

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Douglas José de Sousa

Estudo da União de Materiais Similares e Dissimilares
Utilizando o Processo de Soldagem por Fricção (FW)

Itajubá, Março de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Douglas José de Sousa

Estudo da União de Materiais Similares e Dissimilares
Utilizando o Processo de Soldagem por Fricção (FW)

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Mecânica

Área de Concentração: Projeto, Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho
Castro

Itajubá, Março de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Douglas José de Sousa

Estudo da União de Materiais Similares e Dissimilares
Utilizando o Processo de Soldagem por Fricção (FW)

Dissertação aprovada pela banca examinadora em 31 de Março de 2017, conferindo ao autor o título de *Mestre em ciências em Engenharia Mecânica*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa (Orientador) – UNIFEI

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro (Co-orientador) – CEFET - MG

Prof. Dr. Marcos Moura Galvão – UNIFEI

Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira – CEFET - MG

Itajubá, Março de 2017

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me ajudado em mais uma conquista na minha vida.

Ao meu pai Jair, minha mãe Maria de Lourdes e a minha irmã Débora por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa pela atenção, dedicação, competência, conhecimentos transmitidos, paciência e amizade.

Ao meu Co-orientador, Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro também pela atenção, competência, dedicação, conhecimentos transmitidos, paciência e amizade.

Aos amigos, Eduardo Silva, Gabriel Henrique e Diego Izidoro.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais - FAPEMIG mediante ao programa de bolsa.

A todos que auxiliaram na construção deste trabalho.

Resumo

Sousa, D. J. (2017), *Estudo da união de Materiais Similares e Dissimilares Utilizando o Processo de Soldagem por Fricção (FW)*. 76 p. Dissertação (Mestrado em projeto, Materiais e processos) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Em um período marcado pela grande concorrência mundial, onde a velocidade se tornou uma vantagem competitiva, o desenvolvimento de novos processos de fabricação mais eficientes, que não ofereçam riscos ao meio ambiente e nem a saúde do operador tem-se tornado a tendência do mundo moderno. Neste cenário, a soldagem por fricção (*Friction Welding*) têm se destacado por essas e outras vantagens inerentes, como a união dos materiais no estado sólido, que elimina problemas relacionados a soldagem por fusão e também possibilita a junção de materiais dissimilares. Com o intuito de aumentar o campo de pesquisa nessa área, este trabalho realizou um estudo da soldagem similar e dissimilar dos aços ASTM A 36, ASTM 1045 e AISI 304 com diferentes valores de rotação, pressão e tempo de solda. A utilização desses materiais, principalmente para as soldas dissimilares, permite unir suas boas características. Fez-se uso de um experimento fatorial completo 3^3 para analisar todas as possíveis combinações de soldas existentes entre as variáveis e seus níveis, onde por meio dessas combinações pôde-se encontrar quais os melhores parâmetros para os materiais estudados. Após a soldagem dos corpos de prova, primeiramente, foi analisado a geometria de formação da rebarba: como diâmetro, espessura e *burn off*. Essas análises mostram que a geometria de formação da rebarba varia de acordo com a influência dos valores de rpm, pressão e tempo. Posteriormente foi analisado a interface de ligação dos materiais, onde verificou-se a resistência mecânica da junta soldada para os melhores parâmetros. Para a soldagem similar, a condição que apresentou maior resistência a tração foi do corpo de prova 22 na soldagem do aço ASTM 1045 em que a solda apresentou uma capacidade de resistência de 89,94%. Na soldagem dissimilar, a soldagem dos ASTM A 36 x AISI 304 do corpo de prova 07 foi a condição em que a solda apresentou a maior resistência a tração, chegando em 66,10%. Essa resistência dos materiais se refere a relação entre a força necessária para romper o material soldado e a do material sem solda. Os resultados mostraram que é possível utilizar o processo de soldagem de fricção para materiais similares e dissimilares.

Palavras chaves: Soldagem por atrito, materiais similar, materiais dissimilar.

Abstract

Sousa, D. J. (2017), *Study of the union of similar and dissimilar materials using the Friction Welding Process (FW)*. 76 p. Dissertação (Mestrado em projeto, Materiais e processos) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

In a period marked by the great global competition, where speed has become a competitive advantage, the development of new, more efficient manufacturing processes that don't expose the operator to risk environment nor the health has become the trend of the modern world. In this scenario, friction welding has been highlighted by these and other inherent advantages, such as the joining of materials in the solid state, which eliminates problems related to fusion welding and also enables the joining of dissimilar materials. In order to increase the field of research in this area, this work carried out a study of similar and dissimilar welding of ASTM A 36, ASTM 1045 and AISI 304 steels with different values of rotation, pressure and welding time. The use of these materials, especially for the dissimilar welds, allows joining their good characteristics. A complete factorial experiment 3^3 was used to analyze all possible combinations of welds between the variables and their levels, where through these combinations it was possible to find out the best parameters for the studied materials. After the welding of the test specimens, first the burr formation geometry was analyze: as diameter, thickness and burn off. These analyzes show that the geometry of burr formation varies according to the influence of rpm, pressure and time values. Successively, the bonding interface of the materials was analyze, where the mechanical resistance of the welded joint was verified for the best parameters. For the similar welding, the condition that presented the highest tensile strength was specimen 22 in the welding of ASTM 1045 steel in which the weld presented a resistance capacity of 89.94%. In dissimilar welding, welding of ASTM A 36 x AISI 304 of specimen 07 was the condition in which the weld showed the highest tensile strength, reaching 66,10%. This strength of the materials refers to the ratio of the force required to rupture the weld material to that of the material without welding. The results showed that it is possible to use the friction welding process for similar and dissimilar materials.

Keywords: *Friction welding, materials similar, materials dissimilar.*

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Abreviaturas e Símbolos	vi
1- INTRODUÇÃO	01
1.1 - Objetivo	02
1.2 - Justificativa	02
1.3 - Estrutura do Trabalho	03
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 - Soldagem	04
2.2 - Soldagem por atrito (Friction Welding – FW)	06
2.2.1 - Parâmetros	11
2.2.2 - Variantes do FW	15
2.2.3 - Aplicações do FW	17
2.2.4 - Vantagens do FW	18
2.2.5 - Limitações	19
2.3 - Classificação dos aços	19
2.3.1 - Influência dos elementos de liga	20
2.4 - Soldagem dos materiais	21
2.4.1 - Soldagem do aço ASTM 1045.....	22
2.4.1.1 - Temperabilidade	23
2.4.1.2 - Trincas a frio	23
2.4.1.3 - Aplicação do aço ASTM 1045	24
2.4.2 - Soldagem do aço ASTM A 36	25
2.4.2.1 - Aplicações do aço ASTM A 36	25
2.4.3 - Aço inoxidável austenítico	25
2.4.3.1 - Soldagem do aço inoxidável AISI 304	27
2.4.3.2 - Propriedades físicas dos inoxidáveis	28
2.4.3.3 - Produção, aplicações e especificações dos inoxidáveis Série 300	29
2.4.3.4 - Trincas de solidificação	30
2.5 - Delineamento dos experimentos	30

3 - METODOLOGIA	32
3.1 - Materiais utilizados	32
3.2 - Composição química	32
3.3 - Etapas do projeto	33
3.4 - Métodos utilizados	33
3.5 - Planejamento fatorial	36
3.6 - Macroestrutura	37
3.7 - Microestrutura	38
3.8 - Tensão de ruptura	39
3.9 - Análise por microscópico eletrônico de varredura – MEV	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 - Testes preliminares	40
4.2 - Macrografia	40
4.3 - Diâmetro, espessura e comprimento final de ASTM 1045 x ASTM 1045	42
4.4 - Diâmetro, espessura e comprimento final de AISI 304 x AISI 304	44
4.5 - Diâmetro, espessura e comprimento final de ASTM 1045 x AISI 304	46
4.6 - Diâmetro, espessura e comprimento final de ASTM A 36 x AISI 304	48
4.7 - Micrografia	51
4.8 - Melhores parâmetros	53
4.9 - Análise das interfaces de solda utilizando o MEV e EDS	53
4.10 - Ensaio de resistência a tração	56
5 - CONCLUSÕES	65
5.1 - Sugestões para trabalhos futuros	66
REFERÊNCIAS	67
Anexos	
Anexo A – Soldagem similar dos aços ASTM 1045	73
Anexo B – Soldagem similar dos aços AISI 304	74
Anexo C – Soldagem dissimilar do aço ASTM 1045 x AISI 304	75
Anexo D – Soldagem dissimilar do aço ASTM A 36 x AISI 304	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo (FEHER, 2006)	04
Figura 02 – Etapas do FW (MODENESI; MARQUES, 2000)	10
Figura 03 – Efeitos das variáveis de processo na soldagem por fricção (WAINER, 1992)	13
Figura 04 – Diferentes regiões na ZTA para corpos de prova soldados pelo FW (ROMBAUT., <i>et al</i> 2011)	14
Figura 05 – Variantes da soldagem por atrito (MAALEKIAN., <i>et al</i> 2008)	15
Figura 06 – Solda por atrito convencional (PIRES, 2007)	16
Figura 07 – Solda por atrito método <i>Counter Rotation</i> (PIRES, 2007)	16
Figura 08 – Solda por atrito <i>Center Drive</i> (PIRES, 2007)	16
Figura 09 – Solda por atrito <i>Twin Welds</i> (PIRES, 2007)	17
Figura 10 – Solda por atrito <i>Radial</i> (PIRES, 2007)	17
Figura 11 – Aplicações dos aços austeníticos (CARBÓ, 2008)	29
Figura 12 – Ilustração da soldagem por fricção	34
Figura 13 – Parametrização das pressões utilizadas por meio de células de carga	35
Figura 14 – Microscópio utilizado para análise dos corpos de prova	38
Figura 15 – Microscópio utilizado para análise das interfaces dos corpos de prova	38
Figura 16 – Máquina universal de ensaio de tração	39
Figura 17 – Microscópio eletrônico de varredura – MEV	39
Figura 18 – Formação do <i>flash</i> para os mesmos parâmetros	41
Figura 19 – Média do diâmetro da rebarba para o aço ASTM 1045 x ASTM 1045	43
Figura 20 – Média da espessura da rebarba para o aço ASTM 1045 x ASTM 1045	43
Figura 21 – Comprimento final dos corpos de prova para o aço ASTM 1045 x ASTM 1045 .	43
Figura 22 – Média do diâmetro da rebarba para o aço AISI 304 x AISI 304	45
Figura 23 – Média da espessura da rebarba para o aço AISI 304 x AISI 304	45
Figura 24 – Comprimento final dos corpos de prova para o aço AISI 304 x AISI 304	45
Figura 25 – Média do diâmetro da rebarba para o aço ASTM 1045 x AISI 304	47
Figura 26 – Média da espessura da rebarba para o aço ASTM 1045 x AISI 304	47
Figura 27 – Comprimento final dos corpos de prova para o aço ASTM 1045 x AISI 304	47
Figura 28 – Média do diâmetro da rebarba para o aço ASTM A 36 x AISI 304	49
Figura 29 – Média da espessura da rebarba para o aço ASTM A 36 x AISI 304	49
Figura 30 – Comprimento final dos corpos de prova para o aço ASTM A 36 x AISI 304	49

Figura 31– Comprimento final dos corpos de prova para as condições máximas	51
Figura 32 – Deformação dos corpos de prova para as condições máximas	51
Figura 33 – Interface de ligação do aço AISI 304 x ASTM A 36. Corpo de prova 07; 1-3-1 com aumento de 500 vezes	52
Figura 34 – Região de ligação do aço AISI 304 x ASTM A 36. CP 07; 1-3-1 com 50 vezes de aumento	52
Figura 35 a) e b) – Interface de solda para os materiais AISI 304 x ASTM 1045	54
Figura 36 – Interface de solda para os materiais AISI 304 x ASTM 1045	55
Figura 37 – Interface de solda para os materiais AISI 304 x ASTM A 36	56
Figura 38 – Corpos de prova para ensaio de tração	57
Figura 39 – Corpo de prova 21; 3-1-3. Soldagem similar do aço ASTM 1045 e ensaio de tração	57
Figura 40 – Corpo de prova 22; 3-2-1. Soldagem similar do aço ASTM 1045 e ensaio de tração	58
Figura 41 – Corpo de prova 25; 3-3-1. Soldagem similar do aço ASTM 1045 e ensaio de tração	59
Figura 42 – Corpo de prova 26; 3-3-2. Soldagem similar do aço ASTM 1045 e ensaio de tração	60
Figura 43 – Corpo de prova 18; 2-3-3. Soldagem similar do aço AISI 304 e ensaio de tração	61
Figura 44 – Corpo de prova 23; 3-2-2. Soldagem similar do aço AISI 304 e ensaio de tração	62
Figura 45 – Corpo de prova 07; 1-3-3. Soldagem dissimilar do aço AISI 304 x ASTM 1045 e ensaio de tração	63
Figura 46 – Corpo de prova 07; 1-3-3. Soldagem dissimilar do aço AISI 304 x ASTM A 36 e ensaio de tração	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Propriedades Físicas dos inoxidáveis (ALVES, 2010)	28
Tabela 02 – Composição química nominal do aço ASTM A 36 (%). (MatWeb, 2016)	32
Tabela 03 – Composição química nominal do aço ASTM 1045 (%). (MatWeb, 2016)	32
Tabela 04 – Composição química nominal do aço inoxidável AISI 304 (%). (MatWeb, 2016)	32
Tabela 05 – Número de variáveis	36
Tabela 06 – Número de ensaios	37
Tabela 07 – Formação da rebarba para aço ASTM 1045 x ASTM 1045	42
Tabela 08 – Formação da rebarba para aço AISI 304 x AISI 304	44
Tabela 09 – Formação da rebarba para aço ASTM 1045x AISI 304	46
Tabela 10 – Formação da rebarba para aço A 36 x AISI 304	48
Tabela 11 – Comprimento final dos corpos de prova com maior deformação	50
Tabela 12 – Melhores parâmetros de soldagem	53

Lista de Abreviaturas e Símbolos

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Carbono
CE	Carbono Equivalente
CFC	Cúbica de Face Centrada
Cr	Cromo
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
FW.....	Friction Welding
IIW	International Institute of Welding
LF	Comprimento Final
LI	Comprimento Inicial
M	Martensita
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
Mn	Manganês
Ni	Níquel
P	Fósforo
rpm	Rotação Por Minuto
S	Enxofre
t	Tempo
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZR	Zona de Recristalização
α	Ferrita

1 – INTRODUÇÃO

O processo de soldagem foi impulsionado durante a II Guerra Mundial, devido à fabricação de navios e aviões soldados. Utilizada na fabricação de estruturas metálicas, aviões, veículos espaciais, navios, locomotivas, prédios, oleodutos, gasodutos, reatores nucleares, componentes eletrônicos, entre outros, consiste no processo de união de duas partes metálicas, com a presença de uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão (WAINER, 1992).

Quando os materiais são soldados, as propriedades do metal base são alteradas pela fusão do mesmo, produzida pelo alto ciclo térmico de soldagem, o que resulta em mudanças microestruturais na zona de fusão e da ZTA. Estas microestruturas na zona fundida e ZTA são significativamente diferentes tanto na aparência quanto nas propriedades quando comparados ao metal de base e podem comprometer a integridade da junta soldada (ELMER, 2004).

O uso da soldagem por atrito (fricção) - *Friction Welding (FW)* vem sendo muito utilizado devido as suas vantagens inerentes, como menores temperaturas de soldagem, alta eficiência de produção e ambientes menos agressivos. Materiais que dificilmente seriam soldados pelos processos de soldagem por fusão, podem ser soldados com sucesso pelo FW (PAVENTHAN *et al.*, 2012).

Os estudos da união de materiais dissimilares justificam-se pelo fato de que esta técnica é amplamente utilizada em muitas aplicações na engenharia, uma vez que, os benefícios são muitos, como a redução de peso, boas propriedades mecânicas, resistência a corrosão entre outros. A maior vantagem da soldagem por fricção está ligada a união de materiais com propriedades diferentes, os quais, muitas vezes, não poderiam ser unidos pelo processo de soldagem por fusão, devido a formação de uma união com propriedades mecânicas indesejáveis e devido ao aparecimento de defeitos como porosidades (MURALIMOHAN *et al.*, 2014).

Dessa forma, o FW apresenta a capacidade de unir materiais similares e principalmente dissimilares com diferentes pontos de fusão sem a deposição de material de adição, contribuindo de forma grandiosa para o enriquecimento dos processos de soldagem.

Neste trabalho, fez-se o uso da soldagem por atrito para soldas similares e dissimilares dos aços ASTM A 36, ASTM 1045 e AISI 304. A utilização desses materiais deve-se ao fato de possuírem boa resistência mecânica e a corrosão, logo, pela soldagem por atrito é possível unir as boas propriedades e evitar assim, problemas relacionados a soldagem por fusão.

1.1 – Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar as uniões de materiais similares e dissimilares em aço e aço inox. Os materiais utilizados são: Aço ASTM A 36, Aço ASTM 1045 e o Aço inoxidável AISI 304.

Também na realização deste trabalho pretende-se como objetivos específicos:

- 1 - Produzir soldas por fricção com propriedades aceitáveis;
- 2 - Verificar a resistência do material soldado de modo a contribuir para o aumento do estudo relacionado a soldagem por fricção, trazendo benefícios para a sociedade e para o estado da arte;
- 3 - Analisar a macroestrutura de formação da geometria da rebarba sobre os parâmetros utilizados;
- 4 - Analisar as melhores combinação dos parâmetros;
- 5 - Analisar macroscopicamente e microscopicamente as regiões de solda dos corpos de prova;
- 6 - Analisar por microscopia eletrônica de varredura as interfaces de solda dos materiais.

1.2 – Justificativas

A adoção de técnicas de soldagem automatizadas por fricção, pode causar redução significativa nos tempos de processamento e na mão de obra necessária, garantindo assim, a repetitividade de soldas sem a presença de variáveis dependentes da habilidade do operador. (HAUPT, 2013).

A importância deste estudo é devido ao fato de algumas soldas não se tornarem adequadas quando feitas em outros processos de soldagem a arco elétrico. As juntas de união resultantes das combinações de materiais dissimilares são empregadas em diversas aplicações que requerem combinações especiais de propriedades, redução de custo e aumento de produtividade. Portanto, este trabalho atua neste sentido, unir materiais similares e dissimilares, considerando as suas grandes diferenças de propriedades físicas e químicas, pois muitos desses materiais se fundem a diferentes temperaturas. Assim, contribuir-se-á para o aperfeiçoamento do processo aumentando os estudo sobre o tema, mostrando as tecnologias e parâmetros envolvidos. E como resultado espera-se também contribuir para o estado da arte, para o

processo de soldagem por fricção, utilizando novos desenvolvimentos, baseados na análise da soldabilidade, da qualidade, do rendimento e da produtividade. Sendo assim, poderá ser um instrumento para transferência de conhecimento, contribuindo tanto para a comunidade acadêmica para a realização de trabalhos futuros, como para a sociedade.

A utilização dos aços carbono deve-se a sua alta resistência mecânica, podendo ser aplicado em componentes que exerçam grandes solicitações e os inoxidáveis apresentarem boa resistência a corrosão. Portanto, estruturas produzidas por esses materiais permitem unir suas boas propriedades.

1.3 – Estrutura do trabalho

O trabalho será composto por cinco capítulos, os quais são:

➤ **Capítulo 1 – INTRODUÇÃO.**

Na introdução será abordado um pouco sobre o processo de soldagem FW, ressaltando sua importância, quais os objetivos, justificativas e estrutura do trabalho.

➤ **Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

Será composta por várias literaturas científicas exemplificando como é o FW. Fará uso de artigos nacionais e internacionais referente ao assunto, juntamente com livros comentados sobre o assunto.

➤ **Capítulo 3 – METODOLOGIA.**

Serão apresentados todos os métodos empregados na realização do trabalho.

➤ **Capítulo 4 – RESULTADOS.**

Serão abordados os resultados obtidos do processo após as peças serem soldadas.

➤ **Capítulo 5 – CONCLUSÕES.**

Serão feitas conclusões sobre todos os testes, análises e sugestões para trabalhos futuros.

➤ **REFERÊNCIAS**

Irá conter todos os acervos bibliográficos utilizados na confecção do trabalho.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será realizado uma revisão bibliográfica de forma que se possa fundamentar a pesquisa dando consistência ao tema, servindo como pilar para a construção do trabalho. Assim, espera-se também, o enriquecimento do trabalho norteando a pesquisa para que se possa fazer uma ligação entre o referencial e a metodologia, de forma a se ter embasamento suficiente na elaboração do projeto, caracterizando os aspectos relevantes ao processo de soldagem FW. Também deseja-se reunir informações que apoiadas nos procedimentos experimentais se possa chegar nos objetivos esperados. Dessa forma, serão abordados brevemente o histórico da soldagem, como e onde surgiu o FW, bem como seu desenvolvimento, características, técnicas operatórias entre outros. Esta revisão possibilitou o aprimoramento científico sustentando os objetivos tratados no capítulo anterior de modo a comprovar os resultados que serão discutidos no capítulo 4.

2.1– Soldagem

Sua descoberta retrata do século XIX, e atualmente temos vários processos de soldagem que foram desenvolvidos no decorrer do século, conforme apresentado na Figura 1 (WAINER, 1992).

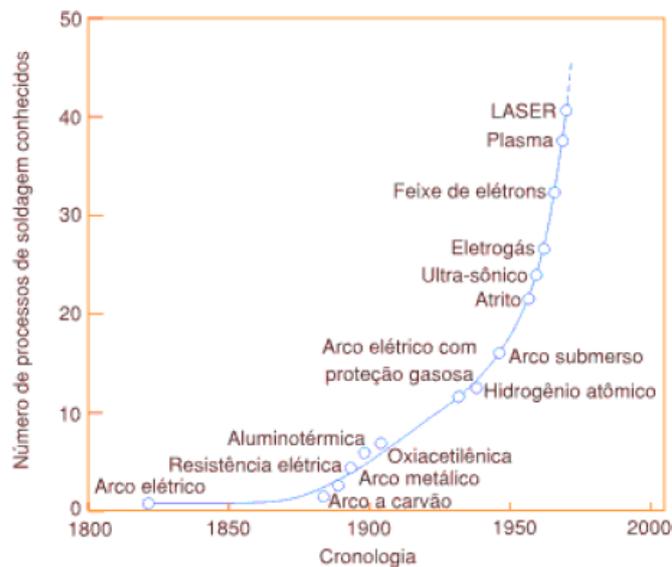


Figura 01 – Evolução dos processos de soldagem ao longo do tempo. (FEHER, 2006).

Relatos evidenciam que desde épocas remotas muitos artefatos eram confeccionados utilizando recursos de brasagem, processo este em que o metal de adição apresenta temperatura de fusão inferior ao metal de base. As notícias mais antigas sobre a soldagem ocorreram na Pérsia e trata-se de um pingente de ouro com indícios de solda a aproximadamente 4.000 a. C que está no museu do Louvre em Paris. A soldagem por forjamento consiste na conformação mecânica por compressão/prensagem, suas evidências são de mais de 3000 anos e seu exemplo trata-se da Espada de Damasco (1.300 a. C) e a utilização de um maçarico soprado pela boca, utilizado para fundir e soldar bronze. A fabricação do ferro data de 1500 a. C., e este substituiu o cobre e o bronze na fabricação de diversos artefatos e nesta época o ferro era conformado por martelamento em forma de blocos. Quando peças maiores eram necessárias, soldava-se os blocos por forjamento, ou seja, o material era aquecido ao rubro, adicionava-se areia entre as peças para escorificar impurezas martelando-as até a soldagem. A exemplo deste processo, tem-se um pilar de cerca de sete metros de altura e mais de cinco toneladas ainda existente na cidade de Delhi (Índia), (FEHER, 2006).

Segundo MARQUES (2009) a soldagem é um importante processo de união dos metais, com grande aplicação na indústria. Sua utilização vai desde a indústria microeletrônica, na criação de peças de artesanato, em estruturas simples como portões, até a fabricação de navios e outras estruturas com grandes toneladas de peso e com elevado grau de responsabilidade, como na indústria petrolífera e nuclear. A soldagem é considerada um processo de união, no entanto, muitos de seus processos são usados visando a recuperação de peças que se desgastaram, ou na formação de um revestimento com características especiais. O termo soldagem pode ser considerado como um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação, recuperação de peças, equipamentos e estruturas. A definição de soldagem pode ser: “processo de união de metais por fusão”; “operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas”; “processo de união dos materiais usados para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e ou material de adição”, sendo esta última adotada pela Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society – AWS*).

Tradicionalmente algumas técnicas de soldagem são baseadas na fusão do material base e do metal de adição. O fluxo de calor necessário para o processo é fornecido por várias fontes, como arco elétrico, raio laser, entre outros. A fase crítica do processo consiste no resfriamento da solda que deve primeiramente ser protegida dos efeitos oxidantes da atmosfera. Além do mais, durante a solidificação da solda, outros desagradáveis fenômenos como

segregação e porosidades podem se formar e comprometer a resistência da solda. (BAFFARI *et al.*, 2014).

Tempos atrás os materiais eram classificados como soldáveis e não soldáveis, no entanto, devido as inovações tecnológicas, tornou-se possível a união dos materiais por fusão e também pela soldagem no estado sólido. No entanto na soldagem por fusão podem surgir danos a peça de trabalho, incluindo enfraquecimento e distorções. Além do mais, muitas das vezes a união de materiais diferentes se faz necessário os quais não podem ser unidos por fusão, no entanto, são facilmente soldadas por fricção (KURT *et al.*, 2011).

2.2 - Soldagem por atrito (*Friction Welding* – FW)

O desenvolvimento do FW foi requisitado por vários países, sendo introduzido na União Soviética em 1956 com uma patente britânica de 1939. Após serem feitas inovações no processo nos Estados Unidos ele foi modificado e patentado em 1966. Devido as patentes existentes, atualmente tem-se duas variantes no processo, sendo a soldagem por atrito convencional (Russa) e a soldagem por atrito inercial (Americana). O FW tem como conceito a união das partes ligadas mecanicamente no estado sólido cujo aquecimento causa a ligação das partes, tornando a solda de alta resistência ocasionando uma faixa de ZTA (zona afetada pelo calor) relativamente pequena. Neste processo, não se atinge o ponto de fusão dos materiais e consequentemente tem-se temperaturas menores de trabalho (WAINER, 1992).

A soldagem por fricção é um processo altamente produtivo com importância significativa para a indústria de fabricação, pois requer curtos tempos de processamento podendo ser de frações de segundos a vários segundos, produzindo soldas de excelente qualidade (MITELEA; BUDĂU; CRĂCIUNESCU, 2012).

Em resposta a essas vantagens o processo de união dos materiais no estado sólido tornou-se de grande interesse para a área acadêmica e para as indústrias voltadas para a produção de estruturas leves e avançadas. A união dos materiais ocorre quando há uma distribuição adequada das variáveis de trabalho utilizadas (BUFFA *et al.*, 2016).

O aumento do uso da soldagem por atrito deve-se ao fato de oferecer vantagens de unir diferentes metais, oferecendo muitas das vezes, soluções únicas para requisitos de engenharia. As principais razões para se unirem materiais dissimilares são devidas a combinação de boas propriedades mecânicas de um material, baixo peso, boa resistência a corrosão, com boas

propriedades características de um segundo material. Grandes setores como de transporte, aeroespaciais, aviação, naval e ferroviário, tem despertado grandes interesses sobre o processo nos últimos anos (TABAN *et al.*, 2010).

O *Friction welding* não é apenas aplicado a soldagem de materiais metálicos, como também pode ser aplicado para a união de materiais plásticos e polímeros (SINGH *et al.*, 2016).

As juntas soldadas de alumínio e cobre pelo FW são amplamente utilizadas para aplicações elétrica e térmica, uma vez que ambos os elementos possuem alta condutividade elétrica e térmica, apresentando um crescente interesse para redução de custo e peso, por meio da substituição do cobre pelo alumínio (AVETTAND-FÈNOËL *et al.*, 2016).

A união de materiais dissimilares é desafiadora devido a diferença nas propriedades físicas, mecânicas e metalúrgicas dos materiais base a serem unidos. O aumento da disponibilidade de novos materiais e os requisitos mais elevados, cria uma maior necessidade de juntas de materiais diferentes (SATYANARAYANA; REDDY; MOHANDAS, 2005).

A soldagem por fricção é um método de união alternativo a soldagem por arco elétrico, é aplicado em situações onde a união dos materiais é de difícil junção e em ambientes submersos (LÓPEZ, 2010). Entre uma das maiores vantagens em relação aos outros processos, está a proteção ambiental e a saúde humana juntamente com juntas soldadas com boas propriedades mecânicas (RATKOVIĆ *et al.*, 2016).

Caracterizado pela união dos materiais no estado sólido, soldas de excelente qualidade são produzidas, tanto para materiais similares quanto para dissimilares. O atrito entre os dois materiais faz com que eles se tornem pastosos em ambas interfaces e após o calor ser suficiente, juntamente com uma pressão aplicada, a solda é finalizada mantendo-se ou aumentando a pressão por um certo instante de tempo, ocasionando assim a união dos materiais (ANDRADE, 2011).

Quando o material torna-se plastificado devido a força e o calor na interface da solda, ocorre a remoção de uma porção de material devido a forças de atuação, formando uma camada luminosa (*flash*). Esta remoção resulta em uma perda do comprimento do material que está sendo soldado e ao final do processo, as peças são forjadas em conjunto com um pouco de material plastificado. Por se tratar da união dos materiais no estado sólido, problemas relacionados a trincas a quente, porosidade, segregação (alteração local da composição química dentro do grão) são evitadas (BHAMJI *et al.*, 2010).

O calor gerado pelo atrito das faces das duas peças converte a energia mecânica em energia térmica durante a rotação sob pressão. Dessa forma, ligas ferrosas e não ferrosas com aspectos circulares ou não, com diferentes propriedades térmicas e mecânicas são facilmente

soldadas. Logo, o estado de união dos metais no estado sólido caracteriza o processo, em que a ligação é feita a temperaturas não tão elevadas, como a fusão em outros processos de união (SAHIN *et al.*, 1998). O calor é gerado diretamente na solda, lugar onde a ligação deve ser desenvolvida (JAMES; SUDHISH, 2016).

No FW o calor gerado nas interfaces de contato é diretamente proporcional a velocidade relativa, sendo mínimo no centro e máxima na periferia. No entanto, nas regiões periféricas as articulações são sujeitas a troca de calor por convecção para ao ambiente o que torna a região de calor máxima em pontos próximos da periferia abaixo da superfície. A taxa de queima influencia na microestrutura da junta soldada onde para o aumento dessa taxa a largura da camada de interação aumenta (MESHARAM *et al.*, 2007).

No início do processo, o contato entre as partes é pequeno, com o aumento da força a ampliação do contato aumenta devido a plasticidade. Essa força se intensifica até que haja o contato íntimo entre as duas áreas e devido a energia envolvida, ocorre o aquecimento das regiões próximas as superfícies de contato que tornam-se plásticas e fluem. A ligação final ocorre pela mistura dos dois materiais, evitando assim a formação de uma fase líquida de fusão (WAINER, 1992).

A soldagem por fricção com acionamento direto, mantém a rotação constante em toda a fase de fricção. A rotação é levada até um nível determinado e as duas superfícies são postas em contato por meio de uma força axial. Esta força é aumentada ocasionando o aquecimento do material gerando uma rebarba. Na fase final, o eixo é desligado ao passo que a carga axial é mantida ou aumentada para completar a solda. Na soldagem por fricção com acionamento inercial, um volante é posto com velocidades desejadas, a fonte de acionamento é desacoplada e as partes são postas em contato com uma força axial. O eixo desacelera ao passo que a energia cinética armazenada é convertida em calor pelo atrito das superfícies de contato. A fase de fricção é interrompida com a parada do eixo motor e uma força é mantida ou aumentada encerrando a soldagem (HAUPT, 2013).

O quadro 01, mostra as variantes da soldagem por atrito convencional e inercial.

Quadro 01- Variantes do processo de soldagem por atrito (WAINER, 1992)

Soldagem por atrito convencional (Processo Russo)	Soldagem por atrito inercial (Processo Americano)
1. Fixação das partes a serem soldadas no mandril e no cabeçote	
<p>2. Colocação do mandril na rotação adequada.</p> <p>3. Manutenção da rotação do mandril enquanto o cabeçote avança aplicando a pressão entre as superfícies.</p> <p>4. Manutenção da rotação e da pressão para que as superfícies atinjam a temperatura adequada de soldagem.</p> <p>5. A rotação é interrompida drasticamente por meio de um freio. A pressão pode ser aumentada para completar a soldagem.</p>	<p>2. Colocação do mandril, geralmente acoplado a um volante, na rotação adequada.</p> <p>3. O sistema em rotação é liberado por um sistema de embreagem. O sistema em rotação é abandonado a sua própria inércia.</p> <p>4. O cabeçote avança criando a pressão entre as superfícies, a qual é mantida constante até o termino da soldagem.</p>

Ambas as tecnologias do FW podem ser aplicadas por diferentes tipos de movimentos relativo, a fim de gerar o atrito necessário para formar a solda. A geometria mais comum é de componentes cilíndricos em que uma peça é mantida estacionária e a outra rotacionada. No entanto, outras formas adicionais como *Friction welding* linear, radial e orbital tem sido desenvolvidos para geometrias de peças especiais (HANDBOOK, 1993).

PRASANTHI *et al.*, (2015) realizou a soldagem de dois materiais dissimilares, sendo um de aço médio teor de carbono e outro de titânio pelo processo de soldagem por fricção rotativa, realizando várias análises variando os parâmetros do processo, como a força de atrito, força de recalque, comprimento de queima e a velocidade de rotação. Pode-se afirmar que, o comprimento de queima (encurtamento dos materiais após a soldagem) e a rotação são os parâmetros que determinam a microestrutura da interface e este comprimento fica entre 2 e 3 milímetros, podendo chegar até 5 milímetros.

A soldagem por fricção possui muitas vantagens e benefícios se comparada com outros processos, pois pode ser usada para unir materiais com propriedades complexas e a rapidez, economia, baixa energia, ausência de material de adição e principalmente, a inexistências de emissões de substancias perigosas que prejudicam a saúde do soldador, diferem o processo.

Além do mais, essa ausência de metal de adição reduz o peso de aeronaves ocasionando o melhoramento de sua eficiência (BAKKER *et al.*, 2015).

A Figura 02 abaixo mostra as etapas do FW que dividem em: (a) momento de rotação, (b) aplicação de pressão, (c) fase de solda e (d) momento de forjamento.

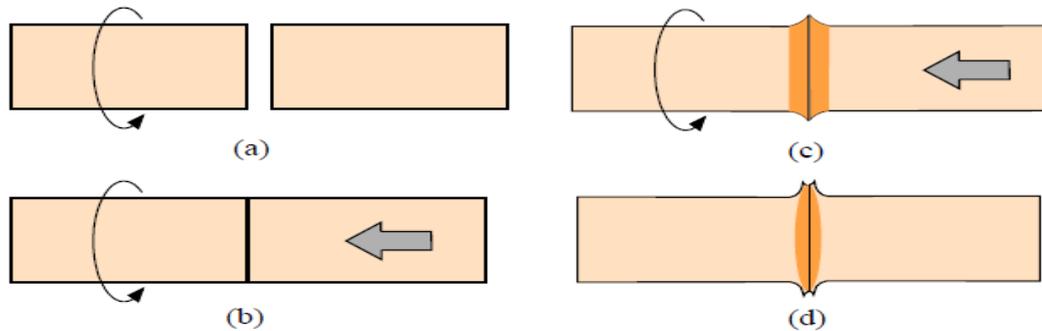


Figura 02 – Etapas do FW. a) Rotação de uma das peças; b) aplicação de pressão; c) início da formação da solda; d) solda completa (MODENESI; MARQUES, 2000).

A ausência de material de adição, gases de proteção, geração de gases nocivos à saúde do operador, torna o processo ambientalmente correto, tornando esta técnica uma tendência do seu uso mais aprofundado nos próximos anos (BAFFARI *et al.*, 2014).

A soldagem por atrito apresenta muitos benefícios, ainda mais quando há a necessidade de utilização de materiais de elevado custo como ligas de titânio, as quais tem sua utilização limitada devido ao elevado custo desses materiais. No entanto, é possível por meio do FW unir estas ligas de titânio com aço estrutural convencional, as quais não poderiam ser feitas sem a ocorrência de defeitos como a formação de intermetálicos altamente frágeis $F_e T_i$ causando trincas nas articulações se feitas pelo processo de soldagem por fusão (ISHIDA *et al.*, 2015).

O FW também pode ser aplicado a soldagem do ferro fundido como foi estudado por WINICZENKO e KACZOROWSKI (2012) que analisou a soldagem por atrito do ferro fundido 60-45-12 e que apresentou boas características mecânicas quando as amostras foram submetidas ao ensaio de tração.

RATKOVIĆ *et al.*, 2016 analisou a união do aço *High Speed* HS 6-5-2-5 com o aço carbono C-60 para têmpera com alta resistência ao desgaste pelo *Friction Welding*, com ênfase na análise das zonas de mistura e na geração de carbonetos durante a soldagem. Verificou-se a ocorrência de uma dura camada do aço *High-Speed* sobre o aço carbono, onde há uma influência do tempo de fricção sobre essa camada e essas partículas foram transferidas ao aço carbono devido à deformação irregular na seção transversal.

Segundo (MA, 2016) na soldagem por atrito do aço carbono ASTM 1045 e do Inox AISI 304, devido a grande diferença de elementos de liga que os dois metais possuem, o C (carbono) possui uma susceptibilidade a formação de carbonetos de cromo com o Cr. Dessa forma, uma aglomeração de C na interface da solda pode ser formada. Segundo o autor, que analisou os efeitos do tratamento térmico pós soldagem para o FW desses dois materiais, essa aglomeração de C aumenta com o acréscimo da temperatura de tratamento térmico. No tratamento há 400 °C ocorreu pouca variação da aglomeração de C da junta soldada, no entanto, a 600 °C houve uma variação bem mais significativa.

2.2.1 - Parâmetros

Na soldagem por atrito, a rotação, a pressão e o tempo, são os principais parâmetros do processo que influenciam na qualidade de uma junta soldada (JAMES; SUDHISH, 2016).

Muitos autores buscam encontrar os melhores parâmetros para a soldagem por fricção. Estudos mostram diferentes valores de parâmetros de trabalho que variam em função do tempo de atrito, pressão e rotação para os mesmos metais (BOUARROUDJ *et al.*, 2017).

Rotação: Os autores CHANDER; REDDY; RAO (2012) avaliaram a influência da velocidade de rotação na microestrutura e nas propriedades mecânicas na soldagem dissimilar do aço inoxidável AISI 304 e AISI 4140 pelo *Friction Welding* e verificaram que o pico de dureza na interface das soldas aumentava a medida em que a rotação diminuía. Ainda segundo os autores a resistência à tração, ao impacto e a tenacidades das articulações são baixas para velocidades muito altas ou baixas, ou seja as propriedades das articulações são ótimas para rotações médias.

SELVAMANI; PALANIKUMAR (2014) analisaram a otimização do FW na soldagem do aço AISI 1035 e segundo eles a rotação é a variável que exerce maior influência na resistência à tração das juntas soldadas.

Segundo OZDEMIR (2005) que analisou a influência da rotação no FW para os materiais AISI 304 e AISI 4340, afirma que a resistência à tração é influenciada pela rotação, para que se possa conseguir uma solda com resistência adequada, o tempo de atrito deve ser mantido o mais curto possível, já a rotação, e a pressão de forjamento devem ser o mais alto possível.

Rotações elevada ocasiona um maior volume de material aquecido e diminui a taxa de resfriamento. Baixas rotações ocasionam menor aquecimento periférico e aporte térmico na

superfície de atrito. As baixas rotações também podem ser prejudiciais devido as mais altas taxas de resfriamento, podendo ocasionar a formação de fases com excessiva dureza (PIRES, 2007).

Força axial: Possui grande importância no processo, promove o contato entre as peças, ocasionando a formação da união. Este parâmetro influencia significativamente nas propriedades mecânicas, pois está diretamente ligado as condições de plastificação do material. Pressões elevadas geram uma ZTA reduzida, pois há uma redução no tempo de soldagem com elevadas taxas de transferência de calor. Pressões menores geram ZTA maiores, devido ao aumento do tempo de soldagem e maior aporte de calor no processo (ANDRADE, 2011). A resistência da junta soldada aumenta notavelmente com o aumento da força de atrito (GUO *et al.*, 2016). Este parâmetro deve ser capaz de manter as superfícies em íntimo contato, evitando a presença de partículas indesejáveis na interface e a formação de filmes de óxidos. Seus valores elevados provocam elevadas temperaturas e altas taxas de queima, influenciando diretamente nos tempos de solda. O emprego de forças elevadas é recomendado para a obtenção de uma microestrutura mais refinada, proporcionando ganho nas propriedades de tração, dureza e tenacidade (PIRES, 2007). Pressão axial muito alta produz soldas de má qualidade na região central e gera uma grande quantidade de rebarba que se assemelha a uma solda feita a velocidade baixa (MATTEI, 2011).

Tempo: O parâmetro está ligado tanto à velocidade de rotação quanto à força axial, influenciando na microestrutura final, pois este depende tanto do nível de aquecimento como das taxas de resfriamento (ANDRADE, 2011). Segundo PIRES (2007) este parâmetro é de grande importância na quantidade de calor gerado e propagado ao longo da região soldada e da ZTA, sendo a microestrutura final dependente tanto do nível de aquecimento ao longo do processo, como também das taxas de resfriamento. O autor (LIANG *et al.*, 2017) afirma que a resistência a tração de uma junta soldada aumenta com o aumento do tempo de atrito. Essa razão pela qual o tempo melhora a resistência a tração é devido ao fato que o aumento do atrito contribui para maior geração de calor na interface da solda e conseqüentemente expulsando as películas de óxidos nas superfícies de contato.

A figura 03 mostra a influência das variáveis de rotação, pressão e tempo na formação da rebarba no processo de soldagem por atrito.

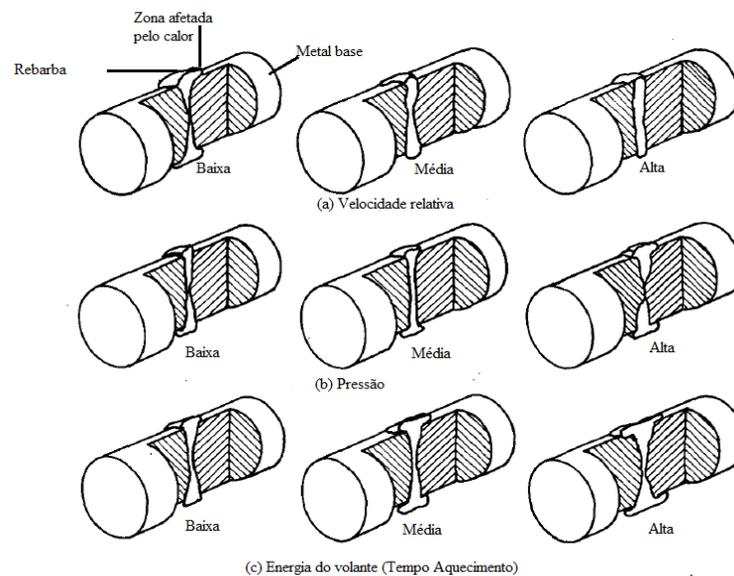


Figura 03. Efeito das variáveis de processo na soldagem por fricção (WAINER, 1992).

Segundo Mattei (2011) a microestrutura do material soldado é influenciada pelos parâmetros aplicados no ciclo de soldagem. Essas regiões podem ser divididas em Zona Termicamente Afetada (ZTA) onde a microestrutura e as propriedades mecânicas sofrem a influência do calor gerado durante o processo, Zona de Recristalização (ZR) caracterizada pela formação de uma microestrutura de grãos finos e com a morfologia equiaxial como resultado do fenômeno de recristalização.

A seleção dos parâmetros do FW geram mudanças na microestrutura do material e se o tempo é mantido por longo período, uma grande zona de difusão pode ser formada. No entanto, baixas pressões, tempo de atrito e pressões de forjamento torna a solda frágil e vazios são formados. Para encontrar um parâmetro ideal, o tempo de solda deve ser o menor possível enquanto a pressão deve ser a maior possível (MURALIMOHAN *et al.*, 2014).

O FW provoca nas região de ligação da solda mudanças de temperatura e conseqüentemente uma série de alterações microestruturais que são divididas em:

- Zona de contato (i), região com grandes deformações plásticas. Esta região tem uma estrutura de grãos muito fina devido a grandes deformações e uma completa recristalização;
- Zona de plastificação (ii), o material é sujeito a uma considerável deformação plástica, mas não participa do processo de transferência de material. Os grãos dessa região são finos e equiaxiais;
- Zona parcialmente deformada (iii), a taxa de deformação, temperatura e quantidade de deformação plástica são menores do que na região (ii). A microestrutura se torna mais grosseira devido a redução da taxa de deformação;
- Zona sem deformação (iv), nesta região dependendo da temperatura máxima, o material não sofre transformação de fase. No entanto, nessa região pode ocorrer uma pequena alteração da microestrutura, como o crescimento de grãos (ROMBAUT *et al.*, 2011). A figura 04 mostra essas regiões que sofrem efeitos de temperatura.

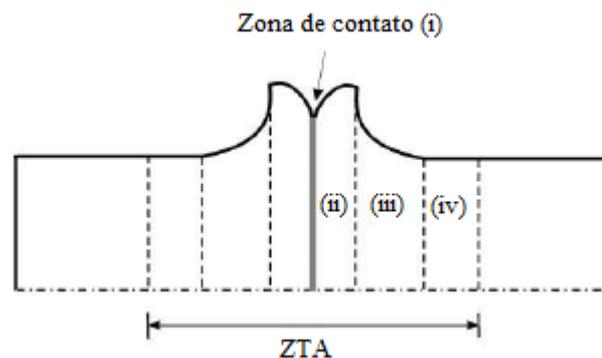


Figura 04. Diferentes regiões na ZTA para corpos de prova soldados pelo FW (ROMBAUT *et al.*, 2011).

O autor BOUARROUDJ (2017) fez uma análise térmica da soldagem por fricção e verificou que a região da ZTA responsável pela adesão da interface dos dois materiais tem suas dimensões aumentadas no período de forjamento. O tempo do processo do FW se torna em função dos parâmetros de trabalho, a operação é mais curta aumentando a velocidade de rotação ou a força de atrito, o que gera uma ZTA menor, no entanto, há um gradiente de temperatura elevado o que aumenta a tensão residual enfraquecendo a solda.

Jl *et al.*, (2012) analisou a formação do *flash* (rebarba) no processo sob diferentes parâmetros de soldagem e desta análise constatou que o grau de curvatura do *flash* aumentou relativamente com tempo de atrito, pressão e a velocidade. Tal ocorrência deve ao fato de que quando se aumenta a velocidade, o atrito aumenta, o que gera um aumento de temperatura e aumenta o grau de plastificação do material. Quando o tempo, a pressão e a velocidade são relativamente pequenos, as dimensões do *flash* são pequenos também, os quais resultam da

baixa velocidade de fluxo de material, seguido do período de forjamento e tempo de atrito insuficiente. Sob essas condições, os óxidos não são extrudados para fora da superfície de atrito e a qualidade da junta se torna de má qualidade.

Segundo Kimura *et al.*, (2017) há uma relação entre a resistência da junta e a pressão de forjamento aplicada, em que para um incremento dessa pressão tem-se um aumento significativo da eficiência da junta soldada.

2.2.2 – Variantes do FW

A soldagem por atrito apresenta algumas variantes, sendo que a rotativa é a mais utilizada desde 1940. O FW linear tem sido utilizado desde 1980 neste processo as peças se movem por meio de um pequeno deslocamento linear do plano da junta a ser soldada com uma pressão de atrito de um componente sobre o outro. O FW orbital é uma combinação da soldagem linear com a rotativa e tem sido utilizada desde o ano de 1970. Neste processo, o centro de um componente em relação ao outro é movido em torno de uma curva no qual as duas peças a serem unidas rotacionam em torno de seus eixos longitudinais no mesmo sentido com a mesma velocidade angular, quando o movimento dos componentes cessa, as peças são alinhadas e a pressão de forjamento é aplicada (MAALEKIAN *et al.*, 2008). O FW linear é uma extensão das aplicações da soldagem por atrito rotacional, utilizada em componentes não assimétricos como em componentes de aeronaves (WANG, 2017).

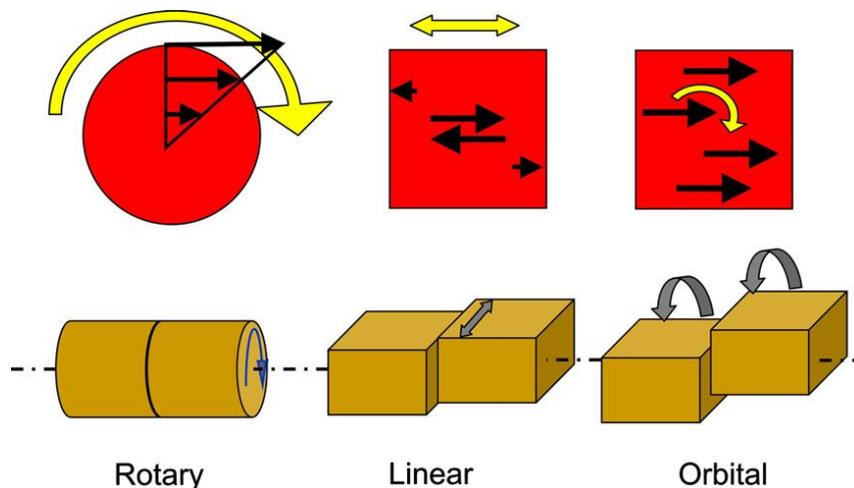


Figura 05 – variantes da soldagem por atrito (MAALEKIAN *et al.*, 2008).

Segundo PIRES (2007) o FW apresenta algumas características em relação ao tipo de movimentação relativa entre as superfícies a serem soldadas. No método de soldagem por atrito convencional, algumas das variáveis do processo consiste no movimento de uma das peças e a outra é mantida estacionária. Essa configuração é a mais utilizada e a sua aplicação se deve a indústria automotiva na união de eixos e hastes de válvulas como mostra a Figura 06. A segunda variação conhecida como método da rotação contrária *Counter Rotation*, e neste processo ambas as peças rotacionam, no entanto em sentidos contrários. Processo este que é empregado quando altas velocidades de rotação são necessárias, Figura 07. Para a junção de peças longas e de difícil rotação, um terceiro membro pode ser utilizado para ser posto em rotação, enquanto as outras partes permanecem paradas. Este Processo é conhecido como *Centre Drive* torna o equipamento mais complexo, Figura 8. Outro método conhecido como *Twin Welds* consiste na rotação de duas peças contra uma terceira, que mantida estacionária em posição intermediária em relação as outras duas, Figura 09. Por fim, outra variação convencional do FW é a soldagem por atrito radial, aplicado para a união e reparo de tubos. Consiste na aplicação de esforços compressivos na direção radial sob um anel de união. Possui como desvantagem uma configuração mais complexa do sistema de fixação e rotação do anel sob os tubos de menor diâmetro, e a aplicação de esforços de maneira síncrona na superfície do anel, Figura 10.

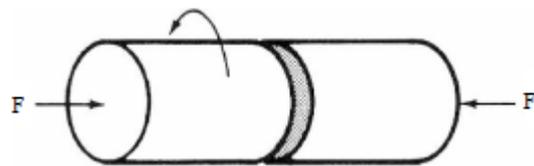


Figura. 06 - Solda por atrito convencional (PIRES, 2007).

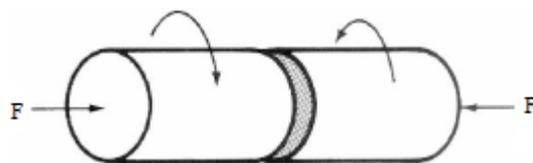


Figura. 07 - Solda por atrito Método *Counter Rotation* (PIRES, 2007).



Figura. 08 - Solda por atrito *Center Drive* (PIRES, 2007).

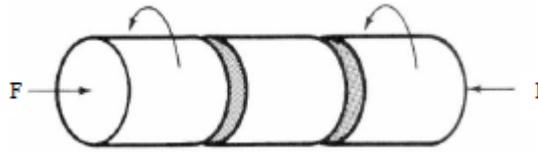


Figura. 09 - Solda por atrito *Twin Welds* (PIRES, 2007).

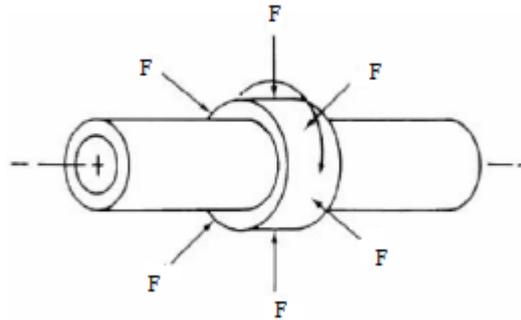


Figura. 10 - Solda por atrito radial (PIRES, 2007).

2.2.3 – Aplicações do FW

Aplicado em uniões que requeiram combinações de metais diferentes, bem como para economizar o custo necessário da soldagem de materiais caros e escassos envolvidos nos processos e que pela soldagem por fusão convencional desses materiais não é possível, devido a incompatibilidade metalúrgica de diferentes pontos de fusão, propriedades físicas e químicas. (MESHRAM *et al.*, 2007).

Segundo UZKUT M. *et al.*, (2010) o *Friction Welding* é utilizado em uma vasta gama de aplicação em vários setores industriais, como por exemplo:

- Indústria de produção de máquinas e peças de reposição: engrenagens, bielas, cilindros hidráulicos, eixo com parafuso sem fim, virabrequim;
- Indústria automobilística: válvulas, eixos de transmissão, alavancas de cambio;
- Indústria aeronáutica e aeroespacial: câmara de combustão, turbinas, rotores, tubos, conexões, flanges;
- Indústria em geral: brocas, fresas, conectores elétricos.

2.2.4 – Vantagens do FW

Devido as junções não serem feitas por fusão, o FW é capaz de soldar a maioria dos materiais, até mesmo os materiais altamente dissimilares que não podem ser unidos por meio dos processos de soldagem por fusão (ALVES, 2010).

A soldagem por atrito apresenta vantagens de sua aplicabilidade, fato este que tem feito com que sua utilização aumente no decorrer dos anos. Dessa forma, pode-se dizer que as vantagens do FW refere-se:

- Na conversão de energia mecânica em térmica na interface da solda;
- ZTA muito pequena;
- Boa eficiência energética, o que permite junções muito rápidas;
- Durante o período de aquecimento e forjamento, o material plastificado é expulso da interface, o que faz com que as contaminações sejam removidas garantindo uma solda de excelente qualidade;
- Processo pode ser utilizado para a soldagem subaquática;
- O processo não contamina o ambiente;
- Pode ser utilizada tranquilamente em locais que existam resíduos que possa causar explosão e incêndios;
- Produz pouca fumaça, gases;
- Não oferece risco a saúde do operador;
- Não há respingo de metal, radiação ou irradiação;
- Não envolve riscos elétricos de alta tensão, arcos e faíscas.
- Pode ser totalmente automatizada;
- Não exige soldador qualificado (ANDRADE, 2011).

O fato da solda ocorrer abaixo do ponto de fusão dos materiais base e os curtos tempos de solda resultam em uma qualidade de solda superior, tornando o processo propenso para a produção para grandes escalas de produção com grandes combinações de materiais de trabalho, gerando mais economia, capacidade de reprodutibilidade e de ser ambientalmente limpo. Outra vantagem é que, as propriedades físicas e metalúrgicas não são degeneradas como no método de fusão pois não fazem uso de materiais de adição e nem de proteção (MURALIMOHAN *et al.*, 2014).

2.2.5 - Limitações

Em todo tipo de processo sempre haverá aspectos vantajosos mediante certas condições práticas, no entanto, eles também podem apresentar consigo algumas limitações. Neste sentido, pode-se fazer uma descrição dos aspectos limitantes do FW, como:

- Uma das peças deve possuir um eixo de rotação, de modo que a peça gire sobre o eixo do plano de soldagem;
- O alinhamento e a preparação das peças podem ser críticos para o desenvolvimento uniforme da deformação plástica e aquecimento da superfície de atrito;
- O processo é limitado a juntas de topo planas ou angulares;
- Elevado custo inicial com ferramentas e equipamento (PIRES, 2007).

O material de pelo menos um dos componentes deve ser plasticamente deformável sobre os parâmetros de soldagem estabelecidos, o tamanho a forma do componente deve ser tal que possa ser fixado e rotacionado, o dispositivo de fixação deve ser rígido o suficiente para suportar a pressão e torque provocados durante o processo e pôr fim, devido a taxa de calor não ser uniforme, tem-se uma espessura não uniforme de ZTA (ANDRADE, 2011).

Vale ressaltar que, os equipamentos são robustos, os quais não permitem o transporte e manuseio para outros locais de trabalho, apresentando determinadas limitações quanto a geometria e dimensões das peças. Superfícies de materiais que sofreram tratamentos superficiais de carbonetação (processo de adicionar carbono à superfície dos materiais) e nitretação (processo que visa aumentar a dureza da superfície do aço) apresentam dificuldades para serem unidas pelo FW devido ao fato do baixo coeficiente de fricção e apresentarem baixa forjabilidade (ALVES, 2010).

2.3 - Classificação dos aços

Os aços podem ser definidos como as ligas de ferro e carbono, com percentual de até 2% deste elemento. No entanto, este percentual em geral fica bem abaixo, constituindo o restante de outros elementos que resultam do processo de fabricação e muitas das vezes intencionalmente adicionados para se obter algumas propriedades. Atualmente existem vários tipos de aços que são classificados de acordo com sua microestrutura, propriedades mecânicas, características de fabricação e composição química.

Segundo FORTES (2004) os aços são classificados basicamente como uma liga de Ferro e Carbono, os aços apresentam níveis de resistência e dureza devido a adição de carbono. Os chamados aços carbonos classificam-se quanto a sua composição química dependendo dos níveis de % de carbono que seguem:

- Baixo carbono: até 0,14 %;
- Aço doce: 0,15 a 0,29 %;
- Aço médio carbono: 0,30 a 0,59 %;
- Aço de alto carbono: 0,60 a 2,00 %

O teor de carbono no aço desempenha um papel importante na evolução da microestrutura soldada. Com o aumento do teor de carbono, a soldagem pode causar alterações na microestrutura do material, tornando-se mais nítida devido a distribuição não uniforme de carbono na microestrutura (ELMER, 2004).

2.3.1 - Influência dos elementos de liga

Segundo FORTES (2004) alguns elementos são adicionados de modo a melhorar as características dos materiais como: dureza, resistência mecânica, ductilidade e a resistência a corrosão.

- Carbono (C)

O carbono é o elemento mais eficaz, mais empregado e de menor custo disponível para aumentar a dureza e a resistência dos aços.

- Enxofre (S)

O enxofre é normalmente um elemento indesejável no aço porque causa fragilidade. Pode ser deliberadamente adicionado para melhorar a usinabilidade do aço, no entanto, cria dificuldades durante a soldagem.

- Manganês (Mn)

O manganês também aumenta a resistência à tração e a temperabilidade dos aços (FORTES, 2004). Este elemento estabiliza a austenita e aumenta a solubilidade do nitrogênio, substitui o Ni com bom custo benefício (VALERIANO, 2012).

- Cromo (Cr)

O cromo aumenta a resistência à corrosão e a resistência do aço a altas temperaturas, sendo o principal elemento de liga dos aços inoxidáveis (FORTES, 2004). É o principal responsável pela resistência a corrosão dos aços inoxidáveis devido a fina camada de óxidos de

cromo formada na superfície dos materiais. Este elemento melhora a resistência à corrosão por pite (corrosão localizada formada por pequenas cavidades), mas promove a fragilização a 475°C (VALERIANO, 2012).

➤ Níquel (Ni)

O níquel melhora a ductilidade, é o mais eficaz dos elementos de liga para melhorar a resistência ao impacto do aço a baixas temperaturas. Consumíveis com alto teor de níquel são empregados para soldar os diversos tipos de ferro fundido (FORTES, 2004). O níquel também é um estabilizador da austenita, com o aumento de sua concentração, a precipitação da fase sigma é acelerada (VALERIANO, 2012).

➤ Silício (Si)

O silício aumenta a resistência dos aços, mas quantidades excessivas podem reduzir a ductilidade (FORTES, 2004).

➤ Fósforo (P)

O fósforo é considerado um elemento prejudicial aos aços devido reduzir a ductilidade e tenacidade. O fósforo é adicionado em quantidades muito pequenas para aumentar sua resistência (FORTES, 2004)

2.4 – Soldagem dos materiais

Atualmente há uma crescente demanda pela aplicação do aço em vários segmentos. Uma análise feita sobre a aplicação do aço no futuro para 42 países diz que, a demanda pelo consumo deste produto chegará a um consumo de 1,8 bilhões de toneladas até o ano de 2025, sendo essa procura impulsionada pelo atual desenvolvimento mundial dos países (HATAYAMA *et al.*, 2010).

Uma microestrutura que geralmente conduz a uma melhor combinação de resistência e tenacidade nos aços é a martensita revenida. Em projetos de peças temperadas e revenidas, emprega-se a dureza como indicador da resistência mecânica, e essa dureza só se torna necessária em casos em que o fator mais importante é a resistência ao desgaste. O termo temperabilidade é a característica que define a variação de dureza desde a superfície até o núcleo da peça, sendo associado a capacidade do aço em formar martensita. Neste contexto, o carbono possui grande efeito sobre a dureza da martensita, já a maior parte dos elementos de liga adicionados, retarda a transformação da decomposição difusional da austenita, aumentando a sua temperabilidade (COLPAERT, 1994).

O aço carbono é largamente utilizado na fabricação de componentes estruturais como eixos, virabrequim e acoplamentos de engrenagens devido a sua alta resistência, boa resistência ao desgaste e baixo custo. Os aços inoxidáveis devido a sua alta resistência a corrosão e boa trabalhabilidade, tem sido muito utilizado nas indústrias em geral. A execução de estruturas híbridas fabricadas de aço carbono e inoxidável, combina as vantagens dos dois materiais, o que está sendo algo promissor em termos de flexibilidade nas indústrias de produção. No entanto, existe uma grande dificuldade de obter a união entre o aço carbono e o aço inoxidável, devido as diferentes composições químicas e propriedades termofísicas (MA *et al.*, 2016).

A técnica de soldagem por atrito proporciona grãos mais finos recristalizados na região de mistura, proporcionando uma solda com boas propriedades mecânicas e eliminando problemas relacionados a soldagem por fusão. A soldagem do aço carbono e inoxidável tem gerados resultados promissores mostrando muitas vantagens na união de matérias dissimilares, minimizando a mudança microestrutural da ZTA e limitando as distorções e tensões residuais nos aços (JAFARZADEGAN *et al.*, 2012).

2.4.1 – Soldagem do aço ASTM 1045

Atualmente existem inúmeros tipos de aços e dentre tantos, o aço 1045 é utilizado na fabricação de vários componentes de construção mecânica, com ou sem tratamento térmico.

Chamados de aços de médio carbono, sua composição é similar a dos aços de baixo carbono, diferenciando-se pelo teor de carbono entre 0,3 - 0,5 e manganês entre 0,6 - 1,65 %. Em função do maior teor de carbono e de manganês, a utilização de eletrodos de baixo hidrogênio se torna recomendável, de forma a diminuir as chances de trincas, especialmente em peças de maior espessura. Pré-aquecimento entre 150 e 260°C pode ser necessário de forma também a minimizar a ocorrência das trincas. Ao final da solda, a realização de um pós-aquecimento também é viável para aliviar tensões residuais e reduzir a dureza que pode ser causada por um resfriamento rápido após soldagem. Dessa forma, os aços de médio carbono podem ser facilmente soldados pelos mesmos processos usados para os aços de baixo carbono desde que os cuidados mencionados sejam cumpridos (MODENESI, 2011).

2.4.1.1 – Temperabilidade

A presença do carbono nos materiais aumenta a dureza e a sua temperabilidade, o aumento deste elemento diminui a tenacidade dos materiais, gerando microestruturas mais duras podendo causar empenamentos e fraturas em operação de tratamento térmico. Uma velocidade crítica de têmpera consiste em um resfriamento rápido que produzirá uma estrutura martensítica (CHIAVERINI, 1982).

O resfriamento rápido de uma peça de modo a se obter uma estrutura com alta dureza, aumenta o limite de resistência a tração do aço e a sua dureza, no entanto, diminui sua tenacidade. De modo a melhorar este tipos de estrutura pode ser aplicado o tratamento térmico de revenimento de modo a aliviar as tensões produzidas pela têmpera (FERRAZ, 2003).

2.4.1.2 – Trincas a frio

As trincas são as descontinuidades mais graves na soldagem, podem ser externas ou internas. Podem ser formadas durante a soldagem na solidificação, no resfriamento da junta, horas após a solda, na realização de tratamentos térmicos para alívio de tensão e mesmo meses após a soldagem (MARQUES *et al.*, 2009).

No que se refere a todos os tipos de trinca, a trinca a frio é considerada a mais perigosa. Seu aparecimento pode ocorrer após algumas horas ou mesmos dias após o término da solda. Este tipo de trinca está ligada a presença do hidrogênio e apenas ocorre com: presença de hidrogênio, tensões residuais, microestrutura susceptível e baixa temperatura. As fontes de hidrogênio estão relacionada a:

- Umidade presente nos revestimentos dos eletrodos;
- Contaminação com óleo, sujeiras, graxas presentes nos eletrodos;
- Óxidos hidratados (ferrugem) na superfície do arame ou do metal base;
- Óleo, graxa, tinta e sujeira na superfície do metal base;

De modo geral, a microestrutura se torna mais favorável a trinca a frio com o aumento da resistência do material, ou seja, com o aumento da concentração de carbono. A martensita após a têmpera é mais sensível a fragilização, essa característica aumenta com o teor de carbono e dureza do aço. Sua ocorrência está ligada à temperabilidade do material, função esta que é ligada a composição química e do tamanho de grão do aço. O CE (carbono equivalente) é empregado para relacionar a temperabilidade do aço a sua soldabilidade. Dessa forma, quanto

maior o valor do CE mais temperável será o aço e conseqüentemente pior será sua soldabilidade. Atualmente, existem várias fórmulas para o cálculo do CE e a equação 1 que será usada é adotada pelo *International Institute of Welding* (IIW).

$$CE = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Cr + \% Mo + \% V}{5} + \frac{\% Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

O preaquecimento do material é um método utilizado para que, a partir do CE %, possa evitar ou pelo menos tentar minimizar a presença da martensita. Se a chapa for preaquecida, a velocidade de resfriamento diminui e dessa forma, pode-se reduzir a quantidade de martensita na ZTA. Dessa forma, o preaquecimento juntamente com um tratamento térmico pós soldagem diminui o teor de hidrogênio na junta soldada, modifica-se a microestrutura e diminui as tensões residuais (WAINER, 1992).

Para teores acima de 0,45% de peso de CE há o risco de ocorrência de trincas, já em concentrações mais baixas, menor é a probabilidade de se obter uma estrutura martensítica e conseqüentemente melhor e a soldabilidade do material onde é pouco provável a ocorrência de trinca e nenhum tratamento térmico se faz necessário.

2.4.1.3 – Aplicação do aço ASTM 1045

O aço 1045 é muito utilizado para construção mecânica devido as suas boas características inerentes. Aplicado em eixos de bombas de torres de destilação e eixos de ventiladores que são utilizados em refinarias do setor de petróleo e gás, os quais estão sujeito a desgaste devido ao ambiente agressivo aos quais estão inseridos. Quando expostos aos ciclos térmicos de soldagem, desenvolvem elevada dureza na ZTA, podendo ser utilizados tratamentos térmicos como têmpera, normalização, recozimento e revenimento de modo a melhorar as características das peças utilizadas (AZEVEDO, 2002).

Considerado um aço de baixa temperabilidade e tenacidade, que após o tratamento térmico atinge média dureza é utilizado na fabricação de peças de grande porte como eixos para moenda de cana, eixos para geração de energia, eixos para britador, tirantes para prensas e eixos propulsores para navios. Enfim, sua aplicação está ligado a peças que necessitam de boa resistência mecânica e soldabilidade (VILLARES METALS, 2015).

2.4.2 – Soldagem do aço ASTM A 36

O aço ASTM A 36 é uma liga com baixo teor de carbono que o torna de fácil soldabilidade. Soldas feitas com este tipo de aço são de excelente qualidade, o que os torna indicados para várias aplicações estruturais. O alto teor de fósforo e enxofre contido nestes aços, os torna susceptível a fragilização por hidrogênio após a soldagem. A fragilização se deve a presença de hidrocarbonetos ou vapor de água durante o processo de soldagem. Para evitar que isso ocorra, as juntas e as áreas adjacentes devem estar sempre limpas e o uso do gás de proteção se faz necessário (DEOILERS, 2016).

Este tipo de material são os mais utilizados na atualidade para a finalidade de fabricação e construção, possuem facilidade de serem soldados por qualquer processo de soldagem, seja a arco, gás ou resistência (MODENESI, 2011).

O aço ASTM A 36 é um aço ferrítico de baixa liga e carbono ligado ao manganês utilizado quando a economia de peso é importante. Suas características permitem atender solicitações de tenacidade em regiões frias, onde a temperatura pode chegar a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sua aplicação também destina-se a aplicação de navios de médio e grande porte e plataformas de exploração de petróleo (RODRIGUES, 2010).

2.4.2.1 – Aplicações do aço ASTM A 36

O aço ASTM A 36 é utilizado na fabricação de peças estruturais em geral, possui boa soldabilidade, baixa resistência mecânica e baixa temperabilidade. Enfim, sua aplicação está ligada à utilização de peças que não apresentam exigências de propriedades mecânicas, utilizadas por exemplo na indústria agrícola, no comércio em geral, na fabricação de máquinas e equipamentos (VILLARES METALS, 2015). Utilizado também na construção de pontes, edifícios e plataformas de petróleo (DEOILERS *et al.*, 2016).

2.4.3 - Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis apresentam em sua composição as ligas de Ferro e Cromo como os componentes principais, sendo os outros metais elementos de liga. O cromo é o mais importante elemento e sua presença é indispensável para a resistência a corrosão, ele é

responsável por gerar uma camada passivadora de proteção e sua principal resistência é a corrosão. Para que um aço possa ser chamado de inoxidável, ele deve possuir teor de cromo acima de 11%. O cromo do material quando em contato com o oxigênio do ar forma uma fina camada de óxido, invisível, com espessura muito fina que age protegendo o material contra ataques corrosivos. Danos como arranhões, esfoliações, cortes e outros meios que venham a danificar a camada de proteção, são rapidamente restaurados devido o oxigênio do ar combinar-se com o cromo, formando novamente a camada de proteção, característica essa de ser auto regenerativa.

Com estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) apresentam excelente resistência a corrosão e boa resistência em baixas e altas temperatura. Apresentam as características de não serem magnéticos, não são temperáveis e são endurecidos somente por trabalho a frio. Possuem alta ductilidade, baixo limite de escoamento e alto limite de ruptura. De modo a melhorar a ductilidade e tenacidade desses aços, um tratamento térmico chamado de austenitização pode ser realizado. Este tratamento consiste em aquecer o aço até uma temperatura entre 1000 e 1120 °C, seguido de um resfriamento rápido até chegar a temperatura ambiente (ALVES, 2010).

O aço inoxidável apresenta muitas características desejáveis que podem ser exploradas em uma vasta gama de aplicações, devido a sua resistência a corrosão de longa duração torna as estruturas mais duráveis, ao mesmo tempo sendo resistentes, higiênicos e recicláveis. Estes aspectos tem aumentado o seu consumo anual ultrapassando o crescimento de outros materiais (BADDOO, 2008).

Os inoxidáveis tem sido largamente utilizados devido as suas propriedades mecânicas favoráveis como boa trabalhabilidade e resistência a corrosão (ÖZDEMIZ, 2005).

A resistência a corrosão a qual os inoxidáveis resistem é atribuída à formação de um filme de óxido de cromo (Cr_2O_3) na superfície do metal, mediante ao processo de passivação. Esta passivação é caracterizada por causa da presença de uma película passiva, aderente, invisível, com espessura entre 3nm a 5nm, garantindo a resistência a corrosão dos aços inoxidáveis que se formam instantaneamente com a presença do oxigênio (VALERIANO, 2012).

2.4.3.1 - Soldagem do aço inoxidável AISI 304

Na classificação de aço inoxidáveis austeníticos, as ligas de Fe – Cr – Ni, são as principais. Possuem estrutura predominante austenítica a temperatura ambiente, e não são endurecíveis por tratamento térmico sendo para o grupo dos inoxidáveis os mais usados. Com cerca de 16 a 30% Cr, 6 a 26% Ni e menos de 0,3 % de carbono é aço inox mais comum. Na temperatura ambiente possui baixo limite de escoamento, elevado limite de resistência e ductilidade. Dessa forma, entre os inoxidáveis, os austeníticos apresentam melhor soldabilidade e resistência a corrosão, conferindo assim, sua aplicação a indústrias químicas, alimentícia, de refino de petróleo entre outras (MODENESI, 2011).

Os austeníticos também são susceptíveis a trincas à quente quando a composição química do metal de adição for igual à do metal de base, a quantidade de ferrita contida no metal de adição precisa ser diferente da contida no metal de base e deve ser controlada para assim evitar a formação de uma estrutura totalmente austenítica que favoreça o aparecimento das trincas de solidificação. De modo a minimizar essas trincas, normalmente é utilizado um metal de adição que leve a formação de uma estrutura austenítica-ferrítica, e a adoção de procedimentos de soldagem que diminuam as tensões na solda (ALVES, 2010).

O autor SHANJEEVI (2013) avaliou as propriedades mecânicas da união do Aço Inoxidável AISI 304 e do cobre pelo *Friction Welding*, e verificou que baixas pressões resultaram em um tempo insuficiente para o material aquecer e formar a ligação. Após ser realizado um teste de tração nos corpos de prova, verificou-se que em todos os casos a fratura ocorria no material que possuía menor resistência a tração.

Segundo BHAMJI *et al.*, (2010) na soldagem do aço inoxidável austenítico, as junções feitas pelo processo de fricção, possuem na maioria das soldas, propriedades de tração superiores a do material de origem. Ainda segundo o autor, esse tipo de material também pode ser soldado por arco convencional, no entanto, a soldagem destes aços pelos processo de fusão produz vapores de cromo que são prejudiciais à saúde do operador e que no processo de união do estado sólido esses vapores não são produzidos.

MURALIMOHAN *et al.*, (2014) analisaram as propriedades do *Friction Welding* na união da liga de titânio e aço inoxidável com intercamadas de níquel. Neste trabalho, as barras de titânio rotacionaram e as de aços inoxidável permaneceram estacionárias. O autor verificou que a resistência a tração aumentou com o acréscimo da pressão de forjamento e mantendo o tempo de atrito constante, variando o tempo de fricção de 1 a 6 s para um tempo de forjamento

de 8 s e verificou que o *flash* ocorreu no lado do titânio e o aço inoxidável não participou da formação. A fratura ocorreu no titânio o qual possui um limite de resistência menor e que esta fratura se deu próxima da interface.

2.4.3.2 – Propriedades físicas dos inoxidáveis

Os inoxidáveis apresentam menor temperatura de fusão, condutividade térmica, maior coeficiente de expansão térmica e menor condutividade elétrica, se comparado as propriedades físicas dos aços carbono, a tabela 01 mostra a propriedade dos aços inoxidáveis (Alves, 2010).

Tabela 01 – Propriedades Físicas dos Inoxidáveis (ALVES, 2010).

Propriedades	Tipos de Aços Inoxidáveis			
	Martensíticos	Ferríticos	Austeníticos	Duplex
Massa Específica (g/cm^3)	7,6 – 7,7	7,6 – 7,8	7,9 – 8,2	8,0
Módulo de Young (MPa)	220.000	220.000	195.000	220.000
Coefficiente de Expansão Térmica ($10^{-6}/$ $^{\circ}C$) 200 – 600 $^{\circ}C$	12-13	12-13	17-19	13
Condutividade Térmica ($W/m^{\circ}C$) 20 $^{\circ}C$	22-24	20-23	12-15	20
Capacidade Térmica ($J/Kg^{\circ}C$) 20 $^{\circ}C$	460	460	440	400
Resistividade ($n\Omega m$) 20 $^{\circ}C$	600	600-750	850	700-850
Ferromagnetismo	Sim	Sim	Não	Sim

É importante dizer que o coeficiente de expansão térmica mede a diferença do comprimento ou volume de um corpo que sofre alterações devido a temperatura. A condutividade térmica avalia a capacidade do material em conduzir energia térmica.

2.4.3.3 – Produção, aplicações e especificações dos inoxidáveis Série 300

Segundo MEINHARDT (2013) a produção mundial de aço inoxidável ultrapassou 30 milhões de toneladas em 2010, o que representa 2,2% do total de aço produzido mundialmente. Este crescimento da produção se deve ao fato dos inoxidáveis apresentarem boas propriedades, abrangendo uma ampla faixa de resistência a corrosão e propriedades mecânicas e quando bem selecionados são materiais seguros e praticamente livre de manutenção. A figura 11, mostra os aços inoxidáveis da série 300 e suas aplicações.

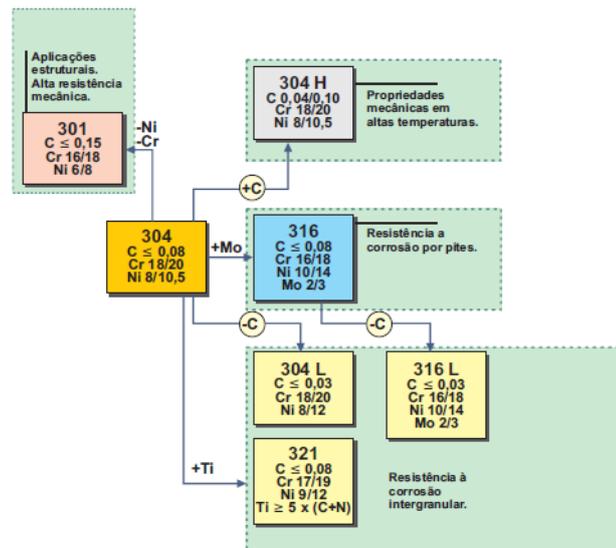


Figura11 – Aplicação dos aços austeníticos (CARBÓ, 2008).

A Aplicação desses aços destina-se aos setores aeronáuticos, aeroespacial, nuclear, utensílios domésticos, equipamentos para indústria química, naval, fabricação de alimentos, fornos, estufas e eletrodos (ALVES, 2010).

2.4.3.4 - Trincas de solidificação

A fissuração na solidificação, ou também conhecida como trincas à quente, está associada com a formação de filmes de materiais líquidos segregados (que sofreram algum tipo de separação) entre os contornos de grão do material na fase final de solidificação com a incapacidade destas estruturas em resistir esforços decorrentes da contração do material. Estes filmes são formados por elementos químicos que sofrem fortes segregação como o enxofre e o fósforo. Seu surgimento ocorre geralmente no centro do cordão, mas podem aparecer em outras localizações, inclusive como microtrincas (MARQUES *et al.*, 2009).

No caso de solidificação dendrítica, as regiões entre os braços dendríticos retêm líquido e o transporte de elementos com ponto de fusão menores para o centro da solda é reduzido. Dessa forma, a utilização de menores energia de soldagem na geração de estruturas dendríticas diminui o risco de trincas de solidificação (MAGALHAES, 2008).

A trinca de solidificação ocorre quando as fases sólido e líquido sofrem uma tensão de tração no processo de solidificação. O fluxo de líquido entre as dendríticas pode compensar a contração de solidificação e as tensões induzidas, restringindo assim os valores dessas tensões para quantidades menores (DYE *et al.*, 2001).

2.5 - Delineamento dos experimentos

O planejamento fatorial completo permite a varredura de toda as combinações possíveis da região de estudo, pois utiliza todos os seu fatores e repetíveis níveis. O planejamento de experimentos DoE (*Design of Experiments*) é uma abordagem sistemática e rigorosa para a resolução de problemas de engenharia, os quais fazem uso dos princípios e técnicas na fase de coleta de dados de modo que se possa assegurar a geração de conclusões de engenharia válida, defensável e suportável (BARBEDO, 2011).

A utilização da técnica do planejamento de experimentos, embasados em fundamentos estatísticos, proporciona a obtenção de um número máximo de informações em estudo, a contar de um número mínimo de experimentos ou ensaios. Baseado nos fundamentos estatísticos, o planejamento experimental é sem dúvida uma ferramenta poderosa para se chegar as condições otimizadas do processo (HASS, 2010).

O DoE procura maximizar a quantidade de informações obtidas em um experimento otimizando as combinações de variáveis. Softwares que utilizam o DoE tem sido definidos como um meio eficaz de fornecer um elevado nível de cobertura do domínio de entrada com um pequeno número de ensaios (KUHN, 2002). É uma técnica que tem sido aplicada frequentemente na indústria de modo que se possa melhorar a qualidade de seus produtos (ILZARBE, 2008).

O autor MANDENIUS e BRUNDIN (2008) utilizou a metodologia do DoE para otimizar processos, segundo ele, esta metodologia investiga as relações matemáticas entre as variáveis de entrada e saída de um sistema. Quando aplicado, o DoE revela como são as interações entre os fatores, e que essas interações são muitas das vezes difíceis de interpretar com outros métodos.

Um planejamento fatorial completo 3^k consiste na análise da influência de três níveis em 3 variáveis. Neste caso, o algarismo 3 corresponde aos nível baixo, intermediário e alto ou seja, -1, 0, +1. A letra k corresponde ao fator ou variáveis.

3 – METODOLOGIA

Neste capítulo será descrito os procedimentos que foram adotados para a realização do trabalho.

3.1 - Materiais utilizados

Todos os corpos de prova foram cortados em um torno convencional no comprimento de 30 mm cada. Os materiais utilizados foram os aços carbono ASTM A 36, ASTM 1045 e o aço inoxidável AISI 304, todos com diâmetro de ½” (12,7 mm).

3.2 – Composição química

As composições químicas nominais dos materiais utilizados estão apresentadas nas tabelas 02, 03 e 04.

Tabela 02- Composição química nominal dos aço AISI A-36 (%). (MatWeb, 2016)

C	Cu	Fe	Mn	P	Si	S
0,29	> = 0,20	98%	0,80 – 1,20	0,040	0,15 – 0,40	< = 0,050

Tabela 03- Composição químicas nominal dos aço ASTM 1045 (%). (MatWeb, 2016)

C	Fe	Mn	P	S
0,42 – 0,50	98,51 – 98,98	0,60 – 0,90	< = 0,040	< = 0,050

Tabela 04- Composição química nominal dos aço inoxidável AISI 304 (%). (MatWeb, 2016)

C	Cr	Fe	Mn	Ni	P	Si	S
< = 0,080	18-20	66,34 - 74	< = 2,0	8,0 - 10,5	< = 0,045	< = 1,0	< = 0,030

3.3 – Etapas do projeto

- 1ª Etapa: Aquisição das barras de aço necessárias;
- 2ª Etapa: Fabricação dos corpos de prova para a realização dos testes;
- 3ª Etapa: Escolha dos valores de rotação, pressão e tempo para a realização das soldas por fricção;
- 4ª Etapa: Realização da solda por fricção nos materiais em estudo;
- 6ª Etapa: Avaliação da soldabilidade dos materiais em estudo, em relação aos parâmetros utilizados;
- 7ª Etapa: Análise das propriedades geométricas dos materiais soldados em estudo, ou seja, se a mesma terá um padrão de aceitabilidade e a parte visual;
- 8ª Etapa: Análise macro e microscópica das amostras soldadas;
- 9ª Etapa: Avaliação das propriedades mecânicas por meio do ensaio de tração nas peças soldadas.

3.4 - Métodos Utilizados

Fez-se uso de uma máquina ferramenta para a realização da soldagem por fricção rotativa convencional, onde de um lado, na placa da máquina, os aços ASTM 1045 e ASTM A 36 rotacionaram a velocidade do eixo árvore com: rotação 1 = 1250 rpm, rotação 2 = 1600 rpm e rotação 3 = 2500 rpm. Do outro lado, o aço AISI 304 exerceu as pressões de trabalho P1 = 300 Mpa, P2 = 540 Mpa e P3 = 805 Mpa sobre um tempo pré-determinado T1 = 11 s, T2 = 15 s e T3 = 19 s por meio do contra ponto do cabeçote móvel.

Inicialmente utilizou-se como valor de referência a velocidade de 800 rpm, no entanto, após inúmeros testes, percebeu-se que com este valor ocorria a falta de fusão dos materiais com um aspecto todo desordenado do *flash*. Também foi substituído um sistema que inicialmente fazia uso de transmissão por polias e correias, por engrenagens, de modo a dar uma maior confiabilidade nos resultados.

Após isso, novos testes foram realizados para a adequação dos parâmetros de referência, os quais mais adiante foram tomados como base para a construção do trabalho. A Figura 12 mostra a ilustração de como foi o processo.

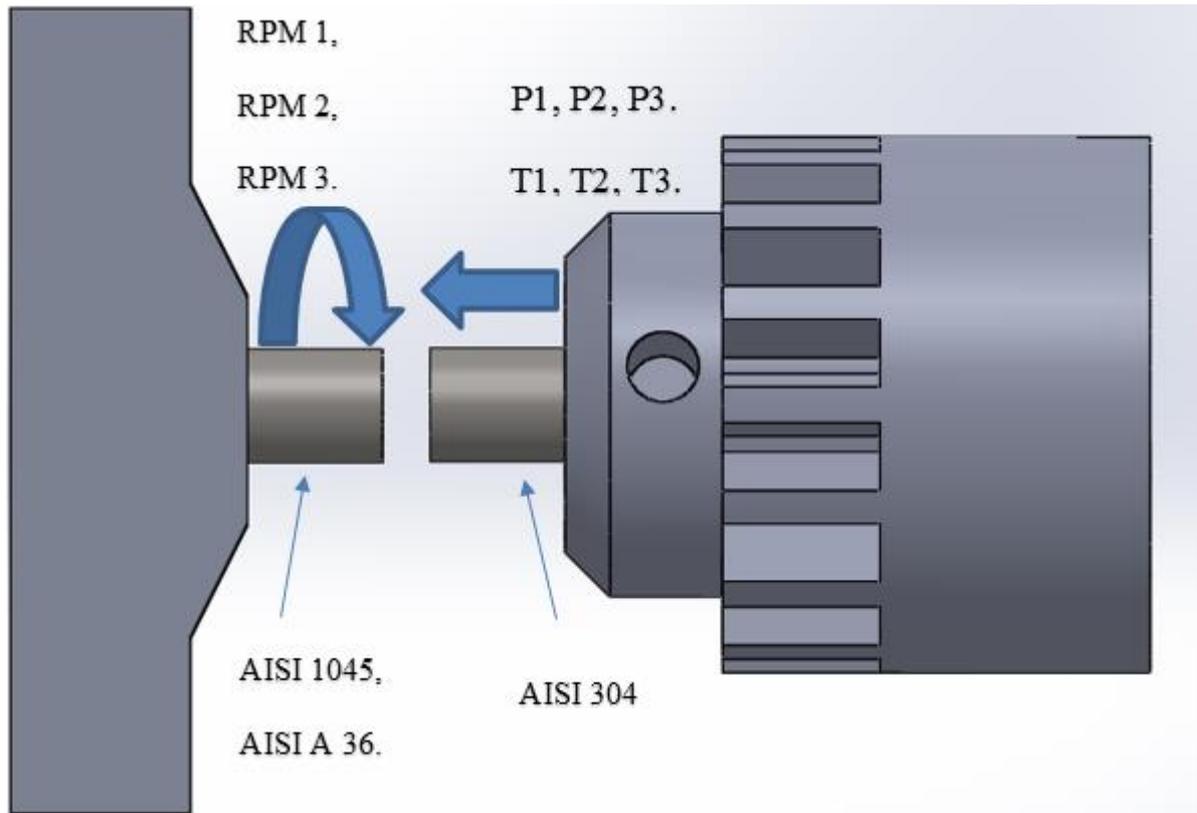


Figura 12 - Ilustração da soldagem por fricção.

A força exercida pelo contraponto do cabeçote móvel faz com que ele realize o movimento horizontal empurrando a peça estacionária em encontro da peça que está rotacionando de modo que, comecem a se atritar. Para a determinação das pressões utilizadas, fez-se uso de uma célula de carga tipo Celtron, modelo PSD-2tSJTH a qual é ligada ao computador como mostra a figura 13. Na medição das pressões de trabalho, a célula foi fixada na castanha da placa da máquina ferramenta, sua finalidade é fornecer os dados reais da força a qual a peça estacionária exerce, e neste instante não houve rotação de trabalho, sendo utilizado apenas as variáveis de pressão e tempo.



Figura 13 - Parametrização das pressões utilizadas por meio de células de carga.

Os resultados obtidos após a medição das forças são de, respectivamente:

- $F1 = 38 \text{ kN}$
- $F2 = 68 \text{ kN}$
- $F3 = 102 \text{ kN}$

A partir dos valores encontrados para as forças de trabalho, pode-se determinar as pressões, uma vez que, a pressão de trabalho e função da força exercida em relação a área da seção do corpo de prova que se desloca no sentido horizontal como mostram as equações 2, 3 e 4.

$$P1 = \frac{38000 \text{ N}}{\frac{\pi \cdot (0,0127^2)}{4}} \rightarrow P1 = 300 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$P2 = \frac{68000 \text{ N}}{\frac{\pi \cdot (0,0127^2)}{4}} \rightarrow P2 = 537 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$P3 = \frac{102000 \text{ N}}{\frac{\pi \cdot (0,0127^2)}{4}} \rightarrow P3 = 805 \text{ MPa} \quad (4)$$

3.5 - Planejamento Fatorial

De modo a atender cada vez mais as exigências de qualidade da solda, torna-se necessária uma análise e utilização otimizada dos parâmetros do processo de soldagem. Desta forma, o uso de métodos estatísticos, utilizando o software MiniTab permite abranger uma análise completa dos parâmetros envolvidos.

Para realização dos ensaios propõe-se um planejamento fatorial completo 3^3 , os ensaios foram divididos em etapas, em que se analisou a influência de três variáveis principais; rotação, pressão e tempo com três níveis de influência, ou seja, a partir de um valor de referência variou-se esses parâmetros em um nível acima e outro abaixo do valor de referência. As Tabelas 06 e 07 mostram o número de variáveis e ensaios, respectivamente.

Tabela 05: Número de variáveis

	Nível Abaixo (1)	Referência (2)	Nível Acima (3)
ROTAÇÃO (rpm)	1250	1600	2500
PRESSÃO (MPa)	300	540	805
TEMPO (s)	11	15	19

Dessa forma, é possível varrer todas as combinações de soldas possíveis. Para este experimento gerou-se uma combinação de vinte e sete ensaios para cada condição de trabalho, ou seja tanto para a soldagem similar quando para a soldagem dissimilar foram realizadas todas essas combinações. Isso se torna de extrema importância, pois pode-se determinar as variáveis que exercem maior influência na qualidade da junta soldada, tanto na formação da solda sem descontinuidade, quanto nas análises das melhores condições com maior resistência mecânica.

De modo a se ter uma melhor interpretação sobre os parâmetros utilizados, a rotação, pressão e o tempo serão apresentados, respectivamente, como 1-1-1 para as menores condições de trabalho, antecedidos pelo número do corpo de prova como mostra a tabela 07.

Tabela 06: Número de ensaios

Nº do Ensaio	Rotação (rpm)	Pressão (MPa)	Tempo (s)
1; 1-1-1	1250	300,00	11,00
2; 1-1-2	1250	300,00	15,00
3; 1-1-3	1250	300,00	19,00
4; 1-2-1	1250	537,00	11,00
5; 1-2-2	1250	537,00	15,00
6; 1-2-3	1250	537,00	19,00
7; 1-3-1	1250	805,00	11,00
8; 1-3-2	1250	805,00	15,00
9; 1-3-3	1250	805,00	19,00
10; 2-1-1	1600	300,00	11,00
11; 2-1-2	1600	300,00	15,00
12; 2-1-3	1600	300,00	19,00
13; 2-2-1	1600	537,00	11,00
14; 2-2-2	1600	537,00	15,00
15; 2-2-3	1600	537,00	19,00
16; 2-3-1	1600	805,00	11,00
17; 2-3-2	1600	805,00	15,00
18; 2-3-3	1600	805,00	19,00
19; 3-1-1	2500	300,00	11,00
20; 3-1-2	2500	300,00	15,00
21; 3-1-3	2500	300,00	19,00
22; 3-2-1	2500	537,00	11,00
23; 3-2-2	2500	537,00	15,00
24; 3-2-3	2500	537,00	19,00
25; 3-3-1	2500	805,00	11,00
26; 3-3-2	2500	805,00	15,00
27; 3-3-3	2500	805,00	19,00

Com isso, é possível fazer um levantamento dos melhores parâmetros para obtenção de uma solda com requisitos desejados. Neste aspecto, são considerados a soldabilidade, mecanismo de formação da rebarba, microestrutura e tensão de ruptura.

3.6 – Macroestrutura

As análises macroestruturais foram realizadas utilizando microscópio Olympus SZ 61 com aumento máximos de até 97 vezes, conforme mostra a figura 14. No entanto, utilizou-se um aumento de 20 vezes para as análises dos corpos de prova.



Figura 14 – Microscópio utilizado para análise dos corpos de prova.

3.7 – Microestrutura

As análises microscópicas dos corpos de prova foram feitas utilizando um microscópio Olympus Sc 30 com capacidade de aumento de até 1000 vezes, como mostra a Figura 15. Com este equipamento é possível analisar a microestrutura do metal base, da ZTA e zona de ligação.

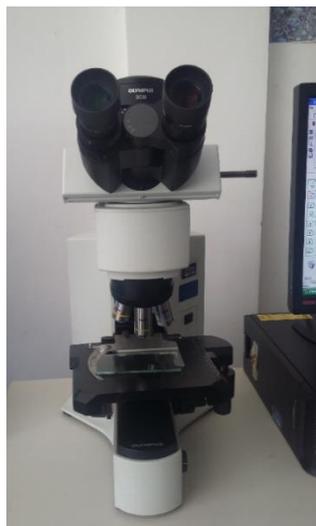


Figura 15 – Microscópio utilizado para análise das interfaces dos corpos de prova

3.8 – Tensão de ruptura.

Os corpos de provas foram ensaiados de acordo com a norma NBR 6152 de 2002, em uma máquina de ensaio com capacidade de carga de 10.000 kgf como mostra a Figura 16. Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente de 23°C com uma velocidade de 5 mm/minuto.



Figura 16 – Máquina universal de ensaio de tração.

3.9 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

De modo a se obter uma análise mais detalhada das interfaces das soldas, fez-se uso do MEV (microscópio eletrônico de varredura) modelo EVO MA 15 como mostra a Figura 17, o qual produz imagens de alta resolução da superfície dos corpos de prova por meio da geração de um feixe de elétrons que faz uma averiguação sobre a topografia e composição química dos materiais estudados.



Figura 17 – Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV

4 – Resultados e Discussões

Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos com os experimentos e as discussões referentes ao assunto.

4.1 – Testes preliminares

Primeiramente determinou-se os valores de referência de rotação, pressão e tempo, nesta fase foram realizadas as soldas com todas as combinações possíveis para cada tipo de material. Depois de soldados, os corpos de prova passaram por uma inspeção visual, seguido de um corte longitudinal na interface de solda, de modo que, pudesse analisar macroscopicamente e microscopicamente a região soldada.

4.2 – Macrografia

Analisando o mecanismo de formação da rebarba, percebe-se que para os mesmos parâmetros utilizados, quando o aço ASTM 1045 rotaciona, há uma geometria mais uniforme da rebarba quando comparado ao inox rotacionando, o qual gerou uma geometria discrepante na formação da rebarba, como mostra a Figura 18. Em ambas as situações, o aço carbono apresentou maior deformação. As diferentes propriedades térmicas e físicas dos materiais fazem com que eles tenham uma deformação assimétrica. E de modo a se ter uma deformação mais uniforme possível o material que está parado aquece mais e o inox possui uma condutividade térmica de, aproximadamente, 30% menor que o aço carbono e também possui maior dureza em temperaturas elevadas e por isso sofre menor deformação. Dessa forma, é necessário que ele aqueça mais, ou seja, que ele esteja estacionário para que possa se deformar mais, aproveitando melhor a energia do processo



Figura 18 - Formação do *flash* para os mesmo parâmetros.

Uma análise da formação da rebarba sobre os parâmetros adotados também foi mapeada de modo a investigar a sua influência. Como será apresentado nas figuras das seções 4.3 a 4.6 os aspectos da rebarba como diâmetro, espessura e comprimento final dos corpos de prova sofrem influência dos valores de rotação, pressões e tempo de trabalho. Para encontrar o valor do diâmetro e espessura da rebarba de cada corpo de prova foram realizadas três medições para cada condição e a partir dessas medições realizou-se a média encontrada entre os valores. Para rpm maiores têm-se um melhor aspecto da geometria da rebarba, como mostram as figuras dos anexos A até D.

Cada corpo de prova possui 30 mm, os dois corpos necessários para realizar a solda apresentam 60 mm de comprimento inicial (LI). No entanto, após a soldagem dos materiais os corpos de prova apresentam um comprimento final (LF) menor que este valor, devido ao material que é expulso através da rebarba nos instantes soldas.

4.3 - Diâmetro, espessura e comprimento final do ASTM 1045 x ASTM 1045

Tabela 07 – Formação da rebarba para aço ASTM 1045 x ASTM 1045

rpm	Nº	Diâmetro rebarba (mm)				Espessura rebarba (mm)				Comprimento (mm)	
		1	2	3	Média	1	2	3	Média	LI	LF
1250	1; 1-1-1	16,23	16,80	16,19	16,41	4,57	3,60	3,44	3,87	60,00	59,03
	2; 1-1-2	16,55	16,58	16,90	16,68	4,38	4,10	4,46	4,31	60,00	57,56
	3; 1-1-3	17,28	16,80	16,89	16,99	5,04	4,70	4,62	4,79	60,00	57,54
	4; 1-2-1	15,50	16,60	17,00	16,37	4,00	4,30	3,60	3,97	60,00	58,50
	5; 1-2-2	17,10	20,02	18,67	18,60	6,27	5,65	6,19	6,04	60,00	55,21
	6; 1-2-3	18,75	18,70	18,89	18,78	6,90	7,32	7,17	7,13	60,00	54,70
	7; 1-3-1	17,80	17,80	17,73	17,78	5,70	6,09	5,96	5,92	60,00	56,06
	8; 1-3-2	18,93	18,82	18,90	18,88	7,51	6,75	7,59	7,28	60,00	54,28
	9; 1-3-3	19,53	19,19	18,79	19,17	7,37	7,17	8,10	7,55	60,00	53,98
1600	10; 2-1-1	16,97	16,90	16,65	16,84	5,52	4,67	4,18	4,79	60,00	58,34
	11; 2-1-2	17,90	18,54	18,48	18,31	5,72	5,83	5,74	5,76	60,00	56,14
	12; 2-1-3	18,59	18,97	18,55	18,70	6,41	6,23	6,43	6,36	60,00	55,31
	13; 2-2-1	17,83	17,97	17,70	17,83	5,50	5,37	5,67	5,51	60,00	56,25
	14; 2-2-2	18,60	18,35	18,45	18,47	6,48	6,20	6,62	6,43	60,00	55,44
	15; 2-2-3	19,35	19,39	19,17	19,30	6,59	7,34	6,60	6,84	60,00	54,46
	16; 2-3-1	17,80	17,83	17,86	17,83	5,81	5,07	6,08	5,65	60,00	56,47
	17; 2-3-2	18,54	18,67	18,89	18,70	6,75	6,96	7,10	6,94	60,00	54,79
	18; 2-3-3	19,31	19,94	19,82	19,69	7,00	6,84	7,27	7,04	60,00	53,22
2500	19; 3-1-1	15,68	17,70	17,80	17,06	3,80	4,50	5,00	4,43	60,00	58,81
	20; 3-1-2	17,58	17,90	17,70	17,73	4,94	5,23	5,48	5,22	60,00	56,90
	21; 3-1-3	18,42	18,27	18,36	18,35	6,25	6,04	6,00	6,10	60,00	55,95
	22; 3-2-1	17,37	17,29	17,52	17,39	5,21	4,88	5,17	5,09	60,00	56,94
	23; 3-2-2	18,08	18,31	18,12	18,17	6,10	5,96	5,94	6,00	60,00	55,54
	24; 3-2-3	18,94	18,69	18,92	18,85	7,32	7,13	7,17	7,21	60,00	54,59
	25; 3-3-1	17,89	17,90	18,16	17,98	5,88	6,03	5,83	5,91	60,00	56,36
	26; 3-3-2	18,85	18,50	18,72	18,69	6,96	7,08	7,02	7,02	60,00	54,62
	27; 3-3-3	19,15	19,44	19,28	19,29	7,16	6,97	7,27	7,13	60,00	52,52

As figuras 19, 20 e 21 mostram respectivamente a média do diâmetro e espessura da rebarba e o comprimento final dos corpos de prova para cada condição de trabalho.

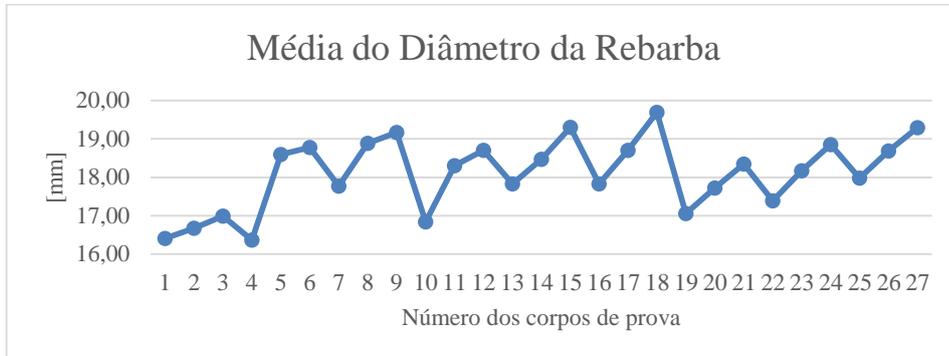


Figura 19 - Média do diâmetro da rebarba para o aço ASTM 1045 x ASTM 1045.

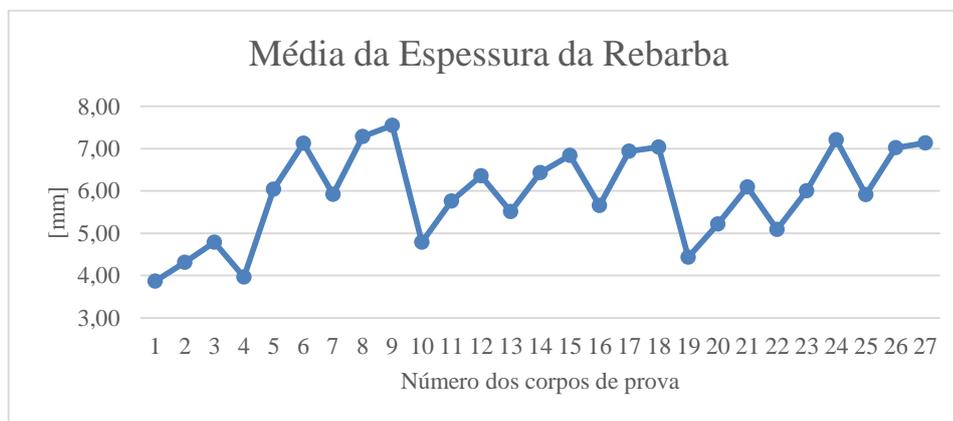


Figura 20 - Média da espessura da rebarba para o aço ASTM 1045 x ASTM 1045.

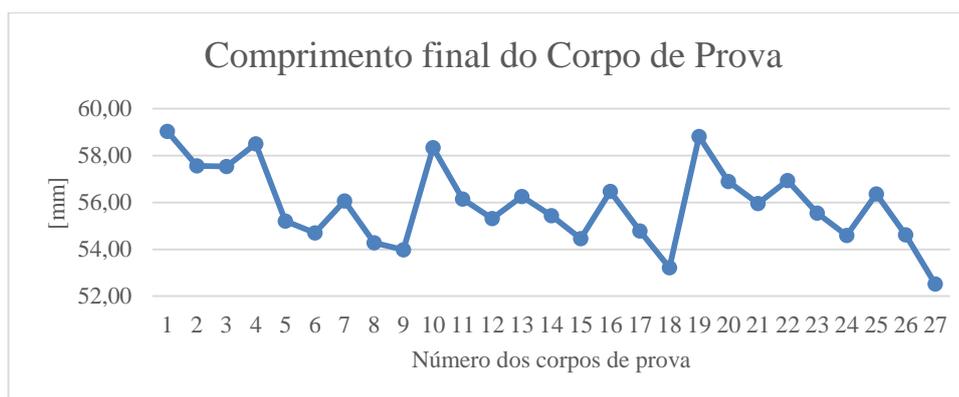


Figura 21 - Comprimento final dos corpos de prova para o aço ASTM 1045 x ASTM 1045.

Nesta condição de soldagem o maior diâmetro ocorreu para o corpo de prova 18; 2-3-3. Já a maior espessura ocorreu no corpo de prova 09; 1-3-3 e o menor comprimento final ocorreram para o corpo de prova 27; 3-3-3.

4.4 - Diâmetro, espessura e comprimento final do AISI 304 x AISI 304

Tabela 08 – Formação da rebarba para aço AISI 304 x AISI 304

rpm	Nº	Diâmetro rebarba (mm)				Espessura rebarba (mm)				Comprimento (mm)	
		1	2	3	Média	1	2	3	Média	LI	LF
1250	1; 1-1-1	14,08	15,00	15,12	14,97	2,30	2,00	2,10	2,13	60,00	59,80
	2; 1-1-2	16,07	16,08	16,09	16,08	2,20	2,80	2,40	2,47	60,00	59,30
	3; 1-1-3	16,70	16,66	16,51	16,62	3,30	3,40	3,40	3,37	60,00	58,70
	4; 1-2-1	15,39	15,08	15,45	15,31	1,70	2,70	2,10	2,17	60,00	59,70
	5; 1-2-2	16,65	16,50	16,67	16,61	3,30	3,40	3,50	3,40	60,00	58,50
	6; 1-2-3	18,19	17,94	18,25	18,13	5,90	5,30	6,00	5,73	60,00	56,50
	7; 1-3-1	16,40	16,60	16,40	16,47	3,30	4,20	3,60	3,70	60,00	58,50
	8; 1-3-2	17,51	17,69	17,51	17,57	5,40	5,50	5,60	5,50	60,00	57,60
	9; 1-3-3	18,75	18,70	18,72	18,72	6,70	6,20	6,20	6,37	60,00	55,60
1600	10; 2-1-1	14,96	15,10	14,93	15,00	1,90	2,50	1,87	2,09	60,00	59,70
	11; 2-1-2	16,25	16,03	16,22	16,17	3,50	3,00	2,70	3,07	60,00	59,10
	12; 2-1-3	17,01	16,94	16,84	16,93	3,40	3,60	3,50	3,50	60,00	58,10
	13; 2-2-1	16,26	15,86	16,04	16,05	3,80	2,10	2,80	2,90	60,00	58,00
	14; 2-2-2	17,34	17,09	17,54	17,32	4,30	4,70	3,90	4,30	60,00	57,80
	15; 2-2-3	18,31	18,30	18,27	18,29	5,20	5,30	5,00	5,17	60,00	57,60
	16; 2-3-1	16,30	16,19	16,33	16,27	3,40	3,30	3,20	3,30	60,00	58,90
	17; 2-3-2	16,97	16,96	16,91	16,95	3,90	4,60	4,00	4,17	60,00	58,00
	18; 2-3-3	17,96	18,16	18,25	18,12	5,30	5,30	5,10	5,23	60,00	57,10
2500	19; 3-1-1	15,80	16,30	16,00	16,03	1,60	2,90	1,70	2,07	60,00	59,30
	20; 3-1-2	16,71	16,69	16,66	16,69	3,90	3,20	3,00	3,37	60,00	59,10
	21; 3-1-3	17,43	17,39	17,41	17,41	5,00	5,20	5,20	5,13	60,00	57,50
	22; 3-2-1	16,57	16,55	16,70	16,61	3,70	3,90	4,30	3,97	60,00	58,00
	23; 3-2-2	17,04	17,11	17,07	17,07	4,20	4,10	4,00	4,10	60,00	57,90
	24; 3-2-3	17,60	17,63	17,61	17,61	4,70	4,65	4,50	4,62	60,00	57,30
	25; 3-3-1	16,73	16,63	16,67	16,68	3,70	3,65	3,80	3,72	60,00	56,00
	26; 3-3-2	17,80	17,75	17,73	17,76	3,45	3,50	3,50	3,48	60,00	55,50
	27; 3-3-3	17,94	17,92	17,95	17,94	4,10	4,11	4,20	4,14	60,00	54,50

As figuras 22, 23 e 24 mostram respectivamente a média do diâmetro e espessura da rebarba e o comprimento final dos corpos de prova para cada condição de trabalho.

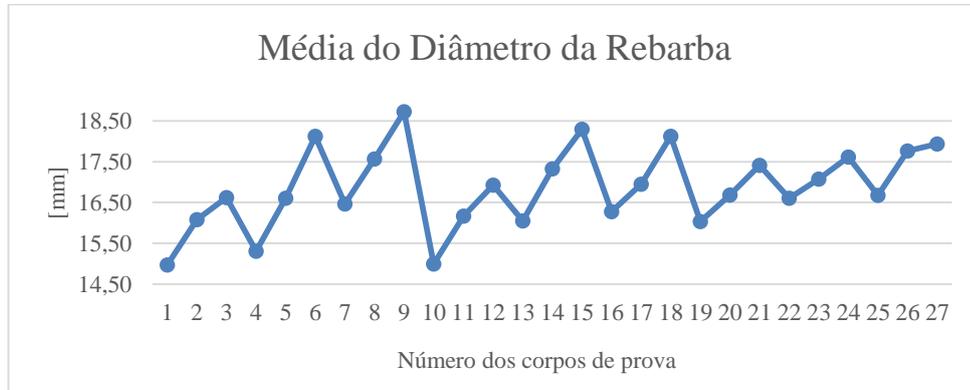


Figura 22. Média do diâmetro da rebarba para o aço AISI 304 x AISI 304.

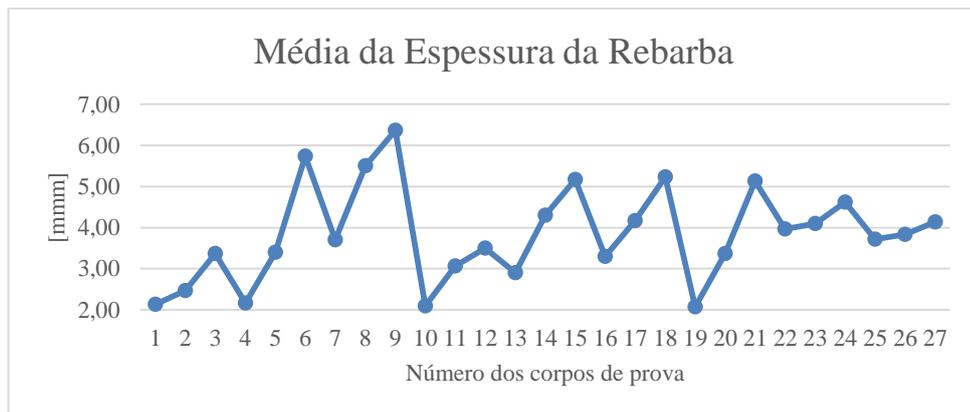


Figura 23. Média da espessura da rebarba para o aço AISI 304 x AISI 304.

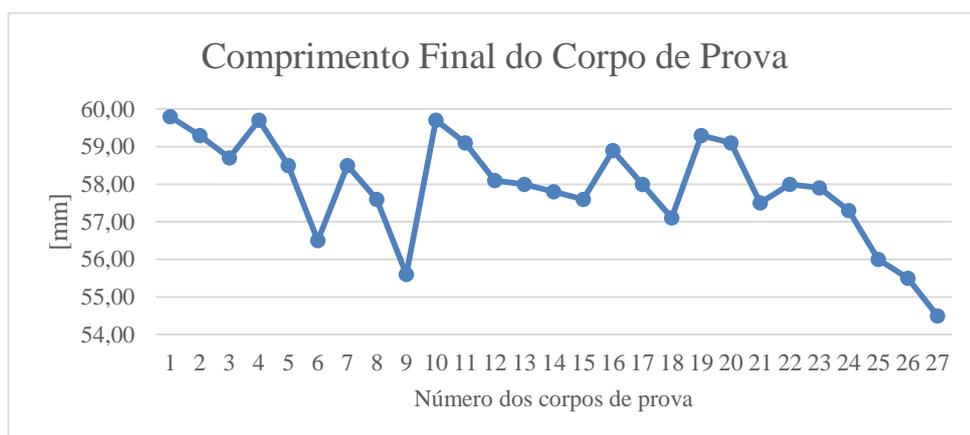


Figura 24. Comprimento final dos corpos de prova para o aço AISI 304 x AISI 304.

Nesta condição de soldagem o maior diâmetro e espessura da rebarba ocorreu para o corpo de prova 09; 1-3-3. Já o menor comprimento final ocorreu para o corpo de prova 27; 3-3-3.

4.5 - Diâmetro, espessura e comprimento final do ASTM 1045 x AISI 304

Tabela 09 – Formação da rebarba para aço ASTM 1045 x AISI 304

rpm	Nº	Diâmetro rebarba (mm)				Espessura rebarba (mm)				Comprimento (mm)	
		1	2	3	Média	1	2	3	Média	LI	LF
1250	1; 1-1-1	16,72	16,63	16,71	16,69	3,82	4,00	3,60	3,81	60,00	58,00
	2; 1-1-2	17,22	17,22	17,57	17,34	4,31	4,70	4,00	4,34	60,00	57,53
	3; 1-1-3	18,39	18,39	18,40	18,39	5,10	5,30	5,81	5,40	60,00	56,12
	4; 1-2-1	17,50	17,33	17,49	17,44	4,90	4,70	4,80	4,80	60,00	56,90
	5; 1-2-2	18,12	18,05	18,17	18,11	5,50	5,80	5,52	5,61	60,00	56,23
	6; 1-2-3	19,15	19,35	19,11	19,20	5,60	6,40	6,41	6,14	60,00	55,30
	7; 1-3-1	18,07	18,09	18,21	18,12	5,30	5,80	5,50	5,53	60,00	56,20
	8; 1-3-2	18,52	18,51	18,47	18,50	6,50	6,90	6,90	6,77	60,00	55,10
	9; 1-3-3	19,63	19,81	19,54	19,66	7,00	7,00	6,90	6,97	60,00	53,90
1600	10; 2-1-1	17,11	17,06	17,09	17,09	3,14	3,32	3,58	3,35	60,00	57,92
	11; 2-1-2	17,63	17,73	17,73	17,70	4,24	3,96	3,84	4,01	60,00	57,50
	12; 2-1-3	17,72	17,74	17,69	17,72	4,52	4,36	4,02	4,30	60,00	57,48
	13; 2-2-1	17,76	17,78	17,81	17,78	4,54	4,20	4,28	4,34	60,00	57,22
	14; 2-2-2	18,48	18,42	18,65	18,52	6,12	5,88	6,18	6,06	60,00	55,70
	15; 2-2-3	19,01	19,01	19,14	19,05	6,32	6,44	6,54	6,43	60,00	55,06
	16; 2-3-1	17,84	17,84	17,87	17,85	5,04	5,32	5,12	5,16	60,00	56,78
	17; 2-3-2	18,47	18,53	18,55	18,52	6,50	6,46	6,16	6,37	60,00	55,17
	18; 2-3-3	18,85	19,07	19,02	18,98	7,08	6,88	6,34	6,77	60,00	54,82
2500	19; 3-1-1	17,65	17,62	17,60	17,62	3,34	3,62	3,52	3,49	60,00	57,76
	20; 3-1-2	17,72	17,71	17,71	17,71	4,82	4,66	4,42	4,63	60,00	57,14
	21; 3-1-3	18,16	18,09	18,11	18,12	5,24	5,62	5,08	5,31	60,00	56,42
	22; 3-2-1	17,76	17,71	17,77	17,75	4,52	4,60	4,92	4,68	60,00	57,04
	23; 3-2-2	18,02	18,04	18,04	18,03	6,08	5,96	5,88	5,97	60,00	56,12
	24; 3-2-3	18,65	18,76	18,66	18,69	7,26	7,24	7,08	7,19	60,00	54,90
	25; 3-3-1	17,46	17,52	17,43	17,47	4,48	4,94	4,78	4,73	60,00	56,98
	26; 3-3-2	18,41	18,33	18,45	18,40	6,86	6,54	6,62	6,67	60,00	55,58
	27; 3-3-3	18,70	18,69	18,75	18,71	7,34	7,16	7,38	7,29	60,00	54,20

As figuras 25, 26 e 27 mostram respectivamente a média do diâmetro e espessura da rebarba e o comprimento final dos corpos de prova para cada condição de trabalho.

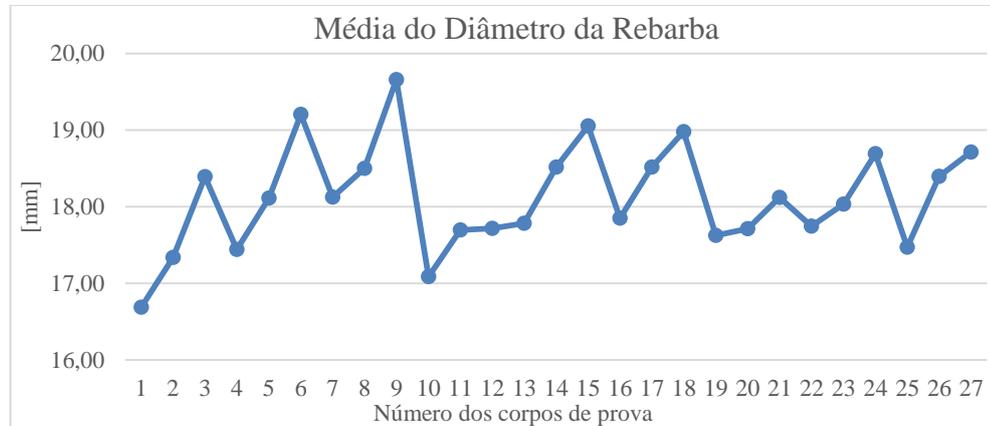


Figura 25 - Média do diâmetro da rebarba para o aço ASTM 1045 x AISI 304.

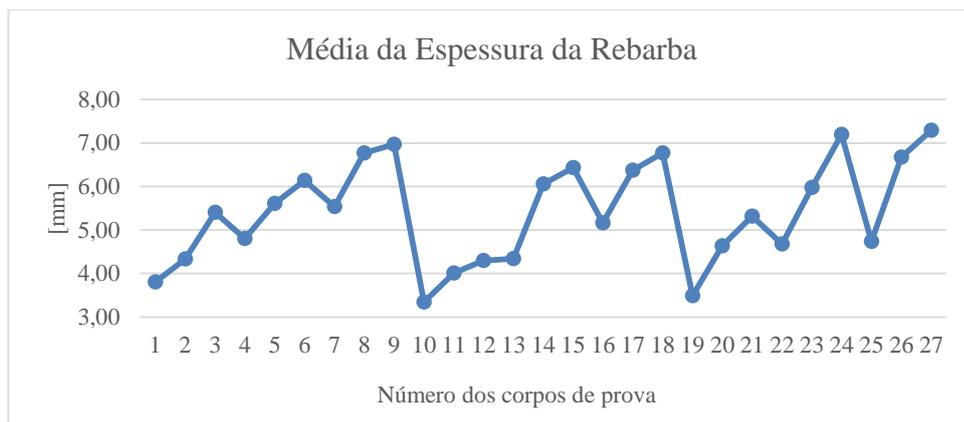


Figura 26 - Média da espessura da rebarba para o aço ASTM 1045 x AISI 304.

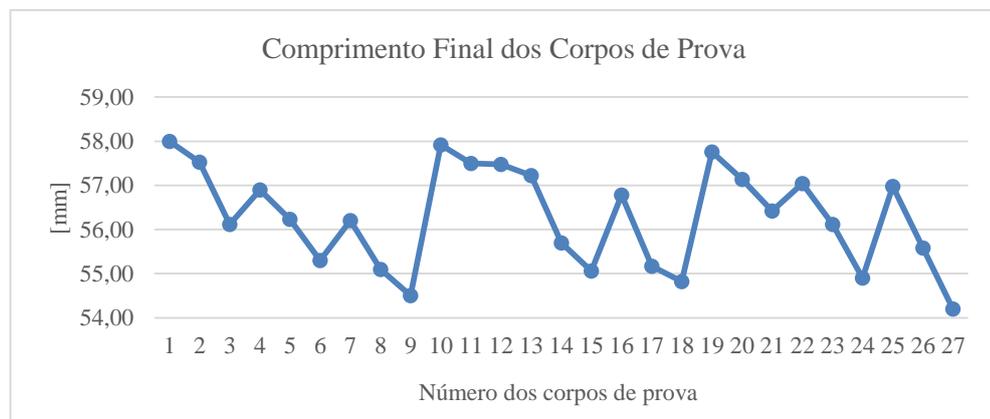


Figura 27 - Comprimento Final dos corpos de prova para o aço ASTM 1045 x AISI 304

Nesta condição de soldagem o maior diâmetro da rebarba ocorreu para o corpo de prova 09; 1-3-3. Já a maior espessura e o menor comprimento final ocorreram para o corpo de prova 27; 3-3-3.

4.6 - Diâmetro, espessura e comprimento final do ASTM A 36 x AISI 304

Tabela 10 – Formação da rebarba para aço ASTM A 36 x AISI 304

rpm	Nº	Diâmetro rebarba (mm)				Espessura rebarba (mm)				Comprimento (mm)	
		1	2	3	Média	1	2	3	Média	LI	LF
1250	1; 1-1-1	16,20	16,20	16,60	16,33	3,60	2,80	3,50	3,30	60,00	58,30
	2; 1-1-2	16,40	16,70	16,20	16,43	4,50	4,20	4,20	4,30	60,00	57,90
	3; 1-1-3	17,60	17,70	18,20	17,83	4,80	5,00	4,70	4,83	60,00	57,00
	4; 1-2-1	17,10	17,40	17,10	17,20	4,20	4,30	5,00	4,50	60,00	57,30
	5; 1-2-2	17,30	17,30	17,20	17,27	4,80	5,30	4,70	4,93	60,00	57,10
	6; 1-2-3	18,10	18,00	18,20	18,10	6,00	6,10	5,90	6,00	60,00	55,70
	7; 1-3-1	17,00	17,20	17,10	17,10	3,30	4,00	4,40	3,90	60,00	57,90
	8; 1-3-2	19,00	18,50	18,70	18,73	5,60	5,80	6,60	6,00	60,00	54,60
	9; 1-3-3	19,10	19,40	19,20	19,23	6,20	6,90	6,50	6,53	60,00	54,20
1600	10; 2-1-1	17,90	17,00	16,80	17,23	2,50	3,30	2,80	2,87	60,00	58,00
	11; 2-1-2	17,40	18,30	17,50	17,73	4,00	4,10	4,80	4,30	60,00	57,50
	12; 2-1-3	17,60	17,73	17,90	17,74	5,30	4,50	5,40	5,07	60,00	57,10
	13; 2-2-1	17,00	17,90	17,90	17,60	4,20	4,10	4,40	4,23	60,00	57,70
	14; 2-2-2	17,90	17,80	17,60	17,77	5,40	5,90	6,00	5,77	60,00	56,50
	15; 2-2-3	17,94	17,69	17,70	17,78	6,00	5,60	5,80	5,80	60,00	56,20
	16; 2-3-1	17,20	17,40	17,20	17,27	4,50	4,80	4,60	4,63	60,00	57,50
	17; 2-3-2	19,00	19,30	19,10	19,13	6,40	6,60	6,70	6,57	60,00	55,00
	18; 2-3-3	20,00	19,30	19,80	19,70	6,90	6,90	7,30	7,03	60,00	54,10
2500	19; 3-1-1	17,60	17,80	17,70	17,70	4,20	3,70	4,00	3,97	60,00	57,80
	20; 3-1-2	18,40	18,50	18,50	18,47	4,20	4,30	3,60	4,03	60,00	57,20
	21; 3-1-3	18,80	19,00	18,70	18,83	5,30	4,40	4,90	4,87	60,00	56,80
	22; 3-2-1	18,00	17,80	17,50	17,77	4,90	4,50	4,60	4,67	60,00	57,00
	23; 3-2-2	18,00	18,20	18,40	18,20	6,80	6,00	5,30	6,03	60,00	55,70
	24; 3-2-3	19,40	19,20	19,30	19,30	5,90	6,20	6,50	6,20	60,00	55,20
	25; 3-3-1	17,26	17,32	17,23	17,27	4,28	4,74	4,58	4,53	60,00	55,40
	26; 3-3-2	18,21	18,13	18,25	18,20	6,00	5,70	5,90	5,87	60,00	54,40
	27; 3-3-3	18,50	18,60	18,40	18,50	7,50	7,50	7,00	7,33	60,00	54,00

As figuras 28, 29 e 30 mostram respectivamente a média do diâmetro e espessura da rebarba e o comprimento final dos corpos de prova para cada condição de trabalho.

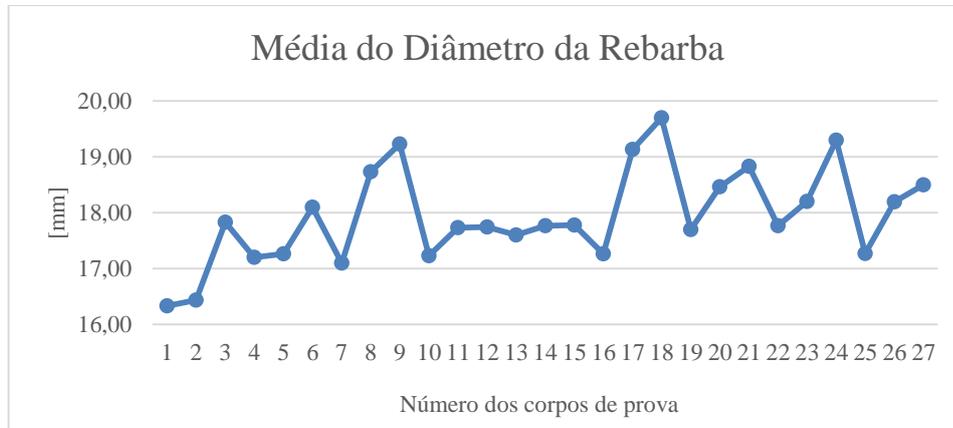


Figura 28 - Média do diâmetro da rebarba para o Aço ASTM A 36 x AISI 304

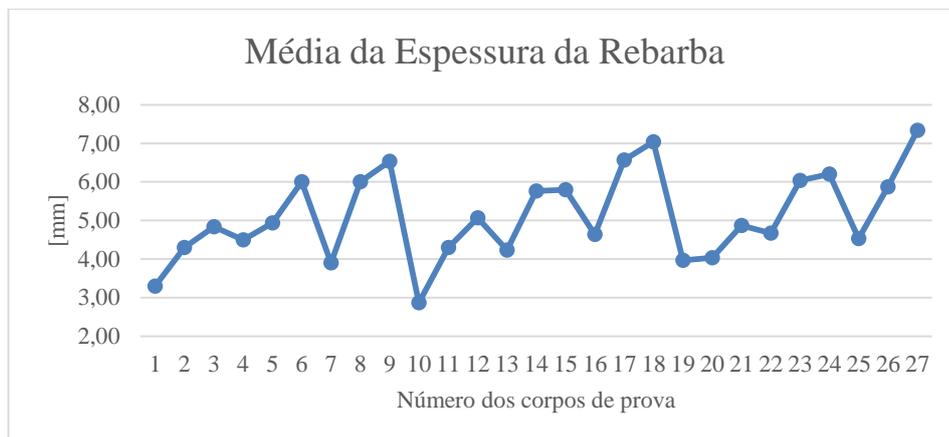


Figura 29 - Média da espessura da rebarba para o aço ASTM A 36 x AISI 304.

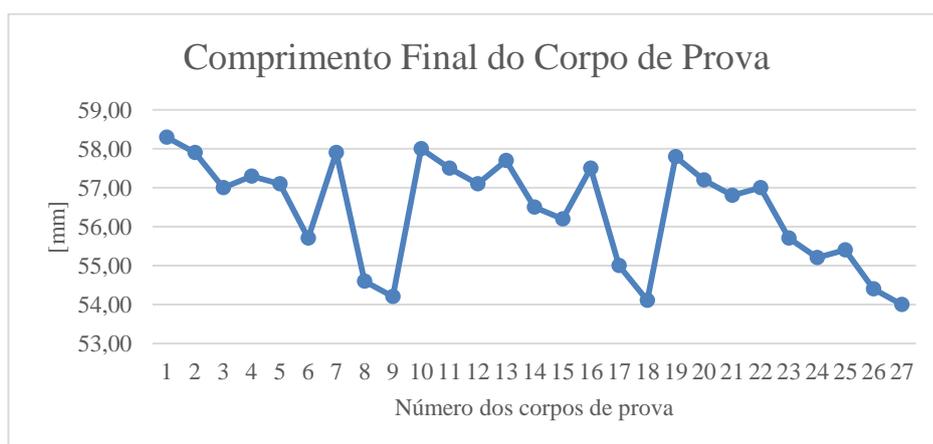


Figura 30. Comprimento final dos corpos de prova para o aço ASTM A 36 x AISI 304.

Nesta condição de soldagem o maior diâmetro da rebarba ocorreu para o corpo de prova 18; 2-3-3. Já a maior espessura e o menor comprimento final ocorreram para o corpo de prova 27; 3-3-3.

Todas as condições que apresentaram o maior diâmetro, espessura e *burn off* (taxa de encurtamento dos materiais) foram para pressões e tempos máximos de trabalho. Essas variáveis são as condições que mais influenciam no mecanismo de formação da geometria da rebarba.

Ao analisar o mecanismo de deformação, percebe-se que os materiais tiveram maior redução de seu comprimento para as condições máximas, ou seja para os corpos de prova 27. Como mostra a Tabela 11 no que se refere ao LF (comprimento final) dos corpos de prova, o aço carbono ASTM 1045 na soldagem similar apresentou um deformação de aproximadamente 3% maior quando comparado na soldagem dissimilar com o aço inox AISI 304 para o mesmo parâmetro. Essa diferença entre o LI (comprimento Inicial) e o LF na soldagem similar do inox AISI 304 para a soldagem dissimilar com o ASTM 1045, praticamente não apresentou diferença, no qual teve-se um aumento na deformação de 0,53% e com o aço ASTM A 36 esse aumento chegou a 0,83% para os mesmos parâmetros. As figuras 31 e 32 mostram respectivamente o comprimento final dos corpos de prova para as condições máximas de trabalho e seu percentual de deformação para essas condições.

Portanto, como mostra as figuras 31 e 32 para todas as condições de soldagem de materiais similares e dissimilares, o aço ASTM 1045 na soldagem similar foi o material que apresentou maior deformação.

Tabela 11 – Comprimento final dos corpos de prova com maior deformação.

Material	LI [mm]	LF [mm]	Deformação [%]
ASTM 1045 x ASTM 1045	60	52,52	12,5
AISI 304 x AISI 304	60	54,50	9,17
ASTM 1045 x AISI 304	60	54,20	9,7
ASTM A 36 x AISI 304	60	54	10

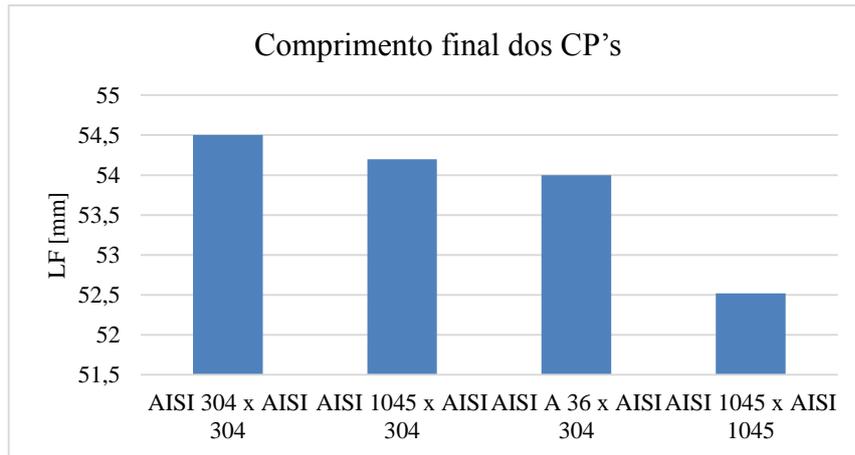


Figura 31 – Comprimento final dos corpos de prova para as condições máximas

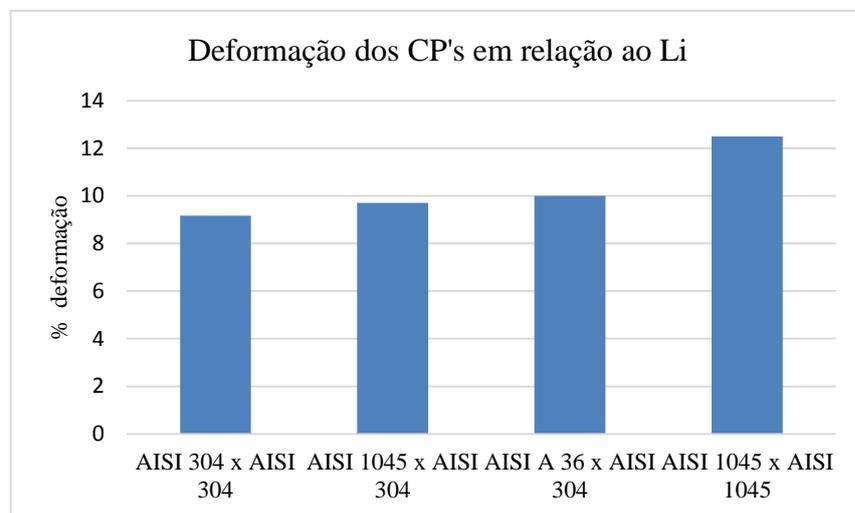


Figura 32 – Deformação dos corpos de prova para as condições máximas

4.7 – Micrografia

A preparação das amostras para análise microestrutural consistiu no corte por abrasivo, refrigerado com óleo solúvel, lixamento, polimento e ataque do aço carbono com Nital 4% e do inoxidável com eletrólise utilizando o reagente glicerégia.

A figura 33 mostra a microestrutura da junção do aço ASTM A 36 x AISI 304, corpo de prova 07 com um aumento de 500 vezes. Nesta região de interface da solda percebe-se uma região homogênea com uma perfeita união dos metais, no qual tem-se a presença de grãos de ferrita e perlita.

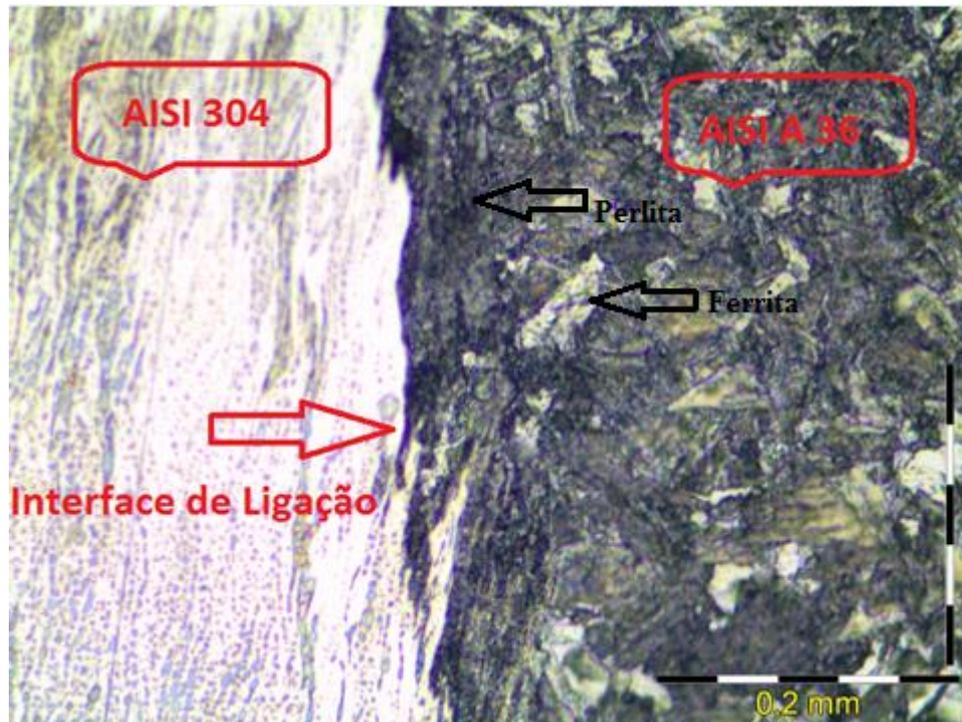


Figura 33 - Interface de ligação do aço AISI 304 x ASTM A 36. Corpo de prova 07; 1-3-1 com aumento de 500 vezes

A figura 34 também se refere aos aço ASTM A 36 x AISI 304, corpo de prova 07 com 50 vezes de aumento. Evidencia-se o fluxo de material (inox) com o aspecto de sinuosidade próximo a interface formando a solda.

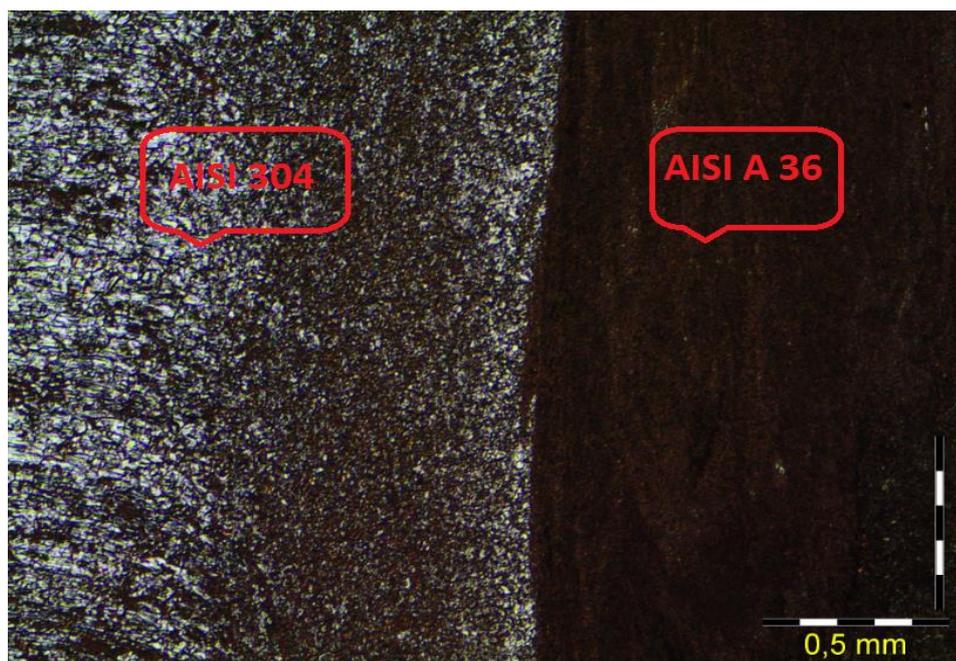


Figura 34 - Região de ligação do aço AISI 304 x ASTM A 36. Corpo de prova 07; 1-3-1 com aumento de 50 vezes

4.8 – Melhores parâmetros

Após a soldagem dos corpos de prova, todos foram cortados, lixados, polidos e atacados para analisar os melhores parâmetros de soldagem. Mediante as macro e micrografias feitas em todos os corpos de prova, os que apresentaram melhor condição de soldagem são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Melhores parâmetros de soldagem

	Condição	Nº CP
Similar	ASTM 1045 x ASTM 1045	21 – 22 – 25 – 26
	AISI 304 x AISI 304	18 - 23
Dissimilar	ASTM 1045 x AISI 304	07
	ASTM A 36 x AISI 304	07

4.9 – Análise das interfaces de solda utilizando o MEV e EDS

Foi utilizado o MEV e EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) para análises dos corpos de prova na soldagem dissimilar do aço AISI 304 x ASTM 1045 e AISI 304 x ASTM A 36 de modo a caracterizar as regiões de interface referentes aos materiais. Com isso pôde-se determinar os elementos químicos presentes e assim identificar os materiais estudados. As figuras 35 a e b, mostram as regiões de solda para o corpo de prova 07 do aço AISI 304 x ASTM 1045 com 54 x de aumento. Verifica-se portanto, com distinção a localização da mudança do aço inox para aço carbono, pois como mostra as figuras ocorre um aumento significativo do teor de Ferro a medida em que se ultrapassa a região de ligação.

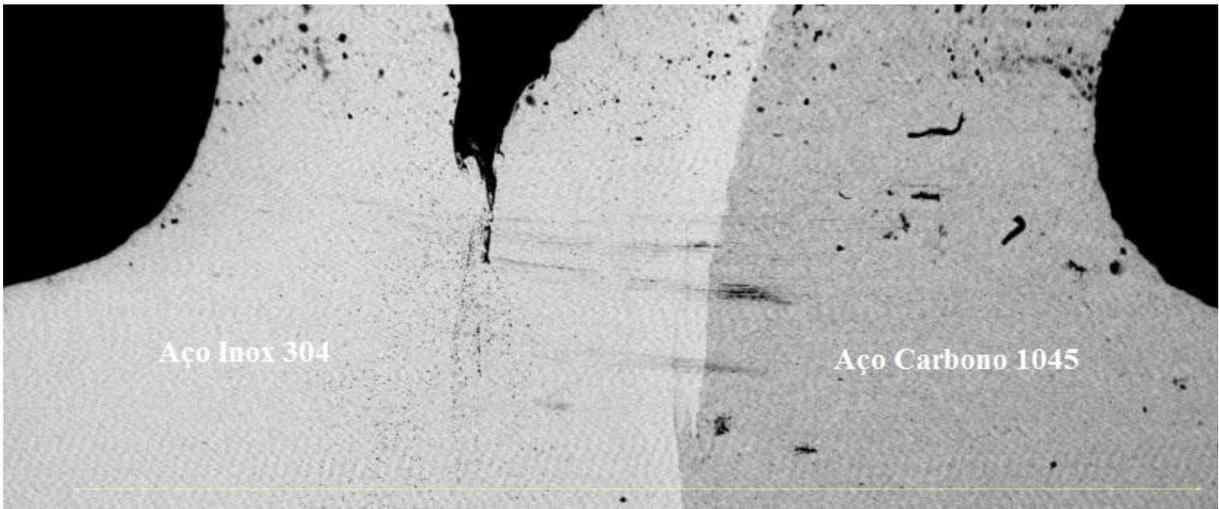


Figura 35 a) - Interface de solda para os materiais AISI 304 x ASTM 1045

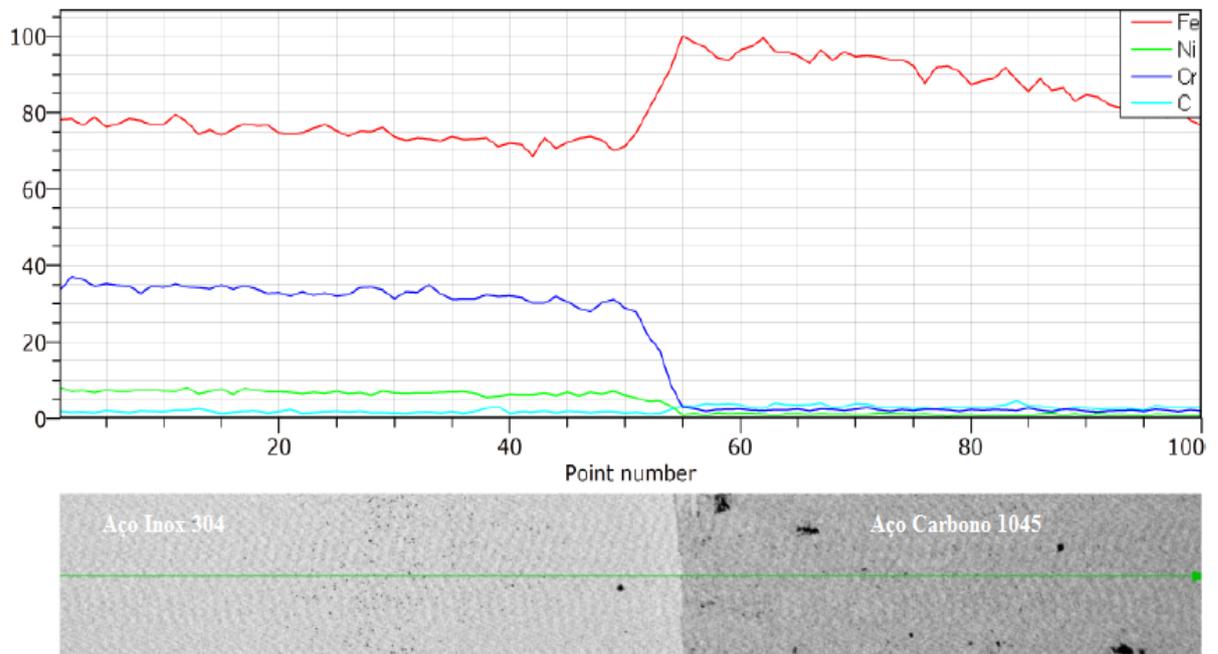


Figura 35b) - Interface de solda para os materiais AISI 304 x ASTM 1045

A Figura 36 mostra a interface de solda para a soldagem do corpo de prova 07 AISI 304 x ASTM 1045 com 2000 vezes de aumento. A simbologia α se refere a ferrita e M se refere a martensita.

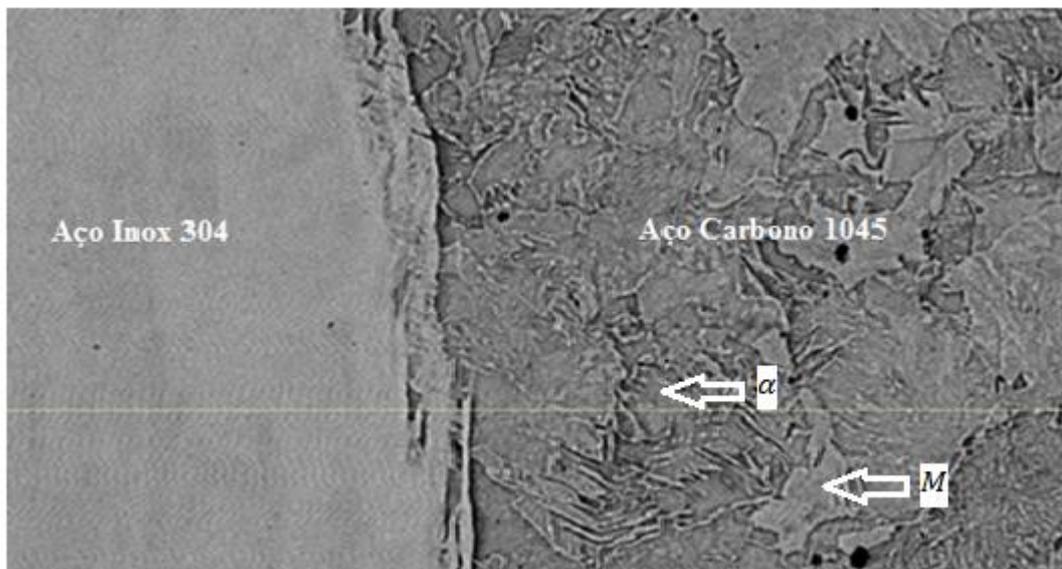
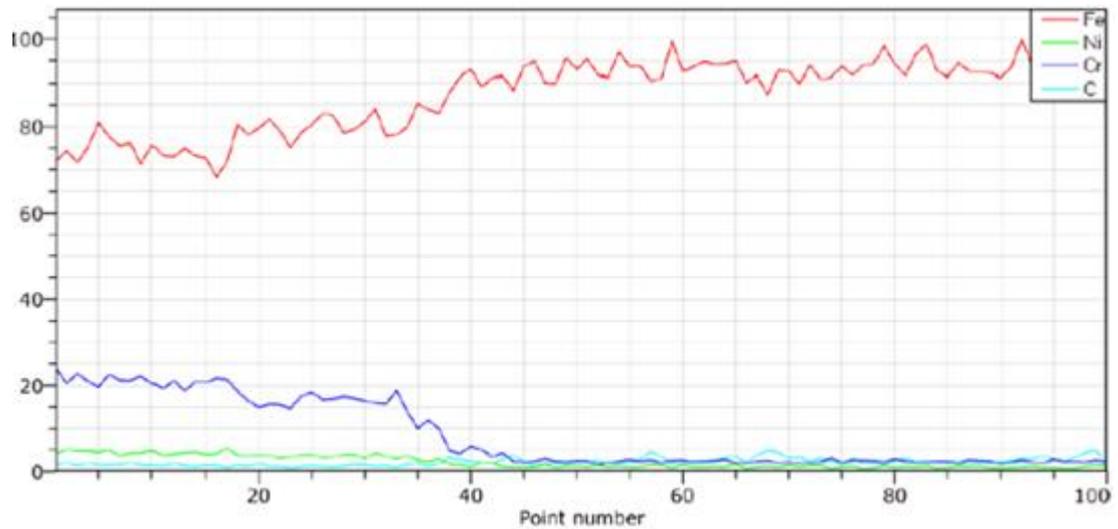


Figura 36 - Interface de solda para os materiais AISI 304 x ASTM 1045

Analisando a Figura 37 fica evidente que a região de solda para a soldagem do aço AISI 304 x A 36 do corpo de prova 07 com 60 vezes de aumento se torna nítida. Pois, a medida em que se ultrapassa a interface de solda em direção do aço inox para o aço carbono o teor Cr cai bruscamente, e o teor de ferro aumenta devido o cromo ser o elemento constituinte do aço inox e o ferro possuir concentração maior no aço carbono caracterizando assim o ponto de mudança de um material para o outro.

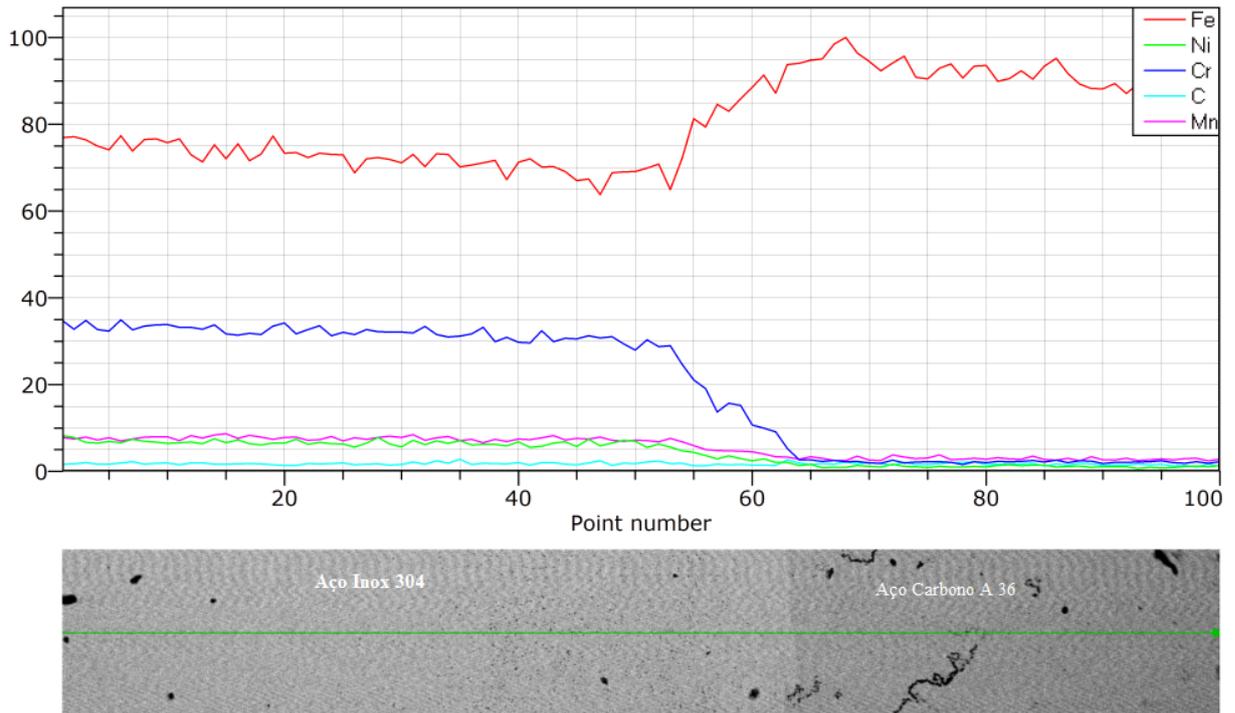


Figura 37 - Interface de solda para os materiais AISI 304 x ASTM A 36

4.10 – Ensaio de resistência a tração

O ensaio de tração realizado nos corpos de prova teve a finalidade de fornecer dados relativos a respeito da resistência da solda, possibilitando fazer um comparativo entre a força necessária para romper o material sem solda e após a soldagem.

Todos os corpos de prova foram seccionados e analisados a sua interface de solda, aqueles que apresentaram perfeita ligação, ou seja, os que não apresentaram falta de fusão foram considerados aptos ao ensaio. Foram ensaiados três corpos de prova sem solda de modo a determinar a força média necessária para romper o material, posteriormente realizou-se a soldagem de três corpos de prova e para cada condição determinou-se a força média necessária para rompê-los encontrando assim a capacidade de carga da solda. A Figura 38 mostra o desenho esquemático dos corpos de prova que foram utilizados para o ensaio de tração. Os corpos de prova possuem um comprimento de 120 mm e foi feito um rebaixo na região central dos mesmos de modo que, os materiais rompessem próximos ou na interface de solda.

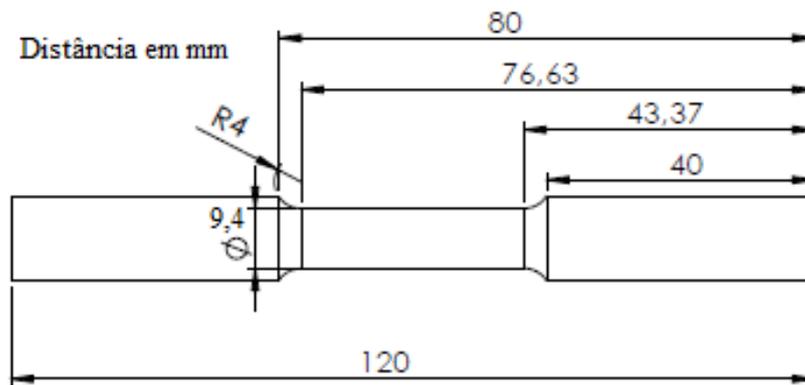


Figura 38 – Corpos de prova para ensaio de tração

Para o corpo de prova 21 na soldagem similar do aço ASTM 1045 conforme a Figura 39, a capacidade da solda foi de 67,38 %.

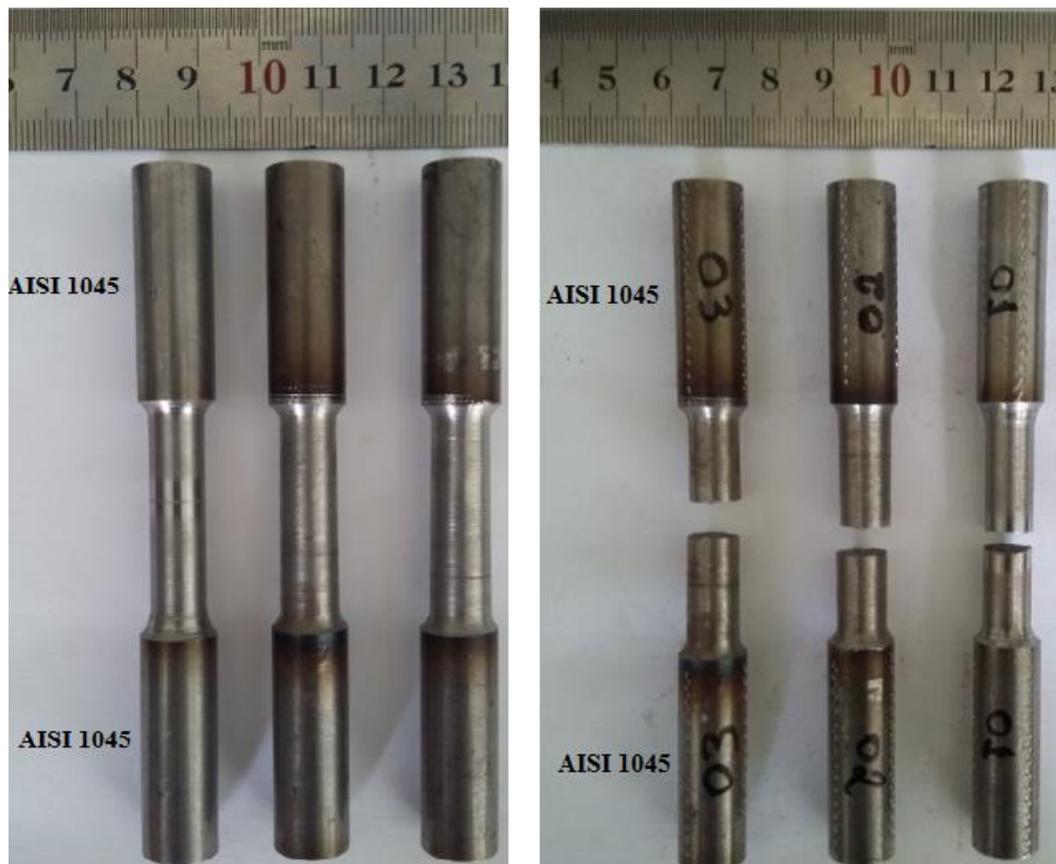


Figura 39 – Corpo de prova 21; 3-1-3. Soldagem similar do aço ASTM 1045 e ensaio de tração

Limite de resistência a tração do material: $T = 891,52 \text{ MPa}$

Limite de resistência da solda: $T = 600,75 \text{ MPa}$

Capacidade de carga da solda: $C = 67,38 \%$

Os aços ASTM 1045 apresentam limite de escoamento acima de 310 MPa e a solda para esta condição suportou uma tensão de 600,75 MPa, ou seja a capacidade de carga da solda foi maior que a limite de escoamento do material, fato este que mostra que a solda está aprovada, pois suportou uma tensão de 48,39 % maior que o limite de escoamento do material sem solda.

Para o corpo de prova 22 na soldagem similar do aço ASTM 1045, conforme figura 40, a capacidade da solda foi de 89,94 %.



Figura 40 – Corpo de prova 22; 3-2-1. Soldagem similar do aço ASTM 1045 e ensaio de tração

Limite de resistência a tração do material: $T = 891,52 \text{ MPa}$

Limite de resistência da solda: $T = 801,87 \text{ MPa}$

Capacidade de carga da solda: $C = 89,94 \%$

Para o corpo de prova 22 a capacidade de carga da solda foi de 801,87 MPa, ou seja a capacidade de carga da solda foi maior que a limite de escoamento do material, fato este que mostra que a solda é de boa qualidade e está aprovada, pois suportou uma tensão 61,34% maior que o limite de escoamento do material sem solda.

Para o corpo de prova 25 na soldagem similar do aço ASTM 1045, conforme Figura 41, a capacidade da solda foi de 84,62 %.



Figura 41 – Corpo de prova 25; 3-3-1. Soldagem similar do aço ASTM 1045 e ensaio de tração

Limite de resistência a tração do material: $T = 891,52 \text{ MPa}$

Limite de resistência da solda: $T = 754,36 \text{ MPa}$

Capacidade de carga da solda: $C = 84,62 \%$

Para o corpo de prova 25 a capacidade de carga da solda foi de 754,36 MPa, ou seja a capacidade de carga da solda foi maior que a limite de escoamento do material, fato este que mostra que a solda é de boa qualidade e está aprovada, pois suportou uma tensão 58,90 % maior que o limite de escoamento do material sem solda.

Para o corpo de prova 26 na soldagem similar do aço ASTM 1045, conforme Figura 42, a capacidade da solda foi de 71,35 %.



Figura 42 – Corpo de prova 26; 3-3-2. Soldagem similar do aço ASTM 1045 e ensaio de tração

Limite de resistência a tração do material: $T = 891,52 \text{ MPa}$

Limite de resistência da solda: $T = 636,09 \text{ MPa}$

Capacidade de carga da solda: $C = 71,35 \%$

Para o corpo de prova 26 a capacidade de carga da solda foi de 636,09 MPa, ou seja a capacidade de carga da solda foi maior que a limite de escoamento do material, fato este que mostra que a solda é de boa qualidade e está aprovada, pois suportou uma tensão 51,26 % maior que o limite de escoamento do material sem solda.

Para o corpo de prova 18 na soldagem similar do aço AISI 304, conforme figura 43, a capacidade da solda foi de 44,39 %.

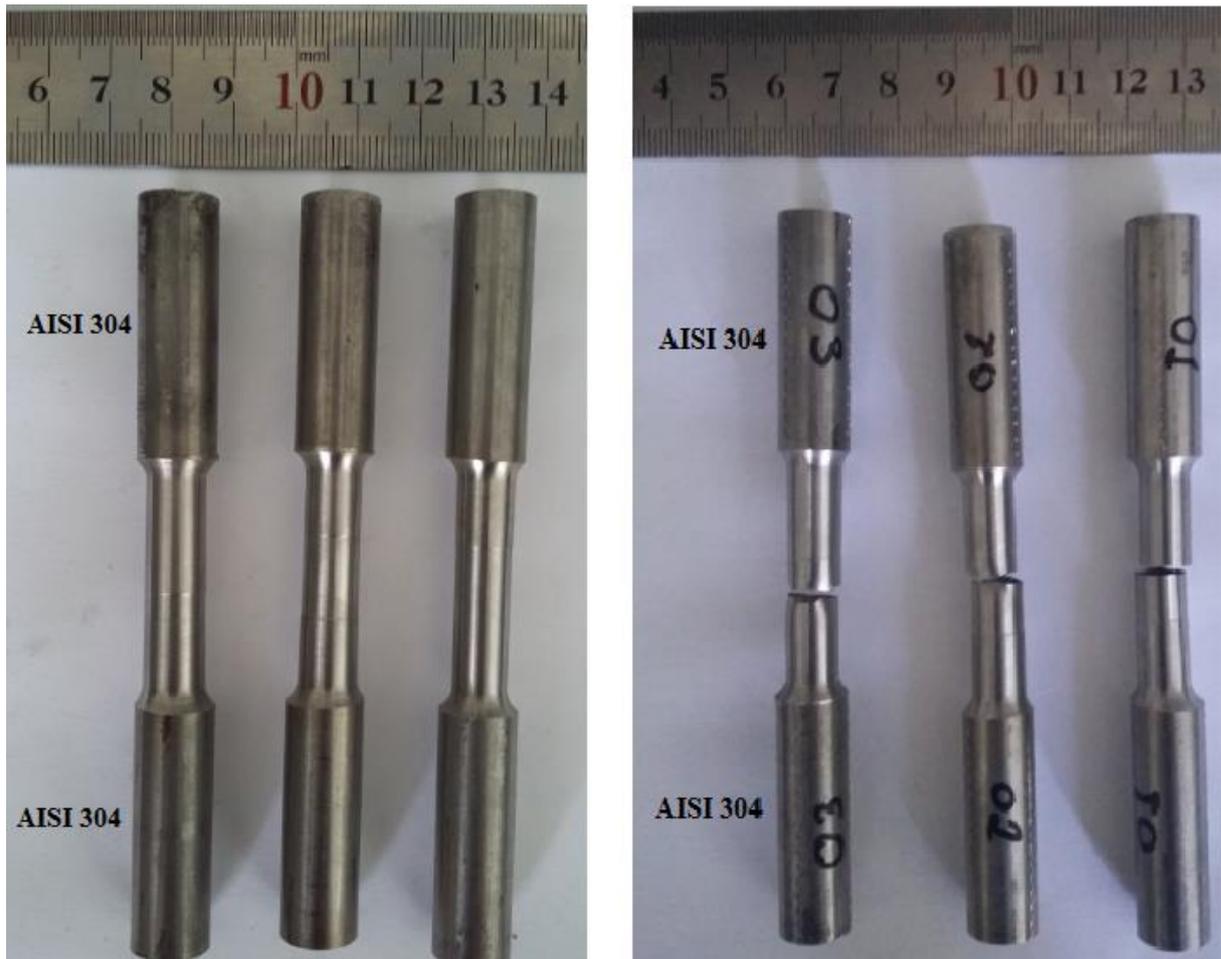


Figura 43 – Corpo de prova 18; 2-3-3. Soldagem similar do aço AISI 304 e ensaio de tração

Limite de resistência a tração do material: $T = 743,34 \text{ MPa}$

Limite de resistência da solda: $T = 330 \text{ MPa}$

Capacidade de carga da solda: $C = 44,39 \%$

Os aços AISI 304 apresentam limite de escoamento acima de 220 MPa e a solda para esta condição suportou uma tensão de 330 MPa, ou seja a capacidade de carga da solda foi maior que a limite de escoamento do material, fato este que mostra que a solda é de boa qualidade, pois suportou uma tensão 33,34 % maior que o limite de escoamento do material sem solda.

Para o corpo de prova 23 na soldagem similar do aço AISI 304, conforme figura 44, a capacidade da solda foi de 39,34 %.



Figura 44 – Corpo de prova 23; 3-2-2. Soldagem similar do aço AISI 304 e ensaio de tração

Limite de resistência a tração do material: $T = 743,34 \text{ MPa}$

Limite de resistência da solda: $T = 296,84 \text{ MPa}$

Capacidade de carga da solda: $C = 39,34 \%$

Na soldagem similar dos aços inox percebe-se uma queda na capacidade de carga da solda. O Cr e o Ni que são elementos constituintes desse material possuem elevados pontos de fusão e como o FW apresenta temperaturas de trabalho bem abaixo do ponto de fusão desses elementos, torna-se necessário um tempo de atrito maior para a soldagem desses materiais, pois com um tempo maior de trabalho tem-se uma maior geração de energia, conseqüentemente aumenta-se a temperatura e a pressão de trabalho, obtendo-se assim, uma interface de solda com melhores propriedades mecânicas. Para o corpo de prova 23 a capacidade de carga da solda foi de 296,84 MPa, ou seja a capacidade de carga da solda foi maior que a limite de escoamento do material, fato este que mostra que a solda é de boa qualidade, pois suportou uma tensão de 25,88 % maior que o limite de escoamento do material sem solda.

Para o corpo de prova 07 na soldagem dissimilar do aço ASTM 1045 x AISI 304, conforme Figura 45, a capacidade da solda foi de 51,34 %.



Figura 45 – Corpo de prova 07; 1-3-3. Soldagem dissimilar do aço AISI 304 x ASTM 1045 e ensaio de tração

Limite de resistência a tração do material: $T = 743,34 \text{ MPa}$

Limite de resistência da solda: $T = 381,66 \text{ MPa}$

Capacidade de carga da solda: $C = 51,34 \%$

Nesta condição a capacidade de carga da solda foi de 381,66 MPa ou seja a capacidade de carga da solda foi maior que a limite de escoamento do material que possui menor resistência (inox) fato este que mostra que a solda é de boa qualidade, pois suportou uma tensão 42,35 % maior que o limite de escoamento do material sem solda.

Para o corpo de prova 07 na soldagem dissimilar do aço ASTM A 36 x AISI 304, conforme figura 46, a capacidade da solda foi de 66,10 %.



Figura 46 – Corpo de prova 07; 1-3-3. Soldagem dissimilar do aço AISI 304 x ASTM A 36 e ensaio de tração

Limite de resistência a tração do material: $T = 491,82 \text{ MPa}$

Limite de resistência da solda: $T = 325,11 \text{ MPa}$

Capacidade de carga da solda: $C = 66,10\%$

Nesta condição a capacidade de carga da solda foi de 325,11 MPa, ou seja, a capacidade de carga da solda foi maior que a limite de escoamento do aço ASTM A 36 fato este que mostra que a solda é de boa qualidade e está aprovada, pois suportou uma tensão 23,10 % maior que o limite de escoamento do material sem solda.

Pelas análises dos resultados obtidos nos ensaio de tração, a aceitação das soldas dependerá dos tipos de solicitações em que forem submetidas como por exemplo, a cargas estáticas, de estanqueidade e equipamento que não façam uso de cargas dinâmicas e quando a carga a que elas forem submetidas for menor que o limite de resistência da solda, ela será considerada aprovada e poderá ser utilizada sem nenhum problema.

5 – Conclusões

Este estudo mostra as melhores configurações de parâmetros para a soldagem por atrito de materiais similares e dissimilares utilizados.

- Para os mesmos parâmetros adotados, o aço carbono apresentou uma deformação maior em relação ao inox. Isso se deve ao fato do Cr aumentar a resistência do aço em altas temperaturas e o inox austenítico possuir baixo limite de escoamento e menor condutividade térmica;
- A condição em que se teve o maior diâmetro da rebarba para soldagem similar foi do aço ASTM 1045 do corpo de prova 18; 2-3-3 com 19,69 mm;
- A condição em que se teve a maior espessura da rebarba para soldagem similar foi do aço ASTM 1045 do corpo de prova 09; 1-3-3 com 7,55 mm;
- Para a soldagem dos materiais dissimilares, a condição que apresentou o maior diâmetro da rebarba foi do aço ASTM A 36 x AISI 304 do corpo de prova 18; 2-3-3 com 19,70 mm;
- A condição que apresentou a maior espessura da rebarba para a soldagem dissimilar foi do aço ASTM A 36 x AISI 304 do corpo de prova 27; 3-3-3 com 7,33 mm;
- A utilização do MEV e EDS permite verificar com distinção a posição de mudança do material;
- O melhor parâmetro encontrado com maior resistência a tração para a soldagem de materiais similares foi do aço ASTM 1045 corpo de prova 22; 3-2-1 que teve uma capacidade de carga de 89,94 % em relação ao material não soldado, ou seja, com maior rotação, pressão média e menor tempo;
- O melhor parâmetro encontrado com maior resistência a tração para a soldagem de materiais dissimilares foi do aço AISI 304 x ASTM A 36 do corpo de prova 07; 1-3-3 que teve uma capacidade de solda de 66,10 % em relação ao material não soldado, ou seja, menor rotação, maior pressão e maior tempo.

5.1 – Sugestões para trabalhos futuros

No decorrer do trabalho, percebeu-se que algumas variáveis e outras análises poderiam ser feitas, de modo a complementar o estudo da soldagem por atrito e o estado da arte. Logo, para trabalhos futuros sugere-se:

- 1 - Variar o tempo e a pressão no instante do forjamento para os parâmetros utilizados;
- 2 - Estudar com mais detalhes a influência do mecanismo de ligação para a maior rotação de trabalho dos materiais em estudo;
- 3 - Analisar a influência da variação do tempo e pressão de forjamento na resistência mecânica da junta soldada;
- 4 - Analisar a soldagem de outros materiais com diâmetros maiores utilizando os mesmos parâmetros e verificar seu desempenho mecânico.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2002. 40 p.

ALVES, Eder Paduan. **Junções de Materiais Dissimilares Utilizando o Processo de Soldagem Por Fricção Rotativa**. 2010. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

ANDRADE, Leandro Vanz de. **Projeto e construção de máquinas de solda por atrito e análise de soldas dissimilares**. 2011. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

AVETTAND-FÈNOËL, M.-N. et al. Microstructural characterization and mechanical performance of an AA2024 aluminium alloy—Pure copper joint obtained by linear friction welding. **Materials & Design**, v. 98, p. 305-318, 2016.

AZEVEDO, Alessandra Góis Luciano de. **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045**. 2002. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BADDOO, N. R. Stainless steel in construction: a review of research, applications, challenges and opportunities. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, n. 11, p. 1199-1206, 2008.

BAFFARI, D. et al. Friction based solid state welding techniques for transportation industry applications. **Procedia CIRP**, v. 18, p. 162-167, 2014.

BAKKER, Otto Jan et al. Linear Friction weld process monitoring of fixture cassette deformations using empirical mode decomposition. **Mechanical Systems and Signal Processing**. V.62, p. 395 – 414.

BARBEDO, Nancy Del Ducca. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

BHAMJI, Imran et al. Linear Friction Welding of AISI 316 L Stainless Steel. **Materials Science and Engineering: A**, V.528, n.2, p. 680 – 690, 2010.

BOUARROUDJ, El-oualid et al. Thermal Analysis during a Rotational Friction Welding. **Applied Thermal Engineering**, v. 110, p. 1543-1553, 2017.

BUFFA, Gianluca et al. Weld quality prediction in linear friction welding of AA6082-T6 through an integrated numerical tool. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 231, p. 389-396, 2016.

CARBÓ, Eng Héctor Mario. "Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações." (2008). 29 p. Acesita.

CHANDER, G. Subhash; REDDY, G. Madhusudhan; RAO, A. Venugopal. Influence of rotational speed on microstructure and mechanical properties of dissimilar metal AISI 304-AISI 4140 continuous drive friction welds. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 19, n. 10, p. 64-73, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. Aço e Ferros Fundidos. São Paulo: **ABM–Associação Brasileira de Metais**, p. 321-358, 1982.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. In: **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª Edição. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1994. 652p.

DEOILERS, Brecken; LUPIAN, Neri; RUMPH, Regan. Welding Procedure Qualification of A36 Steel Plates Using the GTAW and GMAW Processes. **Materials Engineering**, p. 33, 2016.

DYE, D.; HUNZIKER, O.; REED, R. C. Numerical analysis of the weldability of superalloys. **Acta Materialia**, v. 49, n. 4, p. 683-697, 2001.

ELMER, J. W. et al. Direct observations of austenite, bainite, and martensite formation during arc welding of 1045 steel using time-resolved X-ray diffraction. **Welding Journal**, v. 83, n. 9, p. 244, 2004.

FEHER, A. **Desenvolvimento de procedimento utilizando processo de soldagem plasma para confecção de sementes de ¹²⁵I**. 2006. 107 p. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

FERRAZ, Henrique. O aço na construção civil. **Revista eletrônica de ciências**. São Paulo, n. 22, 2003.

FORTES, Cleber; ARAÚJO, W. Metalurgia da soldagem. **Apostila ESAB**, São Paulo, 2004. 48p.

GUO, Wei et al. Microstructure and mechanical properties of dissimilar inertia friction welding of 7A04 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, 2016.

HANDBOOK, A. S. M. Volume 6: Welding, Brazing and Soldering. **ASM International**, v. 2603, 1993.

HASS, A. R. **Análise da influência dos parâmetros de operação sobre a geometria do cordão de solda obtido pelo processo de soldagem por eletrodo tubular**. 2010. 26p. Monografia. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, porto Alegre.

HATAYAMA, Hiroki et al. **Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics**. Environmental science & technology, v. 44, n. 16, p. 6457-6463, 2010.

HAUPT, William. **Ensaio Mecânicos e caracterização microestrutural de tubos soldados por fricção**. 2013. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- ILZARBE, Laura et al. Practical applications of design of experiments in the field of engineering: a bibliographical review. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, n. 4, p. 417-428, 2008.
- ISHIDA, K. et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded lap joints of commercially pure titanium and 304 stainless steel. **Journal of alloys and compounds**, v. 630, p. 172-177, 2015.
- JAFARZADEGAN, M. et al. Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel. **Materials Characterization**, v. 74, p. 28-41, 2012.
- JAMES, J. A; SUDHISH, R. Study on Effect of Interlayer in Friction Welding for Dissimilar Steels: SS 304 and AISI 1040. **Procedia Technology**, v. 25, p. 1191-1198, 2016.
- JI, Shu-de et al. 3D numerical analysis of material flow behavior and flash formation of 45# steel in continuous drive friction welding. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 22, p. s528-s533, 2012.
- KIMURA, M. et al. Effect of friction welding condition on joining phenomena, tensile strength, and bend ductility of friction welded joint between pure aluminium and AISI 304 stainless steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 116-125, 2017.
- KUHN, D. Richard; REILLY, Michael J. An investigation of the applicability of design of experiments to software testing. In: **Software Engineering Workshop, 2002. Proceedings. 27th Annual NASA Goddard/IEEE**. IEEE, 2002. p. 91-95.
- KURT, A.; UYGUR, I.; PAYLASAN, U. Effect of friction welding parameters on mechanical and microstructural properties of dissimilar AISI 1010-ASTM B22 joints. **Welding journal**, v. 90, n. 5, p. 102-106, 2011.
- LIANG, Zhida et al. Continuous drive friction welding of 5A33 Al alloy to AZ31B Mg alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 153-162, 2017.
- LÓPEZ, Facundo Sebastián. **Montagem e Avaliação de Uma Máquina de Solda Por Fricção**. 2010. 63 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica, e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MAALEKIAN, M. et al. Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars. **Acta Materialia**, v. 56, n. 12, p. 2843-2855, 2008.
- MA, Hong et al. Effect of post-weld heat treatment on friction welded joint of carbon steel to stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 227, p. 24-33, 2016.
- MAGALHÃES, Sítonio Gomes de. **Avaliação do revestimento a base de liga de níquel em aço estrutural, empregando o metal de adição ERNiCrMo-3 através da soldagem MIG/MAG**. 2008. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de materiais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- MANDENIUS, Carl-Fredrik; BRUNDIN, Anders. Bioprocess optimization using design-of-experiments methodology. **Biotechnology progress**, v. 24, n. 6, p. 1191-1203, 2008.

MARQUES, Paulo Villani.; MODENESI, Paulo José.; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3ª Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 363 p.

MATTEI, Fabiano. **Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção**. 2011. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MatWeb – **Material Property Data**. Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 23 Ago 2016.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo Villani. Soldagem I **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte, 2000. 54p.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo Horizonte: UFMG– Universidade Federal de Minas Gerais, v. 26, 2011. 27p.

MEINHARDT, Cristian Pohl. **Caracterização microestrutural de solda por fricção em aço inoxidável austenítico (UNS S31673) e aço inoxidável dúplex (UNS S31803)**. 2013. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica, e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MESHARAM, S. D.; MOHANDAS, T.; REDDY, G. Madhusudhan. Friction welding of dissimilar pure metals. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 184, n. 1, p. 330-337, 2007.

MITELEA, Ion; BUDĂU, Victor; CRĂCIUNESCU, Corneliu. Dissimilar friction welding of induction surface-hardened steels and thermochemically treated steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 9, p. 1892-1899, 2012.

MURALIMOHAN, C.H. et al. Properties of Friction welding titanium – stainless steel joints with a nickel interlayer. **Procedia Materials Science**, v.5, p. 1120 – 1129, 2014.

ÖZDEMİR, N. Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. **Materials letters**, v. 59, n. 19, p. 2504-2509, 2005.

PAVENTHAN, R.; LAKSHMINARAYANAN, P. R.; BALASUBRAMANIAN, V. Optimization of friction welding process parameters for joining carbon steel and stainless steel. **Journal of iron and steel research, international**, v. 19, n. 1, p. 66-71, 2012.

PRASANTHI, T. N. et al. Friction welding of mild steel and titanium: optimization of process parameters and evolution of interface microstructure. **Materials & Design**, v. 88, p. 58-68, 2015.

PIRES, Raphael Rezende. **Efeitos da geometria, da força axial e da rotação no reparo por atrito**. 2007. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia.

RATKOVIĆ, Nada et al. Micro-structure in the Joint Friction Plane in Friction Welding of Dissimilar Steels. **Procedia Engineering**, v. 149, p. 414-420, 2016

RODRIGUES, Emanuel Rezende. **Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do Aço ASTM A-36**. 2010. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus de Curitiba, Curitiba.

ROMBAUT, Pieter; DE WAELE, Wim; FAES, Koenraad. Friction welding of steel to ceramic. In: **Sustainable Construction and Design 2011 (SCAD)**. Ghent University, Laboratory Soete, 2011. p. 448-457.

SAHIN, Ahmet Z. et al. Analysis of the Friction welding process in relation to the welding of copper and steel bars. **Journal of Materials Processing Technology**, v.82.n.1,p.127-136, 1998.

SATYANARAYANA, V. V.; REDDY, G. Madhusudhan; MOHANDAS, T. Dissimilar metal friction welding of austenitic–ferritic stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 160, n. 2, p. 128-137, 2005.

SELVAMANI, S. T.; PALANIKUMAR, K. Optimizing the friction welding parameters to attain maximum tensile strength in AISI 1035 grade carbon steel rods. **Measurement**, v. 53, p. 10-21, 2014.

SHANJEEVI, C.; KUMAR, S. Satish; SATHIYA, P. Evaluation of mechanical and metallurgical properties of dissimilar materials by friction welding. **Procedia Engineering**, v. 64, p. 1514-1523, 2013.

SINGH, Rupinder et al. Friction welding of dissimilar plastic/polymer materials with metal powder reinforcement for engineering applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 101, p. 77-86, 2016.

TABAN, Emel; GOULD, Jerry E.; LIPPOLD, John C. Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization. **Materials & design**, v. 31, n. 5, p. 2305-2311, 2010.

UZKUT, Mehmet *et al.* **Friction Welding And Its Applications In Today's World**. 2010. 15 p.

VALERIANO, Lívio de Carvalho. **Influência da Precipitação de Fases Secundárias na Resistência à Corrosão do Aço Inoxidável Super Duplex UNS S32520**. 2012. Pág. 82p. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

VILLARES METALS. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Construcao-Mecanica/Acos-Carbono/VT45>>. Acesso em: 21 Dez. 2015

WAINER, Emílio.; BRANDI, Sérgio Duarte.; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 9ª reimpressão - 2013. São Paulo: Edgard BlucherLtda, 1992. 494 p.

WANG, X. Y. et al. Characterisation studies of linear friction welded titanium joints. **Materials & Design**, v. 116, p. 115-126, 2017.

WINICZENKO, Radosław; KACZOROWSKI, Mieczysław. Friction welding of ductile cast iron using interlayers. **Materials & Design**, v. 34, p. 444-451, 2012.

ANEXO A – Soldagem similar do aço ASTM 1045



Figura A1 - Corpo de prova do N° 01 ao 09.



Figura A2 - Corpo de prova do N° 10 ao 18.



Figura A3 - Corpo de prova do N° 19 ao 27.

ANEXO B – Soldagem similar do aço AISI 304



Figura B1 - Corpo de prova do N° 01 ao 09.



Figura B2 - Corpo de prova do N° 10 ao 18.



Figura B3 - Corpo de prova do N°19 ao 27.

ANEXO C – Soldagem dissimilar do aço ASTM 1045 x AISI 304



Figura C1 - Corpo de prova do N° 01 ao 09.



Figura C2 - Corpo de prova do N°10 ao 18.



Figura C3 - Corpo de prova do N°19 ao 27.

ANEXO D – Soldagem dissimilar do aço ASTM A 36 x AISI 304



Figura D1 - Corpo de prova do N° 01 ao 09.



Figura D2 - Corpo de prova do N° 10 ao 18.



Figura D3 - Corpo de prova do N° 19 ao 27.