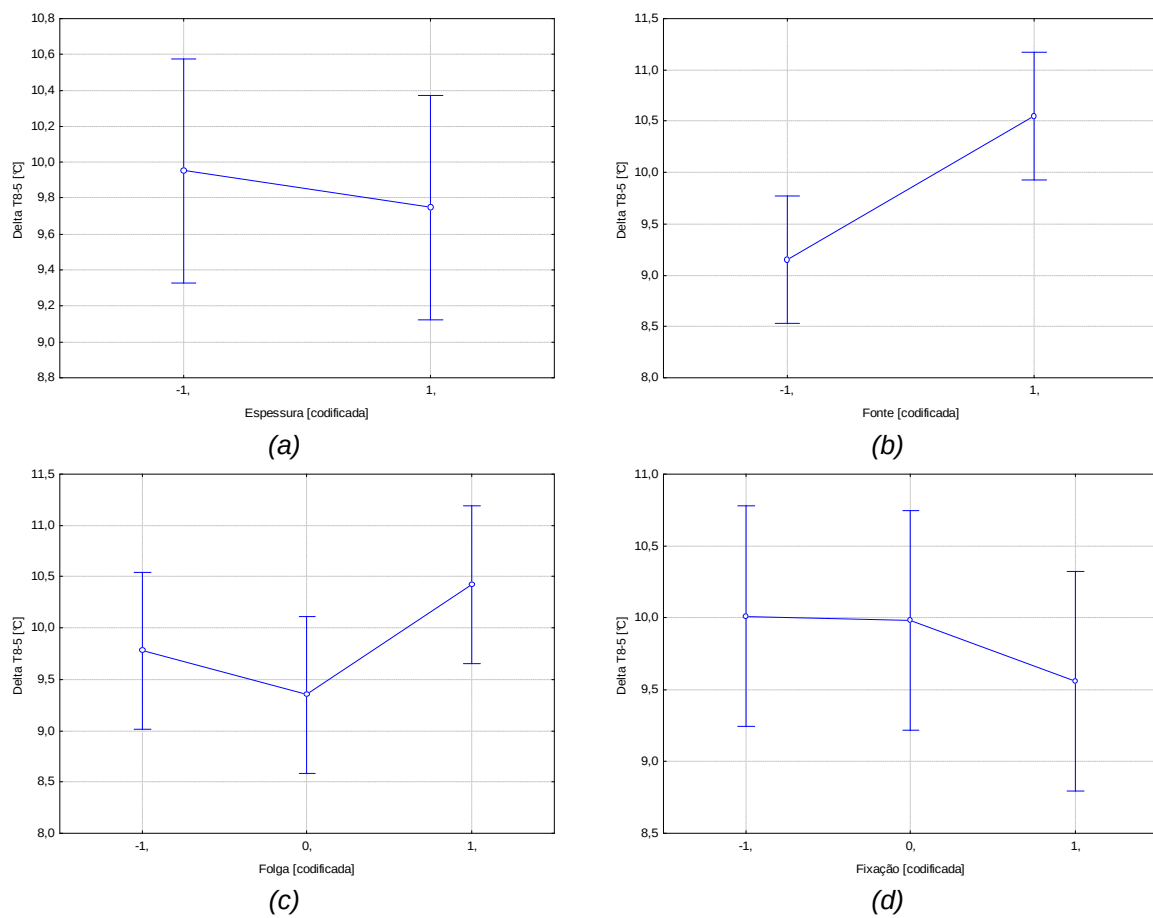


Figura 4.26 – Efeitos médios observados para o $\Delta T_{8/5}$.

Os resultados da análise de variância são mostrados na Tabela 4.8 para a tensão máxima, com um ajuste $R^2=0,89$. Este ajuste pode ser observado através da Fig. 4.27. Na Figura 4.28 pode ser visualizada a influência da variação da espessura, da fonte, da folga e da fixação sobre a tensão máxima. Dentre as influências observadas, a mais notada é a diminuição da tensão máxima com o aumento da folga (Figura 4.28c), ocorrendo com um nível de significância estatística de 100% tanto na forma linear quanto quadrática. Isto pode ser justificado pelo fato de que quanto maior a folga menor será a quantidade de restrições impostas pela peça possibilitando maiores deslocamentos e alívio das tensões (Bezerra, 2006). Pode-se também traçar considerações à respeito do efeito da fixação sobre a tensão máxima (Figura 4.28d). Este efeito se apresentou de forma linear com nível de significância de 91,4%, onde com o aumento das restrições ocorre também um aumento da tensão residual máxima. Isto pode ser justificado devido ocorrer maiores restrições aos deslocamentos para alívio de tensão proporcionando assim um aumento na tensão máxima. (Bezerra, 2006). Quanto à fonte de calor, a fonte alta produz um maior aporte térmico possibilitando assim um gradiente térmico menor na peça soldada, este gradiente elevado é um dos fatores que contribuem para o aumento das tensões residuais. A espessura mostrou-se um fator diretamente proporcional à ocorrência das tensões residuais, porém seriam necessários novos modelos de espessuras diferentes para esta avaliação.

Tabela 4.8 – Resultado da análise de variância para a tensão máxima.

Fator	P	Coeficiente
Média	0,000000	282,6633
Espessura (L)	0,396095	2,1408
Fonte (L)	0,266663	-2,8149
Folga (L)	0,000000	-42,8057
Folga(Q)	0,000002	-15,8105
Fixação (L)	0,086412	5,4027
Fixação (Q)	0,478123	-1,8944

“L” se refere à componente linear do efeito, ao passo que “Q” ao seu termo quadrático.

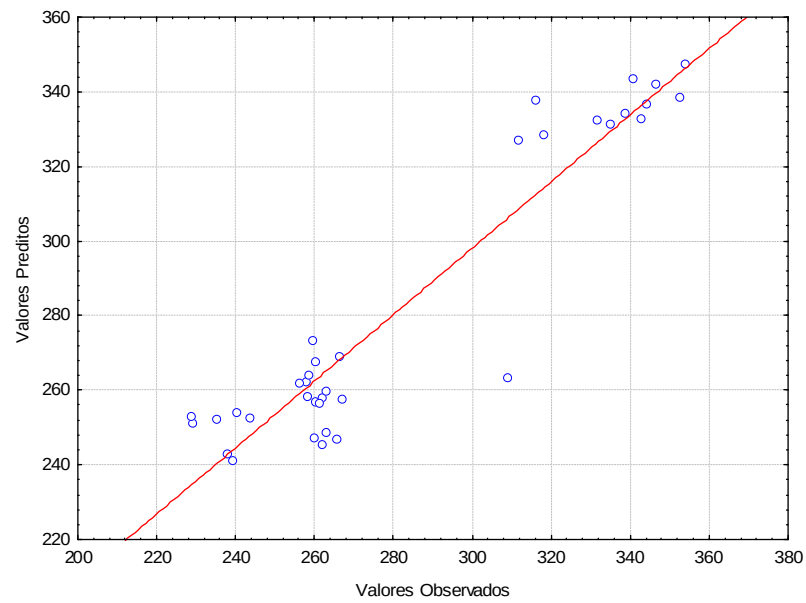


Figura 4.27 – Valores observados versus preditos para a tensão máxima.

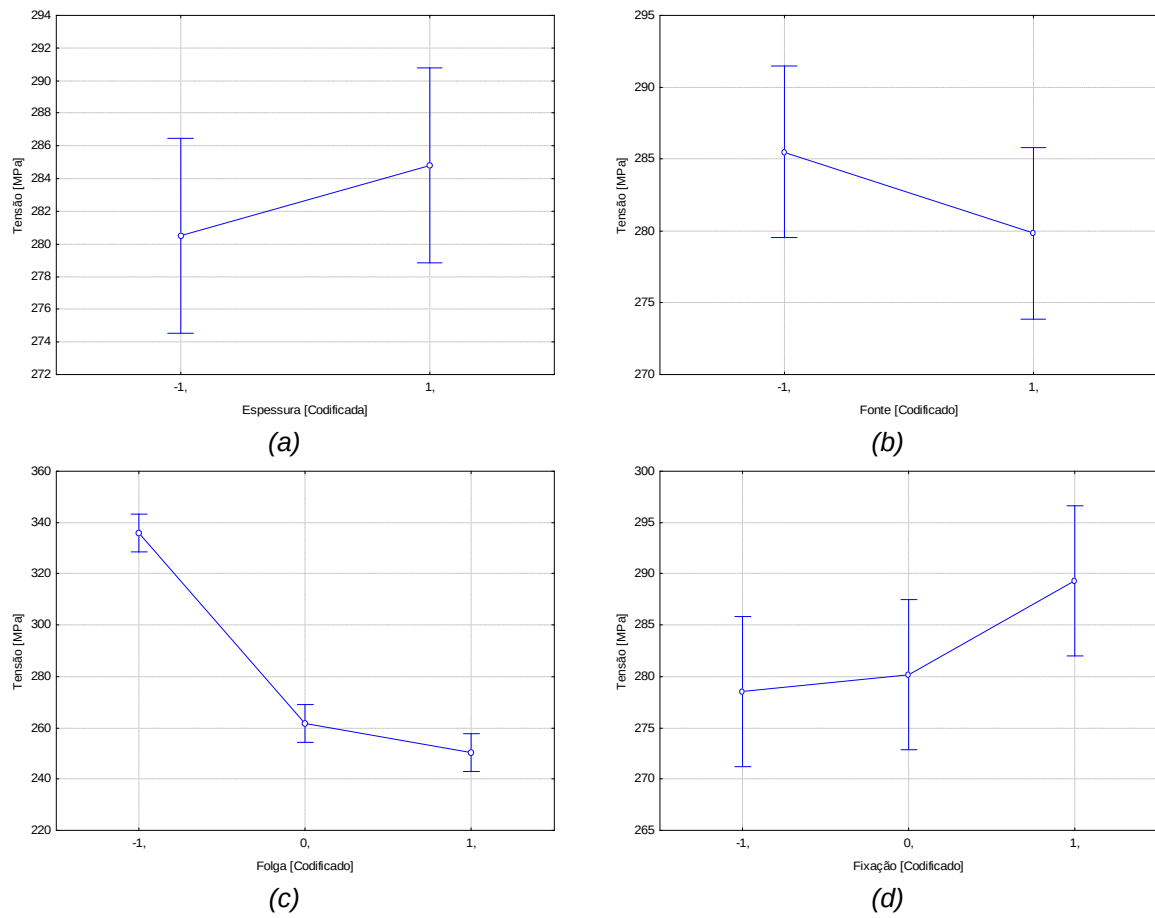


Figura 4.28 – Efeitos médios observados para a tensão máxima.

CAPITULO V

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a criação e validação de uma metodologia para condução de simulações das soldagens de um componente automotivo utilizando-se um software específico para soldagem, o Sysweld®.

- ✓ A metodologia criada se mostrou capaz de levar à execução e conclusão das simulações, partindo-se da comparação entre as macrografias simuladas e experimentais;
- ✓ Foram preditos os campos de temperaturas, campos de deslocamentos e tensões residuais e ainda o percentual de cada fase remanescente no material;
- ✓ Os resultados obtidos para o campo de temperatura e para os deslocamentos se mostraram coerentes, no entanto as medições experimentais realizadas apresentaram discordâncias consideráveis em relação à simulação.

Em uma segunda etapa, visando uma análise mais local da simulação de soldagem, foi mostrada a influência de parâmetros de soldagem (espessura do metal de base, folga da junta, fonte de calor e sistema de fixação), no deslocamento máximo, nas tensões residuais de soldagem e na velocidade de resfriamento do material.

- ✓ Para o deslocamento máximo, o parâmetro que se mostrou mais influente foi a folga, onde ao se aumentá-la notou-se também um aumento na deformação da peça;
- ✓ Já para a variação da taxa de resfriamento entre 800 e 500 °C, o fator mais influente foi a quantidade de calor aplicada à peça, relacionadas de forma proporcional;

- ✓ No caso da tensão residual de soldagem, os fatores que apresentaram maiores influências foram a folga e o sistema de fixação, sendo que a primeira tem influência inversa e a segunda diretamente proporcional.

CAPITULO VI

PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

A obtenção do comportamento da soldagem de estruturas complexas é um desafio constante da indústria automotiva, portanto como continuidade do projeto sugere-se com relação à simulação do componente automotivo:

- ✓ Confirmação das medições experimentais procurando-se apontar as fontes de erro durante o processo que destoou os resultados numéricos dos experimentais;
- ✓ Uma análise microestrutural da porcentagem final de cada fase após a soldagem, o que poderá proporcionar uma melhor confiabilidade ao software na simulação da soldagem;
- ✓ Também seria interessante um estudo das propriedades termofísicas do material utilizado obtendo a variação das propriedades do material com a temperatura em cada fase do mesmo;
- ✓ Realizar uma análise experimental das tensões residuais de soldagem em alguns pontos do componente visando comparação com os resultados do Sysweld®;
- ✓ Simulação do restante do componente de maneira a se obter o comportamento completo da soldagem de um eixo traseiro de um automóvel tipo *hatch*.

Com relação ao estudo numérico de juntas, sugere-se como trabalhos futuros:

- ✓ Realizar o estudo das juntas restantes, junta T e sobreposta, investigando a influência de parâmetros como folga, espessura, fixação e fonte sobre o comportamento de estruturas submetidas à soldagem;
- ✓ Repetir os estudos de juntas considerando variações com mais níveis.

CAPITULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARSOUM, Z. Residual stress analyses and fatigue of multi – pass welded tubular structures. **Engineering Failure Analysis**, Vol. 15, pp. 864-874, 2007.

BEZERRA A.C. **Simulação Numérica da Soldagem com Aplicação à Caracterização do Comportamento Dinâmico de Estruturas Soldadas**. 2006. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

BLOM F.J.e CHURCH J.M. Welding Simulation & Helium Damage Modelling. **Proceeding of International Conference on Metal Fabrication and Welding Tecnology**, Nottingham, 16-18 September 2003.

BRAND, M. e SIEGELE, D. Numerical Simulation of Distortion and Residual Stresses of Dual Phase Steels Weldments. **Welding in the Word**, Vol. 51, nº9/10, 2007.

BROWN, S.B., AND SONG, H. Finite element simulation of welding of large structures. **Journal of Engineering for Industry** 114:441-451, 1992.

CHO, J.R., LEE, B.Y., MOON, Y.H E VAN TYNE, C.J. Investigation of Residual Stress and Post Weld Treatments of Multi-Pass Welds by Finite Element Method and Experiments. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 155-156, pp. 1690-1695, 2004.

CULLITY, B.D. **Elements of X-Ray Diffraction**. Second edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1978.

DEPRADEUX, L. **Simulation Numerique du Soudage – Acier 316L – Validation sur Cas Tests de Complexite Croissante**. 2004. Tese de Doutorado, Ecole Doctorale des Sciences de L'Ingenieur de Lyon, L'Institut National des Sciences Appliquees de Lyon.

FASSANI, R.N.S E TREVISAN, O.V. Analytical Modeling of Multipass Welding Process with Distributed Heat Source. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. Vol. XXV, No. 3, pp. 302-305, 2003.

FONSECA, M.P.C.; COSTA, W.S.; CHAVES, F.R.S.; PARDAL, J.M.; MARQUES Jr, A.S. Estudo das Propriedades Mecânicas e Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Aço ABRL Bifásico Usado na Indústria Automobilística. **VIII Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecânica**, 8, 2007, Cusco.

FRANCIS, J.D. **Welding Simulations of Aluminum Alloy Joints by Finite Element Analysis**. 2002. Dissertação de Mestrado, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

FREE, J.A. E GOFF, R.F.D.P. Predicting Residual Stresses in Multi-Pass Weldments with the Finite Element Method. **Computers and Structures**. Vol. 32, n. 2, pp. 365-378, 1989.

FRICKE, S., KEIM, E. E SCHMIDT, J. Numerical Weld Modeling – a Method for Calculating Weld-Induced Residual Stresses. **Nuclear Engineering and Design**. Vol. 206, pp. 139-150, 2001.

HONG, J.K., TSAI, C.-L. E DONG, P. Assessment of Numerical Procedures for Residual Stress Analysis of Multipass Welds. **Welding Journal**. Vol. 77, n. 9, pp. 372-382, 1998.

KAMTEKAR, A.G. The Calculation of Welding Residual Stresses in Thin Steel Plates. **International Journal of Mechanical Sciences**. Vol. 20, pp. 207-227, 1978.

KANDIL, F.A., LORD, J.D., FRY, A.T. e GRANT, P.V. **A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection**. 2001. NPL Materials Centre, UK.

KOU, S. **Welding Metallurgy** 2003. 2nd Edition. Wiley-Interscience, 480p.

LINDGREN, L.-E., HÄGGBLAD, H.-Å., MCDILL, J.M.J. E ODDY, A.S. Automatic Remeshing for Three-Dimensional Finite Element Simulation of Welding. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. Vol. 147, pp. 401-409, 1997.

LINDGREN, L.-E.; JOSEFSON, B.L. Welding Residual Stresses and Distortions Simulated by the use of Simplified Methods. **Recent Advances in Welding Simulation**. S708/001, 2000.

LU, J., JAMES, M. E ROY, G. **Handbook of Measurement of Residual Stresses**. Society for Experimental Mechanics, Inc., 1996.

LUCAS, W. Distortion - Prevention by fabrication techniques. **TWI Job knowledge for welders**. Disponível em < <http://www.twi.co.uk/content/jk36.html>>, 2004.

MASUBUCHI, K. **Analysis of Welded Structures. Residual Stresses, Distortion and their Consequences**. First Edition, New York, EUA, Pergamon Press, 1980.

MENDELSON, A. **Plasticity: Theory and Application**. Macmillan, U.S.A., 353 p., 1968.

MICHALERIS, P.; DEBICCARI, A.; Prediction of Welding Distortion, **Welding Journal**, 76, 172-181, 1997.

MIKAMI, Y.; MOCHIZUKI, M.; TOYODA, M.; MORIKAGE, Y. Measurement and Numerical Simulation of Angular Distortion of Fillet Welded T-joints – Welding Angular distortion control by Transformation Expansion of Weld Metals (Report 1). **Welding International**. Vol. 21 (8), pp. 547-560, 2007.

MOCHIZUKI, M., MATSUSHIMA, S., TOYODA, M. E THAULOW, C. Fundamental Study of Thermal Stress Generation During Welding Heat Cycles. Studies on Numerical Simulation of Temperature, Microstructure and Thermal Stress Histories During Welding, and their Application to Welded Structures. **Welding International**. Vol. 19 (9), pp. 702-710, 2005.

NGUYEN, N.T., OHTA, A., MATSUOKA, K., SUZUKI, N. E MAEDA, Y. Analytical Solution of Double-Ellipsoidal Moving Heat Source and Its Use for Evaluation of Residual Stresses in Bead-on-Plate. **International Workshop on Fracture Mechanics & Advanced Materials**. Sydney University, Dec. 8-10, 1999.

PAPAZOGLU, V.J. E MASUBUCHI, K. Numerical Analysis of Thermal Stresses during Welding Including Phase Transformation Effects. **Journal of Pressure Vessel Technology**. Vol. 104, pp. 198-203, 1982.

PARLANE, A.J.A., ALLEN, J.S., HARRISON, J.D., LEGGATT, R.H., DWIGHT, J.B., BAILEY, N., PROCTER, E. E SAUNDERS, G.G. **Residual Stresses and their Effect**. 1981. The Welding Institute, U.K.

POORHAYDARI, K., PATCHETT, B. M., & IVEY, D. G.. Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness. **Welding Journal**, October, pp. 149s-155s, 2005.

RADAJ, D. **Welding Residual Stresses and Distortion – Calculation and Measurement**. DVS Verlag, 2003.

RAMSAY, A.C.A. e MAUNDER E.A.W. Sub-modelling and Boundary Conditions with P-type Hybrid-equilibrium Plate-membrane Elements. **Finite Elements in Analysis and Design**. September, N. 43 pp 155 -167, 2006.

ROBERTS, S.M.; HUNZIKER, O.; DYE, D.; STONE, H.J.; REED, R.C. Nickel-base Superalloy Welding-models for Residual Stress, Distortion and Weldability. **Recent Advances in Welding Simulation**. S708/003, 2000

RODEIRO, P.F. **Análise de Distribuição de Temperaturas e Tensões Residuais em Soldas do Tipo Ring-Weld**. 2002. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ROSENTHAL, D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. **Welding Journal**. Vol. 20, N. 5, pp. 220-234, 1941.

SLANIA, J.; MIKNO, Z.; WOJCIK M.; Temperature Measurement Problems in Welding Processes. **Welding International**. Vol. 21 (8), pp. 589-592, 2007.

SMITH, D.J.; GEORGE, D.; BOUCHARD, P.J.; WATSON, C. Measurement and Prediction of residual Stresses in a Thick Section Steel Welds. **Recent Advances in Welding Simulation**. S708/005, 2000.

SYSWELD. **Welding Wizard Reference Manual**. ESI Group, 2006.

TSIRKAS, S.A.; PAPANIKOS, P.; KERMANIDIS, T. Numerical Simulation of the Laser Welding Process in Butt-joint Specimens. **Journal of Materials Processing Technology** 134, pp 59-69, 2003.

VIEIRA, L.C.; BEZERRA, A.C.; RADE, D.A., Modelagem Térmica do Processo de Soldagem TIG Via Elementos Finitos, **XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, 12, Agosto, 2005, Ilha Solteira-SP.

VIEIRA, L.C.; BEZERRA, A.C.; RADE, D.A., Modelagem Computacional da Soldagem TIG Via Elementos Finitos, **XIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, 13, Agosto, 2006, João Pessoa-PB.

VIEIRA JR, A.B. **Identificação de Tensões em Placas Retangulares a partir de Respostas Vibratórias, com aplicação a Tensões Residuais de Soldagem**. 2003. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia.

WANG, T.; HOPPERSTAD, O.S.; LADEMO, O.G.; LARSEN, P.K.. Finite Element Enalysis of Welded Beam-to-column Joints in Aluminium Alloy ENAW6082 T6. **Finite Elements in Analysis and Design**. november, N. 44 pp 1 -16, 2007.

WITHERS, P. J. E BHADSHIA, H. K. D. H. Residual Stress – I: Measurement techniques. **Materials Science and Technology**. Vol. 17, pp. 355-365, 2001a.

WITHERS, P. J. E BHADSHIA, H. K. D. H. Nature and origins – II: Measurement techniques. **Materials Science and Technology**. Vol. 17, pp. 366-375, 2001b.

ZHU, X.K. E CHAO, Y.J. Effects of Temperatura-Dependent Material Properties on Welding Simulation. **Computers and Structures**. Vol. 80, pp. 967-976, 2002.