

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Igor Felipe Grzybowski

**MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS PELO
PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ATMOSFERA
GASOSA (GMAW) UTILIZANDO ONDAS LONGITUDINAIS
CRITICAMENTE REFRAATADAS (ONDAS L_{CR})**

Santa Maria, RS
2019

Igor Felipe Grzybowski

**MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO
DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ATMOSFERA GASOSA (GMAW)
UTILIZANDO ONDAS LONGITUDINAIS CRITICAMENTE REFRACTADAS
(ONDAS L_{CR})**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM),
como requisito parcial para a obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Alexandre Aparecido Buenos, Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2019

Igor Felipe Grzybowski

**MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO
DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ATMOSFERA GASOSA (GMAW)
UTILIZANDO ONDAS LONGITUDINAIS CRITICAMENTE REFRACTADAS
(ONDAS L_{CR})**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM),
como requisito parcial para a obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 13 de dezembro de 2019:

Prof. Alexandre Aparecido Buenos, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Inácio da Fontoura Limberger, Dr. Eng. (UFSM)

Prof. Cristiano José Scheuer, Dr. Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

RESUMO

MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ATMOSFERA GASOSA (GMAW) UTILIZANDO ONDAS LONGITUDINAIS CRITICAMENTE REFRAATADAS (ONDAS L_{CR})

AUTOR: Igor Felipe Grzybowski
ORIENTADOR: Alexandre Aparecido Buenos

A soldagem é um processo de fabricação largamente utilizado na indústria para a união permanente de peças metálicas. No entanto, esse processo pode gerar tensões residuais, prejudicando o desempenho mecânico do componente. Tensões residuais são carregamentos intrínsecos à fabricação da peça e conhecer o estado de tensão residual é essencial, pois o mesmo pode contribuir diretamente para a redução da vida útil do componente. Ensaio destrutivos e não destrutivos são realizados para a quantificação de tais tensões. Contudo, as abordagens destrutivas, ao contrário das não destrutivas, impossibilitam o uso do componente após o ensaio e, por isso, não são usadas em diversos casos, como em rodas ferroviárias, bombas, equipamentos nucleares e dutos de petróleo. Dentre os métodos não destrutivos encontra-se o método de medição de tensão com ultrassom utilizando ondas longitudinais criticamente refratadas (Ondas L_{CR}). Esse tipo de onda propaga-se ligeiramente abaixo da superfície do material e o tempo que a onda leva para percorrê-lo é influenciado pela presença de tensões no meio. Desse modo, com a variação do tempo de percurso da onda (TOF), é possível determinar a diferença de tensão por meio da teoria acustoelástica, que estuda a alteração da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas devido à presença de tensões em um determinado material. Nesse trabalho, foram ensaiadas amostras de aço carbono ASTM A36, muito usado em componentes estruturais. Todas as amostras possuem cordões de solda gerados com diferentes tensões de soldagem, velocidades de alimentação do arame e velocidades de soldagem e foram produzidas pelo processo a arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa (GMAW). Os resultados experimentais mostram perfis de tensão residual em função da distância transversal ao cordão de solda coerentes com a literatura, contribuindo para aumentar a confiabilidade do método. Além disso, verificou-se que os parâmetros de soldagem analisados influenciam diretamente na tensão residual máxima gerada na junta soldada. Essa influência é quantificada, possibilitando a escolha apropriada dos parâmetros de soldagem de modo a atenuar as tensões residuais geradas no processo.

Palavras-chave: Tensão residual. Métodos ultrassônicos. Ondas L_{CR} . Aço ASTM A36. Processo de soldagem GMAW.

ABSTRACT

STRESS MEASUREMENT IN JOINTS WELDED BY THE GAS METAL ARC WELDING (GMAW) PROCESS USING CRITICALLY REFRACTED LONGITUDINAL WAVES (L_{CR} WAVES)

AUTHOR: Igor Felipe Grzybowski
ADVISOR: Alexandre Aparecido Buenos

Welding is a manufacturing process widely used in industry to join metal parts permanently. However, the welding process may induce residual stresses, affecting the mechanical performance of the component negatively. Residual stresses are generated intrinsically by fabrication processes and it is very important to know the residual stress state since it can directly contribute to the reduction of the component life. Destructive and non-destructive tests are performed to quantify such stresses. Nevertheless, destructive approaches, unlike non-destructive ones, don't enable the components to be used after the test and consequently are not applied in many cases, such as railway wheels, pumps, nuclear equipment and oil pipelines. Among non-destructive methods is the ultrasonic stress measuring method using critically refracted longitudinal waves (L_{CR} waves). This type of wave propagates slightly below the surface of the material and the time it takes for the wave to travel through it is influenced by the presence of stresses in the medium. Thus, knowing the variation in time of flight (TOF) of the wave, it is possible to determine the stress difference through the acoustoelastic theory, which studies the change in the propagation velocity of ultrasonic waves due to the presence of stress in a specific material. In this paper, specimens of plain carbon steel ASTM A36, very used in structural components, were tested. All samples have weld beads generated using different welding voltages, wire feed speeds and welding speeds and produced by the gas metal arc welding (GMAW) process. The experimental results show residual stress profiles as a function of the transverse distance to the weld bead in accordance with the literature, contributing to increase the reliability of the method. In addition, it was concluded that the welding parameters analyzed have a significant influence on the maximum residual stress generated in the welded joint. This influence was quantified, enabling the appropriate selection of welding parameters in order to attenuate the residual stresses generated in the process.

Keywords: Residual stress. Ultrasonic methods. L_{CR} waves. ASTM A36 steel. Gas metal arc welding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva de repartição térmica e regiões de uma solda por fusão.....	15
Figura 2 - Metal de adição fundido depositado em uma junta soldada (a) e após ser resfriado (b).....	18
Figura 3 - Distribuição de tensões na direção transversal de um cordão de solda por fusão....	19
Figura 4 - Refração e reflexão causados pela incidência oblíqua de ondas sonoras.....	23
Figura 5 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no trabalho.....	26
Figura 6 - Dimensões em milímetros dos CPs.....	27
Figura 7 - Centro de usinagem ROMI D600.....	29
Figura 8 - Corpos de prova após a preparação para medição do TOF.....	30
Figura 9 - Esquema representativo do sistema ultrassônico completo.....	32
Figura 10 - Serra de fita, marca Franho, modelo FM 500.....	34
Figura 11 - Furadeira de bancada (a) e fresadora vertical (b).....	35
Figura 12 - Conjunto probe após fabricação e montagem.....	36
Figura 13 - Segundo cruzamento com a abcissa do primeiro trem de ondas.....	37
Figura 14 - Primeira tela do programa de aquisição de sinais em LabVIEW.....	37
Figura 15 - Segunda tela do programa de aquisição de sinais em LabVIEW.....	38
Figura 16 - Impressora Stratasys, modelo F170.....	39
Figura 17 - Gabarito de posicionamento para o conjunto probe.....	40
Figura 18 - Disposição dos elementos para as medições de TOF variando-se a temperatura. 41	
Figura 19 - Representação da distância de percurso da onda (d_t).....	43
Figura 20 - Distância de percurso da onda (d_t), em mm.....	44
Figura 21 - Sentido de medição do TOF nos CPs.....	45
Figura 22 - Influência do TOF em função da temperatura.....	47
Figura 23 - Diferença de profundidade de usinagem no CP 14.....	48
Figura 24 - Diferença de TOF em função da diferença na profundidade de usinagem.....	49
Figura 25 - Correção do TOF em função da diferença de profundidade de usinagem.....	50
Figura 26 - Perfil de tensão residual dos CPs 1 e 2.....	51
Figura 27 - Mordedura no cordão de solda do CP 6.....	52
Figura 28 - Perfil de tensão residual dos CPs 5 e 6.....	52
Figura 29 - Perfil de tensão residual dos CPs 7 e 8.....	54
Figura 30 - Perfil de tensão residual dos CPs 9 e 10.....	55
Figura 31 - Perfil de tensão residual dos CPs 11 e 12.....	56
Figura 32 - Perfil de tensão residual dos CPs 13 e 14.....	57
Figura 33 - Perfil de tensão residual dos CPs 15 e 16.....	58
Figura 34 - Perfil de tensão residual dos CPs 17 e 18.....	59
Figura 35 - Superfície de resposta e gráfico de contorno da tensão pela TS e VA.....	60
Figura 36 - Superfície de resposta e gráfico de contorno da tensão pela TS e VA.....	61
Figura 37 - Superfície de resposta e gráfico de contorno da tensão pela VA e VS.....	62
Figura 38- Conjunto probe completo e seus elementos.....	67
Figura 39 - Desenhos do peso morto, barra rosqueada e porca alta sextavada com dimensões em mm.....	68
Figura 40 - Régua e gabarito de posicionamento com dimensões em mm.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem dos cordões de solda dos CPs.....	27
Tabela 2 - Propriedades e composição química do aço ASTM A36.....	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	Associação Americana de Soldagem (<i>American Welding Society</i>)
CP	Corpo de prova
CT	Centro de Tecnologia
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
IRR	<i>Infinite Impulse Response</i>
L _{CR}	(Ondas) Longitudinais Criticamente Refratadas
MAG	Soldagem com atmosfera protetora de gás ativo (<i>Metal Active Gas</i>)
MIG	Soldagem com atmosfera protetora de gás inerte (<i>Metal Inert Gas</i>)
NAFA	Núcleo de Automação e Processos de Fabricação
TOF	Tempo de percurso (<i>Time of Flight</i>)
TS	Tensão de soldagem
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VA	Velocidade de alimentação do arame
VGA	<i>Video Graphics Array</i>
VS	Velocidade de soldagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM.....	14
2.1.1	Processo de soldagem GMAW.....	15
2.1	TENSÕES RESIDUAIS.....	17
2.2.1	Tensões residuais em soldas.....	18
2.2	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS.....	20
2.3	MEDIÇÃO DE TENSÃO POR ULTRASSOM.....	21
2.3.1	Efeito Piezoelétrico.....	23
2.3.2	Teoria Acustoelástica.....	24
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	PLANEJAMENTO.....	26
3.2	CORPOS DE PROVA.....	27
3.2.1	Fabricação.....	27
3.2.2	Material.....	28
3.3	PREPARAÇÃO DOS CPS PARA MEDIÇÃO DO TOF.....	29
3.4	SISTEMA PARA MEDIÇÃO DO TOF UTILIZANDO ONDAS L_{CR}	30
3.4.1	Fabricação.....	33
3.5	MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO TOF DAS ONDAS L_{CR}	36
3.6	PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	37
3.7	GABARITO DE POSICIONAMENTO.....	39
3.8	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TOF DAS ONDAS L_{CR}	40
3.9	CÁLCULO DA TENSÃO A PARTIR DO TOF.....	42
3.10	MEDIÇÕES DO TOF NOS CORPOS DE PROVA.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1	RESULTADO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TOF.....	47
4.2	CORREÇÃO DO TOF EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE USINAGEM.....	48
4.2	RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE TENSÃO RESIDUAL.....	51
4.3	INFLUENCIA DOS PARAMETROS DE SOLDAGEM NA TENSÃO RESIDUAL.....	59
5	CONCLUSÕES E SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63

REFERÊNCIAS.....	65
APÊNDICE A – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO CONJUNTO PROBE.....	67
APÊNDICE B – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO GABARITO DE POSICIONAMENTO DA PROBE.....	69

1 INTRODUÇÃO

Conhecer o estado de tensão presente em um determinado componente estrutural é essencial na engenharia, pois carregamentos externos ou intrínsecos à fabricação da peça contribuem diretamente para a redução da vida útil do componente. As tensões podem ser classificadas em tensões residuais ou aplicadas. Tensões residuais surgem em função da exposição do material à processos térmicos e mecânicos, normalmente ligados aos processos de fabricação da peça, e se sobrepõem às tensões aplicadas.

Quando se trata do processo de soldagem, tensões residuais aparecem mesmo após a elaboração de um plano de soldagem adequado, devido ao surgimento de irregularidades e variações dos parâmetros de soldagem. Além disso, a soldagem é um processo de união permanente dos materiais largamente utilizado na indústria por possuir baixo custo e alta confiabilidade, comparando com outros métodos de união. Com isso, e considerando que a região soldada é uma região altamente suscetível a falhas na estrutura, torna-se necessário aprimorar as técnicas de inspeção de soldas, bem como conhecer a influência de diferentes metodologias de soldagem nas propriedades mecânicas da peça soldada. Também, é importante quantificar o estado de tensões residuais em juntas soldada, evitando falhas inesperadas em materiais.

Muitas vezes, por questões de custo e tempo, torna-se necessário a utilização de ensaios não destrutivos, que não danificam o componente durante as medições. É o caso de oleodutos, gasodutos, rodas ferroviárias, reatores nucleares, aeronaves, entre outros. Descrito em mais detalhes no segundo capítulo, o método ultrassônico utilizando ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas L_{CR}) é uma alternativa não destrutiva que apresenta diversas vantagens em relação a outros métodos. Esse método permite a medição de tensão residual e aplicada, por meio da diferença no tempo de percurso (TOF) do feixe de ondas ultrassônico, que se propaga ligeiramente abaixo da superfície do componente, provocada pela diferença de tensão no material analisado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desse trabalho é determinar a tensão residual em cordões de solda de chapas de aço ASTM A36, depositados pelo processo de soldagem a arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa (GMAW) e com diferentes parâmetros de soldagem. Para a determinação da tensão residual será utilizado um método ultrassônico que emprega ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas L_{CR}).

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Estudar o método a ser utilizado e o surgimento de tensão residual em uniões soldadas;
- b) Adaptar um programa existente de aquisição de sinais, cuja função principal é permitir a visualização do TOF nos corpos de prova (CPs), para que seja compatível com os equipamentos utilizados no presente trabalho;
- c) Realizar a montagem e verificar o funcionamento do sistema ultrassônico como um todo;
- d) Preparar os CPs para que as medições possam ser realizadas adequadamente;
- e) Confeccionar um gabarito de posicionamento para garantir a uniformidade das medições;
- f) Confeccionar um conjunto, chamado de peso morto, para ser fixado no conjunto probe, que também serve para garantir a uniformidade das medições;
- g) Realizar medições de TOF nos CPs e convertê-lo em tensão, obtendo-se perfis de tensão residual no sentido transversal ao cordão de solda;

- h) Verificar a influência dos parâmetros de soldagem.

1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa para esse trabalho é sua contribuição no aprimoramento e no aumento da confiabilidade do método ultrassônico proposto ao serem realizadas diversas medições em diferentes cordões de solda e comparando-as com a bibliografia existente. Além disso, o trabalho se propõe a contribuir para o aumento do conhecimento sobre a influência dos parâmetros de soldagem na tensão residual gerada na solda. Também, o sistema ultrassônico é fabricado, montado, testado e deixado pronto para uso, para que alunos, que tenham interesse no tema, possam realizar outros trabalhos acadêmicos com o sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos relacionados ao processo de soldagem, bem como as tensões residuais geradas no processo e os métodos para medição de tensões residuais com foco no método ultrassônico.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

Soldagem é um processo de fabricação de união permanente de uma ou mais peças, com ou sem a aplicação de pressão e/ou a utilização de material de adição. A união ocorre pela aproximação dos átomos até a formação de ligações químicas, particularmente ligações metálicas e de Van der Waals (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

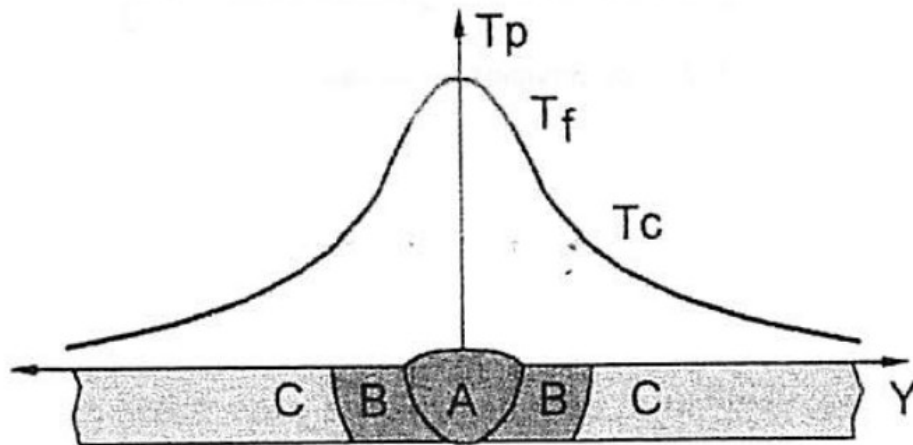
O processo de soldagem é muito utilizado industrialmente, proporcionando a montagem rápida de conjuntos com segurança e economia de material, além de ser um processo muito versátil com relação às espessuras e aos tipos de ligas metálicas que podem ser unidos. Além disso, esse processo pode ser utilizado no chão de fábrica, em condições de trabalho bem controladas ou em diferentes ambientes, até mesmo debaixo d'água. No entanto, a soldagem apresenta algumas limitações relevantes: não pode ser utilizada em juntas que precisam ser desmontadas e, na região da junta, pode ocorrer o aparecimento de distorções, tensões residuais e descontinuidades, prejudicando o desempenho mecânicos dos componentes soldados e contribuindo para sua falha prematura (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2011), as soldas por fusão possuem três regiões macroestruturais básicas:

- Zona Fundida (ZF): região onde a temperatura chega a valores superiores à temperatura de fusão do material. No caso da utilização de eletrodo consumível, o metal de adição atinge temperaturas acima de 2.000 °C, no caso de aços, e é fundido formando gotas que são misturadas ao metal de base fundido. Na parte superior da poça de fusão vai iniciando o processo de solidificação do material líquido, que dá origem ao cordão de solda e influencia diretamente nas propriedades macro e microestruturais da solda.
- Zona Termicamente Afetada (ZTA): região onde a temperatura atinge valores suficientes para alterar a microestrutura e/ou propriedades do metal de base, porém inferiores ao ponto de fusão do material.
- Metal de base (MB): região não afetada pelo processo de soldagem.

A Figura 1 mostra a localização da Zona Fundida (A), da Zona Termicamente Afetada (B) e do Metal de Base (C).

Figura 1 - Curva de repartição térmica e regiões de uma solda por fusão



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

2.1.1 Processo de soldagem GMAW

O processo de soldagem a arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa (GMAW) se refere ao processo que usa um arco elétrico como fonte de calor estabelecido entre a

extremidade de um arame-eletrodo consumível e a peça a ser soldada. Nesse caso, a proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte ou ativo. Esse processo pode ser encontrado na literatura pela nomenclatura MIG/MAG, advinda do inglês, onde MIG (*Metal Inert Gas*) significa que o processo utiliza uma atmosfera de proteção por gás, ou mistura, inerte, e MAG (*Metal Active Gas*) quer dizer que a proteção é feita por um ou mais gases ativos com gases inertes ou CO₂ puro. A Associação Americana de Soldagem (AWS) utiliza a sigla GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), que é usada nesse trabalho, para se referir ao uso de qualquer tipo de gás de proteção durante o processo de soldagem (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

No processo GMAW, os gases de proteção têm a função de evitar a contaminação do arame, do metal fundido em transferência e da poça de fusão, além de interferirem na estabilidade do arco e na geometria e propriedades mecânicas da solda. Os gases de proteção podem ser classificados como inertes ou ativos. Os gases inertes não reagem quimicamente com o metal de solda, sendo o Ar e o He os mais usados comercialmente. Por outro lado, os gases ativos são aqueles que possuem reatividade química com a solda e são compostos por gases puros ou em combinação com gases inertes, de modo que os mais utilizados comercialmente são o CO₂ e o O₂ (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

O arame possui a função de condutor elétrico a partir do ponto de contato elétrico (bico de contato) até o metal de base, por isso também pode ser designado por eletrodo ou arame-eletrodo. Os arames podem ter diversas composições químicas de acordo com a aplicação e são fornecidos em carretéis para garantir uma alimentação contínua do material de adição no processo GMAW (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), as principais limitações do processo GMAW são a dificuldade de manuseio do equipamento pela alta emissão de calor e luz, e a dificuldade de regulagem dos parâmetros para se trabalhar com estabilidade. No entanto, ao ser comparado com outros processos de soldagem, o processo GMAW apresenta boa produtividade e alta capacidade de produção por permitir:

- A relativamente alta taxa de fusão do arame;
- A variação dos modos de transferência metálica e a soldagem em diversas posições;
- A obtenção de um arco elétrico concentrado e de alto poder de fusão do metal de base pela utilização de diâmetros pequenos de arame;

- O uso de uma alta densidade de corrente devido ao pequeno comprimento do eletrodo (normalmente, de 8 a 25 mm);
- Aumentar o ciclo de trabalho pelo fato da alimentação ser contínua;
- A geração de poucos fumos e pouca escória comparando com processos que usam escória como meio de proteção.

O modo de transferência do metal fundido da ponta do eletrodo consumível à poça de fusão é muito importante no processo de soldagem GMAW, pois interfere diretamente na estabilidade do arco, nível de respingos, quantidade de gases absorvida pelo metal de adição, entre outras características do processo (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Uma das formas de transferência metálica é a transferência por curto-circuito, que acontece quando uma gota se forma na extremidade do arame e vai aumentando até tocar na poça de fusão. Esse tipo de transferência ocorre quando se usam baixos valores de tensão e corrente de soldagem. Já quando se utilizam valores intermediários de corrente e tensão, ocorre a transferência globular, que resulta em um arco mais estável, contudo, resulta também em uma transferência mais imprevisível e caótica, comparando com o modo de transferência por curto-circuito. Por outro lado, ao serem usados valores relativamente altos de corrente e tensão, ocorre a chamada transferência goticular projetada, caracterizada pela elevada estabilidade do arco, por gerar poucos respingos, por apresentar alta taxa de deposição, bom aspecto superficial, entre outras qualidades, tornando-a a transferência mais desejada (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

2.1 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais permanecem na peça mesmo após a remoção das solicitações externas. A ocorrência de deformações plásticas ou elásticas não uniformes é um exemplo de uma das principais causas do seu aparecimento (RUUD, 2002; SUE; SCHAJER, 2002).

As tensões residuais podem ser compressivas ou trativas, sendo que as tensões compressivas são geralmente mais favoráveis pois aumentam as propriedades mecânicas em geral. No entanto, a soma das forças resultantes dessas tensões deve ser nula. Isso significa

que tensões de tração devem ser contrabalanceadas por tensões de compressão para garantir o equilíbrio.

As tensões residuais podem ser classificadas em três tipos:

- a) Macroscópicas: são dispersas de modo homogêneo ao longo de todas as áreas macroscópicas, agindo sobre vários grãos do material. Também podem ser chamadas de tensões de primeira ordem.
- b) Microscópicas: estão presentes homogeneamente em regiões microscópicas, localizadas em um grão ou parte de um grão. Podem ser chamadas de tensões de segunda ordem e microestruturais.
- c) Submicroscópicas ou Micro localizadas: são encontradas de forma não-homogênea em distâncias a nível atômico, em uma pequena parte do grão.

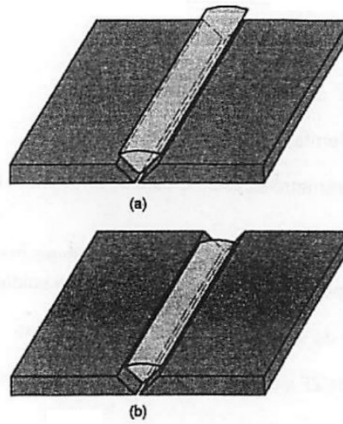
Tensões residuais macroscópicas normalmente são os tipos que mais despertam a atenção em casos práticos de engenharia devido ao fato de afetarem diretamente no desempenho da peça. As tensões microscópicas e micro localizadas são mais estudadas no ramo da ciência dos materiais (SUE E SCHAJER, 2002).

2.2.1 Tensões residuais em soldas

As operações de soldagem por fusão envolvem o aquecimento localizado na região a ser unida, causando o aparecimento de deformações plásticas e elásticas na região da solda durante a solidificação e resultando no desenvolvimento de tensões residuais na junta. A presença de tensões residuais em soldas (especialmente tensões de tração) podem ter um efeito negativo em seu desempenho à fadiga e é um dos motivos que contribuem para a falha por fratura frágil e para a formação de trincas na união soldada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011), durante o processo de soldagem com eletrodo consumível, o metal de adição, quando aquecido e fundido, é depositado na junta e ocupa um determinado volume, como mostra Figura 2-a. Essa mesma quantidade de material ocupa um volume inferior ao anterior quando se solidifica e atinge a temperatura ambiente, conforme a Figura 2-b.

Figura 2 - Metal de adição fundido depositado em uma junta soldada (a) e após ser resfriado (b)

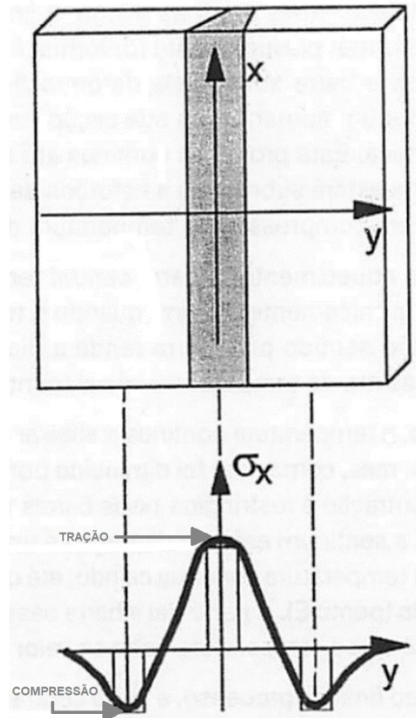


Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Contudo, foram formadas ligações a nível atômico durante o processo e, por isso, o volume ocupado é igual ao inicial, porém o material se encontra intensamente tensionado e deformado, justificando o surgimento de tensões residuais.

A região do cordão de solda é aquecida pela fonte de calor durante o processo de soldagem. Por causa desse aquecimento, essa região tende a se dilatar, mas será barrada pelas regiões vizinhas que se encontram a temperaturas mais baixas. Por não poder se expandir, irão surgir tensões de compressão na região do cordão que atingem facilmente valores próximos ao limite de escoamento do material devido as altas temperaturas. Em regiões próximas ao cordão, surgem tensões de tração. Quando o processo chega ao fim, a região do cordão atinge a temperatura ambiente com uma área menor que as a área das regiões vizinhas, pois se deformou plasticamente. Como essas regiões são unidas, formam-se tensões residuais trativas na região do cordão (ZF) com magnitudes tão altas quanto o limite de escoamento do material. Já a zona adjacente ao cordão (ZTA) terá tensões compressivas para manter o equilíbrio de forças. A Figura 3 mostra a distribuição de tensões longitudinais de uma solda de topo por fusão ao longo da direção transversal ao cordão de solda.

Figura 3 - Distribuição de tensões na direção transversal de um cordão de solda por fusão



Fonte: Adaptado de Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Além de serem geradas por diferentes níveis de deformação que ocorrem na junta durante a solidificação e resfriamento, as tensões residuais também podem ser geradas por transformações de fases.

2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Os métodos de medição de tensões residuais podem ser divididos em métodos destrutivos, semidestrutivos e não-destrutivos. Os métodos destrutivos são baseados na remoção ou seccionamento do material em análise, de modo a criar uma nova configuração interna, gerando um alívio localizado das tensões residuais. A deformação causada pelo alívio das tensões é medida e as tensões são calculadas pela teoria da elasticidade (RUUD, 2002). Os métodos destrutivos não são aplicados em rodas ferroviárias, bombas, equipamentos nucleares e dutos de petróleo, por exemplo (SANTOS, 2007).

Nesse contexto, a técnica de remoção de camadas é uma das mais utilizadas. Conforme Ekmekçi *et al* (2004), geralmente através da usinagem eletroquímica, camadas do material são removidas, causando um desequilíbrio das forças e momentos e fazendo com que

o material se deforme para reestabelecer o equilíbrio interno. O valor da deformação é medido e relacionado com o valor da tensão, sabendo que a peça possui um determinado perfil de distribuição de tensões ao longo da espessura. Existe ainda a técnica de seccionamento, similar ao método de remoção de camadas. Nesse processo, a peça é seccionada em uma ou mais regiões, permitindo o relaxamento das tensões e a deformação da superfície. A deflexão e a deformação são medidas com extensômetros (SOARES, 2003).

Nos métodos semidestrutivos é realizado um pequeno dano na peça ou amostra. Entretanto, muitas vezes esse dano é insignificante para a funcionalidade da peça ou pode ser reparado após a medição. Apesar disso, existem controvérsias quanto aos riscos em reutilizar a peça estudada. Essas técnicas incluem a execução de pequenos furos ou anéis na superfície da amostra. Entre os dois principais métodos desse grupo, está o método *Hole Drilling* ou furo cego, que consiste na usinagem de um pequeno furo através de uma furação superficial. Um extensômetro mede a deformação causada pelo alívio das tensões na região próxima ao furo. O segundo método é chamado de *Ring Core*, que é semelhante ao método anterior, sendo que a diferença é o fato da região livre de tensão ser um anel raso (RUUD, 2002).

Até então, os métodos semidestrutivos e destrutivos se baseiam na medição da deformação causada pela remoção de material, que perturba o campo de tensão residual. Por outro lado, os processos não-destrutivos realizam medição no nível da estrutura cristalina do material e não afetam o campo de tensão residual. A deformação na estrutura atômica, causada pela aplicação de uma determinada tensão, é diretamente medida pelos processos não-destrutivos (RUUD, 2002).

Conforme Ruud (2002), mudanças no espaçamento interplanar da estrutura cristalina podem ser usadas para detectar deformações elásticas pela Equação da lei de Bragg, sabendo-se o comprimento de onda e o ângulo de incidência de um determinado tipo de onda. Por exemplo, ao aplicar um feixe de raios-X, utilizando a técnica de difração, é possível medir as mudanças no espaçamento dos planos cristalinos. No entanto, a técnica de difração de raios-X não permite medições de tensão ao longo da espessura do componente pois a penetração dos raios não ultrapassa alguns Angstroms (Å). Além disso, existem grandes dificuldades para sua utilização em campo pelo alto custo dos equipamentos, associado à segurança no uso dos instrumentos. Apesar das limitações, o método de difração de raios-X é o mais utilizado para medições de tensões (ANDRINO, 2003).

Outra técnica utilizada é a difração de nêutrons. Esse procedimento utiliza os mesmos princípios da difração de raios-X, porém permite uma leitura de profundidades maiores. Nesse caso, a amostra deve ser levada a um reator nuclear, equipamento usado como fonte de nêutrons, o que torna sua aplicação em campo inviável. No processo, o tempo de medição por peça leva em torno de uma hora e os custos associados são relativamente altos (RUUD, 2002).

A técnica de ruído de Barkhausen é outro processo que tem sido bastante explorado na literatura. Nesse método, são utilizados materiais ferromagnéticos que possuem regiões microscópicas magneticamente ordenadas, chamadas de domínios. Quando tensões são aplicadas aos materiais ferromagnéticos, as estruturas de domínio sofrem modificações magnéticas, que causam mudanças na magnetização e nas dimensões da amostra. Essas mudanças, por sua vez, geram pulsos elétricos, formando um sinal chamado de ruído de Barkhausen. A necessidade do material ser ferromagnético, a baixa profundidade de medição e a pequena faixa de medição de tensão (cerca de 5,6 MPa) são algumas das principais limitações do método (RUUD, 2002).

Outro modo de realizar medições de tensões é por meio de ondas ultrassônicas. Isso porque, de acordo com a teoria acustoelástica, a presença de tensões internas no meio de propagação influencia na velocidade de propagação de uma onda ultrassônica. O método de medição de tensão por ultrassom será explicado em mais detalhes na Seção 2.3.

2.3 MEDIÇÃO DE TENSÃO POR ULTRASSOM

O ultrassom é uma onda vibracional que se propaga em sólidos, líquidos e gases em frequências acima da faixa auditiva dos seres humano, isto é, acima de 15 kHz. No entanto, o alcance auditivo de uma criança ou jovem pode chegar a 20 kHz, por isso, o limite superior de frequência para a faixa de ondas ultrassônicas varia na literatura. Em aplicações industriais, a frequência utilizada é em torno de 20 kHz (ENSMINGER E BOND, 2011).

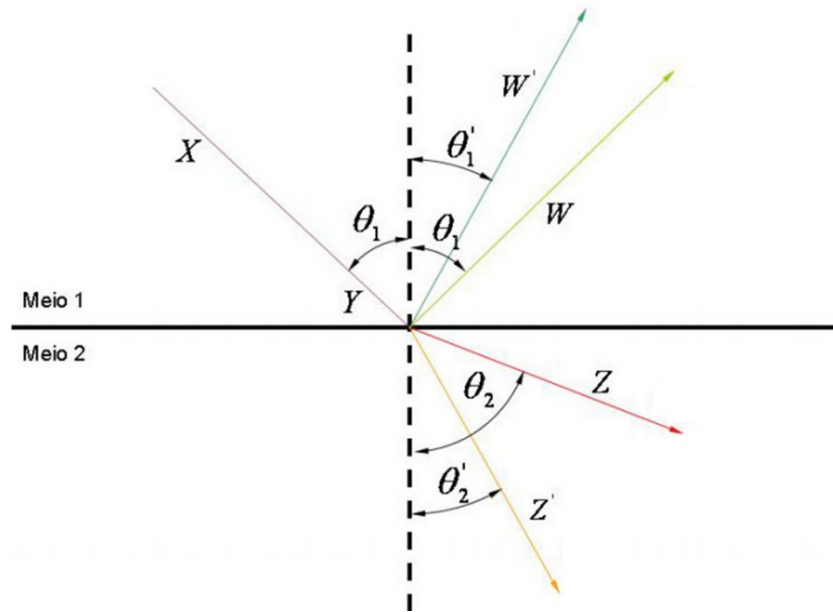
Segundo Ensminger e Bond (2011), a velocidade do som depende da natureza da perturbação, isto é, do tipo de movimento oscilatório que a perturbação produz. A taxa de propagação depende do tipo de onda, da frequência e amplitude da onda, das propriedades elásticas e da densidade do meio. Um meio sólido tem a capacidade de transmitir diversos

tipos de ondas. Ondas longitudinais, ondas transversais, ondas de superfície, ondas Lamb e ondas L_{CR} são os tipos mais comuns de ondas em aplicações com o ultrassom.

As ondas longitudinais criticamente refratadas (ondas L_{CR}) são geradas por ondas longitudinais incidentes a um primeiro ângulo crítico e se propagam sob a superfície da amostra, podendo detectar as características da superfície por meio das propriedades da onda, elasticidade do material e outros efeitos. Ao contrário das Ondas Rayleigh, que são muito sensíveis à rugosidade superficial da peça, as ondas L_{CR} viajam ligeiramente abaixo da superfície do material a uma velocidade longitudinal, sendo mais sensíveis ao campo de tensão em uma espessura finita e não somente na superfície (CHAKI; KE; DEMOUVEAU, 2012). As ondas criticamente refratadas podem ser nomeadas em inglês como *subsurface longitudinal waves*, *head waves*, *lateral waves* e *creeping waves*.

Conforme Fraga (2007) e Pei e Bond (2015), na geração de ondas L_{CR} , considera-se uma onda ultrassônica propagando-se de um meio 1 para um meio 2. Nesse caso, os fenômenos da reflexão e refração irão ocorrer. Para que ocorra a geração de ondas refratadas paralelas à superfície do meio 2 utiliza-se um transdutor em posição oblíqua em relação à superfície da peça, com uma inclinação que deve ser próxima ao valor do primeiro ângulo crítico. A Figura 4 mostra um feixe oblíquo (XY) de ondas longitudinais incidindo na superfície de separação entre dois meios. Uma parte das ondas incidente é refratada, apresentando ondas longitudinais (YZ) e transversais (YZ'). Outra parcela é refletida no meio 1, gerando ondas longitudinais (YW) e transversais (YW').

Figura 4 - Refração e reflexão causados pela incidência oblíqua de ondas sonoras



Fonte: Adaptado de Fraga (2007).

Segundo Pei e Bond (2015), os ângulos seguem a lei de Snell, conforme a Equação 1.

$$\frac{c_1}{\text{sen}\theta_1} = \frac{c_2}{\text{sen}\theta_2} \quad (1)$$

Onde c_1 e c_2 são as velocidades de onda no meio 1 e no meio 2, respectivamente. Já que o feixe de ondas L_{CR} deve se propagar o mais próximo possível da interface, utiliza-se $\theta_2 = 90^\circ$ na Equação 1. Logo, o primeiro ângulo crítico, ou seja, o ângulo de incidência necessário para a geração de ondas L_{CR} pode ser calculado através da Equação 2.

$$\theta_{cr} = \text{sen}^{-1}\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (2)$$

2.3.1 Efeito Piezoelétrico

Conforme Ensminger e Bond (2011), um transdutor é um dispositivo que converte energia de uma forma para outra. Em ultrassom, as conversões mais comuns são de energia elétrica para ultrassônica (emissor) ou de energia ultrassônica para elétrica (receptor). Os transdutores mais comuns utilizam princípios piezelétricos ou eletromagnéticos.

Em transdutores piezelétricos, o componente principal é o elemento piezelétrico, responsável pela emissão e recepção da onda ultrassônica em diversos níveis de frequência pelo efeito piezelétrico. Esse efeito foi descoberto em 1880 por Pierre e Jacques Currie. Quando um material piezelétrico sofre uma deformação mecânica, surgem cargas elétricas de polaridades contrárias nas faces desse material. Uma face terá cargas positivas e, a outra, cargas negativas. Em um transdutor receptor, ondas propagando-se em um meio entram em contato com o elemento piezelétrico, fazendo com que ele se deforme, gerando cargas elétricas conforme a frequência e amplitude da onda (LEITE, 1984).

2.3.2 Teoria Acustoelástica

O efeito da variação da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas devido à uma tensão (aplicada ou residual) é chamado de efeito acustoelástico. Este efeito está relacionado com a anisotropia induzida pelas tensões. A teoria acustoelástica foi desenvolvida por Hughes e Kelly (1953), com expressões para as velocidades de ondas para um meio sólido sob tensão.

Conforme Bray e Stanley (1997), a variação da velocidade de propagação da onda V com a deformação ε é representada pela chamada constante acustoelástica L , cujos valores podem ser obtidos na literatura. A variação da velocidade V_{11} , paralela ao sentido de propagação da tensão aplicada, controlada pelo coeficiente L_{11} , é a mais indicada para ser utilizada em ensaios ultrassônicos pelo fato de variar muito mais do que as velocidades perpendiculares ao carregamento (FRAGA, 2007). A constante acustoelástica L_{11} é expressa pela Equação 3:

$$L_{11} = \frac{dV_{11}}{d\varepsilon} \quad (3)$$

Com a Equação 3 e a lei de Hooke para o estado uniaxial de tensão ($d\sigma = E d\varepsilon$), tem-se:

$$L_{11} = \frac{\frac{dV_{11}}{V_{11}}}{\frac{d\varepsilon}{d\sigma}} = \frac{E \left(\frac{dV_{11}}{V_{11}} \right)}{d\sigma} \quad (4)$$

$$d\sigma = \frac{E \left(\frac{dV_{11}}{V_{11}} \right)}{L_{11}} \quad (5)$$

Onde $d\sigma$ é a variação de tensão, $d\varepsilon$ é a variação de deformação e E é o módulo de elasticidade do material. Sabendo que a variação na velocidade pode ser calculada pela variação relativa do tempo de propagação da onda (dt/t_0), temos:

$$d\sigma = \frac{E}{L_{11} t_0} dt \quad (6)$$

Nesse caso, dt corresponde a variação no TOF e t_0 é o TOF no material investigado livre de tensões. É possível notar que, pela Equação 6, como trata-se de variações no TOF e na tensão presente no meio, é necessário conhecer qual o TOF para uma determinada tensão, para utilizar esses dois valores como referência, e assim, a partir da medição de um TOF diferente, pode ser obtido um valor de tensão correspondente. Ou seja, com apenas um valor de TOF, não é possível transformá-lo em tensão sem conhecer os valores de referência.

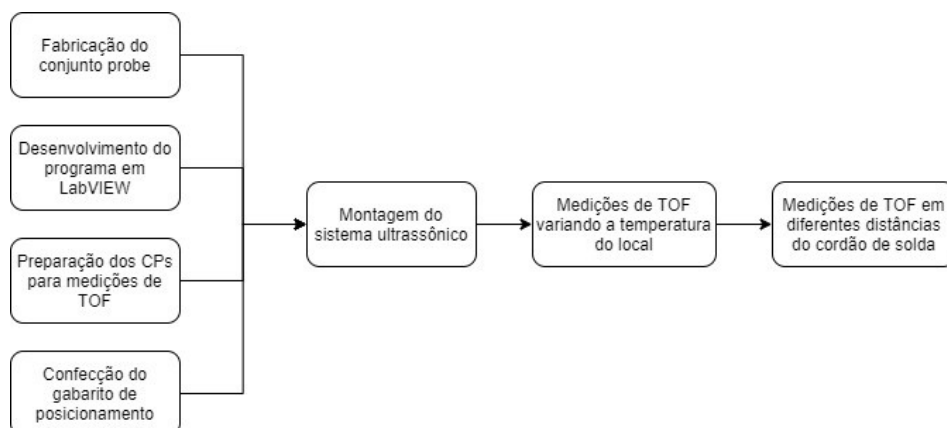
3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o planejamento sequencial do trabalho, a descrição e o processo de preparação para medição de TOF dos corpos de prova. Além disso, o sistema ultrassônico de medição de tensão, o programa de aquisição de sinais e o método utilizado para encontrar o TOF são descritos nesse capítulo. Também são apresentados os procedimentos para a determinação da influência da temperatura no TOF e para as medições de TOF nos cordões de solda dos corpos de prova (CPs).

3.1 PLANEJAMENTO

As atividades desse trabalho foram executadas conforme o planejamento sequencial mostrado no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma das atividades desenvolvidas no trabalho



Fonte: Autor (2019).

Conforme a Figura 5, quatro atividades foram realizadas em paralelo para posteriormente dar sequência ao trabalho, até chegar nas medições de TOF em diferentes pontos de afastamento do cordão de solda. Todas essas atividades são descritas detalhadamente nas seções a seguir.

3.2 CORPOS DE PROVA

Nesse trabalho foram utilizadas oito chapas de aço, sendo que cada chapa possui dois cordões de solda, totalizando dezesseis cordões de solda. O detalhamento dos corpos de prova é apresentado nas seções a seguir.

3.2.1 Fabricação

Nesse trabalho foram utilizadas chapas de aço ASTM A36, fabricadas por Zientarski (2019), com espessura de 5/8'' (15,875 mm), 240 mm de altura e 300 mm de largura. Cada chapa possui dois CPs e cada CP possui um cordão de solda gerado em um canal chanfrado em "V" com ângulo de 60° e 10 mm de profundidade, conforme Figura 6.

Figura 6 - Dimensões em milímetros dos CPs



Fonte: Autor (2019).

Na soldagem MAG dos CPs, foram utilizados alguns parâmetros fixos: a vazão de gás ATAL25 de 12 l/min, a distância de contato bico-peça de 16 mm, a polaridade de soldagem direita e o arame de solda E7013 com diâmetro de 1,6 mm. Já os parâmetros de soldagem variáveis para cada CP são mostrados na Tabela 1 (ZIENTARSKI, 2019).

Tabela 1 - Parâmetros de soldagem dos cordões de solda dos CPs

Corpo de Prova	Tensão de Soldagem (V)	Velocidade do Arame (m/min)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
1	17	4	15
2	17	5	30
3	17	6	45
4	21	4	15
5	21	5	30
6	21	7	45
7	24	5	15
8	24	6	30
9	24	7	45
10	27	7	15
11	27	8	30
12	27	9	45
13	30	8	15
14	30	9	30
15	30	10	45
16	33	8	15
17	33	9	30
18	33	10	45

Fonte: Adaptado de Zientarski (2019).

Uma das chapas foi encontrada com um canal chanfrado sem cordão de solda (número 3) e com outro canal possuindo um cordão com profundidade insuficiente para realizar medições com o sistema ultrassônico proposto nesse trabalho (número 4). Por esse motivo, a chapa com os números 3 e 4 não foi utilizada.

3.2.2 Material

O material dos CPs é o aço ASTM A36, um aço carbono de utilização estrutural, cuja composição química, propriedades físicas e propriedades mecânicas estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades e composição química do aço ASTM A36

Composição Química	
Carbono (C)	0,250 – 0,290 %
Ferro (Fe)	98,0 %
Manganês (Mn)	1,03 %
Fósforo (P)	0,04 %
Silício (Si)	0,28 %
Enxofre (S)	0,05 %
Propriedades Físicas	
Densidade (ρ)	7,85 g/cm ³
Propriedades Mecânicas	
Limite de escoamento (σ_e)	250 MPa
Módulo de elasticidade (E)	200 GPa

Fonte: Adaptado da Norma ASTM A36 (2008).

3.3 PREPARAÇÃO DOS CPS PARA MEDIÇÃO DO TOF

Para que seja possível realizar medições de tempo de percurso (TOF) utilizando o sistema proposto nesse trabalho, é necessário que as superfícies das amostras sejam planas. Por isso, com o apoio do Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA) do Centro

de Tecnologia (CT) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), foi realizada operação de fresamento nos CPs com o objetivo de remover 1 mm da espessura das chapas em torno do cordão de solda. Para isso, foi utilizado uma fresa de 100 mm de diâmetro centralizada com a raiz da solda no sentido transversal ao cordão, com 0,5 mm de remoção de material da espessura das chapas por passe, a uma velocidade de avanço de 1.000 mm/min a 500 rotações por segundo (rps). Para a realização desse serviço, foi usado o centro de usinagem ROMI D600, como mostra a Figura 7.

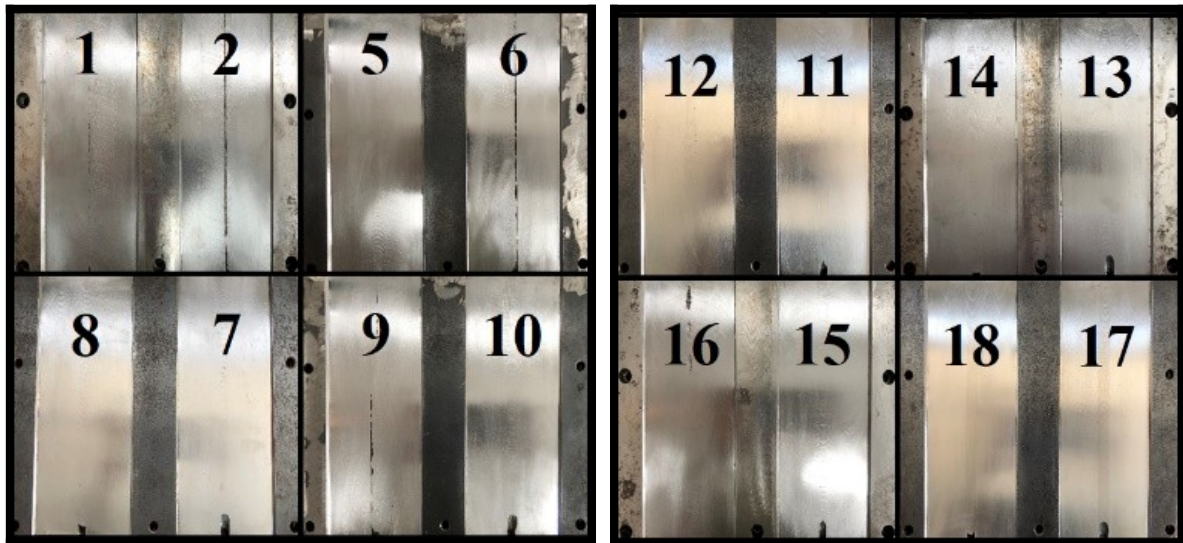
Figura 7 - Centro de usinagem ROMI D600



Fonte: Autor (2019).

A Figura 8 mostra os CPs numerados, após passarem pelo processo de fresamento e por um processo de lixamento manual, com lixas de granulação 80 e 200, para dar acabamento para as superfícies.

Figura 8 - Corpos de prova após a preparação para medição do TOF



Fonte: Autor (2019).

3.4 SISTEMA PARA MEDIÇÃO DO TOF UTILIZANDO ONDAS L_{CR}

O sistema ultrassônico para medição do TOF deve ser capaz de realizar a emissão e recepção das ondas L_{CR} , adquirir e processar os sinais de modo a detectar o tempo que a onda leva para percorrer o material, além de realizar medições de temperatura.

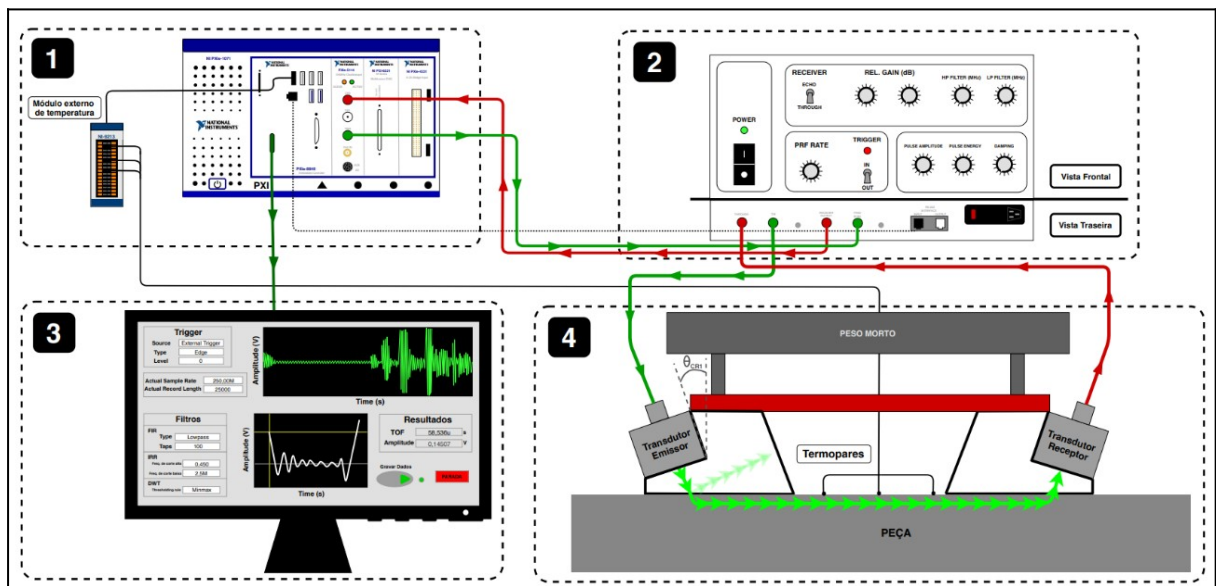
Esse sistema foi separado em quatro conjuntos para auxiliar em seu entendimento. O modelo, a descrição e a função de cada elemento dos conjuntos são descritos a seguir.

- **Conjunto 1: PXI, Módulos e Programa.**
 - a) Chassi (National Instruments, PXI-1071): sua função é permitir o acoplamento dos módulos PXI. Possui ventoinha de exaustão para dissipação de calor, além de entrada e botão de energia.
 - b) Módulo controlador (National Instruments, PXIe-8840): é uma placa controladora embarcada, que possui processador, memória RAM, disco rígido e diversas entradas para conectar outros dispositivos. Possui a principal função de executar o sistema operacional, permitindo a execução do programa desenvolvido em plataforma gráfica, que realiza o processamento e armazenamento dos sinais.

- c) Placa de aquisição de sinais (National Instruments, PXIe-5114): placa de osciloscópio para aplicações com sinais de alta frequência, com função de realizar a aquisição dos sinais na forma de pulsos elétricos.
- d) Módulo externo de temperatura (National Instruments, PXI-9213): permite o acoplamento dos termopares, além de possuir filtros e detecção de termopar aberto.
- e) Termopares (HUA LON, Tipo K): realizam medições de temperatura.
- f) Programa em LabVIEW (National Instruments, versão 9.0): programa adaptado de uma versão existente, desenvolvida por Buenos (2014), que possui a principal função de calcular e mostrar o tempo de percurso da onda L_{CR} . Esse programa é descrito em mais detalhes na Seção 3.6.
- **Conjunto 2: Emissor/Receptor.**
 - a) Emissor/Receptor (JSR Ultrasonics, DPR300): em inglês, chamado de *Pulser/Receiver*, possui a função de excitar o transdutor emissor e amplificar o sinal gerado pelo transdutor receptor. Permite a escolha de utilização de gatilho (*trigger*) interno ou externo.
 - **Conjunto 3: Monitor e Periféricos.**
 - a) Monitor: transmite, por imagem, as informações processadas no computador.
 - b) Mouse e Teclado: são utilizados para inserir dados no computador.
 - **Conjunto 4: Probe.**
 - a) Sapatas de Rexolite: permitem a fixação, por parafusos, dos transdutores na inclinação (ângulo crítico) adequada para a geração e captação de ondas L_{CR} . Na montagem do sistema, o parafuso é apertado até dar o encosto, sem a aplicação de torque excessivo.
 - b) Transdutores (Technisonic, ABS-020408-GP): transformam pulsos elétricos em feixes de ondas ultrassônicas (emissor) ou vice-versa (receptor).
 - c) Barra de ligação: é fixada nas sapatas e impede a variação da distância entre elas durante as medições.
 - d) Peso morto: é fixado na barra de ligação e garante a uniformidade nas medições, já que a força aplicada nas sapatas interfere diretamente no tempo de percurso das ondas. Com isso, a força não varia de medição para medição (força constante).

O esquema da Figura 9 ilustra a trajetória do sinal passando pelos elementos do sistema. Inicialmente, o pulso gatilho, ou *trigger*, é emitido pela placa de aquisição de sinais ou pelo próprio Emissor/Receptor. Em seguida, o Emissor/Receptor detecta esse pulso e emite outro pulso elétrico, porém com amplitude, energia e amortecimento específicos para excitar o transdutor emissor e, com isso, gerar um feixe de ondas ultrassônicas, que se propaga ligeiramente abaixo da superfície do material até ser detectado pelo transdutor receptor. Este gera um sinal que passa novamente pelo Emissor/Receptor para ser amplificado e, após isso, chega à placa de aquisição de sinais. Posteriormente, o sinal é processado pelo módulo embarcado e pelo programa desenvolvido em LabVIEW. Por fim, as informações são transmitidas por imagem pelo monitor.

Figura 9 - Esquema representativo do sistema ultrassônico completo



Fonte: Autor (2019).

O sistema ainda possui um módulo externo de temperatura e três termopares para medição de temperatura. A temperatura é outro fator que influencia diretamente no TOF das ondas L_{CR} . Por isso, se as medições forem feitas em temperaturas diferentes, é necessário conhecer a temperatura e fazer uma correção no TOF.

Outro elemento importante é o agente acoplante. O agente acoplante é uma substância lubrificante utilizada tanto no contato entre transdutor e sapata de acrílico, quanto entre sapata

e amostra metálica. O acoplante possui a função de aumentar a capacidade de transmissão da onda e, quando se distribui de maneira irregular, pode prejudicar as medições. Como acoplante foi utilizado o gel condutor da marca Mercur, indicado para aplicações com ultrassom.

Os transdutores possuem uma frequência de 2,25 MHz. A escolha desse transdutor se deve ao fato do mesmo ser mais utilizado para aplicações com aço e por apresentar maior sensibilidade a medições de tensão, conforme ensaios realizados por Santos (2007) e Fraga (2007). Quanto a penetração das ondas geradas pelo transdutor de 2,25 MHz, Fraga (2007) verificou experimentalmente que a onda de 2,25 MHz se propaga a uma distância da superfície do metal maior que 4 mm. Já Bray e Tang (2001) verificaram uma penetração de 2,6 mm. Para transdutores de frequência muito parecida, de 2 MHz, Javadi *et al* (2016) e Sadegui *et al* (2013) detectaram uma profundidade igual a 2 mm e 3,4 mm, respectivamente.

Nesse trabalho, em todas as medições de TOF, a configuração do Emissor/Receptor foi: uma taxa de amostragem (*PRF Rate*) de 100 kHz com a opção de *trigger* interno selecionada, um filtro *low pass* de 10 MHz e *high pass* de 1 MHz, um amortecimento (*damping*) de 44 Ohms e 12,2 μ J de energia por pulso.

Quanto a montagem do sistema, os cabos coaxiais, com conectores do tipo BNC (*Bayonet Neill Concelman*), dos transdutores emissor e receptor são conectados ao aparelho Emissor/Receptor nas entradas T/R e *Through*, respectivamente. Para a comunicação entre o Emissor/Receptor e a placa de aquisição de sinais, são usados dois cabos coaxiais para conectar as entradas CH0 e TRIG da placa às conexões RECEIVER OUTPUT e TRIG/SYNC do Emissor/Receptor, respectivamente. O controlador embarcado é conectado ao monitor por meio de um cabo com conector VGA (*Video Graphics Array*) e ao teclado, *mouse* e módulo externo de temperatura através de cabos com conectores USB (*Universal Serial Bus*). Por fim, um cabo com conectores RJ45 é usado para a comunicação entre o Emissor/Receptor e o módulo embarcado.

3.4.1 Fabricação

Os elementos fabricados foram as sapatas de rexolite, o peso morto e a barra de ligação, com o apoio de NAFA-CT. As sapatas foram fabricadas pelo centro de usinagem ROMI D600, mostrado anteriormente na Figura 7. A serra de fita, marca Franho, modelo FM 500, como mostra a Figura 10, foi utilizada para o corte da barra de ligação (de 15,5 mm de espessura, 140,5 mm de largura e 40,20 mm de altura) e para o corte do tarugo cilíndrico maciço (de 62 mm de diâmetro e 195,5 mm de comprimento), que serve como peso morto do conjunto probe.

Figura 10 - Serra de fita, marca Franho, modelo FM 500



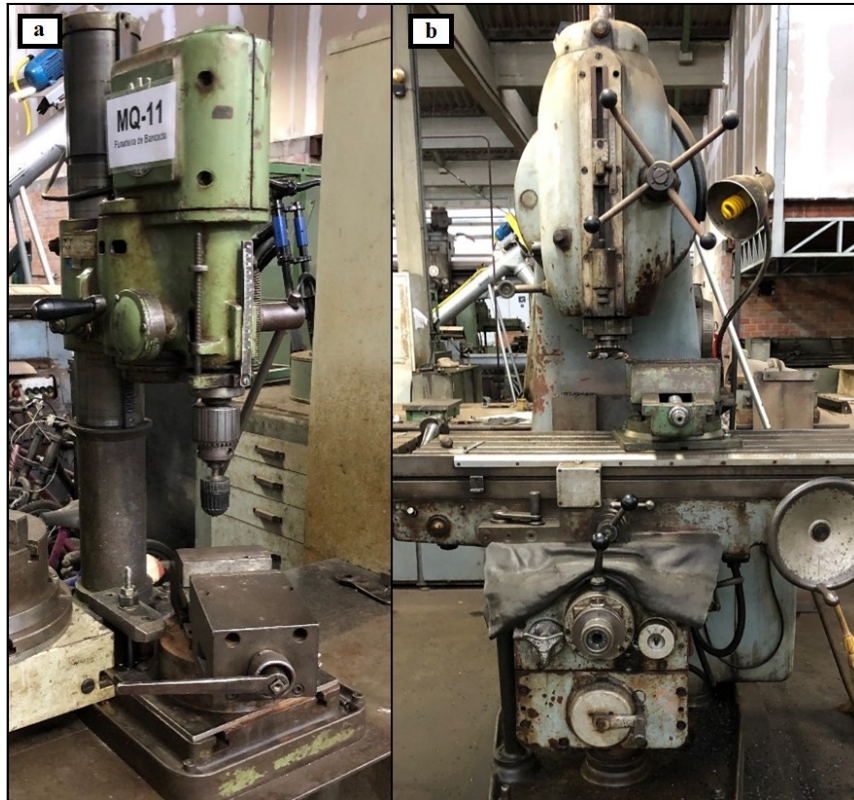
Fonte: Autor (2019).

Foi necessário realizar dois furos passantes de 10,5 mm de diâmetro no tarugo para a passagem de duas barras rosqueadas. Com relação a barra de ligação, foram realizados 6 furos

cegos, um deles de 8 mm de diâmetro e 5,5 mm de profundidade e o outro de 4,5 mm de diâmetro e 10 mm de profundidade, ambos concêntricos. O furo de maior diâmetro serve apenas para esconder a cabeça do parafuso. Esses furos servem para a colocação dos parafusos de fixação entre as sapatas e a barra de ligação. Ainda na barra, foram feitos dois rasgos para a passagem dos cabos dos transdutores, caso seja utilizada uma sapata central. Por fim, foi necessário realizar dois furos de 8,5 mm de diâmetro para ser feita uma rosca interna M10 por um macho. Os processos de furação foram realizados na furadeira de bancada, marca Sanches Blanes S/A, modelo FB-25, conforme Figura 11-a.

O tarugo cilíndrico foi fresado na parte superior e inferior para melhor assentamento das porcas e pinos, resultando numa distância de 56 mm entre as superfícies paralelas inferior e superior. O processo foi realizado pela fresadora vertical, marca CSEPEL, modelo VF 222, como mostra a Figura 11-b.

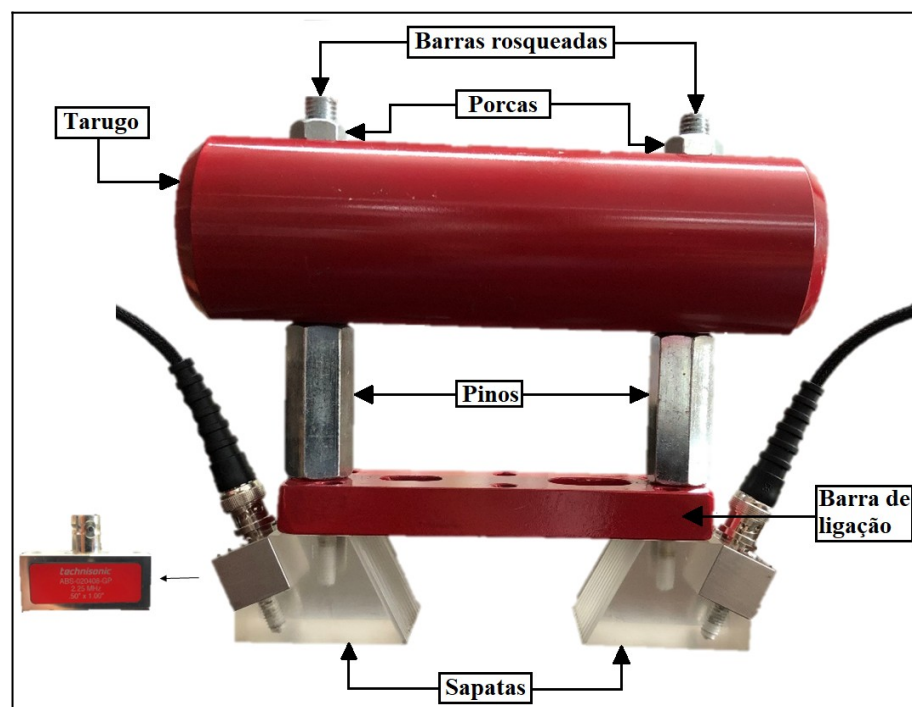
Figura 11 - Furadeira de bancada (a) e fresadora vertical (b)



Fonte: Autor (2019).

Com isso, tem-se o conjunto probe completo, conforme Figura 12. Maiores detalhes do conjunto probe podem ser vistos no Apêndice A, onde estão os desenhos de fabricação do conjunto.

Figura 12 - Conjunto probe após fabricação e montagem



Fonte: Autor (2019).

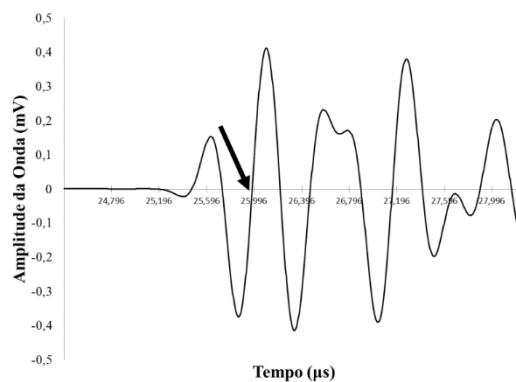
As porcas sextavadas (com rosca interna M10 e 7,86 mm de altura) e os pinos, que são porcas altas sextavadas com rosca interna M12 e 51 mm de altura, foram comprados separadamente, sem passar por nenhum processo de fabricação após a compra. Uma barra rosqueada com rosca externa M10 e 1 m de comprimento foi comprada e cortada por uma serra de arco, obtendo-se duas barras rosqueadas de 140 mm de comprimento.

3.5 MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DO TOF DAS ONDAS L_{CR}

A adequada medição do tempo de percurso (TOF) é essencial para convertê-lo corretamente em tensão residual ou aplicada. Nesse trabalho, o método utilizado para a determinação do tempo de percurso foi o método do segundo cruzamento da onda L_{CR} com a amplitude zero do primeiro trem de ondas, utilizado também por Fraga (2007), Pereira Junior (2011) e Buenos (2010 e 2014).

A técnica consiste na medição do tempo entre o *trigger* inicial do pulsador e o segundo cruzamento com a abcissa após o primeiro pico significativo do primeiro pulso no gráfico do osciloscópio, como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Segundo cruzamento com a abcissa do primeiro trem de ondas



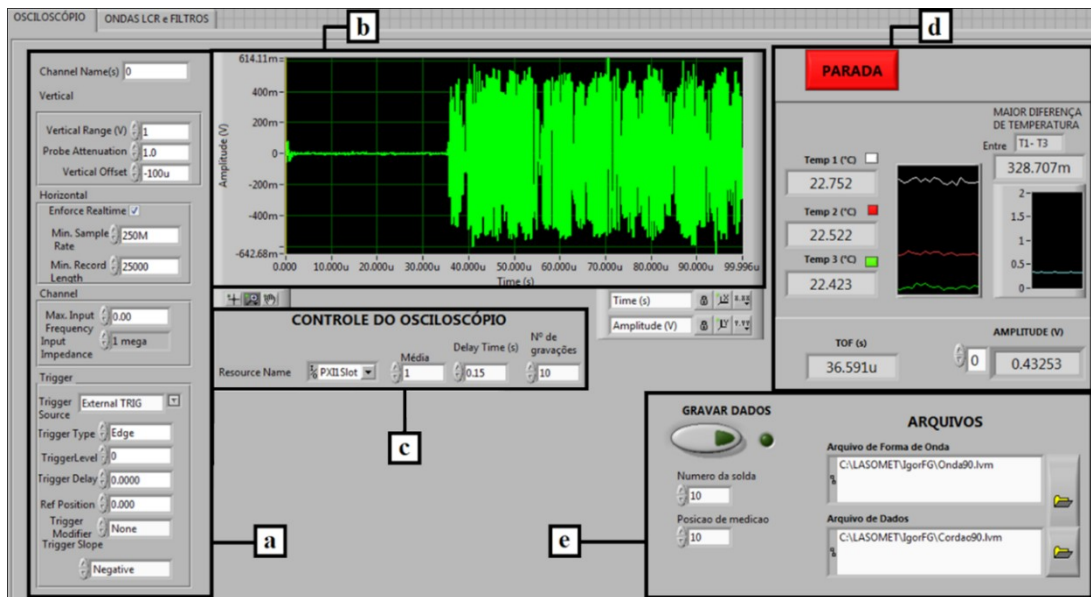
Fonte: (BUENOS, 2014).

Conforme Pereira Junior (2011), o primeiro pulso do transdutor receptor corresponde à onda L_{CR} , que se propaga em linha reta com maior velocidade. É por isso que o método se baseia no primeiro pulso e não nos demais pulsos gerados.

3.6 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

O programa desenvolvido em plataforma gráfica de programação (LabVIEW) possui a principal função de mostrar o TOF da onda L_{CR} e os valores de temperatura. O programa possui dois painéis, sendo o primeiro mostrado na Figura 14.

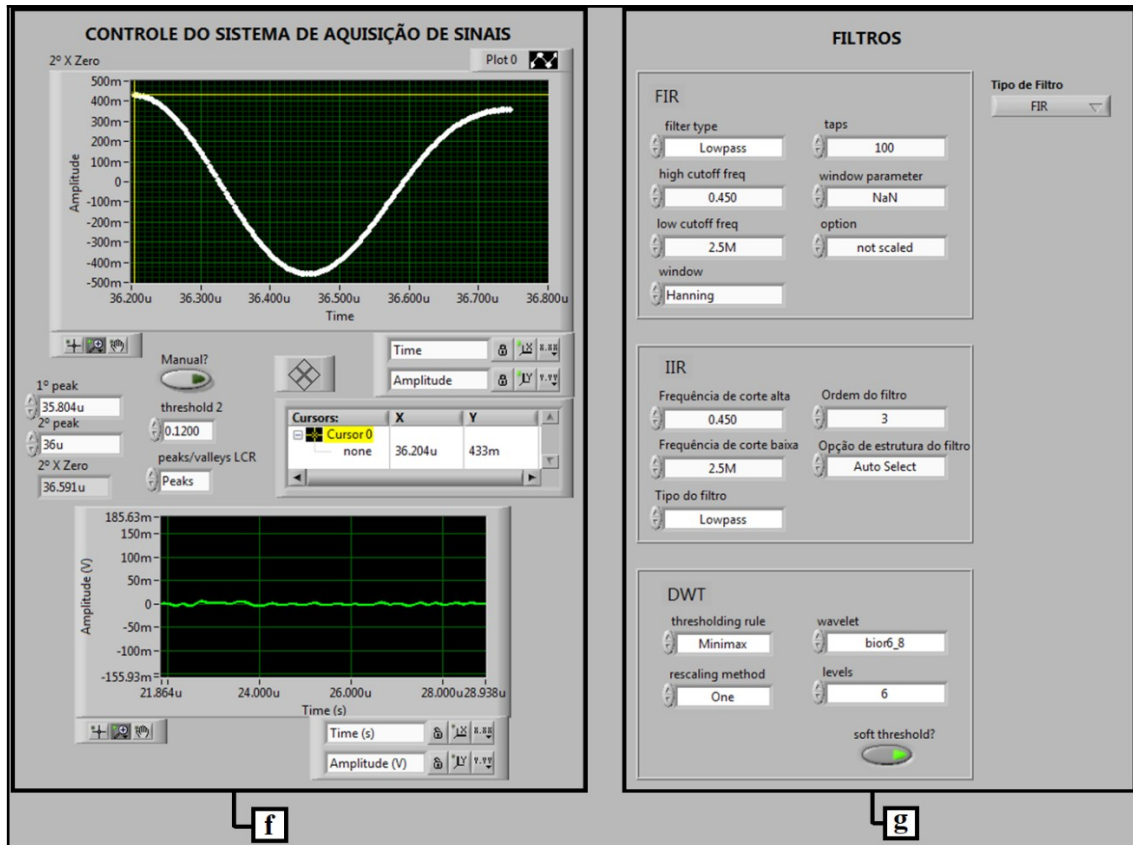
Figura 14 - Primeira tela do programa de aquisição de sinais em LabVIEW



Fonte: adaptado de Pereira Junior (2011).

Com base na Figura 14, a primeira tela é dividida em seis janelas. A janela “a” permite a regulagem vertical e horizontal da janela do sinal, além de permitir a escolha do canal de aquisição e a regulagem das configurações de *trigger*. A janela “b” mostra o gráfico da amplitude do sinal elétrico adquirido em função do tempo. Na janela “c” é possível selecionar o módulo do PXI onde se localiza a placa de aquisição de sinais e realizar ajustes na média, tempo de espera e número de gravações que desejam ser gravadas cada vez que o botão para gravar os dados é acionado. O botão para parar a execução do programa, assim como os valores de temperatura e TOF são mostrados na janela “d”. Por fim, na janela “e”, existe o botão para gravar os dados de amplitude da onda e de TOF em dois arquivos distintos, sendo necessário previamente escrever o caminho do arquivo.

Figura 15 - Segunda tela do programa de aquisição de sinais em LabVIEW



Fonte: adaptado de Pereira Junior (2011).

Já a segunda tela é dividida em duas janelas, conforme a Figura 15. Na janela “f”, encontra-se um gráfico que mostra o segundo cruzamento com a amplitude zero do primeiro pico significativo do sinal. Além disso, existem controles para regulagem desse cruzamento e um gráfico para visualização do sinal. Na janela “g”, é possível selecionar o tipo de filtro digital, com as opções do filtro FIR (*Finite Impulse Response*), IIR (*Infinite Impulse Response*) e DWT (*Discrete Wavelet Transform*).

Vale ressaltar que as imagens das Figuras 14 e 15 também mostram as configurações do programa de aquisição de sinais utilizadas durante as medições desse trabalho, com a seleção do filtro FIR, *trigger* externo, etc.

3.7 GABARITO DE POSICIONAMENTO

O gabarito de posicionamento possui a função de garantir o paralelismo entre o cordão de solda e o conjunto probe e impedir variações indesejadas de distância no sentido transversal entre o cordão e o conjunto probe durante as medições. Para a produção do gabarito foi utilizado o processo de manufatura aditiva (MA), por meio da impressora da marca Stratasys, modelo F170, conforme Figura 16, utilizando o polímero termoplástico ASA (Acrilonitrila Estireno Acrilato).

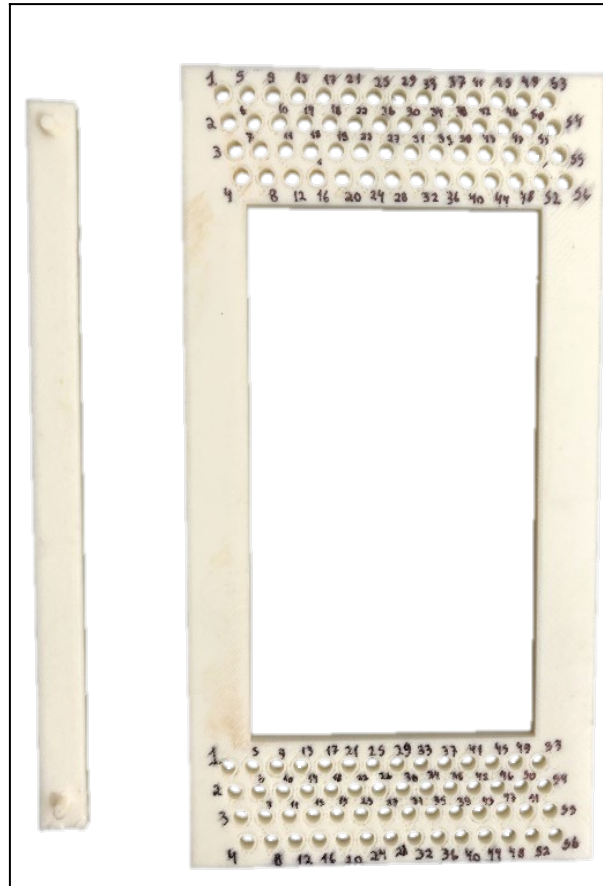
Figura 16 - Impressora Stratasys, modelo F170



Fonte: Autor (2019).

O gabarito foi projetado para acomodar o conjunto probe e, por meio de uma régua com dois pinos e furos no gabarito (de 5 mm de diâmetro) com espaçamento horizontal de 2 mm entre si, conforme Figura 17, é possível variar uma distância uniforme no sentido transversal ao cordão de solda. O gabarito, de 5 mm de espessura, possui um vão retangular de altura igual a distância entre as sapatas do conjunto probe, para não haver variação de distância no sentido longitudinal ao cordão.

Figura 17 - Gabarito de posicionamento para o conjunto probe



Fonte: Autor (2019).

Maiores detalhes sobre o gabarito de posicionamento para o conjunto probe podem ser verificados no desenho do gabarito disponível no Apêndice B.

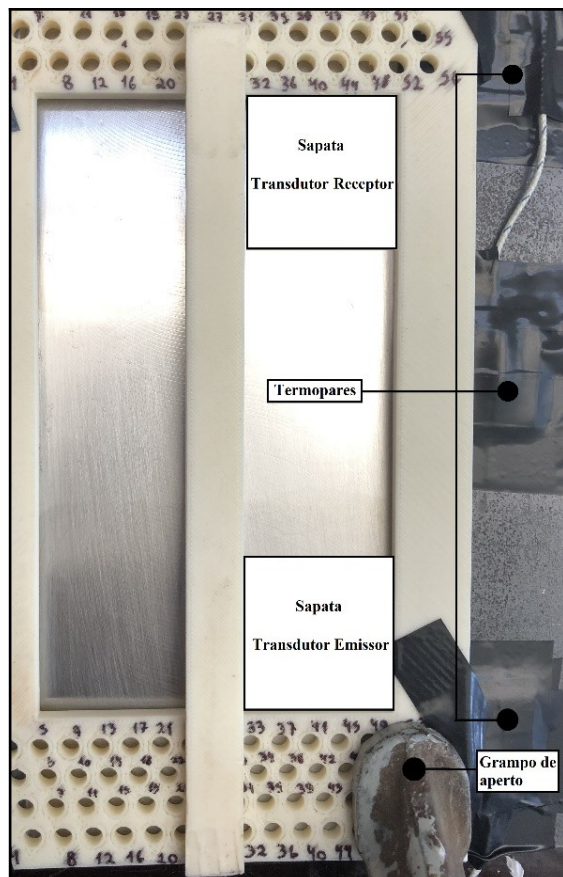
3.8 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TOF DAS ONDAS L_{CR}

Sabe-se que a temperatura influencia diretamente no TOF das ondas L_{CR} devido a dilatação térmica do corpo de prova e do sistema de medição. Essa influência varia de um sistema para o outro. Portanto, é necessário verificar experimentalmente quanto o TOF varia em função da variação da temperatura para que, havendo diferença de temperatura entre as medições, o TOF possa ser corrigido, aumentando a confiabilidade das medições (Santos, 2007).

Esse experimento também é uma forma de verificar se o sistema ultrassônico funciona corretamente, já que se espera um comportamento linear e uma relação de proporcionalidade direta entre a temperatura e o TOF (Santos, 2007).

O CP de número 8 foi utilizado para as medições de temperatura, com a régua do gabarito posicionada nos furos 28. Com isso, conjunto probe é colocado no vão do lado direito da régua, que possui a mesma largura das sapatas do conjunto, como mostra a Figura 18, impedindo variações de distância entre as medições.

Figura 18 - Disposição dos elementos para as medições de TOF variando-se a temperatura



Fonte: Autor (2019).

Três termopares foram utilizados, dispostos conforme Figura 18, sendo fixados com fita isolante. Uma camada de EVA (Espuma Vinílica Acetinada) foi colocada entre o termopar e a fita isolante para isolamento térmico. Além disso, um grampo de aperto,

popularmente conhecido como sargento, foi usado para pressionar o gabarito e a amostra metálica contra a mesa, evitando variações de posicionamento.

Inicialmente, o climatizador de ar foi ajustado para aumentar a temperatura do ambiente durante uma hora e meia. Após a primeira sequência de medições, o mesmo foi configurado para diminuir a temperatura do local. Os intervalos de tempo entre as medições foram de no mínimo 4 min e no máximo 20 min. O gel acoplante entre os transdutores e as sapatas foi aplicado a cada 20 min.

Cada sequência de medição consiste em:

- Primeiro passo: aplicar o gel acoplante entre a amostra e as sapatas do conjunto probe;
- Segundo passo: levantar e colocar o conjunto probe sobre a amostra do lado direito da régua do gabarito de posicionamento;
- Terceiro passo: no programa em LabVIEW, clicar no botão para gravar os dados. São gravadas 10 medições cada vez que o botão é acionado;
- Quarto passo: repetir o segundo e terceiro passo por mais duas vezes.

Após um determinado intervalo de tempo, outra sequência de medição é executada. Com isso, são obtidas 30 medições de TOF e temperatura em cada sequência de medição. No total, foram feitas 30 sequências.

3.9 CÁLCULO DA TENSÃO A PARTIR DO TOF

Como visto na Seção 2.3.2, a Equação 6 determina a relação entre a tensão presente no material e o TOF. A Equação 6, após uma integração, pode ser escrita conforme a Equação 7.

$$\sigma - \sigma_{ref} = \frac{E}{L_{11} t_0} \left| t - t_{ref} \right| \quad (7)$$

Nesse caso, t_{ref} é o TOF para uma determinada tensão σ_{ref} . Com isso, através da medição do TOF (t) é possível convertê-lo em tensão (σ) por meio da Equação 7. Como o objetivo do trabalho é verificar o aumento da tensão residual no cordão de solda em comparação com o metal de base, o valor de t_{ref} utilizado foi o menor valor de TOF obtido ao

longo do cordão. Considera-se uma tensão σ_{ref} igual a zero para t_{ref} . Essa abordagem foi escolhida para que os pontos de tensão ao longo do cordão sejam positivos.

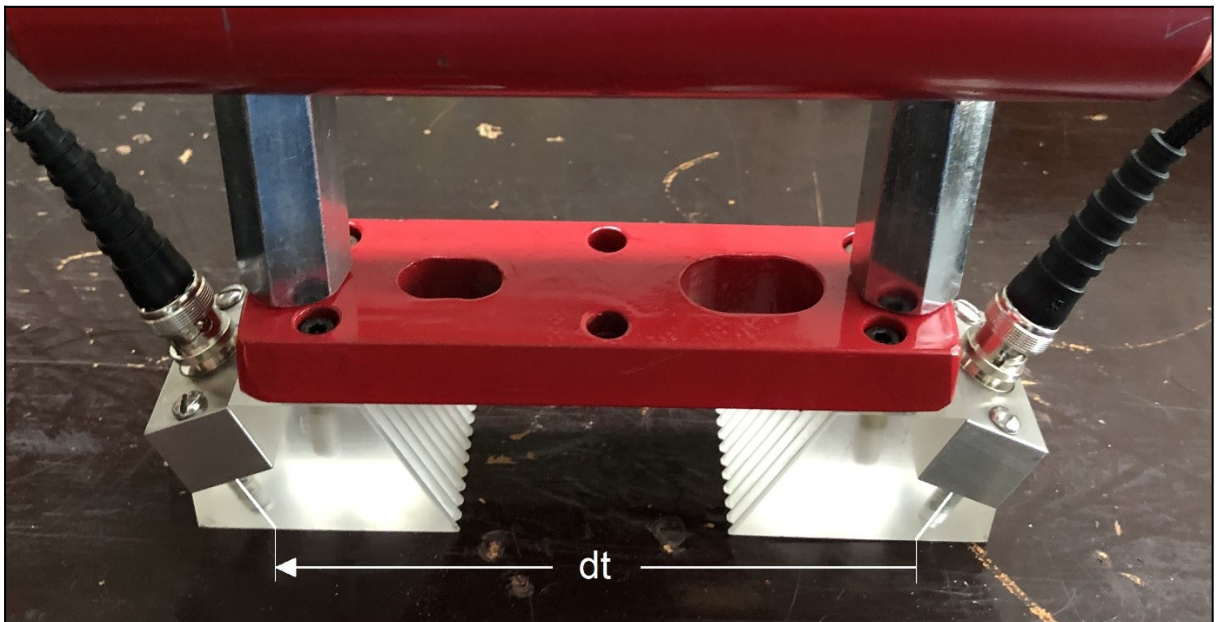
O módulo de elasticidade E utilizado nesse trabalho, conforme Tabela 2, foi de 200 GPa e o valor escolhido para a constante acustoelástica L_{11} foi de -2.38, conforme estudos realizados por Buenos *et al* (2013) com chapas de aço ASTM A36. Já o tempo de percurso da onda (t_0) para o material livre de tensões pode ser calculado pela Equação 8.

$$t_0 = \frac{d_t}{V_{11}} \quad (8)$$

Onde d_t é a distância de percurso da onda L_{CR} e V_{11} é a velocidade de propagação das ondas no aço. Segundo Leite (1984), 5.900 m/s é o valor padrão para a velocidade de ondas longitudinais V_{11} no aço.

Para a determinação da distância de percurso da onda L_{CR} (d_t) considera-se que a onda é emitida e detectada perpendicularmente pelo centro dos transdutores emissor e receptor, como mostra a Figura 19.

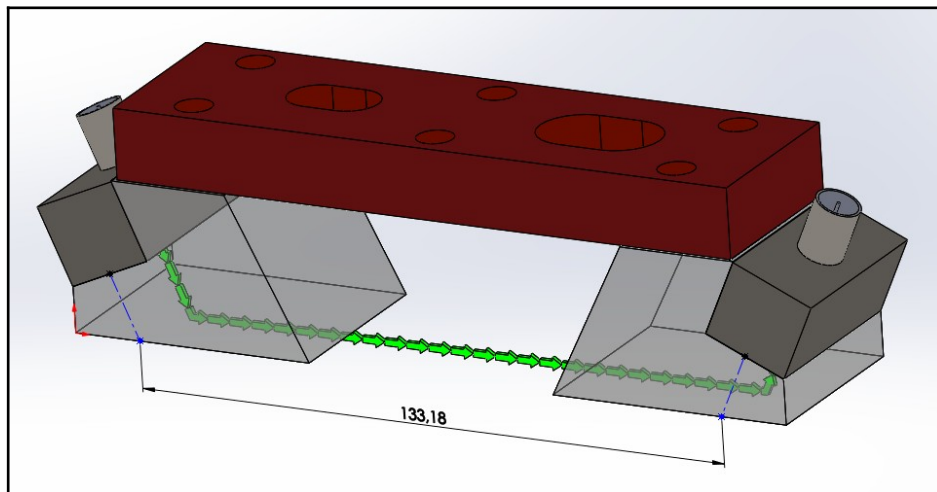
Figura 19 - Representação da distância de percurso da onda (d_t)



Fonte: Autor (2019).

Para isso, as dimensões das sapatas, dos transdutores e da barra de ligação foram medidas por um paquímetro e, utilizando o *software* SolidWorks 2017, foi possível determinar a distância (d_t) de 133,18 mm, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Distância de percurso da onda (d_t), em mm



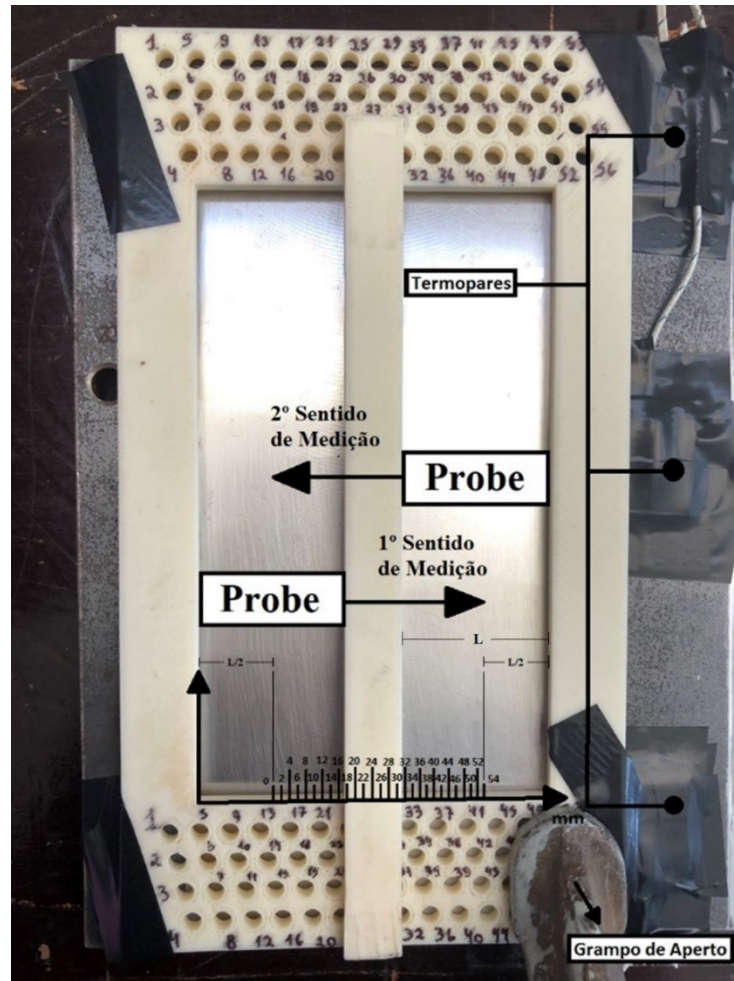
Fonte: Autor (2019).

3.10 MEDIÇÕES DO TOF NOS CORPOS DE PROVA

Em cada medição, a onda L_{CR} percorre uma trajetória longitudinal ao cordão de solda. O que varia é a distância no sentido transversal de medição para medição. A primeira sequência de medições ocorre com a régua inicialmente na posição 29 e o conjunto probe no lado esquerdo da régua, com base na Figura 21. A régua movimenta-se 2 mm por medição transversalmente ao cordão de solda, na medida em que os pinos da régua vão sendo encaixados nos furos do gabarito seguindo a numeração de maneira crescente. O conjunto probe encontra-se sempre em contato com o lado esquerdo régua a cada movimento. Já na

segunda sequência de medições, a régua encontra-se na posição 28 do gabarito e o conjunto probe localiza-se à direita da régua. Nesse caso, as medições são feitas seguindo os números dos furos do gabarito de modo decrescente. Com isso, a trajetória de 54 mm é medida duas vezes porem em sentidos opostos.

Figura 21 - Sentido de medição do TOF nos CPs



Fonte: Autor (2019).

Com relação a Figura 21, vale salientar que quando a régua é colocada nos furos de número 28, a largura no lado direito do vão é igual a largura das sapatas do conjunto probe. No lado esquerdo ocorre o mesmo quando a régua se encontra encaixada nos furos de número 29.

Além do gabarito de posicionamento, foi utilizado um grampo de aperto para impedir deslocamentos indesejados do gabarito em relação a amostra de medição para medição. Além disso, três termopares foram usados para que haja um valor de temperatura (sendo a média das temperaturas medidas nos três termopares) para cada medição de TOF.

As medições de TOF foram feitas, resumidamente, da seguinte maneira:

- Primeiro passo: encaixar os pinos da régua nos furos de número 29 do gabarito de posicionamento;
- Segundo passo: aplicar gel acoplante entre as sapatas e os transdutores;
- Terceiro passo: aplicar gel acoplante entre as sapatas e a amostra;

- Quarto passo: levantar e colocar o conjunto probe sobre o CP, de modo que as sapatas fiquem sempre encostadas no lado esquerdo da régua do gabarito;
- Quinto passo: no programa em LabVIEW, clicar no botão para gravar os dados. São gravadas 10 medições cada vez que o botão é acionado;
- Sexto passo: repetir o quarto e o quinto passo por mais duas vezes, ou seja, isso dará repetição de 3 medições por região medida, minimizando possíveis variações relacionadas com o operador;
- Sétimo passo: encaixar os pinos da régua nos furos com numeração de uma unidade maior que a anterior e repetir o terceiro, quarto, quinto e sexto passo, até chegar aos furos de número 56.

Esses passos são feitos novamente no mesmo CP para o segundo sentido de medição. A diferença é que, no primeiro passo, a régua é encaixada nos furos de número 28, no quarto passo, as sapatas devem ficar sempre encostadas do lado direito da régua do gabarito e, no sétimo passo, os pinos da régua devem ser encaixados nos furos de numeração menor que a anterior, até chegar aos furos de número 1. Em cada posição de medição, são obtidos 60 valores de TOF e temperatura.

Posteriormente, o gabarito, a régua, os termopares e o grampo de aperto são removidos e instalados em outro CP. Foram analisados os CPs de número 1 a 18, com exceção dos CPs de número 3 e 4.

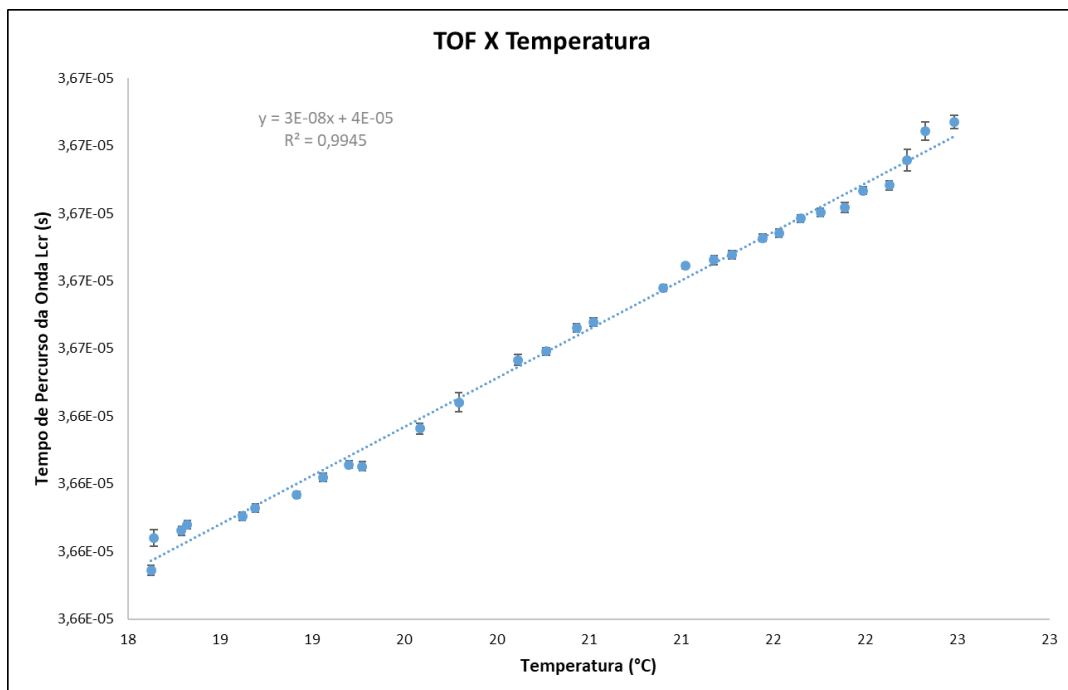
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise da temperatura em função do TOF, assim como os resultados das medições de TOF nos CPs ao longo dos cordões de solda. Além disso, são apresentados os resultados da análise dos parâmetros de soldagem na tensão residual gerada no processo.

4.1 RESULTADO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO TOF

No total, foram obtidos 30 valores de TOF, sendo que para cada valor de TOF, existe um valor de temperatura associado, que consiste em uma média da temperatura medida nos três termopares. A Figura 22 mostra o gráfico dos resultados médios de TOF e temperatura. As barras de erro verticais nos pontos indicam o desvio padrão do valor de TOF calculado.

Figura 22 - Influência do TOF em função da temperatura



Fonte: Autor (2019).

A inclinação da reta do gráfico da Figura 22 foi utilizada para corrigir o TOF em função da temperatura na conversão do mesmo para tensão residual. O fator de correção médio encontrado foi de 28,8 ns/°C. Andrino (2007), Buenos (2014), Fraga (2007) e Santos (2007) obtiveram valores entre 8 e 19 ns/°C. Vale destacar que os experimentos realizados por esses autores possuíram características diferentes das propostas nesse trabalho.

4.2 CORREÇÃO DO TOF EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE USINAGEM

Durante a preparação dos CPs para medições de TOF através do fresamento superficial em torno dos cordões de solda, tomou-se cuidado para utilizar parâmetros de usinagem constantes para todos os CPs, já que se sabe que estes influenciam no TOF das ondas (BUENOS, 2010). No entanto, pelo fato de algumas chapas de aço não serem perfeitamente planas, com as extremidades apresentando um ângulo θ com a horizontal, a profundidade de usinagem não foi constante ao longo do cordão, como mostra a Figura 23.

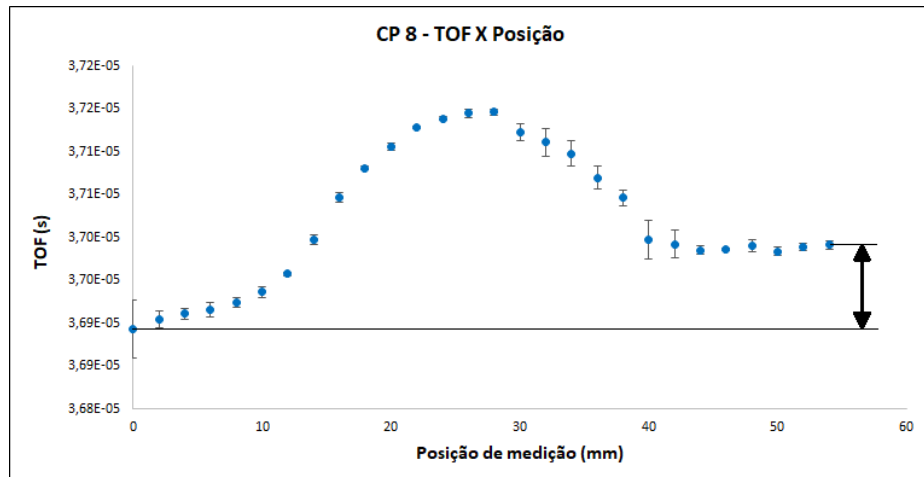
Figura 23 - Diferença de profundidade de usinagem no CP 14



Fonte: Autor (2019).

Essa diferença de profundidade resultou em TOFs diferentes nos pontos de ambos os lados do cordão. Para exemplificar essa diferença de TOF, a Figura 24 mostra o gráfico das medições de TOF realizadas no CP 8. Cada ponto do gráfico é resultado da média dos TOFs para cada posição de medição.

Figura 24 - Diferença de TOF em função da diferença na profundidade de usinagem

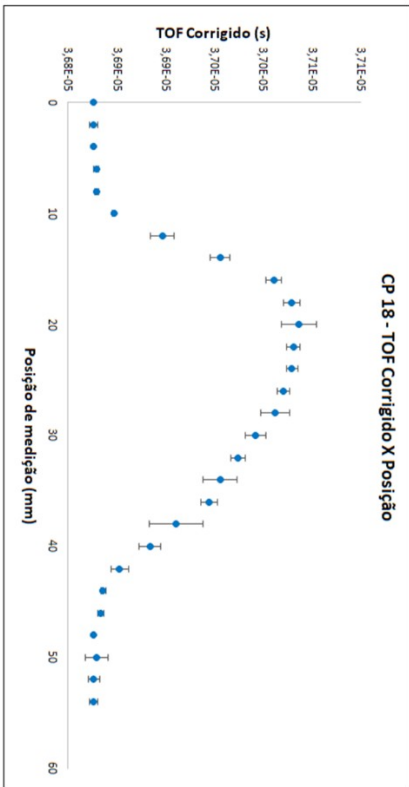
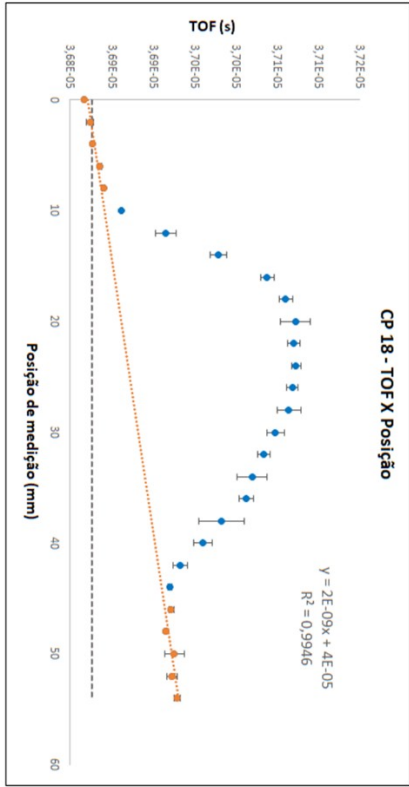
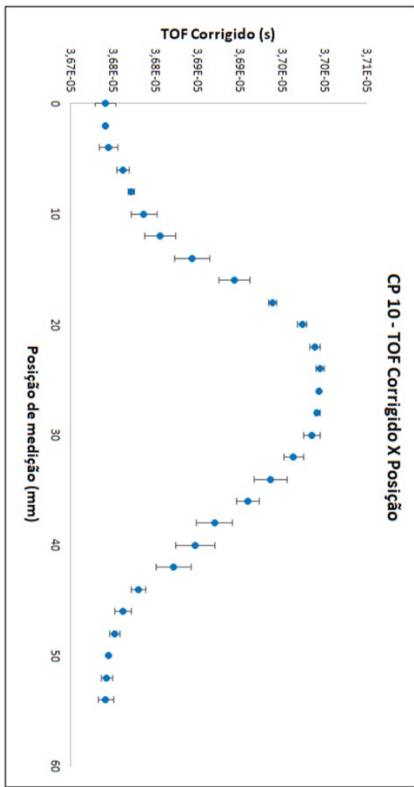
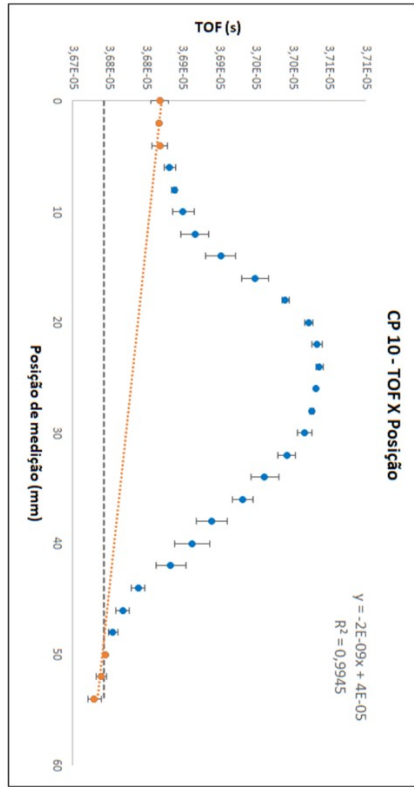


Fonte: Autor (2019).

Para corrigir essa diferença de profundidade, considerou-se que a variação na profundidade de usinagem ocorreu de modo linear no sentido transversal ao cordão de solda. Além disso, considerou-se que o TOF varia linearmente com profundidade de usinagem, de acordo com experimentos feitos por Buenos (2010).

Selecionando-se como exemplo as medições feitas nos cordões 10 e 18, a Figura 25 mostra como foi feita a correção do TOF em função da profundidade: foram selecionados pontos distantes e de ambos os lados do cordão de solda e traçou-se uma reta pontilhada entre eles. Em seguida, é calculada uma média para os quatro pontos mais distantes de ambos os lados do cordão e seleciona-se apenas a menor média, indicada nos gráficos pela reta tracejada. Por fim, todos os pontos são deslocados verticalmente em função das suas respectivas distâncias entre as retas pontilhada e tracejada. Os pontos de cada gráfico indicam a média e o desvio padrão para os valores de TOF obtidos em cada posição de medição.

Figura 25 - Correção do TOF em função da diferença de profundidade de usinagem

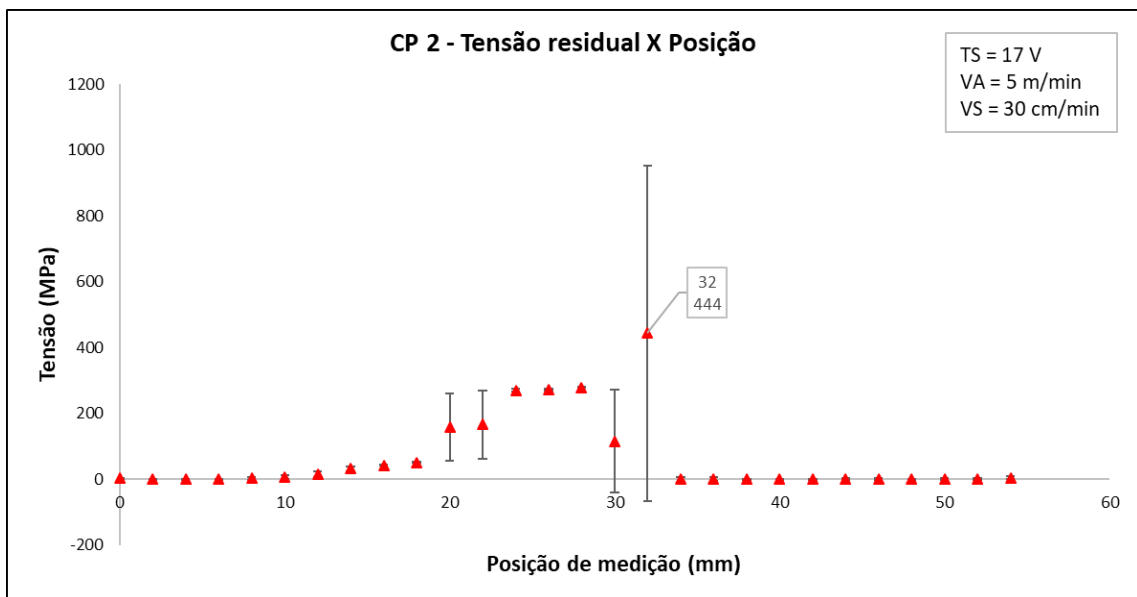
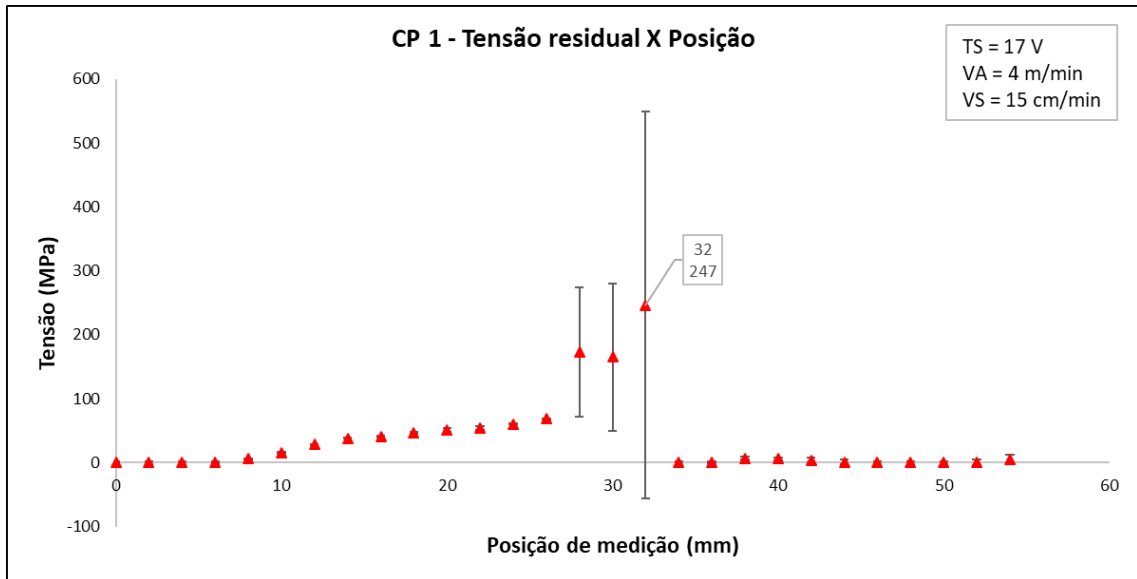


Fonte: Autor (2019).

4.2 RESULTADO DAS MEDIÇÕES DE TENSÃO RESIDUAL

Após os TOFs serem corrigidos em função da diferença de temperatura e de profundidade de usinagem entre as medições, é possível convertê-los em tensão residual. A Figura 26 mostra os perfis de tensão residual em pontos igualmente espaçados no sentido transversal ao cordão de solda dos CPs 1 e 2. Além disso, os gráficos ainda apresentam o valor da tensão e da posição do ponto de maior tensão e, no canto superior direito, os parâmetros de soldagem utilizados em cada cordão de solda: tensão de soldagem (TS), velocidade de avanço (VA) e velocidade de soldagem (VS).

Figura 26 - Perfil de tensão residual dos CPs 1 e 2

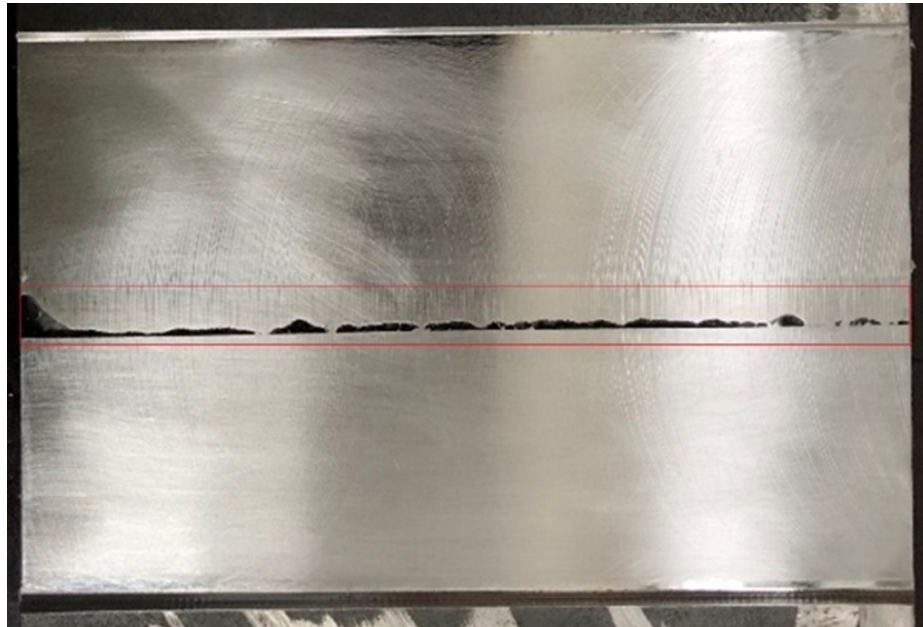


Fonte: Autor (2019).

Pelos gráficos da Figura 26, é possível perceber pontos de tensão residual média com valores bem mais altos comparando com os demais pontos. Outros CPs, além dos CPs 1 e 2, apresentaram mordeduras, como mostra a Figura 6, do CP de número 6. De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2011), mordedura é um tipo de descontinuidade comum em soldas e é originada quando o metal de base é fundido na margem do cordão sem ocorrer o

enchimento desta área, resultando na formação de uma reentrância nessa região. A consequência desse tipo de defeito é a concentração de tensões na região e a redução da área útil e da resistência à fadiga da solda. Além disso, os altos valores de desvio padrão desses pontos indicam que pode haver um grande erro associado a medição de tensão nessa região utilizando o método proposto nesse trabalho, visto que o defeito impossibilita o correto acoplamento da probe sobre a superfície do CP e, conseqüentemente, o acoplante não exerce a função corretamente.

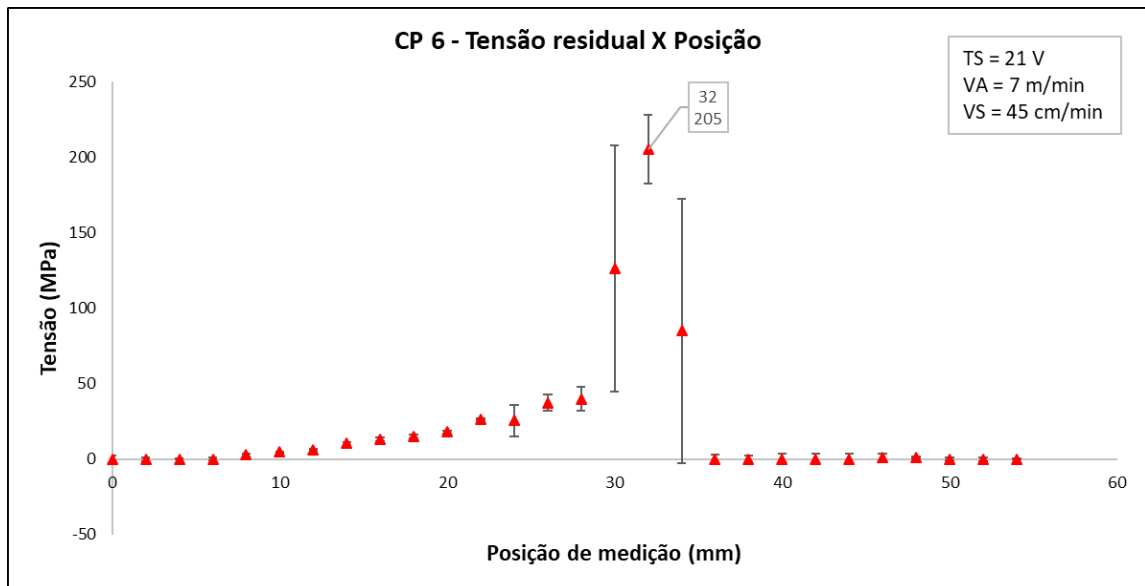
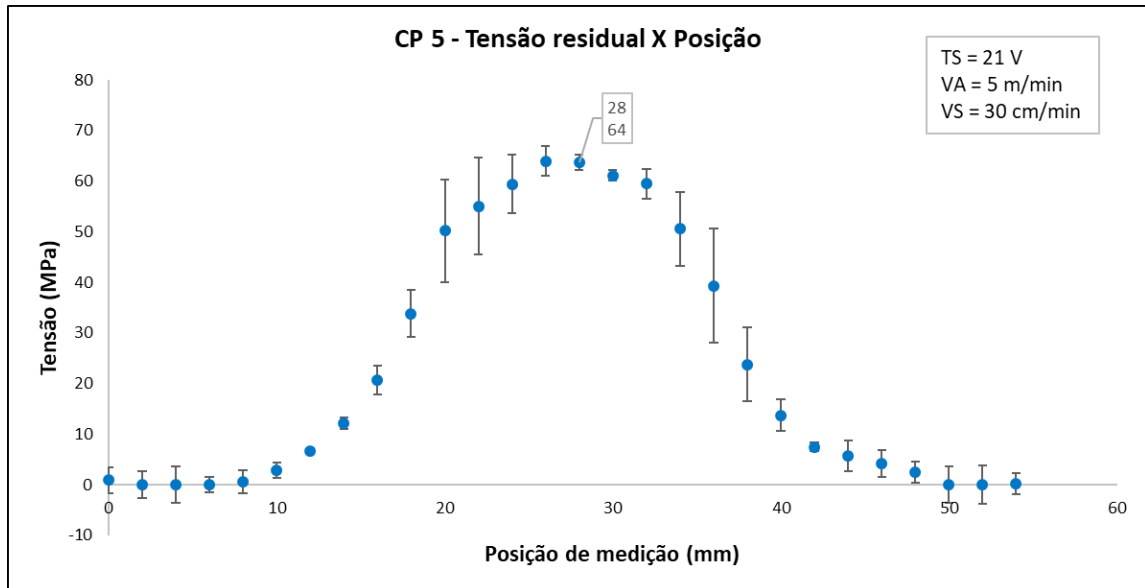
Figura 27 - Mordedura no cordão de solda do CP 6.



Fonte: Autor (2019).

A presença de mordeduras justifica o aparecimento de altos valores de tensão residual na região da mordedura nos gráficos da Figura 26 dos CPs 1 e 2. A Figura 28 mostra os perfis de tensão residual ao longo do cordão de solda dos CPs 5 e 6.

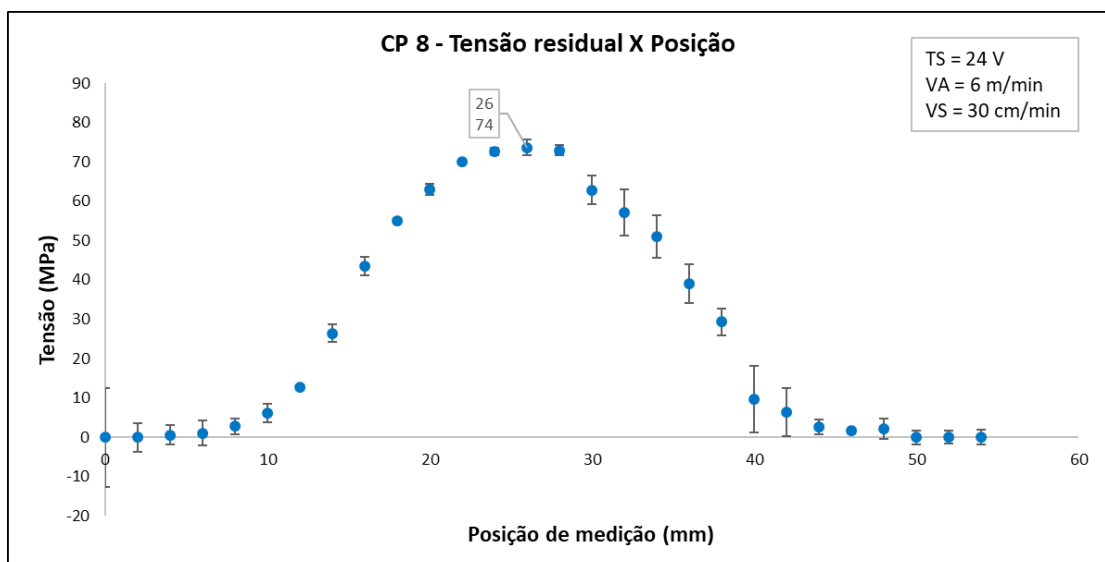
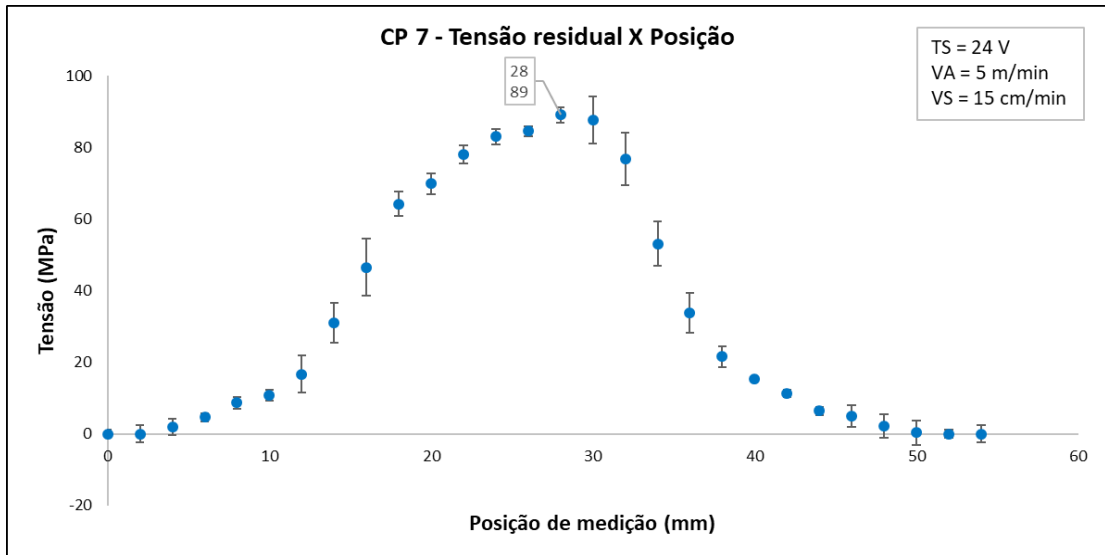
Figura 28 - Perfil de tensão residual dos CPs 5 e 6



Fonte: Autor (2019).

Pelo gráfico do CP 5 da Figura 28, é possível notar que os valores de tensão geraram um perfil esperado de distribuição de tensão ao longo do cordão, conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2011), com um aumento de tensão residual na medida em que a posição de medição se aproxima do ponto central do cordão. Já para o CP 6, foram obtidos três pontos de tensão média com desvios padrão muito mais altos em comparação com os demais. Esses pontos também são justificados pela presença de mordeduras visíveis a olho nu. A Figura 29 mostra os gráficos de tensão residual em função da posição de medição para os CPs 7 e 8.

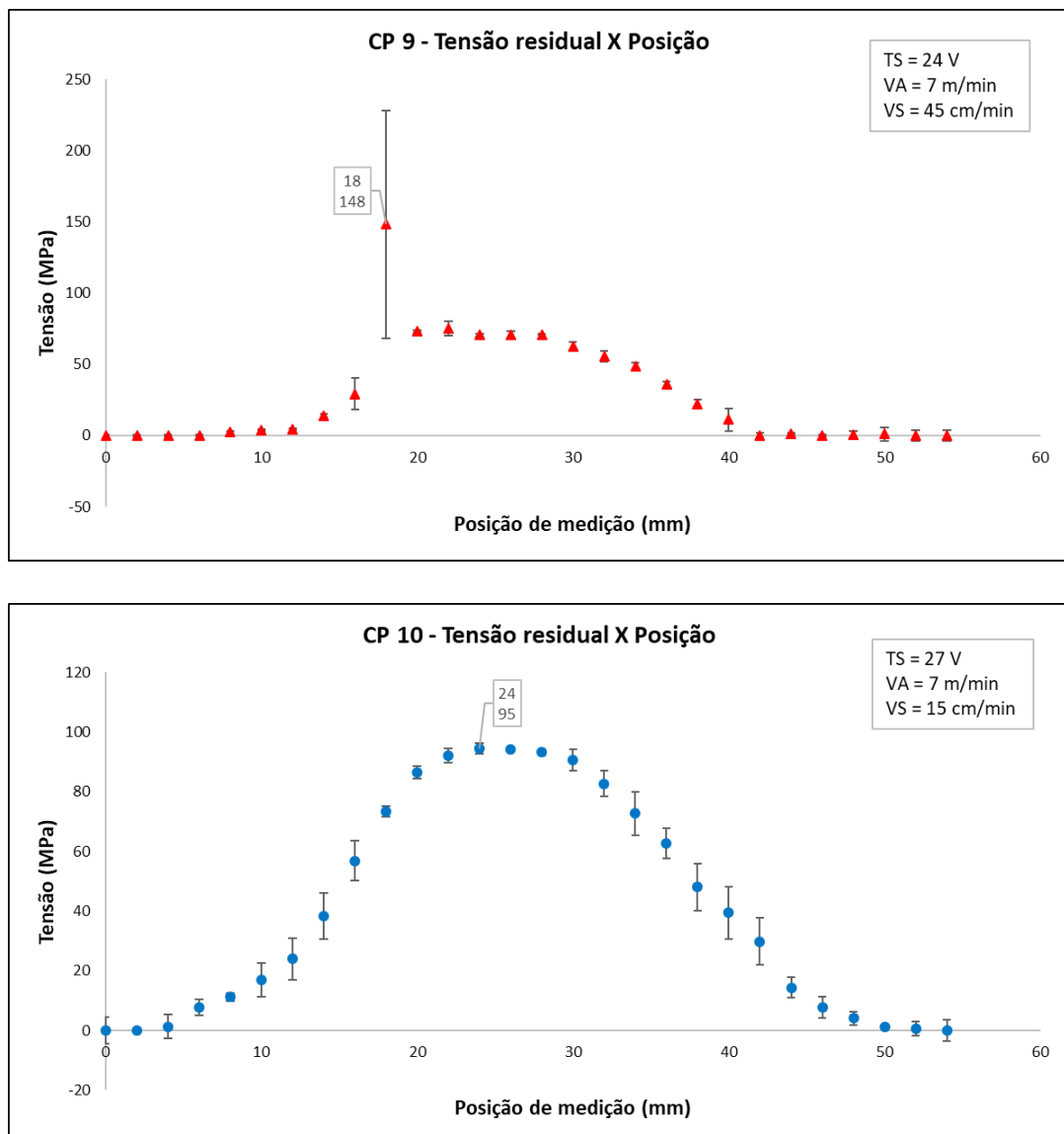
Figura 29 - Perfil de tensão residual dos CPs 7 e 8



Fonte: Autor (2019).

No caso dos gráficos dos CPs 7 e 8 da Figura 29, percebe-se um perfil de tensão conforme o esperado para ambos os CPs (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). Os dados dos CPs 9 e 10 são mostrados na Figura 30, usando a mesma abordagem da Figura 29.

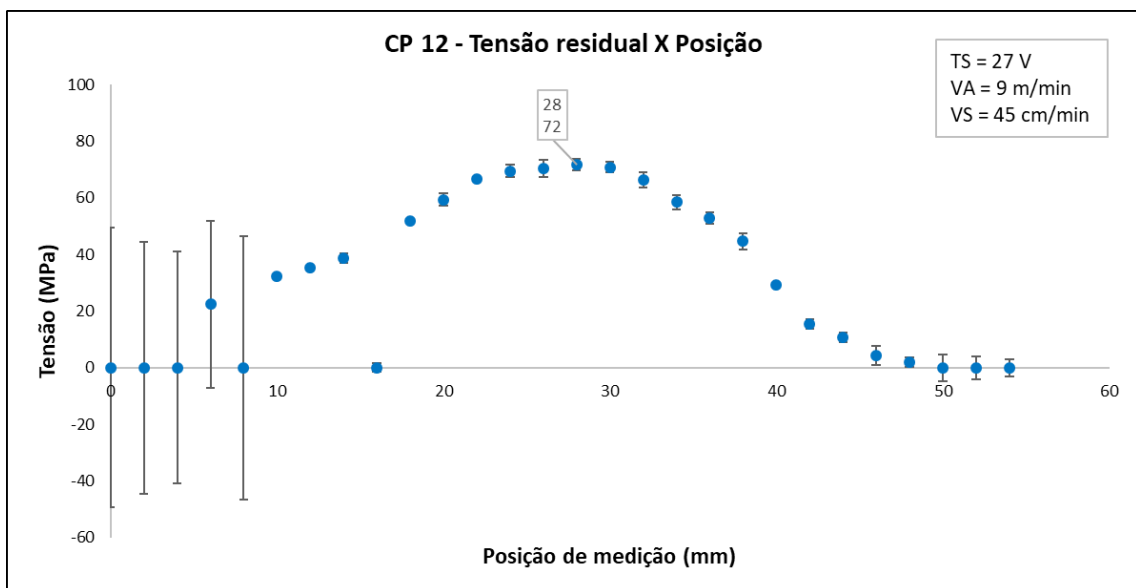
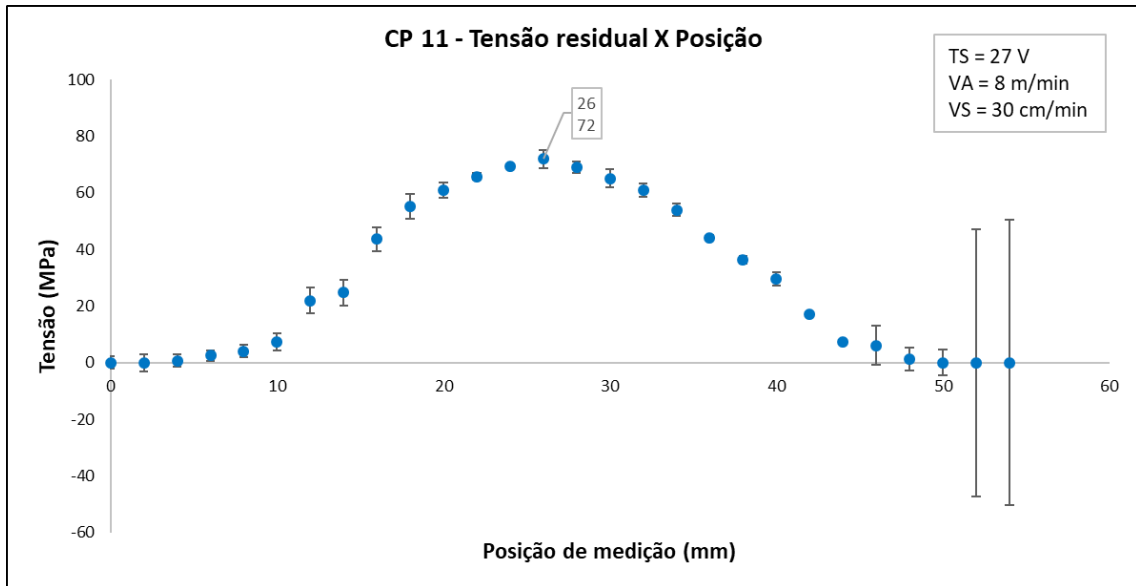
Figura 30 - Perfil de tensão residual dos CPs 9 e 10



Fonte: Autor (2019).

Nota-se um ponto de elevada tensão média e desvio padrão no gráfico do CP 9 da Figura 30. Esse ponto localiza-se na posição da mordedura do CP 9, justificando seu aparecimento. Por outro lado, o gráfico da Figura 30 para o CP 10 mostra uma curva esperada de tensão residual em um cordão de solda em função da distância do centro do cordão. De modo semelhante a Figura 30, na Figura 31 encontram-se os gráficos dos CPs 11 e 12.

Figura 31 - Perfil de tensão residual dos CPs 11 e 12

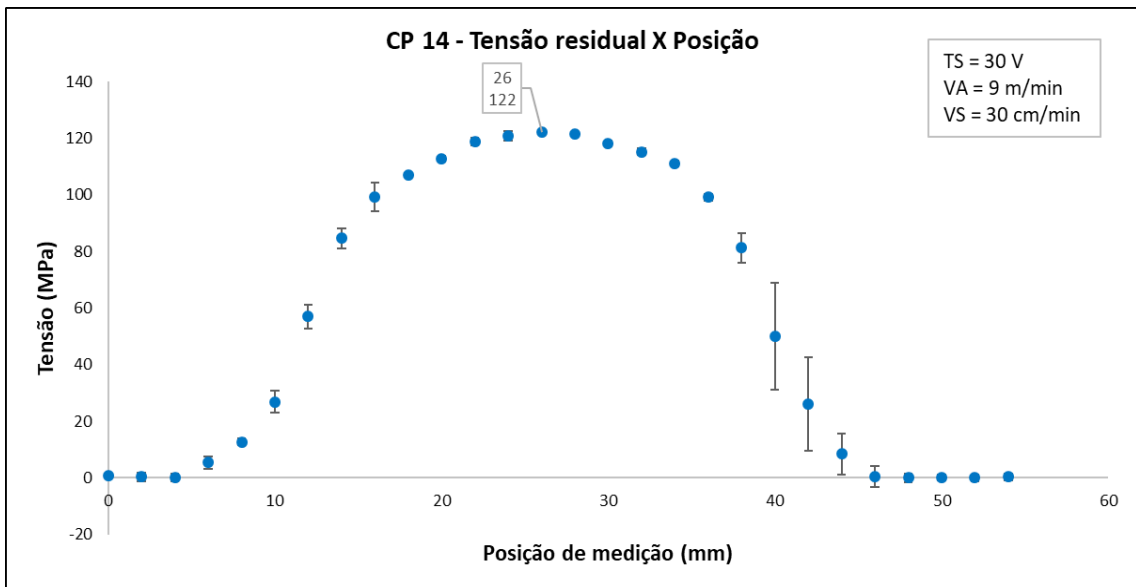
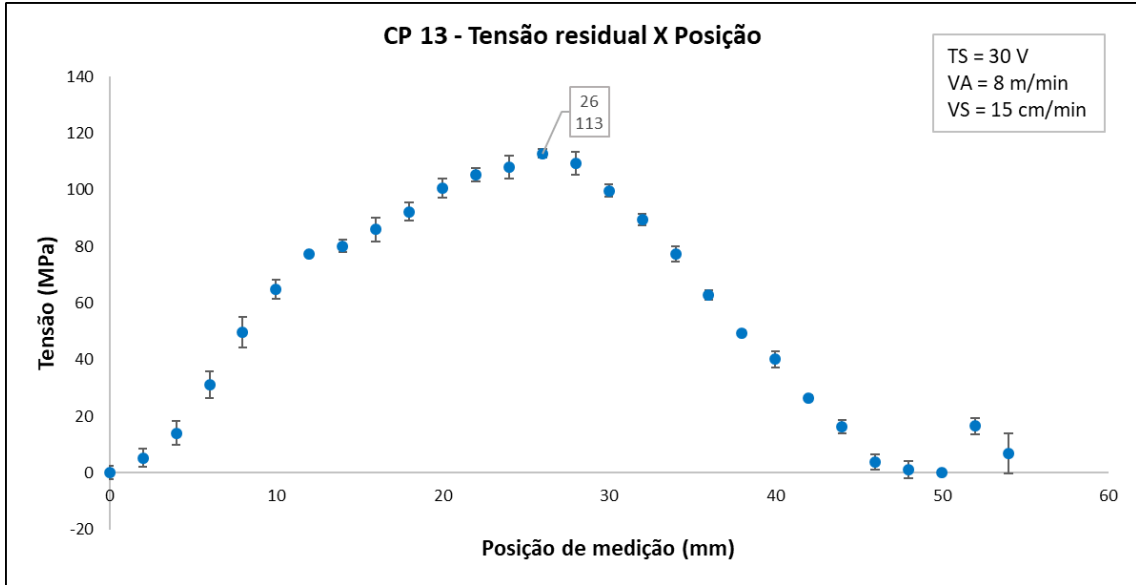


Fonte: Autor (2019).

Nos gráficos dos CPs 11 e 12 mostrados na Figura 31, são encontrados pontos, afastados do centro do cordão de solda, com elevados valores de desvio padrão, significando que o sistema de medição proposto no trabalho não conseguiu determinar com exatidão o

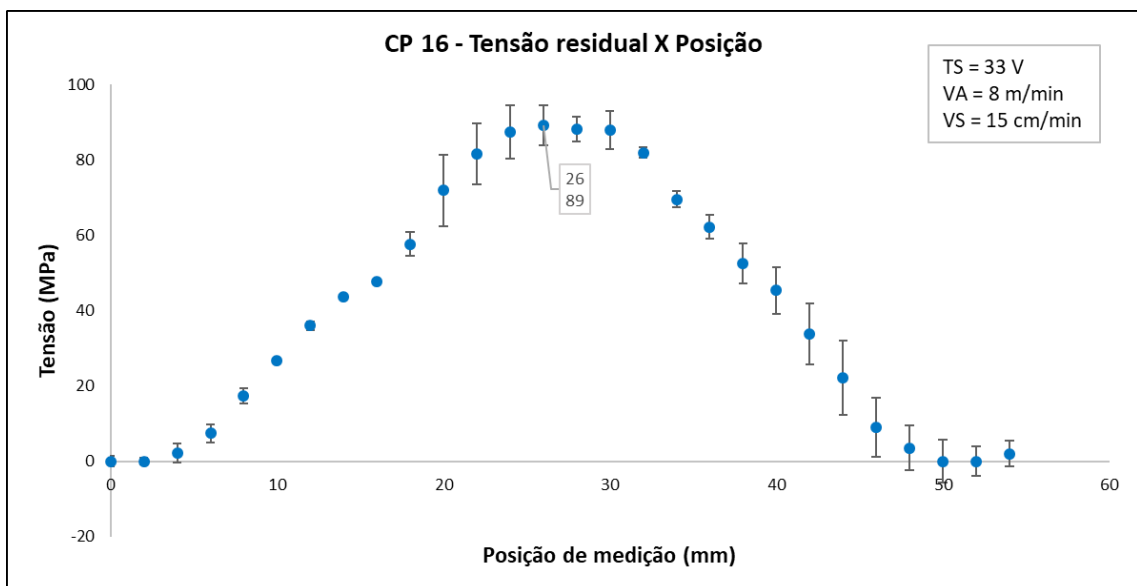
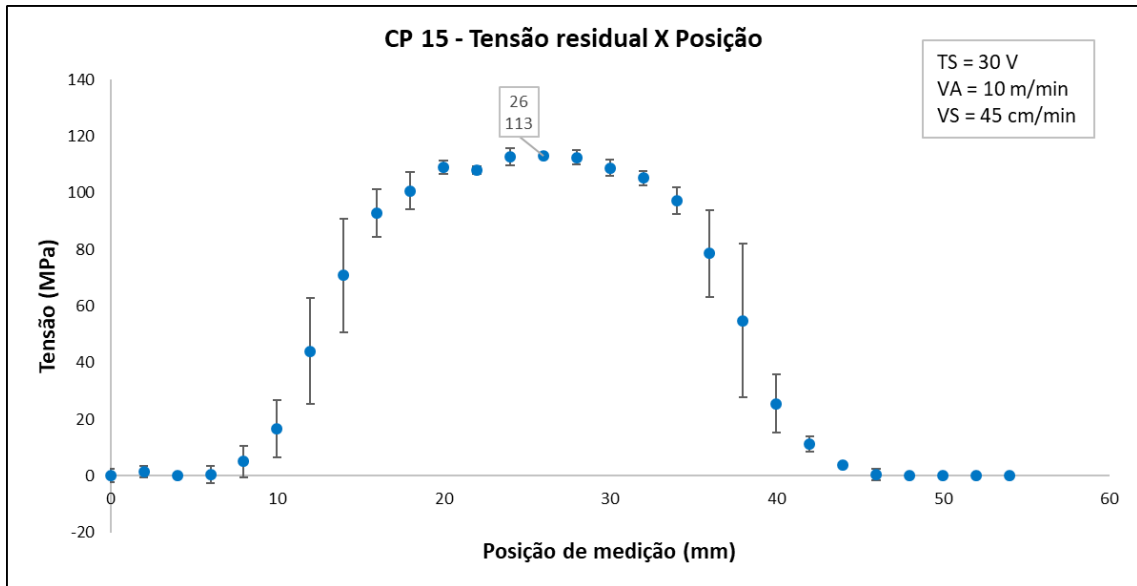
valor de tensão residual nessas regiões. Considerando que não foi possível detectar nenhum tipo de defeito nessas regiões pela realização de inspeção visual, o motivo pode estar associado à presença de descontinuidades totalmente internas nessas regiões. Como exemplo, podem ser citados as trincas, que são fortes concentradores de tensão e são consideradas o tipo de descontinuidade mais grave em soldagem (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). Outro tipo de abordagem, diferente da proposta nesse trabalho, deve ser utilizada para examinar detalhadamente essas regiões, com o intuito de conhecer a causa do alto desvio padrão entre as medições. As Figuras 32 e 33 mostram os gráficos de tensão residual em função da posição de medição para os CPs 13, 14, 15 e 16, que apresentaram um comportamento desejável conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2011).

Figura 32 - Perfil de tensão residual dos CPs 13 e 14



Fonte: Autor (2019).

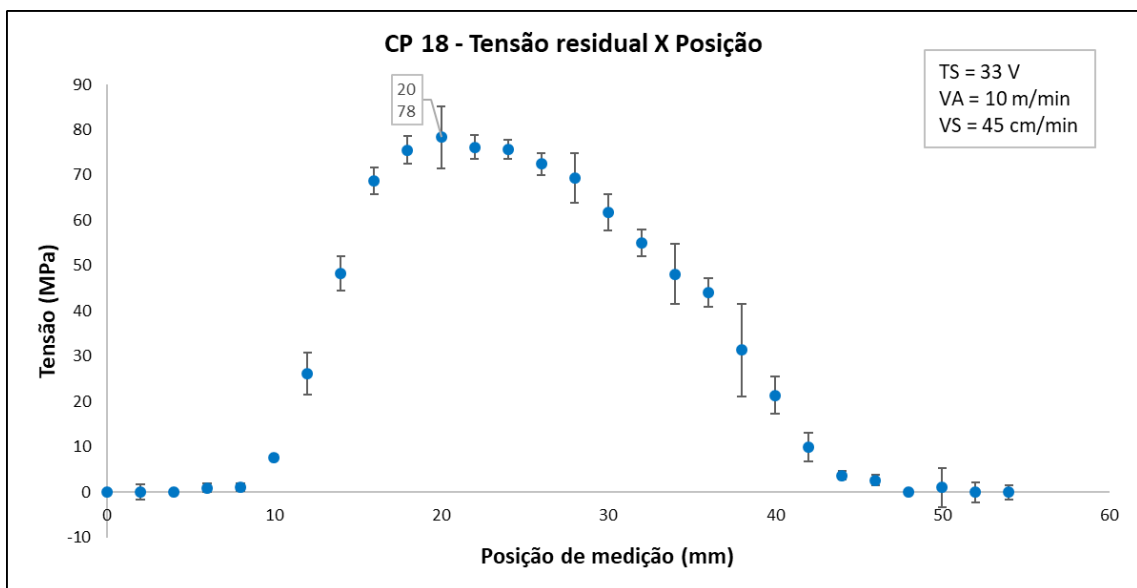
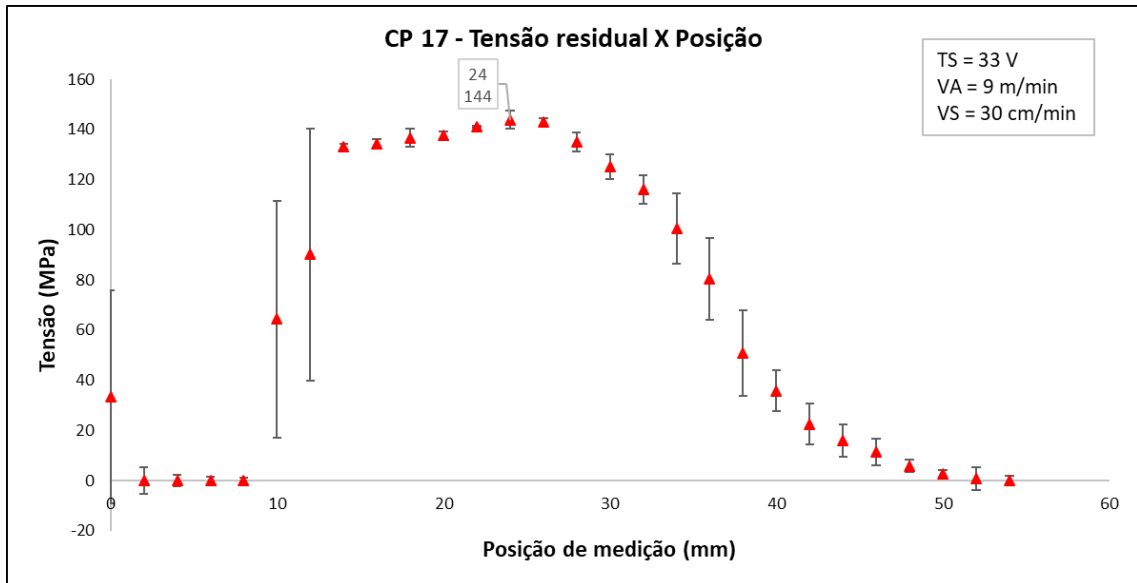
Figura 33 - Perfil de tensão residual dos CPs 15 e 16



Fonte: Autor (2019).

Os perfis de tensão residual para os CPs 17 e 18 são mostrados na Figura 34. É possível observar que, no gráfico do CP 17, existem pontos com alto desvio padrão comparando os demais desvios padrão dos pontos do gráfico. Novamente, o motivo consiste na presença de mordedura visível a olho nu no CP 17. Além disso, tem-se um perfil esperado de tensão residual para o cordão de solda do CP 18 como mostra o gráfico da Figura 34.

Figura 34 - Perfil de tensão residual dos CPs 17 e 18



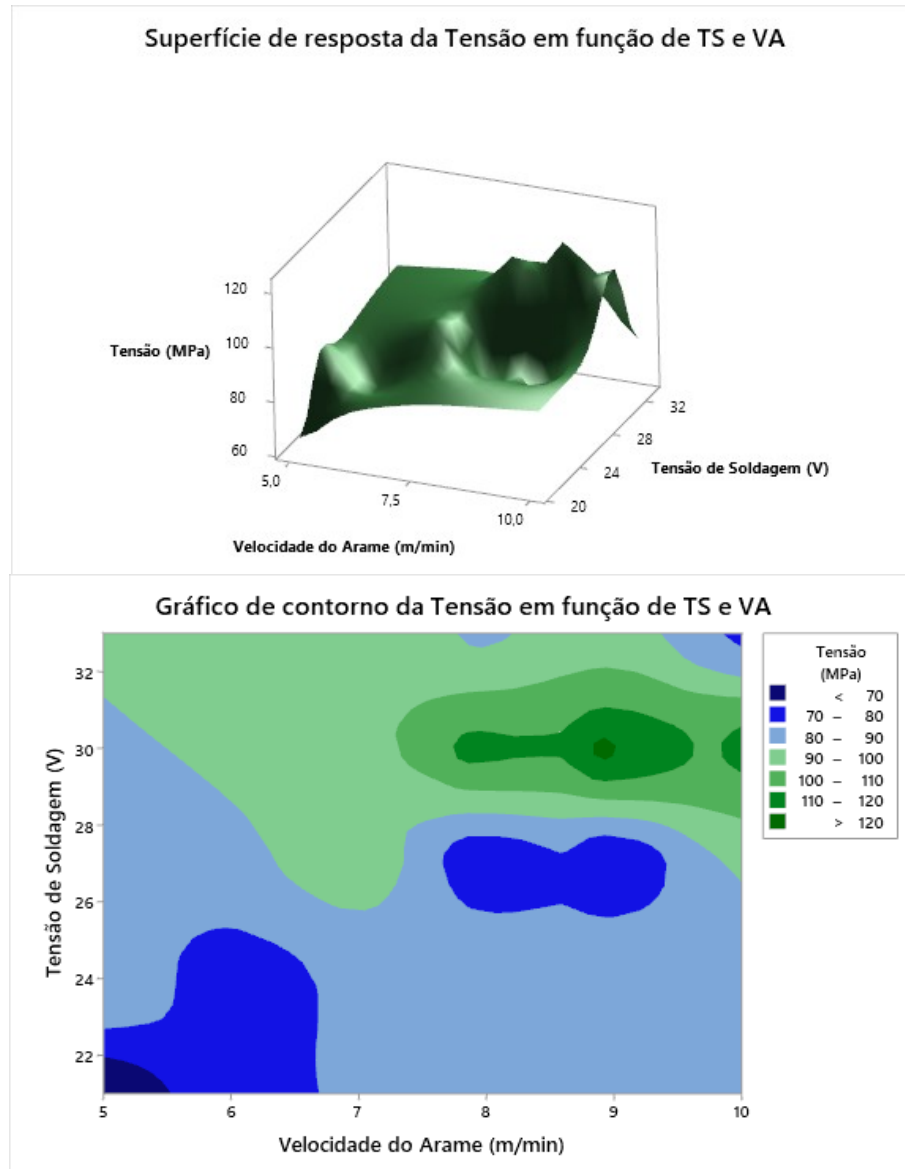
Fonte: Autor (2019).

Da Figura 28 a 34, são mostrados com pontos triangulares os gráficos dos CPs que apresentaram mordeduras que interferiram diretamente nas medições de tensão. Os demais gráficos são mostrados com pontos circulares.

4.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA TENSÃO RESIDUAL

Para a análise da influência dos parâmetros de soldagem na tensão residual dos CPs, foram desconsiderados os CPs que apresentaram mordeduras visíveis a olho nu. Com os parâmetros de soldagem e o valor máximo de tensão residual média em cada CP, é possível verificar a influência desses parâmetros na tensão residual por meio de superfícies de respostas (gráficos de superfície) e gráficos de contorno. Com o auxílio do *software* Minitab 19, a Figura 35 mostra a superfície de resposta e o gráfico de contorno, da tensão residual em função da tensão de soldagem (TS) e da velocidade do arame (VA).

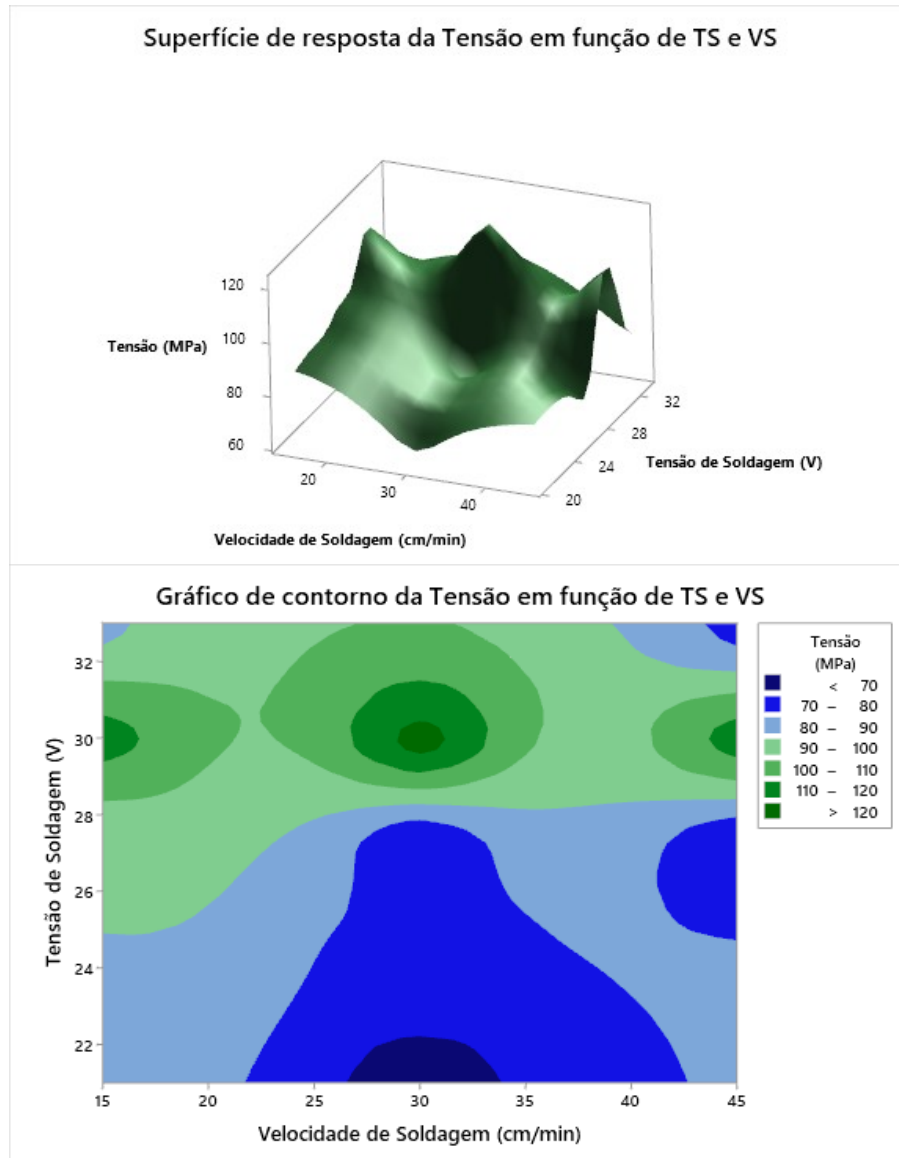
Figura 35 - Superfície de resposta e gráfico de contorno da tensão pela TS e VA



Fonte: Autor (2019).

Pela Figura 35, observa-se um aumento nos valores de tensão residual associado ao aumento da tensão de soldagem e da velocidade do arame até tensões de soldagem de 30 V, sendo após notada uma diminuição na tensão residual para tensões de soldagem de 33 V. De maneira semelhante a Figura 35, tem-se a influência da tensão de soldagem (TS) e da velocidade de soldagem (VS) na tensão residual, mostrado na Figura 36 pela superfície de resposta e pelo gráfico de contorno.

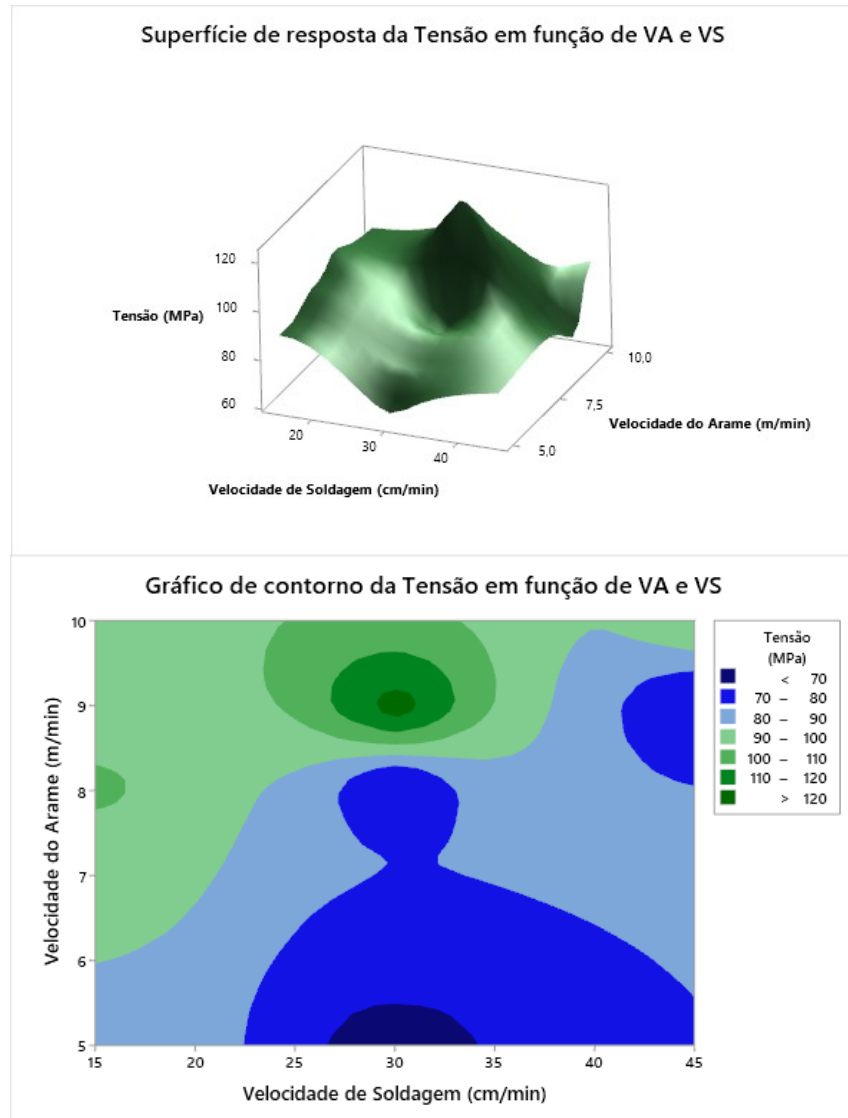
Figura 36 - Superfície de resposta e gráfico de contorno da tensão pela TS e VA



Fonte: Autor (2019).

Por meio da Figura 36, é possível perceber um aumento da tensão residual devido ao aumento da tensão de soldagem, de até 30 V. Não houve variações significativas de tensão residual em função da diferença de velocidade de soldagem utilizando valores constantes de tensão de soldagem. Por fim, na Figura 37, com a mesma abordagem das Figura 35 e 36, são apresentados os valores de velocidade de soldagem e velocidade do arame em função da tensão.

Figura 37 - Superfície de resposta e gráfico de contorno da tensão pela VA e VS



Fonte: Autor (2019).

Pela Figura 37, verifica-se um aumento na tensão residual com a elevação da velocidade do arame e com a diminuição da velocidade de soldagem.

5 CONCLUSÕES E SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho analisou as tensões residuais em diferentes juntas soldadas pelo processo de soldagem a arco elétrico com atmosfera de proteção gasosa (GMAW). Os cordões de solda foram gerados com diferentes valores de tensão de soldagem, velocidade de alimentação do arame e velocidade de soldagem. Os valores de tensão residual foram determinados através de medições de tempo de percurso (TOF) de ondas L_{CR} em CPs de aço ASTM A36.

Nesse trabalho, foram realizadas medições de TOF das ondas L_{CR} em diferentes temperaturas, resultando em um gráfico que mostra que o TOF varia linearmente com a temperatura, comportamento também verificado por Andrino (2007), Buenos (2014), Santos (2007) e Fraga (2007). O modelo linear proposto foi satisfatório, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99. Sabe-se que quanto mais próximo esse coeficiente estiver do valor 1, melhor será a aproximação.

Foram feitas medições de tensão residual no sentido longitudinal ao cordão de solda variando-se a distância no sentido transversal ao cordão, de modo a obter-se um perfil de distribuição de tensão ao longo do sentido transversal da solda. Nesse caso, os resultados mostraram que a presença de discordâncias possui uma grande influência no TOF das ondas L_{CR} no local do defeito. Foi observado um aumento significativo de tensão residual na região onde localizam-se as mordeduras nos CPs, já que esses defeitos, conforme Marques, Modenesi e Bracarense (2011), são altos concentradores de tensão. Além disso, em alguns CPs, foram detectadas grandes variações de tensão em regiões afastadas da solda onde não haviam defeitos superficiais aparentes, dando indícios da presença de defeitos interno nas regiões examinadas. Em regiões próximas ao cordão de solda, quanto mais próximo do centro do mesmo, maiores foram os valores de tensão residual obtidos nas medições, conforme o esperado (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Além disso, pelos valores de tensão residual máxima obtidos em cada CP, foi possível analisar a influência dos parâmetros de soldagem na tensão residual máxima dos cordões de solda. Até uma tensão de soldagem de 30 V, verificou-se um aumento na tensão residual máxima com o aumento da tensão de soldagem. Além disso, foi observado um aumento na tensão residual com a diminuição da velocidade de soldagem e a elevação da velocidade do arame.

As recomendações para trabalhos futuros estão associadas a aplicação de ondas L_{CR} para medição de tensão:

- Realizar medições de tensão residual no sentido transversal ao cordão de solda dos CPs;
- Utilizar transdutores de diferentes frequências para a geração de perfis de distribuição de tensão residual em função da espessura dos CPs;
- Realizar medições de tensão aplicada nos CPs, usando um mecanismo de aplicação de força;
- Aplicar o estudo em outros materiais e outros processos de soldagem, variando parâmetros de soldagem diferentes dos parâmetros estudados nesse trabalho;
- Validar os resultados empregando-se outra técnica de medição de tensão residual tradicionalmente empregada nesses casos.

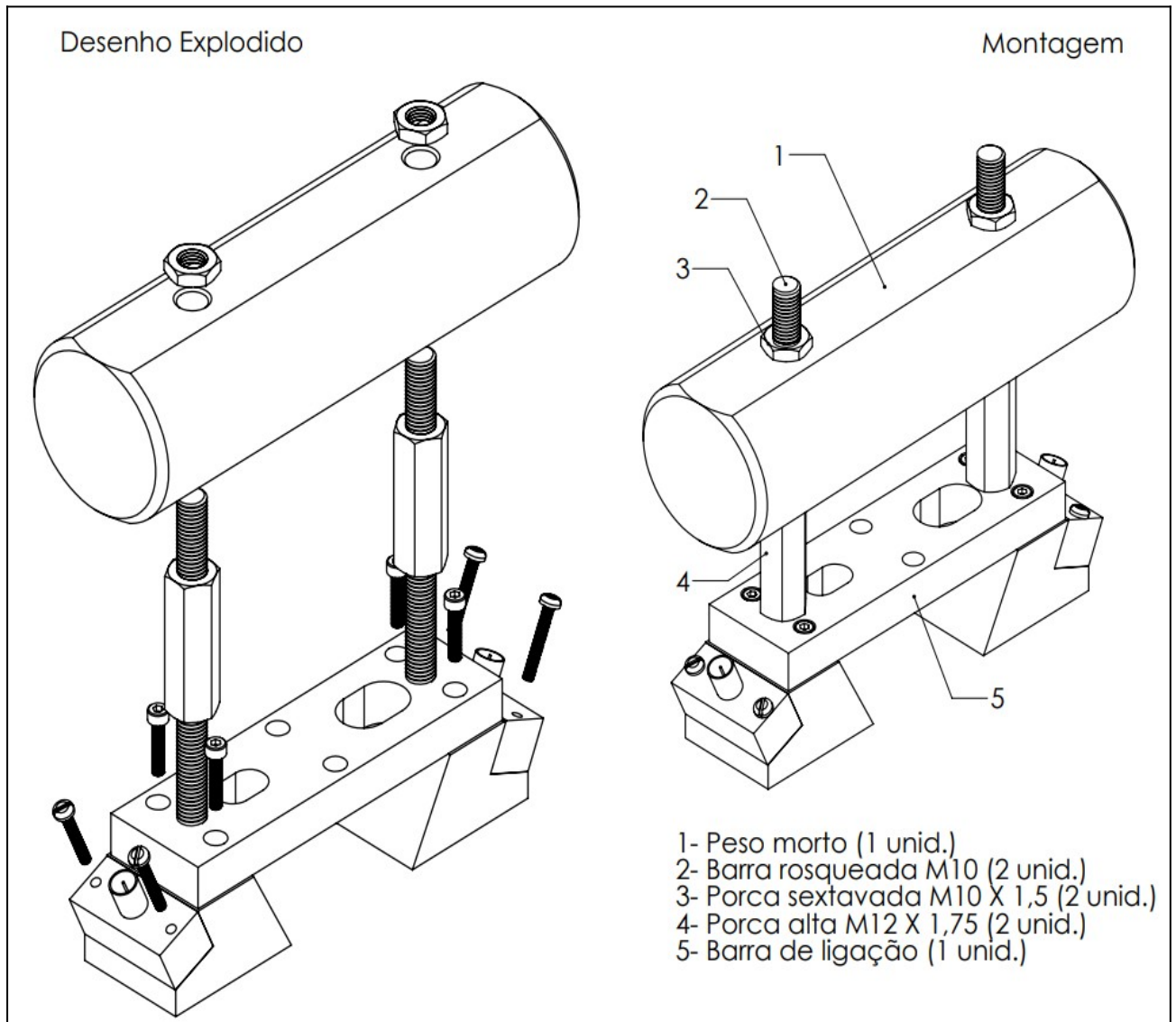
REFERÊNCIAS

- ANDRINO, M. H. **Avaliação de Tensões Residuais em Soldas de Dutos Utilizando o Efeito Acustoelástico**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- ANDRINO, M. H. **Aplicação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas para a Medição de Tensões em Dutos**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- ASTM A36. **Standard Specification for Carbon Structural Steel**. Annual Book of ASTM Standards, USA, 2008.
- BRAY, D. E.; TANG, W. **Subsurface stress evaluation in steel plates and bars using the L_{CR} ultrasonic wave**. Nuclear Engineering and Design 207, p. 231 – 240, 2001.
- BUENOS, A. A. **Avaliação de Tensão Residual gerada pelo Processo de Usinagem utilizando Acustoelasticidade**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- BUENOS, A. A. **Influência do Tamanho de Grão e Textura nas Medições de Propagação de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas L_{CR}** . Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- BUENOS, A. A.; JUNIOR, A. A. S.; RODRIGUES, A. R.; TOKIMATSU, R. C. **Application of acoustoelasticity to measure the stress generated by milling in ASTM A36 steel plates**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2013.
- CHAKI, S.; KE, W.; DEMOUVEAU, H. **Numerical and Experimental Analysis of the Critically Refracted Longitudinal Beam**. Ultrasonics, v. 53, p. 65-69, 2012.
- EKMEKÇI, B.; EKMEKÇI, N.; TEKKAYA, A. E. ERDEN, A. **Residual Stress Measurement with Layer Removal Method**. Proceedings of the First Cappadocia International Mechanical Engineering Symposium, Cappadocia, Turkey, 2004.
- ENSMINGER, D.; BOND, L. J. **Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications**. Third Edition. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- FRAGA, R. S. **Avaliação da Profundidade de Penetração de Ondas Longitudinais Criticamente Refratadas**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- HUGHES, D. S.; KELLY, J. L. **Second-order elastic deformation of solids**. Physical Review, v.92, n.4, p.1145-1149, 1953.
- JAVADI, Y.; KROLCZYK, G. M.; HLOCH, S. **Evaluation of Hoop Residual Stress Variations in the Thickness of Dissimilar Welded Pipes by Using the L_{CR} Ultrasonic Waves**. Tehnički vjesnik 23, p. 329-335, 2016.
- LEITE, P. G. P. **Ensaio não destrutivo**. Associação Brasileira de Metais, São Paulo 1984.
- PEREIRA JUNIOR, P. **Influência da Anisotropia Gerada por Laminação sobre a Medição de Tensões por Ultrassom em Ligas de Alumínio 7050**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Editora UFMG, 3ª edição atualizada, 2011.

- PEI, N.; BOND, L. J. **Analysis of Critically Refracted Longitudinal Waves**. AIP Conference Proceedings, v. 1650, p.1805-1814, 2015.
- RUUD, C. O. Residual Stress Measurement. In: TOTTEN, G; HOWES, M.; INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. USA: ASM International, p. 99-117, 2002.
- SADEGUI, S.; NAJAFABADI, M. A.; JAVADI, Y.; MOHAMMADISEFAT, M. **Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates**. Material and Design 52, 2013.
- SANTOS, R. A. **Efeito da Temperatura sobre a Medição de Tensão por Ondas L_{CR} em Aços API 5L X70**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG**. Artliber Editora Ltda, São Paulo, 2008.
- SOARES, A. C. C. **Avaliação dos efeitos da plasticidade na medição de tensões residuais pela técnica do furo cego**. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2003.
- SUE, J. A; SCHAJER, G. S. Stress Determination in Coatings. In: TOTTEN, G; HOWES, M.; INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. USA: ASM International, p. 118-124, 2002.
- ZIENTARSKI, R. R. **Análise de Influência dos Parâmetros de Soldagem a Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa (GMAW) nas Propriedades Mecânicas e Microestruturais do Aço ASTM A36**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia Mecânica, Santa Maria, 2019.

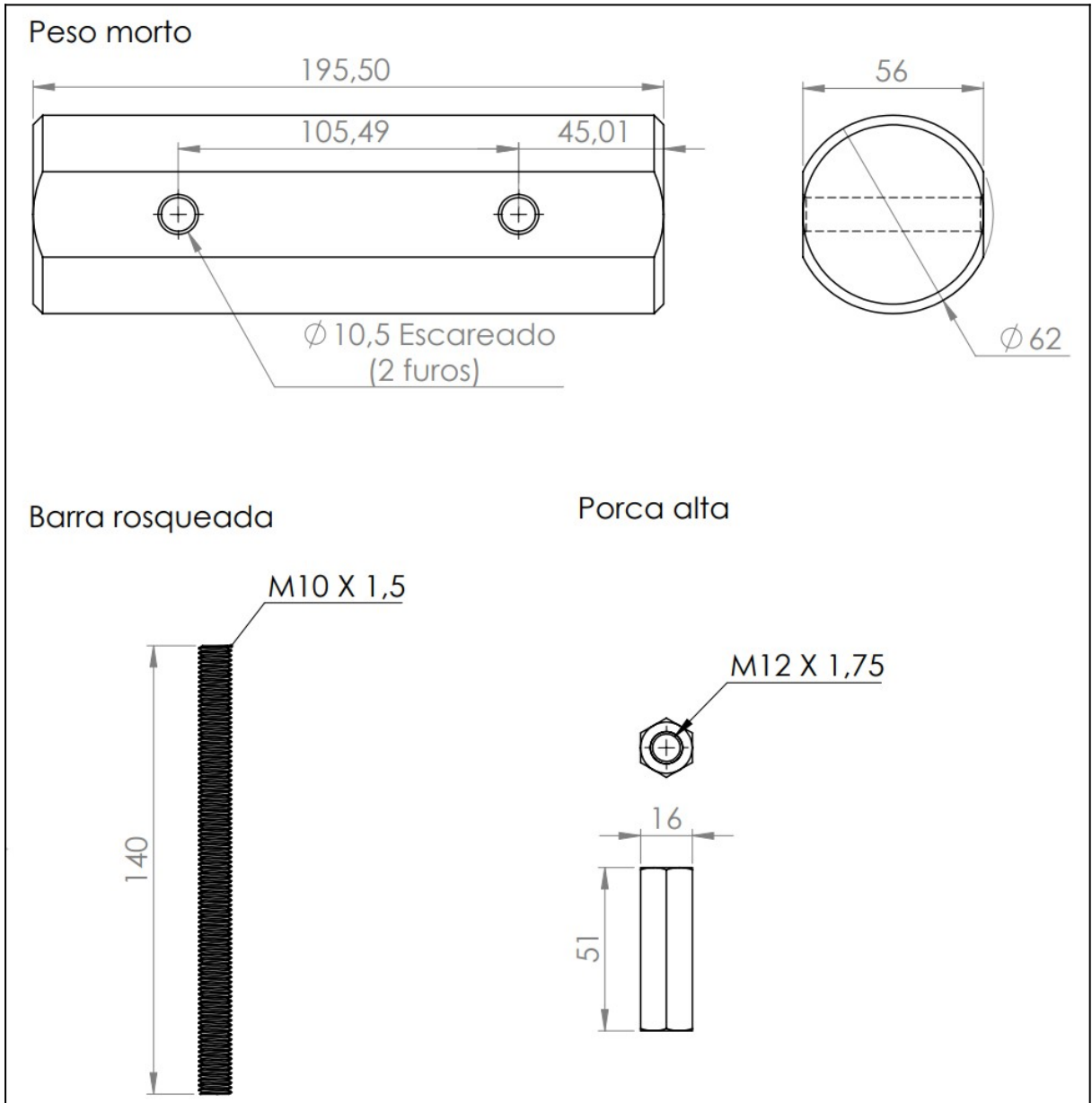
APÊNDICE A – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO CONJUNTO PROBE

Figura 38- Conjunto probe completo e seus elementos



Fonte: Autor (2019).

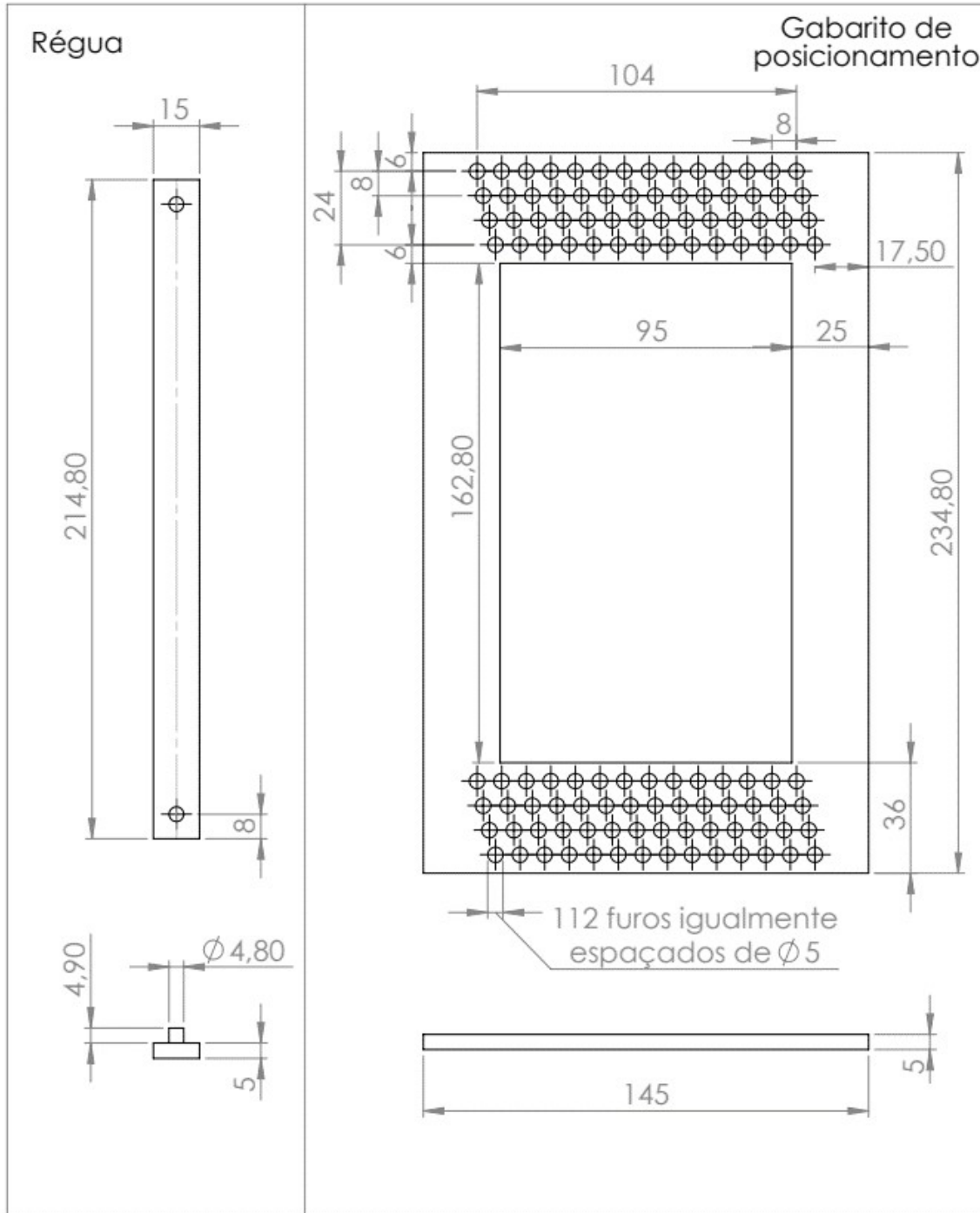
Figura 39 - Desenhos do peso morto, barra rosqueada e porca alta sextavada com dimensões em mm



Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE B – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO GABARITO DE POSICIONAMENTO DA PROBE

Figura 40 - Régua e gabarito de posicionamento com dimensões em mm



Fonte: Autor (2019).