

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUIZANE RAMOS DOS SANTOS

**MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLDAS
PONTO POR FRICÇÃO**

**ALEGRETE/RS
2015**

LUIZANE RAMOS DOS SANTOS

**MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLDAS
PONTO POR FRICÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

**ALEGRETE/RS
2015**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S237m Santos, Luizane Ramos

Modelagem numérica do comportamento mecânico de soldas ponto por
fricção / Luizane Ramos Santos.
96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do
Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2015.

"Orientação: Tonilson de Souza Rosendo".

1. Solda ponto por fricção. 2. Modelagem numérica. 3. Elementos finitos.
4. Ansys Workbench. I. Título.

LUIZANE RAMOS DOS SANTOS

**MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLDAS
PONTO POR FRICÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 03 de Julho de 2015.

Banca examinadora:

Prof. Doutor Tonilson de Souza Rosendo
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Doutor Luis Eduardo Kosteski
(UNIPAMPA)

Prof. Doutor Marco Antonio Durlo Tier
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho aos meus pais, Jâne e Luiz pela confiança e apoio.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais Jâne e Luiz, pela confiança e apoio prestados, e por nunca medirem esforços para me manter firme nessa jornada.

À toda minha família pelo incentivo e carinho.

Ao professor Dr. Tonilson Rosendo, pela orientação, paciência, confiança e toda ajuda prestada desde os trabalhos de iniciação científica.

Aos professores que me incentivaram e me inspiraram ao longo da graduação.

Aos técnicos de laboratório e colegas que contribuíram de forma técnica para esse trabalho.

Aos colegas e amigos pelo apoio e parceria, em especial a Luana amizade que levarei com carinho.

Ao Sérgio, por toda ajuda e companheirismo, pelo carinho, amor e por todos momentos juntos.

“Os dias prósperos não vêm por acaso;
nascem de muita fadiga e persistência.”

Henry Ford

RESUMO

O processo de soldagem no estado sólido, Friction Spot Welding (FSpW), é uma técnica que utiliza a energia mecânica e térmica gerada por uma ferramenta rotativa, criando uma união do tipo sobreposta por meio de um ponto de solda. Essa técnica foi, inicialmente, destinada a união de ligas leves, difíceis de serem soldadas por métodos convencionais (como a solda por resistência elétrica, por exemplo). Virtualmente, qualquer material que apresente um certo grau de plasticidade pode ser soldado por essa técnica. Além de permitir a união de materiais difíceis de serem soldados por processos convencionais, o FSpW praticamente não gera resíduos, não emite gases poluentes e, por não haver a inclusão de outro material para união, facilita a reciclagem. Por ser um processo relativamente novo (patenteado em 2005), é necessário estudá-lo de modo a conhecer os parâmetros que resultam nas melhores características, permitindo reprodutibilidade das juntas e maior confiabilidade. Neste sentido, o estudo do comportamento mecânico da junta é de grande valia, pois é um aspecto importante a ser considerado na escolha de processos de soldagem a serem utilizados em projetos na área de engenharia. Esse trabalho teve como objetivo realizar um estudo de abordagens para simulação do comportamento mecânico de soldas FSpW, sob solicitação de cisalhamento. Inicialmente foi feita uma extensa revisão bibliográfica sobre o processo com a finalidade de adquirir conhecimento sobre o comportamento mecânico de juntas FSpW. Foi utilizado o software ANSYS WORKBENCH para criação de dois modelos, sendo um modelo abrangendo o regime elásto-plástico da junta, e um modelo baseado na simulação do descolamento da interface entre as chapas. A implementação dos modelos foi realizada utilizando dados experimentais de amostras FSpW, como o perfil de microdureza e curvas força x deslocamento obtidas em ensaio de cisalhamento. Diferentes abordagens de material foram testadas e os resultados numéricos foram comparados com a curva experimental. Verificou-se a condição de contato do modelo como sendo a principal característica para definição do comportamento numérico de forma a reproduzir o comportamento real.

Palavras-Chave: Friction Spot Welding. Comportamento mecânico. Modelagem numérica.

ABSTRACT

The Friction Spot Welding (FSpW) is a technique that uses mechanical and thermal energy generated by a rotating tool, creating joints by a spot weld. This technique was initially designed to joining light alloys that are difficult to weld by conventional methods (such as resistance electric welding, for example). Virtually any material with a certain amount of plasticity can be welded by this technique. Besides allowing the union of materials that can not be welded by conventional methods, the FSpW generates almost no waste, does not emit pollutant gases and, because there is no inclusion of other material for marriage, facilitates recycling. Being a relatively new process (patented in 2005), it is necessary to study it in order to know the parameters that result in the best features, allowing reproducibility of the joints and greater reliability. Thus, the study of the mechanical behavior of the joint is of great value as it is an important aspect to be considered in the choice of welding processes to be used in projects in engineering. The objective of this work was study approaches for simulating the mechanical behavior of welds FSpW in shear request. Initially, it made an extensive literature review on the process in order to gain knowledge about the mechanical behavior of FSpW joins. Was used the ANSYS WORKBENCH software for creating two models, one model covering the elastic-plastic joint regime, and a model based on simulation of the interface delamination between the plates. The implementation of the models was performed using experimental datas from FSpW specimens, as the hardness profile and force-displacement curves obtained from shear test. Different approaches of material were tested and the numerical results were compared with the experimental curve. It was the model contact condition as the main feature for setting the numerical behavior so as to reproduce the real behavior.

Keywords: Friction Spot Welding; Mechanical behavior; Numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Ilustração do processo FSW e características da ferramenta..... | 21 |
| Figura 2 - Junta FSSW da liga AA6061-T6 (a) visão geral junta sobreposta (b) detalhe botão de solda chapa superior (c) Detalhe botão de solda chapa inferior | 22 |
| Figura 3- Esquema do processo de solda FSSW. (a) penetração. (b) mistura (c) saída. | 23 |
| Figura 4 - Representação esquemática da ferramenta usada no FSpW. Detalhe dos componentes: pino, camisa e anel de fixação, respectivamente..... | 24 |
| Figura 5 - Esquema das etapas do processo FSpW com penetração da camisa | 24 |
| Figura 6- Exemplo junta soldada pelo FSpW com detalhes característicos da solda. | 25 |
| Figura 7- Macrografia das zonas de solda FSpW | 25 |
| Figura 8 - Microestrutura de solda ponto FSpW liga AA6181-T4 | 27 |
| Figura 9- Perfil de microdureza de junta FSpW liga AA6181-T4 (2900 rpm/ 3s)..... | 29 |
| Figura 10-Perfil de microdureza de juntas FSpW da liga AA7075-T6 | 29 |
| Figura 11 - Comportamento mecânico de juntas FSpW da liga AA7075-T6 (a) Ensaio de cisalhamento. (b) Ensaio de tração. | 30 |
| Figura 12 - Resistência mecânica de juntas FSpW da liga AA6181-T4 sob ensaios de cisalhamento. | 30 |
| Figura 13- Gráfico tensão-deformação de engenharia..... | 31 |
| Figura 14 - Tipos básicos de deformação e fratura | 33 |
| Figura 15- Círculo de Mohr das tensões. | 34 |
| Figura 16- Hexágono de Tresca..... | 35 |
| Figura 17- Comparação gráfica dos critérios de Tresca e de von Mises..... | 36 |
| Figura 18- Modos de falha em soldas FSpW da liga 7075-T6 sob ensaio de cisalhamento | 37 |
| Figura 19 - Rigidez da mola representada pela constante k. | 41 |
| Figura 20 - Comparação entre os casos de uma única rigidez e de uma matriz de rigidez, para representação de um componente. | 42 |
| Figura 21 - Método Newton-Raphson. O gráfico da direita mostra quatro iterações. | 44 |
| Figura 22 - Critério de von Mises num estado espaço tridimensional de tensões. | 45 |
| Figura 23 - Relação entre as tensões no espaço e no estado uniaxial para um material isotrópico. | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 - Modelo de encruamento cinemático..... | 46 |
| Figura 25 - Modelo de encruamento isotrópico..... | 46 |
| Figura 26 - Tipo de curva de plasticidade usadas no ANSYS WORKBENCH..... | 47 |
| Figura 27 - Critério de convergência pela força de desequilíbrio..... | 48 |
| Figura 28 - Exemplos dos tipos básicos de elementos..... | 49 |
| Figura 29 - Exemplos de grau de liberdade (a) Ponto no espaço (b) Corpo rígido... | 49 |
| Figura 30 - Elemento SOLID186 da plataforma ANSYS..... | 51 |
| Figura 31 - Elemento SOLID187 plataforma ANSYS..... | 52 |
| Figura 32 - Elementos finitos de contato com e sem penetração..... | 54 |
| Figura 33 - Superfícies com rigidez de contato devido a penetração..... | 55 |
| Figura 34 - Elementos em contato na formulação MPC..... | 56 |
| Figura 35 - Esquema dos modos de falha do tipo I e II..... | 58 |
| Figura 36 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho..... | 62 |
| Figura 37 - Vista explodida da geometria..... | 63 |
| Figura 38 - Dimensão das chapas..... | 64 |
| Figura 39 - Dimensão das zonas das soldas..... | 64 |
| Figura 40 - Curva tensão x deformação da liga 6181-T4..... | 65 |
| Figura 41 - Perfil de microdureza modelo experimental, utilizado como referência para o estabelecimento das propriedades dos materiais nas diferentes zonas da solda..... | 66 |
| Figura 42 - Condições de contato no modelo inicial. (a) Contato entre ZTMA e a chapa inferior. (b) Contato entre a ZTMA e a chapa superior. e (c) Contato entre a ZM e a ZTMA..... | 67 |
| Figura 43 - Ensaio de cisalhamento (a) ensaio de uma amostra experimental e (b) figura esquemática do ensaio..... | 68 |
| Figura 44 - Condições de carregamento inseridas no modelo numérico..... | 69 |
| Figura 45 - Vista explodida segundo modelo..... | 70 |
| Figura 46 - Dimensões da região da solda..... | 70 |
| Figura 47 - Condição de contato do segundo modelo. (a) e (b) contato da ZM com as chapas superior e inferior respectivamente e (c) contato entre as partes superior e inferior da ZM na interface entre as chapas (região de descolamento)..... | 71 |
| Figura 48 - Perfil de microdureza experimental ao longo do botão de solda FSpW tomada como referência para este estudo..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 49 - Representação dos materiais no caso 1 (a) Regiões do perfil de microdureza (b) Curvas dos materiais criados. | 74 |
| Figura 50- Representação dos materiais no caso 2 (a) Regiões do perfil de microdureza (b) Curvas dos materiais criados. | 75 |
| Figura 51 - Representação dos materiais no caso 3 (a) Regiões do perfil de microdureza (b) Curvas dos materiais criados. | 76 |
| Figura 52 - Representação dos materiais no caso 4 (a) Regiões do perfil de microdureza (b) Curvas dos materiais criados. | 77 |
| Figura 55 - Malha gerada no modelo 1 (a) Malha automática (b) Primeiro refinamento (c) Malha refinada | 78 |
| Figura 56 - Comparação dos resultados em função do refinamento da malha. | 79 |
| Figura 57 - Comparação dos resultados em função do número de iterações. | 80 |
| Figura 53 – Comparação das curvas Força x Deslocamento para solicitação de cisalhamento, obtidas numericamente (considerando os casos 1, 2, 3 e 4) e experimentalmente. | 81 |
| Figura 54 – Teste do comportamento do modelo 1 fazendo todos os elementos com o mesmo material, para cada uma das três zonas de solda (ZM, ZTMA e metal base) | 82 |
| Figura 58 - Comparação curvas dos ensaios experimental e numérico para o modelo de descolamento baseado em zona coesiva..... | 85 |
| Figura 59 - Visão geral do modelo 2. | 87 |
| Figura 60 - Visão em detalhe da região de descolamento do modelo 2..... | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Opções de edição da malha no software ANSYS WORKBENCH. | 50 |
| Tabela 2 - Composição da liga Al 6181-T4 utilizada no modelo experimental..... | 65 |
| Tabela 3 - Propriedades mecânicas inseridas no modelo experimental..... | 65 |
| Tabela 4 -Propriedades exigidas para implementação do material de modelo coesivo no ANSYS WORKBENCH. | 72 |
| Tabela 5 - Ordem de grandeza estimada para o modelo do material. | 84 |
| Tabela 6 - Propriedades dos materiais. | 85 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APDL – ANSYS Parametric Design Language

CAD – Computer Aided Design

CZM – Cohesive Zone Model

EDP – Equação Diferencial Parcial;

FSpW – Friction Spot Welding;

FSSW – Friction Stir Spot Welding;

FSW – Friction Stir Welding;

GKSS – GeseUPschaft für Kernenergie in Schiffbau und Schifffahrt;

HZG – Helmholtz- Zentrum Geesthacht;

MDF- Método das Diferenças Finitas;

MEF – Método dos Elementos Finitos

MVF – Método dos Volumes Finitos;

RPM – Rotação Por Minuto;

RSW – Resistance Spot Welding;

TWI – The Welding Institute;

ZM – Zona de Mistura;

ZTA – Zona Termicamente Afetada;

ZTMA – Zona Termo Mecanicamente Afetada;

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 1.1 Justificativa..... | 18 |
| 1.2 Objetivos..... | 19 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 Processos de soldagem no estado sólido | 20 |
| 2.1.1 Friction Stir Welding..... | 21 |
| 2.1.2 Friction Stir Spot Welding | 22 |
| 2.1.3 Friction Spot Welding..... | 23 |
| 2.2 Comportamento mecânico dos materiais | 31 |
| 2.2.1 Critérios de falhas estáticas..... | 32 |
| 2.2.2 Critério da tensão máxima de cisalhamento para materiais dúcteis | 34 |
| 2.2.3 Critério da máxima energia de distorção | 35 |
| 2.2.4 Mecanismos de falha em soldas FSpW..... | 36 |
| 2.3 Modelagem numérica: método dos elementos finitos | 37 |
| 2.3.1 Problemas lineares | 40 |
| 2.3.2 Problemas não lineares | 43 |
| 2.3.3 Tipos de elementos | 48 |
| 2.3.4 Condições de contato | 52 |
| 2.3.3. Análise de comportamento de falha | 57 |
| 3 METODOLOGIA | 62 |
| 4 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 73 |
| 4.1 Modelo 1 – Regime elasto-plástico. | 73 |
| 4.1.1 Propriedades do material..... | 73 |
| 4.1.2. Influência da malha e parâmetros de implementação. | 78 |
| 4.2 Modelo 2 – Falha por descolamento baseado em zona coesiva..... | 83 |
| 4.2.1 – Características do material. | 83 |
| 5 DISCUSSÃO..... | 87 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 89 |
| 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 91 |
| 7 REFERÊNCIAS | 92 |

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a eficiência energética é um fator determinante nos projetos de engenharia. Quando se trata de meios de transporte, esse fator torna-se ainda mais significativo, pois além da busca por reduções de custos há também a preocupação ambiental. O desenvolvimento de processos visando a redução da emissão de gases poluentes e a diminuição de resíduos nos processos são alguns exemplos que as novas tecnologias buscam em benefício do meio ambiente.

Ligas leves como as de alumínio e magnésio são amplamente empregadas nos setores automotivo e aeronáutico, na busca por redução de peso dos componentes mecânicos. Industrialmente são utilizados processos de soldagem por resistência elétrica ou rebitagem obtenção de juntas sobrepostas, porém este último oferece desvantagens como aumento do peso da estrutura e elevados custos operacionais. Dentro deste contexto apresentam-se os processos de soldagem no estado sólido que permitem a união de ligas leves, não apresentando os problemas relacionados à fusão do material. Além disso esses processos não necessitam de materiais de adição, não emitem gases poluentes, e praticamente não geram resíduos. (Rosendo, 2009; Campanelli, 2012)

Os processos de soldagem ponto no sólido tem sua origem relacionada ao Friction Stir Welding (FSW) desenvolvido em 1991 no TWI (The Welding Institute) na Inglaterra. Alguns anos depois surgiram o Friction Spot Welding (FSpW) em 1999 e o Friction Stir Spot Welding (FSSW) em 2001. Com o FSW obtém-se um cordão de solda, e com o FSSW e o FSpW, um botão de solda. O diferencial do FSpW frente ao FSSW, é o aspecto final da união, não apresentando o furo decorrente do pino da ferramenta. (Rosendo, 2009)

O FSpW, é um processo relativamente novo, logo necessita de estudos para seu aprimoramento. Neste contexto, a avaliação do comportamento mecânico da junta permite avaliar o grau de reprodutibilidade do processo, e assim validá-lo para aplicações que exijam maior confiabilidade. Conhecendo as propriedades e características da junta é possível definir suas aplicações e restrições, em projetos e a confiabilidade do processo. (Campanelli, 2012)

Neste cenário ferramentas computacionais como o método numérico de elementos finitos, consiste em um apoio no estudo do comportamento de estruturas

mecânicas, minimizando os esforços experimentais, sendo um complemento a estes. Modelos numéricos são ferramentas utilizadas para resolução aproximada de fenômenos físicos, a partir de um modelo teórico que represente o comportamento do fenômeno em estudo. Um conjunto de equações são implementadas para representar matematicamente os parâmetros envolvidos no processo. Esse conjunto de equações geralmente é bastante complexo para ser resolvido analiticamente, assim utilizam-se métodos numéricos para sua resolução. (Costa, 2010)

Os métodos numéricos mais utilizados são: Métodos das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Volumes Finitos (MVF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). (Costa, 2010)

O MEF, é o método mais utilizado nos problemas de engenharia, ele consiste na discretização de um problema em elementos finitos de geometria simples. A solução global do problema é obtida pela soma das soluções de cada elementos. Esse método permite a aplicação em geometrias complexas, e também a subdivisão de regiões de interesse por elementos menores para obtenção de maiores precisões.

Atualmente existem vários softwares comerciais para o trabalho com elementos finitos, tornando a análise de estruturas muito mais rápida, reduzindo o tempo de ciclo de projetos, e melhorando a qualidade geral dos produtos. (Jacob, 2009)

1.1 Justificativa

A obtenção de modelos numéricos representa uma diminuição nos ciclos de projeto, dentre outras vantagens. Por exemplo, ensaios experimentais geram elevados custos e demandam tempo, tornando assim os modelos matemáticos um complemento importante para otimização dessas etapas.

A obtenção de um modelo computacional que represente o comportamento mecânico da junta soldada pelo FSpW, representa uma contribuição para o desenvolvimento do processo, tanto pela disseminação da técnica de soldagem quanto pelo próprio modelo a ser desenvolvido, pois permitirá prever o comportamento mecânico de juntas soldadas, reduzindo os trabalhos experimentais. O desenvolvimento em elementos finitos, embora bastante difundido tanto em pesquisas quanto no desenvolvimentos de projetos de engenharia, ainda é pouco explorado no meio acadêmico de nível de graduação, tornando assim a aplicação do método neste estudo uma oportunidade para o aprofundamento nesta técnica.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar métodos para criar um modelo numérico que reproduza o comportamento mecânico de juntas soldadas pelo processo FSpW sob solicitação de cisalhamento.

Os objetivos específicos são:

- Criar um modelo que contemple as propriedades das diferentes zonas da solda;
- Avaliar o comportamento tensão x deformação do modelo numérico;
- Comparar os resultados numéricos com os experimentais;
- Reproduzir o comportamento da deformação da junta;
- Modelar a união na interface entre as chapas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos de soldagem no estado sólido

Os processos de soldagem no estado sólido são estudados desde meados dos anos 50, quando buscou-se, por meio da energia envolvida no atrito, a união metálica de componentes, sem a necessidade de fusão dos materiais. Em 1991, um novo processo de solda por fricção foi desenvolvido na Inglaterra pelo The Welding Institute (TWI), o Friction Stir Welding (FSW), que em português é conhecido como solda por fricção e mistura mecânica. (The Welding Institute, 2014)

O FSW efetua a união por meio de um cordão de solda, gerados mecanicamente pelos movimentos de rotação e translação da ferramenta utilizada no processo. Após o surgimento desse processo, outras patentes foram sendo desenvolvidas, como o Friction Spot Welding (FSpW) e o Friction Stir Spot Welding (FSSW). Atualmente, muitas pesquisas são realizadas visando o aprimoramento dessas técnicas. (Rosendo, 2009)

Esses processos surgem como uma importante opção para a união de ligas leves, tais como alumínio e magnésio, que apresentam baixa soldabilidade, tornando o processo atrativo para indústrias tanto automotiva quanto aeronáutica, as quais possuem como grande desafio maximizar a eficiência energética, e que tem na redução de peso dos componentes um instigante e fundamental problema a ser solucionado para este fim. (Rosendo, 2009)

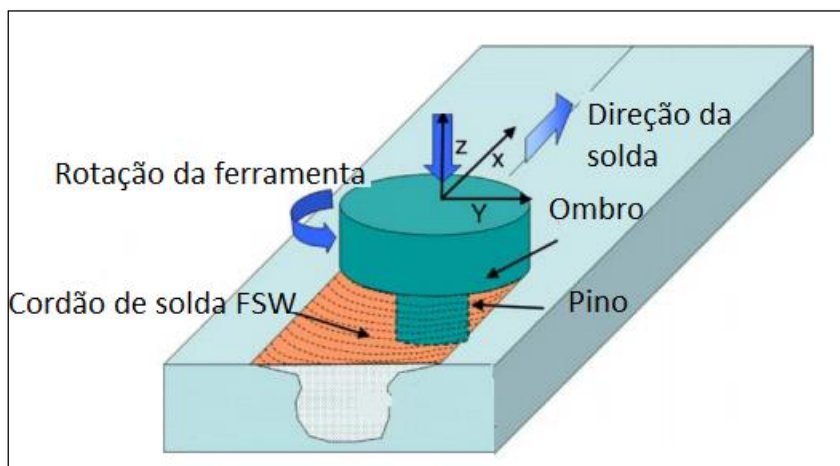
Além da eficiência energética, outro aspecto ambiental vantajoso é a não utilização de um metal de adição no processo, o que facilita a reciclagem do material soldado, além de não emitir gases poluentes nem gerar resíduos durante a soldagem (Rosendo, 2009)

Além dos estudos e aplicações para as ligas metálicas, tem-se estudado a aplicação desse processo na união de juntas dissimilares, como alumínio e cobre, que são difíceis de serem soldadas por outros processos, sendo sua união usualmente feita por rebiteagem. Alguns exemplos de estudos recentes no assunto são: Murr (2010), Bahemmat et.al. (2012) e Kasai et. al. (2014). Outro tipo de união que vem sendo estudada, são as chamadas “juntas híbridas” polímero-metal, e demais uniões utilizando ligas poliméricas, como apresentam, por exemplo: Amâncio Filho (2012), Czigany et.al. (2012) e Junior et.al. (2014)

2.1.1 Friction Stir Welding

A ferramenta utilizada no FSW é o que efetiva a solda, combinada com a velocidade de rotação e translação em que o processo ocorre. Esta é composta por um pino e ombro, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1- Ilustração do processo FSW e características da ferramenta.



Fonte: Mishra (2005, p.2)

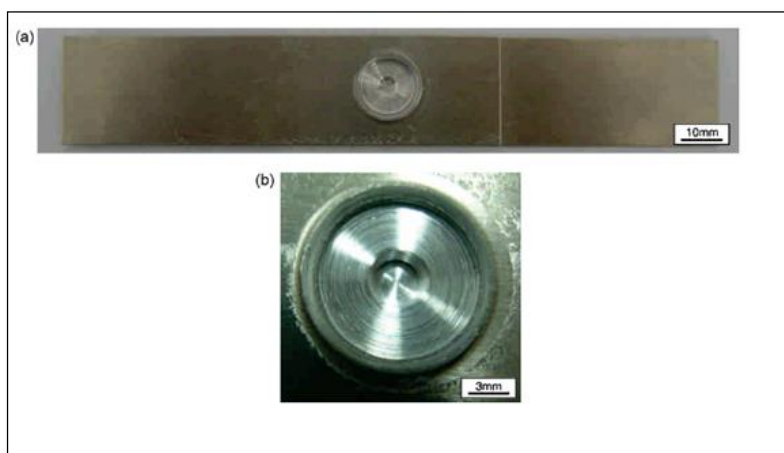
As chapas são posicionadas de forma a não se separarem durante o processo e, então, o pino penetra as chapas a serem soldadas, até que o ombro da ferramenta atinja a superfície destas. Neste momento, inicia-se o movimento de translação, formando, desse modo, o cordão de solda. Ao final do comprimento definido para o processo, o movimento de translação é interrompido e a ferramenta é movida verticalmente para cima, dando fim ao processo de soldagem. (Mishra, 2005)

Embora a ferramenta apresente uma configuração relativamente simples, há uma busca intensiva de diferentes perfis para o pino e para a superfície do ombro, que envolve sobretudo o uso de espirais visando um melhor fluxo de material e, portanto, melhores propriedades da solda. (Bakavos, 2011)

2.1.2 Friction Stir Spot Welding

Uma das variantes do FSW é o Friction Stir Spot Welding (FSSW), processo desenvolvido pela Mazda Corporation em parceria com a Kawasaki Motors Corporation, em 2001 (Rosendo, 2009). O FSSW diferencia-se do FSW basicamente pela ausência do movimento de translação da ferramenta, resultando numa solda ponto com um furo central. A aparência da junta é mostrada na Figura 2.

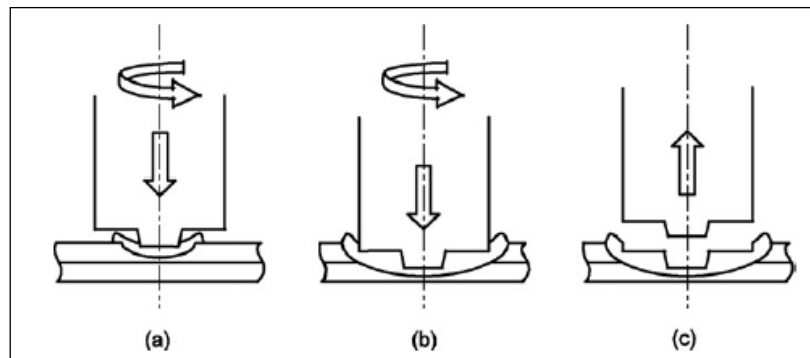
Figura 2 - Junta FSSW da liga AA6061-T6 (a) visão geral junta sobreposta (b) detalhe botão de solda chapa superior (c) Detalhe botão de solda chapa inferior



Fonte: Wang (2006, p. 3)

A solda ocorre em três etapas e a ferramenta utilizada é muito semelhante à usada no FSW. Conforme pode ser observado na Figura 3, o processo inicia-se com as chapas sobrepostas. A ferramenta, então, a uma determinada rotação, as penetra com uma profundidade definida, podendo o ombro entrar em contato com a chapa superior. Essa etapa é mantida por um certo tempo para que ocorra a “mistura” do material. Finaliza-se o processo com a retirada da ferramenta. (Wang, 2006)

Figura 3- Esquema do processo de solda FSSW. (a) penetração. (b) mistura (c) saída.



Fonte: Wang (2006 p. 2)

2.1.3 Friction Spot Welding

O Friction Spot Welding (FSpW) foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa em soldagem (solid state joining processes group), do Centro de Pesquisas Helmholtz-Zentrum Geesthacht HZG (antigo GKSS) na Alemanha, no ano de 1999, e patenteado no ano de 2005. O processo consiste na união de chapas na forma de juntas sobrepostas, no estado sólido, permitindo a união de materiais que apresentem plasticidade. (Rosendo, 2009)

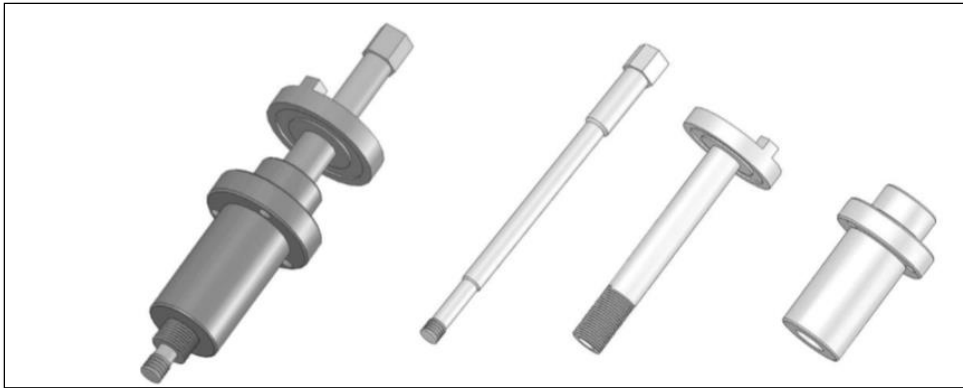
No FSpW a união resultante apresenta-se como um ponto de solda totalmente preenchido, graças a uma ferramenta mais complexa, constituída por três partes independentes. (Campanelli, 2012)

O processo torna-se muito atrativo para as indústrias aeronáutica e automotiva, que utilizam como processos para a obtenção desse tipo de junta a rebiteagem e a soldagem ponto por resistência elétrica (Resistance Spot Welding RSW), as quais possuem como inconveniente o elevado custo de operação e, no caso da rebiteagem, uma elevação no peso estrutural, influenciando negativamente outros fatores ligados à eficiência. (Campanelli, 2012)

A ferramenta utilizada no FSpW consiste em três elementos móveis: pino, camisa e anel de fixação, como mostra esquematicamente a Figura 4. O pino e a camisa giram com a mesma rotação e movem-se axialmente de maneira independente entre si. O anel de fixação não rotaciona, apenas se desloca

verticalmente e tem a função de manter as chapas unidas durante a realização da solda. (Rosendo, 2009).

Figura 4 - Representação esquemática da ferramenta usada no FSpW. Detalhe dos componentes: pino, camisa e anel de fixação, respectivamente.

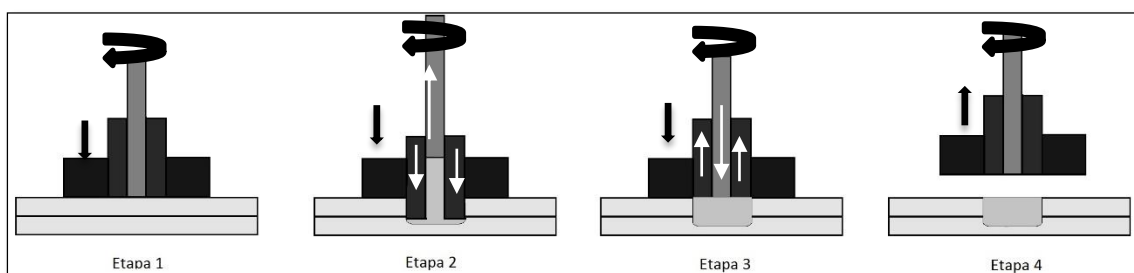


Fonte: Rosendo (ano, p.2)

A soldagem acontece em quatro estágios e possui duas variantes, dependendo de qual parte da ferramenta penetra contra as chapas (pino ou camisa), conforme apresentado nas figuras 5 e 6.

Na variante do processo que consiste na penetração da camisa (Figura 5): a camisa é forçada contra as chapas, enquanto o pino sobe criando um espaço para acomodar o material plastificado. Na etapa seguinte, o pino e a camisa retornam à sua posição inicial e o material plastificado é empurrado pelo pino, preenchendo o vazio criado pela penetração da camisa. (Rosendo, 2009)

Figura 5 - Esquema das etapas do processo FSpW com penetração da camisa

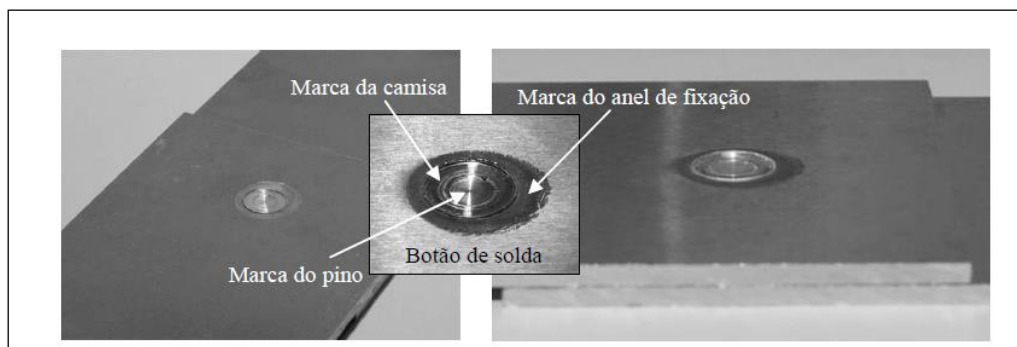


Fonte: Autora.

As duas variantes (penetração do pino e penetração da camisa) do processo apresentam vantagens e desvantagens. Na penetração da camisa, é necessário um maior esforço da máquina, o qual acarreta uma menor vida útil da ferramenta. Por outro lado, a área de solda é maior, o que se traduz em maior resistência mecânica à junta soldada. A escolha da variante a ser empregada envolve uma análise de custo/benefício. (Campanelli, 2009)

A Figura 6 mostra o aspecto final de uma junta resultante do processo FSpW.

Figura 6- Exemplo junta soldada pelo FSpW com detalhes característicos da solda.

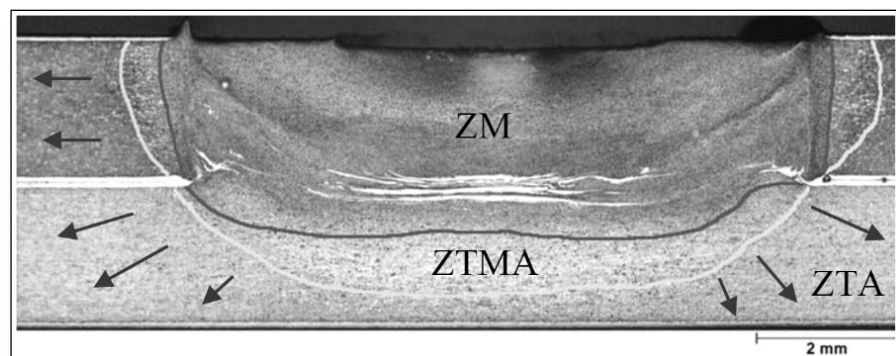


Fonte: Rosendo (2009, p.21)

- **Microestrutura**

Nos processos de soldagem por fricção três regiões de microestrutura distintas são observadas: a zona de mistura (ZM), a zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) e a zona termicamente afetada (ZTA), conforme mostra a Figura 7.

Figura 7- Macrografia das zonas de solda FSpW



Fonte: Rosendo (2007, p. 7)

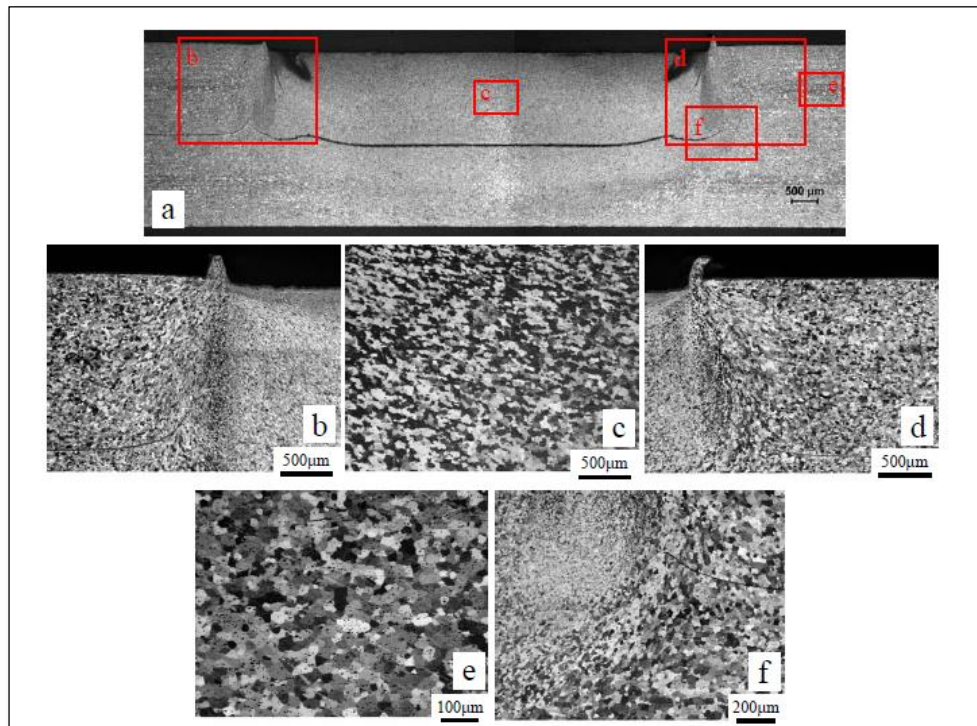
A ZM sofre grande deformação plástica de maneira que ocorre uma mistura entre os materiais das chapas inferior e superior. Nesta região perde-se a interface original entre as chapas, formando uma porção de material com características distintas do material base. Nesta zona ocorre a maior elevação da temperatura, embora ainda inferior ao ponto de fusão do material. Em decorrência da alta temperatura e da intensa deformação plástica, observa-se na ZM a ocorrência de recristalização dinâmica. Essa região é facilmente distinguível em uma investigação por meio de microscopia óptica, sendo caracterizada por uma microestrutura bastante refinada (pequeno tamanho de grão). (Rosendo, 2009)

A ZTMA é caracterizada por menor intensidade de deformação plástica e por atingir níveis de temperatura mais baixos que na ZM. Esta região difere da ZM, principalmente por não apresentar recristalização dinâmica. Dependendo das características do material, nessa região também pode ocorrer desestabilização de algum tratamento térmico existente na liga, bem como outros tipos de alterações microestruturais. Os grãos nessa região encontram-se alongados e direcionais, conforme o fluxo de material. (Rosendo, 2009)

Na ZTA não ocorre deformação plástica. O nível de temperatura nessa região é menor que nas outras, mas dependendo do material pode ser suficiente para promover modificações microestruturais. Pode ocorrer recristalização em materiais que possuam algum trabalho a frio. (Rosendo, 2009)

A Figura 8 mostra as regiões da solda, descritas anteriormente, para uma junta da liga AA6181-T4. Os detalhes 9b e 9d mostram os extremos do botão de solda, onde é possível identificar a região de interface entre a ZM e a ZTMA. O detalhe 9c mostra a microestrutura no centro da ZM, que, conforme citado, apresenta grãos bastante refinados. Uma região afastada do botão de solda é mostrada no detalhe 9e, que apresenta características semelhantes ao metal base, com grãos aproximadamente alongados. Por fim, o detalhe 9f mostra a interface das chapas superior e inferior na extremidade do botão de solda.

Figura 8 - Microestrutura de solda ponto FSpW liga AA6181-T4



Fonte: Rosendo (2009, p. 41)

- **Comportamento mecânico.**

Em soldas por fricção o comportamento é influenciado por quatro grupos de parâmetros principais, que estão diretamente ligados com as zonas características da solda, são eles: o material a ser soldado, a geometria da ferramenta utilizada no processo, os parâmetros de soldagem (rotação, avanço, penetração da ferramenta, etc.) e as condições do meio. (Rosendo, 2009)

A análise da influência desses parâmetros é feita usualmente por meio de ensaios mecânicos. Rosendo (2009) cita como parâmetros de influência: geometria e material da ferramenta, velocidade de rotação e tempo de soldagem e profundidade de penetração da ferramenta. Outro fator não citado como influência nos parâmetros, mas que mesmo assim ainda deve ser garantido, é a força axial, que deve ser suficiente para manter o contato durante a soldagem entre a ferramenta e a junta. (Brzostek, 2012)

Vale ressaltar que cada autor analisa em estudos de caso a influência dos parâmetros de solda do processo para uma determinada liga.

Os parâmetros mencionados são fortemente relacionados com o aporte térmico e a mistura de material durante o processo, ou seja, as mudanças nas propriedades do material soldado são resultado da influência da energia mecânica e térmica envolvidas no processo, sendo que em processos convencionais de soldas tem-se apenas a influência do aporte de energia térmica. No processo de solda por fricção é difícil separar o efeito de cada uma dessas influências nas juntas. Encontra-se na literatura uma relação analítica para o aporte de energia em soldas por fricção, conforme é mostrado na Equação 1. (Rosendo, 2009)

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} Força(n)(x_n - x_{n-1}) + \sum_{n=1}^{n=N} Torque(n) \omega(n)\Delta t \quad (1)$$

onde x_n é a profundidade de penetração da ferramenta num dado incremento de amostragem (n), ω é a velocidade angular da ferramenta (rad/s), n é o incremento de amostragem, N é o incremento final de amostragem e Δt é o tempo de amostragem (tempo total em segundos). Estima-se que o efeito da profundidade de penetração tenha uma influência menor que o da rotação no aporte térmico, sendo usual então reduzir a Equação 1 para a Equação 2.

$$Q = \sum_{n=1}^{n=N} Torque(n) \omega(n)\Delta t \quad (2)$$

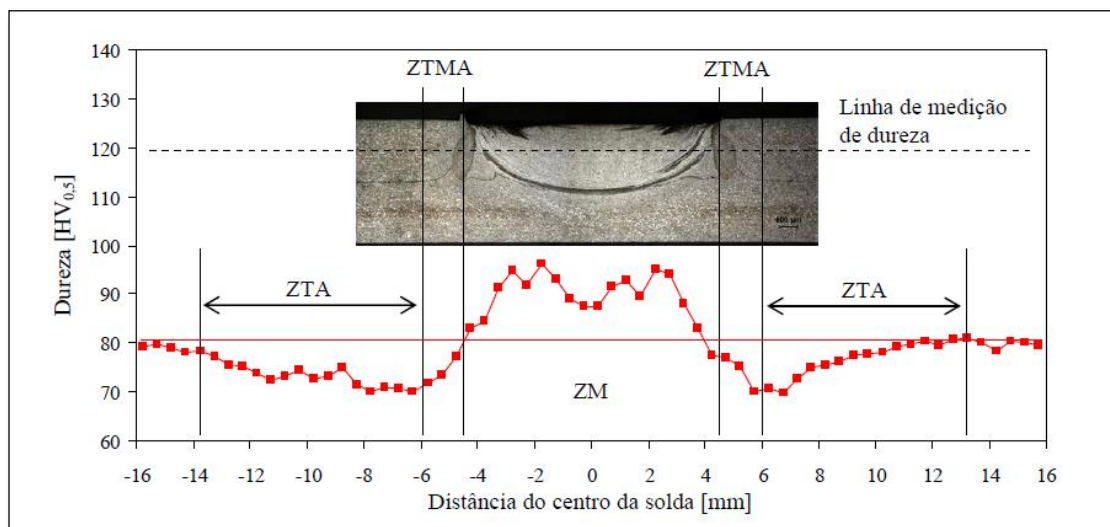
Da equação 2, nota-se que a rotação da ferramenta e o tempo de soldagem estão relacionados fortemente com o aporte térmico. O torque também influencia a energia térmica fornecida ao material, esse parâmetro depende das condições de contato e adesão entre a ferramenta e as chapas. (Rosendo, 2009).

Ante o exposto é possível perceber que as propriedades mecânicas da junta soldada relacionam-se com os seguintes parâmetros: tamanho e distribuição das zonas características da solda, tamanho do botão de solda, presença de defeitos, microestrutura, geometria da interface entre as chapas, presença de óxido ou lubrificantes que influenciam na adesão. (Rosendo, 2009)

Os parâmetros usualmente avaliados em soldas por fricção são a microdureza e a resistência mecânica de corpos de prova. Cada estudo avalia um conjunto estreito de parâmetros de soldagem para determinada liga, ou até mesmo combinações de materiais, sendo os resultados, muitas vezes, particulares ao próprio estudo. Entretanto, algumas características apresentam-se similares independentemente dos

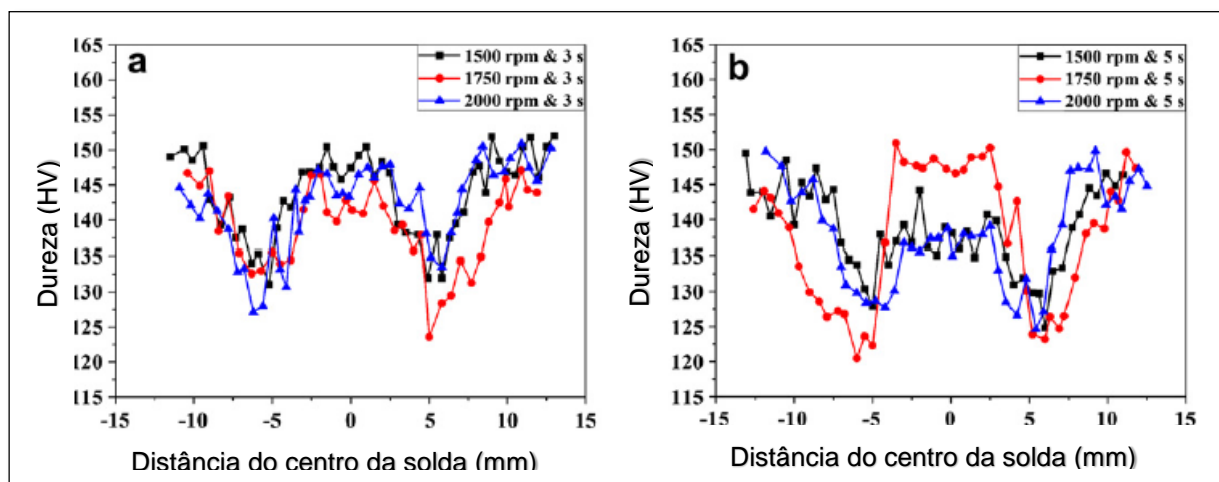
parâmetros utilizados, como a microdureza, por exemplo. No perfil de microdureza observa-se que na ZM há uma microdureza elevada, seguida de um acentuado decréscimo desse valor na região da ZTMA. Esta, por sua vez, é inferior à região correspondente ao metal base. A Figura 9 e a Figura 10, mostram alguns exemplos de perfis microdureza em soldas FSpW.

Figura 9- Perfil de microdureza de junta FSpW liga AA6181-T4 (2900 rpm/ 3s)



Fonte: Rosendo (2009, p. 50)

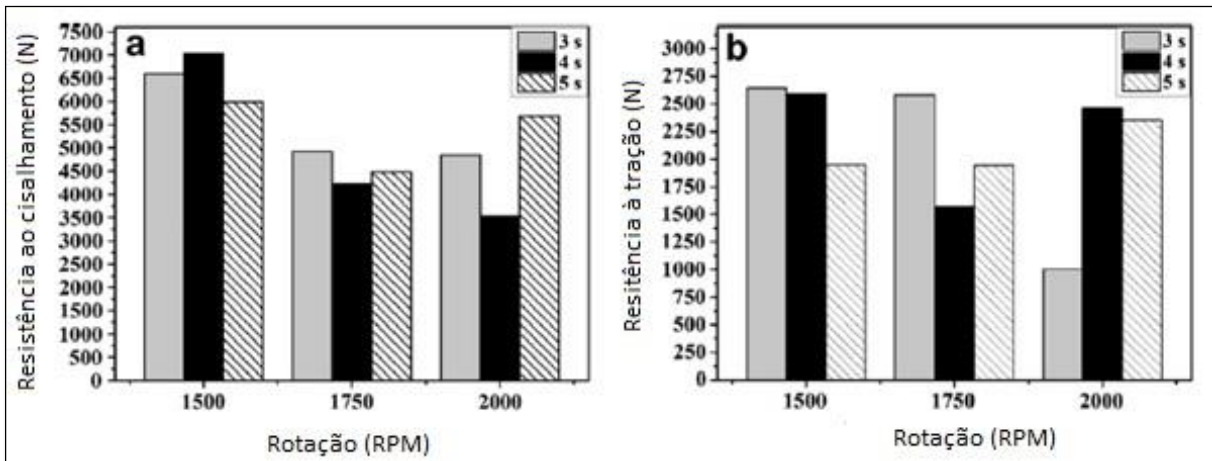
Figura 10-Perfil de microdureza de juntas FSpW da liga AA7075-T6



Fonte: Shen (2013 p. 4)

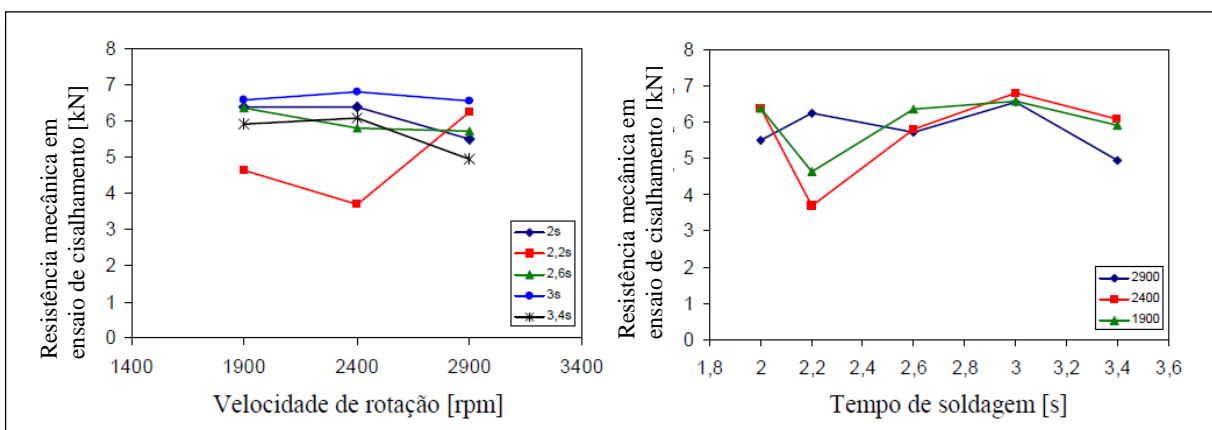
A resistência mecânica dos corpos de prova é avaliada sob solicitação de tração ou cisalhamento em ensaios padrão. A Figura 11 e a Figura 12 apresentam alguns exemplos da resistência de juntas FSpW.

Figura 11 - Comportamento mecânico de juntas FSpW da liga AA7075-T6 (a) Ensaio de cisalhamento. (b) Ensaio de tração.



Fonte: Shen (2013, p.4)

Figura 12 - Resistência mecânica de juntas FSpW da liga AA6181-T4 sob ensaios de cisalhamento.



Fonte: Rosendo (2009, p.52)

2.2 Comportamento mecânico dos materiais

Na engenharia, a seleção de materiais baseia-se tradicionalmente nos parâmetros de resistência e rigidez, e o ensaio básico de engenharia para determinação destes é o ensaio de tração, que fornece curvas de tensão-deformação. A Figura 13 mostra um exemplo genérico desse tipo de curva que representa os valores nominais ou, como são mais conhecidos, valores de engenharia, que são definidos pelas equações 3 e 4. (Callister, 2002)

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Onde:

σ – Tensão normal;

ε – Deformação;

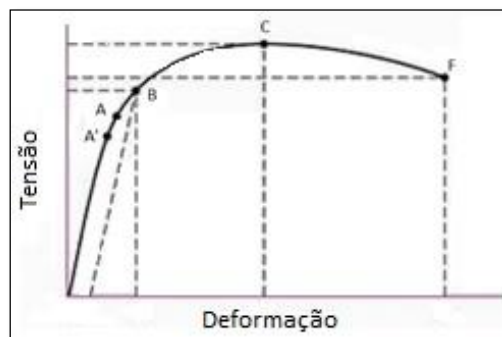
P – Carga;

A_0 – Área da seção transversal original descarregada do corpo de prova

ΔL - Variação do comprimento causado pela carga;

L_0 – Comprimento original do corpo descarregado.

Figura 13- Gráfico tensão-deformação de engenharia



Fonte: Autora.

Pela curva tensão-deformação é possível obter algumas propriedades mecânicas do material avaliado. O ponto A representa o limite elástico do material e

a tensão correspondente a esse ponto representa a maior tensão que o material pode ser submetido e ainda assim retornar ao seu comprimento inicial. O ponto A' representa o limite de proporcionalidade, que permite aproximar a curva a uma linha reta, onde a lei de Hooke pode ser aplicada. Na maioria dos materiais de engenharia, os pontos A e A' são bastante próximos. A inclinação dessa reta é a constante de proporcionalidade entre tensão e deformação, e representa para o material o módulo de elasticidade ou módulo de Young. Quando o material não apresenta esse trecho exatamente linear, o módulo de elasticidade não é bem definido.

O ponto B representa a resistência ao escoamento, a partir do qual a tensão proporciona um escoamento plástico significativo. Para alguns materiais esse ponto não é bem definido. Usa-se, então, o método do desvio, no qual uma linha, a uma distância arbitrária de 0,2% da deformação, é traçada paralelamente ao trecho linear que passa pela origem, e o ponto B é o ponto de escoamento do material a 0,2% de desvio.

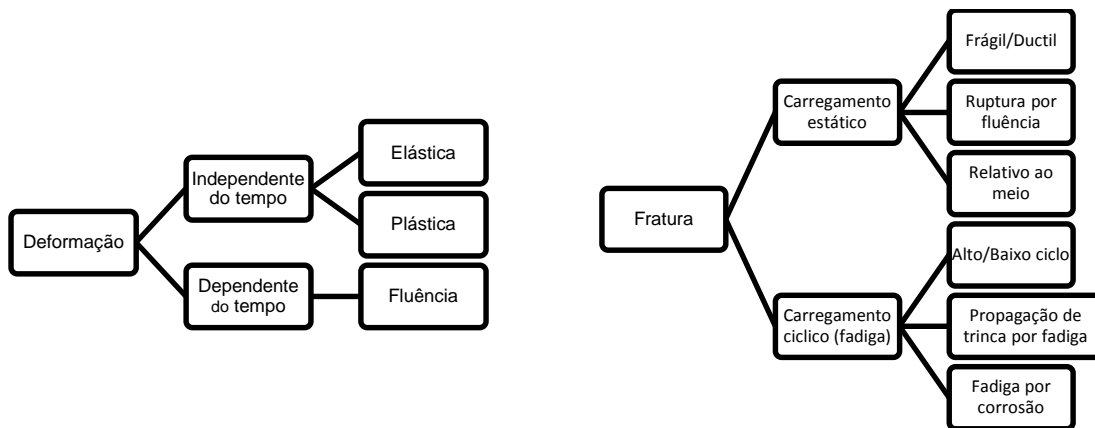
O ponto C representa a maior tensão de engenharia que o material pode suportar, e o ponto F, a tensão de ruptura de engenharia medida no momento da falha do corpo de prova. (Callister, 2002; Juvinall, 2003)

2.2.1 Critérios de falhas estáticas

A falha de um componente solicitado por algum tipo de carregamento é considerada como qualquer comportamento que torne-o impróprio para a operação a qual se destina. (Juvinall, 2002)

Os tipos básicos de falha nos materiais podem ser classificados como deformação ou fratura, conforme é mostrado na Figura 14. É importante saber identificar a causa da falha, para poder escolher apropriadamente o tipo de método de análise para prever seu comportamento. (Dowling, 2007)

Figura 14 - Tipos básicos de deformação e fratura



Fonte: Adaptado de Dowling (2007, p.2)

Os carregamentos estáticos podem resultar em deslocamentos e instabilidades elásticas inconvenientes ao processo, assim como distorções plásticas e fratura. As distorções, ou deformações plásticas, são associadas a tensões cisalhantes e envolvem o deslizamento de planos a nível cristalino do material. A falha ocorre quando a deformação plástica atinge um valor crítico.

Enquanto a falha por distorção é arbitrária, pois é difícil quantificar o limite de distorção elástica, a fratura é claramente definida pela ruptura (separação) do componente. Embora geralmente associe-se a distorção a materiais dúcteis e a fratura a materiais frágeis, é possível que materiais que falhariam como dúcteis adquiram uma fratura frágil se submetidos a temperaturas baixas, entalhes agudos, geometrias específicas e cargas de impacto. Esses mecanismos de fratura são estudados pelo ramo da mecânica da fratura.

Embora obtenha-se um valor previsto da tensão máxima que o material suporta, com base no ensaio padrão de tração, comumente no desenvolvimento de projetos encontram-se componentes submetidos a tensões combinadas de cargas estáticas. Por não ser conveniente a utilização de testes e ensaios de material para cada diferente configuração de solicitação, utilizam-se critérios de teorias de falha que se baseiam no teste de tração do material (Juvinall, 2003)

Os diversos critérios de falha baseiam-se no princípio de que qualquer fenômeno responsável pela falha do material no ensaio de tração padrão, também será responsável pela falha sob todas as demais condições de carregamento estático. Para materiais dúcteis os critérios mais usados são: os da tensão máxima de

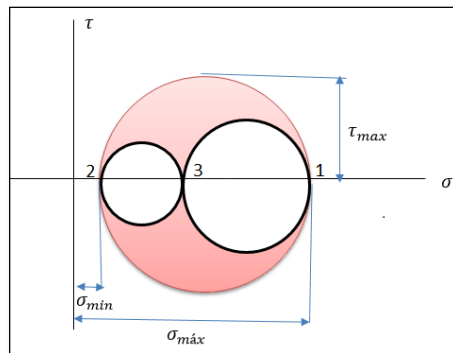
cisalhamento, da máxima energia de distorção e a de Coulomb-Mohr dúctil. (Shigley, 2005)

2.2.2 Critério da tensão máxima de cisalhamento para materiais dúcteis

Também conhecida como critério de Tresca, essa teoria prevê que o escoamento começa sempre que a máxima tensão de cisalhamento em qualquer elemento iguala-se ou excede a tensão máxima de cisalhamento em um corpo de prova de mesmo material em ensaio de tração, quando este começa a escoar. Considerando o círculo de Mohr mostrado na Figura 15, onde σ_1 e σ_2 representam as tensões principais e τ_{max} , a máxima tensão de cisalhamento é possível escrever a Equação 5. (Beer, 2011)

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sigma_{max} \quad (5)$$

Figura 15- Círculo de Mohr das tensões.



Fonte: Autora.

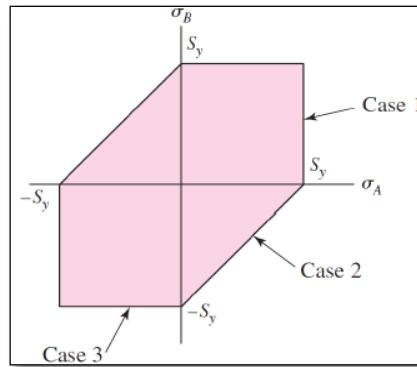
O critério de tensão de cisalhamento máximo é dado pela Equação 6. (Beer, 2011)

$$\sigma_{eq} = |\sigma_1 - \sigma_2| \quad (6)$$

A Figura 16 representa graficamente as relações descritas, e é conhecido como hexágono de Tresca. Enquanto um ponto de tensão (correspondente à solitação de

um componente mecânico) situar-se dentro da área do gráfico o componente encontra-se seguro.

Figura 16- Hexágono de Tresca.



Fonte: Shigley (2005, p.261)

Na Figura 17 S_y é outra notação utilizada para σ_E , e representa a tensão de escoamento do material.

2.2.3 Critério da máxima energia de distorção

Também conhecido como critério de von Mises, esse critério baseia-se na determinação da energia de distorção do material, associada a sua deformação. Segundo esse critério, um componente está seguro enquanto o valor máximo de energia de distorção por unidade de volume for menor que a correspondente para provocar escoamento em um corpo de prova de mesmo material. A energia de distorção em um material isotrópico, por unidade de volume, é dada pela Equação 7. (Beer, 2011)

$$U = \frac{1}{6G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2] \quad (7)$$

Em um corpo de prova, tem-se a Equação 8.

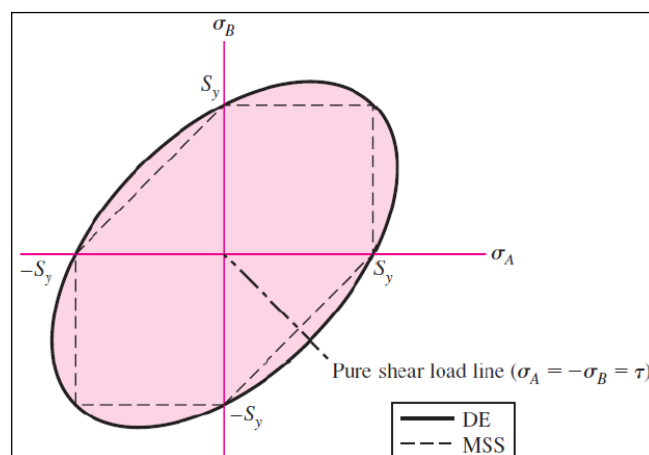
$$U = \frac{1}{6G} * 2 \sigma_{eq}^2 \quad (8)$$

Então, igualando as equações chega-se ao critério de falha de von Mises, que considera a falha quando a energia de distorção da peça atinge o valor do ensaio de tração, conforme a Equação 9

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (9)$$

Graficamente esse critério é mostrado pela elipse da Figura 17, que compara os dois critérios.

Figura 17- Comparação gráfica dos critérios de Tresca e de von Mises



Fonte: Shigley (2005, p.263)

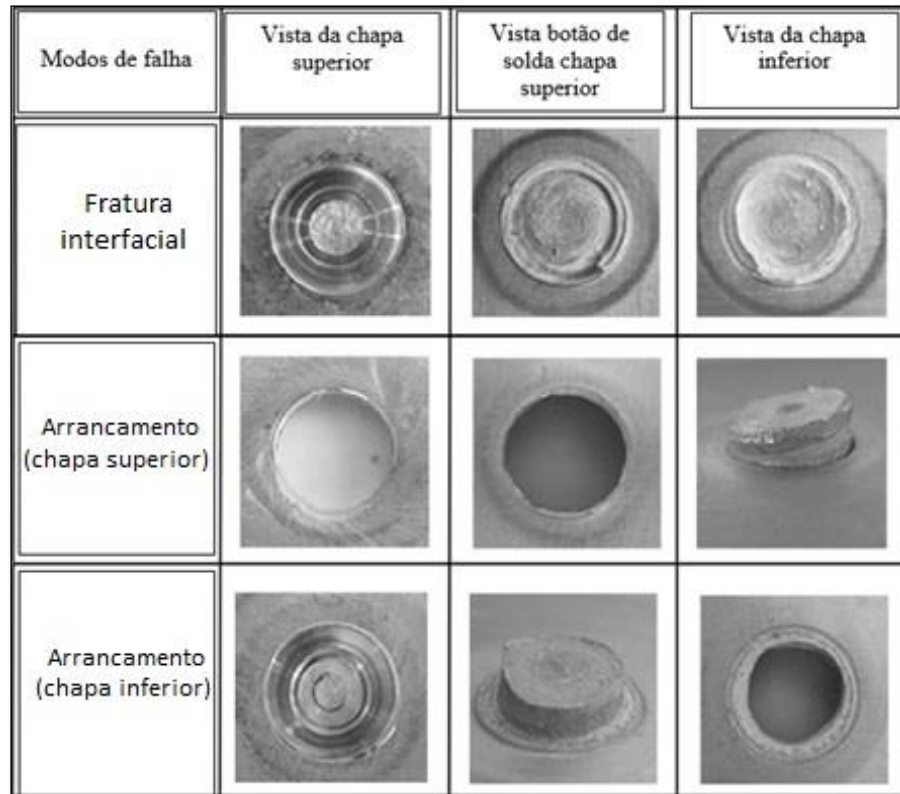
2.2.4 Mecanismos de falha em soldas FSpW.

Em soldas FSpW, solicitadas por cisalhamento, três modos de fratura comumente observados são: fratura interfacial, arrancamento parcial e arrancamento total, sendo os mais recorrentes o arrancamento total e parcial. O mecanismo que governa esses modos de falha pode ser dúctil ou frágil, dependendo das características do material e das zonas de solda. (Rosendo 2009)

No modo interfacial usualmente observa-se um mecanismo de fratura frágil, pois não apresenta acentuada deformação plástica na fratura (Brzostek, 2012). A

Figura 18 apresenta um compilado com os modos de falha de soldas FSpW, submetidas a ensaios de cisalhamento.

Figura 18- Modos de falha em soldas FSpW da liga 7075-T6 sob ensaio de cisalhamento



Fonte: Adaptado de Shen (2013, p.7)

2.3 Modelagem numérica: método dos elementos finitos

Modelos numéricos são ferramentas utilizadas para representar de forma simplificada problemas reais, com o objetivo de prever, a partir de parâmetros conhecidos, variáveis desconhecidas. Os modelos matemáticos estão presentes nos mais diversos campos do conhecimento, como a física, a química e a biologia, permitindo modelar processos como, por exemplo, variação de temperatura, escoamento de fluidos, análises estruturais, entre outros. (Costa, 2010)

Para desenvolver um modelo numérico é necessário que haja um modelo teórico ou conceitual, ou seja, é preciso conhecer o comportamento do sistema que será modelado, incluindo a descrição dos processos e fenômenos envolvidos. Então, traduzem-se esses fenômenos matematicamente, obtendo equações que descrevem

o processo, as condições iniciais e de contorno. Esse conjunto de equações é o chamado modelo matemático. Para adequação de um modelo, pode ser necessária a aplicação de simplificações, que só devem ser feitas quando se possui um profundo conhecimento do processo analisado. (Costa, 2010)

Os resultados do comportamento do modelo são obtidos pela solução das equações que o regem. As técnicas mais usadas na solução dessas equações são: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Volumes Finitos (MVF) e Método dos Elementos Finitos (MEF). Esses métodos podem ser usados para diferentes tipos de problemas e convergir aproximadamente ao mesmo valor, porém existem classes de problemas mais adequados a aplicações específicas de cada método. (Corrêa, 2013)

No MEF, o domínio de solução é dividido em um conjunto discreto de elementos finitos que não são estruturados. Esses elementos geralmente possuem geometrias triangulares e quadriláteras, em análises bidimensionais, ou tetraédricas e hexaédricas, em análises tridimensionais. (Gonçalves, 2007)

O MEF, permite a aplicação em geometrias irregulares, condições de contorno não usuais e composições heterogêneas, por meio de soluções aproximadas de equações diferenciais parciais, a cada elemento gerando uma solução geral pela “montagem” das soluções individuais, considerando a continuidade dos contornos entre os elementos. (Costa, 2010)

Uma importante vantagem do MEF é a aplicabilidade em geometrias irregulares, assim como a possibilidade de refino em regiões de interesse, ou seja, os elementos podem ser facilmente subdivididos em elementos menores para maior precisão. O princípio fundamental do MEF é aproximar, dentro do domínio do elemento, uma solução para o problema, por meio de funções de diferentes ordens. (Gonçalves, 2007)

Levando-se em conta que os problemas comuns de engenharias envolvem geometrias complexas, que inviabilizam o uso de técnicas clássicas de cálculos, o MEF apresenta-se com enorme utilidade para a resolução desses problemas. Por obter uma metodologia sistemática, a solução pode ser determinada por meio computacional, daí sua grande popularização. (Gonçalves, 2007)

O método dos elementos finitos teve seu desenvolvimento nos anos 1950, através da indústria aeroespacial, sendo os principais responsáveis por isso as empresas Boeing e Bell Aeroespacial. Em 1956, os primeiros artigos sobre o método

começam a ser publicados, estabelecendo os procedimentos de montagens das matrizes de elementos e formulações dos mesmos, não utilizando, entretanto, o termo Elementos Finitos. Inicialmente, o meio científico discriminou a técnica, havendo até mesmo a recusa da publicação de artigos sobre o tema. (Jacob, 2009)

No início dos anos 1960, matemáticos conseguiram provar que as soluções por elementos finitos convergiam para a solução correta da equação diferencial parcial em problemas lineares, e na mesma década houve o desenvolvimento do primeiro programa em elementos finitos. (Jacob, 2009). Com a popularização do uso dos computadores, o uso do MEF na análise de estruturas de geometria arbitrária constituída por múltiplos materiais e solicitada a diversos tipos de carregamento tornou-se cada vez mais usual. (Azevedo, 2003)

A análise em elementos finitos, claramente, permitiu que o tempo de ciclo de projetos fosse reduzido, e também melhorou a qualidade geral dos produtos. Atualmente, o MEF é usado nas mais diversas aplicações, são exemplos: análises de tensões e análises térmicas em componentes em geral; análises sísmicas; análises de impactos de meios de transporte; análise de escoamento de fluidos; análises eletromagnéticas; análises de procedimentos cirúrgicos. (Jacob, 2009)

O método dos elementos finitos consiste em dividir o domínio de soluções do contínuo em uma quantidade finita de elementos simples, que são os próprios elementos finitos. O conjunto desses elementos forma a malha, que pode admitir diversas formas. Os elementos são representados matematicamente por expansões polinomiais da forma do elemento, onde a solução de cada um é somada para obtenção da solução global. (Costa, 2010)

Em Jacob (2009), uma classificação generalizada do método divide-o, independentemente do tipo de análise, em 5 etapas genéricas:

1. Pré-processamento: subdivisão do domínio do problema em elementos finitos;
2. Formulação dos elementos: desenvolvimento de equações para os elementos;
3. Montagem: obtenção do sistema global de equações a partir das equações para os elementos;
4. Resolução das equações;
5. Pós-processamento: determinação de valores de interesse, tais como tensões e deformações, e a obtenção de visualização de respostas.

Do ponto de vista da análise por elementos finitos, é possível também definir etapas que são seguidas independentemente do tipo de análise ou complexidade do problema. O modelo geométrico é o ponto de onde se parte a análise, seguindo para a atribuição das propriedades do material, suas restrições e carga, para, enfim, a discretização do modelo. Na etapa de discretização é feita a criação da malha, dividindo sua geometria em elementos menores e de menor complexidade: os chamados elementos finitos. (Alves filho, 2008)

Em problemas estruturais, quando a análise é feita com o auxílio de um software, a primeira etapa a ser seguida é a criação da peça ou de uma montagem que represente o modelo. Para isso, utilizam-se softwares do tipo CAD (*Computer Aided Design*). A geometria gerada no CAD precisa obedecer alguns requisitos para que, posteriormente, seja possível a criação adequada da malha.

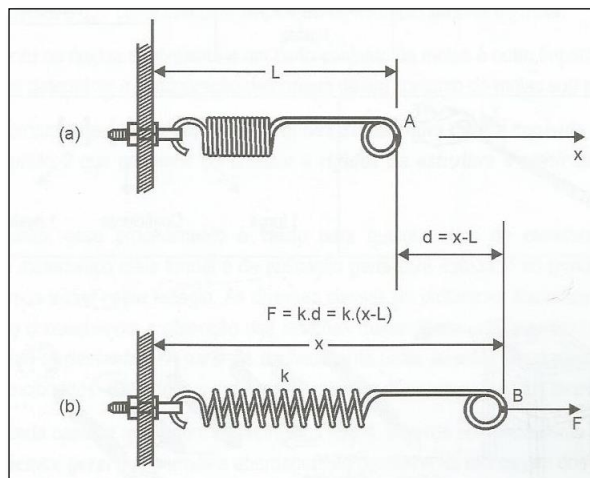
2.3.1 Problemas lineares

O método dos elementos finitos tem como ponto de partida, a relação entre forças nodais e deslocamentos nodais para cada elemento individual, essa ideia baseia-se no conceito de rigidez. Um modelo simples que envolve rigidez é a mola, que expressa a relação entre a força aplicada e o deslocamento medido, por meio de sua constante elástica, que é a medida quantitativa da rigidez da mola. Esse relação é descrita pela Equação (10). (Alves, 2008)

$$F = kd \tag{10}$$

No caso mais simples, em que a relação entre força e deslocamento da mola são lineares, o estudo é feito com base nos fenômenos apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Rigidez da mola representada pela constante k .



Fonte: Alves (2008, p.19)

Em um elemento finito a ideia é basicamente a mesma, porém de forma mais ampla. No caso simples de uma viga, estão associados diferentes tipos de rigidez como: axial, à flexão, à torção e ao cisalhamento. Assim, segundo Alves (2008), “Os diversos tipos de rigidez de um elemento estão relacionados a diversos componentes de forças e deslocamentos presentes.” Desta forma as semelhanças à mola podem ser contabilizadas pelas relações matemáticas, que descrevem o comportamento físico associado a cada rigidez. (Alves, 2008)

Com o auxílio da álgebra matricial, é possível representar esses diferentes valores de rigidez na forma de uma matriz coluna, assim como os componentes de força e deslocamento também podem ser representados por matrizes. Introduce-se assim o conceito de *matriz de rigidez de um elemento finito*. A representação matemática de todas as forças nodais e deslocamentos nodais em um elemento, é feita por um sistema de equações algébricas lineares, os coeficientes das equações, são os coeficientes de rigidez do elemento, representados na matriz de rigidez. (Alves 2008).

Assim pode-se expressar a ideia geral do método, para análises lineares, conforme a Equação 11.

$$\{f\} = [k] \cdot [d] \quad (11)$$

Onde:

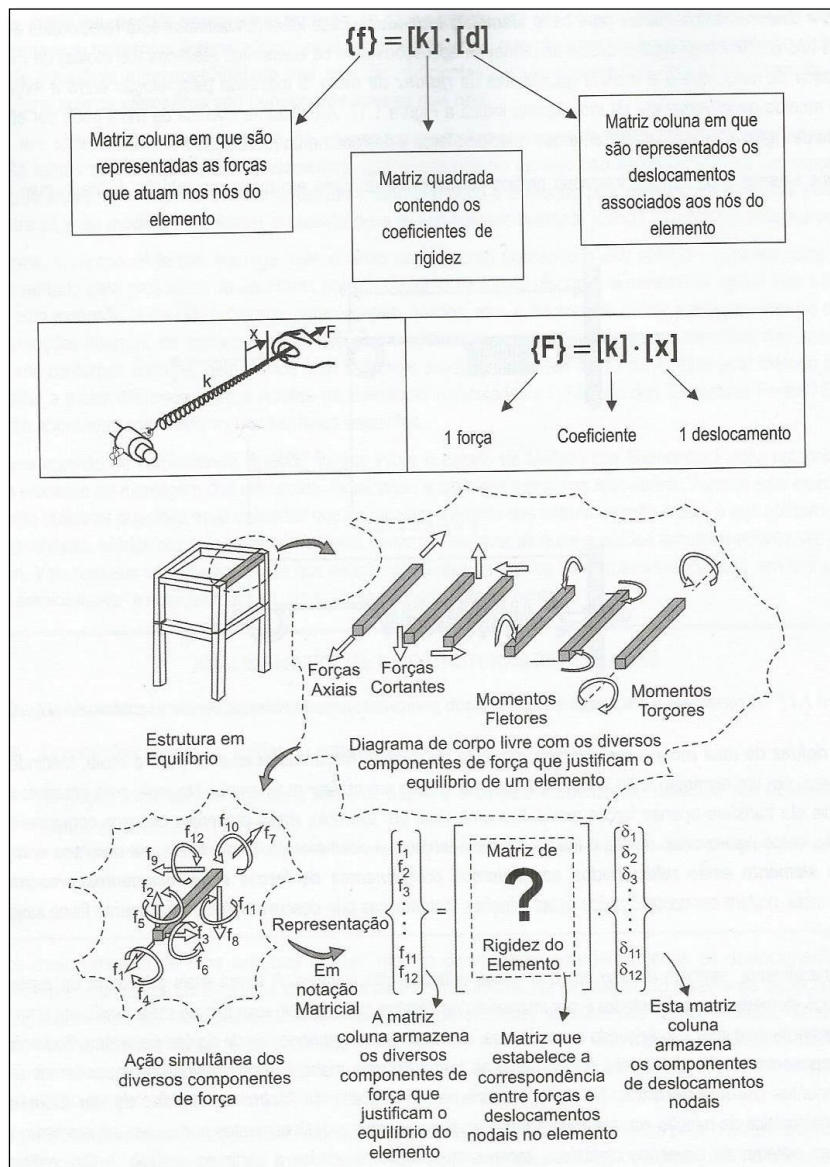
$\{f\}$ – é a matriz coluna em que são representadas as forças que atuam nos nós dos elementos;

$[k]$ – matriz quadrada contendo os coeficientes de rigidez;

$\{d\}$ – matriz coluna em que são representados os deslocamentos associados aos nós dos elementos.

A Figura 20 mostra essa relação para dois casos distintos: uma mola, que possui apenas um valor de rigidez; e uma viga, cujos valores de rigidez podem ser representado por uma matriz.

Figura 20 - Comparação entre os casos de uma única rigidez e de uma matriz de rigidez, para representação de um componente.



2.3.2 Problemas não lineares

Na mecânica estrutural os tipos de problemas não lineares incluem: a não linearidade no material, a não linearidade no tipo de contato e a não linearidade da geometria.

No caso da não linearidade do material, incluem-se os casos de elasticidade não linear, plasticidade e fluência.

Os contatos não lineares, são os casos em que as distâncias e/ou aberturas entre os componentes podem abrir ou fechar, assim como quando as áreas de contato sofrem mudanças em função do carregamento aplicado.

Por fim, a não linearidade geométrica ocorre, quando a deformação é grande o bastante para alterar as equações de equilíbrio, como quando o carregamento muda de direção em função da deformação.

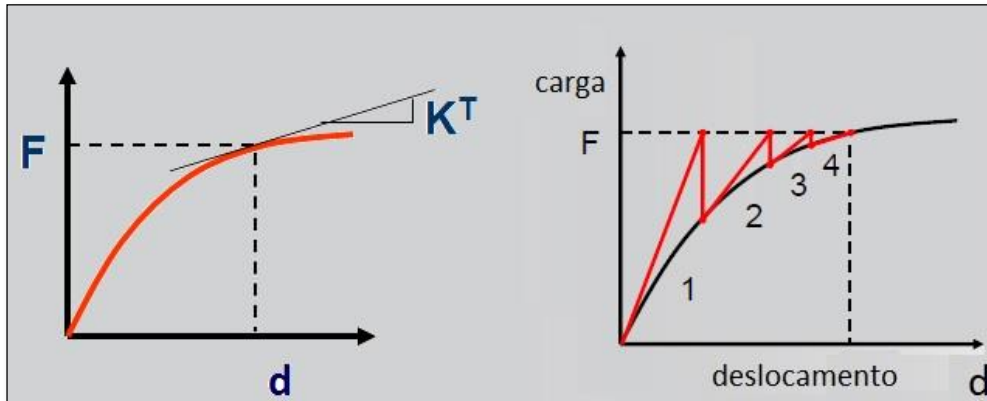
Nos casos não lineares o carregamento e a rigidez tornam-se função dos deslocamentos ou deformações, logo não se pode mais resolver diretamente pela Equação 11 pois $[k]$ e $\{f\}$ são função de $[d]$, necessitando assim um processo iterativo para solução do sistema. (Ansys, 2006)

No software utilizado, a solução é feita pelo método Newton-Raphson Modificado, para explicar sua formulação, primeiramente mostra-se o método Newton Raphson convencional.

O método Newton-Raphson em análise numérica é utilizado para estimar a curva carregamento x deslocamentos nas análises não lineares. O método utiliza uma matriz de rigidez tangente $[kt]$ gerada antes de cada cálculo do incremento de deslocamento. A cada nível de carregamento a probabilidade de convergir aumenta, com base em pequenos incrementos de carga, conforme é ilustrado na Figura 21. Cada iteração é chamada de iteração equilíbrio. (Ansys, 2006)

No método Newton-Raphson Modificado, uma mesma rigidez tangente é utilizada nos ciclos iterativos, reduzindo assim os custos computacionais de cálculo, pois no método convencional a cada iteração uma nova matriz de rigidez tangente deve ser gerada.

Figura 21 - Método Newton-Raphson. O gráfico da direita mostra quatro iterações



Fonte: Ansys (2006)

- **Não linearidade do material**

A plasticidade é uma das definições mais importantes da não-linearidade do material, e é caracterizada pela deformação irreversível que ocorre no material quando um determinado nível de tensão é atingido.

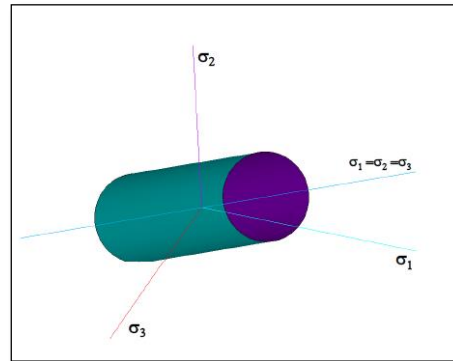
A plasticidade pode ser caracterizada: pelo critério de cedência, regra do escoamento e regra do encruamento.

O critério de escoamento é usado para relacionar estado de tensão multiaxial com o caso uniaxial.

Em ensaios convencionais de tração, são obtidos dados uniaxiais, que podem facilmente plotar curvas tensão x deformação unidimensionais. Porém uma estrutura real geralmente exhibe um estado multiaxial de tensão.

O critério de von Mises (critério de escoamento) também pode ser plotado num espaço tridimensional, como um cilindro, conforme mostra Figura 22.

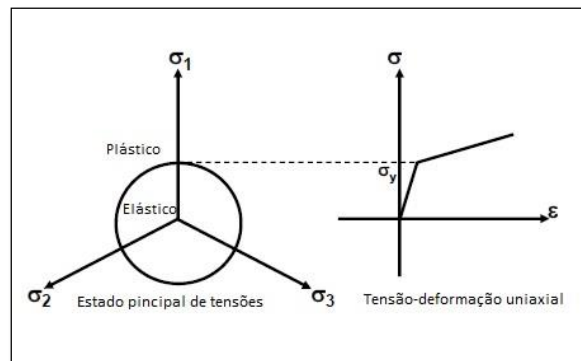
Figura 22 - Critério de von Mises num estado espaço tridimensional de tensões.



Fonte: Ansys (2006)

Quando a tensão equivalente é igual ao critério de escoamento, o material começa a desenvolver deformações plásticas e então as regras de encruamento irão descrever como ocorrem as mudanças no cilindro em relação ao escoamento, a Figura 23 mostra essa relação.

Figura 23 - Relação entre as tensões no espaço e no estado uniaxial para um material isotrópico.



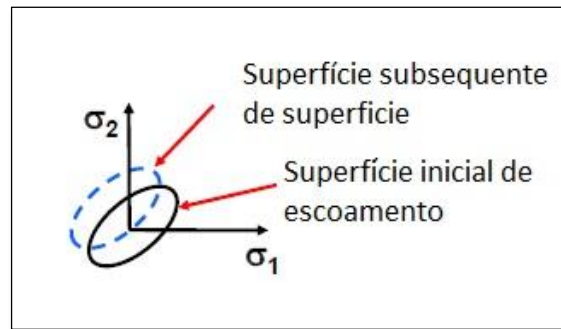
Fonte: Ansys (2006)

A regra de encruamento descreve como a superfície de escoamento muda (tamanho, centro, forma) em função da deformação plástica, assim como o comportamento sob carga e descarga.

Existem basicamente duas regras de encruamento que descrevem a modificação da superfície de escoamento na formulação do software ANSYS WORKBENCH.

- **Encruamento cinemático** - A superfície de escoamento permanece constante em tamanho, mas desloca-se no espaço $\sigma_1 \times \sigma_2 \times \sigma_3$ representando a direção do escoamento.

Figura 24 - Modelo de encruamento cinemático

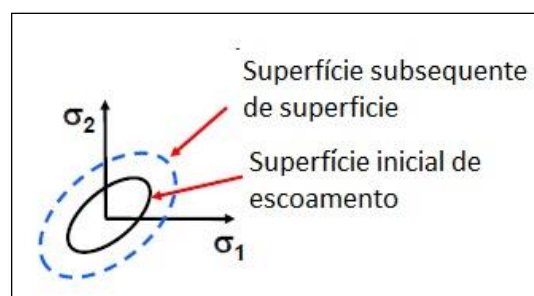


Fonte: Ansys (2006)

Esse modelo é geralmente usado para pequenas tensões, ou aplicação de carregamentos cíclicos.

-**Encruamento isotrópico** - A superfície de escoamento expande uniformemente em todas as direções.

Figura 25 - Modelo de encruamento isotrópico.



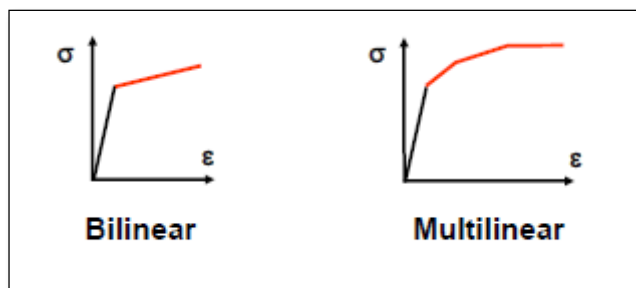
Fonte: Ansys (2006)

Nesse modelo a superfície de escoamento expande uniformemente durante o escoamento. O termo isotrópico se refere a dilatação uniforme da superfície de escoamento e é diferente do “isotrópico” do critério de escoamento.

Esse modelo é frequentemente usado para grandes tensões, e não é aplicado usualmente para carregamento cíclico.

No ANSYS WORKBENCH, as curvas de plasticidade podem ser representadas como um comportamento bilinear ou multilinear como mostra as curvas da Figura 26.

Figura 26 - Tipo de curva de plasticidade usadas no ANSYS WORKBENCH.



Fonte: Ansys (2006)

- **Crêterios de convergência**

De acordo com o critério de convergência as itera es de equilíbrio cessam depois de um determinado nível de carga. Os critérios de convergências se baseiam na força de desequilíbrio e no incremento de deslocamento. No primeiro, a força de desequilíbrio deve ser apenas uma fra o da força total aplicada no carregamento. No segundo, o incremento de deslocamento deve ser apenas uma fra o do incremento de deslocamento inicial.

Seguindo a not a o anterior, o desequilíbrio de forças   expresso pela Equa o 12:

$$\{df\} = \{f\} - [K] [d] \quad (12)$$

Onde $[K]$   a matriz de rigidez dependente do deslocamento, e os dois critérios de convergência são respectivamente:

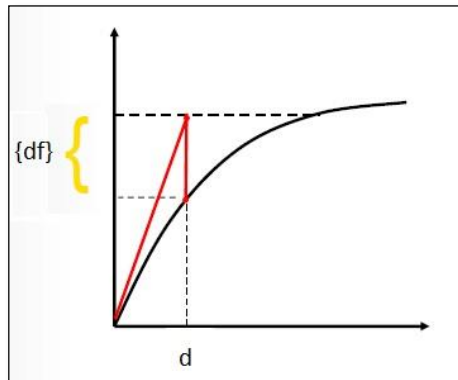
$$\begin{aligned} ||df|| &< \varepsilon ||f|| \\ ||\Delta D|| &< \varepsilon ||\Delta D_0|| \end{aligned}$$

Onde $\{df\}$ e $\{\Delta D\}$ correspondem aos valores determinados mais recentemente de df e Δd , ΔD_0   o incremento inicial de deslocamento. As tolerâncias ε podem ser

nas faixas de 0,001 a 0,01, variando de acordo com o problema, tolerâncias e iterações configuradas.

A Figura 27 mostra o descrito para o critério baseado na força de desequilíbrio conforme mostra a Equação 12.

Figura 27 - Critério de convergência pela força de desequilíbrio.



Fonte: Ansys (2006)

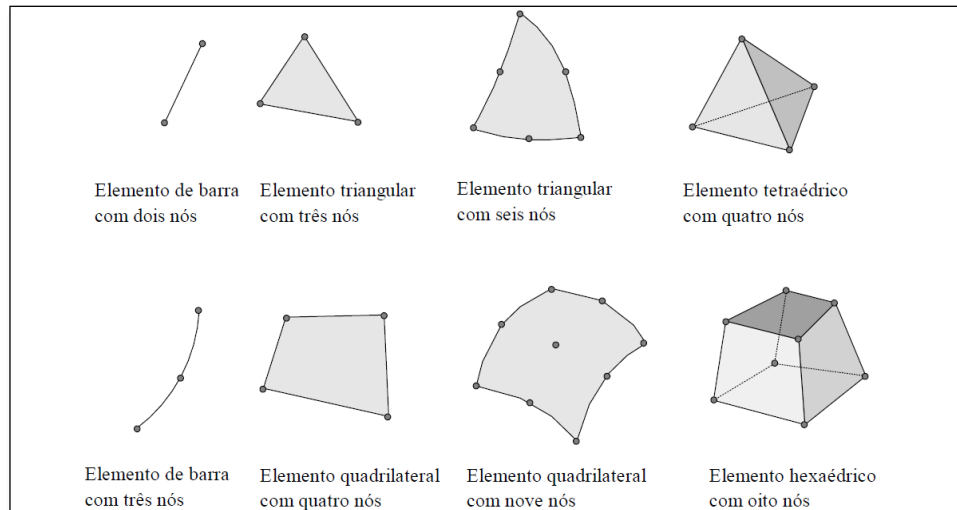
2.3.3 Tipos de elementos

Os elementos usados na análise em elementos finitos são escolhidos de forma a representar o comportamento físico da estrutura em cada trecho. Essa escolha é feita de acordo com o tipo de análise a ser realizada, com a posição espacial do problema (unidimensional, bidimensional ou tridimensional), os graus de liberdade necessários à análise, o tipo de discretização, a geometria ou simplesmente por escolha do operador. (Silva, 2013). Os elementos utilizados possuem basicamente as formas apresentadas na Figura 28.

Além da forma geométrica do elemento, duas características relevantes na escolha do elemento finito são os nós e os respectivos graus de liberdade. A ideia de graus de liberdade está ligada com o movimento e as restrições. É possível associar esse conceito ao movimento de partículas na mecânica dos sólidos. Para isso, basta avaliar os casos apresentados na Figura 29, onde um ponto no espaço tridimensional possui três graus de liberdade, ou seja, é possível movimentar-se translacionalmente nas direções dos eixos, enquanto que um corpo rígido no espaço possui seis graus

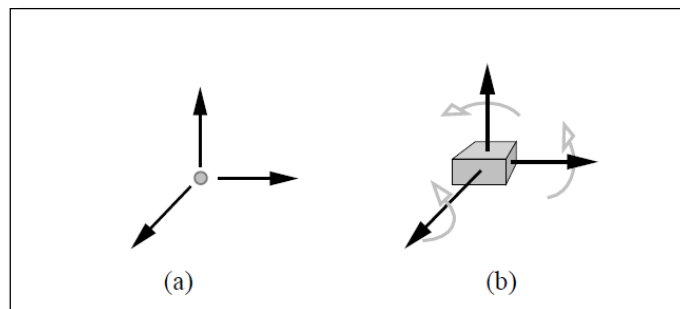
de liberdade, pois, além do movimento de translação, ainda são possíveis os movimentos de rotação nos eixos. (Souza, 2003)

Figura 28 - Exemplos dos tipos básicos de elementos.



Fonte: Souza (2003, p.3)

Figura 29 - Exemplos de grau de liberdade (a) Ponto no espaço (b) Corpo rígido.



Fonte: Souza (2003, p.6)

Um elemento finito é definido basicamente pela sua forma geométrica, pelo número e posicionamento dos nós e pelos graus de liberdade por nó. Os nós são as entidades fundamentais dos elementos. Por meio deles os elementos se conectam uns aos outros, as propriedades são estabelecidas e as condições de contorno são definidas. (Budynas 2006). Dessa maneira, pode-se concluir que um mesmo elemento pode ser utilizado com diferentes graus de liberdade, dependendo da dimensão e do tipo de análise.

Na mecânica dos sólidos, para análise de tensões em um meio tridimensional, tem-se três graus de liberdade, enquanto que para análise de um estado plano de tensões tem-se dois graus de liberdade. Nestes casos, os graus de liberdade estão diretamente relacionados aos movimentos ou deslocamentos dos nós, que são também as incógnitas principais da análise. Para o caso de um problema de condução de calor, embora não haja o estudo do movimento de uma partícula, o grau de liberdade representa a incógnita principal do problema, para qualquer valor de campo de temperatura nos nós da malha. (Souza, 2003)

No ANSYS WORKBENCH, a discretização do componente é feita automaticamente pelo software, de acordo com as características geométricas, do material e do contato. Ainda assim, existem opções para o aprimoramento da malha, que permitem alterar desde o refinamento da malha em determinada região, até a inclusão de métodos específicos para criação da malha. A Tabela 1 mostra um compilado do processo de criação de malha no software ANSYS Workbench.

Tabela 1 - Opções de edição da malha no software ANSYS WORKBENCH.

| Opções de malha | Local de aplicação | Controle | Tipo de especificação |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|--|
| Básica | Todos os corpos | Relevância | Padrão automático com ajuste de relevância |
| Avançada | Todos os corpos | Tamanho de elemento | Padrão automático |
| Avançada | -- | Proximidade | Atribuído pelo usuário |
| Avançada | -- | Verificação de forma | Atribuído pelo usuário |
| Avançada | -- | Ordenação | Atribuído pelo usuário |
| Dimensionamento | Aresta, face ou corpo | Tamanho de elemento | Atribuído pelo usuário |
| Refinamento | Aresta, face ou corpo | Refinamento | Atribuído pelo usuário |
| Discretização mapeada de face | Face | -- | Atribuído pelo usuário |
| Forma de elementos | Corpos sólidos | Forma de elemento | Atribuído pelo usuário |
| Forma de elementos | Superfícies | Forma de elemento | Atribuído pelo usuário |

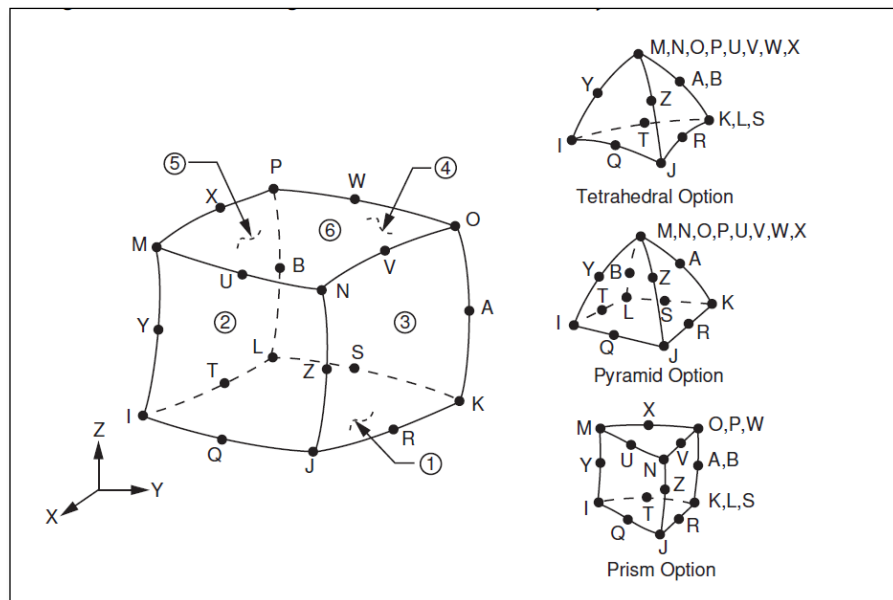
Fonte: Adaptado de Azevedo (2013)

Em geral, para componentes estruturais tridimensionais, a malha criada pelo software é composta pelos elementos SOLID186 e SOLID 187.

O elemento SOLID186 é um elemento tridimensional com 3 graus de liberdade por nó, possuindo uma forma quadrática. Composto por 20 nós distribuídos conforme mostra a Figura 30, ele possui a capacidade da formulação de materiais com plasticidade, encruamento, fluência e grandes deformações.

Além de sua forma básica hexaédrica, esse elemento também pode ter uma configuração prismática, piramidal ou tetraédrica, podendo assim se ajustar a geometria do modelo. (Ansys, 2009)

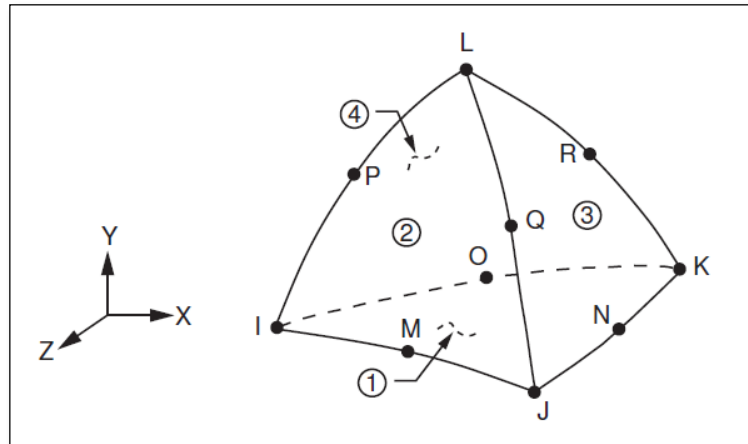
Figura 30 - Elemento SOLID186 da plataforma ANSYS.



Fonte: Ansys (2009)

O SOLID187 é um elemento tridimensional composto por dez nós, com três graus de liberdade cada. É utilizado em geometrias irregulares, permite a formulação de materiais plásticos, hiperelásticos e com grandes deformações. (Ansys, 2009)

Figura 31 - Elemento SOLID187 plataforma ANSYS.



Fonte: Ansys (2009)

2.3.4 Condições de contato

O modelo físico para análise em elementos finitos geralmente é bastante complexo, havendo a interação com outros elementos de diferentes materiais e condições de solicitação. Essas características devem ser garantidas de forma a reproduzir, o mais próximo possível, a situação real que o modelo reproduz.

Quando duas superfícies separadas tocam uma a outra, como quando começam a ser mutuamente tangentes, considera-se que essas superfícies encontram-se em contato.

É senso comum, que quando duas superfícies estão em contato possuem as seguintes características:

- Elas não penetram uma na outra;
 - Elas podem transmitir forças normais compressivas e forças de atrito tangenciais;
 - Elas normalmente não transmitem forças normais de tração;
- Elas são livres para se distanciar uma da outra.

Os principais tipos de contato reproduzíveis no software ANSYS Workbench são descritos na sequência.

- Contato colado (*Bonded*)

Esse tipo de contato é automático nos softwares. Quando a geometria é inserida todos os contatos são considerados colados (*bonded*). Esse tipo de contato não permite nenhum deslizamento ou separação entre as faces ou arestas. Uma solução linear é obtida para esse tipo de contato, uma vez que o comprimento ou área de contato não mudarão durante as solicitações dos carregamentos. Se o contato for determinado com o modelo matemático, lacunas podem ser fechadas e nenhuma penetração é considerada. (Azevedo, 2013b)

- Contato sem separação (*no separation*)

Semelhante ao contato “ligado”, nenhum deslocamento de faces em contato é permitido. Porém, pequenas quantidades de atrito de deslizamento podem ocorrer ao longo das faces em contato. (Azevedo, 2013b)

- Contato sem atrito (*Frictionless*)

Nesse tipo de contato a pressão normal é zero caso a separação ocorra, e só é aplicado a faces. Assim, nesse tipo de contato, lacunas podem se formar entre os corpos se a carga for suficiente. Um coeficiente zero de atrito é admitido, portanto o movimento ocorre livremente. Deve-se ser criterioso ao usar esse tipo de contato, pois geralmente molas fracas são adicionadas ao conjunto, com intuito de gerar estabilidade ao sistema. (Azevedo, 2013b)

- Contato áspero (*Rough*)

Semelhante ao atrito, essa opção cria um contato áspero, ideal para os casos de não deslizamento. Também só pode ser aplicada a faces. Lacunas entre os corpos não são preenchidas por padrão. Um coeficiente de atrito infinito é admitido. (Azevedo, 2013b)

- Contato com atrito (*Frictional*)

Neste tipo de contato é possível inserir qualquer valor não negativo para o coeficiente de atrito. As faces em contato podem ser carregadas por tensões de cisalhamento até uma certa magnitude, então começa a ocorrer o deslizamento entre

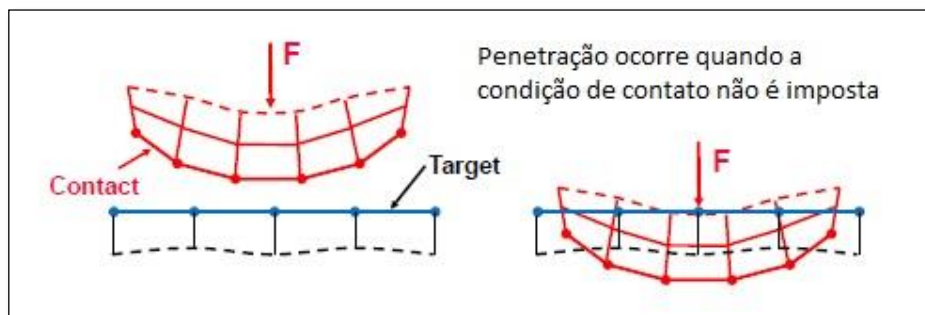
as faces. O modelo define uma tensão equivalente de cisalhamento, que determina o começo do deslizamento quando uma fração de pressão de contato é adicionada. As faces, então, deslizam uma em relação a outra. (Azevedo, 2013b)

No ANSYS WORKBENCH, a condição de interface é interpretada como uma hipótese de contato, estabelecendo relações que permitem que elas não ultrapassem seus limites durante a análise.

O contato muda o status de não-linearidade pois a rigidez do sistema depende do estado do contato, se as peças estão se tocando ou separadas.

Na geração da malha, são criados elementos do tipo “contact” e “target”, conforme mostra Figura 32.

Figura 32 - Elementos finitos de contato com e sem penetração.



Fonte: Ansys (2006)

Quando o programa impede interpenetração, é imposta uma compatibilidade de contato.

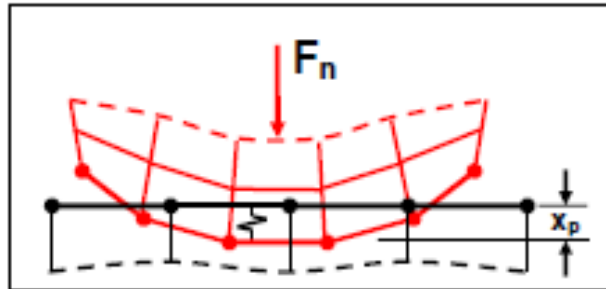
No ANSYS WORKBENCH existem várias formulações diferentes para implementar compatibilidade na interface de contato. Este trabalho especifica as formulações utilizadas na implementação do modelo.

- **Algoritmo de contato: Penalidade Pura (*Pure Penalty*) e Lagrange Aumentado (*Augmented Lagrange*)**

São utilizados nos contatos com e sem atrito, quando as superfícies estão simplesmente apoiadas. Em sua formulação cria-se uma rigidez compressiva de

contato, entre os nós da interface, e a cada iteração ajusta-se o valor da rigidez para que não haja penetração entre as faces.

Figura 33 - Superfícies com rigidez de contato devido a penetração.



Fonte: Ansys (2006)

A formulação para o *Pure Penalty* é dada pela Equação 13:

$$F_n = k_n x_p \quad (13)$$

Onde:

F_n – Força normal de contato na interface

k_n – Rigidez de contato

x_p – valor de interpenetração das faces de contato.

No método, *Augmented Lagrange* além da rigidez normal, é acrescentada a força de contato de pressão (λ), com o objetivo de aumentar a convergência dos resultados, conforme mostra a Equação 14.

$$F_n = k_n(x_p + \lambda) \quad (14)$$

Onde:

λ - Força do contato de pressão

Assim para uma força finita de contato F , quanto maior a rigidez de contato, menor será a penetração. Logo quando k tende ao infinito, x tenderia a zero. Embora isso não seja possível numericamente, para pequenos valores de x , a solução converge com resultados precisos.

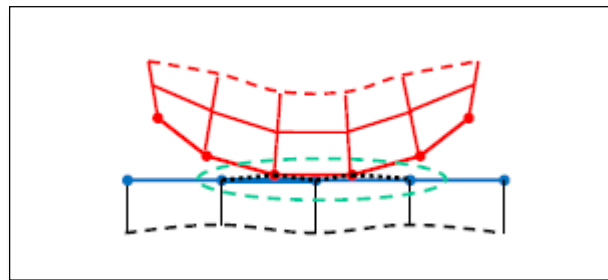
A rigidez de contato (K_n) é o termo mais importante que afeta a exatidão e o comportamento de convergência. (Ansys, 2006)

- **Algoritmo de contato: Método da restrição de Multi-Pontos - MPC (*Multi-Point Constraint*)**

Esse algoritmo é usado para o contato colado, pois adiciona internamente, equações de restrição (condições de contorno) que “amarram” os deslocamentos entre as superfícies de contato.

Por ser uma abordagem direta, é bastante eficiente para os contatos do tipo *Bonded* e *No-Separation*, inclusive para os casos com grande deformação. Um esquema dos elementos *contact* e *target*, é mostrado na Figura 34, os elementos podem assumir qualquer uma das posições.

Figura 34 - Elementos em contato na formulação MPC.



Fonte: Ansys (2006)

- **Elementos Finitos de Contato**

No ANSYS WORKBENCH estão disponíveis os elementos de contato através de pares, são eles: CONTACT174-TARGET170. Esses elementos são usados para representar contato e deslizamento entre superfícies tridimensionais. Pode ser usado tanto em geometrias estruturais sólidas como em elementos de casca.

Ele possui a mesma forma geométrica que a face do elemento (sólido ou casca) com o qual está em contato.

Esse elemento também é usado para modelagem de separação do contato colado (*separation of debonded contact*). O elemento é definido por oito nós.

2.3.3. Análise de comportamento de falha

Para realizar a análise de falhas em elementos finitos é preciso introduzir um novo tipo de consideração, pois o método dos elementos finitos baseia-se no conceito de um meio contínuo. Desta forma, no momento que ocorre a falha por ruptura/separação dos componentes, esse conceito não é mais válido. Na prática, em uma análise de elementos finitos esse comportamento não ocorre. Logo, surge a necessidade da utilização de um recurso chamado elemento coesivo.

A zona coesiva é idealizada como duas superfícies coesas que são mantidas juntas por meio de forças de tração. Segundo o modelo, essas forças são decorrentes das forças de ligação atômica. As zonas coesivas estão relacionadas com o movimento relativo das superfícies em contato por meio da lei constitutiva. Uma abertura (ou trinca) física ocorre quando os deslocamentos relativos na zona coesiva atingem um valor crítico. (Christensen, 2013)

Na formulação de problemas estruturais utilizam-se um conjunto de equações diferenciais para descrever tensão e deformação distribuídos no meio contínuo, sob a influência das condições de contorno. A zona coesiva pode ser incorporada na formulação do contínuo pela aplicação de trações coesivas como condições de contorno. Quando é feita a discretização do problema, são usados dois tipos de elementos: um de tipo contínuo e um de modelo de zona coesiva (Cohesive Zone Model CZM). (Christensen, 2013)

No ANSYS WORKBENCH é possível utilizar duas diferentes abordagens para a modelagem de zona coesivas. A primeira é pela interface de elementos, que permite a simulação do cisalhamento (*delamination*) da interface e outros fenômenos de fratura. A outra é pelo contato de elementos, nessa situação é considerado o descolamento (*debonding*) como um tipo de contato que permite a separação dos componentes. (Ansys, 2009)

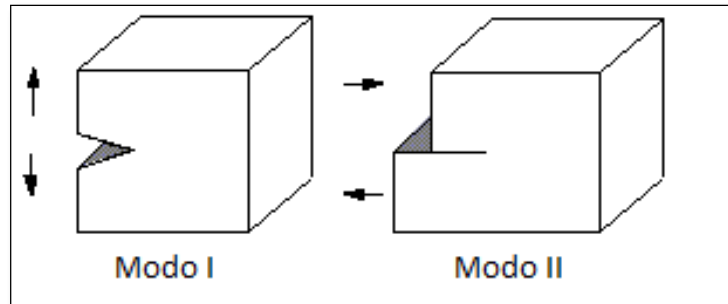
O descolamento é recurso que pode ser utilizado na modelagem de falhas em modelos numéricos. No software ANSYS WORKBENCH esse recurso atua como a separação do contato colado (*bonded*) e está associado a um modelo de material de zona coesiva.

O modelo de zona coesiva permite três modos de separação das regiões em contato são elas:

Modo I – separação por descolagem na direção normal ao contato;

Modo II – separação por escorregamento tangencial a direção de contato;
Modo III – Descolagem ocorre pela combinação dos modos I e II.

Figura 35 - Esquema dos modos de falha do tipo I e II.



Fonte: Ansys (2006)

O material do modelo coesivo pode ser criado de duas formas. A primeira é inserindo os valores de tensão e energia da energia crítica de fratura característicos do contato, a segunda forma é através da tensão e da distância de separação do contato. As características desse material definem a tensão de separação e o comportamento da interface.

Uma alternativa à modelagem por descolamento é a modelagem por meio de uma interface de elementos com um material de zona coesiva, porém a abordagem usando descolamento apresenta vantagens sobre ela, como:

- A malha dos componentes podem ser criadas independentemente;
- Modelos existentes com contatos definidos podem ser modificados facilmente para o modelo de descolamento;
- Contatos padrões e de descolamento podem ser simulados com as mesmas definições de contato;
- O descolamento pode ser utilizado para diversas aplicações como: deslizamento (*delamination*), falha em soldas pontos e outros tipos de falhas em uniões a ponto.

O material do modelo de zona coesiva possui um comportamento bilinear para o descolamento, no modelo a tensão de contato é definida como:

$$P = K_n U_n (1 - d) \quad (14)$$

$$\tau_1 = K_t U_1 (1 - d) \quad (15)$$

$$\tau_2 = K_t U_2 (1 - d) \quad (16)$$

Onde:

P – tensão do contato normal

τ_1, τ_2 – Tensão do contato tangencial na direção 1 e 2 respectivamente;

K_n – Rigidez do contato normal;

K_t – Rigidez do contato tangencial

U_n – abertura do contato;

U_1, U_2 – distância de escorregamento tangencial nas direções 1 e 2 respectivamente

d – parâmetro de descolamento;

1 e 2 indicam as principais direções no plano tangencial.

O parâmetro de descolamento (d) é definido de acordo com o modo de falha (modos I, II e III), e relaciona a abertura do contato e/ou deslizamento em seus pontos: máximo, quando a maior tensão de contato é atingida; e crítica, quando ocorre o descolamento.

Esse parâmetro é definido como:

$$d = \left(\frac{\Delta - 1}{\Delta} \right) x \quad (17)$$

Com $d=0$ para $\Delta \leq 1$ e $0 < d \leq 1$ para $\Delta > 1$. Onde Δ e x são definidos para cada modo de falha.

Para o modo I de falha (normal):

$$\Delta = \Delta_n = \frac{u_n}{\bar{u}_n} \quad (18)$$

$$x = x_n = \left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n} \right) \quad (19)$$

Onde

\bar{u}_n – abertura de contato equivalente a máxima tensão normal.

u_n^c – abertura do contato no descolamento total.

Para o modo II de falha (tangencial):

$$\Delta = \Delta_n = \frac{u_t}{\bar{u}_t} \quad (20)$$

$$u_t = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (21)$$

$$x = x_t = \left(\frac{u_t^c}{u_t^c - \bar{u}_t} \right) \quad (22)$$

Onde

\bar{u}_t – deslizamento equivalente a máxima tensão tangencial de contato.

u_t^c – deslizamento do contato no descolamento total.

Para o modo III de falha (misto):

$$\Delta_m = \sqrt{\Delta_n^2 + \Delta_t^2} \quad (23)$$

$$x = \left(\frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n} \right) = \left(\frac{u_t^c}{u_t^c - \bar{u}_t} \right) \quad (24)$$

A restrição x é executada automaticamente pela propriedade escalar da rigidez de contato.

Para o modo misto de falha, o descolamento completo acontece quando o critério de energia mostrado na Equação 25 é satisfeito:

$$\frac{Gn^2}{Gcn} + \frac{Gt^2}{Gct} = 1 \quad (25)$$

Onde

$$Gn = \int P du_n \quad (26)$$

$$Gt = \int \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} dnt \quad (27)$$

$$Gcn = \frac{1}{2} \sigma_{max} u_n^c \quad (28)$$

$$Gct = \frac{1}{2} \tau_{max} u_t^c \quad (29)$$

Onde:

σ_{max} – Tensão máxima de contato normal

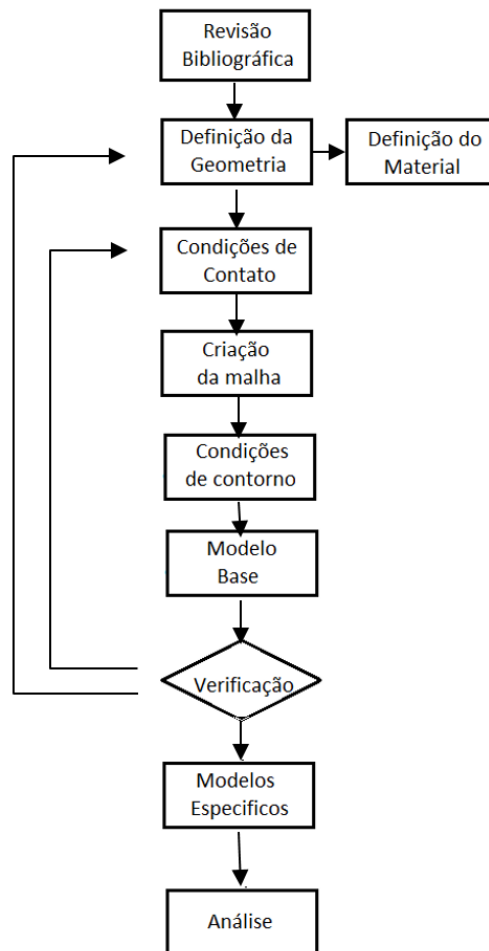
τ_{max} – tensão máxima de contato tangencial.

Para implementação do material no software, são inseridas as tensões máximas e a distância correspondente ao descolamento total, nas direções normal e tangencial.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do modelo proposto, foi seguido o conjunto de etapas esquematizado na Figura 36. Primeiramente, um modelo base foi criado. Então, a partir desse modelo, novas considerações foram realizadas de acordo com os resultados encontrados, criando-se um segundo modelo de modo a obter um comportamento mais próximo ao experimental.

Figura 36 - Fluxograma da metodologia adotada no trabalho



As etapas mostradas na Figura 36 são detalhadas a seguir:

(a) Revisão bibliográfica:

Nessa etapa, buscou-se conhecer o processo de soldagem FSpW, a fim de definir os parâmetros necessários para simular a geometria da junta real e suas regiões de solda, as propriedades do material em cada região e o comportamento mecânico da junta. Também fez-se necessária uma extensa revisão informações sobre o método dos elementos finitos, sua utilização, aplicações e ferramentas de análise, de modo a poder aplica-las de acordo com o modelo a ser criado e definir, assim, os parâmetros do modelo numérico.

(b) Definição da geometria

A geometria criada, compreende a montagem de quatro componentes que representam as duas chapas (superior e inferior), a zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e a zona de mistura (ZM).

A geometria foi criada no software de desenho computacional SolidWorks, conforme é mostrado na Figura 37, e suas dimensões apresentadas na Figura 38 e na Figura 39, foram baseadas na geometria apresentada em Rosendo (2009). Para posterior importação ao software ANSYS, a geometria foi convertida para o formato IGES.

Figura 37 - Vista explodida da geometria.

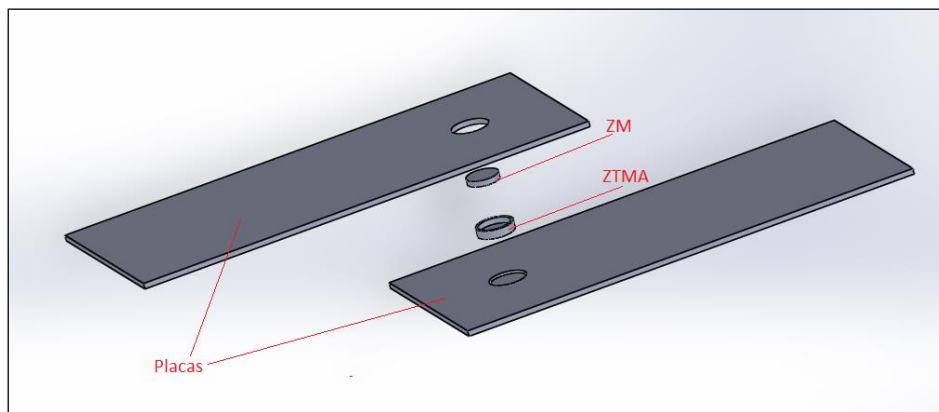


Figura 38 - Dimensão das chapas.

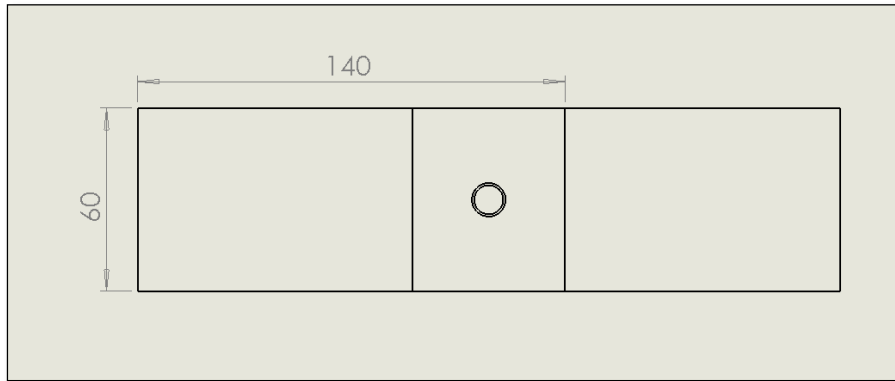
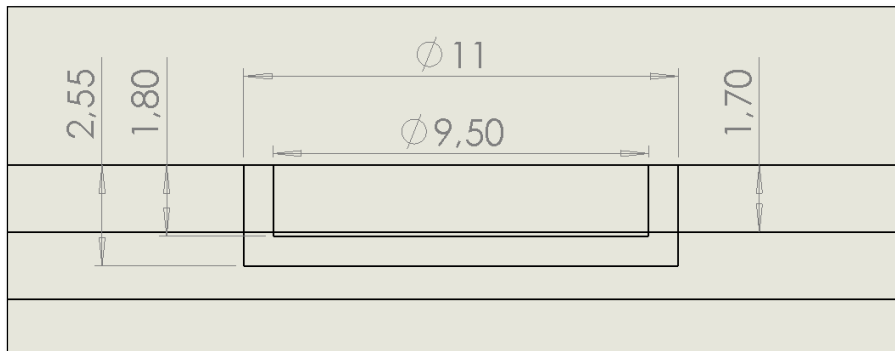


Figura 39 - Dimensão das zonas das soldas.



(c) Definição do material

Nessa etapa, foram inseridas as propriedades do material em cada região da junta, incluindo o metal base (propriedades inalteradas) e as zonas, ZM e ZTMA. Essas propriedades foram baseadas em dados obtidos experimentalmente.

Os modelos utilizados na implementação do material no ANSYS WORKBENCH são: o *isotropic elastic* (elástico isotrópico) para o regime elástico do material, o qual solicita o módulo elasticidade e o coeficiente de Poisson do material; e o *multilinear isotropic hardening* (encruamento isotrópico multilinear) para o regime plástico, esse modelo permite a implementação da curva tensão x deformação do material após o escoamento e antes da estrição.

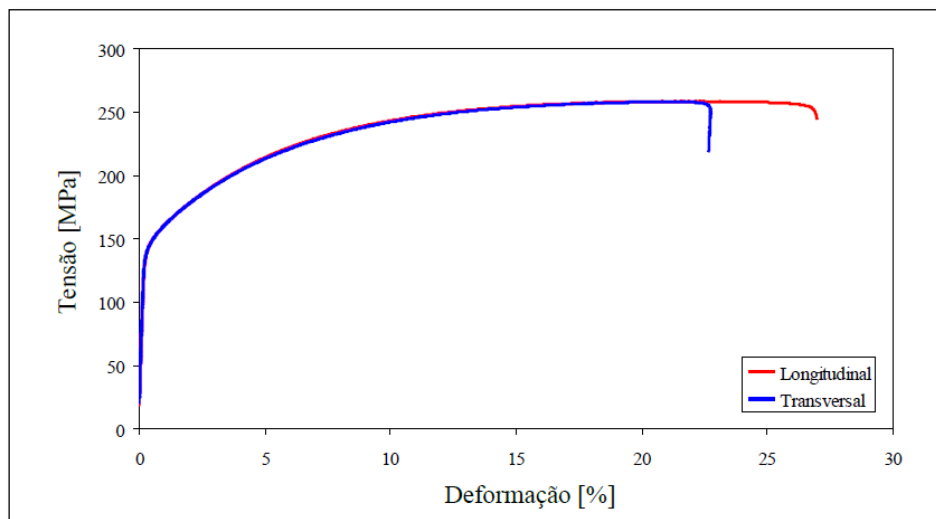
A composição da liga utilizada é mostrada na Tabela 2, e a curva tensão x deformação do material, é mostrada na Figura 40.

Tabela 2 - Composição da liga Al 6181-T4 utilizada no modelo experimental.

| Composição da liga 6181-T4 [% em peso] | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|-------|--------|-------|-------|---------|
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Ti | Al |
| 0,85 | 0,25 | 0,06 | 0,09 | 0,74 | 0,013 | 0,0026 | 0,012 | 0,023 | balanço |

Fonte: Rosendo (2009)

Figura 40 - Curva tensão x deformação da liga 6181-T4.



Fonte: Rosendo (2009)

Com base na curva experimental da liga, foram utilizados no modelo numérico as propriedades mostradas na Tabela 3.

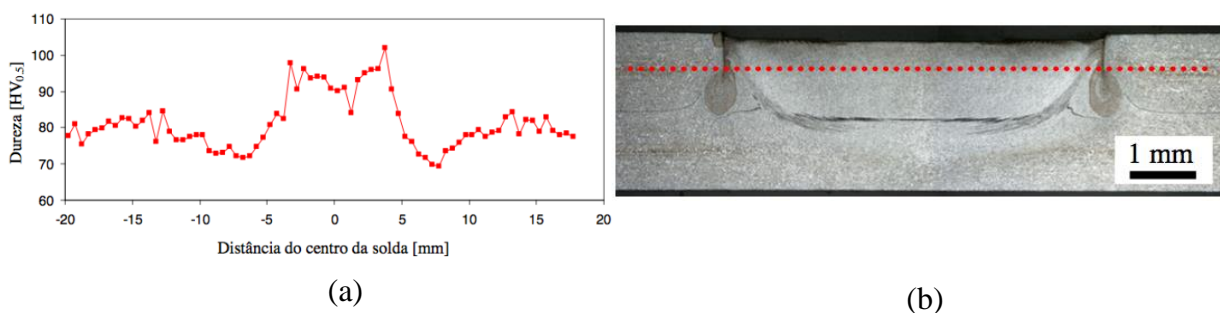
Tabela 3 - Propriedades mecânicas inseridas no modelo experimental

| Propriedade | Valor | Unidade |
|----------------------------|-------|---------|
| Módulo elasticidade - E | 62,6 | GPa |
| Coefficiente de Poisson | 0,34 | -- |

O perfil de microdureza, que é o parâmetro experimental disponível sobre as zonas de solda, foi utilizado para adaptar as características do material em cada zona no modelo numérico.

Com base na variação do perfil de microdureza ao longo das regiões de solda, foram criados três materiais diferentes, que representam o metal base, e as zonas de solda (ZM e ZTMA). A ZTA foi desprezada neste estudo. Os materiais diferem entre si na região plástica curva tensão x deformação, definidas proporcionalmente ao perfil de dureza nas regiões correspondentes, ou seja, foi considerada uma variação na curva tensão deformação, proporcional a variação do valor de microdureza correspondente a uma das zonas, em relação aos valores do metal base. O perfil de microdureza utilizado para estabelecer as propriedades do material (zonas de solda) é mostrado na Figura 41. Esse perfil foi obtido experimentalmente (Rosendo, 2009) por meio da medição da microdureza Vickers na metade da espessura da chapa superior, cobrindo uma distância de 40mm (20mm para cada lado a partir do centro do botão de solda), como mostrado.

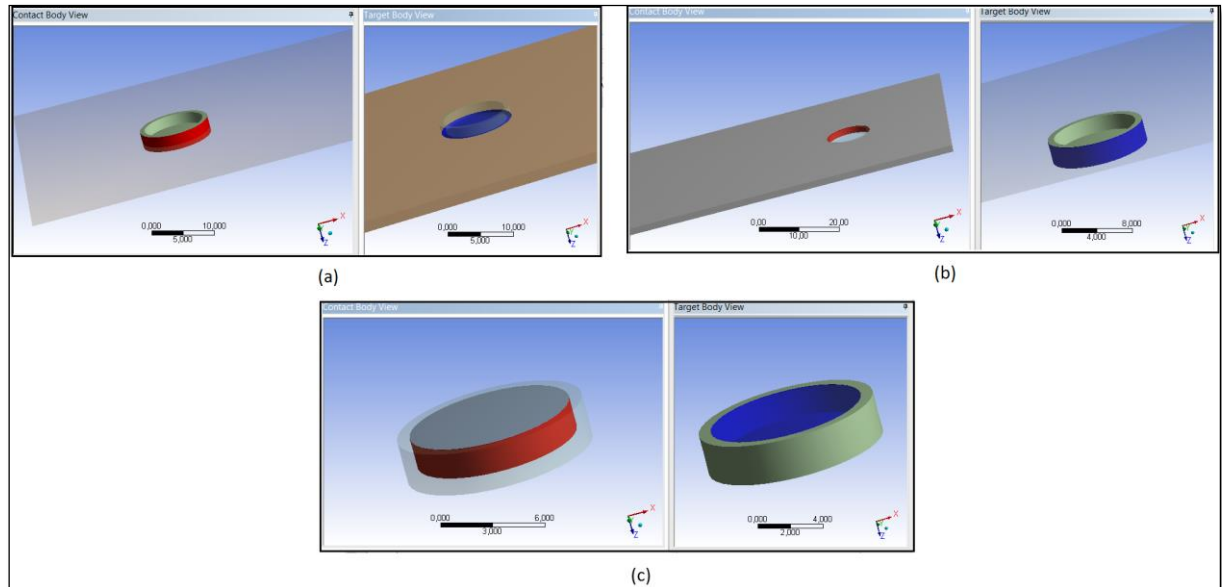
Figura 41 - Perfil de microdureza modelo experimental, utilizado como referência para o estabelecimento das propriedades dos materiais nas diferentes zonas da solda. (a) perfil de microdureza (b) região da junta relativa ao ensaio de microdureza.



(d) Condições de contato

No modelo inicial todas as regiões que simulam contato foram definidas como coladas, para facilitar os cálculos, com exceção da região de interface entre as chapas superior e inferior além do botão de solda, pois embora essas faces “toquem” uma na outra, não existe nenhuma interação que influencie relevantemente na união da junta, sendo esta apenas mantida pelo botão efetivo da solda. As regiões em contato no modelo são mostradas na Figura 42.

Figura 42 - Condições de contato no modelo inicial. (a) Contato entre ZTMA e a chapa inferior. (b) Contato entre a ZTMA e a chapa superior. e (c) Contato entre a ZM e a ZTMA.



(e) Criação da malha

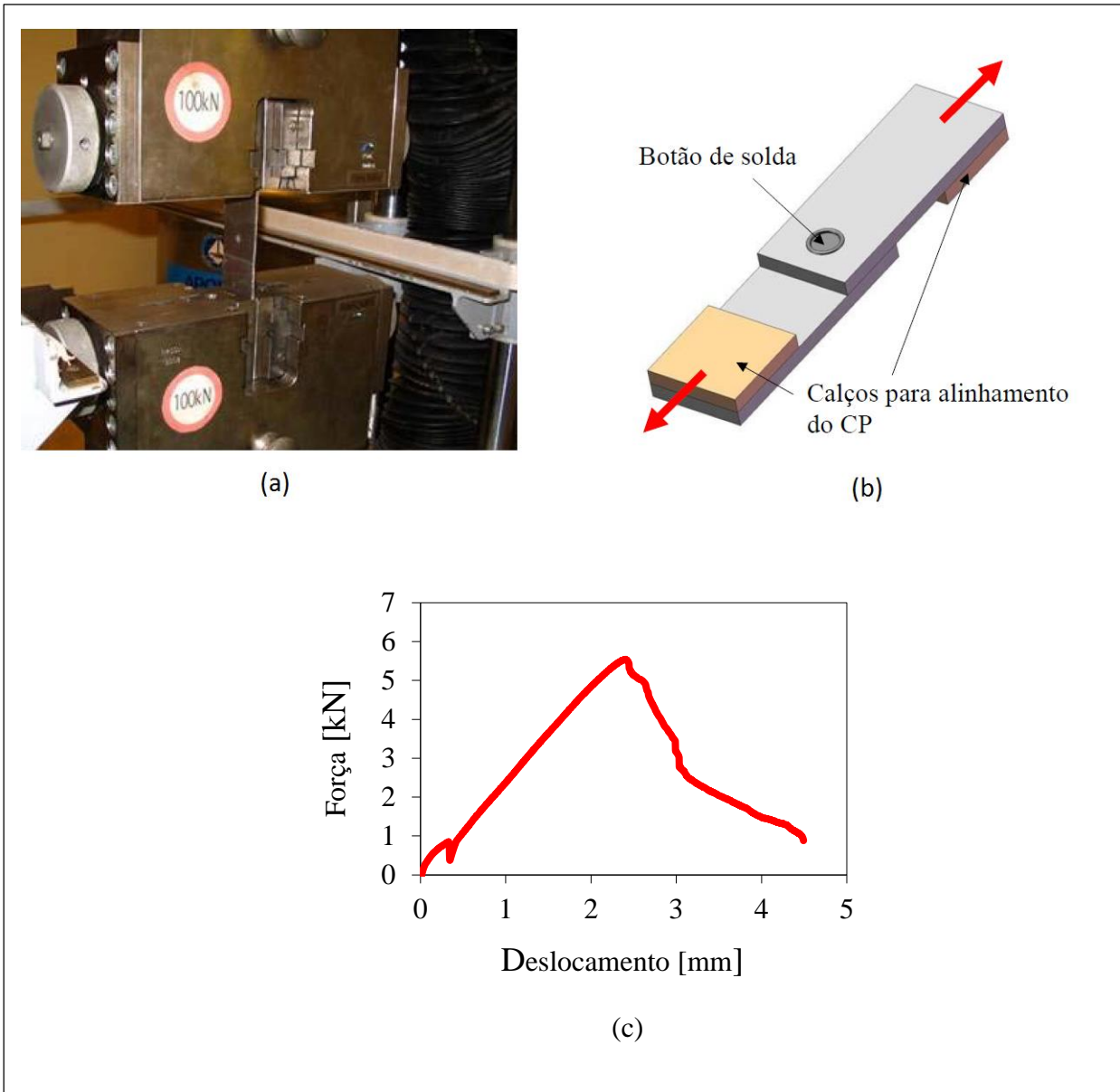
No ANSYS WORKBENCH a malha é construída automaticamente, de forma compatível com as propriedades geométricas, do material e de contatos, definidos. Dentre os parâmetros editáveis, escolhem-se a utilização de elementos hexaédricos e tetraédricos (SOLID186 e SOLID187), o refinamento dos elementos nas regiões correspondentes à ZM e à ZTMA e a uniformidade e suavidade de transição (*smoothing high e transition slow*) dos elementos ao longo do refinamento.

(f) Condições de contorno

Conforme já exposto, busca-se avaliar as características mecânicas de uma junta soldada, sob um ensaio de cisalhamento. No ensaio experimental, as chapas são posicionadas na máquina e solicitadas por tração, enquanto o botão de solda sofre cisalhamento, conforme mostra a Figura 43. A máquina aplica o deslocamento até a falha do componente, medindo a força e o deslocamento durante o ensaio. Esse tipo de ensaio é comumente feito em uniões, tanto soldadas como parafusadas e

rebitadas. A Figura 43c mostra uma curva *força x deslocamento*, típica de um ensaio de cisalhamento de uma junta FSpW.

Figura 43 - Ensaio de cisalhamento (a) ensaio de uma amostra experimental e (b) figura esquemática do ensaio (c) curva característica do ensaio.

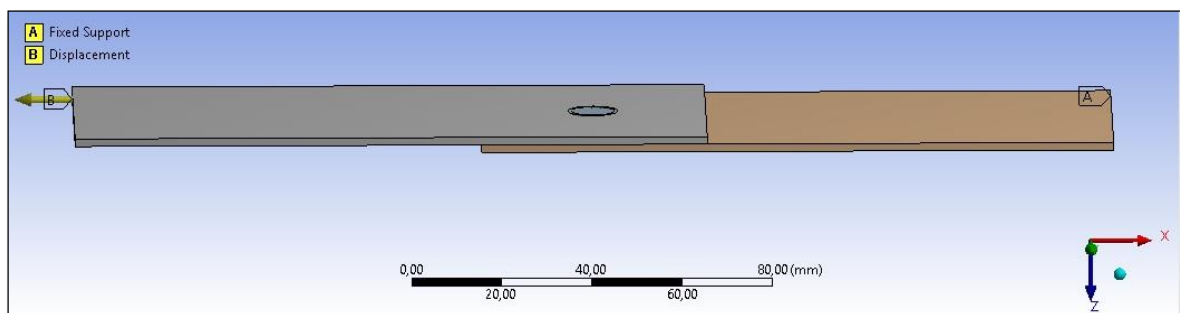


Fonte: Adaptado de Rosendo (2009).

No modelo numérico, optou-se por fixar a extremidade da chapa inferior, e na extremidade da chapa superior foi aplicado um deslocamento, conforme é mostrado na Figura 44. No software a implementação é realizada com duas opções características do Workbench, que são o *fixed support* e o *displacement*. No primeiro, ao selecionar uma região no modelo define-se não haver nenhum grau de liberdade; No segundo, também por seleção de uma região, indica-se o deslocamento aplicado de forma vetorial.

Neste modelo o deslocamento foi implementado somente no eixo paralelo a chapa, que corresponde ao eixo x, do sistema adotado, o valor adotado para o deslocamento no primeiro modelo, corresponde ao deslocamento associado ao início do escoamento nas amostras experimentais.

Figura 44 - Condições de carregamento inseridas no modelo numérico.



(g) Verificação:

Depois da criação de um primeiro modelo base foram avaliadas as propriedades inseridas e escolhidos os parâmetros que auxiliaram na convergência do modelo de forma mais eficiente. Assim, foi decidido pela criação de um segundo modelo, buscando uma formulação que explorasse o comportamento da falha.

No segundo modelo, abordou-se a modelagem da falha, por meio da formulação *Separation-Distance based debonded* do ANSYS WORKBENCH, que visa “descolar” a região de contato entre os componentes. Para essa formulação optou-se por alterar a geometria do primeiro modelo, buscando simplificá-la para facilitar a execução do modelo.

Apenas o metal base e a zona de mistura foram incluídas no segundo modelo, sendo a ZM constituída de dois componentes unidos pela condição de contato, na

região da interface entre as chapas, pois nessa região ocorrerá o descolamento. Assim essa abordagem aproxima-se da situação real de falha.

(h) Segundo modelo– geometria

A geometria do segundo modelo também foi feita no software SolidWorks, e também é composta por quatro componentes, porém no lugar da representação de duas zonas distintas, modela-se apenas a ZM, dividida ao meio representando a separação da junta na falha.

As dimensões das chapas são as mesmas do primeiro, a Figura 45 e a Figura 46, mostram as características geométricas do segundo modelo e suas respectivas dimensões.

Figura 45 - Vista explodida segundo modelo.

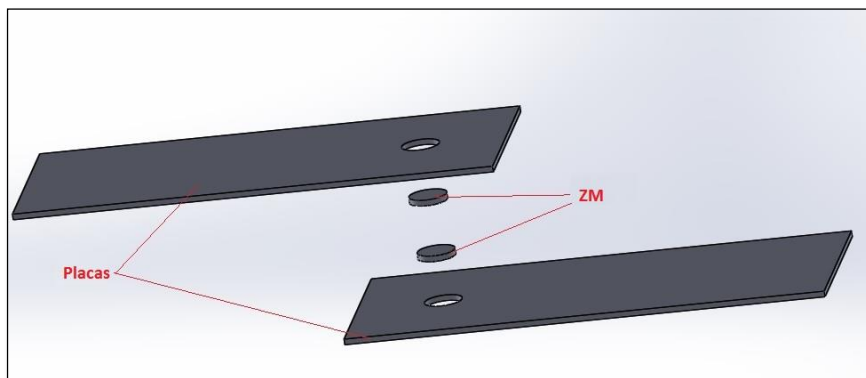
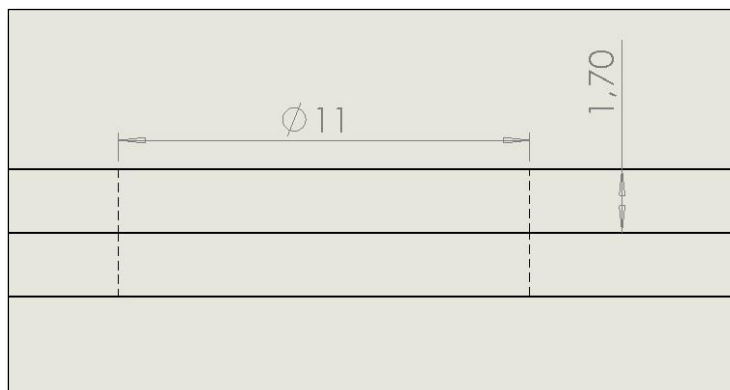


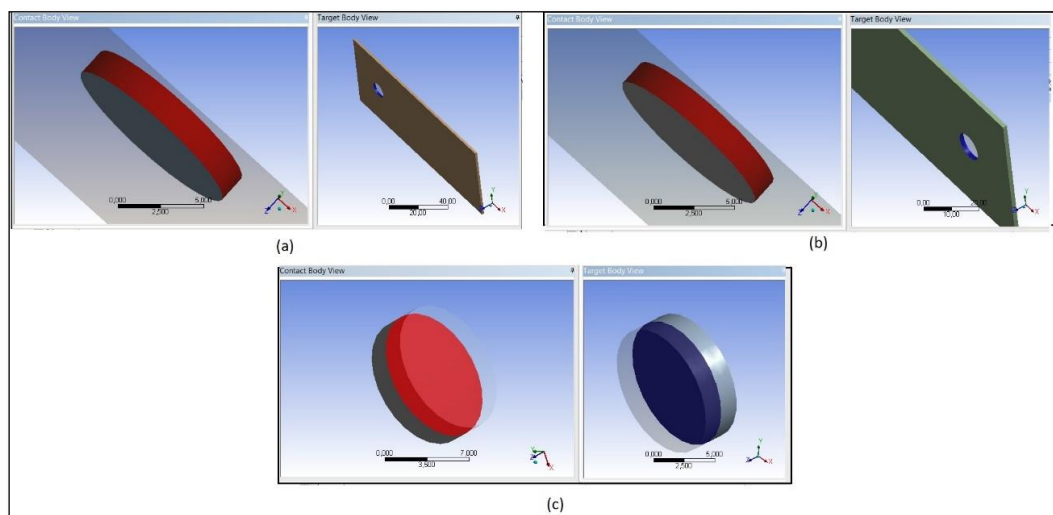
Figura 46 - Dimensões da região da solda



(i) Segundo modelo – contato.

No segundo modelo, também foi utilizada a condição de contato colada (*bonded*) nas regiões entre a ZM e as chapas, e na interface da ZM. Para posterior aplicação do descolamento, é necessário a escolha desse tipo de contato. A Figura 47 mostra as interfaces em contato.

Figura 47 - Condição de contato do segundo modelo. (a) e (b) contato da ZM com as chapas superior e inferior respectivamente e (c) contato entre as partes superior e inferior da ZM na interface entre as chapas (região de descolamento).



(j) Segundo modelo – descolamento

Para modelagem do material no ANSYS WORKBENCH, existem duas opções para o caso baseado no descolamento, um utiliza a energia de fratura do material, e o outro os valores da distância de separação da falha. Ambas abordagens convergem para o mesmo modelo de zona coesiva, mudando apenas as variáveis de entrada.

Neste trabalho é abordado o modelo baseado na distância de separação. As variáveis de entrada implementadas ao modelo são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 -Propriedades exigidas para implementação do material de modelo coesivo no ANSYS WORKBENCH.

| Propriedade | Unidade |
|---|---------|
| Máxima tensão normal de contato | Pa |
| Abertura de contato no descolamento total | m |
| Máxima tensão de cisalhamento de contato | Pa |
| Deslizamento do contato no descolamento total | m |

Embora atualmente já existam vários modelos de material de zona coesiva ou pelo menos modelos preliminares foram avaliados, não foi encontrado na literatura um modelo do tipo utilizado nesse trabalho (*cohesive zone – separation-distance based debonding*) para soldas FSpW em alumínio, logo as propriedades inseridas para o material foram definidas por meio de iterações e avaliação dos resultados.

(k) Análise

No final das simulações há diversas formas de apresentar os resultados. Como o objetivo deste estudo é a simulação do comportamento mecânico de juntas FSpW e a posterior comparação com dados experimentais, foram plotadas curvas força x deslocamento.

No menu *Solution* do ANSYS WORKBENCH escolhe-se o *force reaction*, que retornará os dados da força de reação ao deslocamento (solicitação), e o *defined results*, para os valores de deslocamento usados durante a simulação numérico.

4 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse item os modelos serão apresentados separadamente denominados de “Modelo 1” correspondente ao modelo base inicial, e “Modelo 2” referente ao modelo que utiliza o contato de descolamento baseado no modelo de material de zona coesiva.

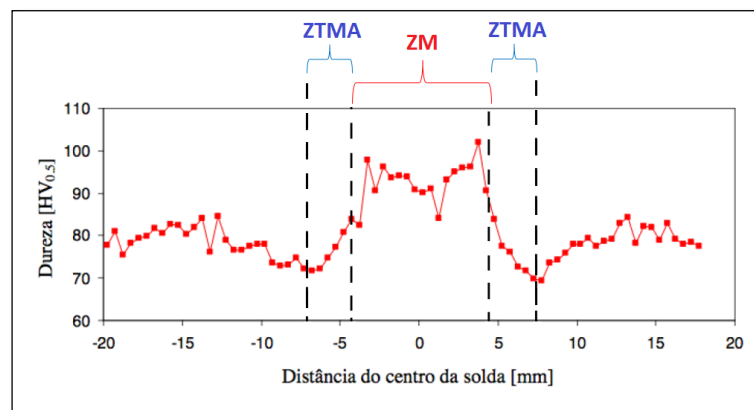
4.1 Modelo 1 – Regime elasto-plástico.

. O primeiro modelo desenvolvido, baseia-se nas características geométricas e no material da junta experimental, representando as diferentes zonas de solda características do processo (exceto a ZTA). Porém esse modelo apenas simula o comportamento elasto-plástico da junta, conforme os modelos baseados na mecânica do contínuo permitem.

4.1.1 Propriedades do material

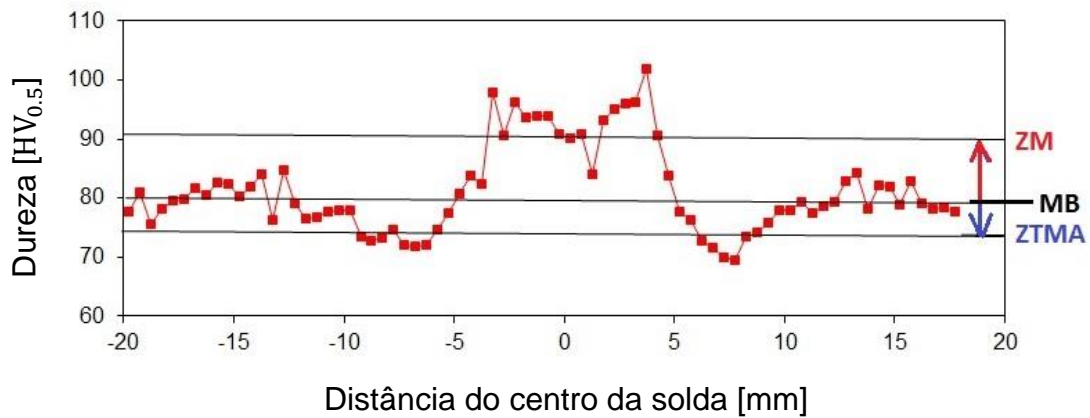
Analisando o perfil de microdureza da junta, foram avaliados quatro diferentes casos para criação dos materiais correspondentes a cada zona. A Figura 48 mostra a região correspondente a cada zona no perfil de microdureza, demonstrando que mesmo dentro de cada zona existem diferenças nos valores. De forma geral é notório que na ZM, a microdureza é superior em relação as demais zonas, enquanto na ZTMA, menor.

Figura 48 - Perfil de microdureza experimental ao longo do botão de solda FSpW tomada como referência para este estudo.

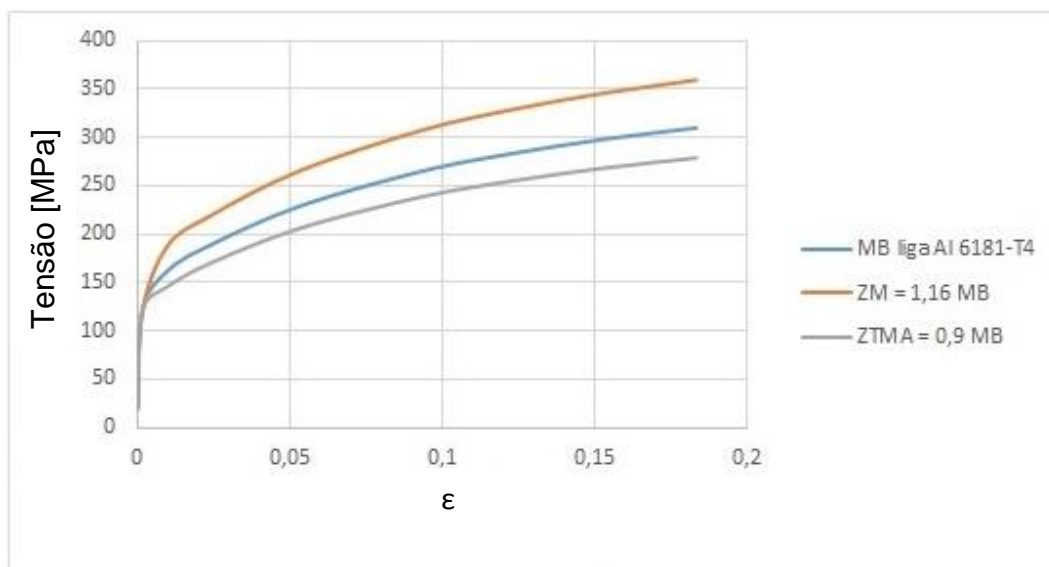


Caso 1: baseia-se na média da microdureza em cada zona para prever o comportamento da curva tensão x deformação do material de cada zona

Figura 49 - Representação dos materiais no caso 1 (a) Regiões do perfil de microdureza (b) Curvas dos materiais criados.



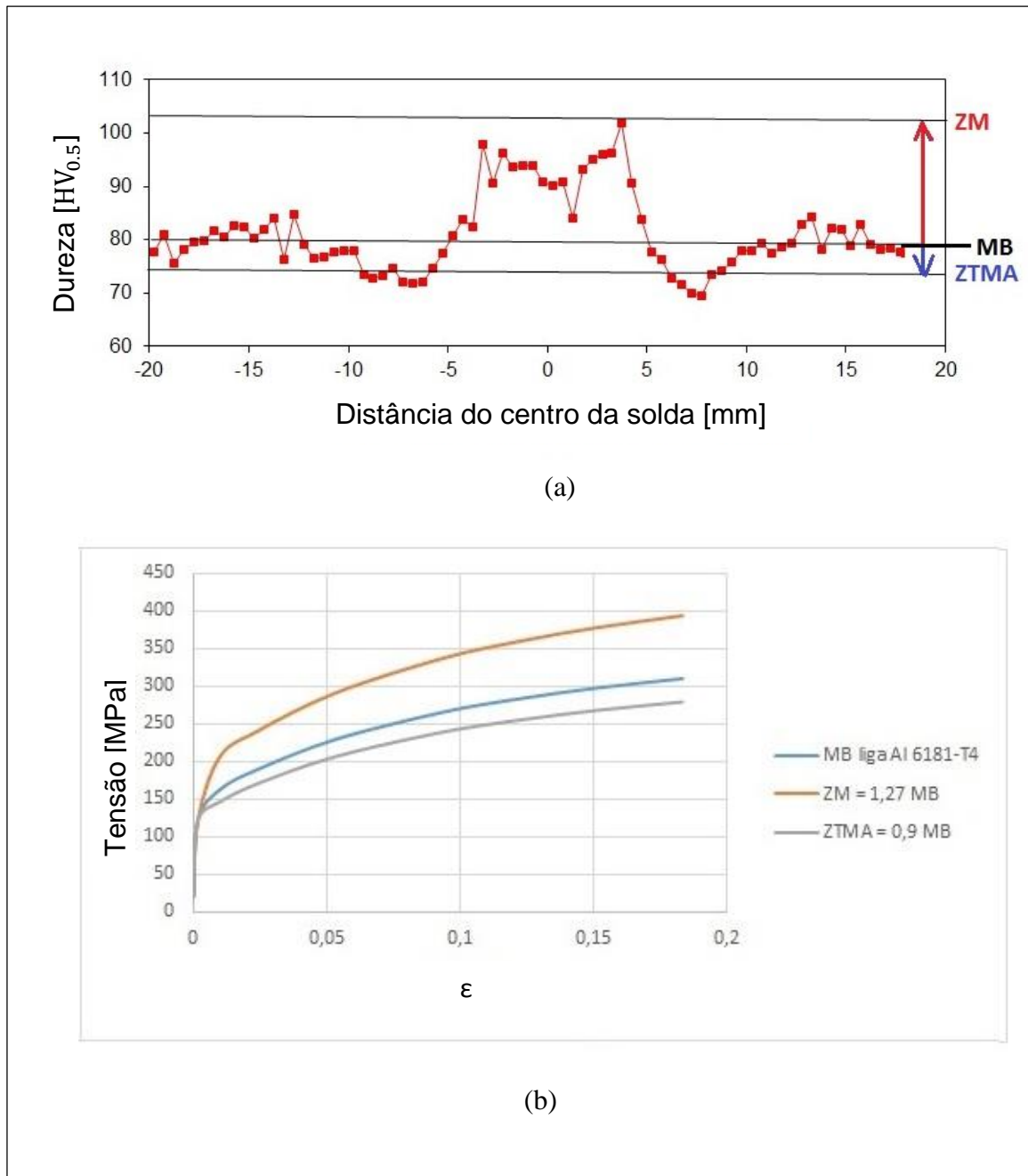
(a)



(b)

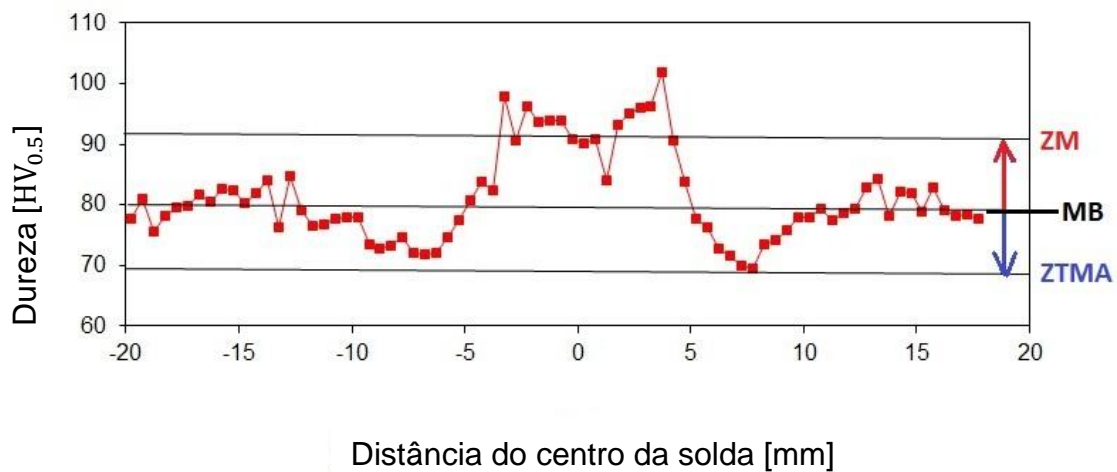
Caso 2: baseia-se no valor máximo da microdureza na ZM e na média de microdureza na ZTMA para prever a curva tensão deformação do material em cada zona.

Figura 50- Representação dos materiais no caso 2 (a) Regiões do perfil de microdureza (b) Curvas dos materiais criados.

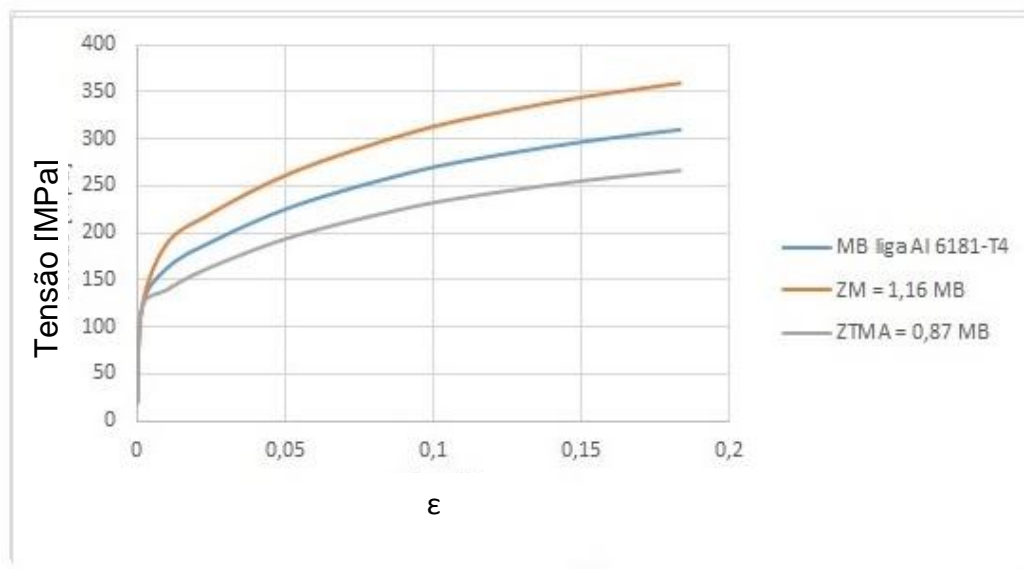


Caso 3: baseia-se no valor mínimo da microdureza na ZTMA e na média de microdureza na ZM para prever a curva tensão deformação do material em cada zona.

Figura 51 - Representação dos materiais no caso 3 (a) Regiões do perfil de microdureza (b) Curvas dos materiais criados.



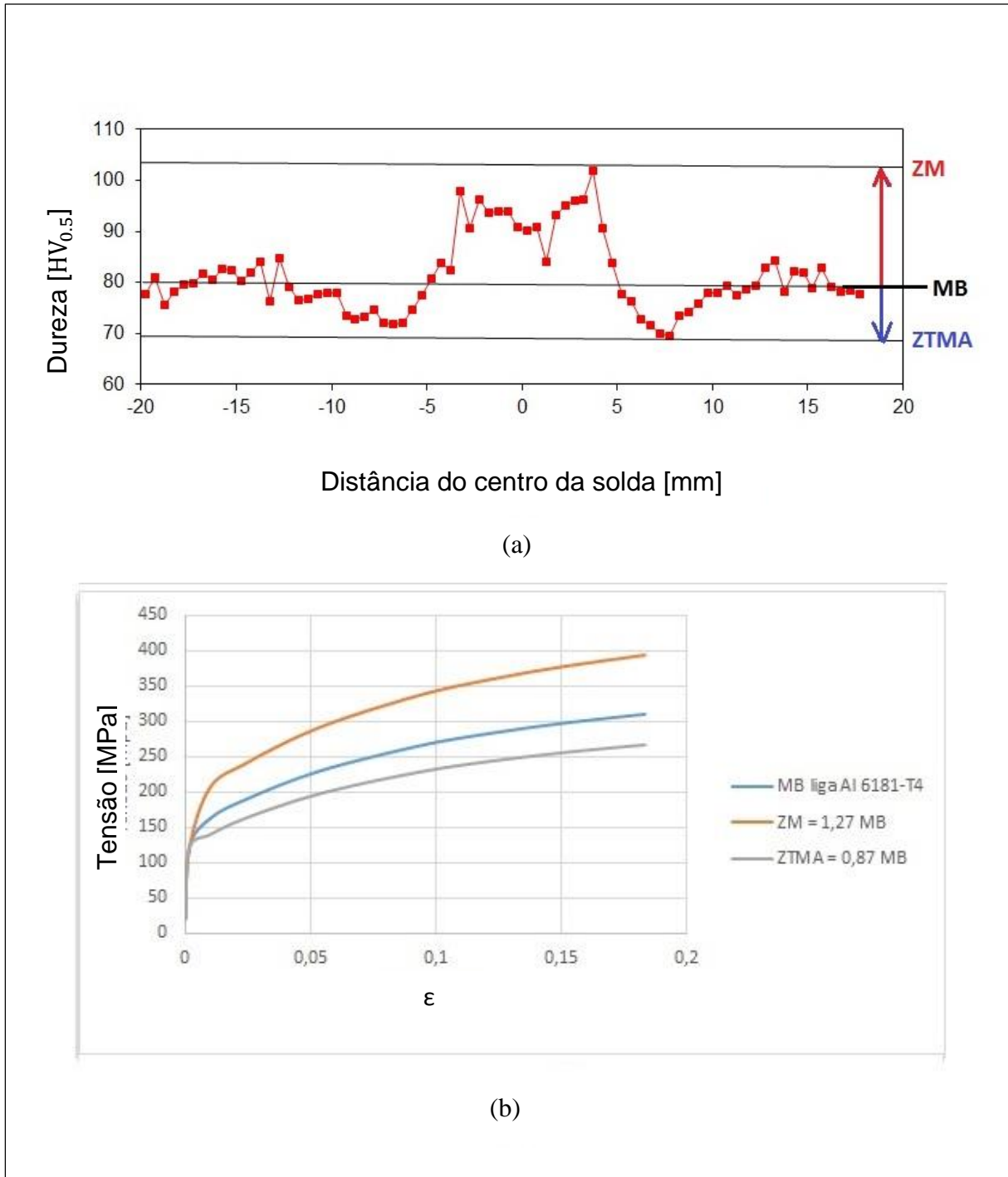
(a)



(b)

Caso 4: baseia-se nos extremos de microestrutura na ZM e na ZTMA para prever a curva tensão x deformação do material em cada zona.

Figura 52 - Representação dos materiais no caso 4 (a) Regiões do perfil de microdureza (b) Curvas dos materiais criados.

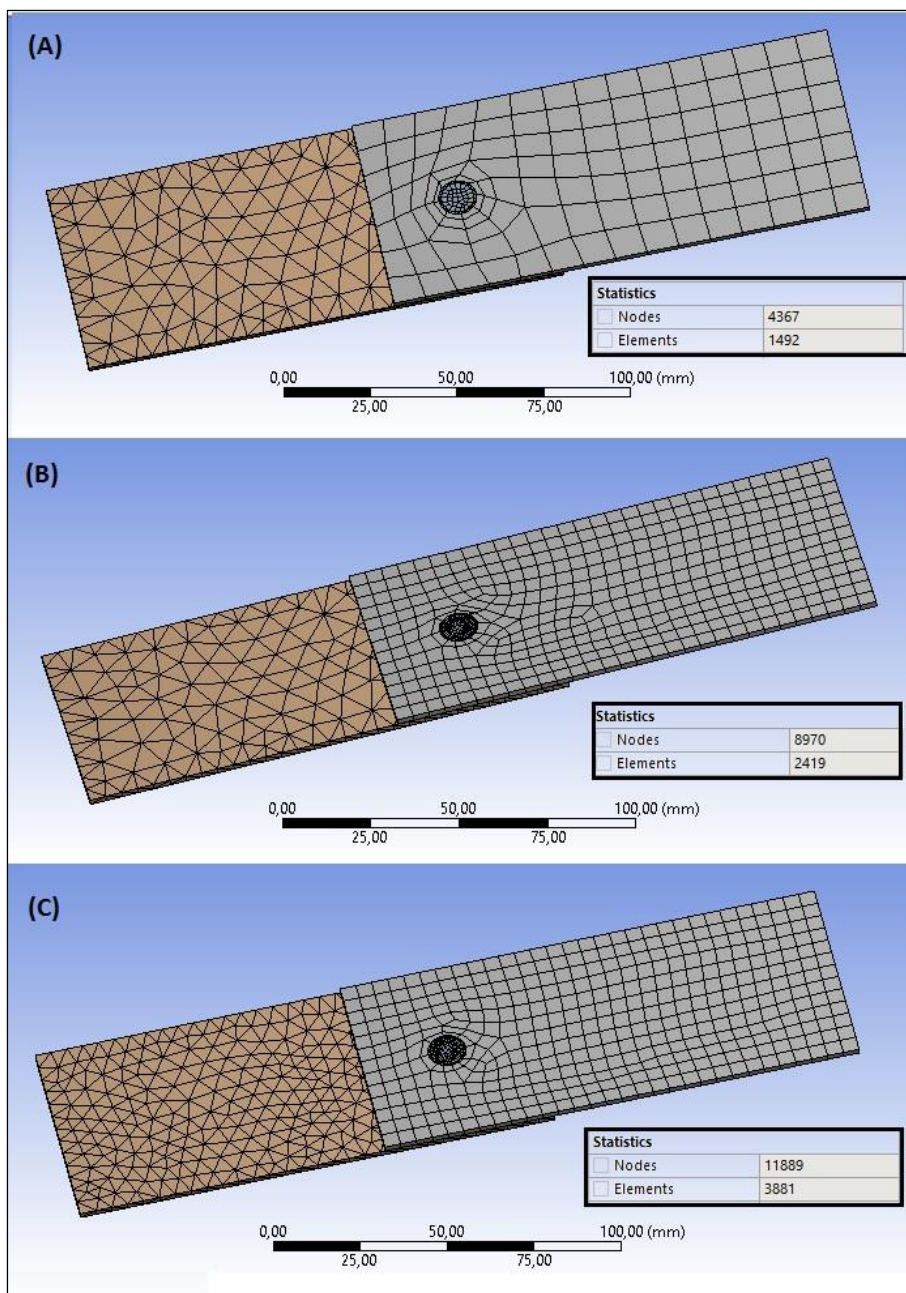


4.1.2. Influência da malha e parâmetros de implementação.

A malha criada automaticamente pelo software, mostrou-se muito grosseira, principalmente nas zonas das soldas, e conseqüentemente não permitiu convergência dos resultados. Assim foram necessárias modificações na malha.

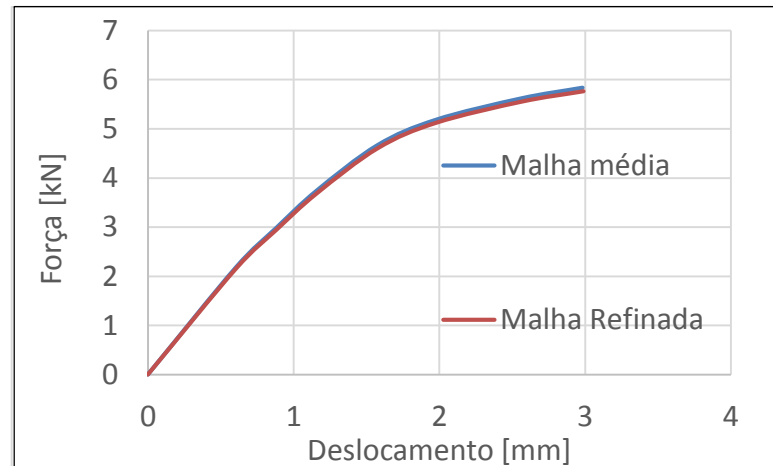
Testaram-se duas malhas uma com refinamento médio e outra com refinamento avançado, as características dessas malhas são mostradas na Figura 53.

Figura 53 - Malha gerada no modelo 1 (a) Malha automática (b) Primeiro refinamento (c) Malha refinada



Das duas malhas que convergiram, foram plotadas as curvas mostradas na Figura 54, essa análise mostra que o refinamento maior da malha mostrou-se desnecessário, pois não influenciou representativamente nos resultados, apenas aumentou o tempo de processamento do modelo.

Figura 54 - Comparação dos resultados em função do refinamento da malha.

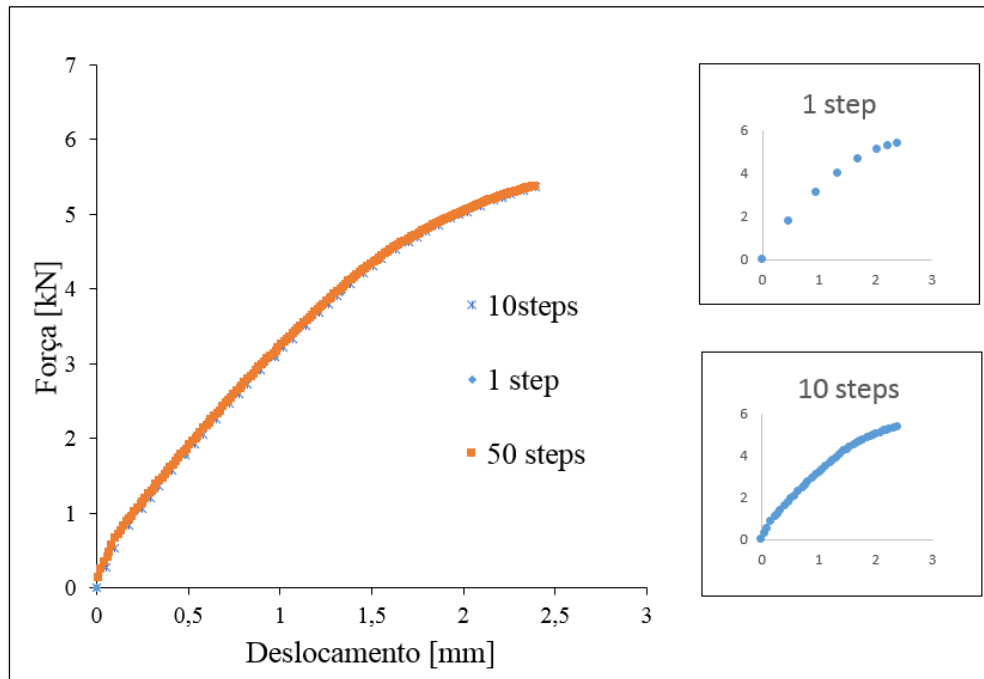


Para plotar as curvas do ensaio numérico de cisalhamento, também foram analisados outros dois parâmetros de simulação o números de iterações (*steps*) os quais o carregamento foi aplicado e o tempo de simulação.

No primeiro parâmetro foram analisados os valores: padrão do programa, 1 *step*, depois 10 e 50 *steps*, as curvas obtidas com os diferentes números de *steps* são mostradas na Figura 55.

Obtém-se com a simulação padrão do ANSYS, apenas 8 pontos, o que torna a curva pouco confiável. Com 10 *steps*, são obtidos 40 pontos do ensaio e com 50 *steps* são obtidos 201 pontos, porém o tempo de processamento é demasiadamente grande, não compensando assim essa abordagem, tendo em vista que não há diferença significativa nos resultados, conforme é observado na Figura 55.

Figura 55 - Comparação dos resultados em função do número de iterações.

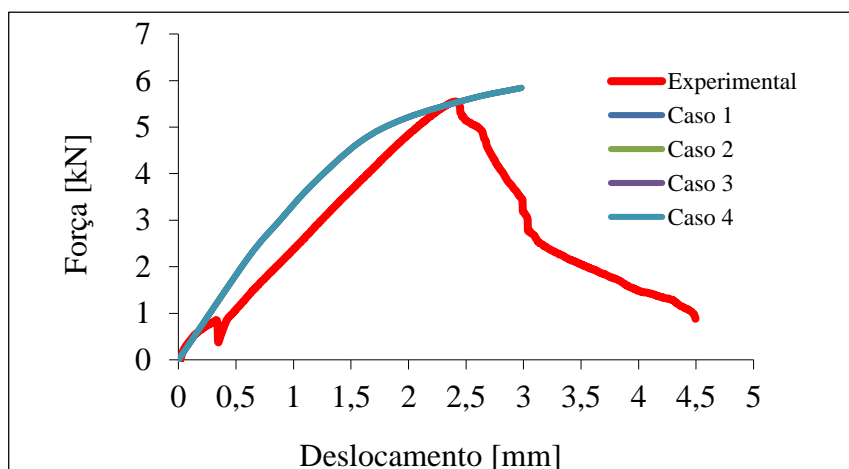


Por fim foi avaliada a influência do tempo de ensaio. Por padrão independentemente do número de *steps* a simulação é feita com um tempo 1s. Alterando esse tempo de simulação, para análise realizada, não houve variação significativa que deve-se a essencialmente duas razões: a simulação ser do tipo *Static Structural*, ou seja, formulada como quase estática; e o deslocamento aplicado ser pequeno.

Assim, depois de analisadas as propriedades do modelo, foram extraídos os resultados utilizando a malha com um primeiro refinamento (Figura 54 (b)) e aplicando o carregamento em 10 *steps*.

Os resultados obtidos nas simulações numéricas para cada um dos quatro casos, foram plotados na forma de curvas força x deslocamento e estão mostrada na Figura 56 juntamente com o resultado experimental correspondente.

Figura 56 – Comparação das curvas Força x Deslocamento para solicitação de cisalhamento, obtidas numericamente (considerando os casos 1, 2, 3 e 4) e experimentalmente.



É importante destacar que estas curvas são reflexo da interação entre as zonas das soldas modeladas com contato do tipo “colado”. É da interação entre os elementos, proveniente do contato colado, que a curva força x deslocamento se comporta como mostrado.

Percebe-se que as curvas são praticamente idênticas em todos os quatro casos estudados, revelando que neste modelo as propriedades individuais de cada zona de solda não interfere significativamente no resultado. Pode-se observar também que o comportamento elástico das curvas numéricas e experimental são semelhantes, validando o modelo implementado dentro deste contexto.

Observando a região um pouco antes dos 0,5 mm de deslocamento, nota-se que as curvas experimental e numérica se afastam um pouco, porém ainda mantêm-se paralelas, isso ocorre devido a pequenas falhas ou “escorregamentos” que ocorrem durante o ensaio real, e não são reproduzidos no ensaio numérico. No modelo implementado, considera-se um meio contínuo e homogêneo, porém sabe-se que esta é apenas uma aproximação, no modelo experimental, pequenos “vazios” iniciam a propagação de pequenas trincas, onde inicia-se o processo de falha por propagação dessas trincas. No caso avaliado ainda assim as curvas mantêm-se paralelas, indicando a proporcionalidade característica do regime elástico.

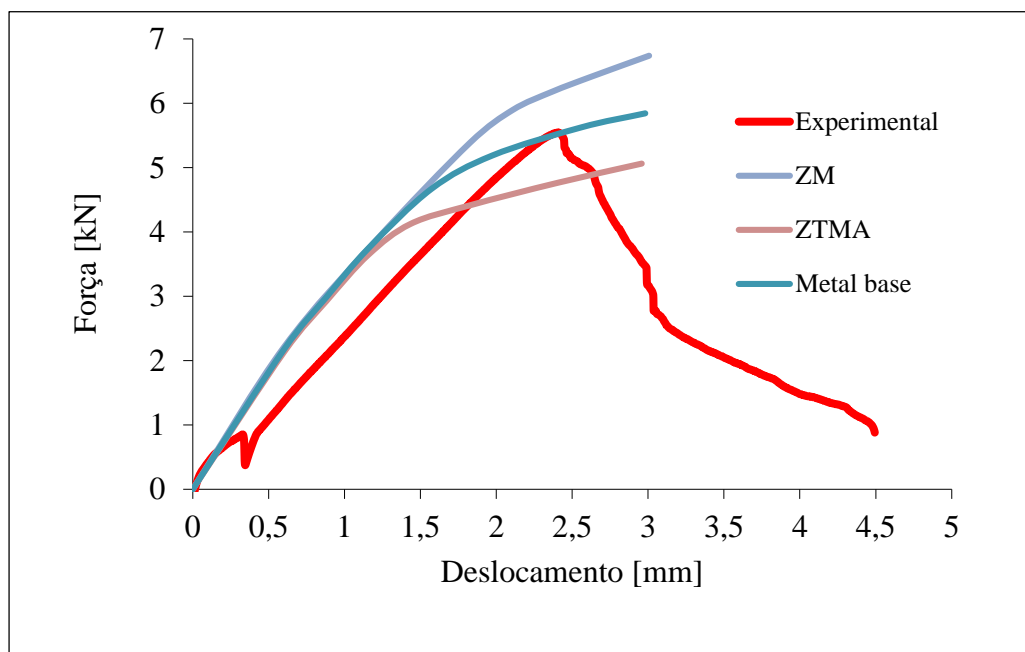
O fato dos quatro diferentes casos convergirem para mesma curva, é preciso avaliar que, embora as propriedades sejam distintas na ZM e ZTMA, essas duas

regiões são muito menores que as dimensões do componente como um todo. É importante destacar que as características geométricas dessas zonas representam o modelo experimental apenas em aspecto macro, sendo que existem diversas características geométricas menores não foram consideradas na implementação.

Destaca-se aqui a hipótese de contato considerada, do tipo colado (*bonded*), essa consideração definitivamente influenciou na interação das diferentes regiões (chapas, ZM e ZTMA) fazendo com que o comportamento da junta como um todo fosse influenciada predominantemente pelo comportamento dos maiores componentes (as chapas superior e inferior) que representam o material base, os quais foram constantes para os quatro casos avaliados.

Para comprovar isso, foram plotadas três novas curvas, obtidas em simulação realizada tendo toda a estrutura com as características de cada zona. Para essa análise foram utilizadas as curvas do material no caso 1, e os resultados obtidos estão mostrados na Figura 57.

Figura 57 – Teste do comportamento do modelo 1 fazendo todos os elementos com o mesmo material, para cada uma das três zonas de solda (ZM, ZTMA e metal base)



Da Figura 57 observa-se que a curva correspondente ao caso utilizando apenas o metal base, se iguala as curvas mostradas nos casos 1 à 4. Observa-se também que a curva que mais se aproximou do comportamento experimental é a correspondente ao material da ZM, pois essa curva inicia o escoamento aproximadamente no mesmo patamar da curva experimental, validando assim a

estratégia adotada, de basear-se no perfil de microdureza para prever a curva tensão x deformação do material.

Os resultados de maneira geral mostram que o modelo de contato utilizado é incompleto, por ser simplista demais. Não é possível considerar que na interface das chapas, e nas regiões de contato das zonas com as chapas, o material encontra-se perfeitamente colado e homogêneo. Esses resultados fundamentaram a decisão da modelagem do contato de descolamento, tendo em vista que essa situação melhor reproduz o comportamento real da amostra.

4.2 Modelo 2 – Falha por descolamento baseado em zona coesiva.

Conforme descrito, no segundo modelo foi implementada uma diferente abordagem, buscando simular o comportamento da junta até a falha, por meio de uma formulação de descolamento, baseado em um material de modelo de zona coesiva.

As condições avaliadas para o modelo 1 (material, malha, *steps*) que demonstraram o melhor desempenho dentro da relação resultados x tempo de processamento foram consideradas satisfatórias e implementadas no segundo modelo, logo não foram realizadas essas comparações novamente, ou seja, foram utilizados no modelo 2 a malha com primeiro refinamento, 10 *steps* de carregamento, e o material utilizado é o correspondente ao caso 1.

4.2.1 – Características do material.

Nesse tipo de formulação, o principal objetivo é definir as propriedades do material que simula o contato, por serem quatro valores distintos a serem inseridos (dois valores de tensão de descolamento, e dois de abertura de descolamento), torna-se demasiadamente complicado estimar os valores.

Nas tentativas iniciais foram testados valores iguais de tensão e abertura, nas direções normal e tangencial, apenas para buscar a ordem de grandeza dos valores, ou seja, obter valores da carga máxima na ordem 10^1 kN a um deslocamento na ordem de 10^1 mm.

Depois de definida o ordem de grandeza das variáveis, iniciou-se a variação de cada valor separadamente, verificando os resultados, e fixando determinados valores para cada propriedade.

O objetivo inicial desse processo iterativo foi principalmente modelar o comportamento da falha, utilizando como parâmetro comparativo a curva do ensaio de cisalhamento. Portanto, buscou-se modelar o ponto em que o material começa a escoar, correlacionando com o valor de deslocamento crítico avaliado nas amostras reais.

Assim após diversas tentativas foram definidas a ordem de grandeza dos parâmetros conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Ordem de grandeza estimada para o modelo do material.

| Propriedade | Ordem de Grandeza | Unidade |
|---|--------------------------|----------------|
| Máxima tensão normal de contato | 10^8 | Pa |
| Abertura de contato no descolamento total | 10^{-7} | m |
| Máxima tensão de cisalhamento de contato | 10^8 | Pa |
| Deslizamento do contato no descolamento total | 10^{-6} | m |

Vale ressaltar, que conforme mostra a formulação desse modelo, o resultado final irá depender da combinação desses valores, logo diferentes combinações desses parâmetros podem convergir para os mesmos resultados aqui apresentados.

Dentro da ordem de grandeza estimada, foram testados diversos valores, ficando claro que diversas combinações dos mesmos, resultam numa gama de possibilidades muito grande. Dentre os valores e combinações testados, a grande maioria não convergiu.

Dos valores que convergiram, são apresentados três materiais implementados, a fim de demonstrar a sensibilidade dos parâmetros com os resultados obtidos.

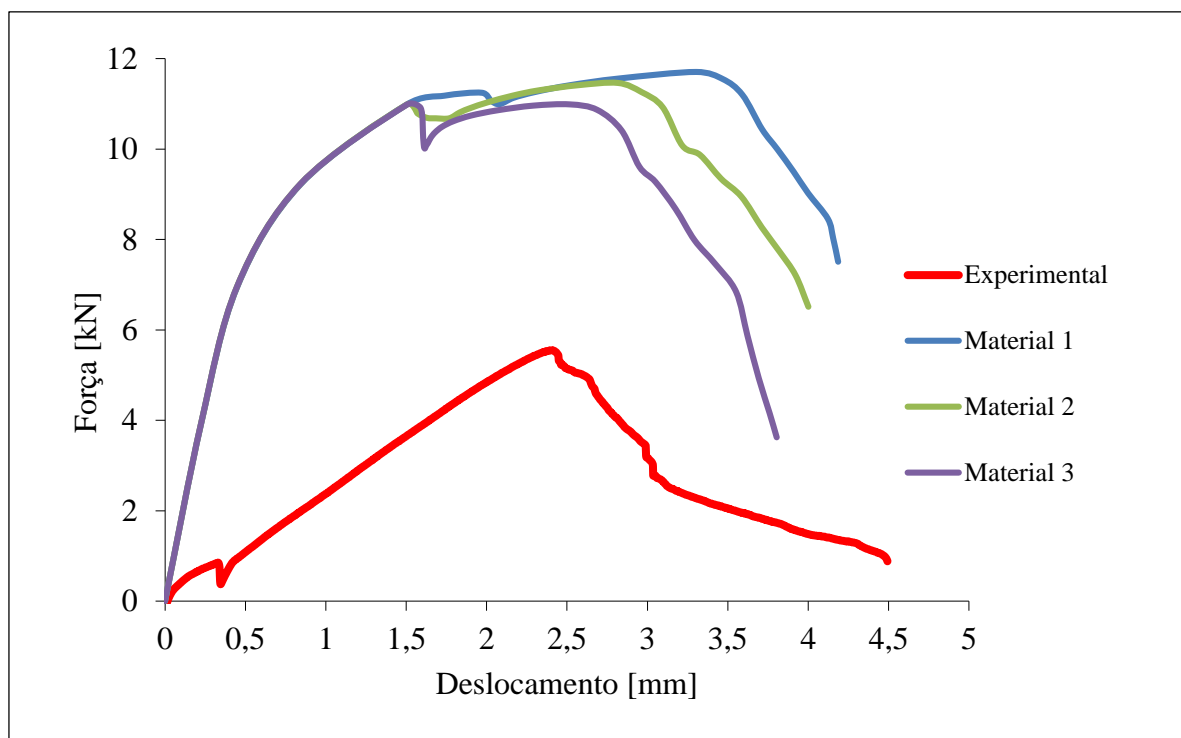
Na Tabela 6, são mostrados os valores dos parâmetros para cada material.

Tabela 6 - Propriedades dos materiais.

| Propriedade | Material | | | Ordem de Grandeza | Unidade |
|---|----------|---|-----|-------------------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| Máxima tensão normal de contato | 1,5 | | | 10^8 | Pa |
| Abertura de contato no descolamento total | 9 | | | 10^{-7} | m |
| Máxima tensão de cisalhamento de contato | 1 | 1 | 0,9 | 10^8 | Pa |
| Deslizamento do contato no descolamento total | 9 | 5 | 5 | 10^{-6} | m |

A Figura 58 mostra as curvas resultante das simulações, comparadas com a curva experimental

Figura 58 - Comparação curvas dos ensaios experimental e numérico para o modelo de descolamento baseado em zona coesiva.



Observa-se que para essa configuração de carregamento, os parâmetros na direção tangencial (tensão de cisalhamento de contato e deslizamento do contato) possuem maior influência nos resultados, porém dos inúmeros testes feitos observa-se que a maior influência é da combinação dos parâmetros. Quando fixam-se 3 parâmetros e altera-se apenas um deles, o modelo não converge, sendo necessária a iteração conjunta dos valores, tornando muito complexa a tarefa de estimar os quatro valores necessários para criação do material de modelo de zona coesiva, sem dispor de estudos e modelos prévios.

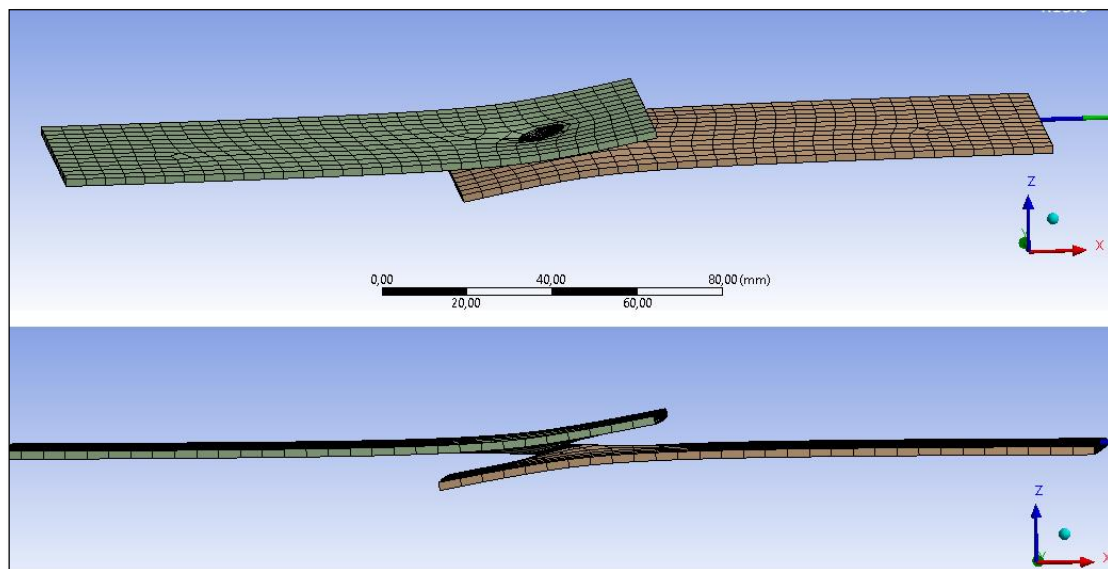
5 DISCUSSÃO

Com base no primeiro modelo desenvolvido, foi avaliada a possibilidade de relacionar as propriedades de microdureza com o aumento da resistência mecânica do componente para o modelo avaliado. Além disso foi possível simular o comportamento elástico de forma satisfatória, assim como permitiu o desenvolvimento do modelo 2, com base nas propriedades avaliadas, diminuindo assim seu tempo de elaboração.

No segundo modelo embora não tenha-se conseguido obter um resultado definitivo com o modelo de zona coesiva, é notório o potencial dessa abordagem. Embora essa formulação não simule o comportamento elástico da deformação, essa abordagem consegue modelar o processo de falha, o que se vê pela queda progressiva da curva até o final da simulação.

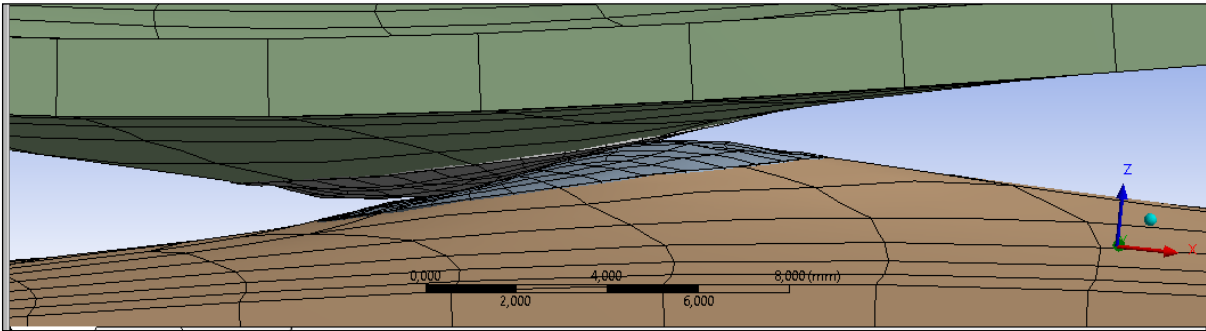
Na Figura 59 é mostrado o aspecto geral do componente sob o efeito da solicitação de cisalhamento simulada numericamente. Percebe-se que o comportamento é muito semelhante ao que ocorre no ensaio experimental.

Figura 59 - Visão geral do modelo 2.



Na Figura 60 é mostrado em detalhe o botão de solda. Nota-se que a falha por descolamento começa circunferencialmente ao botão solda, conforme ocorre no processo experimental. É possível ver também um certo deslizamento relativo entre as superfícies de contato da solda, simulando a falha por cisalhamento.

Figura 60 - Visão em detalhe da região de descolamento do modelo 2.



6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram desenvolvidos dois modelos numéricos baseados no comportamento mecânico de soldas FSpW, sob solicitação de cisalhamento, utilizando a modelagem no software ANSYS WORKBENCH, fundamentado pelo método dos elementos finitos. Com base no perfil de microdureza, e nas curvas força x deformação dos ensaios de cisalhamento de amostras reais foi possível desenvolver um modelo numérico dentro do regime elásto-plástico e um modelo simulando a falha do componente, através da formulação de descolamento de interfaces. Ambos os modelos foram simulados sob cisalhamento, obtendo assim dados para plotar curvas força x deslocamento, para comparar com as experimentais.

Comparando as curvas experimental e numéricas do primeiro modelo, pode-se concluir que a condição de contato entre as zonas de solda e as chapas não podem ser consideradas como coladas e perfeitamente homogêneas.

Foi possível simular satisfatoriamente o comportamento do material baseando-se na variação da microdureza.

Com a condição de contato imposta no primeiro modelo, a junta comporta-se como sendo um elemento único. Quando modela-se todos os elementos da junta com as propriedades da ZM, a curva numérica escoa junto com a experimental, evidenciando que a ZM resiste aos esforços (situação relativamente próxima ao comportamento real do componente em solicitação).

Um refinamento da malha é necessário para a convergência dos resultados. Fazendo uma malha com 2419 elementos (malha média) garantiu a convergência. Maior refinamento não traz benefícios ao modelo, apenas aumenta o esforço computacional.

No segundo modelo, tem-se uma abordagem com um grau de complexidade maior, o que implica num comportamento também mais complexo. É possível simular o escoamento e a perda de resistência da junta por meio do início do descolamento, que representa o início da falha do componente.

O segundo modelo permite avaliar o comportamento da curva força x deslocamento durante o ensaio, simulando o deslocamento imposto sobre a junta. Pode-se verificar o deslocamento associado à carga máxima e à falha.

Com os modelos de materiais desenvolvidos para o segundo modelo, disponibiliza-se uma base para o seu aprimoramento, permitindo convergir para resultados mais próximos da curva experimental.

Por fim, podem ser feitas as seguintes afirmações a partir dos resultados:

1. a curva tensão x deformação pode ser relacionada com o perfil de microdureza, para relacionar com o aumento da resistência mecânica;
2. a condição de contato das zonas de solda com as chapas é o fator mais relevante à modelagem;
3. a abordagem de descolamento baseado no modelo de material de zona coesiva demonstra a melhor aproximação do comportamento real da junta;
4. os parâmetros do material de zona coesiva devem ser estudados mais detalhadamente, a fim de obter modelos mais próximos ao comportamento real.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme foi avaliado, o modelo de descolamento demanda ainda desenvolvimento para seu aprimoramento. Visando a elaboração de trabalhos futuros nesta mesma linha citam-se as seguintes sugestões:

- Testar os parâmetros do material de zona coesiva;
- Modelar metade da junta valendo-se da condição de simetria, para reduzir tempo computacional;
- Modelar também na plataforma APDL do ANSYS;
- Estudar as propriedades de cada zona de solda experimentalmente.

7 REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE**. 5ª Ed. São Paulo: Érica, 2008.

AMANCIO-FILHO, S. T. et. al. **On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures**. Materials Science & Engineering A. Vol.528(10), pp.3841-3848. 2012

ANSYS, Inc. **Element Reference**. 2009. 1698 f. Canonsburg, PA. Disponível em: <http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.1/121/ans_elem.pdf> Acesso em: 12 de novembro de 2014

ANSYS. **Ansys Mechanical APDL and Mechanical Applications Theory Reference**. 2006

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos Finitos**. 1ª Ed. Portugal. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Abril de 2003. Disponível em: <http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/pdf/apontamentos/Livro_MEF_AA.pdf> Acesso em: 12 de novembro de 2014.

AZEVEDO, Domingos F. O. **Análise Estrutural –Ansys**. Agosto de 2013. Disponível em: < <http://www.domingosdeazevedo.com/mef/per/per2/ansys>>. Acesso em: 12 de novembro de 2014.

AZEVEDO, Domingos F. O. **Análise Estrutural –Ansys**. Outubro de 2013. Disponível em: < <http://www.domingosdeazevedo.com/mef/per/per2/ansys2>>. Acesso em: 12 de novembro de 2014.

BAHEMMAT, P ; HAGHPANAHI, M.; BESHARATI G.; RESHAD S. **Study on dissimilar friction stir butt welding of AA7075-O and AA2024-T4 considering the manufacturing limitation**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol.59(9), p.939-953. 2012

BAKAVOS, D; CHEN,Y; BABOUT, L; PRANGNELL, P. **Material interactions in a novel pinless toll approach to Friction Stir Spot Welding thin aluminum sheet**. Metallurgical and Materials Transactions A. v. 42ª, p. 1266-1282. Maio 2011.

BARENBLATT, G. I. **The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks Formed in Brittle Fracture**. 1961. Disponível

em:<<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/283881.pdf>> Acesso em: 20 de novembro de 2014.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistencia dos Materiais**, 5ª ed. – São Paulo: Pearson Makron Books, 2011.

BRZOSTEK, Robson Cristiano. **Estudo da fratura em solda ponto por fricção em alumínio ALCLAD 2024-T351 e alumínio 2024-T351: uma abordagem numérica e experimental**. 2012. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS. Porto Alegre, RS. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/10183/72938>> Acesso em: 03 de outubro de 2014.

BUDYNAS, G. RICHARD; NISBETT, KEITH J.; **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 8ª Ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Primis, 2006.

CALLISTER. W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais uma Introdução**. 5ª Ed, Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMPANELLI, Leonardo Contri. **Estudo do processo de soldagem por fricção por ponto da liga magnésio AZ31**. 2012. 109 f. Dissertação Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de materiais. Universidade federal de São Carlos. São Carlos, SP. 2012. Disponível em: < <http://www.bv.fapesp.br/14212>>. Acesso em: 05 de outubro de 2014.

CHRISTENSEN, Esben; et. al. **Formulation of Cohesive Finite Element for Analysing Strength of Wrinkles in Glass-Epoxy Laminates**. 2013. 156 f. Dissertação de mestrado. Design of Mechanical Systems. Aalborg University. Disponível em:<<http://projekter.aau.dk/projekter/files/77174210/Report.pdf>> Acesso em: 13 de novembro de 2014.

CORRÊA, Claudio; **Método de Diferenças Finitas e Volumes Finitos para Problemas Convectivos Difusivos**. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Universidade Federal Fluminense. Volta Redonda, RJ. Disponível em: < http://www.uff.br/mcct/downloads/Dissertacao_7.pdf> Acesso em: 12 de novembro de 2014.

COSTA, C. T. F; **Introdução aos Métodos Numéricos**. Cariri, Ceará: Universidade Federal do Ceará. 2010. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/133166641/Apostila-Metodos-NumericosFormatada-VF#scribd> > Acesso em: 12 de novembro de 2014.

CZIGÁNY, T ; KISS, Z.; **Effect of welding parameters on the heat affected zone and the mechanical properties of friction stir welded poly(ethylene-terephthalate-glycol)**; Journal of Applied Polymer Science, Vol.125(3), pp.2231-2238. 2012

DOWLING, N. E.; **Mechanical Behavior of Materials**. 3ª Ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall. 2007.

GONÇALVES, Nelson Daniel Ferreira. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não- Estruturadas**. 2007. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Matemática. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Portugal Disponível em <http://www.fc.up.pt/fcup/contactos/teses/t_050370159.pdf> Acesso em: 12 de novembro de 2014

HIBBELER, R. C. **Resistencia dos materiais**. 5ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

JACOB, Fish. **Um Primeiro Curso de Elementos Finitos**. Rio de Janeiro, RJ. LTC. 2009.

JUNIOR, W. S. ; EMMER, T. ; ABETZ, C.; HANDGE, U. A. ; DOS SANTOS, J. F. ; AMANCIO-FILHO, S. T. ; ABETZ, V. **Friction spot welding of PMMA with PMMA/silica and PMMA/silica-g-PMMA nanocomposites functionalized via ATRP Polymer**. Vol.55(20) pg: 5146-5159. 2014

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M.; **Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquina**, 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

KASAI, H. ; MORISADA, Y. ; FUJII, H. **Dissimilar FSW of immiscible materials: Steel/magnesium** Materials Science & Engineering A, Vol.624, pp.250-255. 2014

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. **Friction stir welding and processing**. Materials Science and engineering. v. 50. P 1-78. 2005.

MURR, L. **A Review of FSW Research on Dissimilar Metal and Alloy Systems**. Journal of Materials Engineering and Performance. Vol.19(8), pp.1071-1089. 2010

ROSENDO T, S; et. at. **Investigation on Friction Spot Welding of Aeronautic 2024-T4 clad and 7075-T6 Alloys**. Trends in Welding Research – TWR, Pine Mountain 2008.

ROSENDO, T. S.; et. al. **Investigation of friction spot welding of AA6181-T4 alloy**. International Automotive Body Congress – IABC, Vaals, 2008.

ROSENDO, Tonilson de Souza. **Estudo do desempenho mecânico de solda(s) ponto por fricção (FSpW) as liga AA6181-T4**. 2009. 132 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS. Porto Alegre, RS. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/18981>> Acesso em: 03 de outubro de 2014.

SHEN, Z. et al. **Microstructure and failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminum alloy joints**. Material ans design. V.44. p. 476-486. 2013

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. BUDINAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**, 7ª Ed, Porto Alegre: Bookman, 2005.

SILVA, Evandro Pereira. **Elementos Finitos como Ferramenta Auxiliar na Análise Estrutural Estática de uma Colheitadeira de Café do tipo Automotriz**. 2013. 144 f. Dissertação (Mestrado). Programa de pós graduação em engenharia agrícola. Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG. Disponível em:< <http://repositorio.ufla.br/handle/1/962> > Acesso em: 12 de novembro de 2014.

SOUZA, Remo Magalhães de; **O método dos Elementos Finitos Aplicado ao problema de condução de Calor**. 2003. 40 f. Departamento de Engenharia Civil Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia. Belém, BA. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~luciac/fem/livros-fem/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf> > Acesso em: 13 de novembro de 2014. The Welding Institute. Disponível em:<<http://www.twi-global.com/>> acesso em 05/11/2014

WANG, D. A.; LEE, S. C. **Microstruture and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets**. Journal of materials processing technology. V186. P 291-297. Dezembro 2006.