

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COEME
ENGENHARIA MECÂNICA

ERICH BRAMIGK

**COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE JUNTAS
METÁLICAS: AVALIAÇÃO POR FEA E ENSAIOS MECÂNICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2018

ERICH BRAMIGK

**COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE JUNTAS
METÁLICAS: AVALIAÇÃO POR FEA E ENSAIOS MECÂNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Ricardo Biscaia

Co-Orientador: Prof. Luan Francini

GUARAPUAVA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE JUNTAS METÁLICAS: AVALIAÇÃO POR FEA E ENSAIOS MECÂNICOS

POR

ERICH BRAMIGK

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 12 de novembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Ricardo Vinicius Bubna Biscaia
Prof. Orientador

Luan José Franchini
Membro titular / Coorientador

Henrique Ajuz Holzmann
Membro titular

Aldo Przybysz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às mulheres de minha vida. Em especial à minha mãe, Elaine Bramigk, e tia, Valltraute Bramigk Bonon.

O sonho de me tornar um profissional das exatas só se tornou possível devido aos esforços de minha tia que me incentivou e acolheu para dar início aos meus estudos.

À minha mãe, por ser forte e se esforçar para sempre estar perto, mesmo à longa distância, encorajando e dando o exemplo de mulher que tenho, e me dando todo o suporte necessário para me formar.

Ao meu pai, que sempre foi um exemplo de dedicação, me mostrando como deveria me portar perante Deus e a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me proporcionar um ambiente repleto de pessoas excelentes dispostas a me ajudar.

Agradeço ao meu orientador Prof. Ricardo Biscaia, pela paciência e sabedoria compartilhada, fazendo possível a conclusão de mais uma etapa de minha vida.

Ao meu Co orientador Prof. Luan Franchini, me guiando em todos os passos necessários para concluir este trabalho.

Ao Prof. Dr. Aldo e Técnico Lucas por me auxiliarem em toda a parte de fabricação e utilização dos laboratórios.

RESUMO

BRAMIGK, Erich. **Comparação de processos de fabricação de juntas metálicas: avaliação por FEA e ensaios mecânicos.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2018.

Os tubos metálicos trazem vantagens como leveza, resistência e ótimo potencial de rentabilidade e versatilidade. Dentre as diversas configurações de tubos e juntas tubulares soldadas, faz-se necessário avaliar e comparar qual configuração de junta é mais adequada ao projeto. No presente trabalho foram comparados dois métodos de fabricação de juntas tubulares soldadas a partir do método dos elementos finitos (MEF), ensaio de tração e comprimento efetivo de solda. Em MEF foram avaliados os efeitos de tensões na junta quando submetida à força estática, alterando-se parâmetros de malha, de maneira a obter regiões de concentração de tensões, prevendo assim regiões de possível falha. No ensaio de tração aplicou-se uma carga com crescimento contínuo e lento, de maneira a ser considerada estática, assemelhando os resultados do MEF ao ensaio, até atingir a falha. Por último comparou-se o comprimento efetivo de solda de cada método e obteve-se o método mais econômico e resistente.

Palavras-chave: Juntas tubulares Solda. MEF. Comprimento efetivo de solda. Ensaio de tração.

ABSTRACT

BRAMIGK, Erich. **Comparison of metal joints manufacturing processes:** evaluation by FEA and mechanical tests. 2018. Course Completion Work (Undergraduate) - Mechanical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Guarapuava, 2018.

The metal tubes bring advantages such as lightness, strength and great potential for profitability and versatility. Among the various configurations of tubes and welded tubular joints, it is necessary to evaluate and compare which joint configuration is most appropriate to the design. In the present work, two methods of manufacturing welded tubular joints from the finite element method (MEF), tensile test and effective weld length were compared. In MEF, the effects of stresses on the joint were evaluated when subjected to static force, changing mesh parameters, in order to obtain regions of stress concentration, thus predicting regions of possible failure. In the tensile test a load was applied with continuous and slow growth, in order to be considered static, resembling the results of the MEF to the test, until reaching the fault. Finally, the effective weld length of each method was compared and obtained the most economical and resistant method.

Keywords: Weld tubular seals. FEM. Effective weld length. Tensile test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Linha de soldagem vista de baixo. | 18 |
| Figura 2 — Ilustração diagramática das bordas da tira da fusão e a formação da solda HF..... | 18 |
| Figura 3 – Soldagem por fusão, com e sem adição de metal..... | 20 |
| Figura 4 – Comparação de oxi-acetileno e soldagem a arco metálico. | 20 |
| Figura 5 – Esquemático de soldagem por Metal Gás Ativo/Inerte. | 21 |
| Figura 6 – Processo de soldagem MAG. | 22 |
| Figura 7 – Seção transversal da região da solda de topo por fusão (Esquemático)..... | 23 |
| Figura 8 – Tipos de junta soldada (Esquemático). | 24 |
| Figura 9 – Modelos de elemento finito em 1D (Adaptado). | 25 |
| Figura 10 – Modelos de elemento finito em 2D (Adaptado). | 25 |
| Figura 11 – Modelos de elemento finito em 3D (Adaptado). | 26 |
| Figura 12 – Modelo de elemento finito 3D em coordenadas cilíndricas (Adaptado). | 26 |
| Figura 13 – Refinamento de malha fornecendo resultados mais (Adaptado). . | 27 |
| Figura 14 - Malha de Análise por elementos Finitos de uma solda (Adaptado). | 28 |
| Figura 15 – Fluxograma da metodologia adotada. | 29 |
| Figura 16 – Geometria genérica dos processos de fabricação. | 29 |
| Figura 17 – Representação da solda do segundo a AWS. Método 2 a esquerda, e Método 1 a direita. | 31 |
| Figura 18 – Método de fabricação genérico. | 32 |
| Figura 19 – Etapas do processo de fabricação 01..... | 34 |
| Figura 20 – Etapas do processo de fabricação 02..... | 34 |
| Figura 21 – Força atuante e sua decomposição. | 35 |
| Figura 22 – Representativo dos corpos adicionais para simulação no ANSYS. Método 01 a esquerda e Método 02 a direita..... | 36 |
| Figura 23 – Corpo adicional na plataforma ANSYS. Método 1..... | 37 |
| Figura 24 – Corpo adicional na plataforma ANSYS. Método 2..... | 37 |
| Figura 25 – Representativo das regiões fixa e carregada no ANSYS. | 37 |
| Figura 26 – Diagrama de corpo livre dos corpos de prova. | 38 |
| Figura 27 – Regiões de refinamento de malha. | 39 |
| Figura 28 – Região de solda em modelo 3D com diferentes refinamentos de malha. Malha mais refinada da esquerda para direita. | 40 |
| Figura 29 – Esquema do dispositivo de corte. | 40 |
| Figura 30 – Esquema de utilização do dispositivo para o método 01..... | 41 |
| Figura 31 – Esquema de utilização do dispositivo para o método 02..... | 41 |
| Figura 32 – Esquema de ensaio..... | 42 |
| Figura 33 – Vista em perspectiva do desenho do dispositivo de corte..... | 42 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 34 – Vista em perspectiva do dispositivo de solda..... | 43 |
| Figura 35 – Vista em perspectiva do dispositivo de ensaio. | 43 |
| Figura 36 – Modelo 3D na plataforma ANSYS com aplicação da malha. Método 01 a esquerda e Método 02 a direita. | 45 |
| Figura 37 – Resultado da simulação apresentando o acúmulo de tensões. Método 01 a esquerda e Método 02 a direita. | 45 |
| Figura 38 – Resultado da simulação apresentando a deformação máxima. Método 01 a esquerda e Método 02 a direita. | 46 |
| Figura 39 – Dispositivo de corte. | 49 |
| Figura 40 – Corpos de prova aprovados no ensaio por líquidos penetrantes. . | 52 |
| Figura 41 – Região de máxima concentração de tensões no corpo de prova... | 54 |
| Figura 42 – Corpo de prova 6 do método 1 a esquerda, e corpo de prova 6 do método 2 a direita. | 54 |
| Figura 43 – Indicação da declinação das curvas. | 56 |
| Figura 44 – Detalhe do desenho do método 01. | 64 |
| Figura 45 – Detalhe do desenho do método 02. | 66 |
| Figura 46 – Gráfico completo dos ensaios das amostras do método 01. | 68 |
| Figura 47 – Gráfico completo dos ensaios das amostras do método 02. | 70 |

LISTA DE FOTOGRAFIAS

| | |
|--|-----------|
| Fotografia 1 – Peças do Método 01 cortadas..... | 44 |
| Fotografia 2 – Peças do Método 01 sendo testadas. | 44 |
| Fotografia 3 – Peças do método 02 cortadas. | 44 |
| Fotografia 4 – Dispositivo de solda. | 50 |
| Fotografia 5 – Dispositivo de solda na mesa de solda..... | 50 |
| Fotografia 6 – Dispositivo de ensaio com uma peça do método 01 encaixado no equipamento. | 51 |
| Fotografia 7 – Peças do método 02 cortadas. | 51 |
| Fotografia 8 – Corpo de prova reprovado no ensaio por líquidos penetrantes. | 52 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----------|
| Gráfico 1 – Modelo de gráfico Deslocamento X Quantidade de nós. | 39 |
| Gráfico 2 – Variação do deslocamento máximo conforme aumenta a quantidade de nós na malha no método 1..... | 47 |
| Gráfico 3 – Variação do deslocamento máximo conforme aumenta a quantidade de nós na malha no método 2..... | 47 |
| Gráfico 4 – Tensão x Deformação dos corpos de prova do Método 1..... | 55 |
| Gráfico 5 – Tensão x Deformação do corpos de prova do Método 2. | 55 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----------|
| Quadro 1 – Especificações de procedimento de soldagem. | 30 |
| Quadro 2 – Nomenclatura dos corpos de prova. | 31 |
| Quadro 3 - Materiais para a fabricação dos corpos de prova e execução do estudo. | 32 |
| Quadro 4 - Validação dos corpos de prova | 54 |
| Quadro 5 - Tabela dos processos de fabricação das amostras. 74 | |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| Tabela 1 - Parâmetros das simulações do método 01..... | 48 |
| Tabela 2 - Parâmetros das simulações do método 02..... | 49 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL | 14 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 14 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 16 |
| 2.1 MATERIAIS UTILIZADOS EM ESTRUTURAS METÁLICAS..... | 16 |
| 2.2 CONFORMAÇÃO A FRIO DE TUBOS DE AÇO COM COSTURA..... | 17 |
| 2.3 SOLDAGEM DE AÇOS DE BAIXA LIGA..... | 19 |
| 2.3.1 Soldagem por MAG..... | 21 |
| 2.4 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANALISAR ESTRUTURAS | 24 |
| 2.4.1 Panorama geral do método dos elementos finitos..... | 24 |
| 2.4.2 Refinamento de malha..... | 26 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 29 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA | 29 |
| 3.1.1 Materiais..... | 32 |
| 3.1.2 Os métodos de fabricação | 33 |
| 3.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS | 36 |
| 3.3 OBTENÇÃO DOS GABARITOS..... | 40 |
| 3.4 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 43 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 45 |
| 4.1 SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS | 45 |
| 4.2 OS DISPOSITIVOS | 49 |
| 4.3 ENSAIO POR LÍQUIDOS PENETRANTES..... | 51 |
| 4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO..... | 53 |
| 5 CONCLUSÕES | 59 |
| 6 TRABALHOS FUTUROS | 60 |
| 7 REFERÊNCIAS..... | 61 |
| ANEXO A - Desenho detalhado do modelo do método 01..... | 63 |
| ANEXO B - Desenho detalhado do modelo do método 02..... | 65 |
| ANEXO C - Gráfico completo dos ensaios das amostras do Método 01 | 67 |
| ANEXO D - Gráfico completo das amostras do Método 02 | 69 |
| ANEXO E - Tabela dos processos de fabricação das amostras | 71 |

1 INTRODUÇÃO

Tubos metálicos são amplamente utilizadas em projetos de engenharia. Há uma ampla gama de vantagens em sua utilização. Leveza, dinâmica e resistência, potencial de rentabilidade, estética, versatilidade e ser manutenível são algumas das vantagens. Devido a essas características sua aplicação está presente em diversas áreas do mercado, com vários níveis de importância econômica, justificando seu uso.

No setor automotivo marcas como Lamborghini, Bac Mono e Ariel fabricam parte das estruturas de seus automóveis com tubos metálicos. Em todas existem conjuntos de tubos em formato de treliças, sendo necessário solda-los para obtenção de seu formato final. Motocicletas também fazem parte de produtos que utilizam tubos metálicos como parte, se não total, no mínimo de sua estrutura base.

Segundo ABRACICLO (Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas) foram vendidas 814.573 motocicletas em 2017, com uma frota atual de 26.159.702. Segundo o DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito), representando grande fatia do mercado e indicando sua importância. (ABRACICLO, 2017).

Representando 5,9% do PIB nacional, a agroindústria possui grande parte dos equipamentos adjacentes ao trator confeccionados em tubos metálicos. Em sua maioria, as uniões dos tubos ou juntas são executadas com soldas. Em cada uma dessas aplicações estão presentes as juntas de tubos metálicos soldadas. (EMBRAPA, 2018).

Com todo esse contexto, avaliar certos tipos de fabricação de tais juntas torna-se um mecanismo de controle e até mesmo possibilidade de melhoria na resistência dos projetos mecânicos ou redução dos custos de fabricação. Simulações computacionais e ensaios mecânicos são boas ferramentas para avaliar tais juntas. A avaliação de diferentes processos de fabricação de juntas metálicas, tanto pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) quanto por ensaios mecânicos de tração podem ser admitido para a validação dos métodos de fabricação e possibilitando a escolha do processo de fabricação mais adequado.

1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar dois métodos de fabricação de juntas tubulares soldadas utilizando o método dos elementos finitos e ensaios mecânicos de tração.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Simular a distribuição de tensões em ambos os processos ao serem submetidos a esforços de tração, utilizando o método dos elementos finitos (MEF).
- Obter gabaritos para a fabricação dos corpos de prova.
- Submeter os corpos de prova de cada método a ensaio de tração e avaliar quando falha.
- Avaliar o comprimento de solda dos corpos de prova dos dois processos de fabricação.
- Comparar os resultados obtidos nos processos anteriores e obter as vantagens e desvantagens de cada método.

1.3 JUSTIFICATIVA

Estruturas tubulares são amplamente utilizadas como parte da estrutura de máquinas, carros, construções, transporte de fluídos, etc. Na indústria automotiva a utilização de estruturas tubulares como reforço para a carroceria de automóveis preparados para corrida, chamados “santo antônio”. A justaposição e o bom dimensionamento do “santo antônio” são de suma importância nesses veículos, visto que é um item de segurança para o piloto. Porém, ao aplicar a junta na carroceria do veículo, pode haver a presença de ângulos acentuados, devido ao projeto inicial.

Ao aplicar uma dobra em tubo, destinado a estruturação de um projeto, não deve haver a presença de rugosidades na dobra devido a questões estéticas e mecânicas. Isso implica em uma área de seção transversal deve ser o máximo homogênea possível. A aplicação de dobras nesse tipo de junta (ou cotovelo) não se aplica, justamente devido à essa homogeneidade que, juntamente com o ângulo

acentuado, ocasionaria um alto índice de estiramento da parte externa do raio, podendo surgir falhas, como rasgos, diminuição excessiva da espessura do tubo, diminuição da resistência da junta, entre outras, comprometendo a estrutura.

O estudo de alternativas para esse tipo de junta é imediato. Obter opções que ofereçam resistência, igual ou superior ao modelo dobrado, pode oferecer uma alternativa viável para o projeto, mantendo o coeficiente de segurança do projeto como desejado, sem gastos excessivos no projeto.

Outra aplicação do projeto de juntas tubulares seria a aplicação na estrutura do projeto "Cavalo Elétrico", desenvolvido pela ACTUS Empresa Júnior de Engenharia e Consultoria. Este é um projeto que visa a substituição de carroças tracionadas por animais, por um veículo elétrico, com as seguintes especificações:

- Velocidade máxima de 10km/h;
- Um passageiro;
- Capacidade de carga tracionada de 500kg;
- Autonomia de 8h;
- Estrutura de tubos metálicos.

Os benefícios sociais, tanto da inclusão social do profissional ecológico hoje marginalizado, quanto dos animais que não estariam sob maus tratos, também justificam a aplicação de tal projeto. A otimização de todos os parâmetros de projeto (estrutural, gerenciamento, adequação, etc) são de suma importância, visto que recursos públicos serão destinados para o projeto. Este trabalho de conclusão de curso tem como justificativa melhorar a utilização de recursos estruturais, modificando parâmetros geométricos, para otimizar a estrutura, visando a maior vida útil da estrutura tubular.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Na revisão de literatura, primeiramente é abordado um panorama geral de estruturas metálicas e os respectivos materiais mais utilizados. A definição e estruturas, bem como a classificação geral dos metais, são abordados. Ainda nessa seção, será citada a norma referente ao material utilizado para análise.

Em seguida é abordado o processo de conformação de tubos com costura, apresentando os meios de obtenção dos mesmos.

Após isso, é apresentado o processo de soldagem, tanto com adição de material quanto sem, e especificado o processo de soldagem por MAG (*Metal Active Gás – Metal com Gás Ativo*), sendo caracterizado seu processo como um todo e mostrado suas principais variáveis.

Posteriormente são abordados os ensaios mecânicos de materiais, destrutivos e não destrutivos.

Por último a ferramenta FEA (Finit Element Analysis - Análise por Elementos Finitos) e suas características, e apresentadas algumas das principais ferramentas comerciais. Alguns estudos de caso são identificados mostrando como tal ferramenta pode ser utilizada.

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Estrutura metálica é a associação de peças metálicas entre si por meio de conectores com um objetivo bem definido. Essas peças têm seção transversal de formato específico e bem definido, respeitando limites de tolerância de rugosidade e geométrico, além de ser constante ao longo de todo o comprimento. (PFEIL, 2009).

As formas mais comuns de metais a base de ferro são o aço, ferro fundido e ferro forjado, onde atualmente, o mais importante dos três, o aço. O aço é a liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11 %. (Chiaverini, 2005).

Uma das características do aço é que quanto maior a quantidade de carbono em sua composição maior a resistência do aço, porém, ele se torna mais frágil. Aços com pouca quantidade de carbono em sua composição, por sua vez, possui menor resistência à tração, porém mais dúctil. As resistências à ruptura por tração ou

compressão dos aços utilizados em estruturas oscilam entre 300 Mpa e 1200 MPa. (PFEIL, 2009).

Devido à presença de elementos de liga e elementos residuais das mais variadas porcentagens na composição, os aços são classificados em aço-carbono, que contém teores normais e elementos residuais, e aços-liga, que são aços-carbono acrescidos de elementos de liga ou apresentando altos teores de elementos residuais. (PFEIL, 2009).

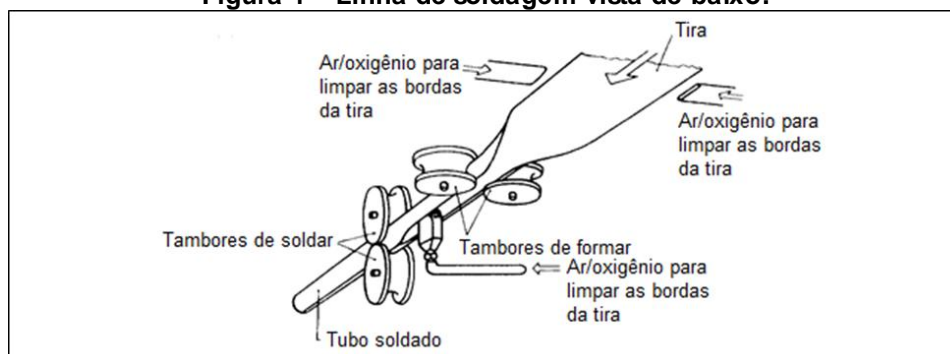
Os aços podem também ser classificados o ponto de vista de suas aplicações, formando diversas categorias com suas características. Por exemplo, aços destinados a estruturas são preferidas propriedades de boa ductilidade, homogeneidade e soldabilidade, elevada relação entre a tensão resistente e a de escoamento. Nesses, a resistência à corrosão é alcançada com pequenas adições de cobre. (PFEIL, 2009).

Aços-carbono são os metais mais usados na indústria em geral, porém, devido à necessidade do processo de soldagem posteriormente, há a preferência de aços com baixo teor de carbono que não precisam de cuidados especiais, tais quais os aços com alto teor de carbono precisam. Os principais tipos de aço-carbono usados em estruturas, segundo os padrões da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), da ASTM (American Society for Testing and Materials) e das normas européias EN, são os que apresentam menor porcentagem de carbono. (PFEIL, 2009, ed. 8).

2.2 CONFORMAÇÃO A FRIO DE TUBOS DE AÇO COM COSTURA

Um dos processos de fabricação de tubos metálicos consiste na conformação e soldagem de chapas do material desejado. Antes temos a adição de ar pressurizado na superfície da chapa metálica para a limpeza e preparo dela para as etapas posteriores. Nele temos a adição e passagem de uma chapa comprida em uma série de rolos, onde a organização e formato de tais rolos deformam plásticamente a chapa e dão forma a ela. Seu formato pode ser quadrado, retangular, esférico etc. Em seguida há a soldagem das arestas da chapa que se encostam, dando a selagem e finalização ao processo. Esse processo de fabricação é indicado na figura 01 abaixo.

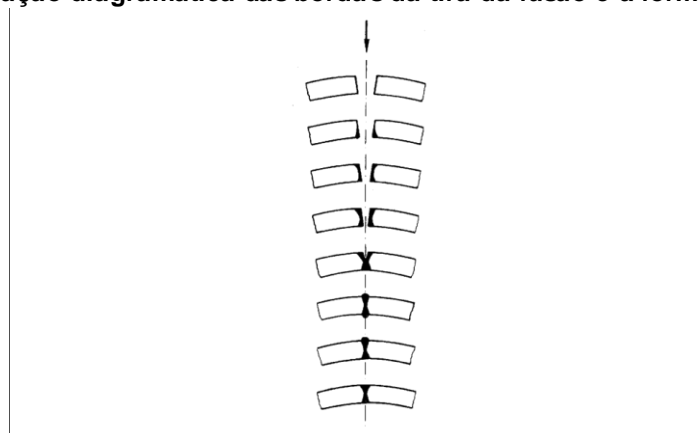
Figura 1 – Linha de soldagem vista de baixo.



Fonte: Dr.-Ing. Karl-Heinz Brensing, 1994 (Adaptado).

O processo de deformação pode ser feito em quantos passos quanto forem necessários para dar o formato final ao tubo. Na figura 2 temos a ilustração de uma série de conformações consecutivas, sendo cada semicírculo apresentado a mesma seção do tubo, em tempos diferentes, sendo o arco superior o início da conformação, e o ultimo o tubo já conformado e soldado.

Figura 2 — Ilustração diagramática das bordas da tira da fusão e a formação da solda HF.



Fonte: Karl-Heinz Brensing, 1994 (Adaptado).

O metal para a fabricação de tubos com costura em solda é especificado por norma. Segundo a especificação NBR 6591 - Tubos de aço-carbono com solda longitudinal de seção circular, quadrada, retangular e especial para fins industriais da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), os tubos podem ser enquadrados conforme a espessura de sua chapa, variação de porcentagem de carbono (de 0,06% a 0,12%), perfil e área transversal, etc. (ABNT NBR 6591, 2008). Para a aplicação na indústria em geral, tanto na engenharia mecânica, quanto na construção civil, a nomenclatura SAE (Society of Automotive Engineers) é utilizada,

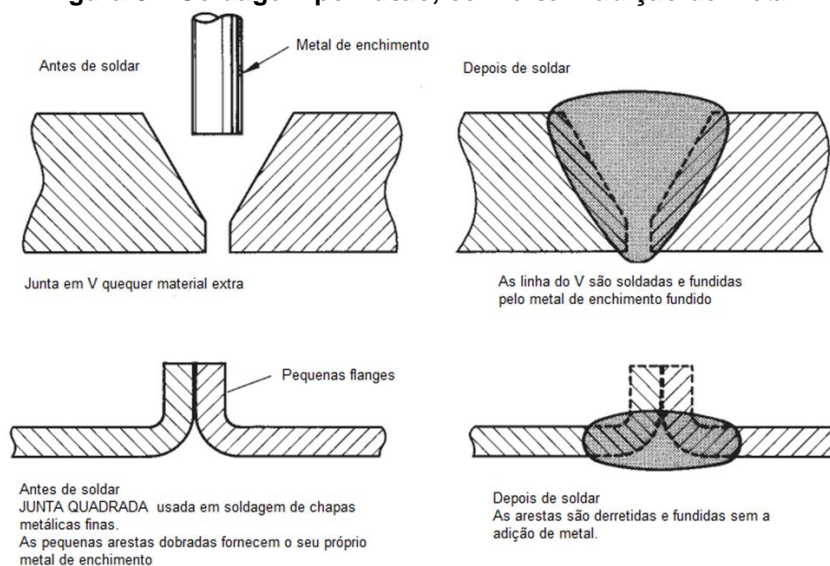
a qual se baseia em quatro dígitos. O primeiro dígito representa o elemento ou elementos de liga característicos. Os dois últimos dígitos representam uma porcentagem de carbono em 0,0 1 %. Os dígitos intermediários restantes (em geral um só dígito) representam a porcentagem aproximada do elemento de liga predominante. Por exemplo, Aço SAE 1020 (aço-carbono, com 0,20% de carbono), SAE 1012 (aço-carbono, com 0,12% de carbono), Aço SAE 2320 (aço-níquel, com 3,5% de níquel e 0,20% de carbono). (PFEIL, 2009).

2.3 SOLDAGEM DE AÇOS DE BAIXA LIGA

Soldagem significa o processo de unir duas peças metálicas em conjunto para dar uma articulação sólida e forte. O processo de soldagem é subdividido em duas classes principais. Primeiro, temos soldagem por fusão, que envolve o aquecimento das extremidades das peças de metal para uni-las a uma temperatura alta o suficiente para que elas derretam ou se fundam e, em seguida, se fundam ao esfriarem. Esse processo é um pouco semelhante ao processo de fundição. A junção, depois que o metal fundido se solidificou resultará em uma junta resistente. E a segunda, soldagem por pressão, que consiste em aquecer as extremidades das peças abaixo do ponto de fusão, e em seguida juntar e submetê-las a alta pressão, causando a fusão dos metais e unindo as peças. (TIMINGS, 2008).

A soldagem de fusão completa, como o nome indica, é um processo de união térmica em que as bordas dos metais originais a serem unidos são derretidas e unidas, com ou sem o uso de um material de enchimento. O princípio básico da soldagem por fusão é mostrado na Fig. 3, que descreve duas configurações de juntas típicas: uma usando um metal de enchimento (parte superior da Figura 3), e outra com autopreenchimento, que não adiciona metal de preenchimento (parte inferior da Figura 3). (TIMINGS, 2008).

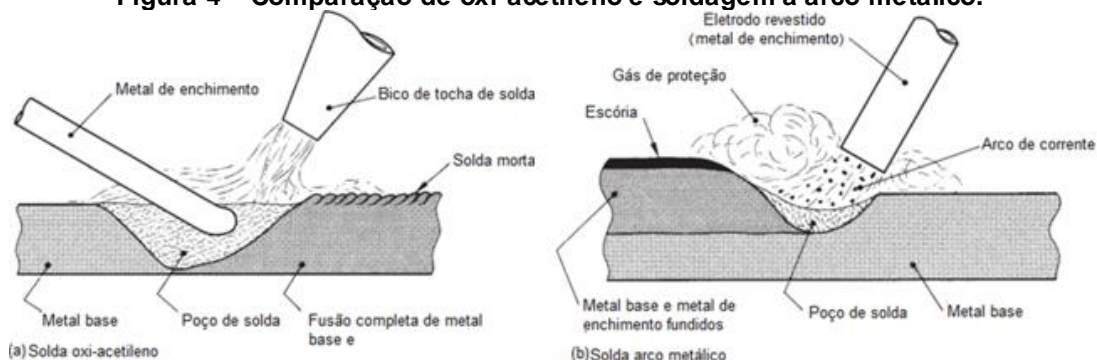
Figura 3 – Soldagem por fusão, com e sem adição de metal.



Fonte: Roger Timings, 2008 (Adaptado).

O metal de preenchimento é uma fina haste de aço ou fio de composição semelhante aos metais-base que se juntam. As hastes de preenchimento são geralmente revestidas de cobre para que elas não se oxidem. Os dois processos básicos de soldagem são mostrados na Figura 4 e são comumente referidos como solda por oxi-acetileno e solda por arco metálico.

Figura 4 – Comparação de oxi-acetileno e soldagem a arco metálico.



Fonte: Roger Timings, 2008 (Adaptado).

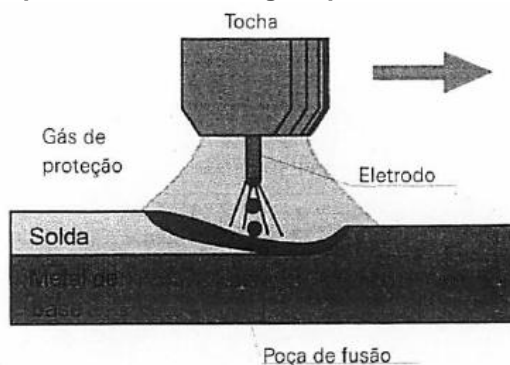
A soldagem de aço carbono e baixas ligas é a atividade de soldagem mais comum devido a vasta gama de possibilidades de formar estruturas variadas com alta resistência. Devido a esses fatos, e à ampla faixa de metais que podem ser utilizados nesse processo, esse processo é amplamente utilizado, desde a aplicações estruturais complexas, a componentes mais simples. Há dois grandes

grupos de aços com baixo teor de carbono. Um deles é o grupo que possui máximo teor de carbono de 0,15%. Eles podem conter até 0,5% de manganês e certas quantidades de silício e cobre, quando há impurezas. O segundo grupo é o de aços com teor de carbono entre 0,15% e 0,30%. Esses aços também são fáceis de soldar, porém com maior possibilidade de endurecimento, caso tenha manganês na superfície. Os aços são laminados a quente em rolos tubulares, e devido a eles serem laminados a quente, geralmente são cobertos com uma fina camada de óxido de ferro, que deve ser limpo antes da soldagem. O processo de soldagem em tal aço requer algumas precauções adicionais, como por exemplo o pré-aquecimento das peças ou remoção de uma fina camada. O pré-aquecimento é para evitar o surgimento da ZTA (Zona Termicamente Afetada) e a remoção da fina camada evitar a porosidade na região soldada. (SINGH, 2016).

2.3.1 Soldagem por MAG

A soldagem por arco metálico é um processo na qual temos a união de duas peças metálicas pela adição de um metal de fusão e pelo aquecimento delas, ocorridos pela produção de um arco elétrico. Para tal, temos a adição de uma camada de um gás de proteção, para que não ocorra contaminação com o ar. Tal gás de proteção pode ser ativo, age quimicamente como o metal de adição e os corpos, ou inerte, não age quimicamente com os metais da solda. A Figura 5 a seguir apresenta esse processo de soldagem.

Figura 5 – Esquemático de soldagem por Metal Gás Ativo/Inerte.



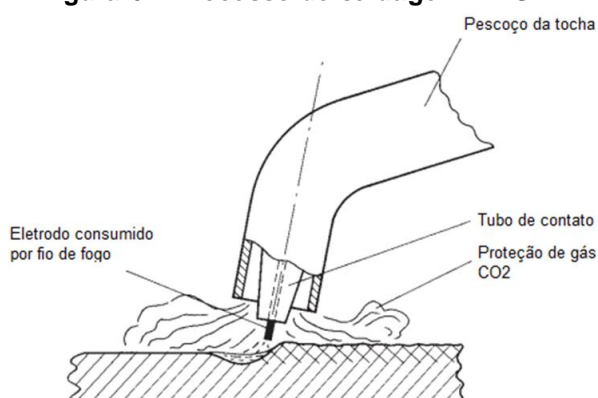
Fonte: Villani Modenese Bracarense, 2011.

A soldagem por MIG/MAG é um processo semiautomático, com pistola de soldagem guiada manualmente, o eletrodo, que é um fio nu, é alimentado continuamente a partir de um tambor na pistola de soldagem por meio de uma unidade de transmissão de fio eletrodo automático que "detecta" a corrente de soldagem e a tensão em todo o arco, a fim de manter um comprimento constante de arco. Os gases de proteção utilizados podem ser argônio, hélio ou monóxido de carbono. O uso de dióxido de carbono reduz consideravelmente os custos operacionais do processo e, quando este último gás é usado, o processo geralmente é chamado de "soldagem de CO₂". (TIMINGS, 2008).

Quando se usa o gás de CO₂ como gás de proteção, apenas ele ou majoritariamente ele, temos o processo de soldagem por MAG. (Villani Modenese Bracarense, 2011, p. 243)

O processo de soldagem por MAG, mencionado anteriormente, é apresentado na figura 6 ilustrando o gás de proteção, o cordão de solda, o arame de solda e a pistola.

Figura 6 – Processo de soldagem MAG.



Fonte: Roger Timings, 2008 (Adaptado).

Tais processos são extremamente versáteis e usuais, visto que possui uma ampla faixa de materiais que podem ser utilizados, com várias espessuras de trabalho.

O processo de soldagem por MAG é recomendado para materiais ferrosos, enquanto que o processo por MIG pode ser utilizado tanto nos ferrosos quanto nos não ferrosos. Os itens consumíveis do processo MAG são o gás CO₂ (ou similar), o arame (AWS A 5.28 para aços de baixa liga) e a própria corrente elétrica utilizada para soldar. (Villani Modenese Bracarense, 2011, p. 249)

A resistência mecânica da solda por MAG é tabelada e estabelecida por norma AWS (American Welding Society), a saber, os arames para aço com baixo teor de carbono são regidos pela norma AWS A 5.28, com classificação ER 70S-2 a 7, seu limite de resistência 480MPa, limite de escoamento 400MPa e seu alongamento 22%. (Villani Modenese Bracarense, 2011, p. 250)

Após a soldagem da peça temos certas regiões características, que devem ser consideradas no projeto ou seleção de processo de fabricação para evitar a contradições no projeto, causando seu mau uso, e possibilitando falha.

A Zona Fundida (ZF) é a região em que temos o metal de solda fundido já solidificado, juntamente com o metal base. Nessa região temos as propriedades mecânicas tabeladas e classificadas por norma, quando são feitas corretamente.

No metal base há uma região que as propriedades mecânicas são alteradas devido ao aquecimento repentino da solda. Essa região é denominada Zona Termicamente Afetada (ZTA). Quando menos ocorrência desse fenômeno, maior é a qualidade da junta gerada pela soldagem. A Figura 7 apresenta as regiões referentes a solda.

Figura 7 – Seção transversal da região da solda de topo por fusão (Esquemático).

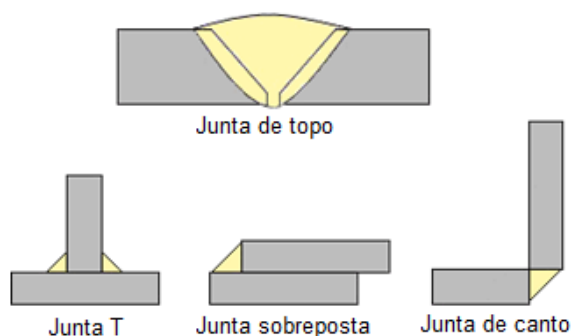


Fonte: VILLANI, 2011, p. 33.

Um processo comum em soldagem é a soldagem de juntas. Junta soldada é um segmento de uma estrutura onde as peças são unidas por soldagem; as partes unidas podem ser do mesmo material ou de materiais diferentes. A figura 8 mostra três tipos de juntas soldadas. A solda de topo, as bordas de uma placa são dobradas uma sobre a outra e a borda de uma é soldada à superfície da outra. Na solda de topo a borda de uma placa é alinhada com a borda de uma segunda placa e a junta é preenchida com metal de solda ou as duas bordas são aquecidas por resistência e pressionadas juntas para fundir. Para solda em filete (sobreposta ou de canto) a borda de uma placa é trazida contra a superfície de outra não no mesmo plano e o

metal de soldagem é fundido no canto entre as duas placas, formando assim um filete. A junta pode ser soldada em um ou ambos os lados. (OKERBLOM, 1964).

Figura 8 – Tipos de junta soldada (Esquemático).



Fonte: OKERBLOM, 1964 (Adaptado).

2.4 UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANALISAR ESTRUTURAS

A utilização de ferramentas computacionais tem crescido devido à vantagem de se obter valores e resultados aproximados, sem os gastos com equipamentos, fabricação e ensaios destrutivos. Uma das ferramentas que mais se utiliza é a Análise de Elementos Finitos (ou FEA - Finit Element Analysis). O objetivo deste capítulo é a introdução do método FEA e apresentar algumas das ferramentas disponíveis no mercado.

2.4.1 Panorama geral do método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos é um método numérico para solucionar problemas de engenharia, matemática e física. Problemas típicos que o utiliza-se tal método é análise estrutural, escoamento de fluidos, transferência de massa, transferência de calor e potencial eletromagnético. (LOGAN, 20012, p. 8).

Em problemas envolvendo geometrias, carregamentos, propriedades materiais complexas a utilização de soluções analíticas se torna inviável. Em sua maioria, impossível. Soluções analíticas são aquelas em que a solução do problema é dado por um valor exato, concedido por uma equação bem definida, para qualquer ponto do objeto em estudo. Esse método requer o uso de equações diferenciais,

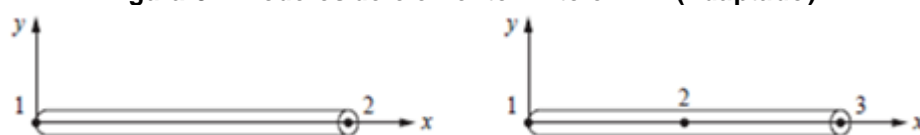
para posteriormente executar o processamento computacional. (LOGAN, 20012, p. 8).

A formulação de elementos finitos do problema resulta em um sistema de equações algébricas simultâneas para solução, em vez de requerer a solução de equações diferenciais. Esse método numérico produz valores aproximados das incógnitas em números discretos de pontos no contínuo. Por isso, este processo de modelagem de um corpo, dividindo-o em um sistema equivalente de corpos ou unidades menores (elemento finito) interligado em pontos comuns a dois ou mais elementos (pontos nodais ou nós) e/ou linhas de fronteira e/ou superfícies, é chamado de discretização. No método dos elementos finitos, em vez de resolver o problema para todo o corpo em uma operação, formulamos a equação para cada elemento finito e combinamos para obter a solução de todo o corpo. (LOGAN, 20012, p. 9).

A escolha do elemento a ser utilizado em uma análise por elementos finitos depende das condições físicas em que o corpo está ao sofrer esforços dos mais variados, e quão próximo do ambiente real será a análise. Deve-se fazer um pré-julgamento de quantas dimensões a análise será feita (uma, duas ou três dimensões). Tal análise deve ser embasada em critérios que embasem a obtenção de resultados aceitáveis, justificando-a. (LOGAN, 20012, p. 9).

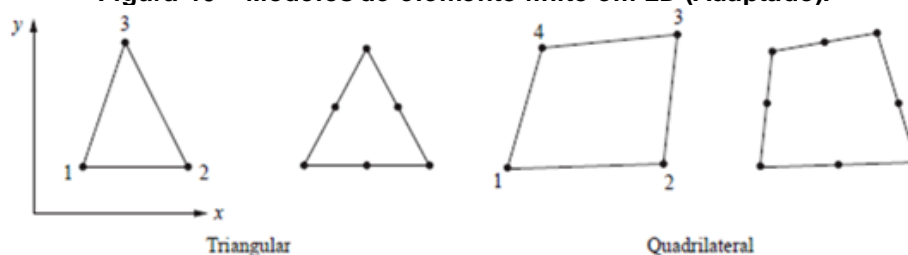
As Figuras 9, 10 e 11 apresentam elementos de uma, duas e três dimensões, respectivamente.

Figura 9 – Modelos de elemento finito em 1D (Adaptado).



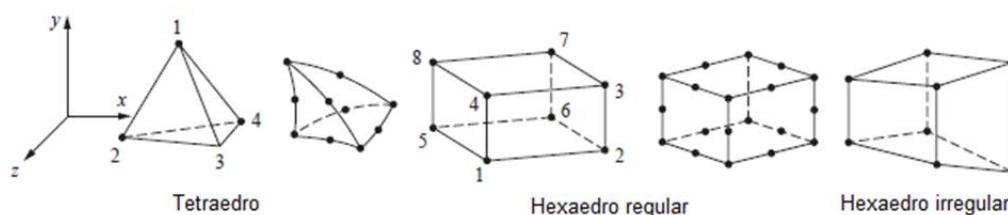
Fonte: LOGAN, 2012, p. 9.

Figura 10 – Modelos de elemento finito em 2D (Adaptado).



Fonte LOGAN, 2012, p. 9.

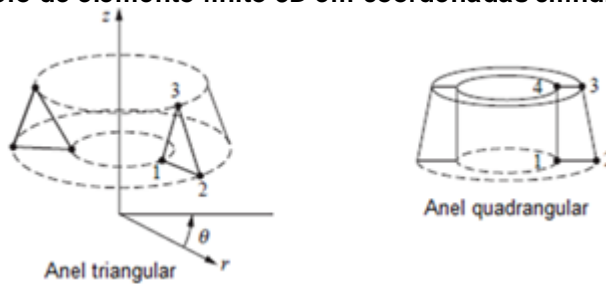
Figura 11 – Modelos de elemento finito em 3D (Adaptado).



Fonte: LOGAN, 2012, p. 9.

A Figura 12 mostra a aplicação do método do elemento finito utilizando-se coordenadas cilíndricas, mais recomendada para geometrias axialmente simétricas (ou axissimétricas). (LOGAN, 2012, p. 10).

Figura 12 – Modelo de elemento finito 3D em coordenadas cilíndricas (Adaptado).



Fonte: LOGAN, 2012, p. 9.

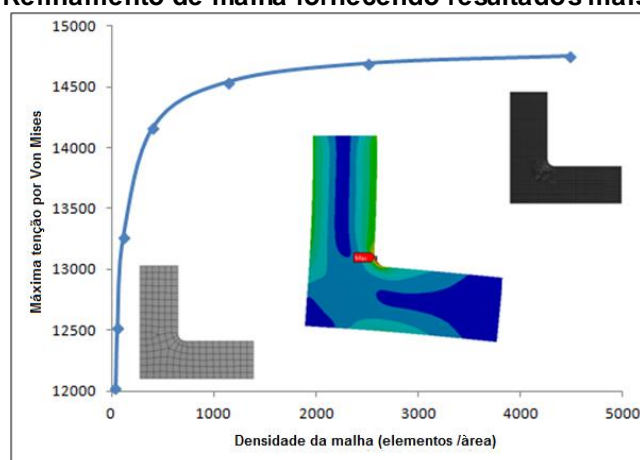
Após a seleção do elemento, e a discretização do mesmo, há a seleção da função deslocamento. Ela atuará em cada elemento utilizando valores nodais de cada um deles. Funções polinomiais de primeiro, segundo e terceiro grau são utilizadas para tais funções devido à sua fácil manipulação. Para um elemento bidimensional, a função deslocamento é em seu plano de atuação. A função é expressa em pontos nodais conhecidos. Essa mesma equação é utilizada para cada ponto nodal. Como no método dos elementos finitos é definido em uma quantidade contínua, assim como o deslocamento do corpo, esses valores são aproximados por pontos discretos pertencentes a um conjunto de funções contínuas por partes, com domínio ou elemento finito. (LOGAN, 2012, p. 10).

2.4.2 Refinamento de malha

Um dos principais problemas na precisão dos resultados de métodos computacionais como o método dos elementos finitos é o refinamento da malha. Isso é relacionado a quão pequeno o elemento precisa ser para garantir que o

resultado não seja afetado pelo seu tamanho. Porém, quanto mais pequenos os elementos, mais elementos haverá na malha, e assim mais tempo de processamento computacional. Entretanto, quanto menor o tempo de projeto é, mais rápido podemos gerar os resultados, e finalizá-lo. Para efetuar um estudo por FEM é necessário que haja um balanço entre o refinamento da malha e o tempo de solução. A Figura 13 apresenta essa característica convergente do FEM ao se refinar a malha.

Figura 13 – Refinamento de malha fornecendo resultados mais (Adaptado).



Fonte: CAE ASSOCIATES, 2014.

Outro ponto a ser levado em conta no refinamento da malha é que não é necessário que toda a malha seja homogeneamente refinada. O princípio de Saint-Venant reforça que as forças aplicadas em um local não afetam regiões distantes. Portanto, o modelo pode ser refinado apenas em locais específicos, onde a malha terá elementos com tamanhos bem menores que os demais. (LOGAN, 20012).

Os métodos convencionais de simulação não consideram regiões delicadas e complexas como as soldas. Normalmente apenas definem o comportamento geral da estrutura/peça definindo um tamanho fixo nos elementos de malha. Em um contexto geral, a região soldada normalmente necessita de uma malha mais refinada, visto que há a chance de acumular tensões nela. (MICHARELIS, 1997, 171-s)

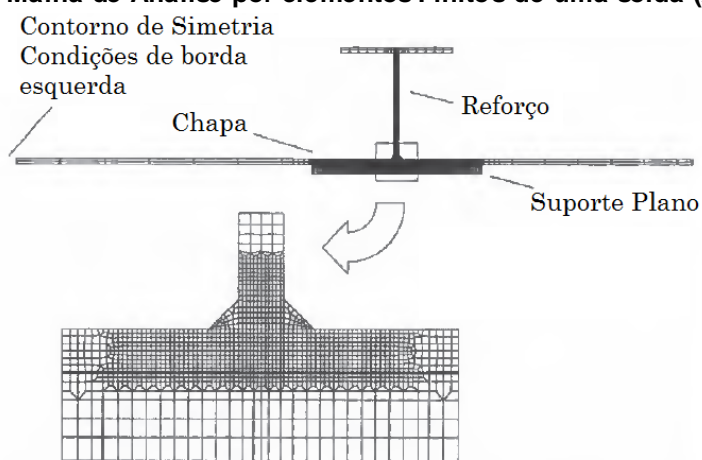
O MEF é utilizado para avaliar as distorções na estrutura de análise. O método é utilizado na indústria automotiva, aeronáutica, de construção naval e ferroviária. A flambagem é a distorção mais comum. Quando ocorre, a magnitude da distorção tende a ser muito grande. Além disso, instabilidade por flambagem reduz a

integridade da estrutura soldada significativamente. O uso dessa ferramenta pode prever uma possível falha e apontar a suscetibilidade do aparecimento de vários tipos de distorções de uma estrutura, e assim assistir a seção da região soldada de maneira mais detalhada, indicando melhores geometrias para sua fabricação. (MICHARELIS, 1997, 171-s)

A interação entre a estrutura e a região soldada pode gerar soluções extremas quando há um acúmulo elevado de deformação. Na maioria dos casos, a estrutura é a parte majoritária no acúmulo de deformações e tensões, o que não ocorre com a solda quando simulada. Esse efeito na simulação é compensada quando se aplica um refinamento de malha maior na região da solda. (MICHARELIS, 1997, 172-s)

A Figura 14 a seguir apresenta a seção transversal de uma viga com perfil em I. Nela temos uma malha em todo o modelo, porém, na solda há um refinamento maior dela.

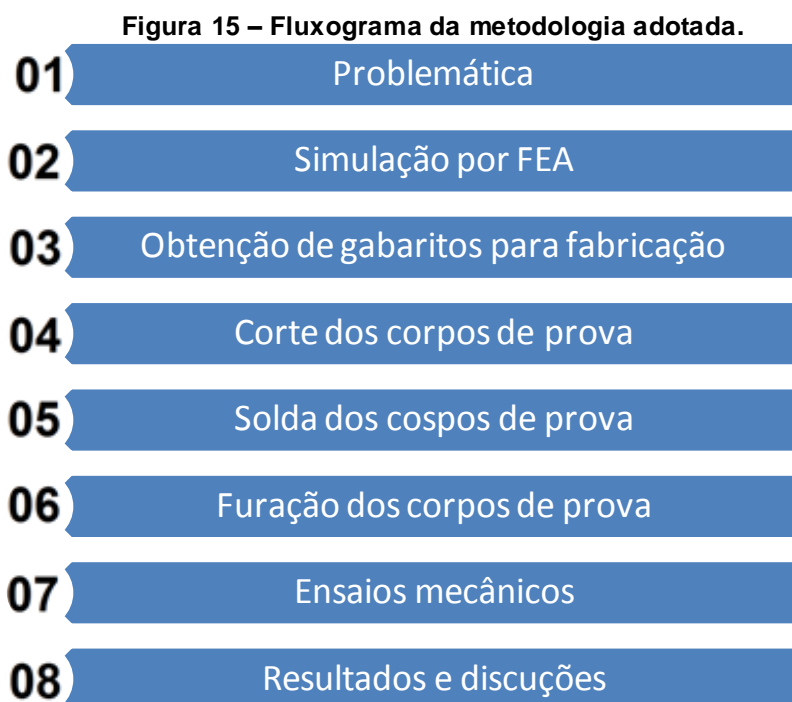
Figura 14 - Malha de Análise por elementos Finitos de uma solda (Adaptado).



Fonte: MICHALERIS, 1997, p172-s.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do presente trabalho foi dividida em oito etapas, somadas a conclusão, conforme apresentado na Figura 15.

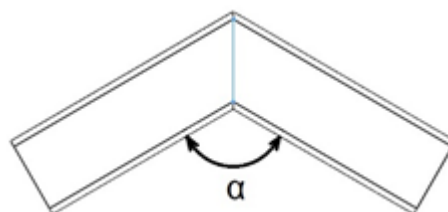


Fonte: Autor.

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho avalia por meio de simulações por FEA e ensaio de tração de corpos de prova, produzidos por dois processos de fabricação de juntas soldadas tubulares. A geometria genérica dos processos de fabricação está apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Geometria genérica dos processos de fabricação o.



Fonte: Autor.

O ângulo *alfa* (α) representa a inclinação de um tubo ao outro. Esse alfa pode ser qualquer valor entre 0° e 180° . Poderia inclusive ser um conjunto de valores, com vários conjuntos de amostras com angulações diferentes. Porém, devido ao curto espaço de tempo foi estabelecido $\alpha=120^\circ$. O desenho detalhado de cada amostra se encontra nos Anexos A e B.

As configurações e especificações de procedimento de soldagem estão relacionados no Quadro 1.

Quadro 1 – Especificações de procedimento de soldagem.

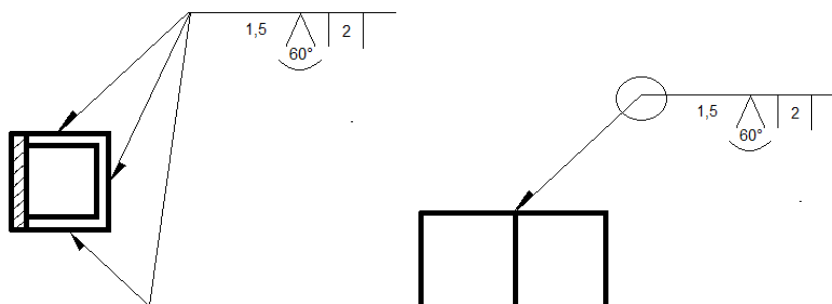
| Especificação de procedimento de soldagem | | | |
|---|--|----------------------------------|---------|
| Método 1 e 2 | | | |
| JUNTA | | TRAT. TÉRMICO APÓS SOLDAGEM | |
| Projeto da junta: | Anexos A e B | Faixa de temperatura: | - |
| Cobre Junta: | - | Tempo de permanência: | - |
| Material tipo: | Aço | Outro: | |
| Outro: | | | |
| METAIS DE BASE | | CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS | |
| Tipo: | A-36 | Corrente (CC/CA): | CC |
| Análise química: | C=0,27%, Mn=0,8% P _{max} =0,04%, S _{max} =0,05% | Faixa de corrente: | 250 A |
| Faixa de espessura: | 1,5 mm | Tensão: | 31 V |
| Outro: | | Outro: | |
| METAIS DE ADIÇÃO E FLUXO | | TÉCNICA | |
| Classif. AWS: | AWS A 5.28 ER 70S-2 | Dimensão do bocal: | 8 mm |
| Marca comercial: | BAUMER | Distancia Bico de contato-peça: | 25 mm |
| Dimensões: | Ø0,8mm | Limpeza inicial ou entre passes: | não |
| Outro: | | Cordão: | zig-zag |
| GÁS | | Oscilação: | não |
| Gás(es) de proteção: | CO2 80% | Método de givagem: | básico |
| Composição: | Argônio 20% | Número de passes: | 1 |
| Vazão: | 15 l/min | Eletrodo (simples ou múltiplo): | simples |
| Outro: | | Velocidade de soldagem: | 8 mm/s |
| PRÉ-AQUECIMENTO | | Posição: | plana |
| Temperatura: | - | Outro: | |
| Temp. entre passes: | - | | |
| Outro: | | | |

Fonte: Autor.

As principais diferenças entre os Métodos 1 e 2 são comprimento de solda e perímetro de corte. A solda do Método 1 é efetuada em todo o contorno, enquanto que a solda do Método 2 é efetuada apenas em 3 das 4 arestas da junta. As

representações segundo a norma AWS de cada Método estão apresentadas na Figuras 17.

Figura 17 – Representação da solda do segundo a AWS. Método 2 a esquerda, e Método 1 a direita.



Fonte: Autor.

Para cada processo de fabricação foram feitos 6 corpos de prova, nomeados conforme seu método de fabricação e numeração. A exemplo, seja uma amostra nomeada por M1-03; a inicial M seguida do numero 1 refere-se ao método de fabricação 01; a numeração 03 indica que é o terceiro corpo de prova. O Quadro 2 apresenta cada nome das amostras conforme essa metodologia.

Quadro 2 – Nomenclatura dos corpos de prova.

| MÉTODO DE FABRICAÇÃO | CORPO DE PROVA | NOMENCLATURA |
|----------------------|----------------|--------------|
| 1 | 01 | M1-01 |
| 1 | 02 | M1-02 |
| 1 | 03 | M1-03 |
| 1 | 04 | M1-04 |
| 1 | 05 | M1-05 |
| 1 | 06 | M1-06 |
| 2 | 01 | M2-01 |
| 2 | 02 | M2-02 |
| 2 | 03 | M2-03 |
| 2 | 04 | M2-04 |
| 2 | 05 | M2-05 |
| 2 | 06 | M2-06 |

Fonte: Autor.

De uma maneira geral, há processos similares para os dois métodos de fabricação. Inicialmente é efetuada a simulação pelo método dos elementos finitos,

para prever as regiões com maior chance de falha. Em seguida, a fabricação dos corpos de prova. Ela é composta por corte, solda e furação, respectivamente, dos corpos de prova. Os processos de corte e solda serão feitos com auxílio de dispositivo/gabarito, para garantir homogeneidade das peças. Por ultimo foram realizados ensaios mecânicos, tanto de líquidos penetrantes, como ensaio de tração. A máquina de ensaio de tração fornece um diagrama de força por deformação. O esquema geral de sequenciamento das atividades dos dois processos de fabricação é mostrado na Figura 18.



Fonte: Autor.

O tipo de tubo selecionado para a realização do presente estudo foi o tubo com costura, de perfil transversal retangular, com 30 x 40mm de perfil, espessura de tubo de 1,5mm e aço de baixo carbono A-36, devido à sua facilidade de acesso na região de Guarapuava e por ser matéria prima para estruturas metálicas.

Foram avaliados os resultados gerados pelo ensaio de tração em cada corpo de prova, comparando cada resultado.

3.1.1 Materiais

O Quadro 3 apresenta todos os materiais necessários para a execução do presente trabalho.

Quadro 3 - Materiais para a fabricação dos corpos de prova e execução do estudo.

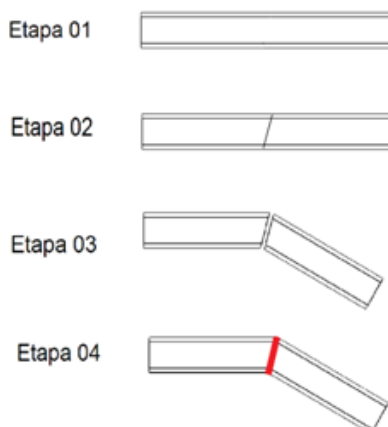
| Nº | Qtd | Denominação | Material/Norma | Detalhes |
|----|-----|------------------|----------------|-----------------|
| 01 | 01 | Tubo retangular | A-36 | 40x30x6000 (mm) |
| 02 | 01 | Arame de solda | MIG/MAG | Ø0,8 (mm) |
| 03 | 01 | Barra de aço | SAE 1020 | 4,8x32x6000(mm) |
| 04 | 01 | Máquina de solda | MIG/MAG | |

| | | | | |
|----|----|-----------------------------|---------------|---------------|
| 05 | 01 | Gás O2 | | |
| 06 | 01 | Gás Argônio | | |
| 07 | 01 | Capa de aço | SAE 1020 | 5x55x200 (mm) |
| 08 | 02 | Parafuso ALLEN | DIN 912 | M14x50 (mm) |
| 09 | 02 | Porca | | M14 |
| 10 | 10 | Parafuso ALLEN | DIN 912 | M12x50 (mm) |
| 11 | 10 | Porca | | M12 |
| 12 | 01 | Máquina de ensaio de tração | EMIC Série 23 | |
| 13 | 05 | Serra fita manual | STARRETT | |
| 14 | 01 | Arco para serra manual | | |
| 15 | 01 | Máquina de serra fita | SM250M | 220/380 (V) |
| 16 | 01 | Tinta acrílica | AMARELA | 900 (g) |
| 17 | 01 | Líquido penetrante | | |
| 18 | 01 | Ativador | | |
| 19 | 01 | ANSYS | | |

Fonte: Autor.

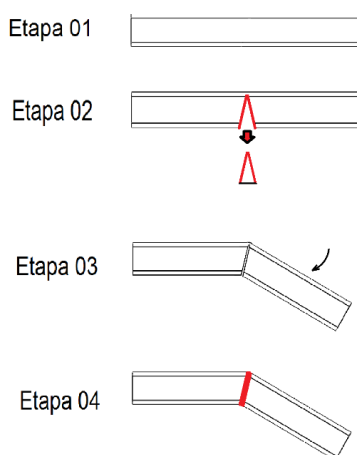
3.1.2 Os métodos de fabricação

O método 01 é dividido em 4 etapas. Na primeira etapa é efetuado o corte do tubo de maneira a obter um segmento de tubo, com 300 mm de comprimento. Em seguida o corte em ângulo. Esse corte foi feito com sua face medindo 60° da linha longitudinal do tubo. A etapa 3 é destinada a posicionar duas peças, com as faces resultantes do passo 2 encostando uma na outra, de maneira a formar o ângulo alfa de 120° . Nessa etapa é importante a utilização do dispositivo de solda para a correta posição das peças. Por último, na quarta etapa foi efetuada a solda dos corpos de solda. A precisão e repetibilidade dos corpos de prova são garantidos pelo gabarito de solda. A Figura 19 apresenta esses processos.

Figura 19 – Etapas do processo de fabricação 01.

Fonte: Autor.

O método 02 está dividido em quatro etapas. A primeira etapa é a obtenção do tubo em seu comprimento original. A segunda etapa é o corte do “V”, onde restará apenas uma, dentre as 4 faces do tubo. Na terceira etapa foi realizada a dobra da peça, executada manualmente e encaixada no dispositivo de corte. A etapa quatro faz-se a soldagem MAG nas arestas cortadas das amostras. Novamente, a precisão e repetibilidade dos corpos de prova são garantidos pelo gabarito de solda. A Figura 20 representa o esquema das quatro etapas descritas.

Figura 20 – Etapas do processo de fabricação 02.

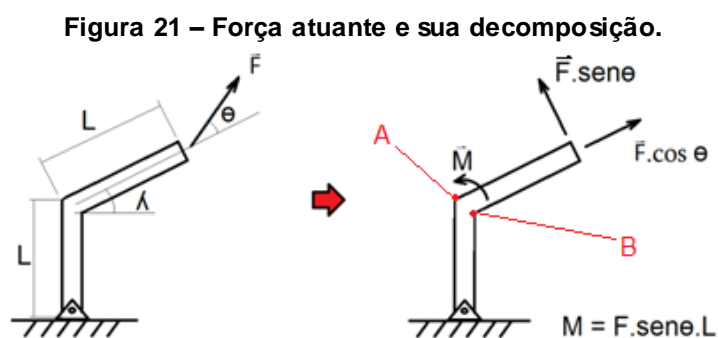
Fonte: Autor.

Como os dois processos de fabricação possuem a mesma quantidade de etapas, será utilizado o comprimento de solda efetivo de cada método como termo de comparação, definindo assim a economia de solda do Método 2 em comparação

com o Método 1. Nomeando a economia de comprimento de solda como E_{solda} , e adotando como referencia o comprimento de solda do método 01, o método 02 economizará:

$$E_{solda} = 1 - \frac{c_2}{c_1} \quad (1)$$

A fixação e o suporte, que formam a base de onde será aplicado o carregamento, não acumularão momento fletor, por serem acoplados por pino. Os efeitos de atrito serão desprezados nesses acoplamentos. Todo o momento gerado será acumulado na junta soldada. O carregamento aplicado atuará formando um ângulo θ (Theta) com o eixo da peça. A Figura 20 exemplifica o caso. Observa-se que a região convexa da junta, indicada por A, apresenta um acúmulo de tensões de compressão, enquanto que a região côncava, indicada por B, apresenta um acúmulo de tensões de tração. Observa-se que, caso o sentido da força fosse alterado, os resultados seriam alterados, devido à mudança de tipo de tensões resultantes nas regiões A e B. Portanto, os resultados adquiridos no presente estudo são específicos do carregamento apresentado na Figura 21.



Fonte: Autor.

Quando avaliamos a força de tração e as tensões que ela gera, não temos variação alguma em seu comprimento, visto que seu perfil é constante. Porém, quando avaliamos o momento na junção, gerado devido à força perpendicular ao eixo, temos que ele varia conforme o comprimento do corpo de prova. Com isso, quando obtemos os valores de tensão limites, também obtemos os valores de Momento limite, onde ele se conservará, não importando o comprimento ou a força aplicada. A equação abaixo exemplifica o caso.

$$M = F * \sin\theta * L \quad (2)$$

3.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

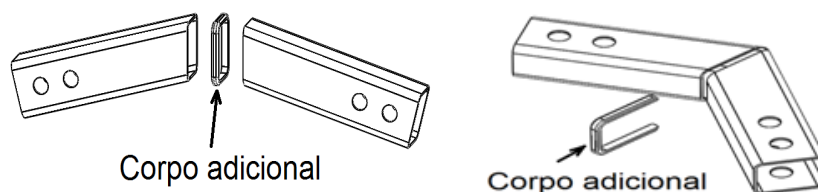
Para a simulação é necessário que haja o modelo 3D computacional do objeto a ser simulado (Figura 21). O próprio ANSYS fornece ferramentas para essa modelagem da peça, porém, como foge do objetivo desse trabalho, não serão detalhados os passos da modelagem computacional da peça.

Feito o modelo 3D de cada método (cada um segundo as medidas dos Anexos A e B, respectivamente) a configuração da simulação é iniciada.

Na plataforma WORKBENCH do ANSYS são importados os modelos desenhados. Em seguida são estabelecidos os parâmetros de encosto da solda. Para isso, foi adicionado um corpo para simular o metal de adição da solda, e estabelecido o tipo de conexão como "bonded". As características mecânicas do material da solda foram consideradas idênticas às do material base, seguindo os parâmetros de solda ideal. (VILLANI, 2011).

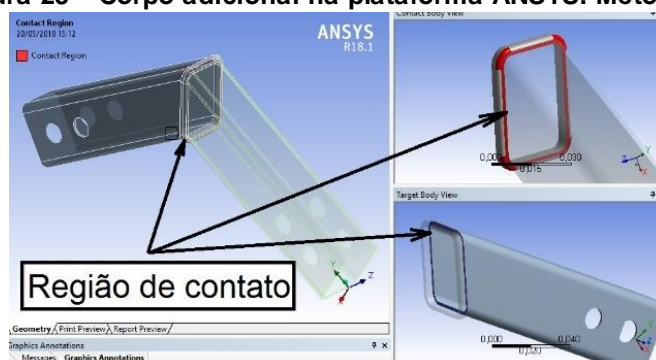
As Figuras 22, 23 e 24 apresentam o corpo adicional nos modelos 3D dos métodos.

Figura 22 – Representativo dos corpos adicionais para simulação no ANSYS. Método 01 a esquerda e Método 02 a direita



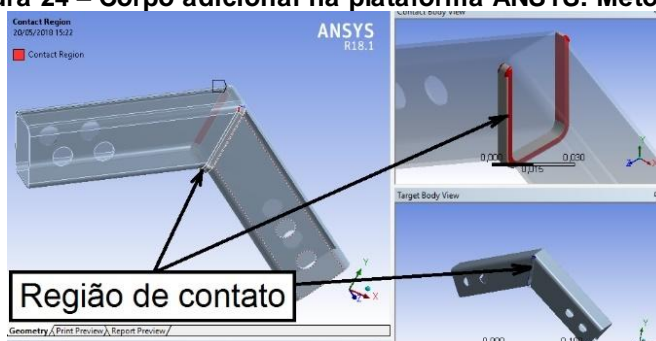
Fonte: Autor.

Figura 23 – Corpo adicional na plataforma ANSYS. Método 1.



Fonte: Autor.

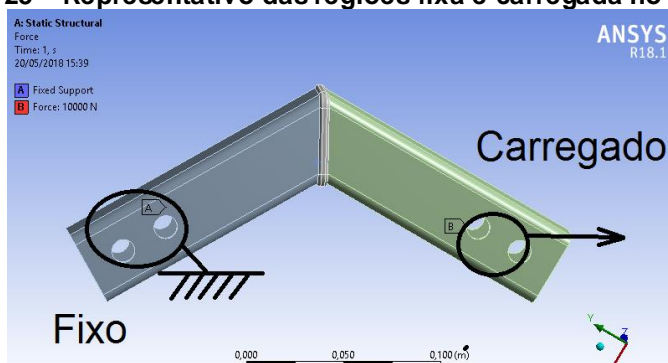
Figura 24 – Corpo adicional na plataforma ANSYS. Método 2.



Fonte: Autor.

O próximo passo é estabelecer a geometria que será considerada fixa e a que receberá a aplicação da força estática. A Figura 25 apresenta o modelo 3D já importado na plataforma de simulação indicando, pelas linhas grossas na cor preta, as regiões de fixação (duas furações na extremidade esquerda do modelo) e a de aplicação da força (as duas furações a direita da Figura 25).

Figura 25 – Representativo das regiões fixa e carregada no ANSYS.



Fonte: Autor.

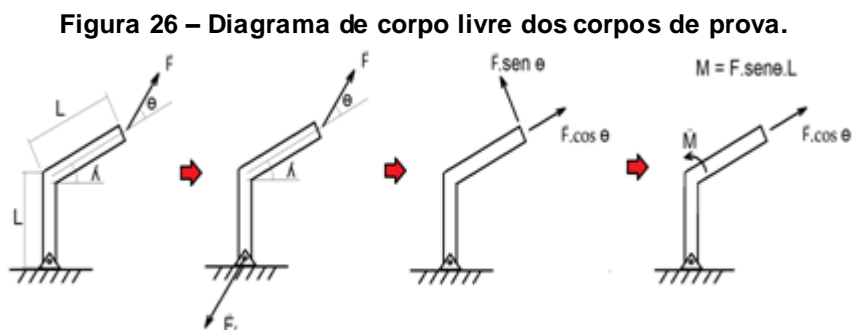
Devido à velocidade de aplicação de força ser extremamente baixa, 2 mm/s, pode-se considerar o tipo de carga como estática. Então, pode-se efetuar aplicação de força estática na simulação. (HIBBELER, 1998).

Por ação e reação, ou somatório das forças igual a zero, essas duas geometrias receberão a mesma força. O diagrama de corpo livre e decomposição de forças do modelo está apresentado na Figura 26. Dada uma força F aplicada no modelo, conforme a parte esquerda da Figura 26, em uma angulação de θ (Theta), sua decomposição resulta em um momento (com eixo de giro na região da solda) e uma força de tração (com sentido colinear ao tubo). Nos pontos extremos, indicados por A e B na Figura 21, serão calculadas as tensões nominais. Essa força de tração e momento resultantes, e tensão nominal são:

$$M = F * \sin \theta * L \quad (2)$$

$$F_{tração} = F * \cos \theta \quad (3)$$

$$\sigma_{nom} = \frac{F * \cos \theta}{A} + \frac{M * C}{I} \quad (4)$$



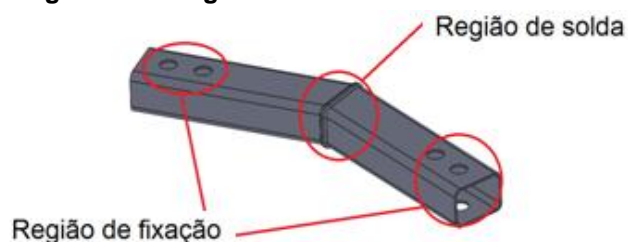
Fonte: Autor.

No presente trabalho foi estabelecido tamanho e geometria fixa nos corpos de prova, tornando assim os resultados específicos para esses formatos. Porém, se por ventura for pertinente elaborar uma junta tubular soldada com mesma resistência, modificando apenas o comprimento L (Figura 26), pode-se utilizar parte dos resultados desse estudo nele. Um deles é o momento fletor M . Ao aplicarmos a força máxima resistida pela junta soldada obterem-se um momento máximo resultante. Esse momento deverá ser conservado de tal forma que, meso alterando o valor a força aplicada, ou o valor de L , ele deverá se conservar.

A seguir é necessário definir a malha. O tamanho do elemento é essencial para a simulação. Ele deve ter um tamanho suficientemente pequeno, de forma que,

mesmo alterando seu tamanho, os resultados não são prejudicados. O tempo de simulação também é levado em conta. Refinar demasiadamente a malha pode ser prejudicial quando o tempo de simulação aumenta excessivamente. Há vários métodos de selecionar ideal do elemento da malha. Aqui usaremos o método empírico, alterando seu tamanho em regiões pertinentes, como a região de solda, fixação e aplicação da força. Essas regiões são apresentadas na Figura 27.

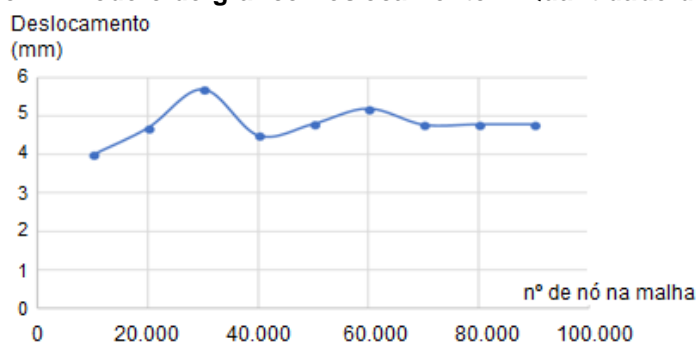
Figura 27 – Regiões de refinamento de malha.



Fonte: Autor.

Como os tamanhos dos elementos não serão iguais, o parâmetro dotado para seleção da malha ideal será quantidade de nós e deslocamento gerado. A quantidade de nós será definida de maneira que o deslocamento gerado pela aplicação da força não resultar uma variação maior que 5% da quantidade de elementos anterior. Esse método gerará um gráfico 2D com número de elementos na abscissa, e deslocamento gerado na ordenada. O Gráfico 01 apresenta um modelo genérico desse modelo.

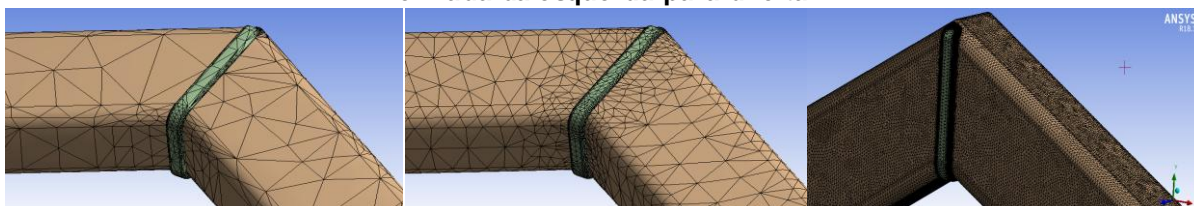
Gráfico 1 – Modelo de gráfico Deslocamento X Quantidade de nós.



Fonte: Autor.

Em termos de comparação, tem-se a Figura 28, que apresenta três refinamentos de malha diferentes do modelo 3D do método 01 na região da solda. Na imagem esquerda da Figura 27 há 14622 elementos no modelo, 28318 na imagem central e 1737080 na imagem a direita.

Figura 28 – Região de solda em modelo 3D com diferentes refinamentos de malha. Malha mais refinada da esquerda para direita.



Fonte: Autor.

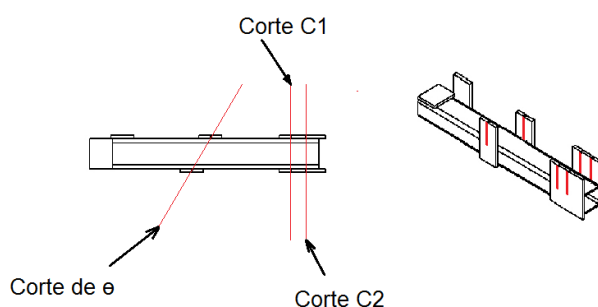
3.3 OBTENÇÃO DOS GABARITOS

Para a confecção dos corpos de prova, visando a minimização de erros e variações nas dimensões de maneira a prejudicar nos resultados de ensaios mecânicos, foram elaborados dispositivos, ou gabaritos, com o objetivo de auxiliar a confecção dos corpos de prova.

O dispositivo de corte é um gabarito, para cortar os corpos de prova diminuindo as chances de cortes com posicionamentos diferentes buscando a minimização de variação de medidas. O esquema do dispositivo de corte é indicado na Figura 29.

O corte do ângulo θ (*Theta*) define a angulação da junta. O corte C1 é o corte que define o comprimento dos corpos de prova do processo de fabricação 01. O corte C2 é o corte que define o comprimento dos corpos de prova do processo de fabricação 02.

Figura 29 – Esquema do dispositivo de corte.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova cortado são encaixados no dispositivo de corte, que possui suas devidas folgas para manter a qualidade dos corpos de prova.

O corte dos corpos de prova será feito tanto na serra fita manual quanto na automática. Os cortes do método de fabricação 01 serão inteiramente feitos

utilizando o dispositivo de corte, usando a serra fita manual para cortar os ângulos e a serra fita automática para cortar os ângulos retos.

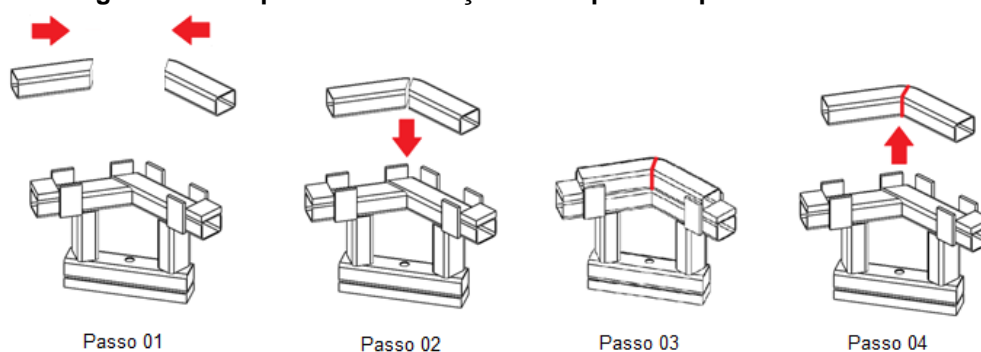
Já o método 02 será cortado manualmente, com a serra manual.

Encaixadas as peças, a solda deverá ser efetuada nas arestas da junta.

No processo de solda do corpo de prova do método 02 é similar. A peça possui uma face não cortada. Para encaixar no dispositivo de corte basta dobrar a peça e efetuar a solda nas arestas das faces de encontro uma da outra.

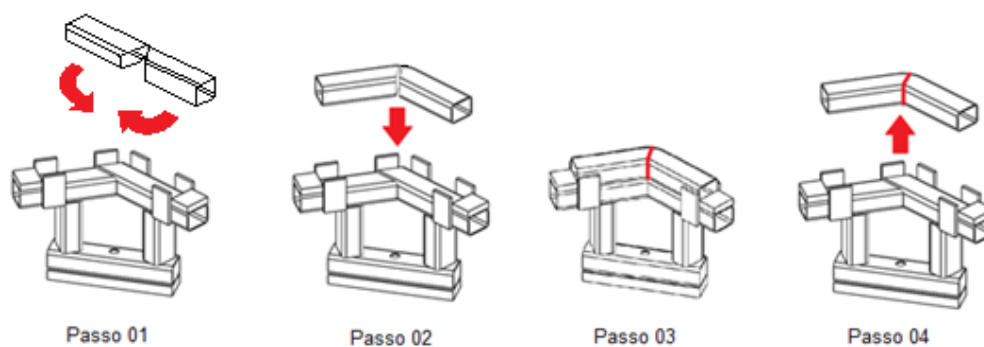
O desenho indicando o esquema geral do dispositivo de solda está indicado na Figura 30 e 31, para cada método.

Figura 30 – Esquema de utilização do dispositivo para o método 01.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Esquema de utilização do dispositivo para o método 02.

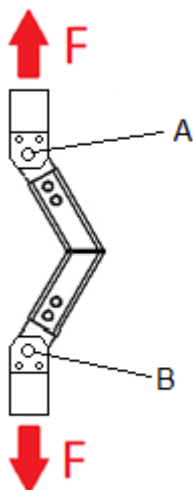


Fonte: Autor.

O corpo de prova tem um formato bem específico. Isso torna necessário um equipamento apropriado para efetivar o ensaio de tração. A Figura 32 apresenta o dispositivo, o esquema de montagem e sua localização no ensaio. Os pontos A e B são os eixos de giro livres de acúmulo de momento fletor e torção, atuantes como um apoio que limita o eixo de se movimentar na direção X, porém possibilitando o livre

giro da peça. A direção Y é a direção de aplicação da força, onde a máquina de ensaio aplicará a força e o deslocamento.

Figura 32 – Esquema de ensaio.



Fonte: Autor.

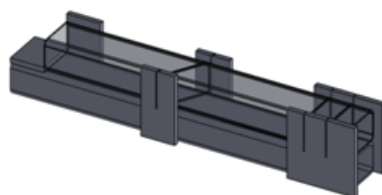
O ponto de giro do dispositivo é como indicado na imagem equipamento apropriado para efetivar o ensaio de tração. A Figura 32 apresenta o dispositivo, o esquema de montagem e sua localização no ensaio.

Os furos foram feitos na furadeira radial, com a furação de $\varnothing 12,0$ mm.

O ensaio por líquidos penetrantes foi feito obedecendo à norma ABNT NBR NM 334, que rege os procedimentos e padrões de ensaios mecânicos não destrutivos. O tempo de espera para efeito do líquido penetrante será de 20 minutos.

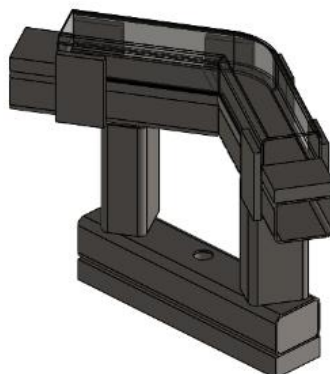
O ensaio será executado de maneira gradual, lenta e contínua, aproximando das condições estáticas, aproximando as condições de ensaio para as da simulação por FEA. As configurações do dispositivo de ensaio e máquina de ensaio estão de tal forma, que não haja acúmulo de tensões por momento nos apoios das extremidades dos corpos de prova. Os desenhos em perspectiva de cada dispositivo elaborado estão representados nas Figuras 33, 34 e 35.

Figura 33 – Vista em perspectiva do desenho do dispositivo de corte.



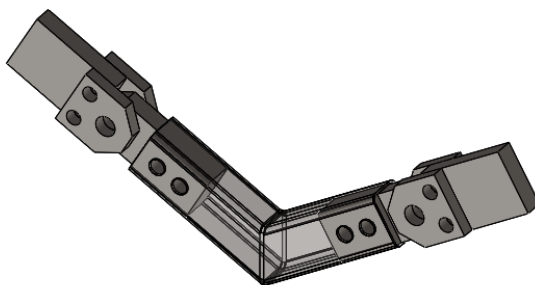
Fonte: Autor.

Figura 34 – Vista em perspectiva do dispositivo de solda.



Fonte: Autor.

Figura 35 – Vista em perspectiva do dispositivo de ensaio.



Fonte: Autor.

3.4 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os cortes dos corpos de prova foram executados com o auxílio do dispositivo de corte. As peças não apresentaram desvios de inclinação maiores que $1,5^\circ$ oscilações em comprimento, largura e altura maiores que 0,1mm. Com isso, a utilização do dispositivo de corte facilitou a fabricação. Ao efetuar o corte em cada peça, foi posto cada uma delas no dispositivo de solda para garantir que, tanto peça quanto dispositivo de solda, estavam corretos. Todas as peças encaixaram perfeitamente. As Fotografias 4, 5 e 6 apresentam algumas peças de cada método e o procedimento mencionado acima.

A Fotografia 4 apresenta um conjunto que formará um corpo de prova do Método 01 após ser soldado e furado. A Fotografia 5 apresenta todas as peças do Método 01 sendo testados com o dispositivo de solda. A Fotografia 6 mostra uma peça do Método 02 e seu retalho logo após o corte.

Fotografia 1 – Peças do Método 01 cortadas.



Fonte: Autor.

Fotografia 2 – Peças do Método 01 sendo testadas.



Fonte: Autor

Fotografia 3 – Peças do método 02 cortadas.



Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

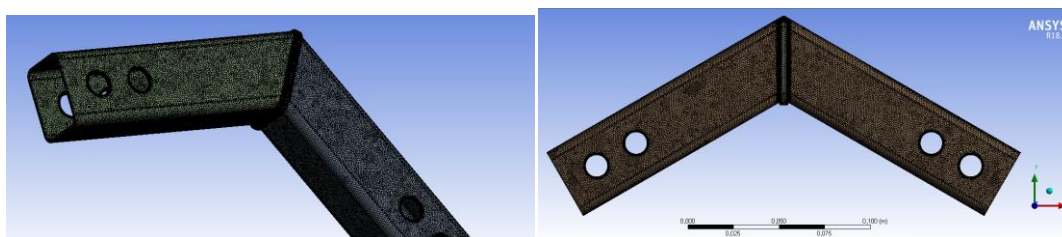
4.1 SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

O refinamento de malha local e regional de ambos os métodos apresentou a diferença de tamanhos de elementos, especificando o estudo nas regiões desejadas.

A deformação total é utilizada como critério de suficiência de nós. Ela determinará a quantidade suficiente de nós (refinamento de malha) que forneça resultados aceitáveis.

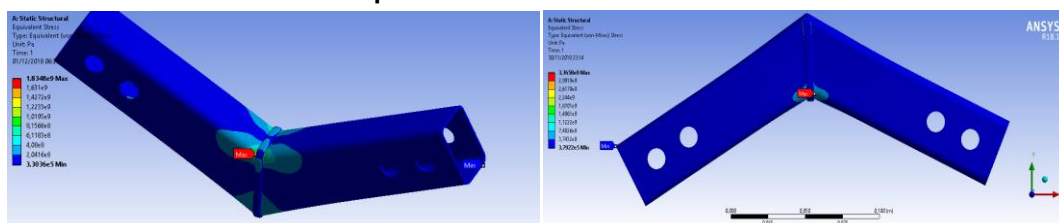
Os resultados iniciais da malha, concentração de tensões (Von-Misses) e deformação total de cada método estão indicados nas Figuras 36, 37 e 38. Na figura 37 vemos que a maior concentração de tensões se encontra na região central côncava da junta soldada, no limiar da peça com a solda. Com isso temos uma informação valiosa, informando que a maior chance de ocorrer a falha é nessa região, e não na furação de fixação com os dispositivos, aumentando a confiabilidade dos resultados do ensaio de tração.

Figura 36 – Modelo 3D na plataforma ANSYS com aplicação da malha. Método 01 a esquerda e Método 02 a direita.



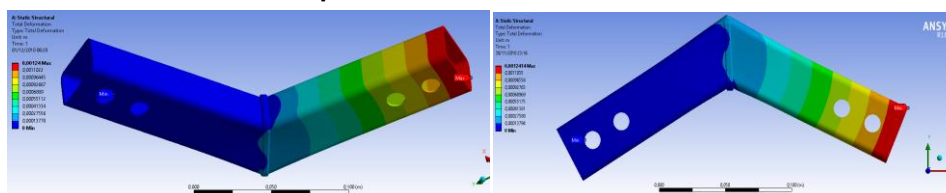
Fonte: Autor.

Figura 37 – Resultado da simulação apresentando o acumulo de tensões. Método 01 a esquerda e Método 02 a direita.



Fonte: Autor.

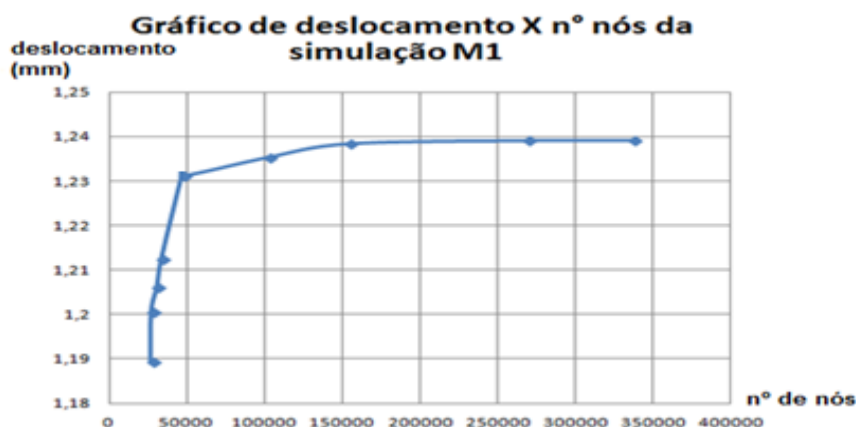
Figura 38 – Resultado da simulação apresentando a deformação máxima. Método 01 a esquerda e Método 02 a direita.



Fonte: Autor.

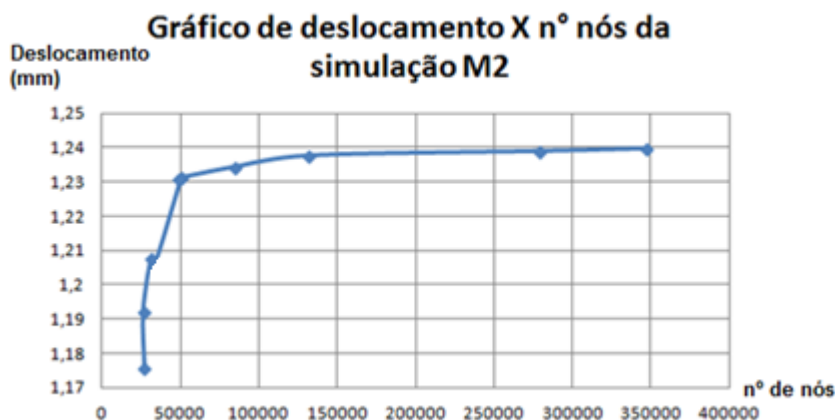
O resultado do refinamento de malha suficiente correspondeu a 92.643 elementos e 154.581 nós no Método 01 e 77.976 e 131.771 no Método 02. Eles corresponderam a 0,0012385 m e 0,0012377 m de deslocamento de cada método, respectivamente, ou seja, equivalentes. A imagem a esquerda na Figura 25 apresenta a vista em perspectiva do Método 01 com seu deslocamento gerado. A imagem a direita apresenta o deslocamento do Método 02. Esses valores de quantidade de elementos de malha foram definidos com base na variação de menos de 5% da simulação anterior. Cada Método foi simulado 10 vezes para obter essa variação menos que 5%. Os Gráficos 2 apresenta o número de nós e deslocamento gerado (aplicação de força fictícia de $F=10000N$) do Método 01, e o Gráfico 3 do Método 02. Nesses gráficos há uma curva em coloração azul e 10 pontos nela. Cada ponto representa uma simulação executada. A curva foi gerada a partir desses pontos, e é observada uma convergência do deslocamento máximo gerado conforme o aumento do número de nós na malha. Os três últimos pontos da curva apresentaram deslocamentos com erros menores que 0,1%, bem menores que o erro adotado (1%). Portanto, se for utilizado esse parâmetro de 1% pode-se utilizar qualquer um desses três pontos de configuração de malha para a simulação. O tempo para cada simulação não ultrapassou um minuto, então podemos admitir a malha com maior número de nós para a simulação. Os dados das simulações para gerar esses gráficos estão nas Tabelas 03 e 04.

Gráfico 2 – Variação do deslocamento máximo conforme aumenta a quantidade de nós na malha no método 1.



Fonte: Autor.

Gráfico 3 – Variação do deslocamento máximo conforme aumenta a quantidade de nós na malha no método 2.



Fonte: Autor.

As Tabelas 01 e 02 informam os dados de cada simulação. Numeração da simulação, número de nós da malha, número de elementos da malha, tamanho do elemento de malha, refinamento de malha na solda, refinamento de malha na furação, tensão máxima por Von-Mises e deslocamento máximo gerado.

Os parâmetros de entrada para a malha são o tamanho do elemento, refinamento da malha na solda e refinamento da malha na furação. Esse refinamento é definido pelo tamanho do elemento fornecido (l , letra ele) dividido por um fator de 2 na potência n , ou seja, o tamanho do elemento de malha na região refinada é " $l_{refinado}$ ", tal que:

$$l_{refinado} = \frac{l}{2^n}$$

Para o refinamento da malha na região da solda adotou-se “ns”, e “nf” para a da furação.

Os parâmetros de numero de elementos e nós, tensão máxima por Von-Misses e deslocamento máximo são dados de saída.

Ao aumentar apenas o tamanho do elemento da quantidade de nós e elementos de malha não mais que dobrou (primeiras 5 simulações). O deslocamento por sua vez apresentou uma variação de quase 5%. Já no caso dos parâmetros ns e nf, juntamente com o tamanho do elemento, quando foram alterados observou-se um aumento expressivo, maior que 10 vezes a quantidade de nós na malha inicial pra final. Os valores de deslocamento também foram modificados com essas modificações, e apresentaram uma convergência para 1,239mm. Nas 3 ultimas simulações o deslocamento máximo não se alterou, mantendo o valor de 1,239mm no Método 01. No método 02 as três ultimas simulações apresentaram uma variação de 1% uma da outra, o que é aceitável pelo parâmetro de erro adotado (também de 1%). Portanto, os parâmetros da simulação 10 foram estabelecidos como ideais para o presente estudo.

Tabela 1 - Parâmetros das simulações do método 01.

| Simulação Número | Número de nós | Número de elementos | Tamanho do elemento (m) | ns = Refinamento Solda | nf = Refinamento Furação | Deslocamento Máximo (mm) |
|---------------------|------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 26848 | 14816 | 0,05 | 1 | 1 | 1,189 |
| 2 | 27154 | 14959 | 0,04 | 1 | 1 | 1,201 |
| 3 | 30802 | 17347 | 0,03 | 1 | 1 | 1,206 |
| 4 | 33712 | 18975 | 0,02 | 1 | 1 | 1,213 |
| 5 | 48596 | 27315 | 0,01 | 1 | 1 | 1,234 |
| 6 | 47449 | 27020 | 0,005 | 1 | 1 | 1,231 |
| 7 | 101950 | 62184 | 0,005 | 2 | 2 | 1,235 |
| 8 | 154581 | 92643 | 0,0025 | 2 | 2 | 1,239 |
| 9 | 268988 | 170386 | 0,0025 | 3 | 2 | 1,239 |
| 10 | 336711 | 213631 | 0,002 | 3 | 2 | 1,239 |

Fonte: Autor.

Tabela 2 - Parâmetros das simulações do método 02

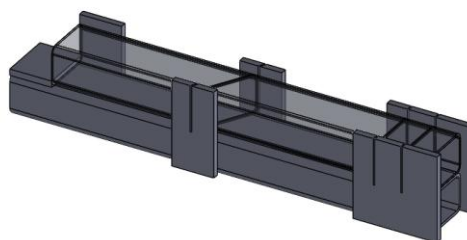
| Simulação Número | Numero de nós | Numero de elementos | Tamanho do elemento (m) | ns = Refinamento Solda (2^ns) | nf = Refinamento Furação (2^nf) | Deslocamento Máximo (mm) |
|---------------------|------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| 1 | 26771 | 14622 | 0,05 | 1 | 1 | 1,176 |
| 2 | 25919 | 14093 | 0,04 | 1 | 1 | 1,192 |
| 3 | 30999 | 17209 | 0,03 | 1 | 1 | 1,208 |
| 4 | 32506 | 17887 | 0,02 | 1 | 1 | 1,205 |
| 5 | 50144 | 28318 | 0,01 | 1 | 1 | 1,231 |
| 6 | 48118 | 27353 | 0,005 | 1 | 1 | 1,231 |
| 7 | 84275 | 51117 | 0,005 | 2 | 2 | 1,234 |
| 8 | 131771 | 77976 | 0,0025 | 2 | 2 | 1,238 |
| 9 | 278208 | 176164 | 0,0025 | 3 | 2 | 1,239 |
| 10 | 346578 | 219334 | 0,002 | 3 | 2 | 1,240 |

Fonte: Autor.

4.2 OS DISPOSITIVOS

O tipo de tubo para a fabricação dos corpos de prova, aço A-36 com 30 x 40 x 1,5 mm, foi utilizado para a confecção do dispositivo de corte para evitar variações de encaixe, visto que os tubos apresentaram planicidade em seu comprimento. Chapas com medias de 4,8 x 32 x 50 mm em SAE-1020 foram utilizadas para estabelecer os encostos dos corpos de prova. A Figura 39 apresenta o dispositivo fabricado.

Figura 39 – Dispositivo de corte.



Fonte: Autor.

O dispositivo de solda apresentou um encaixe dos corpos de prova com pouca variação, com oscilações na ordem de 0,1mm na medida de encaixe (40mm), não representando variações maiores que 0,1mm nos corpos de prova (foi considerado aceitável). Ele também foi elaborado com o mesmo tipo de tubo do corpo de prova para facilitar sua fabricação e diminuir variações de medida. O

mesmo tipo de chapa utilizado no dispositivo de corte foi utilizado no dispositivo de solda para fazer os encostos dos corpos de prova nele, e as medidas de encaixe e corpos de prova apresentaram as mesmas oscilações de medida que o dispositivo de corte (0,1mm). A Fotografia 1 e 2 apresentam o dispositivo de solda.

Fotografia 4 – Dispositivo de solda.



Fonte: Autor.

Fotografia 5 – Dispositivo de solda na mesa de solda.



Fonte: Autor.

No dispositivo de ensaio utilizamos chapas aço INOX para sua fabricação devido à solicitação que será submetida ao efetuar o ensaio. A resistência a tração do aço A-36 é de 400 MPa e limite de tensão de escoamento de 259 MPa, enquanto que o aço inox 304 é de 520 MPa e 220 MPa, respectivamente. (HALLIDAY, 2009). Devido aos 30% a mais na sua resistência, e mantendo os parâmetros de áreas semelhantes, admitiu-se que a falha ficasse no corpo de prova. O dispositivo fabricado é apresentado na Fotografia 03. Durante todo o ensaio não ocorreram falhas no dispositivo, apenas pontos de deformação.

Fotografia 6 – Dispositivo de ensaio com uma peça do método 01 encaixado no equipamento.



Fonte: Autor.

4.3 ENSAIO POR LÍQUIDOS PENETRANTES

A aplicação e avaliação de ensaio não destrutivo por líquidos penetrantes seguiu a norma ABNT NBR NM 334. Inicialmente limpou-se a peça para a aplicação do líquido penetrante. Essa limpeza foi feita em duas etapas. A primeira foi a utilização de um pano para limpeza grosseira, e a segunda foi a aplicação de álcool com 99,5% de pureza, juntamente com a aplicação do pano novamente, para retirar sujeiras e impurezas mais finas.

Em seguida aplicou-se o spray na região de solda dos corpos de prova. A Fotografia 7 apresenta os corpos de prova após a aplicação do líquido penetrante.

Fotografia 7 – Peças do método 02 cortadas.

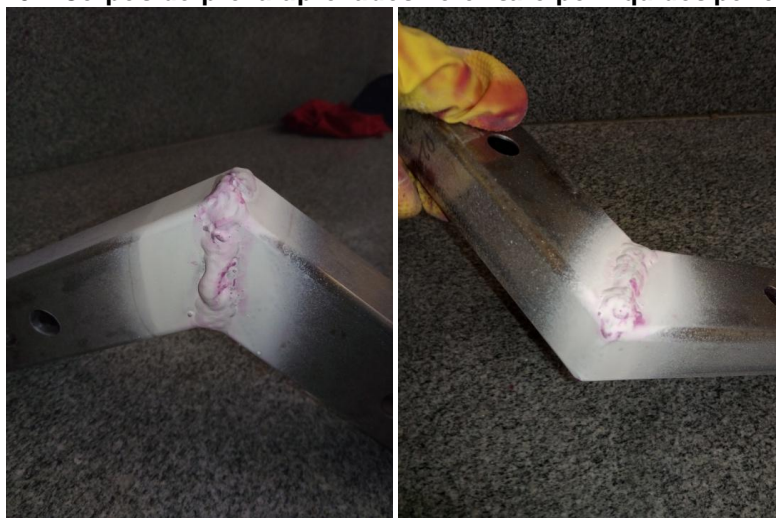


Fonte: Autor.

Após um intervalo de 15 minutos, aplicou-se o spray revelador, e em seguida aguardou-se um intervalo de 20 minutos para avaliar as peças. Os corpos de prova aprovados foram aqueles que apresentaram uma coloração branqueada e uniforme em toda a região da solda. Pontos levemente rosados foram considerados aceitáveis. Já os corpos de prova que apresentaram uma coloração roxa forte, em regiões bem definidas perto da solda, foram considerados reprovados.

A Figura 40 apresenta duas fotos de corpos de prova durante o ensaio. O corpo de prova 03 do método 01 não apresentou falha alguma, sem nenhum ponto de penetração do líquido penetrante. O mesmo ocorreu com o corpo de prova 02 do método 2, apresentando uma superfície branca devido ao produto revelador. Já o corpo de prova 05 do Método 2 apresentou falhas e penetrações do líquido (Fotografia 8). Houve mais 2 corpos de prova que apresentaram a mesma falha, M1-02 e M2_01.

Figura 40 – Corpos de prova aprovados no ensaio por líquidos penetrantes.



Fonte: Autor.

Fotografia 8 – Corpo de prova reprovado no ensaio por líquidos penetrantes.



Fonte: Autor.

O Quadro 4 apresenta os corpos de prova, com seus respectivos nomes e avaliações no ensaio por líquidos penetrantes.

Quadro 4 –Validação dos corpos de prova

| | | | | | | |
|------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Nome M1 | M01_01 | M01_02 | M01_03 | M01_04 | M01_05 | M01_06 |
| Val. | REPROV. | APROV. | APROV. | APROV. | APROV. | APROV. |
| Nome M2 | M02_01 | M02_02 | M02_03 | M02_04 | M02_05 | M02_06 |
| Val. | REPROV. | REPROV. | APROV. | APROV. | APROV. | APROV. |

Fonte: Autor.

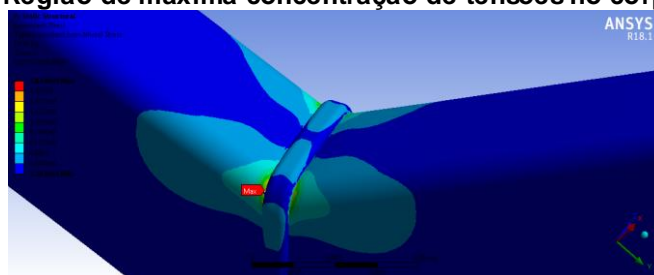
Os corpos de prova que foram considerados reprovados nesse ensaio foram ensaiados para comprovar que poderiam ser desconsiderados no estudo e não oferecer valores válidos.

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova foram encaixados no equipamento conforme fotografia 16. O equipamento gerou gráficos de Tensão por deformação para cada corpo de prova, de seu início de carregamento até a falha. Os gráficos completos estão nos Anexos C e D.

Em todos os corpos de prova a falha ocorreu na mesma região, na parte interna da junta, justamente a prevista pela simulação. A Figura 41 apresenta o resultado da simulação do método 01, com a concentração de tensões em cores variadas. A coloração azul apresenta as regiões com baixa tensão (por Von-Misses). Conforme a coloração fica mais clara a concentração de tensões aumenta. A região amarelada apresenta a região de alta concentração de tensões. A região de máxima concentração de tensões foi justamente a região amarelada. Os pontos de máxima e mínima tensões são indicadas pelos índices “máx” e “min”, em vermelho e azul, respectivamente. Comprovando os resultados da simulação, os ensaios apresentaram início de falha justamente nessas regiões.

Figura 41 – Região de máxima concentração de tensões no corpo de prova.



Fonte: Autor.

A figura 42 apresenta duas fotografias de corpos de prova após o ensaio de tração. A esquerda o corpo de prova M1-06, e a esquerda o M2-06. A região de início de falha foi a superfície raiada na parte interna à junta soldada, imediatamente após a solda (Zona Termicamente Afetada - ZTA). Todos os corpos de prova apresentaram falha na mesma região.

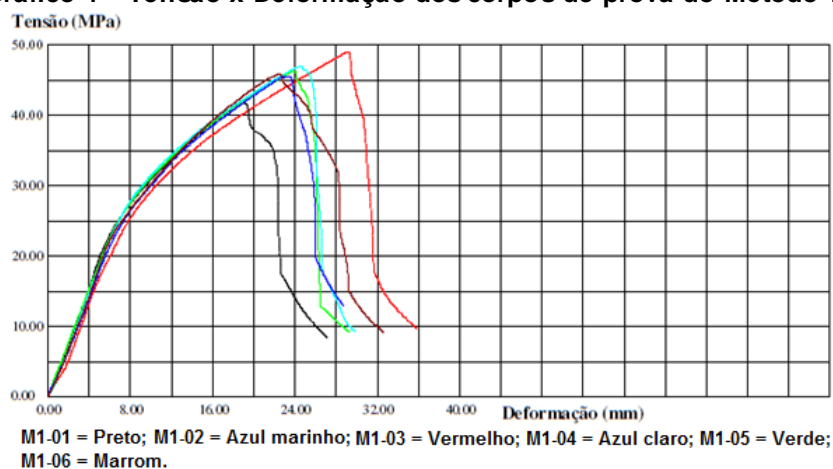
Figura 42 – Corpo de prova 6 do método 1 a esquerda, e corpo de prova 6 do método 2 a direita.



Fonte: Autor.

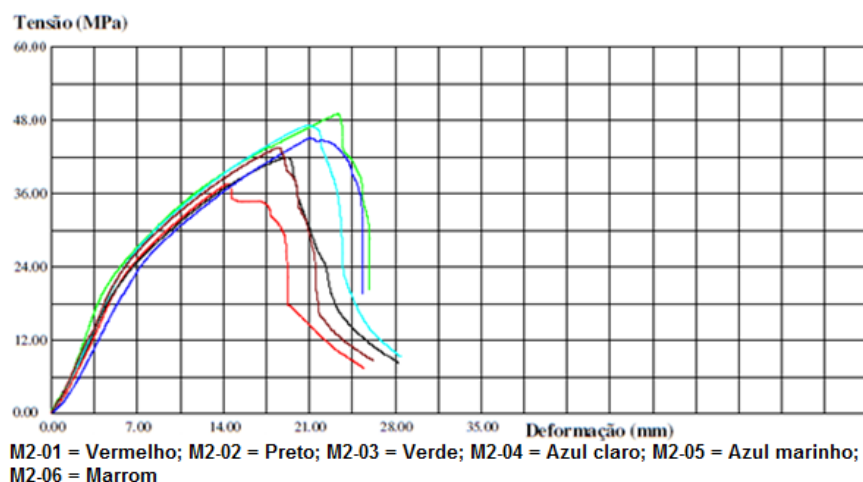
A máquina de ensaio de tração fornece um gráfico de tensão, em MPa, por deslocamento, em milímetros. Os gráficos simplificados dos corpos de prova analisados estão apresentados nos Gráficos 04 e 05, e os completos nos Anexos C e D. Nele cada corpo de prova tem uma coloração de linha. A indicação de cada corpo de prova está na parte inferior de cada gráfico.

Gráfico 4 – Tensão x Deformação dos corpos de prova do Método 1.



Fonte: Autor.

Gráfico 5 – Tensão x Deformação do corpos de prova do Método 2.

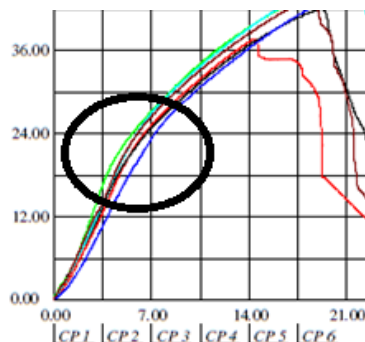


Fonte: Autor.

Pode ser observado que todas as curvas dos dois gráficos apresentaram uma forma semelhante.

No que se refere às curvas do ensaio de tração, percebe-se uma curvatura inicial, comum a todos os corpos de prova, como pode ser vista na indicação da Figura 43. Tal curvatura pode ser justificada pela imprecisão do dispositivo de ensaio, onde foi observado um ponto de flexão, gerado pelo contato do dispositivo com o tubo da junta, o que pode ter influenciado a resistência à deformação do perfil. Como não se pode afirmar o que gerou essa deflexão, a região elástica das juntas será considerada a região anterior a essa declinação.

Figura 43 – Indicação da declinação das curvas.



Fonte: Autor.

Todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração até sua falha. Isso é indicado pela inclinação verticalizada na parte final de cada gráfico.

A média da força máxima das amostras válidas do método 01 foi de 21.063 N, e do método 2 de 20.841 N, com desvio padrão de 560,76 N e 938,8 N, respectivamente. O desvio padrão do método 1 representa 2,66% do valor da média, e 4,5% no método 2. A diferença entre as forças máximas é:

$$Dif = F1_{media@max} - F2_{media@max}$$

$$Dif = 21063 - 20841$$

$$Dif = 222N$$

Em comparação com à média das forças máximas do método 01, $F1_{media@max}$, essa diferença representa 1,05%, e em relação à média das forças máximas do método 02, $F2_{media@max}$, essa diferença representa 1,06%. Ambas menores que os desvios padrão. Isso significa que a força máxima que os dois métodos resistem até a falha são tecnicamente iguais.

Analisando o comprimento de solda de cada método temos 153 mm para o método 01, e 123mm para o método 02. Então, a economia de comprimento de solda E_{solda} será:

$$E_{solda} = 1 - \frac{C_2}{C_1}$$

$$E_{solda} = 1 - \frac{123}{153}$$

$$E_{solda} = 19,6\%$$

Portanto, o método 2 economizará 19,6% de solda e tempo de solda.

Com isso temos que o Método 02 de fabricação de juntas metálicas soldadas, mesmo utilizando 19,6% de solda e tempo que o Método 01, possui mesma resistência mecânica quando tracionadas conforme indicado na Figura 31.

Para efetuar a fabricação dos corpos de prova e ensaiá-los, definiu-se o valor do comprimento do corpo como fixo (Medidas nos Anexos A e B), os resultados aqui presentes são pertinentes a ele. Porém, ao obter o valor de força máxima (média das forças máximas) que os corpos de prova foram submetidos, pode-se calcular o valor de momento fletor máximo que a junta suporta. Com isso, os valores obtidos nesse estudo podem ser estendidos para outras medidas, semelhantes em todos os quesitos, diferentes apenas no comprimento L da haste.

Assim, tem-se que o momento fletor máximo a se conservar será:

$$M = F * \sin \theta * L$$

Como o ângulo das amostras foi adotado como 120°, então $\theta = 30^\circ$. F é a média das forças máximas encontradas, sendo elas $F1_{\max} = 21.063 \text{ N}$ e $F2_{\max} = 20.841 \text{ N}$. L é o comprimento de cada haste dos corpos de prova, que é 165,5 mm. Com isso, calcula-se a expressão seguindo a sequência descrita:

$$M1 = F1_{\max} * \sin \theta * L$$

$$M2 = F2_{\max} * \sin \theta * L$$

Então,

$$M1 = 1743 \text{ Nm}$$

$$M2 = 1695 \text{ Nm}$$

Portanto, se a opção é a execução do mesmo estudo em uma amostra similar às do presente trabalho, porém, variando apenas o comprimento de haste, a força aplicada deverá obedecer ao momento máximo, calculado anteriormente.

O Anexo E apresenta as fotografias de cada corpo de prova dos Métodos 01 e 02.

A tensão nominal nos pontos A e B da Figura 21 são:

$$\sigma_{nom} = \frac{F * \cos \theta}{A} + \frac{M * C}{I}$$

Para o ponto A do Método 1, obtêm-se:

$$\begin{aligned}\sigma_{nom} M1_A &= \frac{F1_{max} * \cos \theta}{A} + \frac{M1 * C_A}{I} \\ \sigma_{nom} M1_A &= \frac{21063 * \cos 30^\circ}{276} \left[\frac{N}{mm^2} \right] + \frac{1743 * 23,5}{8,4385 * 10^{-8}} \left[\frac{Nm * mm}{m^4} \right] \\ \sigma_{nom} M1_A &= 66,09 \left[\frac{N}{mm^2} \right] + 48540 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \\ \sigma_{nom} M1_a &= 48606 \frac{N}{mm^2} = 48,70 \text{ GPa}\end{aligned}$$

Para o ponto B do Método 1, obtêm-se:

$$\begin{aligned}\sigma_{nom} M1_B &= \frac{F1_{max} * \cos \theta}{A} + \frac{M1 * C_B}{I} \\ \sigma_{nom} M1_B &= \frac{21063 * \cos 30^\circ}{276} \left[\frac{N}{mm^2} \right] + \frac{1743 * (-23,5)}{8,4385 * 10^{-8}} \left[\frac{Nm * mm}{m^4} \right] \\ \sigma_{nom} M1_B &= 66,09 \left[\frac{N}{mm^2} \right] - 48540 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \\ \sigma_{nom} M1_B &= -48474 \frac{N}{mm^2} = -48,47 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Como essa geometria das duas peças são iguais, os valores são os mesmos para o Método 2. O sinal negativo apresenta a natureza das tensões. Na região B temos tensões normais de tração, enquanto que na região A de compressão. Isso retifica o ocorrido nos corpos de prova, onde a região B rasgou-se, e em A comprimiu-se.

5 CONCLUSÕES

Concluí-se que na simulação por elementos finitos (MEF) consegue-se observar a concentração de tensões e identificar a região que ocorreu o início da falha, sendo ela na superfície raiada, na parte interna da junta, imediatamente após a solda, na zona termicamente afetada (ZTA).

Também se pode afirmar que os processos de fabricação forneceram corpos de prova homogêneos entre si pela similaridade dos gráficos resultantes dos ensaios. Essa homogeneidade também pode ser confirmada pelo perfeito encaixe dos corpos de prova no dispositivo de solda.

Ao submeter os corpos de prova ao ensaio de tração pode-se observar seu comportamento de acordo com o gráfico gerado. Nele temos a região elástica inicial, indicada pela curvatura próxima a uma reta, na parte esquerda do gráfico de cada método de fabricação. Pelo valor da força média das forças máximas de cada amostra, e pelos desvios padrão encontrados, pode-se afirmar que os dois processos de fabricação possuem a mesma resistência mecânica, quando submetidos a um carregamento igual ao ensaiado.

Comparando os dois processos, concluí-se que o processo de maior economia de materiais (solda, tempo de fabricação e corte) é o Método 02 que, conforme o desvio padrão indicou, os dois processos possuem a mesma resistência mecânica. Nele há uma economia de 19,6% de solda, corte e tempo.

6 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho se limitou a estudar apenas dois tipos de juntas tubulares soldadas, com geometrias simples, sofrendo carregamento estático, e sob tração, excluindo compressão, torção, vibração, impacto, fadiga, entre outros. Portanto os resultados aqui obtidos são muito particulares e específicos ao carregamento aplicado.

Pode-se ainda estudar diferentes geometrias de corte, sendo elas mais elaboradas e confeccionadas em equipamentos de maior precisão que serras manuais e automáticas, como por exemplo máquinas CNC de corte a laser de tubos. Esse tipo de máquina consegue elaborar cortes extremamente precisos e com velocidades elevadas. Geometrias mais elaboradas podem gerar encaixes das juntas de maneira mais prática, melhorando o processo.

Para o estudo dos métodos dos elementos finitos pode-se ainda estudar diferentes tipos de elementos de malha, e diferentes tipos de carregamento, alterando assim seus parâmetros, e podendo obter resultados totalmente diferentes.

Sobre a solda, pode-se estudar diferentes configurações da solda, com materiais de adição, velocidade de solda, aporte térmico e geometria diferentes.

7 REFERÊNCIAS

VILLANI MARQUES, Paulo. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. 3ª ed. Belo Horizonte. UFMG, 2011.

TIMINGS, Roger. **Fabrication and Welding Engineering**. 1st ed. London and New York. Routledge, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6591: Tubos de aço-carbono com solda longitudinal de seção circular, quadrada, retangular e especial para fins industriais - Especificação: referências**: 2ª ed., ABNT, 2008.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings**. AISC, 2016.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Structural Welding Code-Steel**, 22ªed. ANSI, 2010.

IMGRUND, M. C., **ANSYS Verification Manual**, Swanson Analysis System, 1992.

VAN VLACK, L. H., **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**, 6ª. ed. Rio de Janeiro, Campus, 1970.

LOGAN, Daryl L.. **A first course in the finite element method**. 5ªed. Cengage Learning, Stanford, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros fundidos**. 7ª ed., Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, USA, 1996.

BRENSING, Karl-Heinz; SOMMER, Baldur. **Steel Tube and Pipe Manufacturing Processes: Handbook**. Vol. 3 Berlin, 1939.

SWIFT, K.G.; BOOKER, J.D.. **Manufacturing Process Selection Handbook**. 1ªed., Butterworth-Heinemann, Waltham, 2013.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michéle. **Estrutura de Aço: Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008**. 8ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SINGH, U.K.; DWIVEDI, **Manish**. **Manufacturing Processes**. 2ª ed. New Age International, 2009.

TIMINGS, Roger. **Fabrication and Welding Engineering**. Newnes (Elsevier), Oxford, 2008.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 4ªed. United States of America, 2010.

ZHAN, Xiaohong; ZHANG, Dan; WEI, Yanhong; WANG, Yuhua. **Research on the microstructure and properties of laser.MIG hybrid welded joint of Invar alloy**. Elsevier, p. 124-136, june. 2017.

MA, Jia-Lin; CHAN, Tak-Ming; YOUNG, Bem. **Experimental investigation of cold-formed high strength steel tubular beams**. Elsevier, v. 1, p. 200-209, july. 2016.

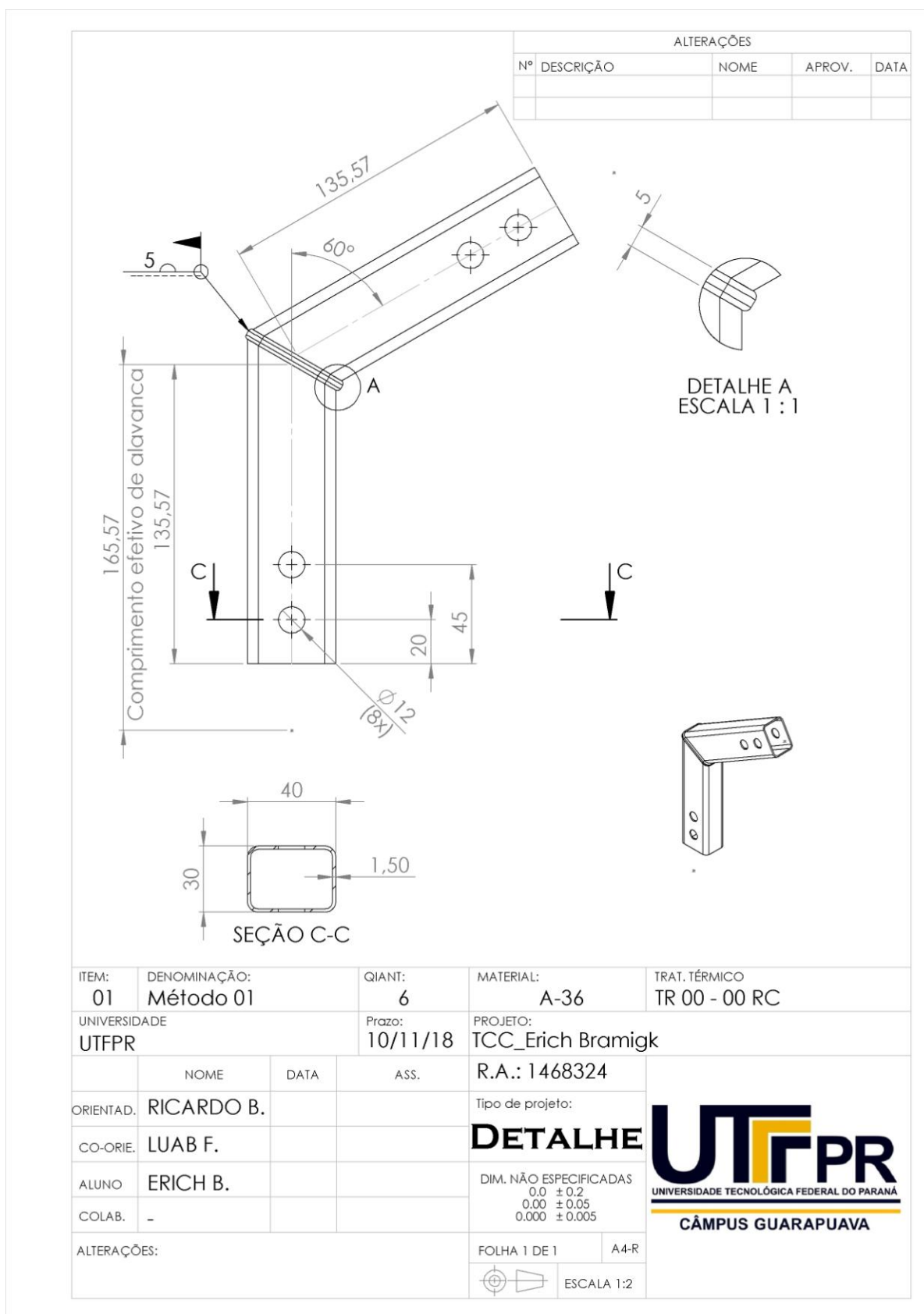
NI, Junyan; WAHAB, Magd Abdel. **A numerical kinematic model of welding process for low carbon steel**. Elsevier, p. 35-49, january. 2017.

Okerblom, N. O. **Estruturação - projeto tecnológico de estruturas soldadas**. Moscow-Leningrad, 1964.

R.C. Hibbeler, **Structural Analysis**, Quarta Edição, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1998.

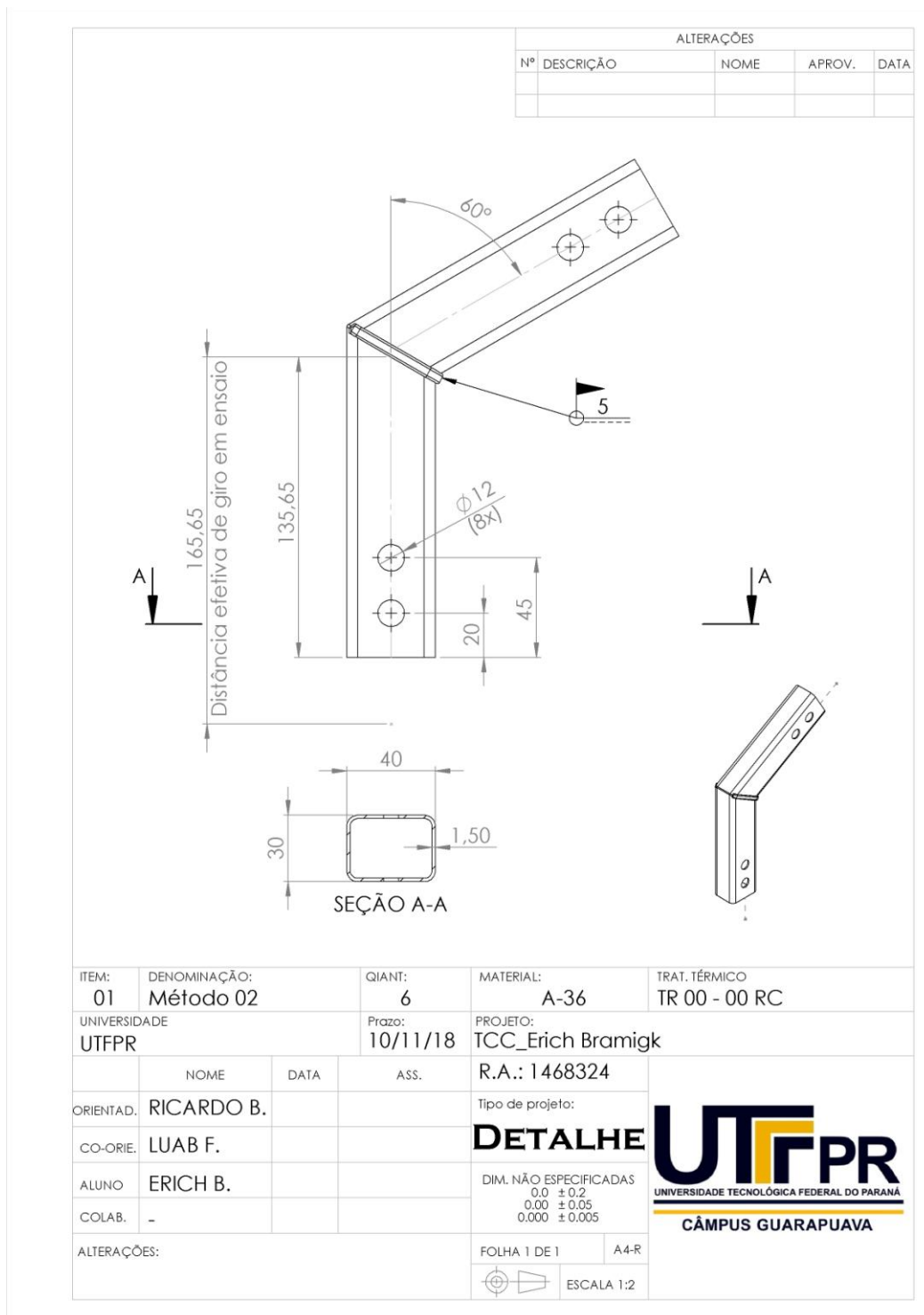
ANEXO A - Desenho detalhado do modelo do método 01

Figura 44 – Detalhe do desenho do método 01.



ANEXO B - Desenho detalhado do modelo do método 02

Figura 45 – Detalhe do desenho do método 02.



ANEXO C - Gráfico completo dos ensaios das amostras do Método 01

ANEXO D - Gráfico completo das amostras do Método 02

Figura 47 – Gráfico completo dos ensaios das amostras do método 02.

UTFPR - Campus Guarapuava

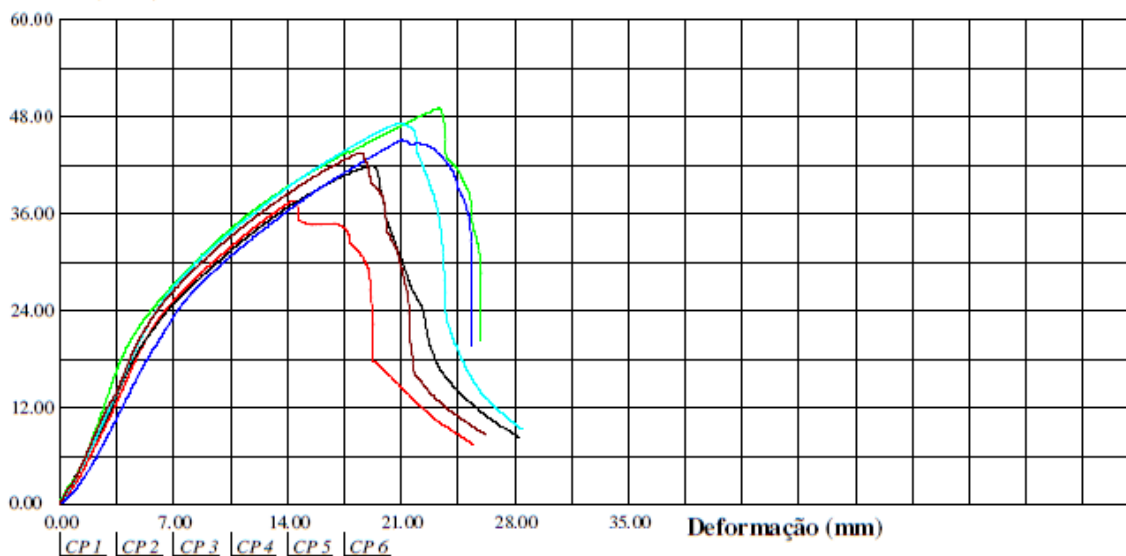
Laboratório de Ensaios Mecânicos

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 29** Extensômetro: - Data: **13/06/2018** Hora: **13:46:46** Trabalho n° **0697**
 Programa: **Tesc versão 4.00** Método de Ensaio: **11 - Tração metal - Retangular - Sem extensômetro**
 Ident. Amostra: >>>>>>>> Material: **TCC Erich Amostra Dobrada** Curso: **Eng. Mecânica** Professor: **Ricardo Biscaia**

| Corpo de Prova | Área/Seção (mm ²) | Força no Escoamento (kgf) | Força Máxima (N) | Módulo (MPa) | Tensão de Escoamento (MPa) | Tensão Máxima (MPa) | Alongamento Final (%) |
|----------------|-------------------------------|---------------------------|------------------|--------------|----------------------------|---------------------|-----------------------|
| CP 1 | 450.00 | 1281.33 | 16970.42 | 599.28 | 27.92 | 37.71 | 0.00 |
| CP 2 | 450.00 | 1413.46 | 18904.55 | 507.22 | 30.80 | 42.01 | 0.00 |
| CP 3 | 450.00 | 1634.56 | 22117.70 | 522.06 | 35.62 | 49.15 | 0.00 |
| CP 4 | 450.00 | 1571.64 | 21265.02 | 536.12 | 34.25 | 47.26 | 0.00 |
| CP 5 | 450.00 | 1508.34 | 20360.35 | 487.67 | 32.87 | 45.25 | 0.00 |
| CP 6 | 450.00 | 1459.80 | 19622.05 | 556.26 | 31.81 | 43.60 | 0.00 |
| Número CPs | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Média | 450.0 | 1478 | 19870 | 534.8 | 32.21 | 44.16 | 0.0000 |
| Mediana | 450.0 | 1484 | 19990 | 529.1 | 32.34 | 44.42 | 0.0000 |
| Desv. Padrão | 0.0000 | 124.4 | 1824 | 39.41 | 2.711 | 4.054 | 0.0000 |
| Coef. Var. (%) | 0.0000 | 8.416 | 9.179 | 7.369 | 8.416 | 9.179 | * |
| Mínimo | 450.0 | 1281 | 16970 | 487.7 | 27.92 | 37.71 | 0.0000 |
| Máximo | 450.0 | 1635 | 22120 | 599.3 | 35.62 | 49.15 | 0.0000 |

Tensão (MPa)



ANEXO E - Tabela dos processos de fabricação das amostras

Quadro 5 – Tabela dos processos de fabricação das amostras.

| MÉTODO | 1 | | | | 2 | | | | | | | |
|------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | P1.01 | P1.02 | P1.03 | P1.04 | P1.05 | P1.06 | P2.01 | P2.02 | P2.03 | P2.04 | P2.05 | P2.06 |
| AMOSTRA | SIM | | | | | | | | | | | |
| | CORTE | | | | | | | | | | | |
| | FURAÇÃO | | | | | | | | | | | |
| FABRICAÇÃO | SOLDA | | | | | | | | | | | |
| | TRACÇÃO | | | | | | | | | | | |
| | LÍQ. PEN. | | | | | | | | | | | |
| | TRACÇÃO | | | | | | | | | | | |

Fonte: Autor.