

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais

PPGE3M

SUBSTITUIÇÃO DA SOLDAGEM MAG POR SOLDAGEM POR FRICÇÃO EM
TUBOS HIDRÁULICOS

Jeferson André Sbalchiero

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

Porto Alegre
2016

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais

PPGE3M

SUBSTITUIÇÃO DA SOLDAGEM MAG POR SOLDAGEM POR FRICÇÃO EM
TUBOS HIDRÁULICOS

JEFERSON ANDRÉ SBALCHIERO
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2016

Esta Dissertação foi julgada e adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, PPGEM/UFRGS

Prof. Dr.
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a minha esposa pelo amor e
carinho incondicionais

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker pela oportunidade, apoio e incentivo a este trabalho.

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	1
2.0	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Definição de soldagem.....	3
2.2	Soldabilidade dos aços	4
2.3	Soldagem por fusão	6
2.3.1	Soldagem por eletrodo revestido	7
2.3.2	Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas).....	7
2.3.3	Soldagem MIG/MAG.....	7
2.3.4	Limitações da soldagem MIG-MAG (ESAB, 2005)	9
2.4	Soldagem por deformação ou pressão	12
2.4.1	Solda por fricção	12
2.4.2	Parâmetros de soldagem e sua influência na morfologia das soldas	17
2.4.3	Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção. 20	
3.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.1	Projeto.....	23
3.2	Análise dos Materiais	24
3.3	Análise dimensional	25
3.4	Processo de soldagem.....	27
3.4.1	Equipamentos utilizados	28
3.4.2	Etapas do processo	29
3.4.3	Testes no processo.....	32
3.4.4	Normas utilizadas para avaliação da junta soldada	36
3.4.5	Corpos de prova	36
3.4.6	Ensaio Mecânicos:	37
3.4.7	Ensaio Metalográficos:.....	41
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	Ensaio de Tração:	43
4.2	Ensaio de Dobramento	45

4.3	Ensaio de Microdurezas Vickers (HV):.....	47
4.4	Caracterização macrográfica das Juntas Soldadas:	49
4.5	Caracterização micrográfica das Juntas Soldadas:	50
4.5.1	Solda MAG:.....	50
4.5.2	Solda por fricção:.....	54
4.6	Ensaio Hidrostático	58
4.7	Análise de custos	59
4.8	Considerações Finais.....	63
5.0	CONCLUSÕES	65
6.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
7.0	APÊNDICES	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Conjunto camisa de cilindro hidráulico soldado nos processos MAG e fricção.....	2
Figura 2-1 Teoria da ligação no processo de soldagem (MODENESI e MARQUES, 2006), (UFMG, 2006), (RAMALHO, 2009)	3
Figura 2-2 Soldabilidade dos aços em função do CE, adaptado de (LIU e INDACOCHEA, J. E., 1993)	5
Figura 2-3 Variação da solubilidade do hidrogênio com a temperatura em um metal de solda típico.	6
Figura 2-4 Modelo de soldagem por fusão (UFMG, 2006)	6
Figura 2-5 Soldagem a arco elétrico a) por eletrodo revestido b) TIG (Tungstênio inerte gás) c) MIG/MAG (Metal inerte gás ou metal ativo gás) (ESAB, 2005). 8	
Figura 2-6 Descontinuidades comuns na soldagem por fusão (ESAB, 2005).....	10
Figura 2-7 Nomenclatura de soldagem por fusão (Mecatronica, 2008).....	10
Figura 2-8 Zona Termicamente Afetada para diferentes processos (Mecatronica, 2008).....	11
Figura 2-9 Modelo de soldagem por pressão (RAMALHO, 2009).....	12
Figura 2-10 Processo de solda por fricção (FUSION, 2009).	13
Figura 2-11 Principais variações de posição das soldas por fricção adaptado de (DE FARIA e BACARENSE, 2003)	13
Figura 2-12 Sistema de solda a fricção por inércia (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).	15
Figura 2-13 Sistema de solda a fricção com acionamento direto (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).	16
Figura 2-14 Soldagem por fricção com acionamento direto (ASM Metals Handbook, 1993).....	16

Figura 2-15 Influência da energia, força axial e velocidade na morfologia da solda.	20
Figura 3-1 Projeto das juntas do conjunto soldado a) junta do flange - MAG b) Junta do fundo- MAG c) Junta do fundo- fricção d) Junta do flange- fricção.	23
Figura 3-2 Projeto dos componentes e do conjunto	24
Figura 3-3 Perfil de usinagem dos componentes	26
Figura 3-4 Perfil do fundo usinado para soldagem MAG e fricção	26
Figura 3-5 Perfil do flange usinado para soldagem MAG e fricção	27
Figura 3-6 Geometrias utilizadas na soldagem por fricção dos tubos a) sem chanfro b) chanfro de 60°.....	27
Figura 3-7 Máquina de soldagem por fricção Thompson - 125 toneladas.....	28
Figura 3-8 Soldagem MAG entre o fundo e o tubo a) Solda ponto b) Solda fechamento horizontal.....	29
Figura 3-9 Soldagem MAG entre o flange e o tubo a) Solda ponto b) Solda fechamento a 45°.....	29
Figura 3-10 Perfil do raio de solda utilizado nas peças soldadas com MAG	30
Figura 3-11 a) Posição plana para o fundo b) Posição horizontal em ângulo para o flange	31
Figura 3-12 Disposição das peças na solda por fricção a) Flange e tubo b) Fundo e tubo	32
Figura 3-13 Análise macrográfica do cordão de solda durante os testes da solda do fundo	32
Figura 3-14 Soldagem por fricção entre o tubo e o fundo	35
Figura 3-15 Soldagem por fricção entre o tubo e o flange	36
Figura 3-16 Localização da retirada dos corpos de prova para ensaio de tração e dobramento	37

Figura 3-17 Geometria dos corpos de prova para ensaio de tração e dobramento	37
Figura 3-18 Posicionamento e fixação do corpo de prova no ensaio de Tração..	38
Figura 3-19 Posicionamento dos corpos de prova para o ensaio de dobramento	39
Figura 3-20 Conjuntos soldados pelo processo a) MAG e b) Fricção	40
Figura 3-21 Dispositivos e peças utilizadas para o ensaio hidrostático.....	40
Figura 3-22 Sistema montado para o ensaio hidrostático	41
Figura 4-1 Ensaio de tração para os conjuntos soldados no processo MAG	44
Figura 4-2 Ensaio de tração para os conjuntos soldados no processo Fricção....	44
Figura 4-3 Ensaio de dobramento para os conjuntos soldados no processo MAG	46
Figura 4-4 Ensaio de dobramento para os conjuntos soldados no processo fricção	46
Figura 4-5 Perfil de microdureza Vickers para o processo MAG.....	47
Figura 4-6 Regiões do perfil de solda MAG.....	47
Figura 4-7 Perfil de microdureza Vickers para o processo fricção	48
Figura 4-8 Regiões do perfil de solda fricção	48
Figura 4-9 Macrografia da junta fundo e tubo nos processos a) MAG e b) fricção	49
Figura 4-10 Macrografia da junta flange e tubo nos processos c) MAG e d) fricção	49
Figura 4-11 Micrografia do material base do fundo composta de ferrita (F) e perlita (P) com tamanho de grão entre 7-8 (ASTME112). Microestrutura não afetada pelo processamento da solda MAG; observa-se ainda bandeamento originário da laminação da barra. a) 60µm e b) 30µm.....	51

Figura 4-12 Micrografia da ZTA do fundo composta de ferrita poligonal (PF) e perlita (P) com redução do tamanho de grão ferrítico. Tamanho de grão entre 7 a 9 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.	51
Figura 4-13 Micrografia da zona de ligação entre fundo e o material de adição. Microestrutura é composta por perlita (P) e ferrita no contorno de grão (PF (G)). Tamanho de grão entre 5-6 (ASTME112). a) 60µm e b) 30µm.	52
Figura 4-14 Micrografia do material de adição. Estrutura epitaxial colunar do metal de solda solidificado, ferrita acicular (AF), ferrita de Widmanstatten (WF), ferrita no contorno de grão (PF (G)), agregado de carbonetos (FC) e perlita (P).	53
Figura 4-15 Micrografia da zona de ligação entre o tubo e o material de adição. Microestrutura formada perlita (P) e ferrita (F) com tamanho de grão entre 9-10 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.	53
Figura 4-16 Micrografia da ZTA do tubo composta de ferrita poligonal (PF) e perlita (P) com redução do tamanho de grão ferrítico. Tamanho de grão entre 9-11 (ASTM E112) a) 60µm e b) 30µm.	54
Figura 4-17 Micrografia do material base do tubo composto de ferrita (F) e perlita (P). Microestrutura não afetada pelo processamento da solda MAG; observa-se ainda forte alinhamento de grãos originário da laminação do tubo. Tamanho de grão entre 7-8 (ASTM E112) a) 60µm e b) 30µm.	54
Figura 4-18 Micrografia do material base do tubo, composta de ferrita (F) e perlita (P). Tamanho de grão entre 5-6 (ASTM E112). Microestrutura não afetada pelo processamento da solda fricção. a) 60µm e b) 30µm.	55
Figura 4-19 Micrografia da ZTA do fundo composta de ferrita (F) e perlita (P). Tamanho de grão entre 8-9 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.	55

Figura 4-20 Micrografia da ZMTA do fundo composta de ferrita no contorno de grão (PF (G)) e perlita (P). Tamanho de grão entre 7-8 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.....	56
Figura 4-21 Micrografia da interface de soldagem entre o fundo e o tubo. Microestrutura é formada por ferrita (F) e perlita (P). Tamanho de grão entre 8-9 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.....	56
Figura 4-22 Micrografia da ZTMA do tubo composta de ferrita no contorno de grão (PF (G)) e perlita (P). Tamanho de grão entre 8-9 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.....	57
Figura 4-23 Micrografia da ZTA do tubo composta de ferrita poligonal (PF) e perlita (P). Tamanho de grão entre 8-12 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.....	57
Figura 4-24 Micrografia do material base do tubo composto de ferrita (F) e perlita (P). Tamanho de grão entre 5-6 (ASTM E112). Microestrutura não afetada pelo processamento da solda fricção; observa-se ainda forte alinhamento dos grãos originário da laminação do tubo. a) 60µm e b) 30µm.....	58
Figura 4-25 Ensaio hidrostático para os conjuntos soldados no processo MAG..	58
Figura 4-26 Local do dano na vedação para o conjunto soldado no processo MAG	59
Figura 4-27 Ensaio hidrostático para os conjuntos soldados no processo Fricção	59
Figura 4-28 Local do dano na vedação para os conjuntos soldados no processo Fricção	59
Figura 4-29 Tempos de processo para a solda do flange e fundo (segundos) para os processos MAG e fricção.	61

Figura 4-30 a) Participação do investimento da solda MAG e fricção em relação ao total dos investimentos b) Redução de custo da matéria prima no conjunto camisa obtida com a substituição da solda MAG pela fricção..... 61

Figura 4-31 Redução de custo obtida pela substituição da solda MAG pela solda por fricção na solda do flange, do fundo e para o conjunto camisa. 62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 Aplicações e as normas reguladoras (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009) (MODENESI, 2009).....	11
Tabela 3-1 Composição Química dos componentes a serem soldados (% em peso).....	24
Tabela 3-2 Propriedades Mecânicas do material dos componentes.....	25
Tabela 3-3 Tabela de parâmetros utilizados e registrados durante a soldagem do fundo e flange.	34
Tabela 4-1 Ensaio de tração para os conjuntos soldados no processo MAG	43
Tabela 4-2 Ensaio de tração para os conjuntos soldados no processo Fricção...	44
Tabela 4-3 Ensaio de dobramento para os conjuntos soldados no processo MAG	45
Tabela 4-4 Ensaio de dobramento para os conjuntos soldados no processo Fricção	46
Tabela 4-5 Comparativo de tempos de processo (MAG x Fricção).....	60
Tabela 4-6 Investimentos para os processos MAG e solda por fricção.....	60
Tabela 7-1 Dados da soldagem por fricção entre tubo e fundo.....	69
Tabela 7-2 Dados da soldagem por fricção entre tubo e flange.....	70

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

AWS	<i>American Welding Society;</i>
IIW	<i>International Institute of Welding;</i>
kN	Quilonewton (1.000 N);
kW	Quilowatts;
mm/min.	milímetros por minuto;
MIG	<i>Metal Inert Gas;</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
mm	milímetros;
MPa	Megapascal;
N	medida de força em Newton;
Nm	Medida de torque em Newton vezes metro;
P	pressão;
rev./min.	Revoluções por min.;
rpm	rotações por minuto;
ZTA	Zona termicamente afetada pelo Calor;
MA	Material de adição
ZTMA	Zona termo mecanicamente afetada;

ZL	Zona de ligação;
MS	Metal de solda;
TIG	Soldagem Tungstênio Inerte Gás;
MAG	Metal Ativo Gás
<i>r</i>	<i>Raio;</i>
<i>R</i>	<i>Rotação do processo de soldagem;</i>
π 3,1415926	número constante com o valor aproximado de
W	Potência para soldagem
T	Torque adquirido no processo
P	Pressão aplicada
CE	Carbono equivalente

RESUMO

O desenvolvimento contínuo nos processos de soldagem que ocorre basicamente em função da necessidade crescente da demanda da indústria e das necessidades de redução de custo provenientes dos processos manuais convencionais, gera a demanda para estudos para aplicação do processo de soldagem por fricção.

O processo de soldagem por fricção, ainda pouco desenvolvido no Brasil, tem uma amplitude de aplicação cada vez maior quando são considerados os benefícios trazidos pelas reduções de custo potenciais, a confiabilidade no processo e o impacto ambiental.

Com esta abordagem foi desenvolvido este trabalho que tem como objetivo apresentar a vantagem técnica e econômica na substituição da soldagem MAG pela soldagem por fricção em tubos utilizados em cilindros hidráulicos. A comprovação técnica será demonstrada através de ensaios metalúrgicos e mecânicos assim como pela análise de comparativa de custos. Para este fim, foram montados vários cilindros hidráulicos de uma mesma aplicação em duas versões de processo de soldagem, MAG e fricção. Como o cilindro hidráulico analisado tem duas regiões de soldagem, fundo e flange, cada versão foi analisada para estas duas regiões Figura 1-1.

Na primeira versão manteve-se a soldagem MAG do tubo com o fundo, e do tubo com o flange, e na segunda versão a soldagem MAG foi substituída pela soldagem por fricção.

Os testes comparativos para as duas versões levaram em consideração o processo de soldagem e regiões afetadas pelo calor, sendo que para a avaliação destas regiões foram submetidas amostras aos ensaios de metalografia, dureza, dobramento, tração e teste hidrostático. A análise comparativa de custo foi realizada pelo método de custeio ABC que considera todas as etapas de processo.

Os resultados comparativos finais que resultaram em uma redução de custo de 12% para a solda por fricção, têm por finalidade prover informações para estudos de novas técnicas ou novas aplicações.

ABSTRACT

The continuous development of welding process due to the industry growing demand, plus the cost reduction needed coming from conventional manual processes, generates demands for friction welding's studies application.

The friction welding process still underdeveloped in Brazil has an increasing application when considering the cost reduction potential, process reliability and environmental impact.

With this approach the objective of this job is to present the economic and technical advantage to replace the MAG welding process by the friction welding process in pipes used for hydraulic cylinders.

The advantages will be showed through metallurgical, mechanical and product tests application.

To this end, an amount of hydraulic cylinders for the same application were assembled in two welding process versions.

The welding for those versions were made between the end cap and the tube. In the first version the MAG welding's process were applied and in the second version the MAG welding process was replaced by the friction welding process.

The comparative tests were conducted for both versions divided into two groups.

The first group relates to the welding evaluation, where the samples were subjected to metallographic, hardness, bending and strength tests. The second group refers to the evaluation of the product, i.e., the hydraulic cylinder where they were subjected to endurance and bursting tests. The final comparative data which resulted in a cost reduction of 12% for friction welding, have the purpose of providing information for new techniques and new applications studies.

1.0 INTRODUÇÃO

A soldagem por fricção é um processo de união de materiais no estado sólido e, por não ocorrer fusão no processo, apresenta inúmeras vantagens sobre os processos convencionais, proporcionando união de componentes de uma forma rápida, com qualidade superior e com a possibilidade de combinação de vários materiais.

A grande maioria dos cilindros hidráulicos, que são os componentes de estudo deste trabalho, são utilizados na produção de tratores e máquinas agrícolas. Estes componentes são normalmente soldados por processos convencionais de soldagem por arco voltaico, que constituem técnicas já consagradas. Dentre eles, os mais difundidos e usuais são aqueles que utilizam eletrodo revestido, assim como as soldas MIG/MAG (*Metal Inerte Gás ou Metal Ativo Gás*) e TIG (*Tungsten Inert Gas*).

As juntas soldadas por estas técnicas, porém, podem apresentar problemas de origem metalúrgica como inclusão de escória, fragilização por hidrogênio difusível, trincas de solidificação, porosidade no cordão de solda e formação de fases frágeis nas zonas termicamente afetadas (COGO, 2011). Além destes inconvenientes também podem colocar em risco o ambiente de trabalho pela formação de ambientes insalubres em função dos fumos de solda, riscos de explosões, exposição ao calor.

Por outro lado a soldagem por fricção, por se tratar de um processo realizado no estado sólido e envolver menores temperaturas de trabalho (temperaturas máximas tipicamente em torno de 1350°C), os problemas de um processo de fusão e o aparecimento de fases frágeis na zona termicamente afetada são minimizados (COGO, 2011). Com isso a redução de custos obtida com consumo de energia, fluxos de solda, metais de adição e gases, somadas a facilidade de operação, melhor controle dos parâmetros de processo, por ser menos poluente e mais econômico, torna a soldagem por fricção uma boa alternativa para melhoria nos processos industriais.

Com esta abordagem foi desenvolvido este trabalho que tem como objetivo apresentar a vantagem técnica e econômica na substituição da soldagem MAG pela soldagem por fricção em tubos utilizados em cilindros hidráulicos. Para a realização deste trabalho inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica dos conceitos de soldagem assim como das principais variantes do processo de fricção. Para validar a compatibilidade técnica da solda dos dois processos, foram realizados testes comparativos de resistência à tração, dobramento, metalografia, dureza e teste hidrostático.

A soldagem para ambos os processos foi realizada entre o tubo e o fundo (nome dado à contra peça, que faz o fechamento de uma das pontas do tubo que será utilizado no cilindro hidráulico), e tubo e flange Figura 1-1.

O comparativo de custos foi realizado utilizando o método de custeio ABC levando em consideração cada etapa do processo de soldagem assim como todos os insumos envolvidos nos mesmos.



Figura 1-1 Conjunto camisa de cilindro hidráulico soldado nos processos MAG e fricção

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição de soldagem

Processo de união que produz coalescência de materiais, aquecendo-os até a temperatura de soldagem, com ou sem aplicação de pressão ou somente por aplicação de pressão, com ou sem o uso de material de adição. (AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991) (Mecatronica, 2008).

Ou seja, o processo tem por objetivo assegurar a união dos materiais obtendo uma continuidade ou similaridade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas. (MODENESI e MARQUES, 2006).

A soldagem por fricção ocorre fundamentalmente pela aproximação das superfícies das peças, que em função de ser muito pequena acaba criando ligações químicas entre seus átomos. Estas ligações podem ser interrompidas pela interferência de camadas de óxidos, gorduras e outros contaminantes. Figura 2-1 (UFMG, 2006).

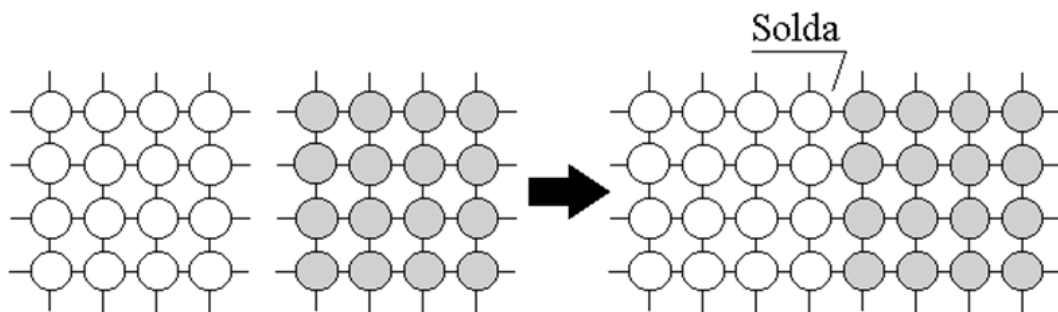


Figura 2-1 Teoria da ligação no processo de soldagem (MODENESI e MARQUES, 2006), (UFMG, 2006), (RAMALHO, 2009)

Esta dificuldade é superada pela formação de dois grandes grupos de soldagem: soldagem por fusão e deformação ou pressão (MODENESI e MARQUES, 2006).

2.2 Soldabilidade dos aços

Soldabilidade é um termo usado para se referir a capacidade de um material ser soldado sob uma condição de fabricação específica, com uma estrutura adequadamente projetada e que garanta um desempenho satisfatório para o serviço pretendido. (AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). As taxas de resfriamento relativas aos ciclos térmicos da soldagem podem produzir microestruturas como por exemplo, martensita que são susceptíveis a fratura frágil ou trincas induzidas por hidrogênio. O método mais utilizado para avaliar a possibilidade de formação destas microestruturas nos aços é através da fórmula do carbono equivalente (CE), (ENGINEERS, 2004).

O CE é uma relação empírica que considera os elementos que influenciam significativamente a soldabilidade dos aços num valor único. Também permite determinar a necessidade de aplicar um tratamento térmico antes ou após a soldagem. Uma das fórmulas desenvolvidas pelo International Institute of Welding (IIW, 2015), para o cálculo do CE de aços ao carbono e ligados é apresentado na equação (2.1).

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Si + \%Ni + \%Cu}{15} \quad (2.1)$$

O resultado da equação (2.1) é de interpretação prática. Os limites sobrepõem-se na literatura, mas em resumo, quando o material tem baixo valor de CE, geralmente, apresenta boa soldabilidade. Sendo o CE do material menor que 0,45% é pouco provável que ocorra uma trinca por solda e nenhum tratamento térmico é requerido. Com valores de CE entre 0,45e 0,60%, há probabilidade de trincas e um pré-aquecimento, na ordem dos 95 a 400 °C, faz-se necessário. Quando o CE é maior que 0,60%, a probabilidade é alta e tanto pré-aquecimento como tratamento pós solda deverão ser realizados para obter soldas com propriedades adequadas.

A Figura 2-2 apresenta a soldabilidade de várias famílias de aços como função do carbono equivalente. O número 1 indica a presença de Mo na liga; 2, Cr + Ni + Mo + Si, 3, Cr ou V ou Ni+Si (LIU e INDACOCHEA, J. E., 1993).

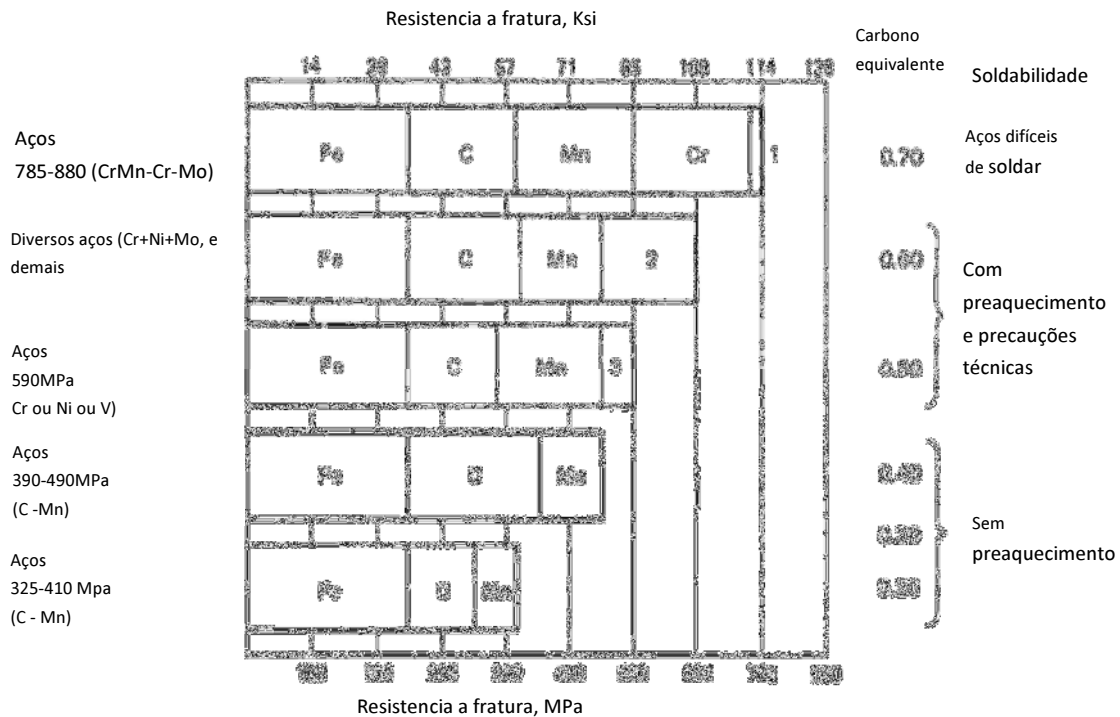


Figura 2-2 Soldabilidade dos aços em função do CE, adaptado de (LIU e INDACOCHEA, J. E., 1993)

As trincas induzidas por Hidrogênio (H), também conhecidas como trincas a frio, são defeitos formados pela contaminação da microestrutura da solda por este elemento. O Hidrogênio (H) dissocia-se dos lubrificantes orgânicos (salienta-se a importância da limpeza superficial), das moléculas d'água que, inevitavelmente, estão presentes na umidade do ar e no ambiente das soldas submersas. Deve ser salientado que a solubilidade do H é muito maior no aço fundido do que no estado sólido (MEYERS, 2002).

O ferro no estado líquido tem uma alta solubilidade para o hidrogênio. Ela diminui gradativamente a medida que a temperatura diminui e apresenta uma queda brusca quando o aço solidifica Figura 2-3. Quando a austenita (Fe- γ) resfria e se transforma em ferrita (Fe- α), a solubilidade cai bruscamente e continua a diminuir, alcançando níveis extremamente baixos na ferrita a temperatura ambiente. A temperatura ambiente, a solubilidade do hidrogênio na austenita é elevada, enquanto que é baixa na ferrita, (BUSCHINELLI, 2015).

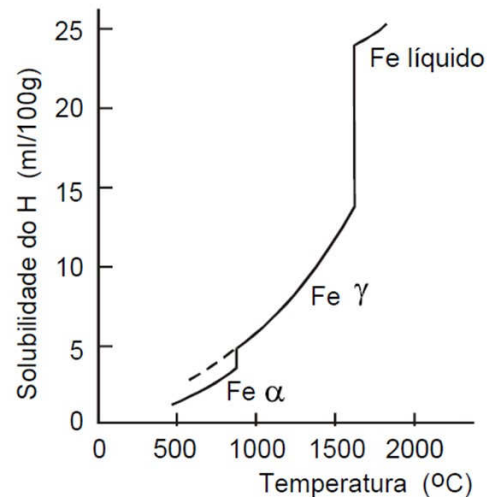


Figura 2-3 Variação da solubilidade do hidrogênio com a temperatura em um metal de solda típico.

Isto quer dizer que, um processo de solda onde os materiais não são fundidos, como é o caso da soldagem por fricção, a probabilidade de sucesso com a união dos componentes com valor comprometido de CE é maior.

2.3 Soldagem por fusão

O processo que ocorre quando a região soldada é aquecida até sua temperatura de fusão, destruindo as superfícies e produzindo a solda com a solidificação do material fundido (UFMG, 2006), como ilustrado na Figura 2-4.

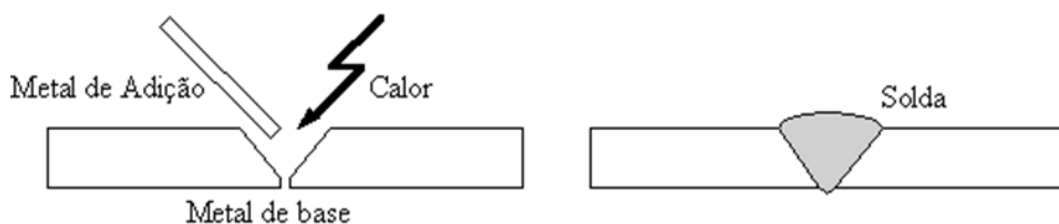


Figura 2-4 Modelo de soldagem por fusão (UFMG, 2006)

Os processos por fusão mais utilizados na indústria são os processos de soldagem a arco elétrico que dividem-se, basicamente, em soldagem MIG/MAG (*Metal Inerte Gás ou Metal Ativo Gás*) e a solda em que o eletrodo é a base de Tungstênio, sigla em inglês TIG (*Tungsten Inert Gas*).

2.3.1 Soldagem por eletrodo revestido

A união das peças é obtida através da fusão da alma metálica e do metal de base estabelecido por um eletrodo consumível durante a soldagem. O eletrodo é revestido de elementos facilitadores e estabilizadores na obtenção do arco elétrico além de elementos protetores para o cordão de solda (ESAB, 2005)

Figura 2-5 a).

2.3.2 Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas)

Caracterizado pela formação do arco elétrico através de um eletrodo não consumível sob uma atmosfera protetora de gases inertes como Argônio e Hélio, permitindo soldas autógenas ou com metal de adição (adicionado em separado, como uma vareta) levando a soldagem de juntas de alta qualidade em ligas especiais de solda (ESAB, 2005)

Figura 2-5 b).

2.3.3 Soldagem MIG/MAG

Soldagem por arco elétrico com gás de proteção. Trata-se de um processo de soldagem por arco elétrico entre a peça e o consumível em forma de arame, eletrodo não revestido, fornecido por um alimentador contínuo, realizando uma união de materiais metálicos pelo aquecimento e fusão. O arco elétrico funde de forma contínua o arame à medida que é alimentada a poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera por um fluxo de gás, ou mistura de gases, inerte (MIG) ou ativo (MAG). Neste processo de soldagem é utilizada a corrente contínua (CC) e geralmente o arame é utilizado no polo positivo (polaridade reversa). A polaridade direta é raramente utilizada, pois, embora proporcione uma maior taxa de fusão do eletrodo, proporciona um arco muito instável. A faixa de corrente mais comumente empregada varia de 50A até cerca de 600A, com tensões de soldagem de 15V até 32V. Um arco elétrico autocorrigido e estável é obtido com o uso de uma fonte de tensão constante e com um alimentador de arame de velocidade constante (ESAB, 2005) (SVETSAREN, 2003)

Figura 2-5 c).

- Processo MIG (Metal Inert Gas)

É denominado MIG o processo de soldagem utilizando gás de proteção quando esta proteção utilizada for constituída de um gás inerte, ou seja, um gás normalmente monoatômico como Argônio ou Hélio, e que não tem nenhuma atividade física com a poça de fusão. Este processo foi inicialmente empregado na soldagem do alumínio e o termo MIG ainda é uma referência a este processo. Estes processos são geralmente utilizados com corrente elétrica contínua (ESAB, 2005).

- Processo MAG (Metal Active Gas)

Quando a proteção gasosa é feita com um gás dito ativo, ou seja, um gás que interage com a poça de fusão (normalmente CO₂) o processo é denominado MAG.

Os gases de proteção têm como função primordial a proteção da poça de fusão, expulsando os gases atmosféricos da região da solda, principalmente Oxigênio, Nitrogênio e Hidrogênio, que são gases prejudiciais ao processo de soldagem. Além disso, os gases de proteção, ainda possuem funções relacionadas a soldabilidade, penetração e pequena participação na composição química da poça de fusão, quando gases ativos são empregados na soldagem (ESAB, 2005).

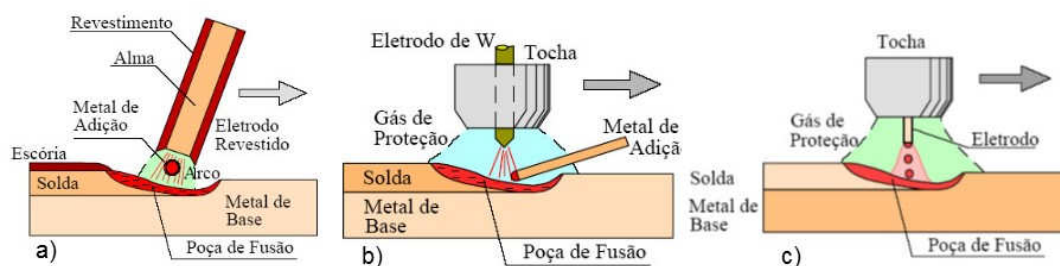


Figura 2-5 Soldagem a arco elétrico a) por eletrodo revestido b) TIG (Tungstênio inerte gás) c) MIG/MAG (Metal inerte gás ou metal ativo gás) (ESAB, 2005).

2.3.4 Limitações da soldagem MIG-MAG (ESAB, 2005)

- Regulagem do processo bastante complexa;
- Não deve ser utilizado em presença de corrente de ar;
- Probabilidade elevada de gerar porosidade no cordão de solda;
- Produção de respingos;
- Manutenção mais trabalhosa;
- Alto custo do arame consumível para uso em alumínio e aço inoxidável.
- Os processos ao arco elétrico geram radiação ultravioleta. Isto pode ser perigoso se o usuário do equipamento não possui treinamento adequado sobre o processo, seus riscos e a necessidade dos EPIs específicos (LINDE, 2015).

O conhecimento do operador nos fundamentos e na tecnologia de soldagem assim como sua habilidade no manuseio dos equipamentos são condições fundamentais neste processo já que o mesmo possui uma grande variabilidade de parâmetros e condições de processo.

A estrutura do material exerce um papel fundamental na soldagem pois pode ser modificada por inúmeras causas e parâmetros. Entre as principais destacam-se, corrente elétrica, velocidades de avanço incorretas, proteção gasosa, temperatura, tipo de materiais a serem unidos e outros (KOU, 2003). Estes parâmetros influenciam de forma importante o desempenho futuro da peça ou a estrutura soldada. Parâmetros incorretos podem ocasionar o aparecimento de discontinuidades, como pode ser observado na Figura 2-6, onde aparecem na forma de inclusão de escória, falta de penetração, mordeduras, trincas e microestruturas indesejáveis.

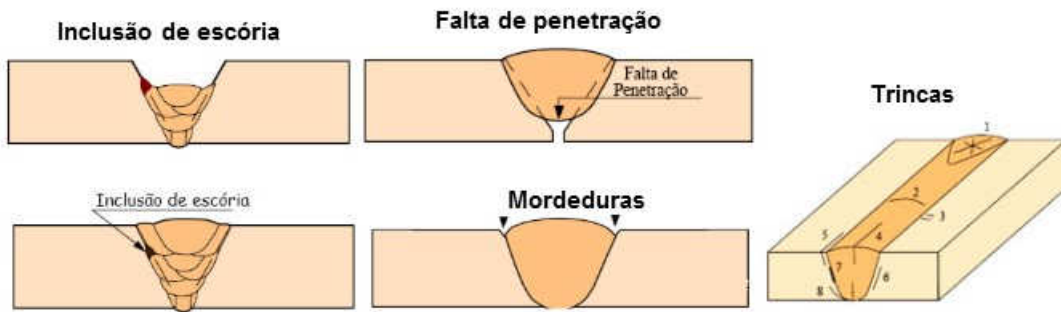


Figura 2-6 Descontinuidades comuns na soldagem por fusão (ESAB, 2005).

Outro ponto importante refere-se ao aporte térmico (Mecatronica, 2008), ou seja, a quantidade de calor transferida para a região no tempo de exposição do material, conhecidas como as zonas termicamente afetadas (ZTA). Na Figura 2-7 pode-se observar a ZTA em um cordão de solda, a primeira faixa refere-se à zona que sofreu modificações metalúrgicas e na segunda faixa é a região onde houve um aumento na temperatura, porém não o suficiente para haver transformações.

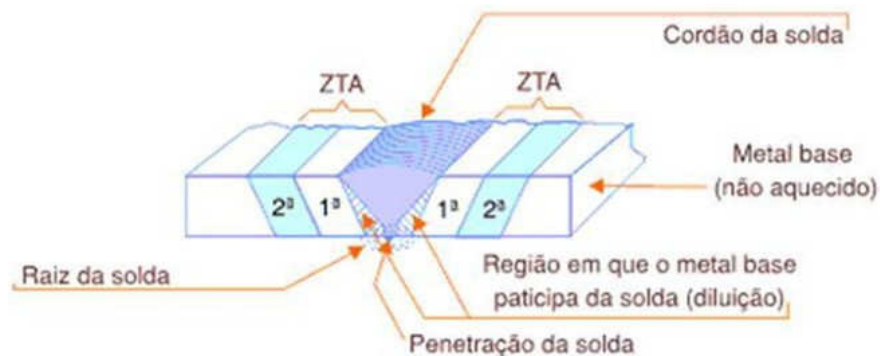


Figura 2-7 Nomenclatura de soldagem por fusão (Mecatronica, 2008).

As zonas termicamente afetadas nos diferentes processos de soldagem por fusão geralmente são bem maiores que por deformação (Mecatronica, 2008). Assim, a necessidade de um bom controle e escolha dos processos é determinante para a união das juntas soldadas.

Na Figura 2-8 pode-se observar a comparação das ZTA's de alguns processos de soldagem.

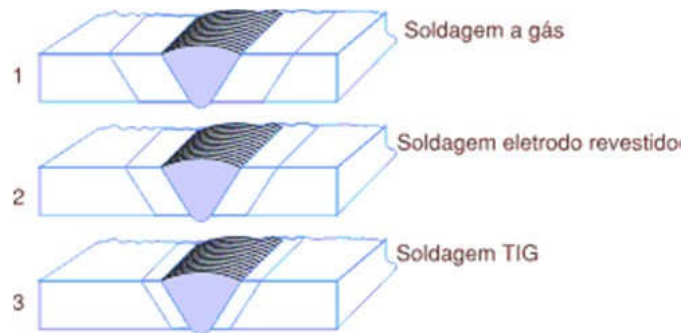


Figura 2-8 Zona Termicamente Afetada para diferentes processos (Mecatronica, 2008).

Muitas vezes, mais de um processo de soldagem pode ser utilizado para a fabricação de um mesmo produto final, assim, para a seleção de um processo de união com a qualidade desejada, as considerações econômicas são o principal critério de escolha.

As operações de soldagem, como suas etapas, preparação do material, inspeções e testes são reguladas por diferentes códigos e normas, segundo a aplicação desejada. Na Tabela 2-1 são apresentadas algumas aplicações específicas e suas normas orientadoras e fiscalizadoras.

Tabela 2-1 Aplicações e as normas reguladoras (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009) (MODENESI, 2009).

Aplicações	Normas
Tubulações e dutos (óleo e gás)	API STD- <i>Standard for Welding</i>
Estruturas marítimas	DNV - <i>Offshore Structures</i>
Vasos de pressão	ASME <i>Boiler and Pressure Vessel Code</i>
Estruturas soldadas de aço carbono	AWS - <i>Structural Welding Code</i>

Existem outras normas formadas por associações com especificações diferentes como exemplo ISO (*International Organization for Standardization*), AWS (*American Welding Society*), BS (*British Standard Institution*), DIN (*Deutsches Institute für Normung*), NF (*Association Française de Normalisation*) e a ABNT (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*). A ABNT representa o

Brasil na ISO/IEC e nos foros regionais de normalização, auxiliada por entidades governamentais e privadas.

2.4 Soldagem por deformação ou pressão

Consiste em deformar as superfícies em contato, rompendo as camadas de contaminantes, permitindo a sua aproximação e a formação de ligações químicas, como mostrado na Figura 2-9. As superfícies de contato podem ser pré-aquecidas para facilitar a sua deformação (RAMALHO, 2009).

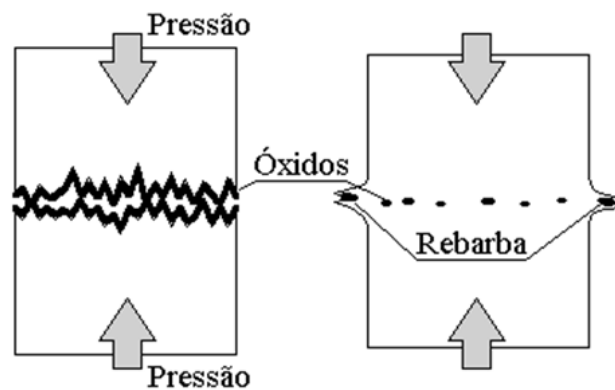


Figura 2-9 Modelo de soldagem por pressão (RAMALHO, 2009).

No grupo de deformação, incluem-se os processos de soldagem por: ultrassom, fricção, forjamento, difusão e explosão e ainda o processo por resistência elétrica (RAMALHO, 2009).

2.4.1 Solda por fricção

É um processo de união de materiais sólidos que produz um tipo de “mistura” entre os mesmos (ASM Metals Handbook, 1993). Duas peças são axialmente alinhadas e atritadas através de movimentos relativos e devido ao atrito entre as superfícies é produzido calor. O material aquecido é deslocado plasticamente nas superfícies de atrito e assim ocorre uma junção com qualidade de forjado (ASM Metals Handbook, 1993).

A Figura 2-10 representa as etapas do processo de soldagem. Inicialmente uma peça é fixa e na outra é aplicada uma rotação (A), depois as peças são aproximadas e se inicia o atrito entre as superfícies (B). Após, as superfícies aquecem e se deformam devido ao atrito e à pressão criada pela força axial aplicada (C) e, finalmente, a rotação é cessada, então uma força axial adicional

(força de forjamento) faz com que a solda seja consolidada criando um colar de rebarba (D) (FUSION, 2009).

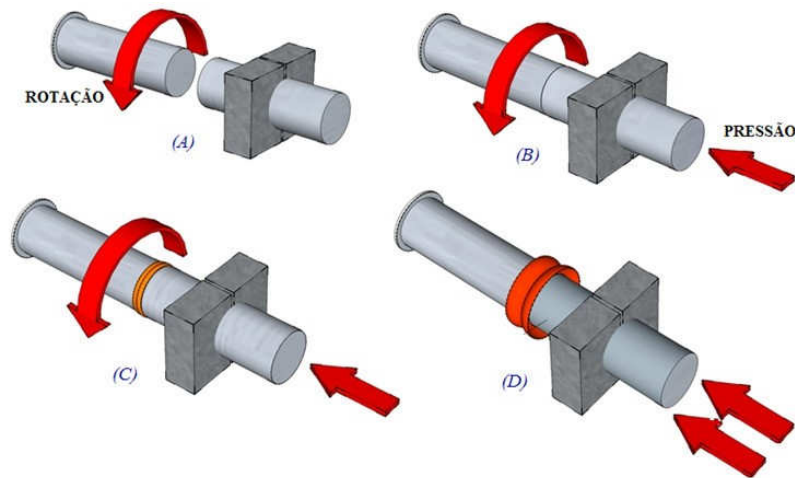


Figura 2-10 Processo de solda por fricção (FUSION, 2009).

No processo de solda por fricção superfícies atritadas não chegam ao ponto de fusão e não são necessárias atmosferas protetoras nem a adição de fundentes ou materiais de preenchimento (ASM Metals Handbook, 1993).

O processo de soldagem por atrito está limitado aos tipos de juntas de topo, plana e angular, que devem ser perpendiculares e concêntricas com o eixo de rotação. Na Figura 2-11 são ilustradas algumas possibilidades de união (DE FARIA e BACARENSE, 2003).

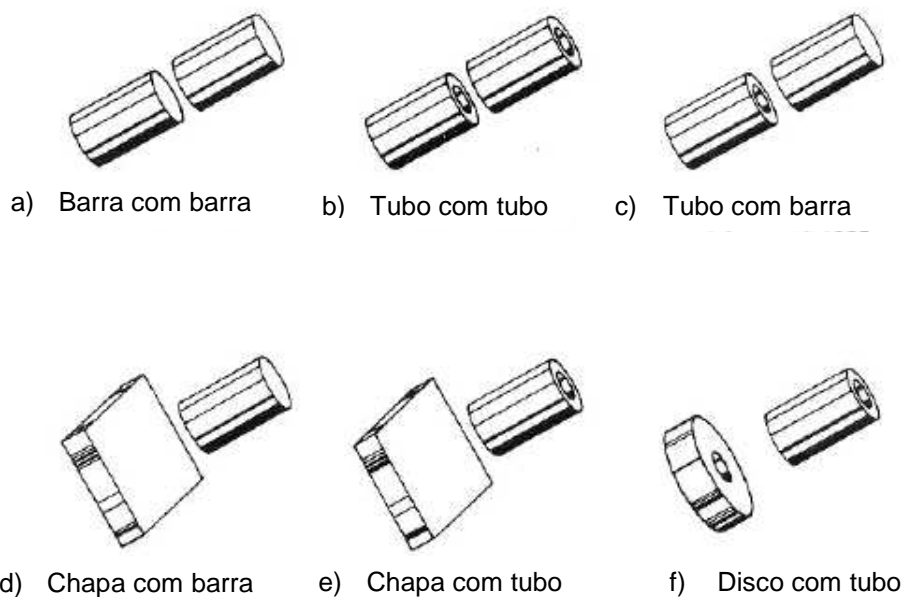


Figura 2-11 Principais variações de posição das soldas por fricção adaptado de (DE FARIA e BACARENSE, 2003)

As principais variáveis controladas neste processo são a velocidade de rotação, a pressão axial, e o tempo de solda, para fornecer a combinação necessária de calor e pressão na formação da solda (ASM Metals Handbook, 1993). Esses parâmetros são ajustados de modo que a interface é aquecida a uma temperatura onde acontece uma soldagem plástica. Depois que a interface é aquecida o equipamento exerce uma pressão axial nas interfaces da solda (ASM Metals Handbook, 1993).

Na última fase do processo de soldagem, enquanto as interfaces estão em contato, ocorre uma difusão atômica, permitindo formar entre os dois materiais uma ligação metalúrgica (ASM Metals Handbook, 1993).

A solda produzida é caracterizada pela ausência de uma zona de fusão, pela presença de uma estreita zona termo mecanicamente afetada pelo calor (ZTMA) e por material deformado plasticamente em torno da região de soldagem (KOU, 2003).

A soldagem por fricção pode ser dividida em duas variações de processo de soldagem, dependendo do modo como é fornecida a energia de rotação para a realização da solda dividindo-se em acionamento direto ou acionamento por inércia (ASM Metals Handbook, 1993).

O processo de acionamento direto ou acionamento contínuo tem sido utilizado comercialmente desde a década de 1940. Esse processo necessita de energia constante a partir de uma fonte. O outro processo por inércia foi desenvolvido na década de 1960, usa a energia cinética armazenada em um volante rotativo (ASM Metals Handbook, 1993).

2.4.1.1 Solda por fricção com acionamento por inércia

A solda por fricção tipo inércia é uma variação do processo de solda por fricção, no qual a energia necessária para execução da mesma é obtida pela energia cinética de rotação armazenada na máquina de soldagem (ASM Metals Handbook, 1993), (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

No processo de solda por inércia, uma das peças fica presa a um volante e a outra parte fica imóvel. Na Figura 2-12 pode ser observado esse sistema de solda por inércia. Um volante é acelerado a uma velocidade de rotação pré-determinada armazenando a energia necessária para a solda. O motor de acionamento é

desconectado e as partes são pressionadas uma contra a outra pela força axial na máquina de solda. O movimento faz com que as superfícies a serem soldadas atritem pela pressão. A energia cinética armazenada no volante é dissipada na forma de calor, através do processo de fricção, para as interfaces da solda, à medida que a rotação diminui (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

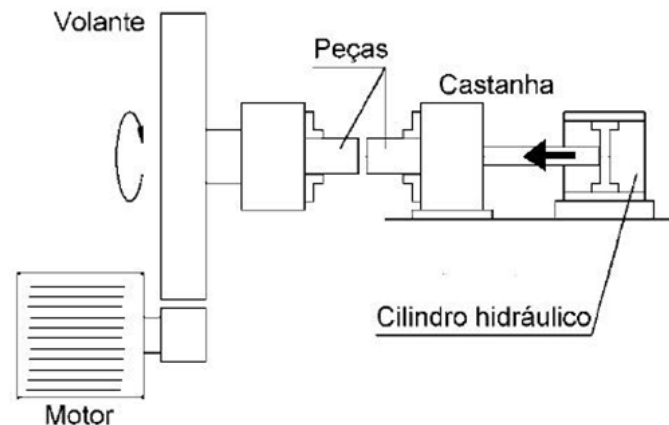


Figura 2-12 Sistema de solda a fricção por inércia (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

2.4.1.2 Solda por fricção com acionamento direto.

A solda por fricção com acionamento direto é uma variação do processo de solda por fricção na qual a energia necessária para a execução da solda é fornecida pela máquina através da conexão direta com o motor de acionamento por um período pré-determinado para o ciclo de soldagem (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009). Neste processo uma das peças é presa à unidade acionada pelo motor enquanto a outra permanece imóvel Figura 2-13.

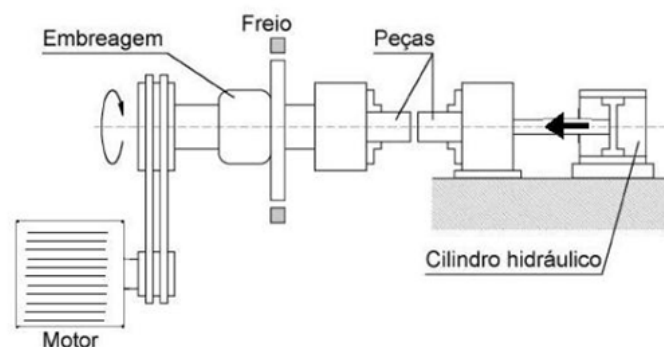


Figura 2-13 Sistema de solda a fricção com acionamento direto (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

No sistema de solda direto a peça acionada pelo motor faz um movimento de rotação a uma velocidade pré-determinada. As peças a serem soldadas são pressionadas uma contra a outra e é aplicada a força necessária para o processo de soldagem. À medida que as peças entram em atrito é gerado calor e esta etapa é mantida até o momento em que é cessada a rotação. A rotação do sistema é cessada por uma frenagem ou pelo próprio processo de soldagem, neste caso o sistema é híbrido, pois há inércia na soldagem. Ao final do processo de soldagem a força é mantida ou intensificada até que atinja um tempo determinado. A intensificação da força é conhecida como força de forjamento ou ainda como recalque (MATTEI, 2011).

A relação dos parâmetros de soldagem de solda por fricção direta é mostrada no gráfico da Figura 2-14.

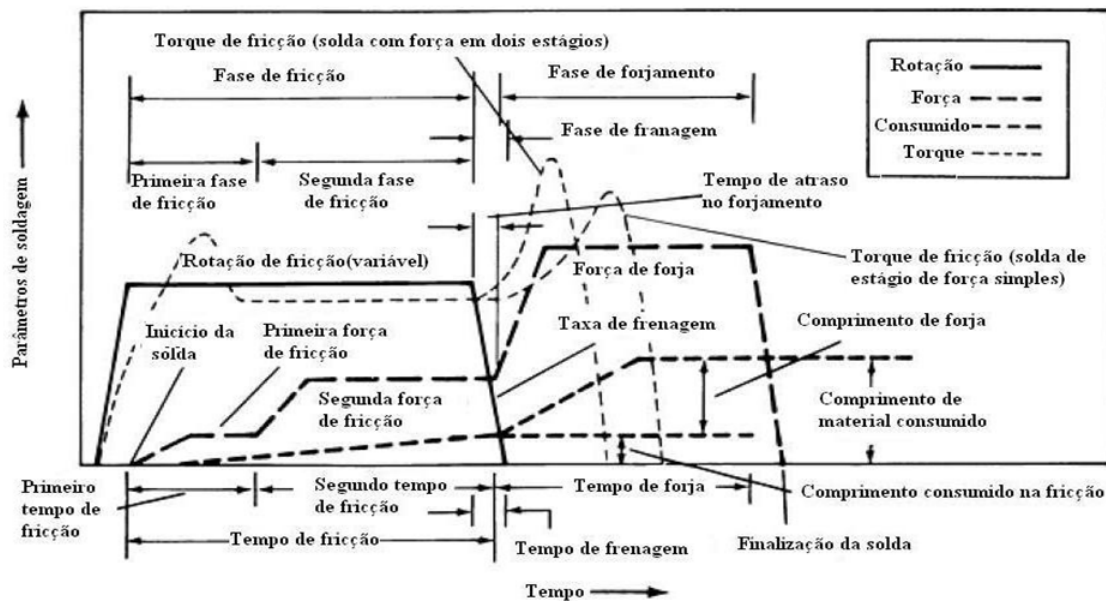


Figura 2-14 Soldagem por fricção com acionamento direto (ASM Metals Handbook, 1993).

Na soldagem por fricção direta existem dois mecanismos diferentes de controle para determinar o fim do ciclo de soldagem, um deles pode ser finalizado quando um tempo pré-determinado de soldagem é atingido, o outro quando é atingida a quantidade de deslocamento determinada (comprimento de material consumido), conhecido como *burnoff*.

Para a solda por fricção com acionamento direto pode-se calcular o torque através da potência ou vice-versa (FARIA e ALEXANDRE, 2003). A equação de cálculo da potência é dada por:

$$W = 2,7 \pi R T \quad (2.2)$$

Sendo W a potência necessária para a soldagem, R a rotação de soldagem e T o torque adquirido no processo (FARIA e ALEXANDRE, 2003). Ainda pode-se calcular o torque para a soldagem com a equação:

$$T = 2 \pi \mu P r^3 \quad (2.3)$$

Nesta equação o torque resultante será em Nm, sendo μ o coeficiente de atrito, P a pressão aplicada (MPa) e r o raio da superfície da barra. Para calcular a pressão aplicada ao processo divide-se a força aplicada pela área de atrito.

2.4.2 Parâmetros de soldagem e sua influência na morfologia das soldas

Dos principais parâmetros do processo de soldagem por fricção é possível destacar cinco que tem maior influência sobre a formação da junta. São estes: velocidade de rotação, força axial, comprimento consumido, tempo de aquecimento e força de forjamento. O tempo de soldagem é uma variável dependente dos demais parâmetros, sendo de grande importância na geração do calor necessário para realizar a união (HAUPT, 2013).

- **Velocidade de Rotação:** Este parâmetro permite sua utilização em uma grande faixa de variação, sem grandes variações na qualidade das juntas soldadas (AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991). Nas mais altas velocidades de rotação, as interações entre as asperidades são acompanhadas por uma ação de polimento entre as superfícies de contato. Este comportamento está relacionado às condições visco plásticas do material interfacial, o que conduz a um maior tempo de aquecimento para serem alcançadas as condições plásticas ideais, favorecendo assim a propagação de calor, decréscimo das propriedades mecânicas por formação de fases mais frágeis como Widmanstätten e a intensificação da ZTA (PIRES, 2007). Já baixas velocidades de rotação implicam em maiores demandas de torque para

vencer os esforços provenientes da plastificação dos materiais e uma menor adição de energia com menor aquecimento periférico, mas maior perturbação de material plastificado. As taxas de resfriamento são mais elevadas quando utilizadas baixas rotações, podendo favorecer a formação de fases com excessiva dureza.

- **Força Axial:** A força axial é um dos parâmetros de maior influência na qualidade da união soldada. Esta variável deve ser mantida em valores capazes de garantir o contato íntimo entre as superfícies de atrito e garantir a retirada de filmes de óxidos e partículas indesejáveis das interfaces de contato por meio da rebarba de material plastificado proveniente do processo. Segundo (ELLIS, 1972) a força axial é um fator de controle dos tempos de soldagem, atuando no perfil e características da ZTA. Forças de maior magnitude conduzem a um estreitamento da ZTA proveniente da maior pressão exercida que facilita a expulsão do material plastificado. Para forças de menor magnitude a ZTA se apresenta mais abrangente devido ao alívio da pressão exercida sob o material plastificado mantendo o mesmo na região de atrito com redução da parcela expulsa na forma de material plastificado. Com o emprego de maiores forças axiais é possível obter uma estrutura mais refinada, evitando assim a formação de fases com ferrita de Widmanstätten, obtendo-se um ganho nas propriedades mecânicas de tração, dureza e tenacidade (ELLIS, 1972) (AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).
- **Comprimento consumido:** O comprimento consumido é a medida de deslocamento do início da soldagem (contato entre as superfícies) e o final da soldagem (final da fase de forjamento). O comprimento de queima deve ser o necessário para expelir óxidos e impurezas da interface de soldagem garantindo uma união de boa qualidade. Este parâmetro também é responsável pelo controle do ciclo de soldagem (início e fim), tendo esta grande influência dos parâmetros força axial e velocidade de rotação na sua taxa de queima. Segundo (ELLIS, 1972) o limite de resistência das soldas é maior quando empregados maiores comprimentos de queima. O controle do processo através do comprimento de queima apresenta algumas desvantagens como a necessidade de um alinhamento adequado entre as seções a serem unidas, bem como a presença de largas rebarbas de material

plastificado e defeitos superficiais, o que reduz a qualidade da soldagem (PIRES, 2007).

- Tempo de aquecimento: O tempo de aquecimento é o período de tempo entre o início do contato das superfícies a serem unidas até a frenagem completa do equipamento de soldagem. Este parâmetro é de grande importância, pois ele determina a energia empregada na soldagem. Segundo (ELLIS, 1972) a microestrutura final depende tanto do aquecimento atingido ao longo do processo, como das taxas de resfriamento a que o material é submetido.
- Força de forjamento: A força de forjamento empregada na soldagem é importante para garantir o contato íntimo entre as superfícies a serem unidas após a fase de fricção. Em seu estudo (LUCAS, 1971) concluiu que a pressão de forja tem efeito dominante sobre a resistência da solda, através da influência da microestrutura da zona de soldagem. A pressão de forja promove o refinamento de grão por trabalho a quente, o que diminui a tendência à formação de estruturas mais grosseiras após o resfriamento produzindo assim soldas de maior resistência (FAES, VERMEIRSCH, *et al.*, 2008 b).

Após a união os materiais soldados podem ser divididos em quatro zonas que podem ser definidas após o processo de fricção entre as superfícies de soldagem (HAUPT, 2013):

- Zona de mistura (ZM) é caracterizada por uma elevada deformação plástica promovendo assim a mistura dos materiais que, aliada ao aquecimento do material leva o mesmo a recristalização;
- Zona termo mecanicamente afetada (ZTMA), esta é caracterizada por apresentar um menor grau de deformação e aquecimento, podendo promover a recristalização e/ou recuperação do material;
- Zona termicamente afetada (ZTA), nesta região da solda não é observada deformação do material, mas a temperatura pode ser alta o suficiente para promover mudanças estruturais.

- Material de base (MB) região da solda onde a microestrutura é mantida inalterada, sendo que a deformação e/ou calor são insuficientes para promover mudanças estruturais.

O tamanho e forma destas regiões dependem fortemente da energia empregada no processo de soldagem, força axial e velocidade de rotação (DE FARIA e BACARENSE, 2003). A

Figura 2-15 mostra a variação na morfologia das soldas quando variados os parâmetros anteriormente citados em níveis altos, médios e baixos.

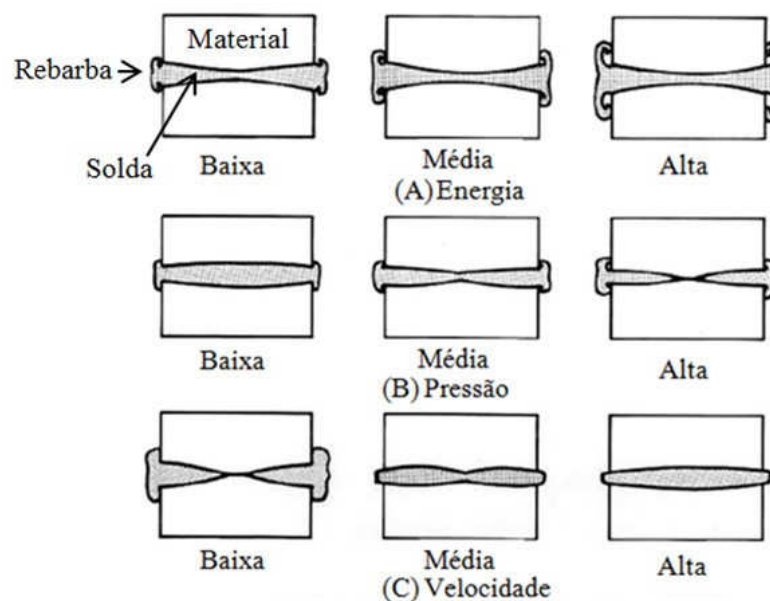


Figura 2-15 Influência da energia, força axial e velocidade na morfologia da solda.
Adaptado de (DE FARIA e BACARENSE, 2003).

2.4.3 Vantagens e limitações do processo de soldagem por fricção.

Existem alguns requisitos importantes para uma boa formação de soldas por fricção, um deles é que os materiais a serem unidos possam ser forjados ou que os materiais possam gerar atrito na interface de solda. O primeiro requisito elimina soldas metálicas entre materiais frágeis semelhantes, como cerâmicas, ferros fundidos e carbonetos, porém podem ser unidos materiais frágeis com

dúcteis. O outro requisito elimina ou dificulta a soldagem de materiais que contêm na liga aditivos livres que forneçam lubrificação como exemplo a grafita nas ligas de ferro fundido e ligas de chumbo (ASM Metals Handbook, 1993).

A solda por fricção permite junções não somente entre barras, também entre tubos, tubos com barras, barras e tubos com discos ou chapas. Muitas peças fundidas, fabricadas pela metalurgia do pó ou mesmo compostos com matriz metálica são soldáveis. Como regra geral todos os materiais metálicos de engenharia que são forjáveis podem ser soldados por fricção (ASM Metals Handbook, 1993).

Por ser um processo em estado sólido, esse tipo de operação apresenta mais vantagens que limitações.

Vantagens (SILVA, 2015):

- Atenção especial com a limpeza da superfície não é necessária, uma vez que a soldagem por fricção tende a romper, deslocar, e finalmente remover os filmes de superfície na rebarba da solda;
- Metal de enchimento, fluxo, e gás protetor não são requeridos. Diferentemente dos processos por fusão, a soldagem por fricção não põe em risco a saúde do operador além de mais seguro, porque não existe radiação, fumaça, ou risco de problemas elétricos envolvendo alta tensão;
- Defeitos associados a fenômenos de solidificação, como porosidade e segregação, não estão presentes em soldagem por fricção, uma vez que ele é um processo em estado sólido;
- São possíveis juntas de metais dissimilares que são difíceis ou até impossíveis de serem soldadas por outros processos como por exemplo metais refratários;
- Baixos custos, simplicidade de operação, instalações simples, baixo consumo de energia, e um curto ciclo de soldagem fazem do processo efetivo para componentes normalmente produzidos por outros processos de fabricação;
- O processo é facilmente automatizado para reproduzir soldas de alta qualidade. O equipamento atual pode ser operado a até 4 quilômetros, sendo adequado para aplicações distantes em ambientes perigosos;

- Baixo calor introduzido e os rápidos ciclos de soldagem fazem com que o processo seja adequado para aplicações em oleodutos operantes, linhas de gás e linhas de metanol;
- Estreita zona termicamente afetada associada ao processo; a integridade metalúrgica da junta soldada por fricção quando comparada com as juntas convencionais, dá-se em geral, pela zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) que é menos extensa e tem uma largura mais estreita do que a ZTA de uma solda convencional incluindo o material de enchimento. As propriedades mecânicas na ZTA são semelhantes à do metal base, mas, dependendo da temperatura alcançada durante a solda, a taxa de resfriamento e o tratamento térmico pós-soldagem, as propriedades da solda podem ser alteradas. Porém se estes três parâmetros forem controlados corretamente, a soldagem terá sua integridade necessária.
- Na maioria dos casos, a resistência da solda é igual ou maior que a dos materiais a serem unidos.

Limitações (SILVA, 2015):

- A área de pelo menos uma peça deve ser simétrica, de forma que a parte possa girar sobre o eixo do plano de rotação. As geometrias típicas que podem ser soldadas por fricção são: barra com barra, barra com tubo, barra com chapa, tubo com tubo e tubo com chapa;
- O processo é normalmente limitado à soldagem de juntas de topo planas e angulares ou ainda cônicas;
- Material de pelo menos um componente deve ser plasticamente deformável sob as dadas condições de soldagem;
- Preparação e alinhamento das peças podem ser críticas para o desenvolvimento uniforme do atrito e aquecimento;
- Custos do equipamento e custos com dispositivos de fixação geralmente hidráulicos são altos;

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realização deste trabalho foram detalhados para ambos os processos, MAG e fricção, o projeto, os materiais empregados, os equipamentos envolvidos, as modificações dimensionais das peças a serem soldadas, o processo de soldagem e as avaliações das propriedades mecânicas e metalúrgicas das juntas soldadas segundo as respectivas normas. Destaca-se, também, a análise microestrutural das diferentes regiões soldadas.

3.1 Projeto

O projeto das peças para o conjunto soldado por fricção levou em consideração a equalização geométrica da junta a ser soldada com o objetivo de se obter uma melhor homogeneidade de aquecimento nas peças, ou seja evitou-se utilizar o perfil da junta barra- placa

Figura 2-15 dando preferência ao perfil tubo-tubo conforme Figura 3-1 d).

A Figura 3-1 mostra o projeto das juntas e a Figura 3-2 mostra o projeto dos componentes assim como o perfil do conjunto soldado por fricção.

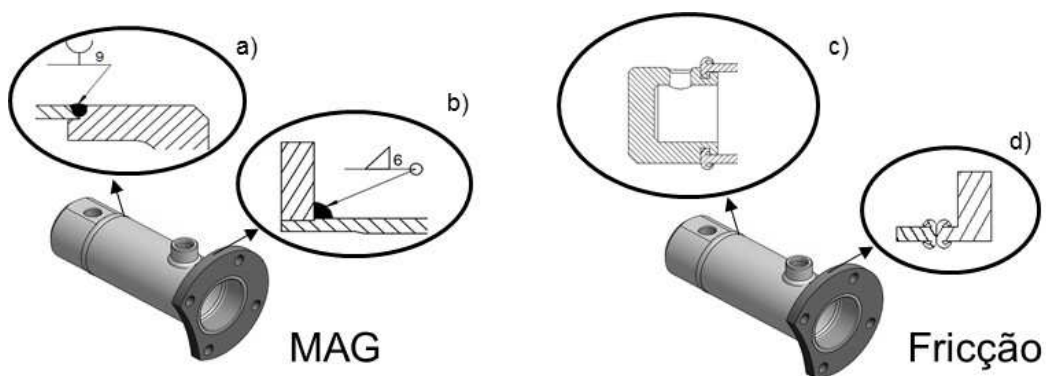


Figura 3-1 Projeto das juntas do conjunto soldado a) junta do flange - MAG b) Junta do fundo- MAG c) Junta do fundo- fricção d) Junta do flange- fricção

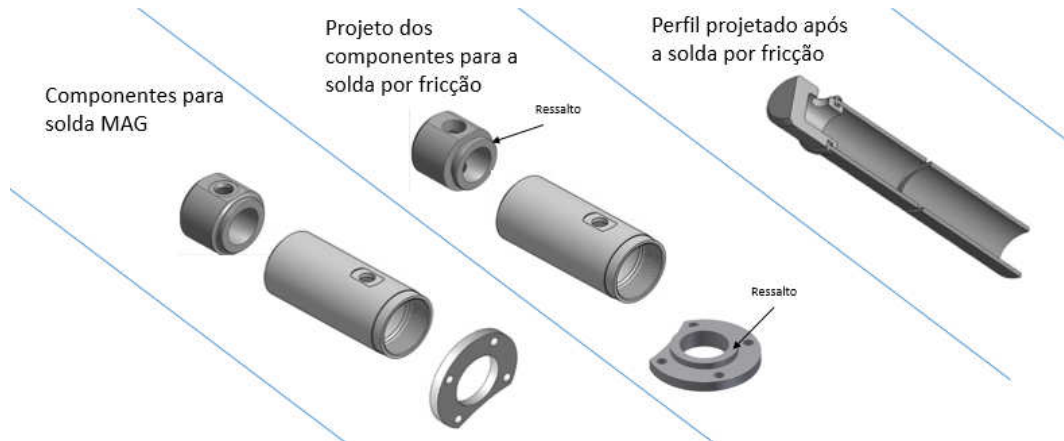


Figura 3-2 Projeto dos componentes e do conjunto

3.2 Análise dos Materiais

Utilizou-se o aço carbono para todos os componentes a serem soldados nos processos de soldagem MAG e fricção. O tubo foi obtido a partir de uma seção de aço SAE 1026 sem costura com 76,2mm de diâmetro externo, espessura de 12,6 mm e 172 mm de comprimento, trefilado a frio. O fundo e o flange foram obtidos através da usinagem de uma barra de aço SAE 1030 laminada com diâmetro inicial de 80mm para o fundo e 140mm para o flange. Os tubos foram previamente conformados pelo processo *Mannesmann*, que é formado a partir de uma barra circular maciça de aço, empurrada por dois cilindros oblíquos que o rotacionam e transladam contra um mandril fixo. Obtém-se um tubo bruto, que sofrerá conformação de acabamento através de laminadores perfiladores (MANNESMANN). O arame de solda utilizado para o processo MAG, tanto para o ponteamto como para fechamento, foi o ER70S-6 de diâmetro 1,2mm. As composições químicas do tubo e do fundo assim como suas propriedades mecânicas estão apresentadas nas Tabela 3-1 e Tabela 3-2, respectivamente.

Tabela 3-1 Composição Química dos componentes a serem soldados (% em peso).

Componente	Fornecedor	Material	Condição	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Co
Tubo	PTC Alliance	SAE 1026	Conformado a frio	0,26	0,27	0,803	0,018	0,011	0,022	<0,005	<0,005	0,004	<0,01
Fundo	Gerdau	SAE 1029	Laminado	0,23	0,14	0,486	0,021	0,008	0,005	<0,005	<0,005	0,005	<0,01
Flange	Gerdau	SAE 1030	Laminado	0,2	0,25	0,419	0,015	0,004	0,049	<0,005	0,012	0,027	<0,01

Componente	Fornecedor	Material	Condição	%Cu	%Nb	%Ti	%V	%W	%Pb	%Sn	%B	%Fe	%CO ₂	%Ar
Tubo	PTC Alliance	SAE 1026	Conformado a frio	0,028	<0,001	0,001	<0,001	<0,01	<0,002	<0,001	2E-04	98,6	-	-
Fundo	Gerdau	SAE 1029	Laminado	0,034	<0,001	<0,001	<0,001	<0,01	<0,002	<0,001	1E-04	99,1	-	-
Flange	Gerdau	SAE 1030	Laminado	0,021	<0,001	0,012	<0,001	<0,01	<0,002	0,004	0,001	99	-	-

Tabela 3-2 Propriedades Mecânicas do material dos componentes

Componente	Fornecedor	Material	Condição	Limite de escoamento MPa	Resistência a tração MPa	Relação LE/LR	Alongamento %	Dureza HB
Tubo	PTC Alliance	SAE 1026	Conformado a frio	483	552	0,88	5 (em 50mm)	165
Fundo	Gerdau	SAE 1029	Laminado					
Flange	Gerdau	SAE 1030	Laminado	345	550	0,63	32	179
Arame de solda	Belgo Bekaert Arames	BME-C4 ER70S-6 AWS A5.18	trefilado Ø1,2mm	400	480	0,83	22	-
Gas para solda	Linde	Corgon 8 (Dióxido de Carbono em Argônio)	Mistura gasosa, não inflamável	-	-	-	-	-

Com base na composição química dos materiais a serem soldados, dada na Tabela 3-1, e o uso da Equação (2.1) obtém-se os seguintes valores de carbono equivalente:

$$(IIW) CE_{(Tubo)} = 0,42; CE_{(Fundo)} = 0,32 \text{ e } CE_{(Flange)} = 0,30.$$

Ou seja, neste caso conforme o International Institute of Welding (IIW, 2015) como o CE é menor que 0,45% é pouco provável que ocorra uma trinca por solda e nenhum tratamento térmico é requerido.

3.3 Análise dimensional

A Figura 3-3 abaixo mostra o conjunto das peças usinadas antes da soldagem para os processos MAG e Fricção, sendo que para este último foram feitas algumas alterações dimensionais com o objetivo de melhorar a qualidade da solda.

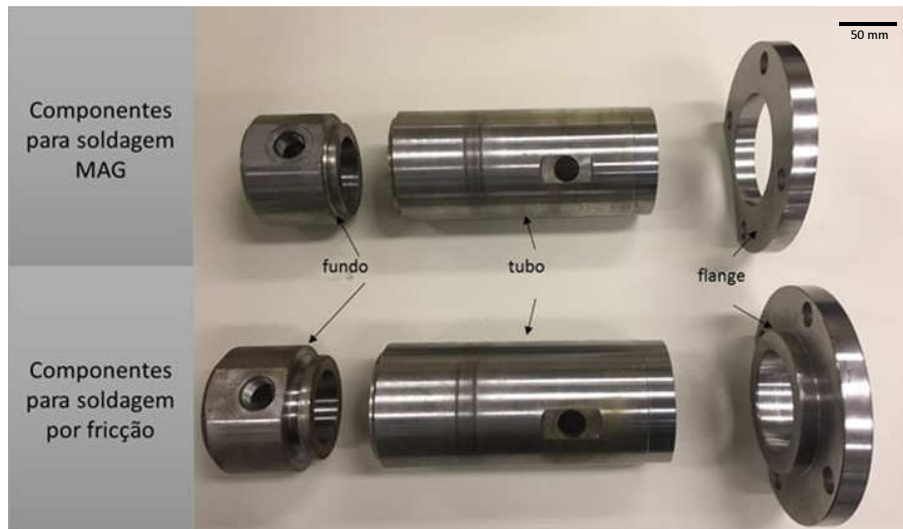


Figura 3-3 Perfil de usinagem dos componentes

- No fundo foi incluído um novo perfil com objetivo de encapsular a rebarba de solda, referência (THOMPSON). Este encapsulamento tem por finalidade evitar que a pressão do óleo durante o funcionamento do cilindro hidráulico quebre a rebarba ou parte da mesma (dureza entre 160 e 185 HV) e contamine o mesmo. A Figura 3-4 mostra a diferença dos perfis de usinagem entre fundos MAG e fricção.



Figura 3-4 Perfil do fundo usinado para soldagem MAG e fricção

- No flange Figura 3-5 foi feito um ressalto para a soldagem por fricção com objetivo de evitar a solda de topo da face do tubo com a superfície plana do flange. Esta ação permite uma equalização dos volumes de materiais a serem aquecidos conferindo uma melhor homogeneidade de aquecimento nas peças.

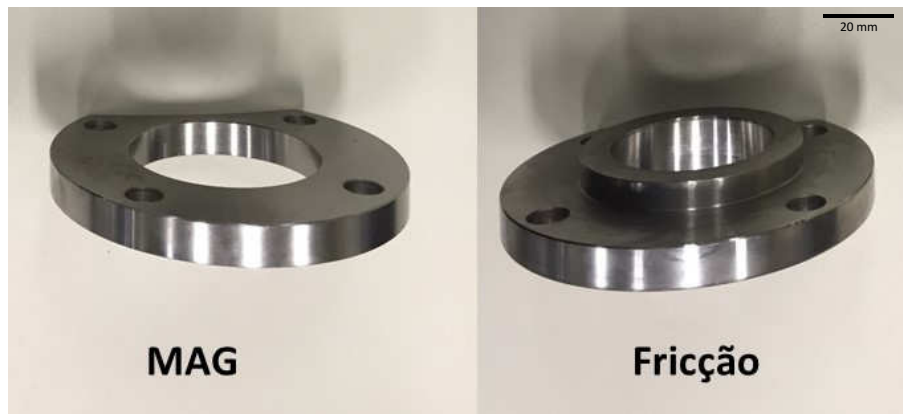


Figura 3-5 Perfil do flange usinado para soldagem MAG e fricção

- No tubo foram usinadas duas geometrias de contato para a solda, chanfro de 60° e sem chanfro Figura 3-6. Isto foi feito com o objetivo de facilitar o início da soldagem por reduzir a área em contato minimizando assim o torque inicial.

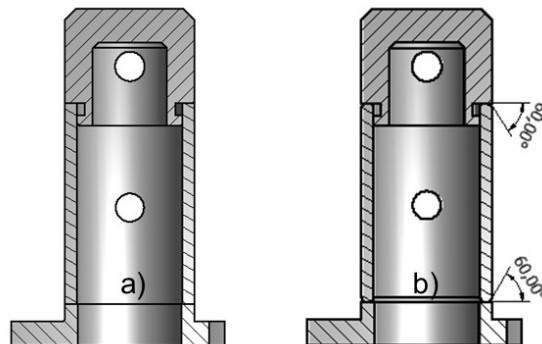


Figura 3-6 Geometrias utilizadas na soldagem por fricção dos tubos a) sem chanfro b) chanfro de 60°

3.4 Processo de soldagem

Todas as etapas de processo descritas a seguir serão abordadas de forma comparativa entre os processos de soldagem MAG e por fricção.

3.4.1 Equipamentos utilizados

Para o processo de soldagem por fricção foi utilizada uma máquina da marca Thompson de 125 toneladas apresentada na Figura 3-7. Esta máquina é equipada com motor elétrico com potência de 165 kW, e rotação de 0-1775 rpm. O eixo principal é acionado por correia em V com frenagem a disco. A máquina foi construída para limitar o erro de perpendicularismo entre as faces a serem soldadas ao, no máximo, 0,1mm (THOMPSON).



Figura 3-7 Máquina de soldagem por fricção Thompson - 125 toneladas

Para o processo de soldagem MAG foram utilizadas duas máquinas de solda da marca Jetline. Uma equipada com cabeçote para soldagem circunferencial na posição horizontal e outra na posição 45° (JETLINE) e dois conjuntos de soldagem Miller Deltaweld 652 (650A e 10-44V) (MILLER, 2015) para o ponteamto. O ponteamto do fundo e do flange foram feitos através de dispositivo para garantir o paralelismo e perpendicularismo entre estas peças e o tubo. A soldagem final do fundo e do flange foram feitas nas máquinas Jetline citadas acima sendo o fundo soldado na posição horizontal Figura 3-8 e o flange na posição 45° Figura 3-9. Ambas as máquinas são semiautomáticas, ou seja, o posicionamento da tocha no raio de solda é feito manualmente.



Figura 3-8 Soldagem MAG entre o fundo e o tubo a) Solda ponto b) Solda fechamento horizontal



Figura 3-9 Soldagem MAG entre o flange e o tubo a) Solda ponto b) Solda fechamento a 45°

3.4.2 Etapas do processo

Para o processo de soldagem MAG tem-se:

- a. Lavagem das peças a serem soldadas
 - b. Posicionamento das peças no dispositivo de ponteamto
 - c. Ponteamto
 - d. Fixação do conjunto ponteamto na máquina de solda de fechamento
 - e. Corte da ponta do arame
 - f. Posicionamento da tocha no centro do raio a ser soldado
- b)

- g. Início do ciclo automático de solda com os parâmetros de velocidade, rotação, corrente e tensão previamente estabelecidos. Foram utilizados um passe de solda para o flange e dois para o fundo.
- h. Limpeza do cordão de solda através de escovamento manual
- i. Descarga da peça

O ciclo automático é iniciado com a abertura do arco da solda e imediatamente é iniciada a rotação da placa que faz girar todo o conjunto de peças já ponteadado anteriormente. A rotação da peça é acompanhada com a deposição do arame e a oscilação da tocha que acompanha este movimento transversal à rotação para que ocorra o completo preenchimento do raio de solda previamente usinado. Após o último passe o arco é interrompido e a tocha sobe automaticamente para a posição inicial.

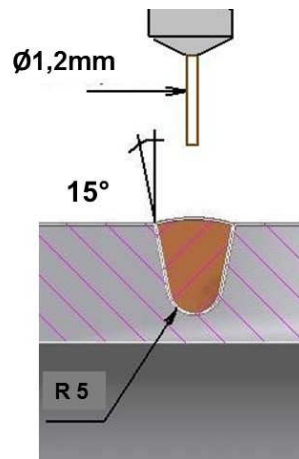


Figura 3-10 Perfil do raio de solda utilizado nas peças soldadas com MAG

A soldagem circunferencial no processo MAG foi realizada na posição horizontal em ângulo, para o componente flange, e na posição plana para o fundo.

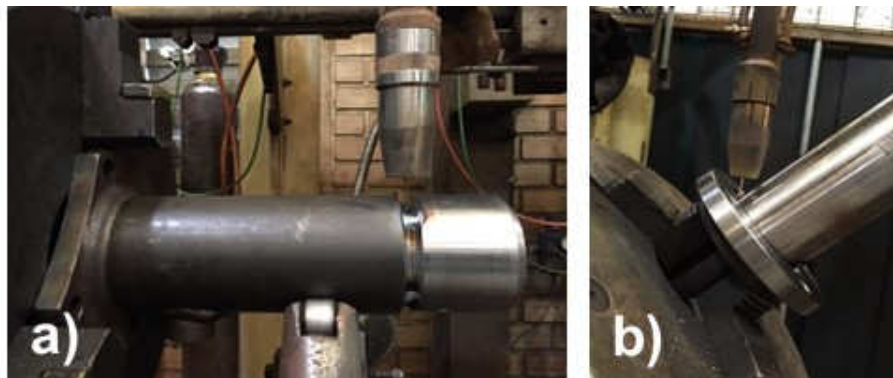


Figura 3-11 a) Posição plana para o fundo b) Posição horizontal em ângulo para o flange

Para o processo de soldagem por fricção tem-se:

- a. Limpeza das superfícies a serem soldadas
- b. Posicionamento das peças na máquina
- c. Início do ciclo automático
- d. Descarga das peças da máquina

O ciclo automático é iniciado com uma pressão de calibração usada para retirar as folgas ainda existentes entre as peças. Nesta fase também é possível parametrizar o comprimento inicial do conjunto a ser soldado, isto é utilizado para fazer a comparação com o comprimento final e desta forma saber o consumo de material de solda. Após a pressão de calibração feita pela parte fixa (mordente), o mesmo retorna a posição inicial onde se inicia a rotação da placa hidráulica com o tubo afixado Figura 3-12. Nesta sequência segue o ciclo de soldagem descrito a seguir:

Na primeira etapa o fundo ou o flange é posto em contato com o tubo e, então, é iniciada sua aceleração e ciclo de pressão. Na segunda a pressão é mantida em um nível baixo cujo objetivo é aquecer e plastificar os materiais em contato evitando torques iniciais muito elevados. Na terceira etapa a pressão é aumentada até o nível estabelecido para a soldagem e ao final desta fase a rotação é cessada, dando início a fase de forjamento, que é a quarta etapa. Nessa etapa a pressão é aumentada para garantir o contato dos materiais unidos. A última etapa representa a solda finalizada e já resfriada pronta para a remoção do material plastificado proveniente do processamento.

O posicionamento das peças para a soldagem por fricção foi realizado na posição de topo, sendo o fundo ou o flange rotacionados e o tubo mantido engastado através de mordentes hidráulicos Figura 3-12. As castanhas da placa hidráulica rotativa, assim como as do mordente fixo, foram projetadas para garantir o paralelismo, a concentricidade e o perpendicularismo entre as duas faces a serem soldadas, assim como para manter a uniformidade da solda e evitar vazios na mesma.



Figura 3-12 Disposição das peças na solda por fricção a) Flange e tubo b) Fundo e tubo

3.4.3 Testes no processo

A definição dos parâmetros iniciais de soldagem foi obtida de forma experimental através de uma sequência de soldagens observando a morfologia do cordão de solda

Figura 2-15 e a análise macrográfica transversal da solda. Nesta análise foram sendo observados defeitos de preenchimento, quantidade de material consumido através do corte transversal do cordão de solda e da geometria do mesmo.



Figura 3-13 Análise macrográfica do cordão de solda durante os testes da solda do fundo

Durante a soldagem é possível acompanhar o comportamento dos parâmetros através de gráficos, Figura 3-14 e Figura 3-15, gerado de forma

instantânea com os principais parâmetros de soldagem, rotação primárias e secundárias, força primária e secundária e de forjamento, e consumo de material.

Os testes foram feitos utilizando dois corpos de prova para cada sequência de parâmetros para verificar a repetibilidade dos mesmos assim como a morfologia do cordão de solda. No total foram produzidos quarenta corpos de prova, sendo 20 para o conjunto fundo e tubo e 20 para o conjunto tubo e flange. Ainda dentro de cada um destes grupos de vinte peças foram feitos 10 corpos de prova com chanfro de 60° e sem chanfro. A Tabela 3-3 apresenta as diferentes combinações de parâmetros de processo incluindo os diferentes tipos de chanfro utilizados nos testes de soldagem do fundo e do Flange.

Tabela 3-3 Tabela de parâmetros utilizados e registrados durante a soldagem do fundo e flange.

Conjuntos soldados	N° do CP	Comprimento pré-solda mín (mm)	Comprimento pré-solda máx (mm)	Comprimento mín soldado (mm)	Comprimento max soldado (mm)	Consumo de material (mm)	Primeira força de atrito (kN)	Segunda força de atrito (kN)	Força de forjamento (kN)	Primeira rotação (rpm)	Segunda rotação (rpm)	Velocidade de remoção da rebarba (mm)	Defeitos na solda após corte trasnversal (vazios, porosidades ...)	Morfologia da solda figura 2.14
Fundo e tubo sem chanfro	1	220	222	214	216	5,0	55	145	217	680	647	300	Isenta	Baixa
	2	220	222	214	216	5,0	55	145	217	680	647	300	Isenta	Baixa
	3	220	222	214	216	5,5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Média
	4	220	222	214	216	5,5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Média
	5	220	222	214	216	6,0	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	6	220	222	214	216	6,0	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	7	220	222	214	216	5,8	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	8	220	222	214	216	5,8	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	9	220	222	214	216	5,6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Ok
	10	220	222	214	216	5,6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Ok
Fundo e tubo com chanfro de 60°	11	220	222	214	216	5,0	55	145	217	680	647	300	Isenta	Baixa
	12	220	222	214	216	5,0	55	145	217	680	647	300	Isenta	Baixa
	13	220	222	214	216	5,5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Média
	14	220	222	214	216	5,5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Média
	15	220	222	214	216	6,0	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	16	220	222	214	216	6,0	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	17	220	222	214	216	5,8	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	18	220	222	214	216	5,8	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	19	220	222	214	216	5,6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Ok
	20	220	222	214	216	5,6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Ok
Flange e tubo sem chanfro	21	177	179	171	173	5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Baixa
	22	177	179	171	173	5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Baixa
	23	177	179	171	173	5,5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Média
	24	177	179	171	173	5,5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Média
	25	177	179	171	173	6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	26	177	179	171	173	6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	27	177	179	171	173	5,8	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	28	177	179	171	173	5,8	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	29	177	179	171	173	5,6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Ok
	30	177	179	171	173	5,6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Ok
Flange e tubo com chanfro de 60°	31	177	179	171	173	5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Baixa
	32	177	179	171	173	5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Baixa
	33	177	179	171	173	5,5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Média
	34	177	179	171	173	5,5	55	145	217	680	647	300	Isenta	Média
	35	177	179	171	173	6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	36	177	179	171	173	6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	37	177	179	171	173	5,8	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	38	177	179	171	173	5,8	55	145	217	680	647	300	Isenta	Alta
	39	177	179	171	173	5,6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Ok
	40	177	179	171	173	5,6	55	145	217	680	647	300	Isenta	Ok

Analisando os resultados dos testes observa-se que não houve diferença significativa na qualidade do cordão de solda quando foi utilizado o chanfro de 60°, desta forma levando-se em consideração a redução de custos com usinagem optou-se em deixar o chanfro reto.

Na sequência de figuras abaixo Figura 3-14, Figura 3-15 e tabelas (Tabela 7-1 e Tabela 7-2) estão demonstrados os gráficos e os valores obtidos para as amostras com melhores resultados da Tabela 3-3 sob os números de corpos de prova 9 e 10 e 29 e 30. Os parâmetros utilizados para estes últimos foram reutilizados para a fabricação de mais 20 corpos de prova a serem utilizados nas avaliações das propriedades mecânicas.

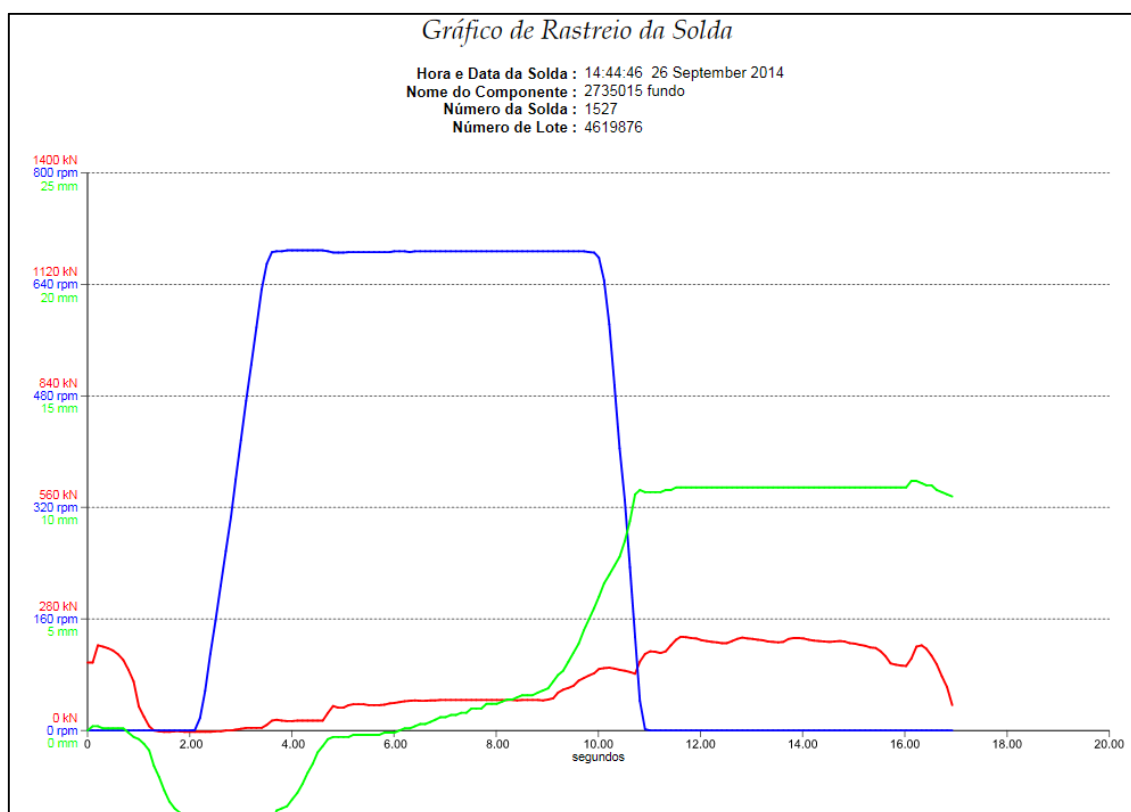


Figura 3-14 Soldagem por fricção entre o tubo e o fundo

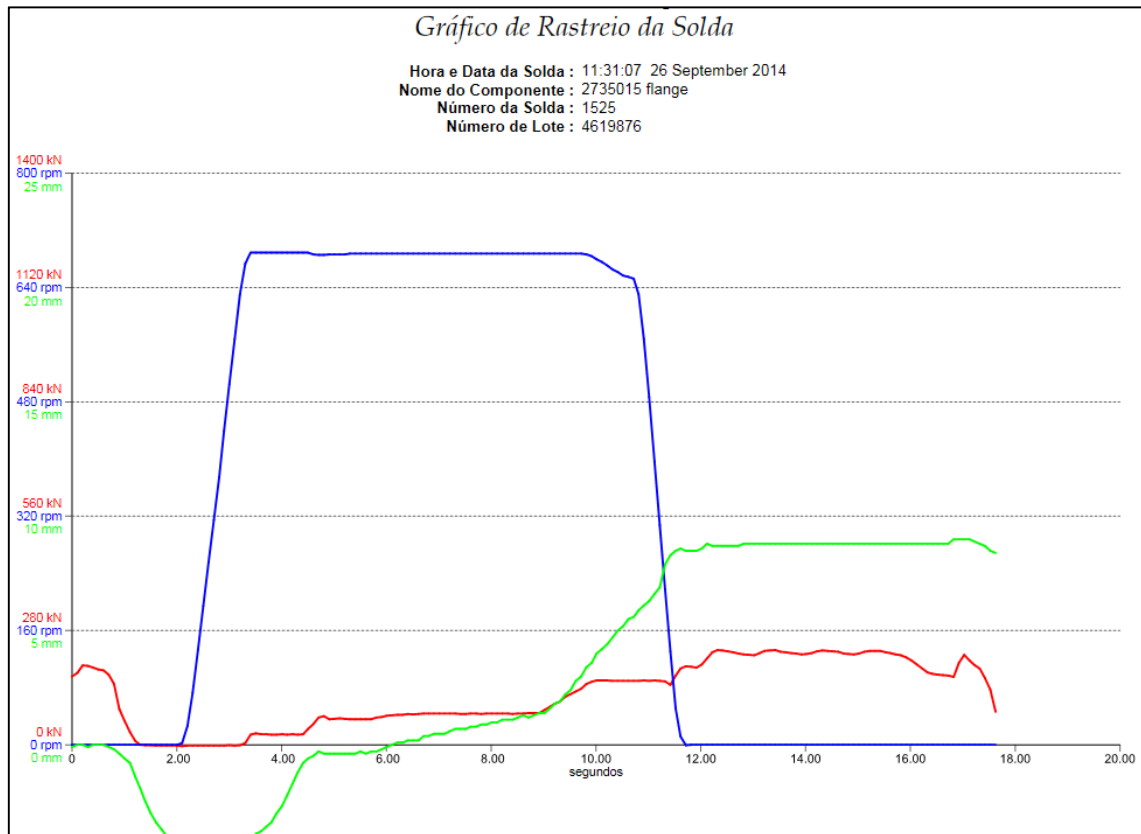


Figura 3-15 Soldagem por fricção entre o tubo e o flange

3.4.4 Normas utilizadas para avaliação da junta soldada

A avaliação das propriedades mecânicas das juntas soldadas foi realizada fazendo uso de cinco juntas soldadas em dois conjuntos. O primeiro conjunto refere-se as soldagens feitas pelo processo MAG e o segundo pela soldagem por fricção. Os ensaios realizados foram ensaio de tração segundo a norma ASTM E8/8M, ensaios de dobramento realizados segundo a norma ASTM E290 e ensaio hidrostático segundo a norma NFPA-T2.6.1 R2-2000.

As análises macrográficas, micrográficas e o perfil de microdurezas foram todos realizados em uma seção transversal das soldas realizadas, sendo o perfil de microdurezas realizado segundo a norma ASTM E 384.

3.4.5 Corpos de prova

Os corpos de prova foram codificados de forma que os primeiros sete dígitos referem-se a numeração do laboratório, o oitavo dígito tem a referência da letra T para ensaio de tração e D para dobramento. O nono dígito refere-se ao

processo sendo M para MAG e F para Fricção, e o décimo dígito é a sequência numérica dos corpos de prova.

As figuras (Figura 3-16 e Figura 3-17) representam a localização e geometria dos corpos de prova utilizados para os ensaios de tração e ensaios de dobramento, respectivamente.

A localização número um indica a seção do tubo, a dois o corpo de prova para os ensaios de tração e três o corpo de prova para o ensaio de dobramento.

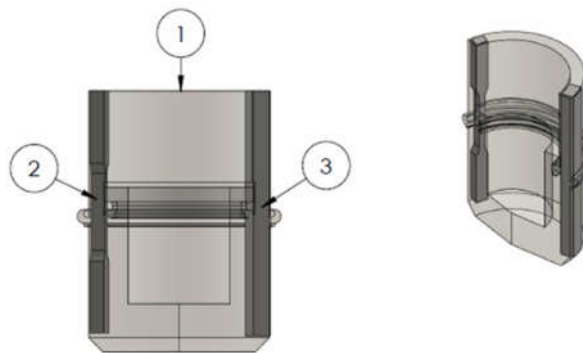


Figura 3-16 Localização da retirada dos corpos de prova para ensaio de tração e dobramento

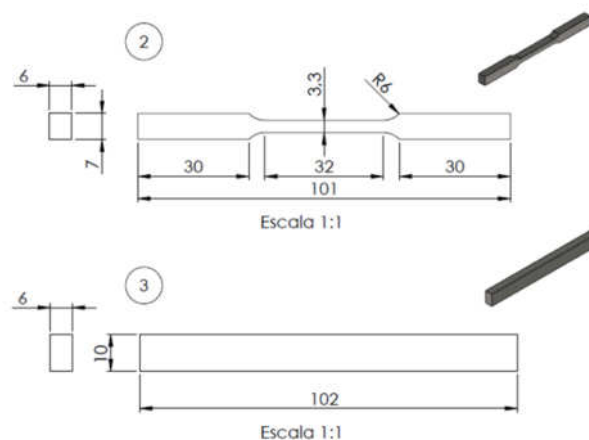


Figura 3-17 Geometria dos corpos de prova para ensaio de tração e dobramento

3.4.6 Ensaio Mecânicos:

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de Ensaio Eletromecânica, marca Instron com capacidade nominal de 200 kN com célula de carga de mesma capacidade e resolução de 0,0005 kN para célula de carga, e 0,005 mm para o sensor de deslocamento.

Os ensaios de dobramento foram realizados em uma máquina eletromecânica marca Instron modelo 5585H. Para o ensaio de perfil de microdurezas foi utilizado o equipamento Microdurômetro, marca INSTRON, modelo Tukon 2100B, com carga de 0,3 kgf durante 30 segundos e resolução de 0,2 HV.

Os ensaios hidrostáticos foram realizados através de equipamentos e dispositivos exclusivos pertencentes ao LAMEF.

3.4.6.1 Ensaio de Tração:

Consiste em submeter os corpos de prova a uma carga axial ao longo do comprimento do corpo de prova, Figura 3-18. A resistência a tração foi calculada dividindo a carga máxima pela área da seção reduzida do corpo de prova medido antes do ensaio. A taxa de deslocamento da máquina foi de 0,375 mm/min e a base de medida (L_0) para determinação do alongamento foi de 25 mm.

Critério de aceitabilidade – Segundo a norma ASTM E8/8M o ensaio de tração será considerado válido se:

- A fratura deve ocorrer dentro da região onde a seção é reduzida.
- A fratura não pode ocorrer a uma distância menor que duas vezes a largura da amostra com relação aos pontos de fixação da amostra.
- O limite de resistência à tração registrado no ensaio deve ser maior ou igual ao limite de resistência mínimo especificado para o material do tubo.



Figura 3-18 Posicionamento e fixação do corpo de prova no ensaio de Tração.

3.4.6.2 Ensaio de Dobramento

Método – Segundo a norma ASTM E290 os corpos de prova devem ser dobrados de forma guiada Figura 3-19, a distância entre os dois apoios é de 40 mm com um êmbolo com raio de 12 mm e raio do fundo onde a amostra é guiada de 20 mm. Os corpos de prova para dobramento devem ser posicionados com o êmbolo no meio da junta e a seção transversal da soldagem perpendicular a abertura da matriz. O êmbolo deve ser forçado dentro da abertura até que a amostra se curve na forma de U. A taxa de deslocamento da máquina foi de 1 mm/min, sendo ensaio quando completo (ângulo de dobra de 180°) realizado em duas etapas.

Critério de aceitabilidade – Para a avaliação dos corpos de prova dobrados foi utilizado o critério da norma API 1104 que trata da caracterização mecânica de tubos da classe API soldados. Segundo a norma API 1104 a amostra é aprovada se:

- Nenhuma imperfeição exceder 1/8" (3 mm) ou a metade da parede nominal do tubo, sendo válida para qualquer direção da zona de soldagem.
- Fissuras que se originam no raio exterior ao longo das arestas do espécime que são menores que 1/4" (6 mm) não devem ser consideradas a menos que imperfeições evidentes sejam notadas.
-

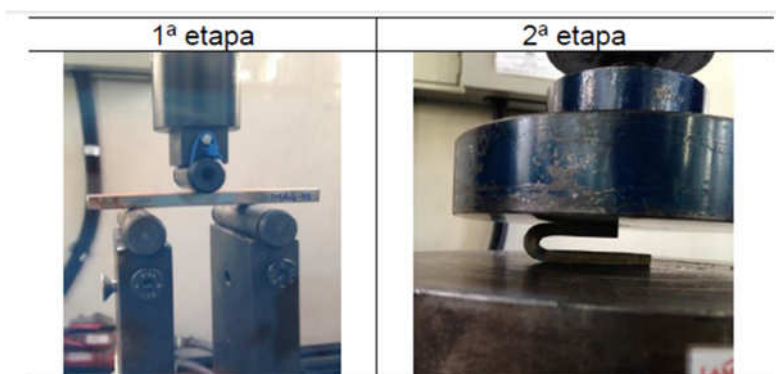


Figura 3-19 Posicionamento dos corpos de prova para o ensaio de dobramento

3.4.6.3 Ensaio Hidrostático

Este ensaio tem por finalidade submeter os conjuntos soldados pelo processo MAG e Fricção a pressão máxima de trabalho quando montado no cilindro hidráulico.

Para a realização do ensaio foram utilizados equipamentos e dispositivos pertencentes ao LAMEF. A pressão foi aplicada através de uma bomba hidropneumática de capacidade máxima de 1400 bar, instrumentada com uma célula de pressão para 1599 bar. Os dados foram registrados com sistema de aquisição Lynx. As amostras foram submetidas a um incremento constante de pressão até 1400 bar ou o máximo suportado pelo conjunto.

O sistema montado para o ensaio pode ser observado na Figura 3-22, os conjuntos soldados no processo MAG e fricção na Figura 3-20, e os flanges e dispositivos para utilizados para o fechamento do conjunto na Figura 3-21.

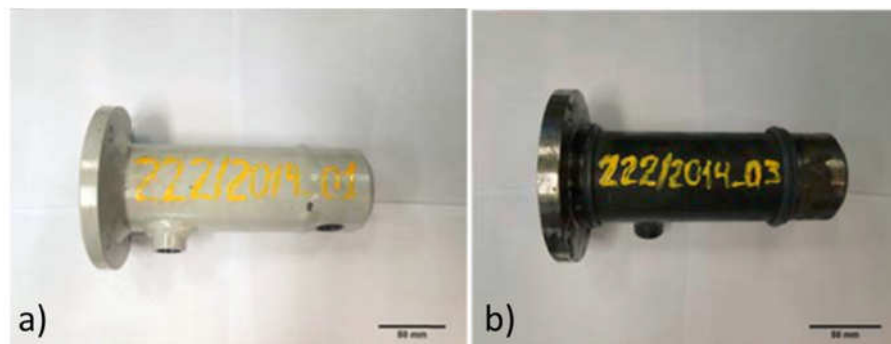


Figura 3-20 Conjuntos soldados pelo processo a) MAG e b) Fricção



Figura 3-21 Dispositivos e peças utilizadas para o ensaio hidrostático

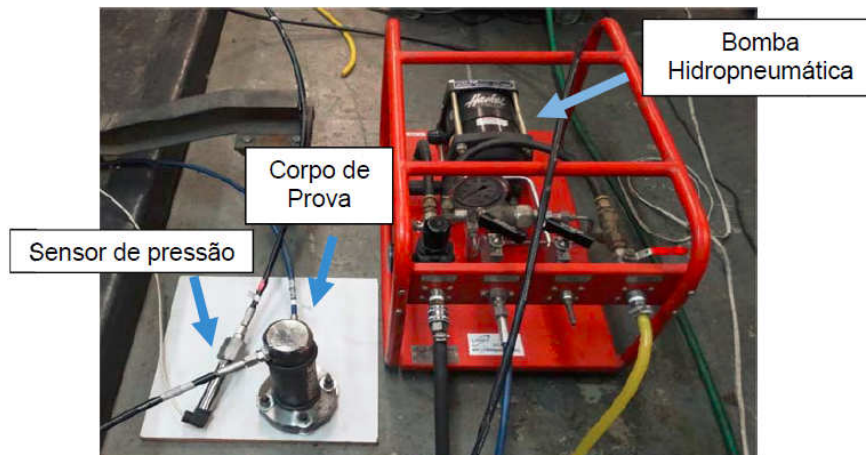


Figura 3-22 Sistema montado para o ensaio hidrostático

3.4.7 Ensaio Metalográficos:

Na etapa de avaliação macrográfica e micrográfica procurou-se relacionar as propriedades mecânicas com a estrutura metalúrgica.

A preparação das amostras para análise macrográfica foi através do uso de lixas a água com granulometria de 220, 400 e 600. As amostras foram lixadas em uma direção e a cada mudança de granulometria de lixa a peça foi girada 90° foram sendo eliminadas todas as marcas deixadas pela lixa anterior. A preparação para a análise micrográfica foi realizada com o uso de lixas a água com granulometria de 220, 400, 600, 1000 e 1200, executando a mudança de direção em 90° a cada mudança de lixa, para o acabamento final da peça foi utilizado polimento manual com pasta diamantada de 2 μm e 1 μm .

3.4.7.1 Ensaio de microdureza Vickers (HV):

Método – Para o ensaio de microdureza Vickers (HV) foram realizados perfis de microdurezas com carga de 0,3 kgf e distância entre as endentações de 0,3 mm Os perfis de microdureza foram obtidos na seção transversal da solda, abrangendo a material base de ambos os lados e toda a região da solda.

3.4.7.2 Análise Macrográfica:

Nesta etapa foram avaliados os possíveis defeitos existentes nas juntas soldadas como falta de preenchimento, falta de adesão e presença de impurezas nas regiões de interface das soldas, as características das diferentes regiões das soldas como a ZTA e o escoamento do material plastificado.

O procedimento de ataque químico foi realizado nestas amostras com o uso de uma solução de nital 10% durante 5 segundos, após o ataque químico as amostras foram limpas com álcool etílico e secadas com o auxílio de um soprador térmico. Após o final da preparação das amostras foram obtidas imagens da superfície através de (scanning) com qualidade de 600 dpi na escala 1:1.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de Tração:

Os ensaios de tração realizados nos corpos de prova SI-180-14-T-M-1, SI-180-14-T-M-2, SI-180-14-T-M-3, SI-180-14-T-M-4, SI-180-14-T-M-5 do conjunto soldado pelo processo MAG, apresentaram uma dispersão nos resultados apresentados no gráfico Tensão x Deformação da Figura 4-1. Como resultado é possível verificar um menor percentual de alongamento nos corpos de prova SI-180-14-T-M-1, SI-180-14-T-M-2 e SI-180-14-T-M-3, sendo que todas as fraturas ocorreram na região da ZTA. Esta redução no alongamento pode ser atribuída a microestruturas frágeis presentes nesta região aliada a regiões onde não houve a perfeita adesão da interface de soldagem.

Os ensaios de tração realizados nos corpos de prova SI-180-14-T-F-1, SI-180-14-T-F-2, SI-180-14-T-F-3, SI-180-14-T-F-4, SI-180-14-T-F-5 do conjunto soldado pelo processo Fricção, não apresentaram uma dispersão significativa nos resultados apresentados no gráfico Tensão x Deformação da Figura 4-2.

Tabela 4-1 Ensaio de tração para os conjuntos soldados no processo MAG

Amostra	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%) (em 25mm)
SI-180-14-T-M-1	373,1	461,5	8,5
SI-180-14-T-M-2	370,4	504,6	14,0
SI-180-14-T-M-3	361,3	506,8	-
SI-180-14-T-M-4	409,7	545,5	14,7
SI-180-14-T-M-5	360,0	504,1	14,4
Média	374,7	504,5	12,9
Incerteza	25,5	38,3	4,9

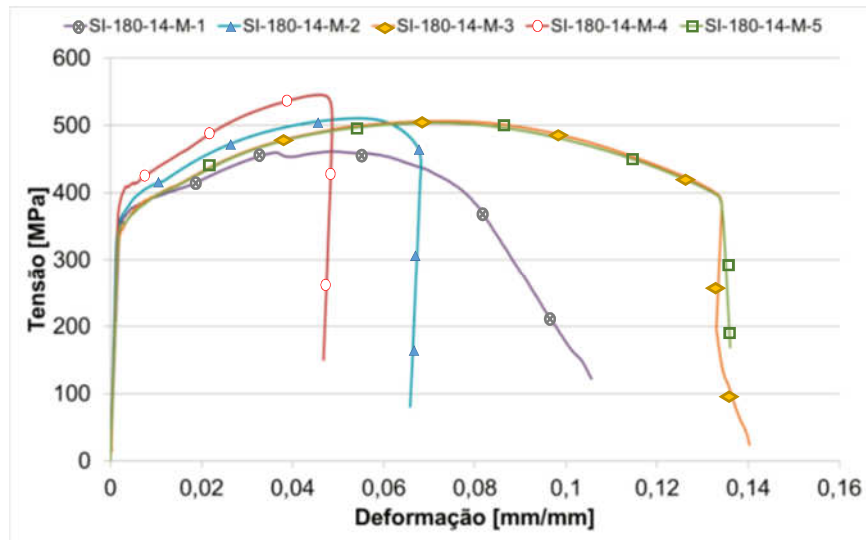


Figura 4-1 Ensaio de tração para os conjuntos soldados no processo MAG

Tabela 4-2 Ensaio de tração para os conjuntos soldados no processo Fricção

Amostra	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%) (em 25mm)
SI-180-14-T-F-1	398,4	513,1	13,7
SI-180-14-T-F-2	408,0	513,6	14,0
SI-180-14-T-F-3	364,3	523,6	13,8
SI-180-14-T-F-4	397,8	508,3	12,9
SI-180-14-T-F-5	374,6	503,8	14,0
Média	388,6	512,5	13,7
Incerteza	23,6	10,0	0,6

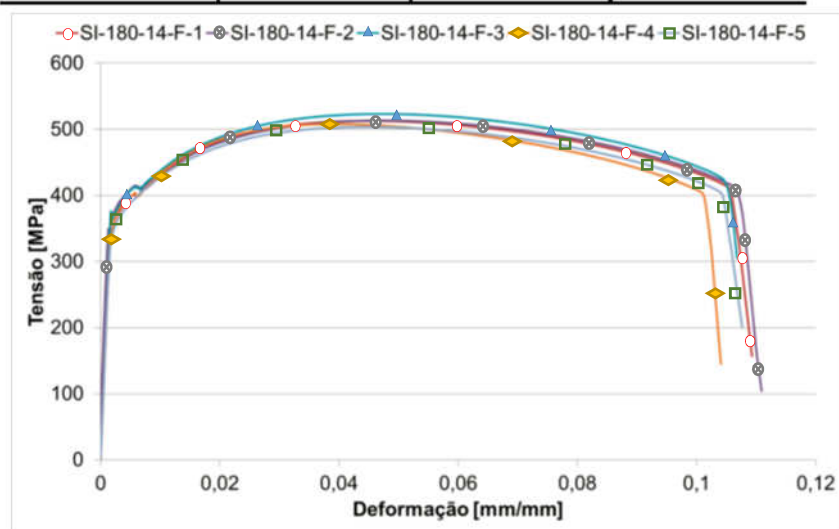


Figura 4-2 Ensaio de tração para os conjuntos soldados no processo Fricção

Analisando as tabelas (Tabela 4-1 e Tabela 4-2) observa-se que o limite de escoamento para a soldagem por fricção foi superior a solda MAG, isto pode ser atribuído a redução nos valores de microdurezas registrados na região da ZTA que diminuiram a resistência do material levando o mesmo a ruptura nesta região.

4.2 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento realizados nos corpos de prova SI-180-14-D-M-1, SI-180-14-D-M-2, SI-180-14-D-M-3, SI-180-14-D-M-4, SI-180-14-D-M-5 do conjunto soldado pelo processo MAG, apresentaram uma diferença significativa nos resultados apresentados quando comparados como os corpos de prova SI-180-14-D-F-1, SI-180-14-D-F-2, SI-180-14-D-F-3, SI-180-14-D-F-4, SI-180-14-D-F-5 do conjunto soldado pelo processo Fricção.

A diferença está no aparecimento de trincas na região de solda em todos os corpos de prova soldados pelo processo MAG antes de completar um ângulo de 60° Figura 4-3. O que não ocorreu nos corpos de prova soldados pelo processo fricção onde os corpos de provas dobraram até 180° sem a presença de trincas. Isto pode ser atribuído as zonas dendríticas colunares (Figura 4-14) apresentadas na ZTA da solda MAG indicando possíveis fragilizações nestas regiões.

Tabela 4-3 Ensaio de dobramento para os conjuntos soldados no processo MAG

CP	Ângulo de dobramento [°]	Presença de Trincas
SI-180-14-D-M-01	35	Sim
SI-180-14-D-M-02	46	Sim
SI-180-14-D-M-03	57	Sim
SI-180-14-D-M-04	6	Sim
SI-180-14-D-M-05	51	Sim



Figura 4-3 Ensaio de dobramento para os conjuntos soldados no processo MAG

Tabela 4-4 Ensaio de dobramento para os conjuntos soldados no processo

CP	Ângulo de dobramento [°]	Presença de Trincas
SI-180-14-D-F-01	180	Não
SI-180-14-D-F-02	180	Não
SI-180-14-D-F-03	180	Não
SI-180-14-D-F-04	180	Não
SI-180-14-D-F-05	180	Não

Fricção



Figura 4-4 Ensaio de dobramento para os conjuntos soldados no processo fricção

4.3 Ensaio de Microdurezas Vickers (HV):

As medições de microdurezas Vickers foram realizadas para os dois processos soldados MAG Figura 4-5 e Figura 4-6 e fricção no fundo Figura 4-7 e Figura 4-8

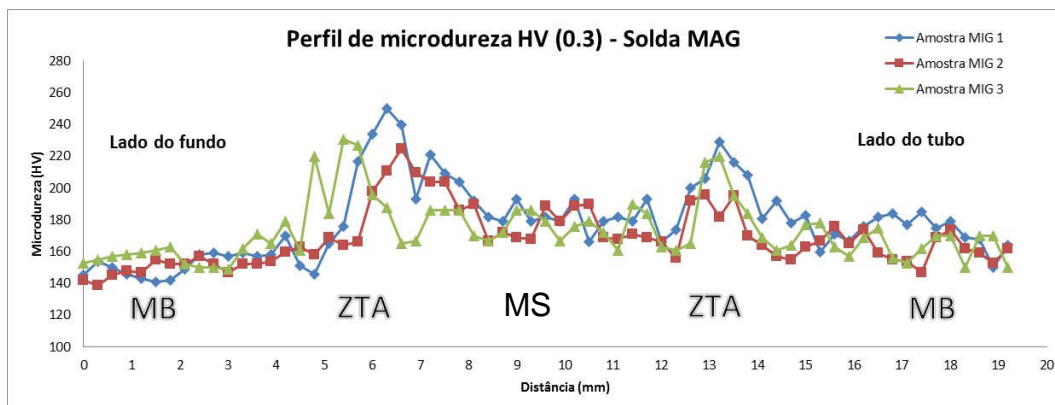


Figura 4-5 Perfil de microdureza Vickers para o processo MAG



Figura 4-6 Regiões do perfil de solda MAG

A Figura 4-5 apresenta os resultados dos perfis de microdurezas, e a Figura 4-6 o sentido das medições, mostrando também as regiões das três amostras realizadas nos conjuntos soldados pelo processo MAG entre o tubo e o fundo. O perfil de durezas para as três amostras pode ser apresentado em conjunto devido à similaridade do mesmo, sendo dividido entre as principais regiões da solda, (MB do tubo, ZTA do tubo, MS, ZTA do fundo e MB do fundo). Sendo MB (metal base), ZTA (zona termicamente afetada) e MS (metal de solda = metal do arame + diluição do metal base).

Analisando o gráfico da esquerda para a direita é possível observar uma dureza na faixa de 150 HV para o material de base do fundo, seguida de um aumento de dureza para uma faixa de 240HV na ZTA devido ao refinamento do

grão obtido em função da recristalização ver Figura 4-12. Nas regiões da ZTA mais próxima a MS do arame é possível verificar novamente uma diminuição no perfil de durezas para 180HV onde ocorreu crescimento de grão perlítico ferrítico comentado na Figura 4-13. Para o lado do tubo observa-se o mesmo perfil ocorrido no lado fundo, ou seja, uma dureza em torno de 180HV para a região próxima a MA seguida de um pico de 220HV para a região do refinamento de grão voltando para uma redução na faixa de 160HV para o material base.

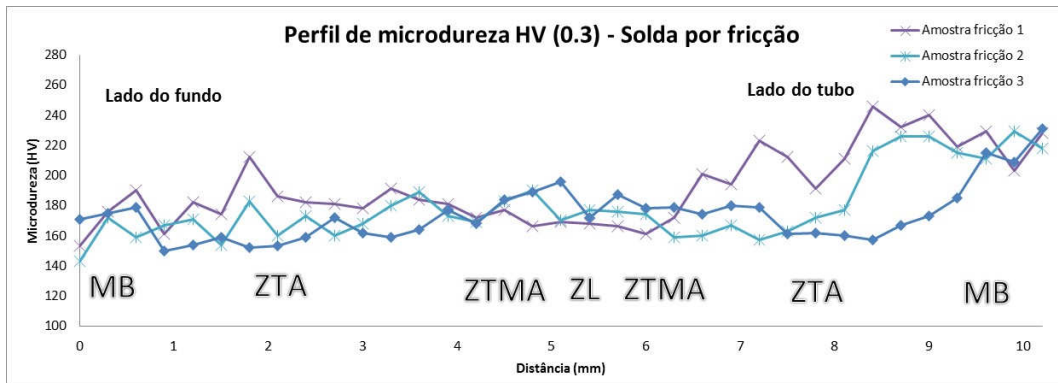


Figura 4-7 Perfil de microdureza Vickers para o processo fricção



Figura 4-8 Regiões do perfil de solda fricção

A Figura 4-7 apresenta os resultados dos perfis de microdurezas, e a Figura 4-8 o sentido das medições, mostrando também as regiões das três amostras realizadas nos conjuntos soldados pelo processo fricção entre o tubo e o fundo. Como resultado é possível avaliar pequenas variações nas diferentes regiões da solda, sendo evidenciada uma leve elevação nos valores do perfil de microdurezas nas regiões da ZTA do fundo e do tubo na faixa de 220 HV em função do refinamento de grão ocorrido nesta região. Nas regiões da ZTMA e ZL observa-se uma redução da dureza para uma faixa 180HV devido ao aumento do tamanho de

grão nestas regiões. Na região da ZTA do tubo percebe-se um aumento de dureza chegando a 240HV em função do refinamento de grãos ocorrido nesta região que foi maior que na região da ZTA do fundo.

4.4 Caracterização macrográfica das Juntas Soldadas:

As principais regiões da solda pelo processo MAG e fricção foram numeradas em uma sequência de 1 a 7, sendo que a numeração 1 refere-se ao lado da peça fundo ou flange e a 7 ao lado do tubo.

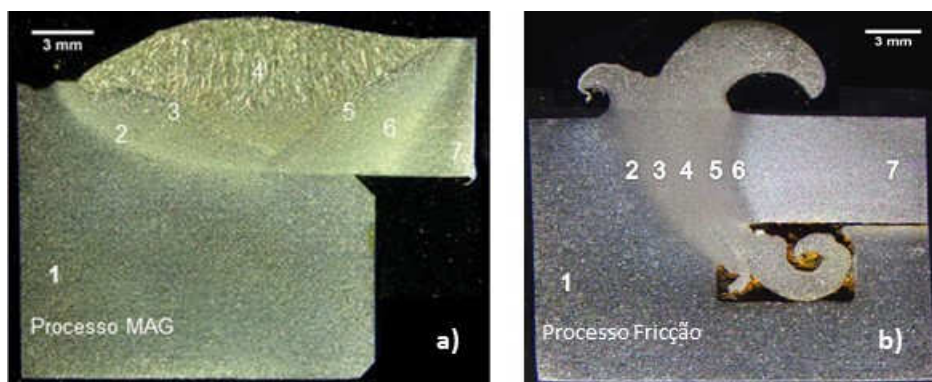


Figura 4-9 Macrografia da junta fundo e tubo nos processos a) MAG e b) fricção

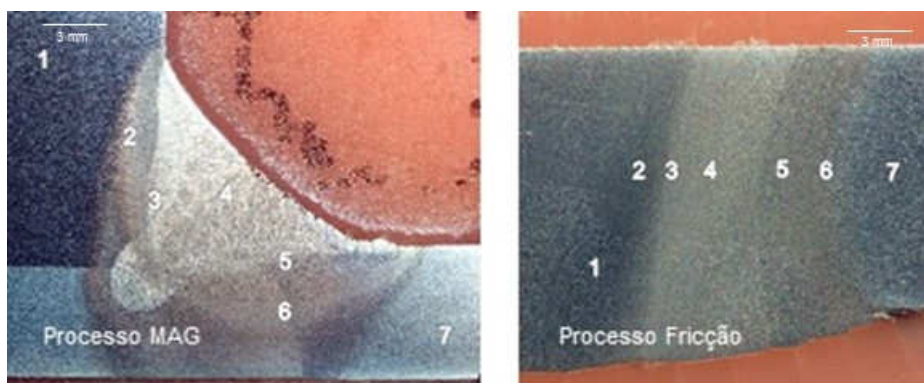


Figura 4-10 Macrografia da junta flange e tubo nos processos c) MAG e d) fricção

Para o processo de solda MAG Figura 4-9 a) e Figura 4-10 c) as regiões apresentadas com os números 1 e 7 caracterizam o material base inalterado pela soldagem da peça fundo ou flange e tubo, respectivamente. Já as regiões apresentadas pelos números 2 e 6 representam a ZTA (extensão média: 3mm) do fundo ou flange com e tubo, respectivamente, onde houveram alterações microestruturais (transformações parciais) e no perfil de microdurezas por efeito

da entrada de calor. As regiões apresentadas pelos números 3 e 5 referem-se a zona de ligação (entre a zona fundida e ZTA), e a região número 4 é refere-se ao MS, ou seja, o arame de solda fundido.

Para o processo de solda por fricção Figura 4-9 b) e Figura 4-10 d) as regiões apresentadas com os números 1 e 7 caracterizam o material base inalterado pela soldagem da peça fundo ou flange e tubo, respectivamente. As regiões apresentadas pelos números 2 e 6 representam a ZTA (extensão média: 7mm) do fundo ou flange e tubo, respectivamente, onde houveram alterações microestruturais (transformações parciais) e no perfil de microdurezas por efeito da entrada de calor. As regiões apresentadas pelos números 3 e 5 referem-se a ZTMA do fundo ou flange e tubo, respectivamente, região onde houve o efeito mecânico combinado com a entrada de calor implicando em alterações microestruturais e no perfil de microdurezas desta área. A região apresentada pelo número 6 é a região de ligação entre o fundo ou flange e tubo.

Nas Figura 4-9 b) também é possível analisar a formação e a geometria da rebarba ou o excesso de material plastificado do tubo e fundo onde se observa uma maior formação de material plastificado pelo tubo e uma menor pelo fundo assim como a geometria usinada do fundo para encapsular a rebarba interna do tubo já comentada na Figura 3-3.

4.5 Caracterização micrográfica das Juntas Soldadas:

A microestruturas apresentadas a seguir, com os aumentos no lado a) 60 μ m e no lado b) 30 μ m mostram as diferentes regiões das juntas soldadas pelo processo MAG e fricção que seguem a mesma ordem apresentada na Figura 4-9 a) e b).

4.5.1 Solda MAG:

Na Figura 4-11 são apresentadas as microestruturas do material base do fundo, região indicada pelo número 1 na Figura 4-9 a). Observa-se que esta região não foi alterada pelo processamento da solda MAG, sendo composta

essencialmente de ferrita e perlita e que ainda conserva um bandeamento associado a laminação da barra.

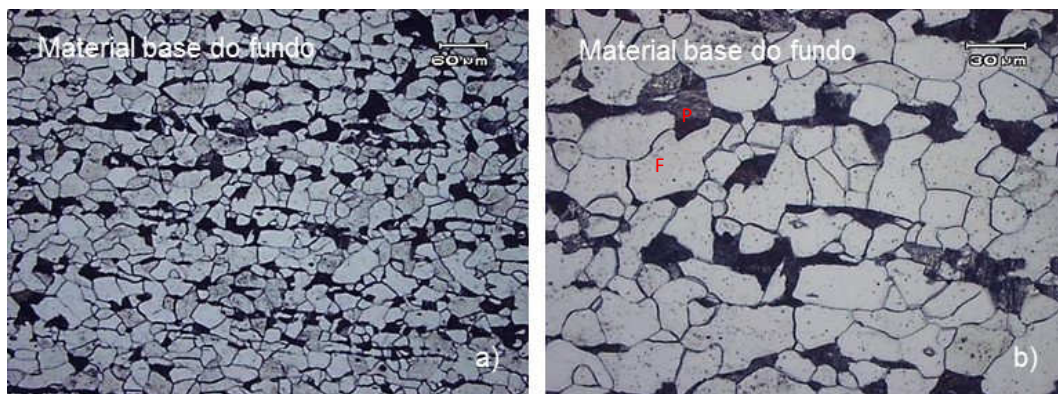


Figura 4-11 Micrografia do material base do fundo composta de ferrita (F) e perlita (P) com tamanho de grão entre 7-8 (ASTME112). Microestrutura não afetada pelo processamento da solda MAG; observa-se ainda bandeamento originário da laminação da barra. a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-12 observa-se a microestrutura da ZTA do fundo, região indicada pelo número 2 na Figura 4-9 a). Percebe-se redução no tamanho do grão ferrítico devido ao aumento de temperatura (1100°C e 900°C) proveniente do processamento da solda MAG. Nesta região, a transformação da ferrita para austenita gera uma deformação menor que a região 3 (da Figura 4-19 a). Associada a temperatura e tempos menores, esta deformação se mostra insuficiente para que haja recristalização primária. Logo, a austenita obtida através do aquecimento é recuperada e se transforma em ferrita e/ou perlita com pequeno tamanho de grão (SÁ, 1999). A microestrutura é composta por ferrita e perlita.

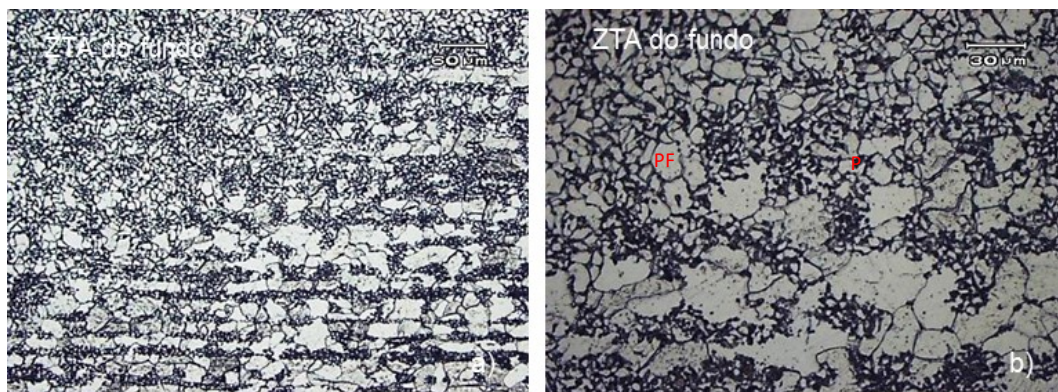


Figura 4-12 Micrografia da ZTA do fundo composta de ferrita poligonal (PF) e perlita (P) com redução do tamanho de grão ferrítico. Tamanho de grão entre 7 a 9 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-13 observa-se a região de ligação entre o material do fundo e o material de adição da solda MAG, região indicada pelo número 3 na Figura 4-9 a). Percebe-se um aumento no tamanho de grão nesta região. Este fenômeno ocorre entre 1100°C e 1500°C e é influenciado pela transformação da fase ferrita para a austenita durante o aquecimento. Este crescimento de grão dependerá do tempo de permanência em temperatura acima de 1300°C (SÁ, 1999). A microestrutura é composta por perlita grosseira e ferrita no contorno de grão.

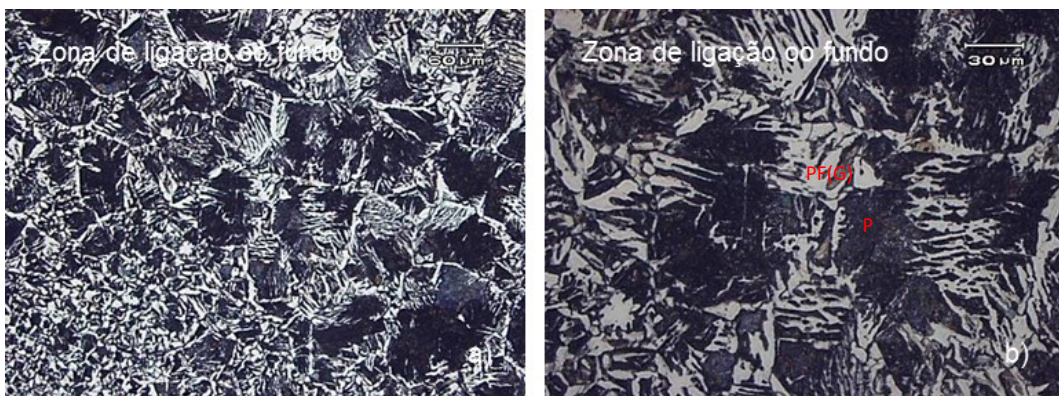


Figura 4-13 Micrografia da zona de ligação entre fundo e o material de adição. Microestrutura é composta por perlita (P) e ferrita no contorno de grão (PF (G)). Tamanho de grão entre 5-6 (ASTME112). a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-14 observa-se a microestrutura do metal de solda composta por estrutura epitaxial colunar do metal de solda solidificado, ferrita acicular, ferrita de Widmanstätten, ferrita no contorno de grão, agregado de carbonetos e perlita, região indicada pelo número 4 na Figura 4-9 a). A microestrutura da zona fundida do metal de baixo carbono e baixa liga é resultado do crescimento epitaxial colunar do metal de solda solidificado, sendo influenciado pelo estado inicial da austenita (composição, tamanho de grão, micro segregações e estado de deformações), das condições de aquecimento e resfriamento, bem como do efeito dos elementos de liga. (MODENESI, 2004)

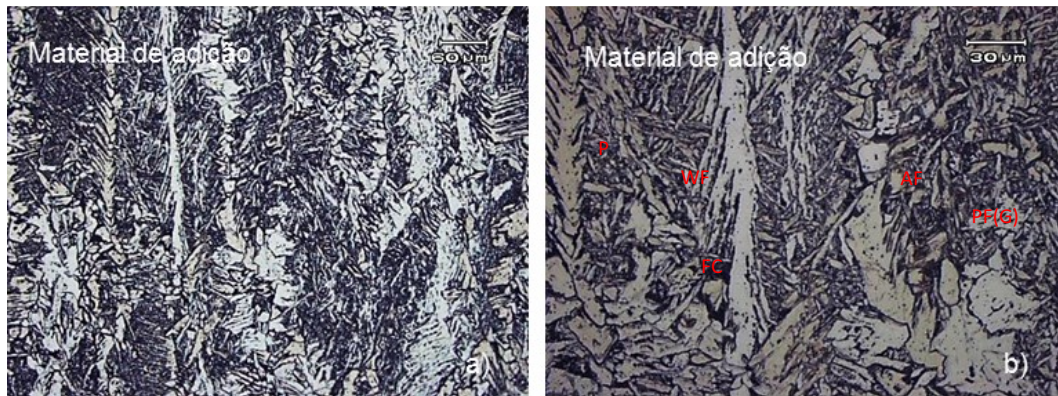


Figura 4-14 Micrografia do material de adição. Estrutura epitaxial colunar do metal de solda solidificado, ferrita acicular (AF), ferrita de Widmanstätten (WF), ferrita no contorno de grão (PF (G)), agregado de carbonetos (FC) e perlita (P).

Na Figura 4-15 observa-se a microestrutura na região de ligação entre o material do tubo e o material de adição da solda MAG, região indicada pelo número 5 na Figura 4-9 a). Assim como na Figura 4-13 observa-se um aumento no tamanho de grão nesta região devido ao aquecimento elevado. A microestrutura é composta por perlita e ferrita.



Figura 4-15 Micrografia da zona de ligação entre o tubo e o material de adição. Microestrutura formada por perlita (P) e ferrita (F) com tamanho de grão entre 9-10 (ASTM E112). a) 60 μ m e b) 30 μ m.

Na Figura 4-16 observa-se a microestrutura da ZTA do tubo, região indicada pelo número 6 na Figura 4-9 a). Assim como na Figura 4-12 observa-se uma redução no tamanho do grão ferrítico devido a calor proveniente do processamento da solda MAG, a microestrutura é composta por ferrita poligonal (PF) e perlita (P).

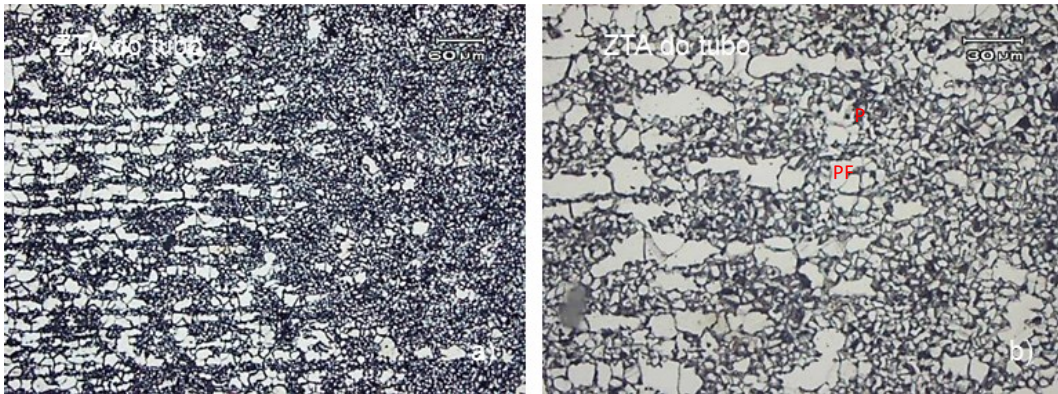


Figura 4-16 Micrografia da ZTA do tubo composta de ferrita poligonal (PF) e perlita (P) com redução do tamanho de grão ferrítico. Tamanho de grão entre 9-11 (ASTM E112) a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-17 são apresentadas as microestruturas da material base do tubo, região indicada pelo número 7 na Figura 4-9 a). Estrutura inalterada pelo processamento da solda MAG, composta de ferrita e perlita apresentando forte alinhamento de grãos originário da laminação do tubo.

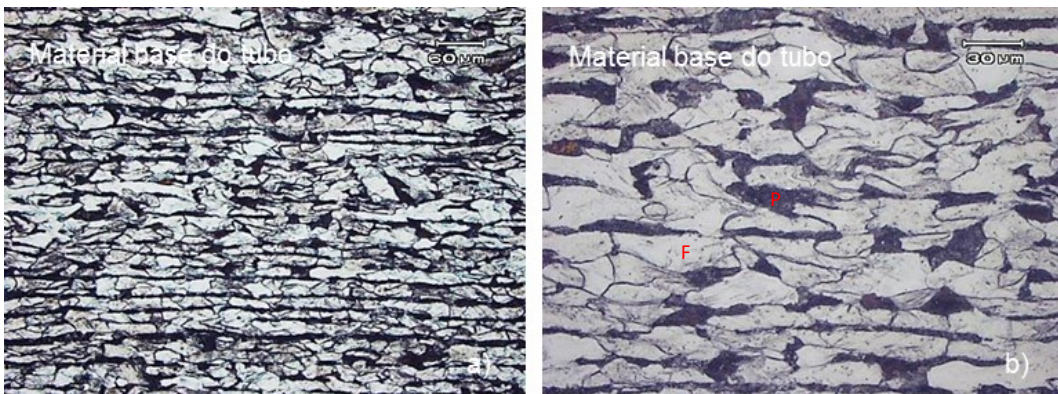


Figura 4-17 Micrografia do material base do tubo composto de ferrita (F) e perlita (P). Microestrutura não afetada pelo processamento da solda MAG; observa-se ainda forte alinhamento de grãos originário da laminação do tubo. Tamanho de grão entre 7-8 (ASTM E112) a) 60µm e b) 30µm.

4.5.2 Solda por fricção:

Na Figura 4-18 são apresentadas as microestruturas da material base do fundo, região indicada pelo número 1 na Figura 4-9 b). Observar-se que a região 1 não foi alterada pelo processamento da solda fricção e é composta essencialmente de ferrita e perlita.

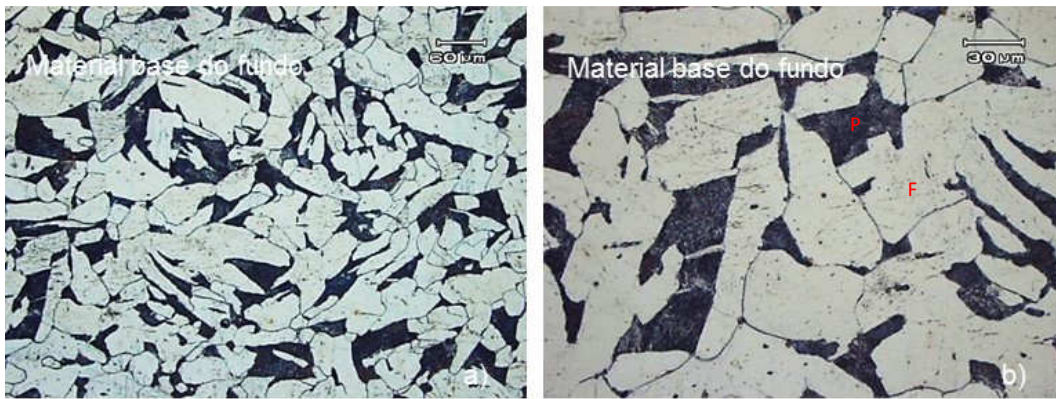


Figura 4-18 Micrografia do material base do tubo, composta de ferrita (F) e perlita (P). Tamanho de grão entre 5-6 (ASTM E112). Microestrutura não afetada pelo processamento da solda fricção. a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-19 observa-se a microestrutura da ZTA do fundo, indicada pelo número 2 na Figura 4-9 b). Percebe-se redução no tamanho do grão ferrítico devido a entrada de calor proveniente do processamento da solda, a microestrutura é composta por ferrita e perlita.

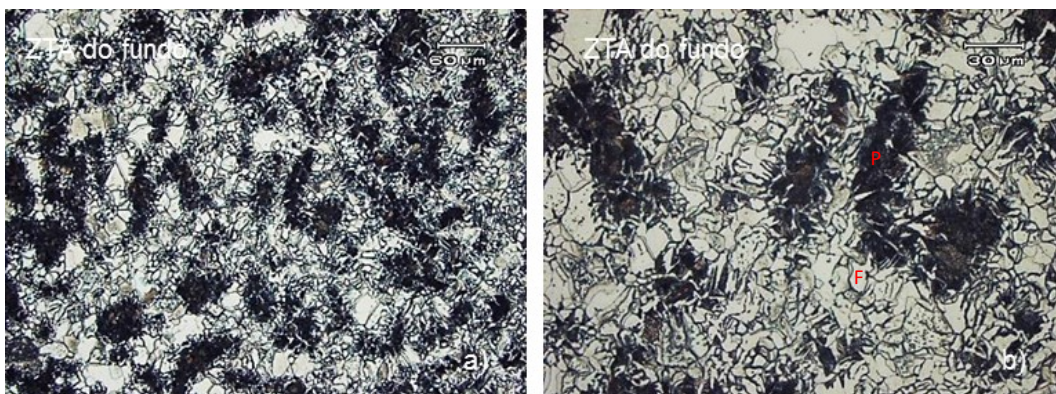


Figura 4-19 Micrografia da ZTA do fundo composta de ferrita (F) e perlita (P). Tamanho de grão entre 8-9 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-20 observa-se a microestrutura da ZTMA do fundo, indicada pelo número 3 na Figura 4-9 b), composta por perlita com aumento no tamanho de grão, e ferrita.

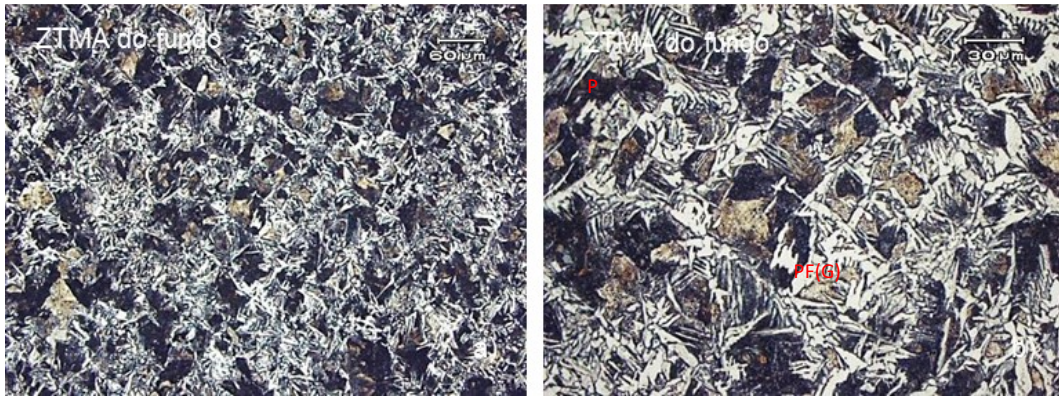


Figura 4-20 Micrografia da ZMTA do fundo composta de ferrita no contorno de grão (PF (G)) e perlita (P). Tamanho de grão entre 7-8 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-21 é apresentada a microestrutura da interface de soldagem entre o tubo e o fundo indicada pelo número 4 na Figura 4-9 b). Microestrutura é formada por ferrita e perlita.

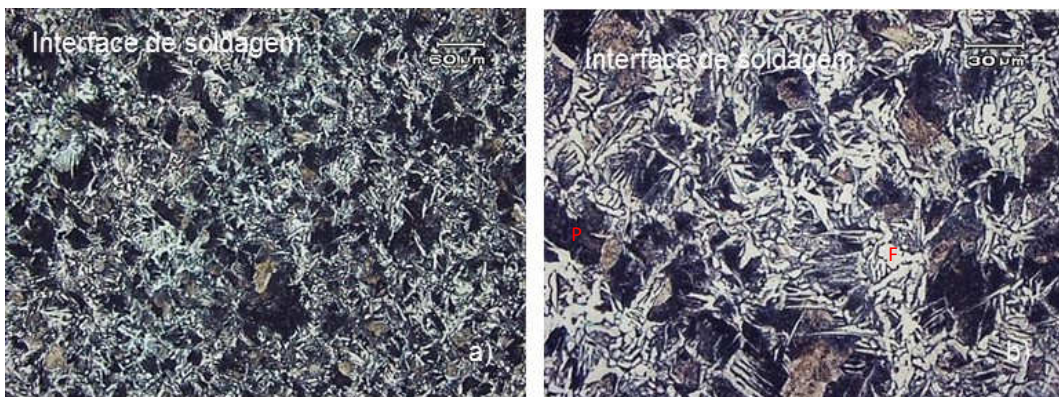


Figura 4-21 Micrografia da interface de soldagem entre o fundo e o tubo. Microestrutura é formada por ferrita (F) e perlita (P). Tamanho de grão entre 8-9 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-22 observa-se a microestrutura da ZMTA do tubo, indicada pelo número 5 na Figura 4-9 b), composta por perlita grosseira e ferrita.



Figura 4-22 Micrografia da ZTMA do tubo composta de ferrita no contorno de grão (PF (G)) e perlita (P). Tamanho de grão entre 8-9 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-23 observa-se a microestrutura da ZTA do tubo, indicada pelo número 6 na Figura 4-9 b). Percebe-se redução no tamanho do grão ferrítico devido a entrada de calor proveniente do processamento da solda, a microestrutura é composta por ferrita e perlita.

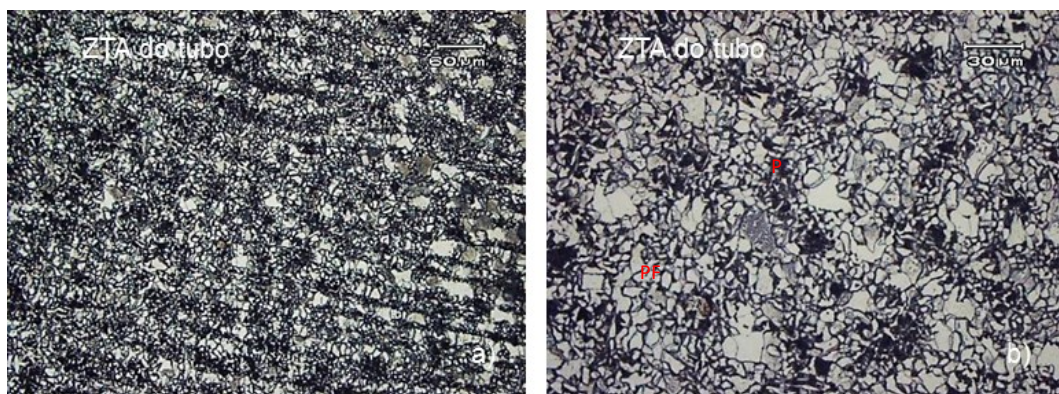


Figura 4-23 Micrografia da ZTA do tubo composta de ferrita poligonal (PF) e perlita (P). Tamanho de grão entre 8-12 (ASTM E112). a) 60µm e b) 30µm.

Na Figura 4-24 são apresentadas as microestruturas da material base do tubo, região indicada pelo número 7 na Figura 4-9 b). Observar-se que esta região não foi alterada pelo processamento da solda fricção e é composta essencialmente de ferrita e perlita apresentando forte alinhamento de grãos originário da laminação do tubo.

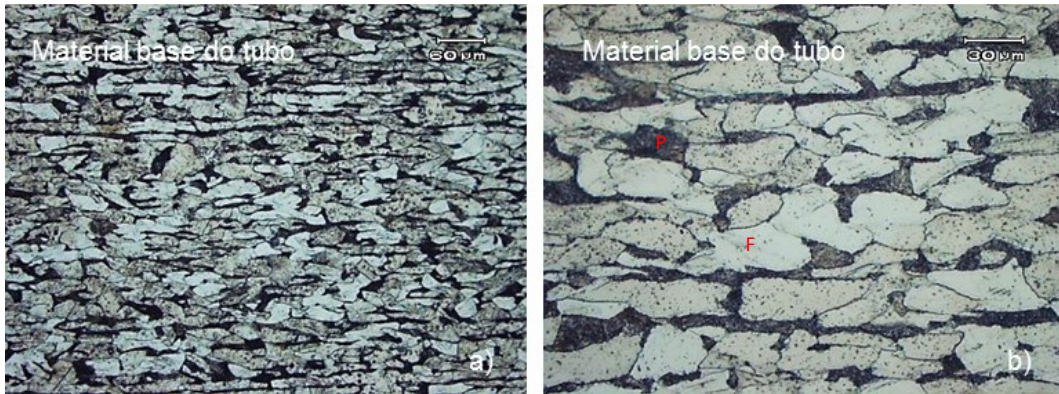


Figura 4-24 Micrografia do material base do tubo composto de ferrita (F) e perlita (P). Tamanho de grão entre 5-6 (ASTM E112). Microestrutura não afetada pelo processamento da solda fricção; observa-se ainda forte alinhamento dos grãos originário da laminação do tubo. a) 60µm e b) 30µm.

4.6 Ensaio Hidrostático

Os resultados obtidos para os conjuntos soldados estão representados nas figuras abaixo, o processo MAG na Figura 4-25 e Figura 4-26, e o processo fricção na Figura 4-27 e Figura 4-28. A pressão máxima observada para o conjunto soldado pelo processo MAG foi de 365 bar e para o processo fricção foi de 449 bar. Para os dois processos foi observada uma queda brusca na pressão pelo rompimento do sistema das vedações. Nenhum conjunto apresentou fraturas ou falhas em qualquer região do corpo metálico.

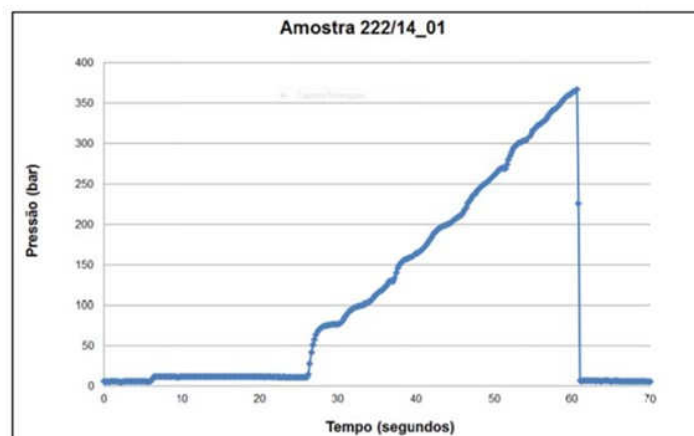


Figura 4-25 Ensaio hidrostático para os conjuntos soldados no processo MAG

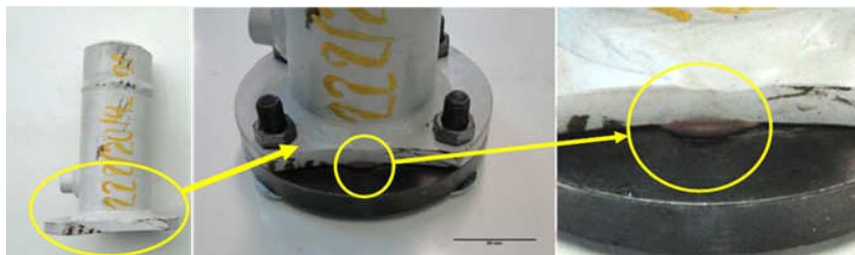


Figura 4-26 Local do dano na vedação para o conjunto soldado no processo MAG

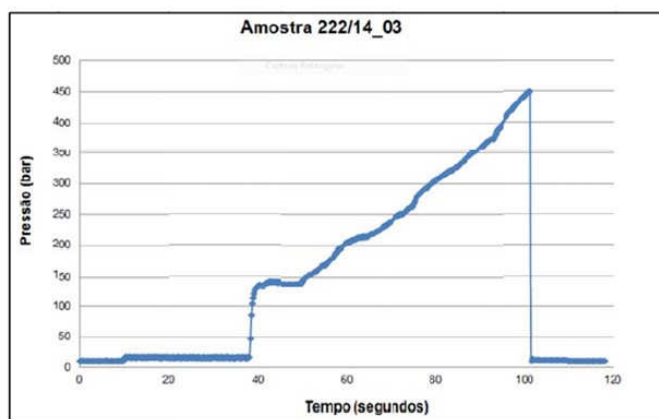


Figura 4-27 Ensaio hidrostático para os conjuntos soldados no processo Fricção



Figura 4-28 Local do dano na vedação para os conjuntos soldados no processo Fricção

4.7 Análise de custos

A análise de custo foi realizada através do sistema de custeio ABC, que permite uma melhor visualização dos custos através da análise das atividades executadas e suas respectivas relações com os objetos de custos. A Tabela 4-5 mostra os objetos de custeio considerados com os respectivos tempos de processo, e a Tabela 4-6 mostra os investimentos considerados nos processos MAG e fricção. Foram considerados nos cálculos:

- O tempo de depreciação dos equipamentos para 10 anos
- O custo dos insumos (solução de lavagem, alicate de corte, arame de solda, gás, escovas de aço, insertos e tempos de processo) utilizados na solda MAG e solda por fricção incluindo a remoção da rebarba interna e externo do tubo para as duas posições fundo e flange.

Tabela 4-5 Comparativo de tempos de processo (MAG x Fricção)

MAG			Fricção		
Etapas	Tempo máquina (seg)	Tempo homen (seg)	Etapas	Tempo máquina (seg)	Tempo homen (seg)
Flange			Flange		
Limpeza das superfícies a serem soldadas	-	30	Limpeza das superfícies a serem soldadas	-	20
Posicionamento das peças no dispositivo	-	30	Posicionamento das peças na máquina	-	20
Ponteamento	5	60	Ciclo de soldagem	17,6	-
Posicionamento do cj na máquina	-	20	Usinagem da rebarba	15	-
Corte da ponta do arame	-	5	Descarga das peças da máquina	-	20
Posicionamento da tocha no centro do raio	-	10			
Ciclo automático de solda com 1 passe	80	-			
Escovamento do cordao de solda	40	40			
Descarga da peça	-	30			
Total	125	225	Total	33	60
Fundo			Fundo		
Limpeza das superfícies a serem soldadas	-	30	Limpeza das superfícies a serem soldadas	-	20
Posicionamento das peças no dispositivo	-	30	Posicionamento das peças na máquina	-	20
Ponteamento	5	60	Ciclo de soldagem	16,9	-
Posicionamento do cj na máquina	-	30	Usinagem da rebarba	15	-
Corte da ponta do arame	-	5	Descarga das peças da máquina	-	20
Posicionamento da tocha no centro do raio	-	10			
Ciclo automático de solda com 2 passes	120	0			
Escovamento do cordao de solda	40	40			
Descarga da peça	-	30			
Total	165	235	Total	32	60
Total Geral	290	460	Total Geral	65	120

Tabela 4-6 Investimentos para os processos MAG e solda por fricção

Investimentos para o processo MAG			Investimentos para o processo de solda por fricção		
Equipamentos	Flange	Fundo	Equipamentos	Flange	Fundo
Dispositivo de ponteamento	✓	✓	Maquina de soldagem por fricção		✓
Máquina de ponteamento	✓	✓	Dispositivo (mordente e placa)	✓	✓
Maquina de soldagem MAG horizontal	-	✓	Talha elétrica com suporte para solda por fricção	✓	✓
Maquina de soldagem MAG angular 45°	✓	-			
Dispositivo de soldagem MAG	✓	✓			
Sistema de exaustão MAG	✓	✓			
Maquina de escovar MAG	✓	✓			
Talha elétrica com suporte para solda MAG	✓	✓			



Figura 4-29 Tempos de processo para a solda do flange e fundo (segundos) para os processos MAG e fricção.

A Figura 4-29 mostra os tempos de processo para a solda do flange e fundo (segundos) para os processos de solda MAG e fricção. Estas reduções de processo (74% para o flange e 77% para o fundo) foram obtidas basicamente pela eliminação das movimentações de peças nas operações de ponteamto, e solda existentes no processo MAG, o que não ocorre na solda por fricção. Além disso observa-se uma redução no processo MAG maior na solda do fundo do que no flange; isto ocorreu em função do tempo de ciclo da soldagem MAG do fundo ser maior (120 segundos em dois passes de solda) do que no flange (80 segundos em um passe de solda).

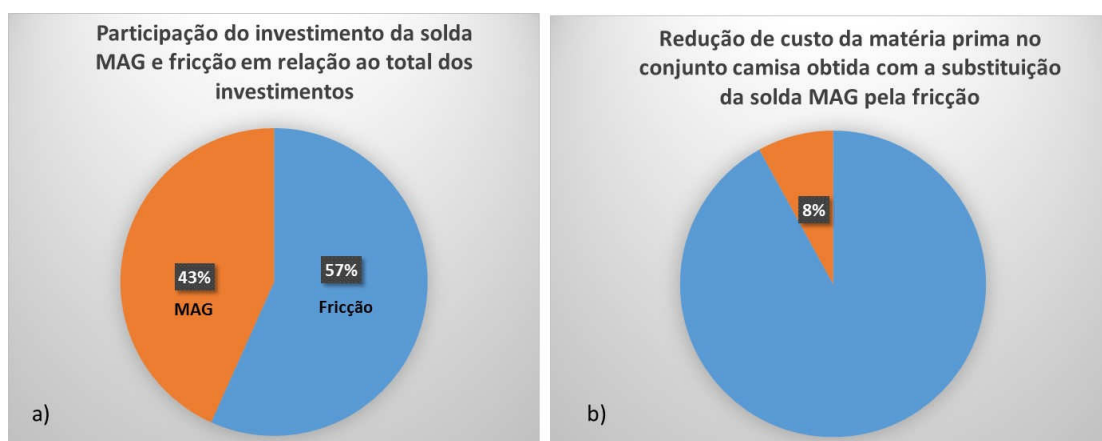


Figura 4-30 a) Participação do investimento da solda MAG e fricção em relação ao total dos investimentos b) Redução de custo da matéria prima no conjunto camisa obtida com a substituição da solda MAG pela fricção

A Figura 4-30 a) mostra a participação do investimento da solda MAG e solda fricção em relação ao total dos investimentos. Observa-se que mesmo considerando duas máquinas de solda MAG e duas soldas de ponteamto (3.4.1), o investimento no processo de solda por fricção ainda é maior. A Figura 4-30 b) mostra a redução de custo da matéria prima no conjunto camisa obtida com a substituição da solda MAG pela fricção. Grande parte desta redução foi obtida pela eliminação da usinagem do raio de solda e faceamento no tubo necessárias para a solda MAG, ou seja, para a solda fricção o tubo só precisa ser cortado (serra automática). O fundo e o flange tiveram um pequeno acréscimo de material em função da modificação no perfil da junta (3.3).

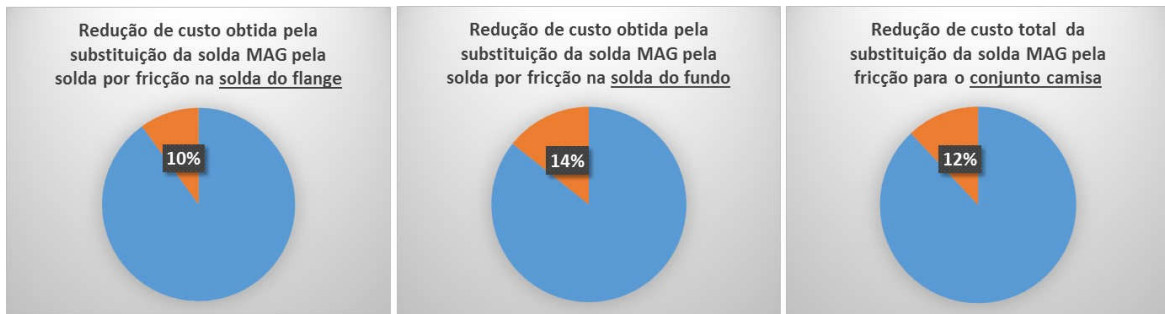


Figura 4-31 Redução de custo obtida pela substituição da solda MAG pela solda por fricção na solda do flange, do fundo e para o conjunto camisa.

A Figura 4-30 mostra a redução de custo obtida pela substituição da solda MAG pela solda por fricção na solda do flange, do fundo e para o conjunto camisa. Observa-se uma redução maior para o fundo; isto ocorreu em função do aumento do tempo de processo MAG para esta peça (solda em dois passes) que também aumentou o consumo de insumos (gás e arame de solda). A redução de custo total pela substituição da solda MAG pela solda por fricção no conjunto camisa foi de 12%.

4.8 Considerações Finais

Embora haja uma consciência e comprovação que a soldagem por fricção é um processo de soldagem mais econômico que os tradicionais, ainda existem algumas considerações, citadas abaixo, que devem ser levadas em conta antes da aquisição deste processo.

- a) Substituição de peças forjadas ou fundidas pela soldagem por fricção para altos volume de produção. Quando se trata de milhares de peças com demanda constante e levando-se em consideração o investimento na máquina de solda por fricção, o ferramental, dispositivos, processos de corte, faceamento da superfície a ser soldada, remoção da rebarba e usinagens finais para adequações geométricas de algumas peças, a soldagem por fricção pode não ser a melhor opção. (AFW, 2015)
- b) Lotes de produção pequenos. Além da dificuldade de amortizar o valor da máquina em função do baixo volume de produção a soldagem por fricção só se justificaria neste caso pela necessidade de combinação de peças bi metálicas ou para peças de formas complexas com necessidade de fusão completa da superfície da junta. (AFW, 2015)
- c) Não ser necessária a fusão completa da superfície da junta que confere a mesma resistência máxima. Os processos tradicionais de soldagem, onde a fusão ocorre apenas no perímetro, como por exemplo, para uma haste de pistão hidráulico, não se comparam a resistência obtida pela junta soldada com fusão completa. No entanto os métodos tradicionais são frequentemente suficientemente fortes e economicamente viáveis para determinadas aplicações. (AFW, 2015).

Trazendo as considerações anteriores ao caso particular deste estudo que trata da substituição da soldagem MAG pela soldagem por fricção em tubos utilizados em cilindros hidráulicos, pode-se fazer os seguintes comentários adicionais:

- Apesar deste trabalho, não considerar substituições de peças fundidas ou forjadas, o investimento na máquina de solda por fricção, ferramentais, usinagens para modificar as juntas e usinagens para remoção da rebarba, foram compensados com a eliminação dos custos de movimentação, transporte e insumos necessários para a solda MAG. Isto resultou em uma redução de custo de 12% favorecendo desta forma a opção para a soldagem por fricção.

- A amortização do investimento na solda por fricção para esta aplicação foi de 4 anos, porém vale ressaltar o aumento de produtividade com a redução de tempo de ciclo que foi de 74% (flange e fundo), a redução dos equipamentos no processo, (substituição de 2 solda ponto e 2 soldas MAG por uma máquina de solda por fricção), e a redução do impacto ambiental associada ao processo MAG (exaustão de gases, equipamentos de proteção individual...). Os insumos relacionados ao impacto ambiental não foram considerados nos cálculos de redução de custo.
- Com relação a necessidade da fusão completa ou não da junta comentada no item c), cabe salientar que neste estudo a solda do fundo foi completa para os dois casos MAG e fricção e proporcionou maior redução de custo que a solda do flange, ou seja, se as duas soldas tivessem sido do tipo MAG horizontais (que tem maior número de passes) a economia final do projeto teria sido possivelmente maior que 12%.
- A maior economia foi obtida para o fundo em função do maior número de passes na solda MAG. Isto não ocorre para hastes de pistão hidráulico, onde a solda é realizada a partir de uma barra maciça que requer um maior número de passes de solda MAG. Talvez este seja o motivo para que a redução de custo para hastes de pistão hidráulico com a soldagem por fricção seja maior.
- Baseado em dados obtidos com a soldagem por fricção de hastes de pistão para cilindros hidráulicos, obteve-se uma economia de até 15% nos custos com aumentos de 20% sobre a resistência à tração. O tempo de usinagem também pode ser reduzido em até 15% tanto para a haste como para o olhal forjado. (BROWN, 2007).
- Em resumo a redução de custo obtida com a aplicação da solda por fricção em tubos para cilindros hidráulicos ficou em 12% que é um pouco menor que as reduções obtidas para hastes para cilindros hidráulicos que ficam até 15% segundo BROWN, 2007.

5.0 CONCLUSÕES

A substituição da solda MAG por solda por fricção, em tubos soldados para utilização em cilindros hidráulicos, comprovou ser viável economicamente e tecnicamente, pois embora o investimento inicial neste processo tenha sido maior que o processo MAG o mesmo gerou uma redução de custo de processo de 12% tendo um retorno do investimento de aproximadamente 4 anos.

Tecnicamente favorável pois os ensaios de tração, dobramento e a caracterização microestrutural mostraram uma tendência positiva para a soldagem por fricção quando comparada com a soldagem MAG.

Embora os ensaios de tração apresentassem uma perda no limite de escoamento (374 MPa para solda MAG e 388 MPa para solda fricção) em relação ao material base do tubo (483 MPa). O limite de escoamento para a soldagem por fricção foi superior a solda MAG.

Os ensaios de dobramento foram aprovados para a soldagem por fricção, enquanto que para a soldagem MAG foram reprovados em função de apresentarem trincas na interface de soldagem.

A largura da ZTA da solda fricção ficou em média 50% menor que a solda MAG. Na solda por fricção foi observado apenas crescimento de grão ferrítico junto as interfaces de soldagem, e refino de grão nas regiões das ZTA's.

No ensaio hidrostático não foi observada diferença significativa nos resultados entre os dois processos MAG e fricção pois ambos ultrapassaram a pressão máxima (210 bar) requerida para a aplicação desta camisa no cilindro hidráulico. O rompimento ocorreu na região das vedações com 365 bar para solda MAG e 449 bar para solda fricção, já que a vedação tem uma pressão de trabalho limitada a 400 bar.

O limite de escoamento encontrado nos processos de solda equivale a uma pressão resistiva interna máxima da camisa de 736 bar para a solda MAG e 766 bar para a solda por fricção, que quando comparada com a pressão máxima de trabalho desta aplicação (210bar) resulta em um fator de segurança de 3,5 e 3,6 respectivamente.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFW. **The Friction Welding Advantage in Overcoming Challenges with Hydraulic Cylinder Rod Manufacturing by American Friction Welding.** [S.l.]. 2015.
- ASM Metals Handbook. [S.l.]: [s.n.], v. 6- Welding, Brazing and Soldering, 1993.
- AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. Miami. ed. Miami: Welding Handbook, 8, v. 2, 1991.
- BROWN, C. **Metallurgical Evaluation of Two Piston Rods.** [S.l.]. 2007. (#0706-20202).
- BUSCHINELLI. **Apostila do Curso de Metalurgia da Soldagem UFSC.** [S.l.]. 2015.
- COGO, G. Processamento de pinos por atrito: Avaliação de características mecânicas e metalúrgicas de aços estruturais unidos pelo processo FTPW (Friction Taper Welding), UFRGS Porto Alegre, 2011.
- DAVID ABSON, A. D. A. R. P. **Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals.** The Welding Institute. [S.l.]. June 1988.
- DE FARIA, P. E.; BACARENSE, A. Q. **Soldagem por Fricção.** [S.l.]. 2003.
- ELLIS, C. R. G. Continuous Drive Friction Welding of Mil Steel. **Welding Journal**, Abril 1972. 183s-197s.
- ENGINEERS, T. A. S. O. M. **ASME Boiler & Pressure Vessel Code.** New York: [s.n.], 2004.
- ESAB. **Apostila de Eletrodos Revestidos.** Rio de Janeiro. 2005.
- ESAB. **Apostila de soldagem MIG/MAG.** Rio de Janeiro. 2005.
- ESAB. **Apostila de soldagem TIG.** [S.l.]. 2005.
- FAES, K. et al. Influence of forge pressure on properties of friction welded pipelines using intermediate rings. **Science and Technology of Welding and Joining**, 2008 b, Abril 2008 b. 445-451.
- FARIA, P. E.; ALEXANDRE, Q. B. **Infosolda.** [S.l.]. 2003.
- FUSION, F. & G. FPE. **www.fpe.co.uk**, 2009. Disponível em: <<http://www.fpe.co.uk/processes/friction-welding>>.
- GORNI, A. A.; SILVEIRA, J. H. D.; REIS, J. S. S. METALURGIA DOS AÇOS MICROLIGADOS USADOS NA FABRICAÇÃO DE TUBOS SOLDADOS COM GRANDE DIÂMETRO. **Revista Tubo & Companhia**, v. 5:26, p. 52-63, setembro 2009.
- HAUPT, W. Ensaios Mecânicos e Caracterização Microestrutural de Tubos Soldados por Fricção. **Dissertação de Mestrado**, UFRGS, 2013.
- IIW. **International Institute of Welding.** [S.l.]. 2015.

- JETLINE. Jetline Engineering. Disponível em:
<<http://www.jetline.com/product.aspx?i=14477&c=38&pp=8&sb=0&p=0>>. Acesso em: 1 fevereiro 2015.
- KOU, S. **Welding Metallurgy - Second Edition**. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- LINDE. The Linde Group, 2015. Disponível em: <http://www.linde-gas.com.br/international/web/lg/br/likelgbr.nsf/docbyalias/nav_ind_libo>. Acesso em: 7 junho 2015.
- LIU, S.; INDACOCHEA, J. E. Weldability of Steels. In: _____ **ASM Handbook. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. [S.l.]: [s.n.], v. 1, 1993. Cap. Fabrication Characteristic of Carbon and Low-Alloy Steels.
- LUCAS, W. Met. Construct. Brit. Weld J., 1971. 293-297.
- MANNESMANN. **Salzgitter Mannesmann Line Pipe**. [S.l.].
- MARQUES, P. V.; MODENESI, J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. **UFMG**, Belo Horizonte, 2009.
- MATTEI, F. Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção. **Dissertação de Mestrado**, UFRGS Porto Alegre, 2011.
- MECATRONICA. [S.l.]: [s.n.], 2008. Acesso em: 26 Março 2008.
- MEYERS, A. Friction Hydro Pillar Processing: Bonding Mechanism and Properties. **Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig Fakultät für Maschinen und Elektrotechnik**, 2002.
- MILLER. Miller Electric. **Miller Welds**, 2015. Disponível em:
<http://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/DC16-2.pdf>. Acesso em: 2 março 2015.
- MODENESI. Soldabilidade dos Aços Transformáveis. **Tese de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2004.
- MODENESI, P. J. Normas e Qualificação em Soldagem, 27 nov. 2009. Disponível em:
<http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/procedimento_soldagem.pdf>. Acesso em: 27 Novembro 2009.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I - Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- PIRES, R. R. Efeito da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito. **Dissertação Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2007.
- RAMALHO, J. P. Infosolda, 17 junho 2009. Disponível em:
<<http://www.infosolda.com.br/artigos/proso103.pdf>>. Acesso em: 2009.
- SA, A. L. C. Análise microestrutural e de propriedades mecânicas resultantes da soldagem de um aço do tipo HY-80 com os processos de eletrodo revestido e arame tubular. **Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

- SILVA, W. A. WN Place, 2015. Disponível em: <http://www.wnplace.com/index_arquivos/friction01.htm>. Acesso em: 7 junho 2015.
- SVETSAREN. **MIG/MAG Welding**. [S.l.]: [s.n.], v. 58 n², 2003.
- The Friction Welding Advantage in Overcoming Challenges with Hydraulic Cylinder Rod Manufacturing. [S.l.]. 2013.
- THEWLIS, G. Classification and quantification of microstructures in steels. In: _____ **Materials Science and Technology**. [S.l.]: [s.n.], v. 20, 2004.
- THOMPSON. Thompson Friction Welding. Disponível em: <<http://www.thompson-friction-welding.com/friction-welding-solutions/machines/popular-machines/piston-rod-machines>>. Acesso em: 2 fevereiro 2015.
- UFMG. DEMEC, 2006. Acesso em: 6 dezembro 2006.
- YURIOKA, N. Physical Metallurgy of Steel Weldability. **ISIJ International**, v. 41:6, p. 566-571, June 2001.

7.0 APÊNDICES

Tabela 7-1 Dados da soldagem por fricção entre tubo e fundo

HORA		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.00	kN	171.3	170.9	214.8	211.2	206.5	201.0	191.6	178.1	153.1	123.6
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	0.0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.3
1.00	kN	60.7	34.8	11.4	-0.3	-2.5	-3.9	-3.6	-2.8	-2.8	-3.9
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	-0.4	-0.6	-0.9	-1.6	-2.1	-2.7	-3.2	-3.5	-3.7	-4.0
2.00	kN	-4.3	-4.3	-3.9	-4.3	-3.6	-3.2	-2.5	-0.3	0.4	2.6
	rpm	0	1	18	57	110	158	208	258	307	361
	mm	-4.1	-4.4	-4.5	-4.6	-4.7	-4.6	-4.7	-4.7	-4.8	-4.8
3.00	kN	4.8	6.6	7.0	6.6	7.4	15.0	25.8	27.4	25.3	24.5
	rpm	417	473	525	579	633	670	687	688	688	689
	mm	-4.9	-4.9	-4.9	-4.8	-4.8	-4.9	-4.1	-3.6	-3.5	-3.4
4.00	kN	24.8	25.6	25.9	25.6	25.9	25.6	25.6	45.3	62.0	57.7
	rpm	689	689	689	689	689	689	689	688	686	686
	mm	-3.1	-2.8	-2.4	-1.9	-1.5	-1.0	-0.7	-0.4	-0.3	-0.3
5.00	kN	58.2	64.4	65.9	65.9	66.2	64.8	64.8	64.0	65.1	68.4
	rpm	686	687	687	687	687	687	687	687	687	687
	mm	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1
6.00	kN	69.9	72.1	73.9	75.0	76.1	75.0	75.4	75.7	76.1	77.2
	rpm	688	688	688	687	688	688	688	688	688	688
	mm	-0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
7.00	kN	77.2	77.6	76.8	76.8	77.2	77.2	76.8	76.8	77.2	77.2
	rpm	688	688	688	688	688	688	688	688	688	688
	mm	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2
8.00	kN	77.6	76.8	77.2	77.2	76.5	77.2	76.8	77.6	77.6	76.5
	rpm	688	688	688	688	688	688	688	688	688	688
	mm	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8
9.00	kN	78.7	82.0	95.9	103.2	108.0	113.1	126.3	132.5	138.3	144.2
	rpm	688	688	688	688	688	688	688	688	687	686
	mm	1.9	2.2	2.5	2.7	3.1	3.5	3.9	4.5	5.0	5.5
10.00	kN	154.8	157.4	158.1	156.6	153.0	151.2	147.1	143.5	173.5	193.3
	rpm	679	646	583	496	405	331	234	134	43	2
	mm	6.0	6.6	7.0	7.4	7.8	8.5	9.4	10.6	10.8	10.7
11.00	kN	198.8	197.7	195.1	199.1	214.5	228.8	236.5	235.4	233.2	231.3
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	10.7	10.7	10.7	10.8	10.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
12.00	kN	226.9	225.5	223.6	222.2	220.3	219.6	224.8	231.0	233.9	232.1
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
13.00	kN	231.0	228.8	226.9	224.0	222.6	221.8	222.9	230.6	232.8	232.4
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
14.00	kN	231.3	228.0	226.6	225.5	224.0	223.3	224.4	225.5	224.0	220.0
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
15.00	kN	218.5	216.0	213.8	209.4	207.9	199.5	187.8	168.7	166.2	164.0
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9
16.00	kN	162.5	180.6	211.7	214.2	205.8	189.0	166.5	137.1	109.8	64.4
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	10.9	11.2	11.2	11.1	11.0	11.0	10.8	10.7	10.6	10.5

Tabela 7-2 Dados da soldagem por fricção entre tubo e flange

HORA		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.00	kN	168.0	176.3	194.8	193.7	189.7	185.7	183.5	172.6	150.1	87.5
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	-0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.4
1.00	kN	58.4	31.8	10.3	-0.7	-1.4	-1.4	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	-0.6	-0.8	-1.4	-1.9	-2.5	-3.0	-3.4	-3.7	-4.0	-4.2
2.00	kN	-2.8	-3.6	-3.2	-2.8	-2.5	-3.2	-3.2	-2.8	-2.8	-3.2
	rpm	0	3	26	73	133	195	256	315	375	440
	mm	-4.4	-4.5	-4.6	-4.8	-4.8	-4.8	-4.9	-4.9	-4.9	-4.9
3.00	kN	-2.1	-2.8	-2.1	4.4	25.1	28.4	26.4	27.0	25.9	25.9
	rpm	505	568	631	674	689	689	689	689	689	689
	mm	-4.9	-5.0	-5.0	-5.0	-4.4	-3.9	-3.8	-3.6	-3.4	-3.0
4.00	kN	26.7	25.9	26.7	25.9	26.3	39.4	51.8	67.1	70.4	63.3
	rpm	689	689	689	689	689	689	687	686	686	687
	mm	-2.7	-2.2	-1.7	-1.2	-0.8	-0.6	-0.5	-0.3	-0.4	-0.4
5.00	kN	64.4	65.1	64.8	63.7	63.3	62.9	62.9	62.9	67.3	69.1
	rpm	687	687	687	688	688	688	688	688	688	688
	mm	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2
6.00	kN	71.3	72.4	73.9	74.3	75.7	75.0	76.5	76.8	77.2	77.2
	rpm	688	688	688	688	688	688	688	688	688	688
	mm	-0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.5
7.00	kN	77.2	77.6	77.6	77.2	76.5	76.5	76.8	77.2	76.5	77.2
	rpm	688	688	688	688	688	688	688	688	688	688
	mm	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
8.00	kN	76.8	76.8	76.8	77.2	76.1	77.2	77.6	78.3	77.9	78.7
	rpm	688	688	688	688	688	688	688	688	688	688
	mm	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4
9.00	kN	85.6	93.7	101.4	106.9	117.8	124.8	131.0	137.2	149.7	154.5
	rpm	688	688	688	688	688	688	688	688	687	684
	mm	1.4	1.6	1.8	1.9	2.2	2.4	2.8	3.0	3.4	3.6
10.00	kN	158.5	158.5	158.5	157.4	157.7	157.0	157.7	157.7	157.0	158.5
	rpm	680	676	671	666	662	657	655	653	631	568
	mm	4.0	4.2	4.4	4.7	5.0	5.2	5.5	5.6	5.9	6.1
11.00	kN	157.7	158.1	157.7	156.3	147.5	170.2	187.8	193.3	191.8	190.0
	rpm	487	397	308	218	131	51	12	-1	0	0
	mm	6.3	6.6	6.9	7.9	8.3	8.5	8.6	8.5	8.5	8.5

HORA		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
12.00	kN	197.3	212.3	227.0	232.8	231.3	229.9	227.3	224.0	221.8	220.4
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	8.6	8.8	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.8	8.8
13.00	kN	219.3	225.1	230.2	231.7	232.4	228.8	227.7	225.5	223.7	221.5
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
14.00	kN	222.6	225.5	229.1	231.3	231.0	229.5	228.0	224.4	222.9	221.8
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
15.00	kN	224.0	228.8	230.6	230.6	230.2	227.3	225.5	221.8	220.0	214.5
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
16.00	kN	207.2	196.9	187.0	177.5	174.6	172.8	171.7	169.8	167.3	202.0
	rpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	mm	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	9.0	9.0
17.00	kN	220.8	206.5	196.3	187.2	163.5	136.0	81.1			
	rpm	0	0	0	0	0	0	0			
	mm	9.0	9.0	8.9	8.8	8.7	8.5	8.4			