



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTÉRFANO EMERSON DE MORAIS SILVA

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NOS NÍVEIS DE DISTORÇÕES EM
JUNTAS DE TOPO SOLDADAS PELO PROCESSO ELETRODO REVESTIDO.**

MOSSORÓ

2019

ESTÉRFANO EMERSON DE MORAIS SILVA

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NOS NÍVEIS DE DISTORÇÕES EM
JUNTAS DE TOPO SOLDADAS PELO PROCESSO ELETRODO REVESTIDO.**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga

MOSSORÓ

2019

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

S586i SILVA, ESTÉRFANO EMERSON DE MORAIS.
INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NOS NÍVEIS
DE DISTORÇÕES EM JUNTAS DE TOPO SOLDADAS
PELO PROCESSO ELETRODO REVESTIDO. /
ESTÉRFANO EMERSON
DE MORAIS SILVA. - 2019. 66 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-
árido, Curso de Engenharia Mecânica, 2019.

I. Soldagem. 2. Energia de soldagem. 3. Distorções. 4. Tensões
Residuais. I. Fraga, Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira, orient. II.
Título

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE SOLDAGEM NOS NÍVEIS DE DISTORÇÕES EM
JUNTAS DE TOPO SOLDADAS PELO PROCESSO ELETRODO REVESTIDO.**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Graduação em
Engenharia Mecânica

Defendida em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga - CE - UFERSA
Presidente

Prof. Dr. Fabrício José Nobrega Cavalcante – CE - (UFERSA)
Membro Examinador

Prof.^a Liliane Ferreira de Araújo Almada– PPGCEM - (UFERSA)
Membro Examinador

O aumento do conhecimento é como uma esfera dilatando-se no espaço: quanto maior a nossa compreensão, maior o nosso contato com o desconhecido.

(Blaise Pascal).

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai e a minha mãe...

RESUMO

A energia de soldagem afeta várias propriedades do metal de base, devido a transformações microestruturais gerando a zona afetada pelo calor (ZAC), aumento do tamanho da ZAC, como também gradientes térmicos responsáveis pelo surgimento de tensões residuais e deformações na junta. O presente trabalho tem por objetivo estudar a influência da energia de soldagem sobre as distorções de uma junta soldada. Para o desenvolvimento do presente trabalho será utilizado o processo de eletrodo revestido e corpos de prova de aço ABNT 1020 em uma junta de topo. A energia de soldagem será avaliada variando a velocidade de soldagem em dois níveis, a fim de verificar qual o comportamento em relação aos níveis de distorção. As distorções serão avaliadas por dois procedimentos, o primeiro será medir o desalinhamento angular da junta soldada sem restrição, o segundo consistirá de inicialmente soldar a junta com restrição (sem permitir que haja distorção) e em seguida retirar a restrição e medir o desalinhamento angular. Utilizou-se a estatística de análise de variância - ANOVA para análise dos resultados. Os resultados preliminares mostram que para a mesma velocidade de soldagem, o efeito da restrição é mais significativo que o efeito da velocidade de soldagem na variável de resposta. Entretanto, o efeito da variação da velocidade de soldagem, na variável de resposta, é estatisticamente significativo.

Palavras-Chave: Soldagem. Energia de soldagem. Distorções. Tensões Residuais.

Abstract

Welding energy affects various properties of the base metal, such as microstructural transformations generating the zone affected by the heat (ZAC), increase in ZAC size, also generate thermal gradients responsible for the appearance of residual stresses and deformations in the joint. The present work has the objective of studying the influence of the welding energy on the distortions of a welded joint. For the development of the present work will be used the coated electrode process and ABNT 1020 steel test bodies in a top joint. The welding energy will be evaluated by varying the welding speed in two levels, in order to verify the behavior in relation to the levels of distortion. Distortions will be assessed by two procedures, the first will be to measure the angular misalignment of welded joint without restriction, the second will consist of initially soldering the joint with restriction (without allowing distortion) and then removing the constraint and measuring the angular misalignment. Use a variance analysis statistic - ANOVA to analyze the results. Preliminary results show that for the same welding speed, the restriction effect is more significant than the welding speed, however, the effect of the variation of the welding speed on the response variable is statistically significant.

Key Words: Welding. Welding Power. Distortions. Residual Voltages.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Tipos de distorções em soldagem. (a) Contração transversal (b) Contração longitudinal (c) Distorção Angular (d) Distorção por arqueamento.....	9
FIGURA 2: Desvio angular da junta em função da posição da restrição.....	11
FIGURA 3: Influência da velocidade de soldagem na deformação angular.	12
FIGURA 4: Forma de medição de distorções	13
FIGURA 5: Distorção angular.....	14
FIGURA 6: Desvios angulares de caráter complexo.	15
FIGURA 7: Sistema de 3 barras utilizado para o entendimento do surgimento das tensões residuais.	17
FIGURA 8: Comparação entre as T.R. e a montagem de três barras (A) e as tensões residuais longitudinais formadas ao longo da direção transversal y de uma solda de topo (B).	18
FIGURA 9: Furo Cego Incremental dimensões especificadas.....	19
FIGURA 10: Ferramental para medição de T.R	20
FIGURA 11: T.R. medidas pelo método do furo cego.	21
FIGURA 12: Difração de raios X por um cristal, onde θ é o ângulo do raio incidente com a superfície, d é a distância entre dois planos paralelos e $d \cdot \sin \theta$ é a diferença de caminho seguido por duas reflexões provenientes de planos sucessivos.....	22
FIGURA 13: Fixação das rosetas para seis corpos de prova.....	24
FIGURA 14: Relação da E.S. com o nível de tensões medidas e distância do cordão de solda.	24
FIGURA 15: T.R apresentadas pela junta em função da posição.	25
FIGURA 16: Relação entre distorção e T.R.....	26
FIGURA 17: Curva de ciclo Térmico.	27
FIGURA 18: Dimensões em mm.	31
FIGURA 19: 24 peças, totalizando total de 12 juntas.	32
FIGURA 20: Vista superior: Operações de ponteameto.	33
FIGURA 21: Método de medição das distorções.....	34
FIGURA 22: Organograma do Experimento.	35

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Tempos de Soldagem.	37
TABELA 2: Velocidade de Soldagem de Cada Corpo de Prova.	38
TABELA 3: Parâmetros definidos para a realização dos experimentos.....	39
TABELA 4: Valores das distorções de cada condição de soldagem.....	41
TABELA 5: Análise de Variância.	42
TABELA 6: Matriz de Planejamento para Cálculos dos Efeitos.	42
TABELA 7: Análise ANOVA dos fatores.	46

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: Velocidades de Soldagem para cada C.P.	40
GRÁFICO 2: Dispersão entre as médias de velocidade de soldagem de cada CP.	40
GRÁFICO 3: Dispersão entre as Médias para cada Condição de Soldagem.....	41
GRÁFICO 4: Efeito da Variação da Velocidade de Soldagem na Variável de Resposta.	43
GRÁFICO 5: Efeito da Variação da Restrição Imposta na Variável de Resposta.	45
GRÁFICO 6: Representação ilustrativa, dos valores de T.R. em cada C.P.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras Latinas.

T_f	– Temperatura de fusão	[°C]
T	– Temperatura	[°C]
U	– Tensão de soldagem	[V]
I	– Corrente de soldagem	[A]
V_s	– Velocidade de soldagem	[mm/min]
Q	– Quantidade de calor	[kJ/m ²]
l	– Comprimento do cordão de solda	[mm]
h	– Coeficiente de convecção	[W/m ² K]
k	– Condutividade	[W/Cm°C]
c	– Calor específico	[J/g °C]
t	– tempo, instante	[s]
F	– Valor de significância	
Y	- Limite de escoamento.	[Mpa]

Letras Gregas

η	– Rendimento do processo de soldagem
ε	– Emissividade
ρ	- Densidade [g/cm ³]
α	– Nível de significância
α	– Coeficiente de expansão térmica.

Abreviações

TR	– Tensões Residuais
ZAC	– Zona Afetada pelo Calor

MS – Metal de Solda

CP – Corpo de Prova

ES – Energia de Soldagem [J/mm]

CS – Cordão de solda

MB – Metal de Base

PF – Planejamento Fatorial

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVOS	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	7
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
3.1 DEFORMAÇÕES DEVIDO À SOLDAGEM.	8
3.1.1 Tipos de Distorções em Função do Tipo de Junta.	8
3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM AS DISTORÇÕES.	9
3.2.1 Influência da Restrição.	10
3.2.2 Influência das Propriedades do Material de Base.	11
3.2.3 Influência da Velocidade de Soldagem.	12
3.3 PROCESSO DE MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.	13
3.3.1 Medição em Termos da Variação de Cota.	13
3.3.2 Medição em Termos Angulares.....	14
3.3.3 Distorções com Medição não Trivial.	14
3.4 TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAGEM.....	16
3.4.1 Fundamentos e Mecanismos da Geração de Deformações e Tensões Residuais.	16
3.5 MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS	18
3.5.1 Método do Furo Incremental	19
3.5.2 Difração de Raio X: Método do $\sin^2 \Psi$	21
3.6 ENERGIA DE SOLDAGEM.	22
3.7 CORRELAÇÃO ENTRE TENSÕES RESIDUAIS E DEFORMAÇÕES EM SOLDAGEM.	26
3.8 CICLOS TÉRMICOS NA SOLDAGEM E A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS.....	26
3.9 TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM SOLDAGEM.	28
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
4.1 MATERIAIS E PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	30
4.1.1 Confeção dos Corpos de Prova.....	31

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.	32
4.2.1 Preparação e Soldagem dos Corpos de Prova.	32
4.3 MEDIÇÃO DA ENERGIA DE SOLDAGEM E DAS DISTORÇÕES.....	34
4.4 PLANEJAMENTO E ESTATÍSTICAS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES DE SOLDAGEM.	37
5.2 MEDIÇÃO DAS DISTORÇÕES.	41
5.3 CÁLCULOS DOS EFEITOS PRINCIPAIS E SIGNIFICÂNCIA DE EFEITOS.	42
5.3.1 Velocidade de Soldagem.	42
5.3.2 Restrição imposta à Junta.	44
5.4 EFEITOS DE INTERAÇÃO.	46
5.5 ANÁLISE DE FATORES PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO.....	46
5.6 CARÁTER QUALITATIVO DOS VALORES DE TENSÕES RESIDUAIS.	46
6 CONCLUSÕES.....	48
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXOS	54

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos mais importantes processos mecânicos da fabricação, e está presente em quase todos os tipos de indústria. Ela apresenta muitas vantagens em relação aos processos de união, rebitagem ou parafusamento, além de ser um processo rápido e confiável. Pode ser utilizada para o revestimento em superfícies desgastadas que posteriormente venham ser submetidas a outros processos na fabricação, usinagem, corte e etc.

Dado a grande aplicação da soldagem para união em vários tipos de materiais como (Aço carbono, Aço Inox, Ligas de Alumínio etc.). É crescente a busca por aprimoramento e controle dos problemas. Distorções, mudanças microestruturais do material de base, tensões residuais e instabilidade dimensional são alguns dos problemas decorrentes da soldagem. (MODENESI, 2008)

A presença de distorções numa junta soldada pode aumentar a suscetibilidade à formação de trincas, tendência da junta a apresentar fratura frágil e maior instabilidade dimensional, as tensões residuais estão intimamente relacionadas com as distorções, quando se fala em soldagem. Por esse motivo é grande a importância do estudo dos mecanismos ligados ao surgimento das distorções. (MODENESI, 2008)

O calor é o elemento vital na execução e qualidade da soldagem, por outro lado é um elemento bastante prejudicial, devido ao surgimento de problemas relacionados ao ciclo térmico, plastificação, mudanças na granulação do material e muitos outros fenômenos térmicos que acontecem na região do cordão de solda. (WAINER, BRANDI E MELLO, 1992).

A soldagem aquece a peça não uniformemente e as dilatações das regiões subjacentes são dificultadas pelas regiões pouco aquecidas, o que causa a deformação plástica e tensões residuais. Todos os processos de fabricação inserem no material algum nível de tensões residuais (usinagem, trefilação, soldagem, fundição e etc.) neste trabalho será dada atenção as tensões residuais originadas pela soldagem.

A energia de soldagem tem papel importante no processo de surgimento e intensidade das deformações, sabe-se que quanto maior a energia de soldagem maior a intensidade das deformações, o tipo de chanfro utilizado, também tem papel importante.

Portanto, estudar como a energia de soldagem influencia nas distorções e tensões residuais é tema de grande interesse para a indústria.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL.

O presente trabalho tem por objetivo geral avaliar estatisticamente qual a relação entre as distorções apresentadas na junta soldada em função da energia de soldagem e da restrição da junta.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Fazer um estudo teórico sobre relação entre distorção e tensões residuais.
- Estudar como a energia de soldagem, por meio da variação da velocidade de soldagem, interfere nas distorções apresentadas na soldagem.
- Estudar como a restrição da junta soldada interfere nas distorções apresentadas na soldagem, por meio da soldagem de juntas com e sem restrição.
- Avaliar se há correlação entre as variáveis analisadas - restrição da junta e velocidade de soldagem por meio da análise de variância – ANOVA.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 DEFORMAÇÕES DEVIDO À SOLDAGEM.

A deformação elástica é caracterizada pela sua reversibilidade; ao ser removida a força causadora da deformação, as dimensões iniciais da peça não é afetada. Ao contrário, uma deformação plástica é caracterizada pelo escoamento do material, ao ser removida a força as dimensões iniciais da peça não é preservada. (SEARS E ZEMANSKY, 2008).

Em soldagem, as deformações são provenientes das variações volumétricas causadas pelo gradiente de temperatura. O processo de resfriamento é não homogêneo, ou seja, diferentes regiões têm diferentes taxas de resfriamento a qual faz surgir tensões internas no material, em alguns casos os valores de tensões é elevado e promove deformação plástica à peça. As tensões que permanecem no material após a conclusão da soldagem são chamadas Tensões Residuais. T.R. (WAINER, BRANDI E MELLO, 2004).

O processo de soldagem gera uma distribuição não uniforme de temperaturas no interior do material e, conseqüentemente, ocorrem deformações plásticas e variações volumétricas por causa das transformações que têm lugar em uma área bastante aquecida da zona de solda. Isto provoca deformações e, conseqüentemente tensões na junta, que corresponde à contração do metal depositado (OKUMURA E TANIGUCHI, 1982 APUD ABREU, 2008).

3.1.1 Tipos de Distorções em Função do Tipo de Junta.

Dado a geometria da junta as distorções apresentadas podem ser de várias formas, segundo Radaj, (2003) e Modenesi, (2001) as distorções podem ser classificadas em sete tipos.

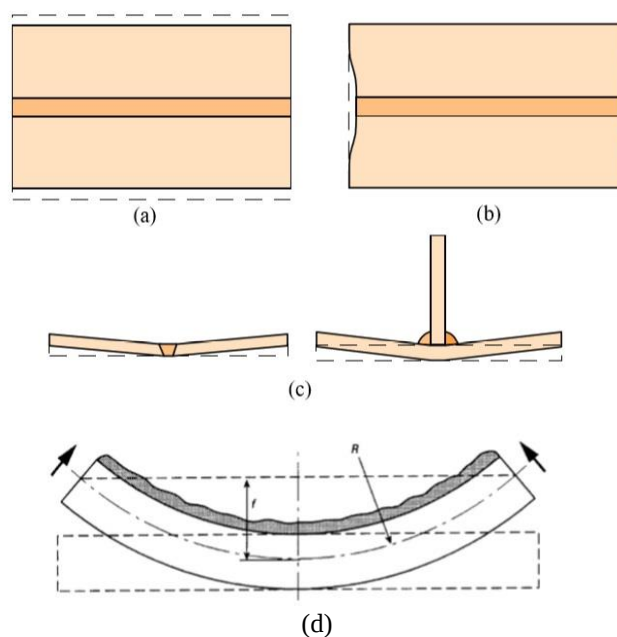
Tais como:

- Contração transversal
- Distorções angular
- Contração longitudinal

- Flambagem
- Distorção por arqueamento
- Distorção Rotacional
- Torção

As figuras abaixo mostram alguns tipos de distorções que permanecem na peça após a conclusão do processo de soldagem.

FIGURA 1: Tipos de distorções em soldagem. (a) Contração transversal (b) Contração longitudinal (c) Distorção Angular (d) Distorção por arqueamento.



Fonte: Bezerra, 2012 e Modenesi, 2008

Nesse contexto, uma junta pode apresentar mais de um tipo de distorção, por exemplo em chapas finas, o processo de distorção tem caráter complexo adquirindo dois ou mais tipos. As deformações causam, principalmente, dificuldades no ajuste entre o conjunto de peças e desvio de suas tolerâncias geométricas, na verdade, este o principal problema causado pelas deformações,

3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM AS DISTORÇÕES.

Muitos fatores afetam o nível de deformações na junta, assim como verificaram em suas pesquisas os seguintes autores:

- Energia de Soldagem (GAGEIRO, et al. 2017) e (RADAJ, 2003)

- Restrição da junta (TENG, et al. 2001)
- Propriedades mecânicas e térmicas dos materiais (WANG, et al, 2008)
- Geometria da junta. (PILIPENKO, 2001) e (RADAJ, 2003)
- Procedimento de montagem (MODENESI, 2008)
- Tensões Internas (SOARES, 2006)

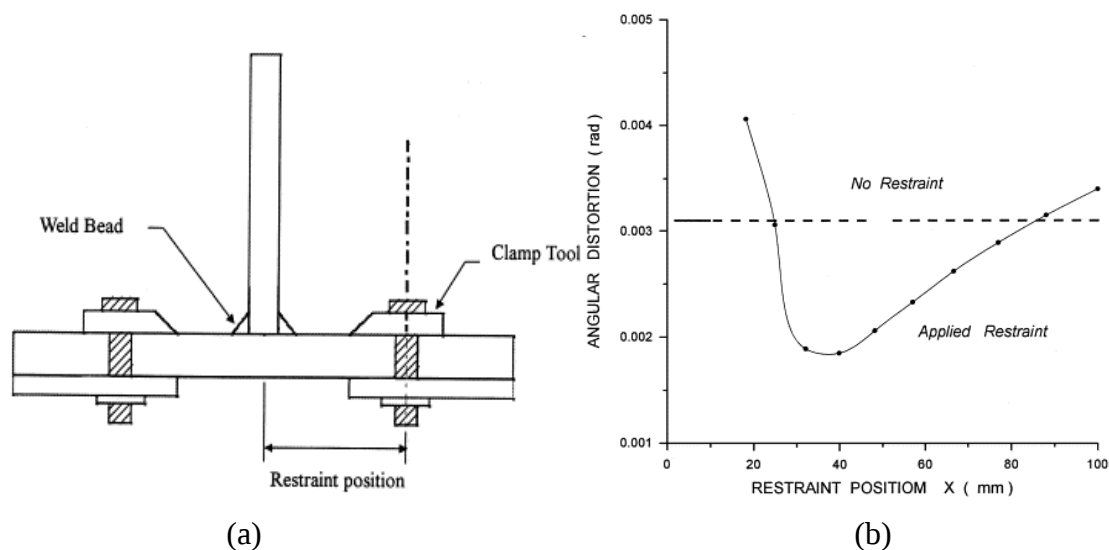
Entre outros parâmetros, por exemplo a eficiência do arco elétrico e tipo de processo de soldagem. Gageiro e Colaboradores (2017) analisaram a influência da energia de soldagem nos níveis de deformação apresentadas pela junta, verificaram que os níveis de distorções têm relação direta com a energia de soldagem e espessura da chapa, observaram menores distorções para a combinação de maior energia de soldagem e menor espessura.

Sabe-se que em chapas finas – espessura $< 3\text{mm}$ – a extração de calor é menos intensa em relação a chapas mais espessas. Por esse motivo, em chapas finas, as diferenças de temperatura ao longo da geometria da peça serão menores; o que minimiza o efeito das deformações, entretanto, se a chapa for espessa, o processo de distorção é maior. (MODENESI, 2011). Por outro lado, se corpo o soldado tiver grande espessura, estes efeitos passam a ser menos significativos e ocorrerão cada vez menos distorções ao aumentar a espessura da chapa (PILIPENKO, 2008).

3.2.1 Influência da Restrição.

Teng et al. (2001) investigaram os efeitos da restrição em relação às deformações de juntas em ângulo, concluíram que para vários posicionamentos da restrição a junta apresentou menor deformação em relação à solda sem restrição. Na Figura 2, na Figura 2 (a) a junta em “T” foi presa em várias posições, e ao termino do processo de soldagem foi obtido o gráfico da figura 2 (b) das distorções em função da posição das restrições.

FIGURA 2: Desvio angular da junta em função da posição da restrição.



Fonte: Teng, et al, 2001

A análise minuciosa da figura sugere algumas conclusões importantes: a primeira é que corpos soldados sem restrição apresentaram uma distorção total de pouco mais de 0,003rad. (Linha pontilhada). A segunda é que a restrição imposta, resultou em menores níveis de distorção, porém, a posição onde se encontra a restrição é muito importante, observe que dependendo da posição da restrição, os níveis de distorção são elevados, em alguns casos, a utilização de restrição não diminuiu em nada os níveis de restrição apresentados (TENG et al. 2001).

Schenk et al, (2010) também avaliaram o nível de distorção apresentado pela junta quando imposta uma restrição, em juntas em “T”, e descobriram que a fixação mais próxima da solda reduz a distorção angular; ao afastarem o ponto de fixação do cordão de solda, verificaram que a deformação por flexão aumenta, também que existe um ponto ótimo onde haverá os valores mínimos de deformação, este resultado é idêntico ao encontrado por TENG et al, (2001).

3.2.2 Influência das Propriedades do Material de Base.

Wang, et al. (2008) investigaram a influência do tipo material e suas propriedades nos níveis de distorções apresentadas, utilizaram o aço inoxidável 304 e o aço baixo carbono, concluíram que as propriedades do material desempenham um papel maior na distorção de soldagem quando a entrada de calor da soldagem é a mesma. Na

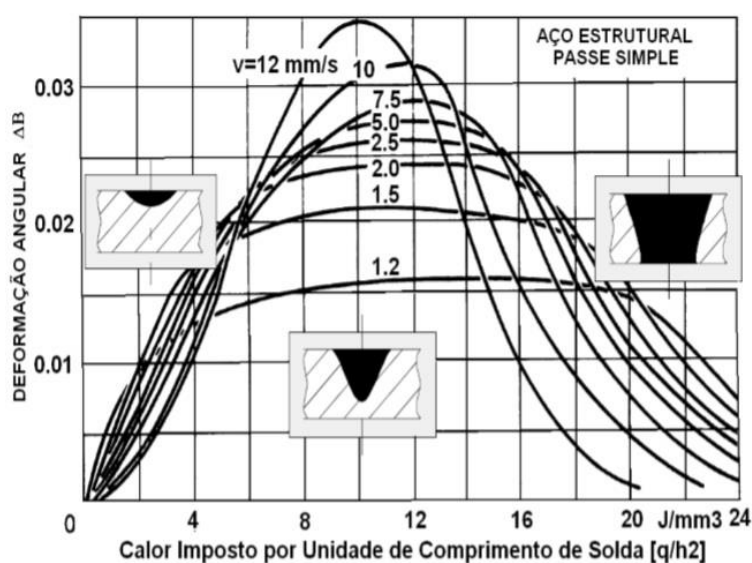
mesma condição de soldagem, a distorção do aço inoxidável 304 é maior que o aço carbono.

O processo de soldagem fornece uma grande quantidade de calor a junta, o calor é dissipado nas suas três formas básicas, sendo a condução a de maior importância para a qualidade final da solda. A condutividade térmica é uma propriedade de muita importância, LITTLE E KAMTEKAR, (1998) verificaram em sua pesquisa que quanto maior a condutividade térmica do material maior será a facilidade do calor de se propagar através da peça, logo, os picos de temperatura perto do cordão de solda terão uma amplitude menor e a queda de temperatura depois dos picos serão maiores, o que contribui para uma melhor qualidade final da soldagem.

3.2.3 Influência da Velocidade de Soldagem.

A velocidade de soldagem é um parâmetro diretamente relacionado a quantidade de calor fornecida a junta, sabe-se que o calor é elemento de grande influência na qualidade final da solda. RADAJ, (2003) apresenta um modelo proposto por Kuz'minov para relacionar vários destes parâmetros de soldagem. A Figura 3 apresenta as curvas de energia de soldagem em função da deformação angular e do calor imposto por unidade de comprimento.

FIGURA 3: Influência da velocidade de soldagem na deformação angular.



Fonte: Radaj, 2003

Observa-se a grande influência da velocidade de soldagem na deformação final do componente soldado. Para corpos de maior espessura os efeitos de deformação são menores, pois o material – devido a sua espessura - resiste aos momentos impostos pelas tensões residuais.

3.3 PROCESSO DE MEDIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.

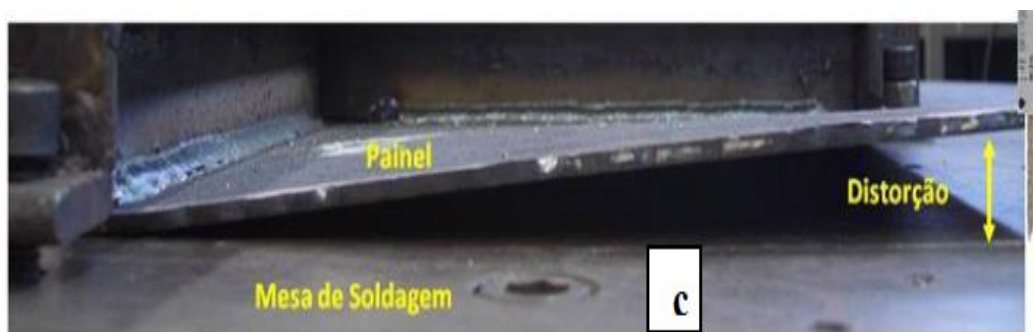
As normas da ASTM e ABNT que estão relacionadas à soldagem não apresentam procedimento para o processo de medição de distorções. Os autores fazem a medição de acordo com o método a qual julgam melhor para sua pesquisa. Pode-se medir as distorções de várias formas, tanto em termos de ângulos absolutos como em termos de variação geométrica em mm.

3.3.1 Medição em Termos da Variação de Cota.

Vasconcelos, (2014) em seu trabalho sobre o efeito dos passes de soldagem nos níveis de distorções de chapas para construção naval, mediu as deformações em termos da cota de altura, antes e após o processo de soldagem. Da mesma forma que apresentado na Figura 4.

Cabral, (2011) em seu trabalho sobre a influência do procedimento de soldagem nas distorções em painéis de estruturas navais, também mediu as distorções da junta em termos da variação da cota de altura. Como mostra a Figura 4 abaixo.

FIGURA 4: Forma de medição de distorções



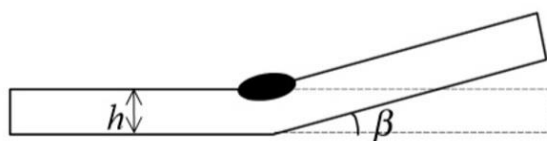
Fonte: Cabral. 2011

Com um paquímetro pode-se medir o desvio da cota de altura para cada corpo de prova e assim quantificar, razoavelmente bem, as distorções apresentadas pela junta.

3.3.2 Medição em Termos Angulares.

Também é possível medir os desvios angulares em termos dos ângulos formados em relação ao cordão de solda, assim como fez (PILIPENKO, 2001), a Figura 5 abaixo representa este processo de medição.

FIGURA 5: Distorção angular.



Fonte: Pilipenko, 2001

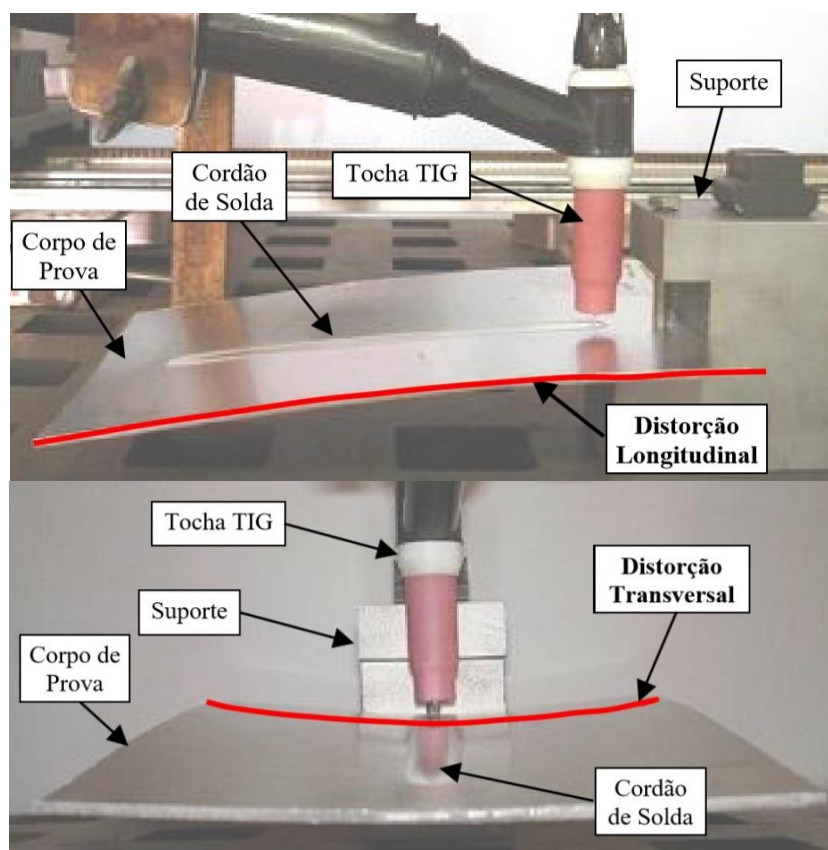
O ângulo beta pode ser medido com goniômetro, inclinômetro ou com ajuda de softwares, entretanto há dificuldade na medição de pequenos ângulos, pois há necessidade de instrumentos bem mais sofisticados.

3.3.3 Distorções com Medição não Trivial.

Para os casos acima citados considera-se que a junta soldada apresenta apenas um tipo de deformação, seja ela angular, longitudinal, transversal e etc. Para esses casos a medição é imediata, bastando utilização de goniômetro ou paquímetro para uma razoável precisão na medição, entretanto, uma junta soldada pode apresentar mais de um tipo de deformação, que é o caso da soldagem de chapas finas (espessura $< 3\text{mm}$) o que torna a medição mais complexa, porém mais abrangente.

Fraga, (2009) verificou este tipo de deformação na sua pesquisa sobre susceptibilidade a distorção devido à soldagem em chapas de alumínio. A Figura 6 abaixo, verifica-se duas formas de deformações.

FIGURA 6: Desvios angulares de caráter complexo.



Fonte: Fraga, 2009

A análise da figura sugere dois tipos distintos de distorções, distorção longitudinal e outra transversal ao cordão de solda, observe que, para cada posição da chapa, tem-se uma combinação de distorções, de forma que não é possível caracterizar a distorção com uma única medição, em termos matemáticos, a distorção é função da posição (X,Y) . O autor discute que a distorção em chapas finas é não-linear, diferentemente do que se pode observar em chapas grossas, o que requer um procedimento mais específico para quantificar as distorções dessa natureza, o que é sustentado por vários autores como; PILIPENKO, (2008) e MODENESI, (2008). Estes mesmos autores, por sua vez, explicam que em chapas finas há um gradiente temperatura bem mais extenso ao longo da chapa, enquanto que em chapas grossas a extração de calor é mais intensa do que em chapas finas, o que explica tal comportamento.

Fraga, (2009) propôs uma técnica de medição de ponto a ponto em coordenadas cartesianas, da seguinte forma: para cada posição (X, Y) mede-se um valor de cota Z em

relação a uma origem, afim de obter um polinômio que descreverá uma aproximação de distorção para todas as posições (X, Y).

Este exemplo mostra a dificuldade de medir deformações em casos onde o corpo apresenta mais de uma forma de deformação, neste trabalho a abordagem será simplificada, onde a peça soldada apresenta apenas a distorção angular e a medição será em termos dos desvios angulares. Essa medição pode ser simplificada por conta da espessura dos corpos de prova (6,3mm), que para espessura, tendem a apresentar apenas um tipo de deformação, como já foi discutido.

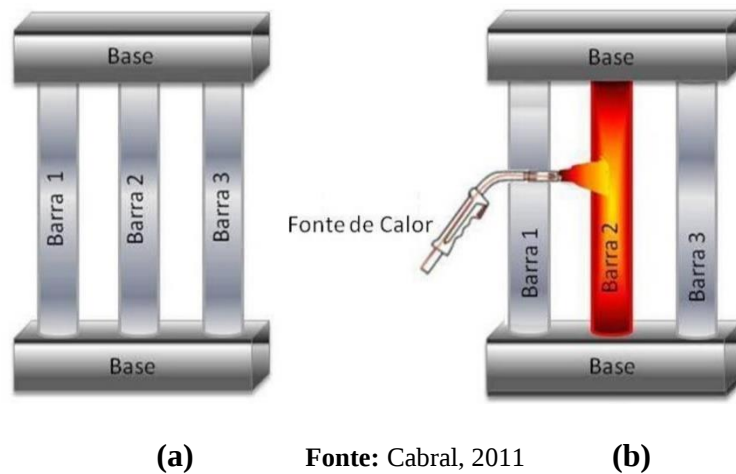
3.4 TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAGEM

As T.R. são induzidas em um material decorrentes do processo de fabricação, basicamente, por introdução de calor não uniforme na peça, elas são introduzidas pela maioria dos processos de fabricação: usinagem, soldagem, fundição, laminação, trefilação e etc. SCOTTI, (2014).

3.4.1 Fundamentos e Mecanismos da Geração de Deformações e Tensões Residuais.

Para entender como surgem as T.R em soldagem, vários autores, SCOTTI, (2014); MODENESI, (2008); CABRAL, (2011); e largamente divulgado pelo Welding Handbook da American Welding Society utilizam um modelo apresentado na Figura 7. As barras de aço estão fortemente engastadas nas travessas horizontais, de tal forma que elas não podem se deformar independente umas das outras, as barras têm comprimento e áreas de secção transversal iguais a (L_0 e A_0).

FIGURA 7: Sistema de 3 barras utilizado para o entendimento do surgimento das tensões residuais.

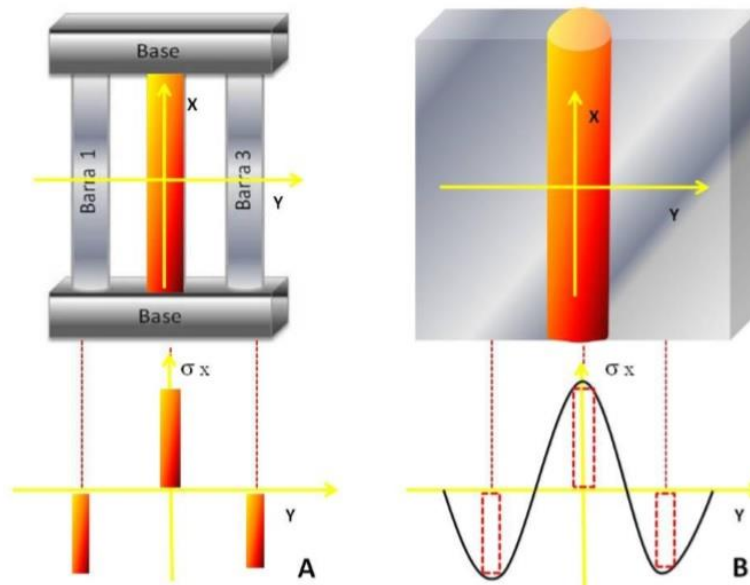


Inicialmente, na Figura 7 (a), não há tensões induzidas, as barras estão pressas e fortemente engastadas. Na figura 7 (b) uma fonte de calor adiciona calor a barra 2 de tal forma que ela se expande de acordo com a expressão:

$$\Delta l = \alpha * L_0 * \Delta T \quad (2)$$

Surgirá uma força de compressão na barra 2, e conseqüentemente surgirá força de tração nas barras 1 e 3 de módulo igual a metade da força da barra 2, ao continuar o aquecimento (de tal forma que as barras 1 e 3 recebe pouquíssimo calor), a barra 2 continua a se dilatar e devido ao calor, reduz o seu limite de escoamento, enquanto as barras 1 e 3 não variaram seu valor de limite de escoamento, o resultado disto é que a barra 2 sofre dilação plástica enquanto as outras sofre apenas dilação elástica, de tal forma que ao final do aquecimento o comprimento da barra 2 é $L_F < L_0$. Ao iniciar o processo de resfriamento as barras têm 1 e 3 tendem a adquirir os seus comprimentos iniciais L_0 , entretanto a barra 2 (tem comprimento $L_F < L_0$) o resultado disto é que ao chegarem a temperatura ambiente, há uma força de tração na barra 2 e força de compressão nas barras 1 e 3. De acordo com a Figura 8 (a) abaixo.

FIGURA 8: Comparação entre as T.R. e a montagem de três barras (A) e as tensões residuais longitudinais formadas ao longo da direção transversal y de uma solda de topo (B).



Fonte: Cabral, 2011

A figura 8 (a) mostra o resultado final do processo de aquecimento, observa-se que a barra 2 está sofrendo tração enquanto as barras 1 e 3 estão sob compressão. Observa-se que as tensões estarão presentes em toda a vida útil do material.

Ainda observando a Figura 8 (b) a analogia pode ser utilizada para a representação de tensões de uma junta soldada, associando a região da solda com a barra central e as regiões mais afastadas do metal de base, com as barras externas. Baseado nesse raciocínio pode-se esperar como consequência do aquecimento da junta durante a soldagem, o desenvolvimento de T.R. de tração na região da solda e de tensões de compressão no metal de base. SCOTTI, (2014); MODENESI, (2008); CABRAL, (2011); entre outros)

Este é o mecanismo causador das distorções em soldagem, as distorções estão intrinsecamente ligadas ao fenômeno de geração de T.R. Este exemplo mostra de forma lucida o mecanismo causador das distorções anteriormente comentadas.

3.5 MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

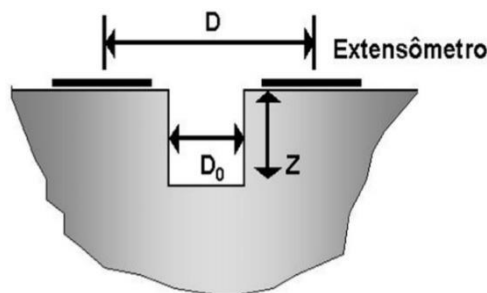
Não é simples medir tensões residuais, dado o estado complexo de distribuição das tensões ao longo do material, entretanto, as várias técnicas existentes garantem uma

boa precisão da medição, que muda dependendo do método de medição. Existem vários métodos de medir tensões residuais: Método do furo incremental, por difração de Raio X (técnica do $\text{sen}^2(\Psi)$) entre outros.

3.5.1 Método do Furo Incremental

O método do furo incremental baseia-se na tensão aliviada devido à introdução de um furo na superfície do material. O método de medição deste alívio de tensões é por extensômetros (Strain Gauges). A roseta, que é um tipo especial de extensômetros, varia sua resistência elétrica à medida que sofre uma deformação devido a esforços mecânicos. A roseta é fixada a superfície do material ao passo que um furo no centro da roseta faz variar o estado de tensões, várias deformações são medidas para várias profundidades do furo. (NORMA ASTM E837).

FIGURA 9: Furo Cego Incremental dimensões especificadas.



Fonte: Martins, 2004

O método do furo cego é um dos mais utilizados na determinação de tensões residuais superficiais, pois, apresenta relativo baixo custo, mobilidade do equipamento, e possibilidade de aplicação a uma vasta variedade de materiais. Por outro lado, o método do furo-cego apresenta algumas limitações, o método é considerado semi-destrutivo, pois, dependendo do tipo de componente a ser analisado, o furo pode causar um dano ao mesmo. (ROCHA et al, 2009)

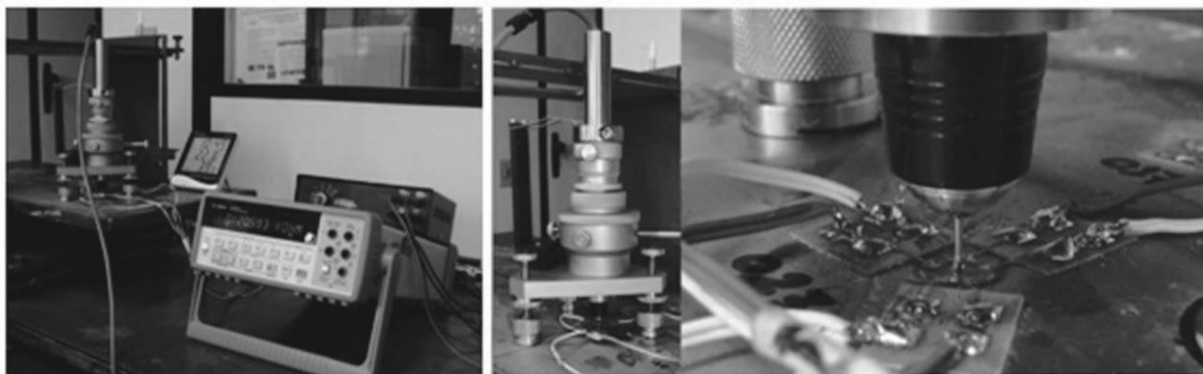
Há limitações quando ao uso da técnica, uma das limitações refere-se à magnitude de tensões máximas a serem medidas podendo ser no máximo 50% do limite

de escoamento¹ do material. Um material que apresenta tensões residuais superiores a 0,5y ao ser submetido ao método do furo-cego poderá apresentar plastificação na borda do furo, provocada pela redistribuição no estado de tensões na região onde houve a remoção de material, desta forma os resultados obtidos no ensaio não serão corretos podendo superar a tensão de escoamento do material (ROCHA et al, 2009).

Neste caso, os resultados obtidos pela técnica tradicional do furo cego não são confiáveis, pois o algoritmo de cálculo das tensões é baseado em teorias linear-elásticas. (NORMA ASTM E-837). Alguns pesquisadores já quantificaram estes erros, e verificaram que pode chegar a mais de 100% da tensão residual real apresentada pelo componente.

Mansur et al, (2011) utilizou o método do furo incremental para medir tensões residuais na solda de topo em materiais dissimilares, sendo eles o aço A-36 e ao aço inox 304, utilizaram rosetas do tipo A e o equipamento de furação da marca Vishay modelo RS-200. Como mostra a Figura 10 abaixo.

FIGURA 10: Ferramental para medição de T.R



Fonte: Mansur, 2011

Para a confecção das soldas em materiais dissimilares foram utilizadas as máquinas de soldagem MIG/MAG Smashweld 350. Para a realização da solda dissimilar cobre/aço inoxidável 304 utilizou-se como metal de adição o cobre. O gás utilizado foi o Argônio comercial com uma vazão de 16 l/min. A velocidade do arame foi de 7m/min com stick-out de 25 a 30 mm. Foram realizados 6 (seis) passes de soldagem (MANSUR et al, 2011).

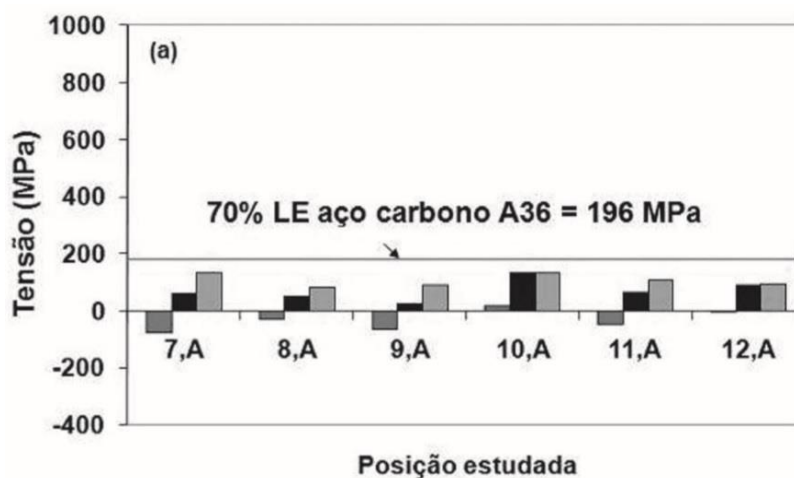
¹ Alguns autores utilizam um valor máximo de 70% do limite de escoamento, em desacordo com a norma ASTM – E-837.

Utilizaram os seguintes materiais e equipamentos:

- Multímetro digital marca Agilent, modelo 34401^a
- Roseta tipo A modelo FRS-2-11 para o aço carbono A36
- Equipamento de furação da marca Vishay modelo RS-200
- Entre outros.

Após a conclusão do processo de soldagem, utilizou-se o procedimento descrito na norma ASTM E837 os resultados obtidos são os seguintes: Para diferentes posições do cordão de solda gerou-se o gráfico da Figura 11 onde os eixos das ordenadas representa a tensão calculada em Mpa e o eixo das abscissas a posição a qual foi fixada a roseta.

FIGURA 11: T.R. medidas pelo método do furo cego.



Fonte: Mansur, 2011

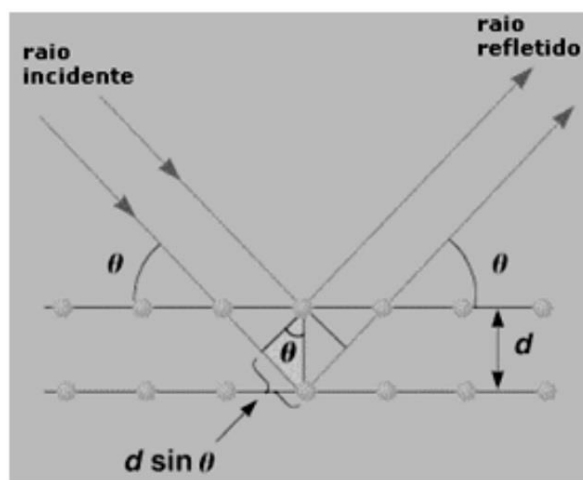
Os pesquisadores concluíram que: O método de medição das tensões residuais se aplica para todas as posições estudadas no aço carbono A36.

Pelo gráfico observa-se que os valores de tensões não ultrapassaram 70% do limite de escoamento, que pela norma está dentro dos valores aceitáveis logo a medição apresenta boa confiabilidade.

3.5.2 Difração de Raio X: Método do $\sin^2 \Psi$

Outra técnica bastante difundida na tentativa de medir tensões residuais é a técnica do $\sin^2 \Psi$ feita por difração de Raio X, a variação no retículo cristalino introduzido pela presença de tensões, é medida com base na lei de Bregg, e as tensões residuais são calculadas assumindo-se que as distorções ocorrem no regime linear elástico (MARTINS et al, 2004). Bragg propôs então que o cristal era constituído por uma rede de íons dispostos em planos paralelos, como mostra a Figura 12.

FIGURA 12: Difração de raios X por um cristal, onde θ é o ângulo do raio incidente com a superfície, d é a distância entre dois planos paralelos e $d \cdot \sin \theta$ é a diferença de caminho seguido por duas reflexões provenientes de planos sucessivos.



Fonte: ERDÓCIA, 2011

A difração de raios X pode ser usada para medir com precisão os espaçamentos do retículo cristalino pois há uma relação direta entre o ângulo de incidência do raio, o espaçamento interplanar “d” e a deformação no material (ERDÓCIA 2011).

O método por DRX tem melhor precisão em relação ao método do furo cego, assim como verificou vários autores.

3.6 ENERGIA DE SOLDAGEM.

A E.S. - energia de soldagem - é um parâmetro de grande importância no processo de transformações microestruturais e comportamento da junta soldada. É a grandeza que quantifica a energia realmente disponível para soldagem, visto que uma parte dela é desperdiçada por meio da irradiação e convecção (WAINER, BRANDI E MELLO (1992).

Portanto, trata-se da energia disponível para a fusão da junta soldada, é medida de acordo com a expressão abaixo (MARQUES E MODENESI, 2014).

$$ES = N * \frac{V * I}{v} \quad (\text{J/m}) \quad (3)$$

Onde:

Es – Energia de Soldagem em (J/m)

N – Rendimento do arco elétrico.

U – Tensão em volts (V);

I – Corrente elétrica em amperes (A);

v – velocidade linear de soldagem (m/s)

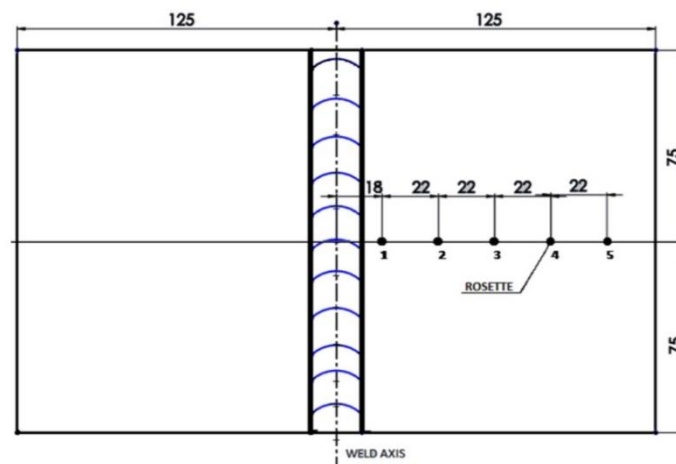
Segundo Abreu (2008) quanto mais alto for a energia de soldagem inserida na junta soldada, maior será a quantidade de energia calorífica transferida à peça, maior a poça de fusão, mais larga a zona termicamente afetada entre outros efeitos.

A velocidade de soldagem é inversamente proporcional a E.S, este comportamento era de se esperar visto que tem relação direta com o tempo a qual o arco elétrico fica aberto, ela tem papel fundamental na energia de soldagem e é amplamente estudada em várias pesquisas (RADAJ, 2003).

A E.S. está diretamente relacionada ao nível de distorção e tensões térmicas apresentada pela junta assim como verificou KHANNA e SACHIN MAHESHWARIB, (2017) em seu estudo sobre o efeito da energia de soldagem na magnitude das tensões medidas. A pesquisa teve cunho experimental com a seguinte metodologia: utilizando o processo de soldagem MAG, a taxa de alimentação de arame e velocidade de soldagem foram variados entre 2.8 m/min a 10.8 m/min e 30cm/min a 50cm/min, respectivamente, para seis (6) corpos de prova, enquanto outros parâmetros como o bico à distância da placa (N), a tensão de arco (V) e o eletrodo ao ângulo de trabalho (θ) foram mantidos constantes

Para a medição das T.R. foi utilizado o procedimento descrito na norma ASTM E837 em que os extensômetros foram fixados no corpo de prova, como mostra Figura 13.

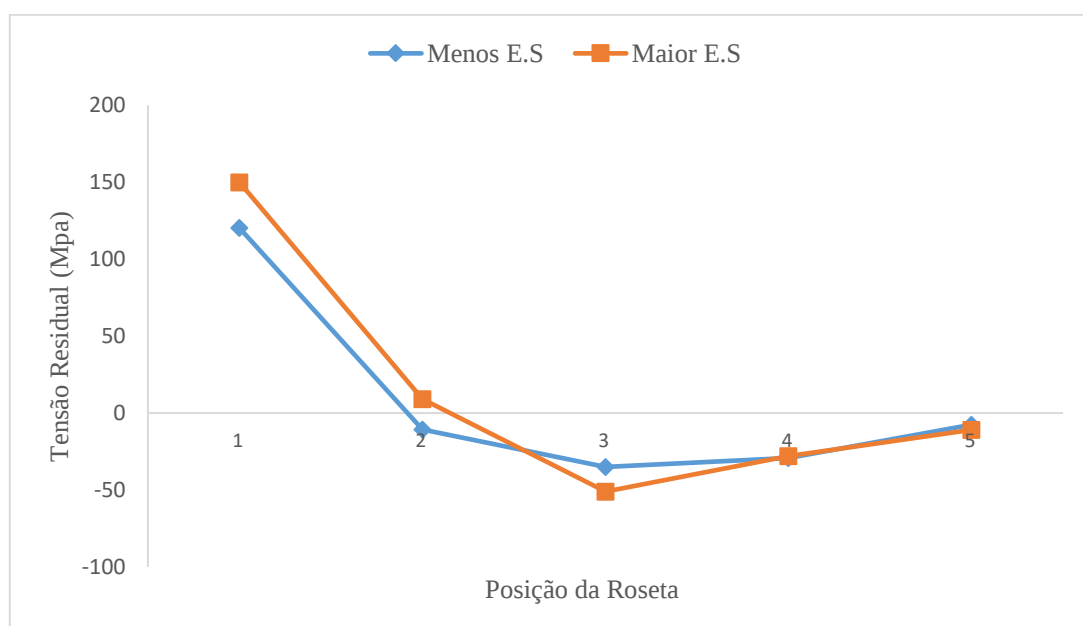
FIGURA 13: Fixação das rosetas para seis corpos de prova.



Fonte: Khanna e Sachin Maheshwarib, 2017

Os pontos 1 a 5 são rosetas, e para cada corpo de prova variou-se energia de soldagem, os resultados para cada corpo de prova foi disposto em gráficos, onde a coordenada Y temos o valor da tensão medida enquanto na coordenada X temos posição de cada roseta (1 a 5). Após a coleta dos dados foi possível a construção do gráfico apresentado na Figura 14, observa-se duas curvas uma para a menor energia de soldagem e outra para maior energia de soldagem.

FIGURA 14: Relação da E.S. com o nível de tensões medidas e distância do cordão de solda.



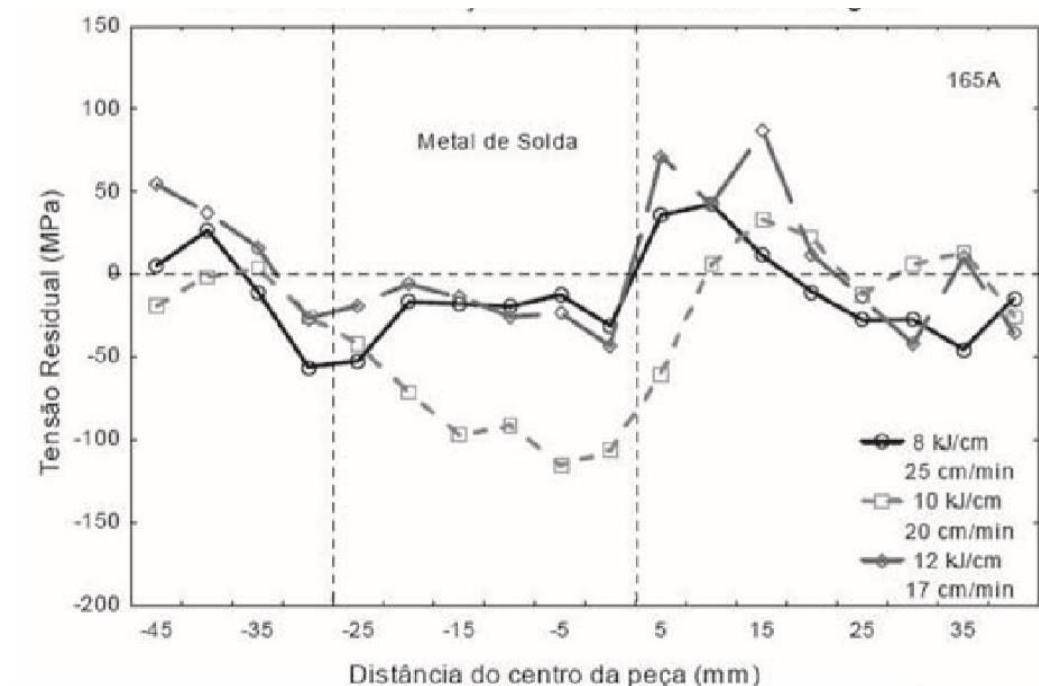
Fonte: Khanna e Sachin Maheshwarib, 2017)

A curva superior representa o corpo de prova, que foi soldado com maior energia de soldagem, enquanto a curva inferior representa o corpo de prova com menor energia de soldagem. Pela análise do gráfico, conclui-se que quanto maior a energia de soldagem maior o nível de tensões apresentadas pela junta, e em regiões próximas ao cordão de solda as tensões são de caráter trativo enquanto para regiões mais afastadas do cordão tem caráter compressivo.

Oliveira, et al, (2010) também pesquisaram o efeito da energia de soldagem sobre as tensões residuais resultantes, a metodologia utilizada foi: As energias de soldagem foram aplicadas em três níveis: 8, 10 e 12 kJ/cm. A partir da energia de 10 kJ/cm o valor da velocidade de soldagem foi variado enquanto a corrente de soldagem permaneceu constante (165 A), sendo conseguidos assim os níveis de energia de soldagem de 8 e 12 kJ/cm com variação da velocidade de soldagem e corrente constante.

Oliveira, et al, (2010) mediu as tensões residuais utilizando o DRX, entre outras conclusões importantes chegaram ao seguinte Gráfico 15 abaixo.

FIGURA 15: T.R apresentadas pela junta em função da posição.



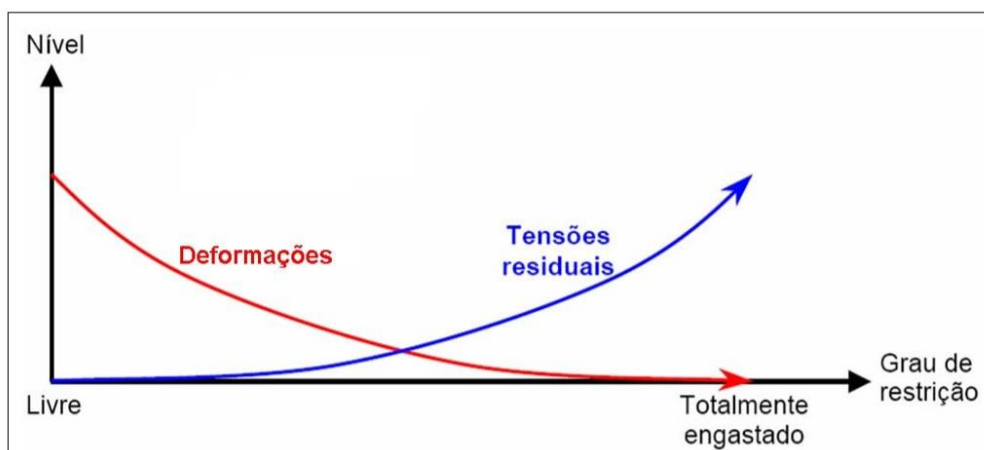
Fonte: Oliveira et al, 2010

A análise do gráfico sugere correlação entre energia de soldagem e tensões apresentado pela junta, cada curva representa um nível de energia de soldagem, para as maiores energias de soldagem (10KJ/min e 12KJ/min). Verifica-se os maiores picos de T.R.

3.7 CORRELAÇÃO ENTRE TENSÕES RESIDUAIS E DEFORMAÇÕES EM SOLDAGEM.

Vários autores já verificaram que há uma relação entre tensões residuais e distorção, TENG et al. (2001) verificou que quanto maiores os níveis de distorção apresentados, menor as tensões residuais no aço. RADAJ, (2003) afirma que as T.R. e distorções são antagônicas, ou seja, o surgimento de uma, faz diminuir a outra e vice-versa. O gráfico apresentado na figura 16, proposto por BEZERRA, (2006) dá uma boa noção da afirmação acima.

FIGURA 16: Relação entre distorção e T.R.



Fonte: Bezerra, 2006

A análise do gráfico traz uma noção importante do processo de surgimento de deformações e tensões residuais, note que para corpos com grande restrição espera-se maiores valores de tensões e vice-versa.

3.8 CICLOS TÉRMICOS NA SOLDAGEM E A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS.

O calor é o elemento vital na execução e qualidade da soldagem, por outro lado é um elemento bastante prejudicial, devido ao surgimento de problemas relacionados ao ciclo térmico, plastificação, mudanças na granulação do material e muitos outros

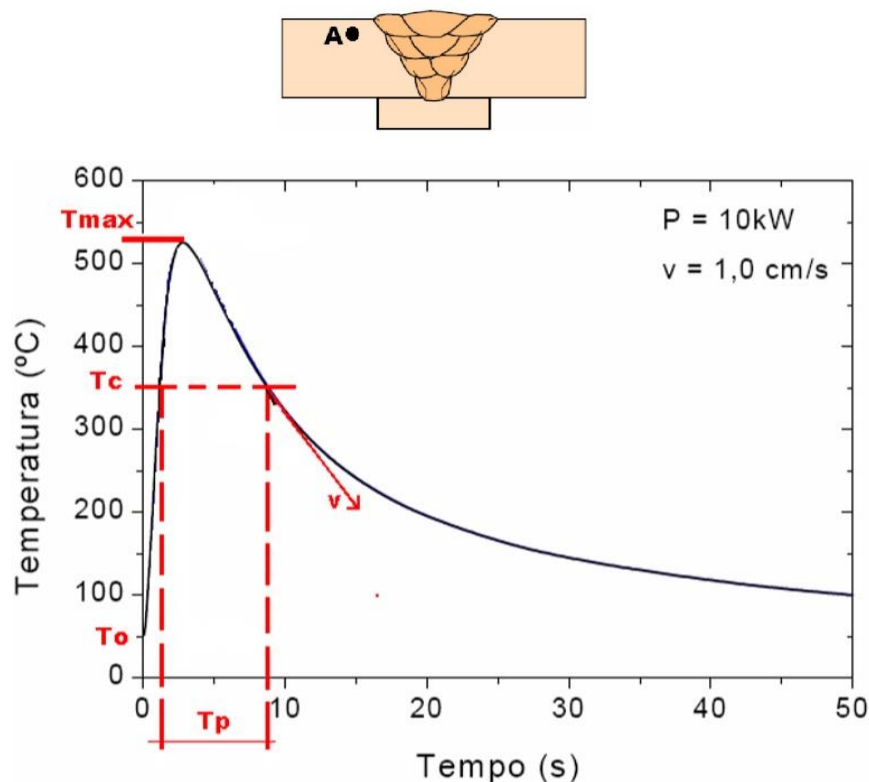
fenômenos térmicos que acontecem na região do cordão de solda (WAINER, BRANDI E MELLO, 1992).

Considere um ponto A próximo a região do cordão de solda, note que ao passo que o processo de soldagem se inicia a temperatura de A aumenta, ao iniciar o resfriamento a temperatura de A vai caindo até a temperatura ambiente. (WAINER, BRANDI E MELLO, 1992)

Curvas desse tipo são chamadas de curvas de ciclo térmicos, e são de grande importância, pois é possível extrair várias propriedades de controle, que são fundamentais a qualidade do processo de soldagem.

A Figura 17 representa o ponto A assim como a curva que descreve sua temperatura ao longo do tempo.

FIGURA 17: Curva de ciclo Térmico.



Fonte: Modificado de Abreu, 2008

Pela análise do gráfico define-se várias propriedades importantes, T_0 é a temperatura a qual se inicia o processo de soldagem, T_c é a temperatura a qual se inicia as transformações microestruturais, T_{max} é temperatura máxima atingida pelo ponto em

estudo, T_p é o tempo de permanência do ponto na temperatura T_c e v é velocidade de resfriamento (ABREU, 2008).

O estudo das curvas de ciclos térmicos torna-se importantes na questão das distorções e tensões residuais, exemplo: a velocidade de resfriamento, é um fator de grande importância no mecanismo causador das distorções.

Relembrando o mecanismo causador das T.R (Figura 6) especificamente do momento onde começa o processo de resfriamento, se o resfriamento fosse muito lento (ex. $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$), haveria mais tempo da barra 2 recuperar uma parte do seu tamanho original, de forma que o valor das tensões residuais seria significativamente menor, o que não ocorre na prática. A velocidade de resfriamento, de acordo com (SILVEIRA, 1982 apud CABRAL, 2011) depende de vários fatores, entre eles:

- Condutividade térmica do metal
- Temperatura Inicial
- Energia de soldagem
- Espessura da peça

Isso mostra a grande importância no estudo das curvas de ciclo térmico, e como é representativa no estudo das T.R e Distorções.

3.9 TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE DEFORMAÇÕES EM SOLDAGEM.

O estudo dos elementos causadores das T.R e distorções proporcionam a base para descrever mecanismo de prevenção e controle desse problema, vários autores recomendam aproximadamente as mesmas ideias métodos de controle, umas mais práticas outras mais complexas de serem executadas. A lista abaixo representa algumas das técnicas de controle de distorções descrita pelo autor (MODENESI, 2001).

(a) No projeto de estruturas soldadas.

- Projetar estruturas com a menos quantidade possível de soldas.
- Usar chanfros que necessitem de menos quantidade de metal de adição
- Usar chanfros simétricos (X, K e outros)

- Posicionar as soldas ao longo da linha neutra ou em posições simétricas em relação a linha neutra.
- Solicitar o menor tamanho possível de solda compatível com a solicitação.

(b) Na fabricação.

- Estimar a distorção que ocorrerá na estrutura e posicionar as soldas no sentido de compensar esta distorção.
- Colocar a peça na posição correta e utilizar dispositivos de fixação (Utilização de grampos ou pontamentos).
- Usar sequência de disposições de cordões de solda (disposição por partes, uso de mais de um soldador, soldando em posição simétricas)

Há outros pontos que podem ser alterados visando o controle de distorções, como por exemplo o tipo de metal de base, no sentido de mudar algumas propriedades relevantes a distorção, utilização de pré-aquecimento entre outros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS.

Nesta seção, apresentam-se todos os materiais utilizados, descrição dos procedimentos e forma de análise da pesquisa.

Os parâmetros de soldagem foram selecionados em função da estabilidade do arco elétrico e boa condição final dos cordões de solda realizados previamente, visando obter cordões com bom aspecto visual, com níveis aceitáveis de respingos, retilineidade, reforço e falta de fusão.

4.1 MATERIAIS E PARÂMETROS DE SOLDAGEM.

Para a realização do experimento utilizou-se os seguintes materiais e parâmetros de soldagem.

- Máquina de soldagem Retificadora trifásica. Da fabricante ESAB série: Origo ARC 426, fator de trabalho 100% até, 200 A;
- Doze (12) corpos de prova de aço Carbono ABNT 1020, dimensões: 120 x 50 x 6,3 mm;
- Eletrodo revestido E6013 Ø 4mm;
- Grampo de fixação;
- Esquadro de 90° e 180°;
- Outros materiais para soldagem: Escovas, martelo etc;
- Serra fita;
- Cronômetro;
- Caderneta para anotações.

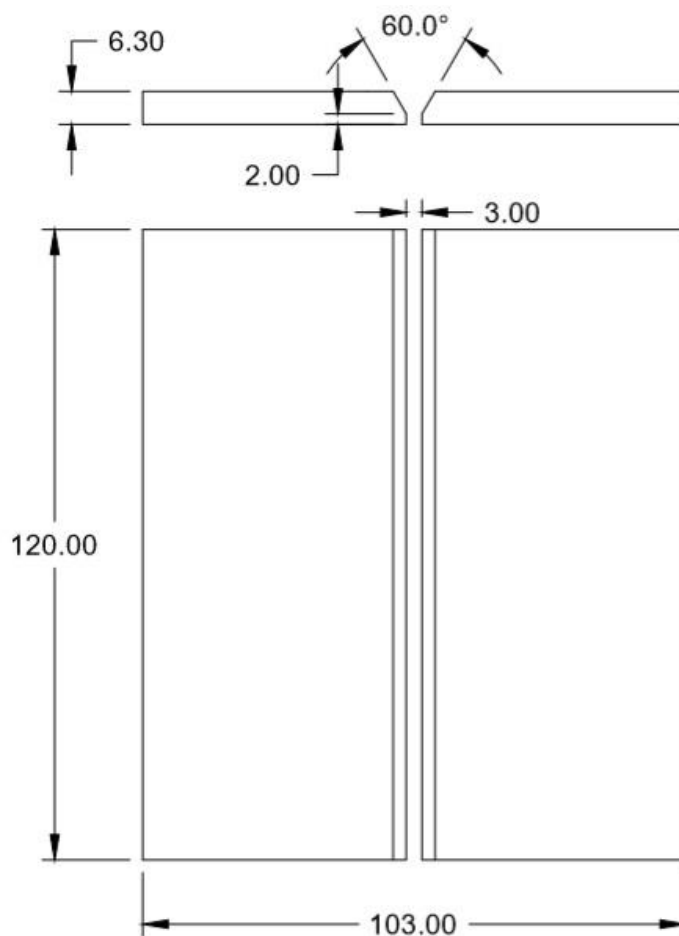
O processo de soldagem foi o de Eletrodo Revestido. A variável de influência foi a velocidade de soldagem e foi variada a dois níveis, assim como a restrição da junta. As variáveis de influência deste processo, que serão mantidas constantes após otimização de condições de soldagem, são correntes e a polaridade de soldagem. A velocidade de soldagem pôde ser medida e controlada por meio de medição do comprimento do cordão de solda e do intervalo de tempo entre o início e o término do cordão, a razão entre o comprimento e o tempo nos dá a velocidade média do processo,

geralmente registrada em mm/min. O eletrodo escolhido foi o E6013 de diâmetro de 4mm, que apresenta ótimas características de soldagem, arco estável e boa taxa de deposição.

4.1.1 Confeção dos Corpos de Prova.

Foram confeccionadas 24 peças, totalizando 12 corpos de prova a qual foram chanfradas e cortadas nas dimensões desejadas. O aço utilizado será o aço ABNT 1020 com baixo teor de carbono, a ideia inicial era utilizar barras de aço ABNT 1045, mas, devido a indisponibilidade do mercado local, não foi possível sua utilização, o metal foi cortado nas dimensões especificadas e preparadas formando juntas de topo com chanfro em V à 60°. (As dimensões e chanfros foram determinados conforme os trabalhos apresentados por Gageiro (2017); Mansur (2011); Oliveira (2010)). A Figura 18 traz as dimensões² dos corpos de provas.

FIGURA 18: Dimensões em mm.



² A figura 18 é apenas ilustrativa, as dimensões apresentadas estão fora de escala.

Fonte: Autoria Própria, 2019

A espessura dos CP's escolhida foi de 6,3mm, a bancada de realização dos experimentos apresenta baixa taxa de extração de calor; verificando também a soldagem dos CP's sempre no mesmo local da bancada para garantir que qualquer efeito de extração de calor afetasse por igual todos os CP's. Além disso a temperatura média do Laboratório no momento de realização dos experimentos era de 33°C.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Para a regulagem dos parâmetros corretos de soldagem, realizou-se vários cordões e observou-se os defeitos possíveis de correção por inspeção visual, como respingos, mordedura, falta de fusão. A medida que a regulagem dos parâmetros gerou bom aspecto visual dos cordões, utilizou-se aqueles parâmetros. Posteriormente os CP's são posicionados na bancada. A Figura 19 apresenta as 12 juntas de solda preparadas para início do processo de soldagem.

FIGURA 19: 24 peças, totalizando total de 12 juntas.



Fonte: Arquivo pessoal, 2019

4.2.1 Preparação e Soldagem dos Corpos de Prova.

Após a preparação dos CP's, verificou-se que todos apresentaram as mesmas dimensões. Posteriormente realizou-se operação de ponteamento para evitar a distorção rotacional como mostra a Figura 20. Utilizou-se esquadro para verificar boa retilidade de todos os CP's. Também foi necessário medir os tempos de soldagem

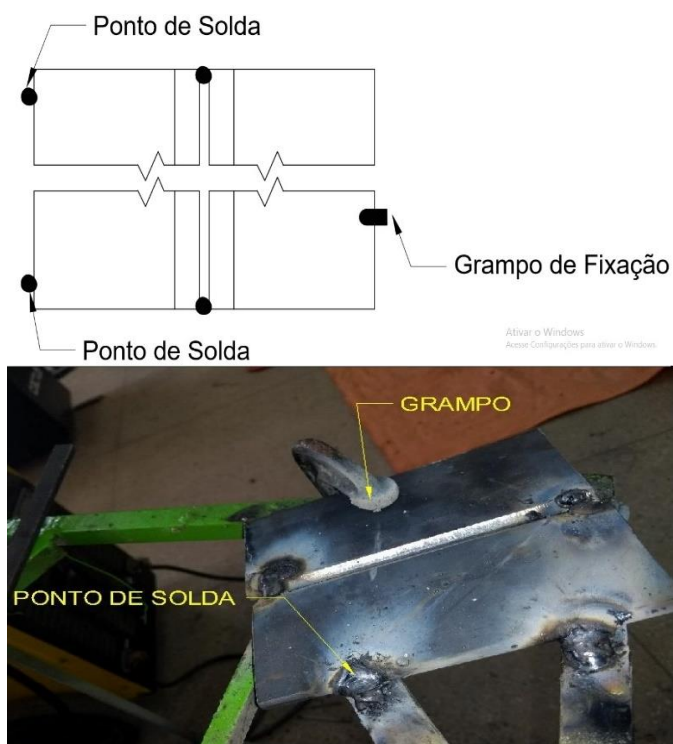
para cada cordão para isso utilizou-se um cronômetro.

Após garantir que os chanfros apresentam boa retilineidade e sem nenhum tipo de restrição imposta na junta iniciou-se o processo de soldagem com os parâmetros definidos da Tabela 3. Para o completo preenchimento da junta foi necessário um total de 3 cordões em cada C.P. O intervalo de tempo entre o término de um cordão e o início de outro foi de aproximadamente 1min e 30s. Após o término de cada cordão anotou-se o tempo de soldagem. A restrição utilizada foi dois pontos de solda de um lado e um grampo do outro lado, se justifica por uma melhor estabilidade na fixação.

As condições de soldagem e procedimento adotado, é baseado no modelo previamente discutido como forma de avaliar distorções em soldagem e qual o efeito das variáveis em questão nos resultados encontrados.

Após a coleta de todos os dados referentes a pesquisa, realizou-se a limpeza dos CP's e iniciou-se o processo de medição e cálculos dos parâmetros relevantes para o experimento. São estes: Distorções (em termos da variação angular, considerando a referência como 0°), cálculo da Velocidade de Soldagem e Energia de Soldagem. Os procedimentos de medição e cálculos são descritos no item 4.4

FIGURA 20: Vista superior: Operações de ponteamto.



Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

4.3 MEDIÇÃO DA ENERGIA DE SOLDAGEM E DAS DISTORÇÕES.

Com os dados de tempo podemos facilmente medir a velocidade média de soldagem, podemos utilizar a expressão:

$$V.S = \frac{CCS}{TS} \quad (4)$$

Onde:

V.S = Velocidade soldagem (mm/min).

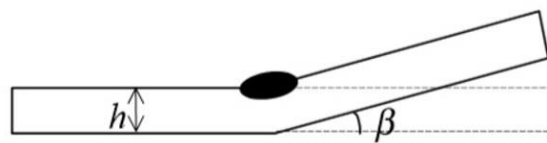
CCS = Comprimento do Cordão de Solda (mm)

TS = tempo de soldagem de cada cordão. (min)

Com a informação de velocidade soldagem e os outros parâmetros conhecidos podemos calcular a quantidade de energia fornecida a junta, utilizando a Expressão (3) Os dados foram exportados para uma planilha de cálculo.

Para a medição das distorções será observado qual o desvio angular dos corpos de prova, em relação à linha de referência – linha de centro do cordão de solda (desvio de retilidade longitudinal). A forma de medição é em termos do ângulo beta mostrado na figura 21.

FIGURA 21: Método de medição das distorções.



Fonte: Philipenko, 2001

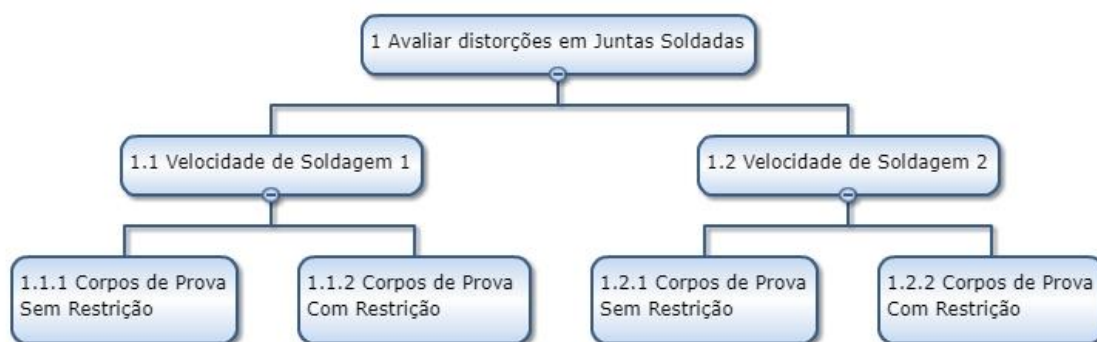
O ângulo beta é medido com um goniômetro, o ângulo foi medido em todos os CP's. Após a coleta os dados foram exportados para uma planilha de cálculo, para realização de análises estatísticas. O instrumento utilizado para medição tem resolução 0,5° de forma que não possível medir, por exemplo 1,35°, assim utilizou-se o seguinte procedimento: arredondou-se para o valor de medida mais próximo da resolução do instrumento, por exemplo se uma medida se aproxima de 1,35° arredondou-se para 1,5° se outra medida se aproxima de 1,20° arredondou-se para 1,0°. Seguindo a mesma

lógica, se uma medição está em torno de $1,7^\circ$ arredondou-se para $1,5^\circ$ se está em torno de $1,85^\circ$ arredondou-se para 2° .

4.4 PLANEJAMENTO E ESTATÍSTICAS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados serão avaliados estatisticamente segundo um Planejamento Fatorial 2^2 , para cada condição será avaliado três corpos de prova, com um total de doze corpos. No fluxograma a seguir é mostrado como se dará a distribuição dos experimentos.

FIGURA 22: Organograma do Experimento.



www.wbstool.com

Fonte: Arquivo pessoal, WBSTOOL, 2019

Para cada velocidade serão medidas as deformações apresentadas em relação aos corpos de prova com e sem restrição. Para cada situação serão confeccionados 3 corpos de prova.

4.5.1 Análise de variância – anova.

O procedimento estatístico adotado para o estudo e análise dos resultados é da estatística ANOVA. A análise visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente (MILONE, 2009).

Ela é utilizada quando se quer decidir se as diferenças amostrais observadas são reais (causadas por diferenças significativas nas populações observadas) ou casuais

(decorrentes da mera variabilidade amostral). Portanto, essa análise parte do pressuposto que o acaso só produz pequenos desvios, sendo as grandes diferenças geradas por causas reais. (MILONE, 2009).

Sabe-se que o processo de distorção da junta é influenciado por vários fatores, e a variação de um deles, pode ser gerar diferenças significativas ou não no resultado, a análise estatística visa cobrir essa lacuna, e a ANOVA se encaixa bem ao tipo de pesquisa deste trabalho e já foi utilizada por outros pesquisadores assim como fez GAGEIRO, (2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES DE SOLDAGEM.

Após finalizar os experimentos, preencheu-se os dados da tabela 1, que representa o tempo decorrido para cada cordão de solda com um total de três cordões. Sabendo que o comprimento total dos corpos de prova é de 120mm é possível calcular a velocidade de soldagem.

Para a simplificação das análises e plotagem de gráficos relevantes adota-se a seguinte nomenclatura: A – Fator Velocidade de Soldagem; B – Fator Restrição. Onde:

A_0 – Representa a condição com menor velocidade de soldagem

A_1 – Condição com Maior velocidade de soldagem

B_0 – Condição Sem Restrição.

B_1 – Condição com Restrição.

TABELA 1: Tempos de Soldagem.

Corpo de Prova	Condição de Soldagem	Cordão 1 (s)	Cordão 2 (s)	Cordão 3 (s)	Média de tempo(s)
1	$A_0 - B_0$	49	53	56	52,67
2		46	54	45	48,33
3		42	50	59	50,33
4	$A_0 - B_1$	43	57	46	48,67
5		50	60	55	55,00
6		49	50	61	53,33
7	$A_1 - B_1$	28	30	37	31,67
8		32	37	33	34,00
9		35	32	38	35,00
10	$A_1 - B_1$	31	30	36	32,33
11		40	36	29	35,00
12		36	35	38	36,33

Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

Com os dados de tempo de cada cordão é possível medir a velocidade de soldagem e energia de soldagem utilizando a expressão (4), e (3) respectivamente. Os dados estão na tabela 2.

TABELA 2: Velocidade de Soldagem de Cada Corpo de Prova.

Corpo de Prova	V.S 1º Cordão (mm/min)	V.S 2º Cordão (mm/min)	V.S 3º Cordão (mm/min)	V.S (Média). (mm/min)	Energia de Soldagem (J/mm)
1	146,94	135,85	128,57	137,120	1.312,721
2	156,52	133,33	160,00	149,952	1.200,387
3	171,43	144,00	122,03	145,821	1.234,392
4	167,44	126,32	156,52	150,093	1.199,255
5	144,00	120,00	130,91	131,636	1.367,403
6	146,94	144,00	118,03	136,324	1.320,385
7	257,14	240,00	194,59	230,579	780,643
8	225,00	194,59	218,18	212,592	846,692
9	205,71	225,00	189,47	206,729	870,704
10	232,26	240,00	200,00	224,086	803,263
11	180,00	200,00	248,28	209,425	859,495
12	200,00	205,71	189,47	198,396	907,276

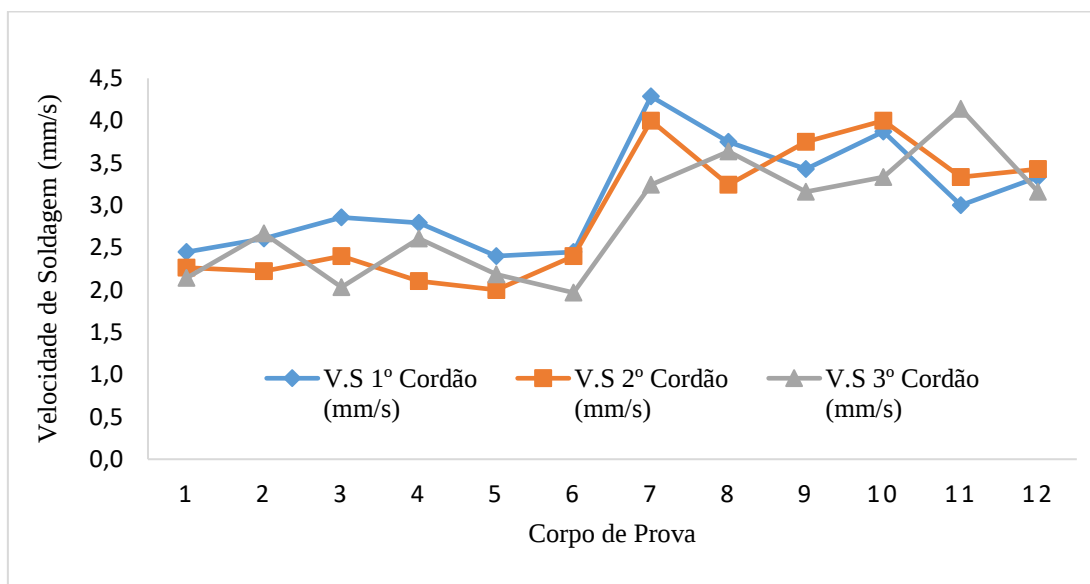
Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

A partir dos resultados obtidos na tabela acima, determinou-se duas velocidades médias de soldagem. A velocidade de soldagem 1, definida pela média das velocidades de soldagem medidas nos corpos de prova de um a seis, foi quantificada em 140,4 mm/min. A velocidade de soldagem 2, definida pela média das velocidades de soldagem medidas nos corpos de prova de sete a doze, foi quantificada em 213 mm/min.

TABELA 3: Parâmetros definidos para a realização dos experimentos.

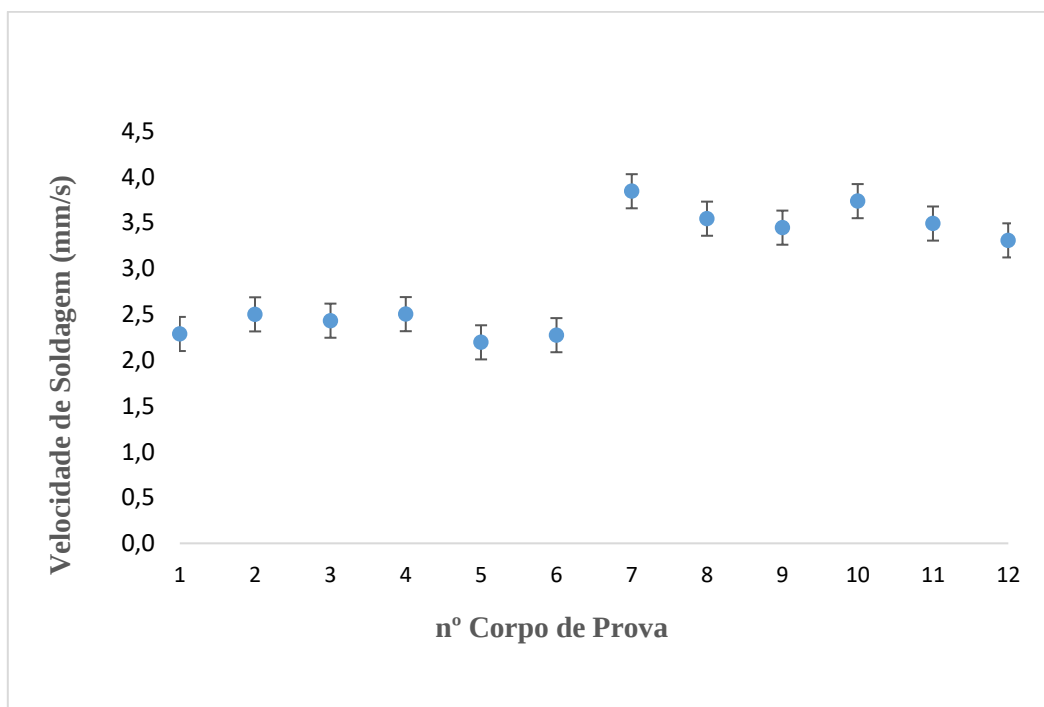
Parâmetro	Informação
Processo	Eletrodo Revestido
Corrente de soldagem	125A
Tensão	24V
Velocidade média de soldagem 1	140,4 mm/min
Velocidade média de soldagem 2	213mm/min
Comprimento do Cordão	120mm
Rendimento do Arco	90%
Polaridade e posição de soldagem	Direta e posição plana
*Energia de Soldagem 1	1153 J/mm
* Energia de Soldagem 2	760 J/mm
Fonte: Arquivo Pessoal. *Calculada pela expressão (3)	

Para melhor visualização das velocidades calculadas pode-se plotar no mesmo gráfico a velocidade de soldagem de cada cordão de solda de forma a verificar que são estatisticamente diferentes, e verificar que os efeitos causados pela variação desse fator causarão efeito no resultado da variável de influência. No Gráfico 1 são ilustradas comparativamente as velocidades de soldagem para cada um dos corpos de prova, respectivamente para cada cordão de solda realizado. Lembrando que foram realizados três cordões de solda em cada corpo de prova. O Gráfico 2 ilustra esses mesmos resultados, mas mostrando a dispersão dos valores médios de velocidade de soldagem entre os três cordões de solda para cada corpo de prova.

GRÁFICO 1: Velocidades de Soldagem para cada C.P.

Fonte: Arquivo Pessoal

O gráfico mostra as velocidades de soldagem em cada cordão e de cada corpo de prova. Pode-se verificar um aumento significativo da velocidade a partir do CP 6, como era desejado. Fato que pode ser comprovado com um gráfico de dispersão.

GRÁFICO 2: Dispersão entre as médias de velocidade de soldagem de cada CP.

Fonte: Arquivo Pessoal

Observando-se os valores das médias e seus respectivos desvio padrão, pode-se constatar que, de fato, as velocidades foram estatisticamente diferentes, uma vez que não houve interferência entre as dispersões das medias registradas nos seis primeiros corpos de prova em relação as medias dos demais.

5.2 MEDIÇÃO DAS DISTORÇÕES.

Os resultados para as distorções apresentada por cada corpo de prova estão disponíveis na Tabela 4. O método de medição já foi discutido no capítulo anterior.

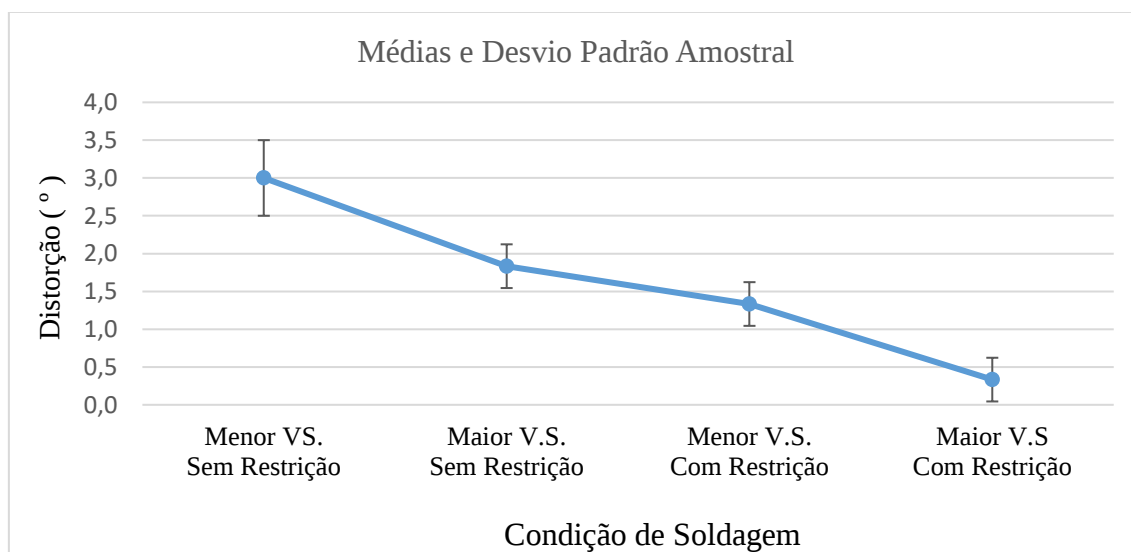
TABELA 4: Valores das distorções de cada condição de soldagem.

Condição de Soldagem		Repetições (Valores em °)		
V. Soldagem	Restrição.	1	2	3
Menor	Sem	3,50	2,50	3,00
Maior	Sem	2,00	2,00	1,50
Menor	Com	1,50	1,00	1,50
Maior	Com	0,5	0	0,5

Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

Para cada condição de soldagem configurou-se uma média de resultados e respectivos desvio padrão para conjunto de dados, pelo gráfico 3 abaixo, verifica-se um indicativo que a variação dos fatores causou uma variação na resposta.

GRÁFICO 3: Dispersão entre as Médias para cada Condição de Soldagem.



Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

Pela análise do gráfico verifica-se intersecção entre os desvios padrão calculados, é necessário verificar por meio de testes de hipótese se as médias são estatisticamente significativas. Constrói-se a tabela 5 resumida de ANOVA.

TABELA 5: Análise de Variância.

Fonte de Variação	GLD	SQ	QM	F
Tratamentos	3	11,06	3,6875	29,50
Resíduo	8	1,00	0,125	
TOTAL	11	12,06		

Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

Consultando a tabela de estatística F para uma confiabilidade de 95% e entrando com os dados de grau de liberdade dos tratamentos e residuais ($V_1=3$ e $V_2=8$) chegamos a um valor $F_{\text{tabelado}} = 4,07$

Como $F(\text{Calculado}) >> F(\text{Tabelado})$ podemos concluir que pelo menos duas médias de tratamentos diferem significativamente, entre as distorções apresentadas pelos tratamentos. Logo que as médias são significativamente diferentes.

5.3 CÁLCULOS DOS EFEITOS PRINCIPAIS E SIGNIFICÂNCIA DE EFEITOS.

5.3.1 Velocidade de Soldagem.

Resta saber quais efeitos são mais significativos, velocidade de soldagem, restrição? Há efeito de interação significativa? Considere os dados da tabela abaixo.

TABELA 6: Matriz de Planejamento para Cálculos dos Efeitos.

Fator de Controle		
Velocidade de soldagem	Restrição da Junta	Resultado (Média dos 3CPs)
Menor	Sem	3°
Maior	Sem	1,8°
Menor	Com	1,3°
Maior	Com	0,3°

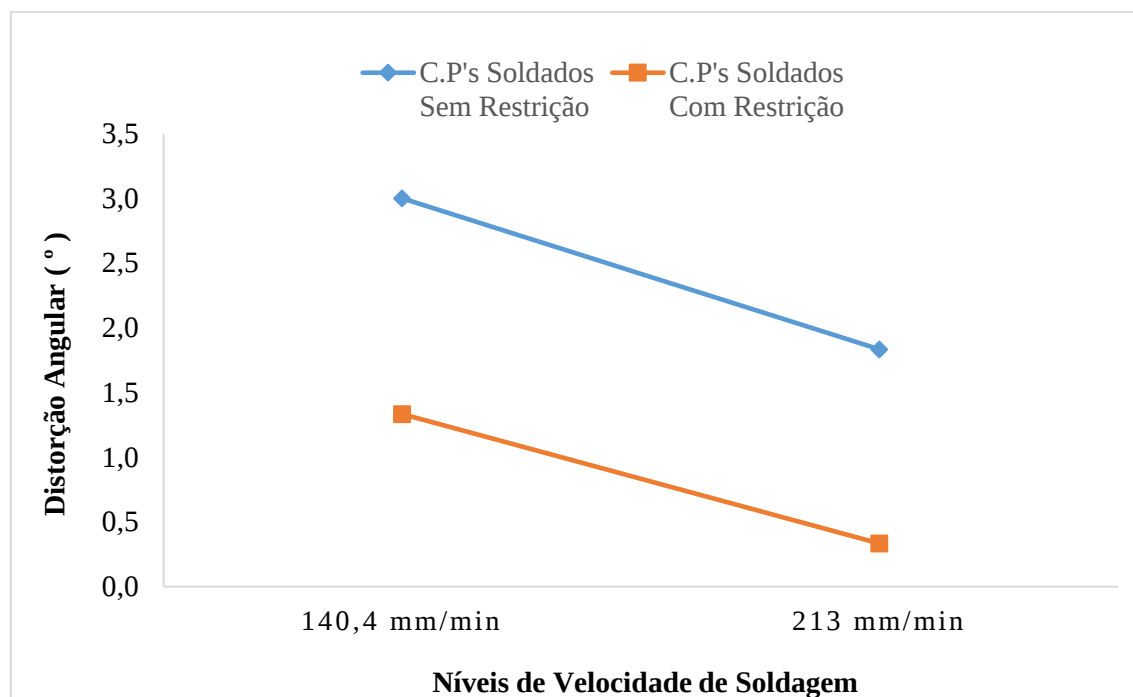
Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

Na Tabela 6, em cada uma das linhas é informada o tipo de interação entre as variáveis de influência analisadas. Comparando-se os resultados apresentados na última coluna, pode-se observar que, os maiores níveis de distorções apresentadas foram para os corpos soldados com menor velocidade de soldagem e na condição sem restrição. Da mesma forma, os menores valores de distorções foram encontrados para a combinação de maior velocidade de soldagem e condição com restrição, como mostra os resultados da tabela acima.

Uma maneira de avaliar os efeitos que as variáveis de influência causaram na variável de resposta é fixar o valor de cada variável e coloca-las em função da outra, de forma a observar suas características/tendências em termos das curvas descritas como mostra o Gráfico 4.

O eixo X corresponde aos níveis de velocidade de soldagem; o eixo Y corresponde a distorção apresentada pelo respectivo corpo de prova. A linha superior representa os corpos soldados sem a utilização de restrição na junta. A linha inferior representa os corpos soldados com restrição imposta no corpo de prova.

GRÁFICO 4: Efeito da Variação da Velocidade de Soldagem na Variável de Resposta.



Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

Pela análise do gráfico conclui-se que corpos soldados na velocidade de 140,4 mm/min apresentaram maior distorção em relação aos corpos soldados na velocidade de 213 mm/min. O aumento na velocidade de soldagem de 140,4 mm/min para 213 mm/min causou uma redução média de 49% nos níveis de distorção.

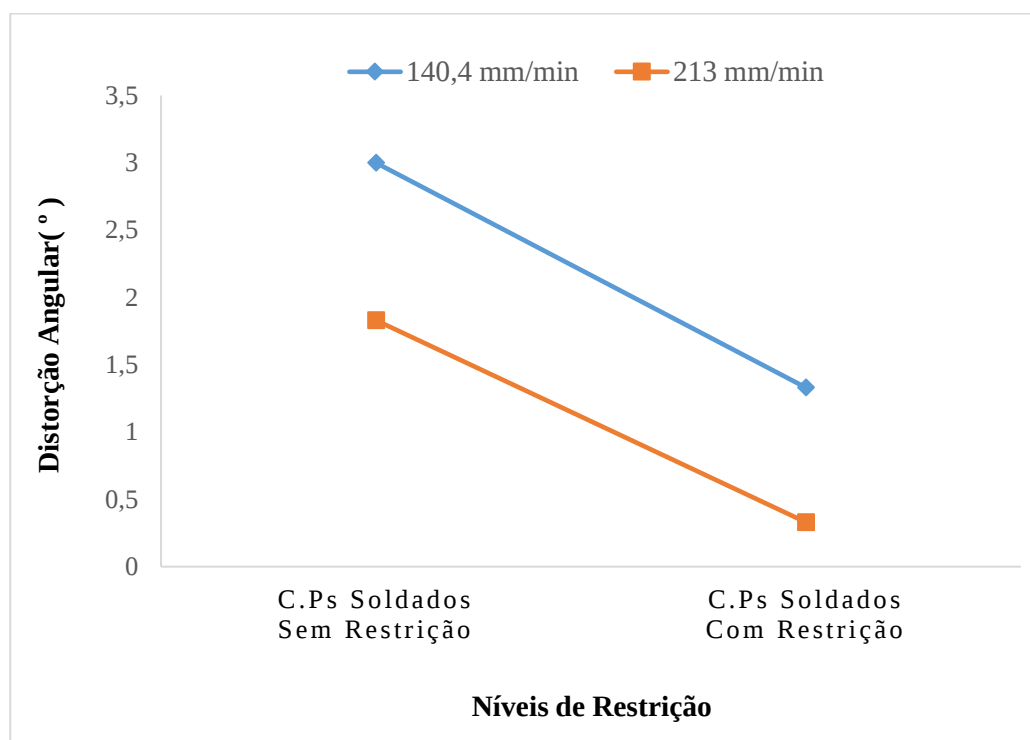
GAGEIRO, et al. 2017 verificou que o nível de distorções tem relação direta com a energia de soldagem e espessura da chapa, observou maiores distorções para a condição com maior energia de soldagem. Sabe-se que a variação da velocidade de soldagem é parâmetro direto no cálculo da Energia de soldagem, e, portanto, a variação dela é significativa.

Khanna e Sachin Maheshwarib, (2017) verificaram que a energia de soldagem está diretamente relacionada ao nível de distorção e tensões térmicas apresentadas.

5.3.2 Restrição imposta à Junta.

Da mesma forma que a análise feita para a velocidade de soldagem, pode ser feita para o nível de restrição. O eixo X representa os níveis de restrição, o eixo Y corresponde a distorção medida. A linha superior representa os corpos soldados na velocidade de soldagem 140,4 mm/min a linha inferior representa os corpos soldados na velocidade 213 mm/min, como apresentado no Gráfico 5.

GRÁFICO 5: Efeito da Variação da Restrição Imposta na Variável de Resposta.



Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

Pela análise do gráfico conclui-se que corpos soldados com restrição apresentaram os menores níveis de distorção. Impor restrição aos corpos de prova causaram uma redução média na distorção de 65%.

Teng et al. (2001) investigaram os efeitos da restrição da junta em relação a distorções apresentadas juntas em ângulo “T”, concluíram que para vários posicionamentos da restrição a junta apresentou menor distorção angular em relação a solda sem restrição.

Modenesi, (2008) afirma que uma das possíveis formas de minimização das distorções é impor restrições a junta soldada.

A observação dos efeitos calculados dá um indicativo de que a restrição imposta é mais significativa que a variação do efeito da velocidade e de soldagem, (observe que as distancias entre as curvas do gráfico 4 maiores que as distancias entre as curvas do gráfico 5) este resultado vai ser testado com uma análise variância.

5.4 EFEITOS DE INTERAÇÃO.

O fato de os gráficos da Figura 4 e 5 serem aproximadamente paralelos, é um indicativo que os efeitos de interação são baixos. A análise estatística mostra que os efeitos de interação afetaram em menos de 5% a variável de resposta. Esta conclusão pode ser verificada com o procedimento estatístico representado na tabela 7.

5.5 ANÁLISE DE FATORES PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO.

Utilizando uma planilha de cálculo pode-se fazer o teste de ANOVA dos fatores testados, os dados estão apresentados na Tabela 7.

TABELA 7: Análise ANOVA dos fatores.

Fonte de Variação	GLD	SQ	QM	F	Significância
Velocidade de Soldagem (A)	1	3,52	3,52	28,17	Significativo
Restrição da Junta(B)	1	7,52	7,52	60,17	Significativo
Interação (AxB)	1	0,02	0,02	0,17	Não--Significativo
Tratamento	3	11,06	3,6875	29,50	
Resíduo	8	1,00	0,12500		
TOTAL	11	14,25			

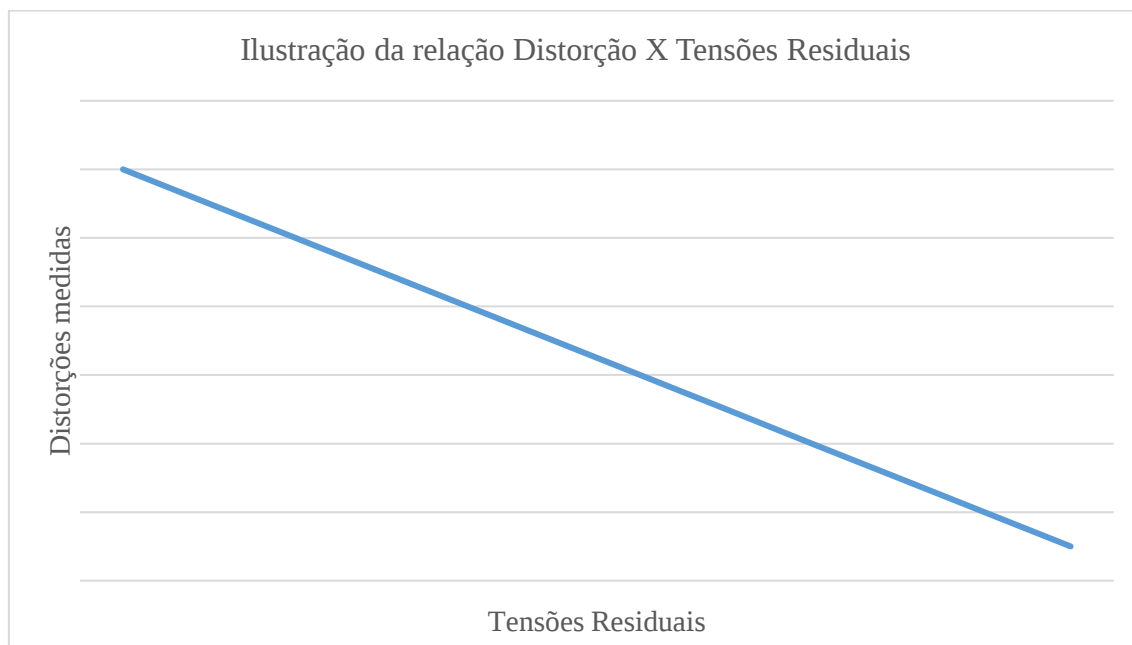
Fonte: Arquivo Pessoal, 2019

Consultando a tabela F para um nível de 95% de confiança e entrando com os dados iniciais, conclui-se que os efeitos de interação são pouco significativos, como já indicava os resultados anteriores. Conclui-se que as variáveis velocidade de soldagem e restrição imposta causam efeitos independentes na variável de resposta, como já indicava os resultados anteriores.

5.6 CARÁTER QUALITATIVO DOS VALORES DE TENSÕES RESIDUAIS.

O estudo e revisão bibliográfica permite inferir os valores de tensões residuais em cada corpo de prova, com base nas distorções apresentadas.

GRÁFICO 6: Representação ilustrativa, dos valores de T.R.



Fonte: Arquivo pessoal, 2019

O gráfico 6 acima é apenas uma representação dos valores de tensões residuais em cada corpo de prova. Na realidade, a curva acima não é uma reta, assim como mostrou BEZERRA, (2006). Ela apenas tenta ilustrar o comportamento geral de tendência da curva.

Dessa forma os corpos soldados na maior velocidade de soldagem e sem restrição apresentam os menores valores de tensões residuais, enquanto os corpos soldados com restrição e na menor velocidade de soldagem apresentam os maiores valores, de acordo com a literatura disponível.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados observados neste trabalho, concluiu-se que:

- O estudo da literatura possibilitou uma maior compreensão da relação entre tensões residuais e as distorções provocadas pelo processo de soldagem, onde, quando se permite uma maior distorção da junta soldada, espera-se menores níveis de tensões residuais.
- A variação dos fatores “velocidade de soldagem” e “restrição imposta na junta de solda” causou efeito significativo na distorção final apresentadas, que é comprovado comprando o valor tabelado de $F=4,07$, ao valor calculado $F=28,17$ no caso da velocidade de soldagem e $60,17$ para o fator restrição.
- Em relação à influência da velocidade de soldagem, o aumento desta de $140,4$ mm/min para 213 mm/min gerou uma diminuição média de $38,6\%$ de distorção angular, na condição sem restrição e $75,2\%$ na condição de soldagem com restrição. Em termos angulares, ao diminuir a velocidade de soldagem, a distorção variou de 3° para 2° para o caso sem restrição, e de $1,5^\circ$ para $0,5^\circ$ para o caso com restrição.
- Analisando-se a influência da restrição, a utilização dela gerou diminuição média de $55,6\%$ de distorção angular na velocidade de soldagem $140,4$ mm/min e de 82% para a velocidade de 213 mm/min
- O efeito de restrição sobre o nível de distorção da junta foi estatisticamente mais significativo que o efeito da velocidade de soldagem.
- Os resultados obtidos mostram que não há efeito de interação significativa entre as variáveis de influência “velocidade de soldagem” e “restrição da junta”, o que equivale a dizer que cada variável causa um efeito independente na resposta, ou ainda, que uma variável não gera interferência significativa sobre a influência da outra variável.
- As análises e os testes de hipóteses confirmam que o melhor resultado para os corpos de prova soldados foi para as combinações de menor velocidade de soldagem

com uso de restrição, porque nesta combinação os corpos de prova apresentaram os menores níveis de distorção.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Carlos filho. **Metalurgia da soldagem**. Instituto Federal do Paraná. 2008. (Notas de Aula). Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAM0YAF/metalurgiasoldagem>>. Acesso em 12 jun. 2018.

ARAÚJO, Francisco Edson Nogueira. **Estudo de distorções em Soldagem com Uso de Técnicas Numéricas e de Otimização**. 2009. 265 p. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14710/1/t.pdf>> Acesso em 05 jul. 2018.

ASTM E-837-13a, “**Standard Test Method for determining Residual Stresses by the Hole- Drilling Strain Gauge Method**”, 2013. Acesso em Maio 2018

CABRAL, Tércio dos Santos. **Influência dos Procedimentos e Processos de Soldagem MAG na Redução de Deformação em Painéis de Estruturas Navais**. Belém, 2011. 160 p. Tese (mestrado em engenharia mecânica). Disponível em: <www.ufpa.br/ppgem/images/.../cabral%20tercio%20do%20santos.pdf> Acesso em 01 jul. 2018.

Dante Gageiro La Porta Neto, Arnaldo Ruben Gonzalez, José Antônio Esmerio Mazzaferro. **Análise da Influência da Espessura de Aba, Espessura de Alma e Energia de Soldagem sobre as Distorções Angulares em Juntas em Ângulo de Filete**, Soldagem & Inspeção. 2017;22(2):174-193. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2202.07>>. Acesso em 30 jun. 2018.

ESAB. **Processo de Soldagem: Eletrodo Revestido (MMA/SMAW)**. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_ma_ma_smaw.cfm>. Acesso em: 05 jul. 2018.

ERDÓCIA, Félix A. Barros. **Difração de Raios X em Minerais de Bauxita e Análise Através de Refinamento pelo Método de Rietveld**. Belém, 2011. 93 p. Tese (mestrado em engenharia mecânica). Disponível em: <http://www.ppgf.ufpa.br/download/Dissertacoes/38_F%C3%A9lix_Erd%C3%B3cia.pdf> Acesso em 01 jul. 2018.

FRAGA, Francisco Edson Nogueira. **Proposta de Modelo para Caracterizar Suscetibilidade a Distorção Devido à Soldagem em Chapas de Alumínio**. 2009. 159 p. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265234/1/Fraga_FranciscoEdsonNogueira_D.pdf> Acesso em 05 jul. 2018.

MANSUR, Tanius Rodrigues et al. **Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base**. Soldag. insp. (Impr.) [online]. 2011, vol.16, n.3, pp.274-284. ISSN 0104-9224. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242011000300009>. Acesso em 16 jun. 2018

Martins, C. O. D., Strohaecker, T. R., Rocha, A. S., Hirsch, T. K. . **Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100**. Revista Matéria, v. 9, n. 1, pp. 20 – 28, 2004 ISSN 1517-7076. Disponível em <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10589> Acesso em 02 mai. 2018

MARQUES, Paulo Villani e MODENESI, Paulo José. Algumas equações úteis em soldagem. Soldag. insp. [online]. 2014, vol.19, n.1, pp.91-101. ISSN 0104-9224. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242014000100011>. Acesso em 29 jul. 2018

MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2008. Disponível em:<engenhariasoldagemupe2011.files.wordpress.com/.../monografia-01....> . Acesso em 02 maio 2018. .

OLIVEIRA, George Luiz Gomes de; SILVA, Thiago Ferreira da; MIRANDA, Hélio Cordeiro de and MOTTA, Marcelo Ferreira. **Avaliação do efeito da energia de soldagem sobre as tensões residuais resultantes em juntas soldadas com multipasse**. Soldag. insp. (Impr.) [online]. 2010, vol.15, n.3, pp.218-224. ISSN 0104-9224. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242010000300008>. Acesso em: 01 jun. 2018

PILIPENKO, Artem. **Computer Simulation of Residual Stress and Distortion of Thick Plates in Multi-electrode Submerged Arc Welding. Their Mitigation Techniques.** 2001 .228 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Norwegian University of Science and Technology, Trondheim. Disponível em: <ntnu.divaportal.org/smash/get/diva2:126204/FULLTEXT01> Acesso em 06 mai. 2018.

Pradeep Khanna and, Sachin Maheshwari, **Residual Stress Analysis in MIG Welding of Stainless Steel 409M**, Materials Today: Proceedings, Volume 5, Issue 2, Part 1, 2018, Pages 4939-4947, ISSN 2214-7853, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.071>. Acesso em 03 jun. 2018

RADAJ, D. **Welding residual stresses and distortion: Calculation and measurement.** Düsseldorf: Ed. DVS-Verlag, 2003. 397 p

ROCHA, A.S.; Nunes, R.M.; Hirsch, T.K.. **Comparação entre difração de raios X e "método do furo cego" para medição de tensões residuais em barras cilíndricas**, On-line ISSN 1517-7076 Revista Matéria vol.14 no. 3 2009 Disponível em: <www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11078/>. Acesso em: 18 jul. 2018.

SCOTTI, A. **Tensões e Deformações em Soldagem.** Universidade Federal de Uberlândia. 2009. Disponível em: <www.ufpa.br/ppgem/images/.../cabral%20trcio%20do%20santos.pdf > Acesso em 25 mar. 2018.

SILVEIRA, J. P. BARROS, S. M. **Tensões Residuais e Deformações em Soldagem.** Rio de Janeiro: Petrobrás / Sepes / Diven, 1982. Disponível em <Biblioteca Orlando Teixeira UFERSA>. Acesso em 10 mai. 2018.

SEARS E ZEMANSKY, YOUNG EFREEDMAN . **Física II Ondas e Termodinâmica** 10. ed. São Paulo: Person, 2008. Disponível em: <Biblioteca Orlando Teixeira - UFERSA>. Acesso em 04 fer. 2014.

SOARES, Hélio Coelho Guimarães. **Estudo da Sequência de Soldagem para Redução e Eliminação das Distorções.** 2006. 95 p. Tese (mestrado em engenharia mecânica). Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/SBPS-7B5JET>> Acesso em jul. 2018.

T. Schenk, I. M. Richardson, M. Kraska & S. Ohnimus (2009) **Influence of clamping on distortion of welded S355 T-joints**, Science and Technology of Welding and Joining, 14:4, p. 369-375, Disponível em: DOI: 10.1179/136217109X412418 Acesso em 01 jun. 2018

Tso-Liang Teng, Chin-Ping Fung, Peng-Hsiang Chang, Wei-Chun Yang, **Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds**, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 78, n. 8, 2001, P. 523-538, ISSN 0308-0161, disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(01\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(01)00074-6). Acesso em 25 jun. 2018

VASCONSELOS, Alexandre Maioli. **Análise da sequência de soldagem em painéis típicos navais**. 2012. 145 p. Monografia (Graduação em engenharia naval). Disponível em: < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10012002.pdf> > Acesso em jul. 2018.

WAINER, E. BRANDI, S.D. MELLO, F.D.H. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 8. ed. Rio de Janeiro: Edgard Blucher. 2004 494p. Disponível em:<Biblioteca Orlando Teixeira UFERSA> Acesso em 20 jul. 2018.

Wang, Rui & Rashed, Sherif & Serizawa, Hisashi & MURAKAWA, Hidekazu & ZHANG, Jianxuna. (2008). **Numerical and Experimental Investigations on Welding Deformation**. V. 37, N. 1, p.12 – 2008 Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/43169661_Numerical_and_Experimental_Investigations_on_Welding_Deformation > Acesso em 10 jun. 2018.

ANEXOS

A - Tabelas utilizadas para análise estatística dos dados.

VALORES DAS DISTORÇÕES DE CADA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM							
Fatores		Repetições			Totais	Médias	Desvio padrão
V. SOLD.	Restrição.	1	2	3			
(--)	(--)	3,50	2,50	3,00	9,00	3,00	0,500
(++)	(--)	2,00	2,00	1,50	5,50	1,83	0,289
(--)	(++)	1,50	1,00	1,50	4,00	1,33	0,289
(++)	(++)	0,5	0	0,5	1,00	0,33	0,289

Análise ANOVA: Fator duplo

(nº de repetições)	3
(numero de trat.)	4

				Soma	Soma de QT	Soma QTr	SQR
1	3,50	2,50	3,00	9,00	27,50	27,00	
2	2,00	2,00	1,50	5,50	10,25	10,08	
3	1,50	1,00	1,50	4,00	5,50	5,33	
4	0,5	0	0,5	1,00	0,50	0,33	
Totais				31,69	12,063	11,06	1,000

PRIMEIRO QUADRO DE ANOVA.

Fonte de Variação	GLD	SQ	QM	F
Tratamentos	3	11,06	3,6875	29,500
Resíduo	8	1,00	0,1250	
TOTAL	11	12,06		

AGORA PODEMOS CONSTRUIR O SEGUNDO QUADRO DE ANOVA.

		Restrição		
		B0	B1	Totais
velocidade de S.	A0	9,00	4,00	13,00
	A1	5,50	1,00	6,50
	Totais	14,50	5,00	19,50

Soma Q(A)	Soma Q(B)	Soma Q(AxB)
3,521	7,521	0,021

Fonte de Variação	GLD	SQ	QM	F	Significância
Velocidade de Soldagem (A)	1	3,52	3,52	28,17	Significativo
Restrição da Junta(B)	1	7,52	7,52	60,17	Significativo
Interação (AxB)	1	0,02	0,02	0,17	Não-- Significativo
Tratamento	3	11,06	3,6875	29,50	
Resíduo	8	1,00	0,12500		
TOTAL	11	14,25			