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

Departamento de Metalurgia

ANÁLISE DE MICROESTRUTURAS EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS SAE 4140 E BS 4360 ATRAVÉS DO PROCESSO FHPP
(*Friction Hydro Pillar Processing*)

Diego Belato Rosado

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre
Dezembro de 2009

Dedico este Trabalho de Diplomação à minha família, à minha namorada
que está sempre ao meu lado me apoiando e motivando,
e a todos amigos que me acompanharam
durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Victoria Gorete Ferreira Belato pelo apoio incontestável e pelas lições de vida que ajudam a guiar meu caminho.

A minha tia Christiane Coutinho Rosado pelos conselhos e suporte, os quais tornaram possível a realização da minha graduação.

Ao Laboratório de Metalurgia Física e ao Professor Doutor Telmo Roberto Strohaecker, pela oportunidade de conhecer e vivenciar a prática da engenharia em diversos seguimentos.

Aos meus colegas de universidade Leandro Vanz de Andrade e Facundo Lopez, pelo auxílio e oportunidade de realizar este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS VI
LISTA DE TABELAS VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS IX
RESUMO X
ABSTRACT XI

1.0 INTRODUÇÃO ..... - 1 -

2.0 OBJETIVOS ..... - 3 -

3.0 REVISÃO DA LITERATURA ..... - 4 -
3.1 Soldagem por Atrito ..... - 4 -
3.1.1 Métodos de Geração de Energia ..... - 5 -
3.1.2 Fases do Processo ..... - 6 -
3.1.3 Parâmetros Relevantes ao Processo ..... - 12 -
3.1.4 Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito ..... - 14 -
3.2 Processo de Soldagem por Atrito com Pino Consumível ..... - 16 -
3.2.1 Descrição e Caracterização do Processo ..... - 16 -
3.2.2 Influência da Geometria do Corpo de Prova na Qualidade da Solda ..... - 18 -
3.2.3 Influência dos Parâmetros do Processo na Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Solda ..... - 20 -

4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL ..... - 22 -
4.1 Apresentação da Unidade de Solda por Atrito ..... - 22 -
4.2 Materiais Analisados ..... - 24 -
4.3 Geometria dos Corpos de Prova ..... - 25 -
4.4 Parâmetros de Soldagem ..... - 26 -
4.5 Preparação Metalográfica ..... - 27 -
4.5.1 Macrografia ..... - 28 -
4.5.2 Micrografia ..... - 28 -
4.6 Perfil de Microdureza ..... - 29 -

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... - 30 -
5.1 Considerações Iniciais .....- 30 -
5.2 Caracterização Metalográfica .....- 30 -
5.3 Ensaios de Microdureza Vickers .....- 36 -

6.0 CONCLUSÕES ..... - 40 -

7.0 CONTINUAÇÃO DO TRABALHO ..... - 42 -

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... - 43 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Sequência básica da solda por atrito. (A) Rotação de uma das peças; (B) Início da aplicação de força axial; (C) Início da união soldada; (D) Solda concluída (MARQUES 2009). ..... - 5 -

Figura 3.2 Ilustração esquemática dos parâmetros durante o processo de soldagem por atrito pelo método convencional (I: Atrito, II: Aquecimento, III: Desaceleração, IV: União) (MEYER 2002). ..... - 7 -

Figura 3.3 Anéis de deformação plástica em pinos de aço inoxidável após diferentes períodos de atrito (MEYER 2002). ..... - 8 -

Figura 3.4 Ilustração esquemática da superfície de atrito durante a fase I: Concentrações de material plastificado em um anel entre 1/2 a 2/3 de raio (MEYER 2002).- 9 -

Figura 3.5 Ilustração esquemática da superfície de atrito durante a fase II: Área Plastificada aumenta inicialmente em direção ao centro da peça e por fim para a região externa (MEYER 2002). ..... - 10 -

Figura 3.6 Ilustração esquemática das diferentes etapas de soldagem pelo processo FHPP (PINHEIRO et al. 2001). ..... - 17 -

Figura 3.7 Ilustração do processo Tapered Plug Welding (PIRES 2007). ..... - 17 -

Figura 3.8 Ilustração do processo FHPP, geometrias cilíndrica e cônica (PIRES 2007). ... . - 18 -

Figura 4.1 Apresentação da Unidade de Solda por Atrito. ..... - 22 -

Figura 4.2 Descrição dos componentes da unidade de solda por atrito. ..... - 23 -

Figura 4.3 Interface gráfica do sistema de controle e monitoramento. ..... - 24 -

Figura 4.4 Conjunto pino/bloco. ..... - 25 -

Figura 4.5 Croqui do bloco de reparo, dimensionado em milímetros. ..... - 26 -

Figura 4.6 Croqui do pino, dimensionado em milímetros. ..... - 26 -

Figura 4.7 Soldagem do corpo de prova pelo processo FHPP. ..... - 27 -

Figura 4.8 Distribuição dos perfis de dureza. ..... - 29 -

Figura 5.1 Macrografia do CP1. ..... - 31 -

Figura 5.2 Macrografia do CP2. ..... - 31 -

Figura 5.3 Macrografia do CP3. ..... - 31 -

Figura 5.4 Microestrutura do metal de adição (pino). (A) Seção longitudinal 200x; (B) Seção longitudinal 1000x; (C) Seção transversal 200x; (D) Seção transversal 1000x. ..... - 32 -

Figura 5.5 Microestrutura do metal base (bloco). (A) Seção longitudinal 200x; (B) Seção transversal 1000x. ..... - 33 -

Figura 5.6 Regiões para análise microestrutural. ..... - 34 -

Figura 5.7 Microestruturas das regiões A e B. ..... - 34 -

Figura 5.8 Microestruturas das regiões C e D. ..... - 34 -

Figura 5.9 Microestruturas das regiões E e F. ..... - 35 -

Figura 5.10 Microestruturas das regiões G e H. ..... - 35 -

Figura 5.11 Perfis de microdureza do CP1: vertical e horizontais. ..... - 38 -

Figura 5.12 Perfis de microdureza do CP2: vertical e horizontais. ..... - 38 -

Figura 5.13 Perfis de microdureza do CP3: vertical e horizontais. ..... - 39 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Composição química (% em massa) do pino SAE 4140. ..... - 25 -

Tabela 4.2 Composição química (% em massa) do bloco de reparo BS 4360. ..... - 25 -

Tabela 4.3 Parâmetros utilizados nas soldas por FHPP. ..... - 27 -

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASM	American Society of Metals;
ASTM	American Society for Testing and Materials;
AWS	American Welding Society;
BS	British Standard;
CE	Carbono Equivalente;
CP	Corpo de Prova;
FHPP	Friction Hydro Pillar Processing;
HV	Hardness Vickers;
MA	Metal de Adição;
MB	Metal Base;
PF	Perlita Fina;
PG	Perlita Grossa;
rpm	Rotações por minuto;
SAE	Society of Automotive Engineers;
TWI	The Welding Institute;
ZTA	Zona Termicamente Afetada;
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada;

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise metalúrgica do processo de solda por atrito através do método conhecido como FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*), identificando suas principais características bem como a influência de alguns fatores deste processo na qualidade da solda. Durante os ensaios de soldagem por FHPP foram feitas alterações nos parâmetros de força axial, comprimento de queima e força de forjamento, permitindo assim avaliar seu efeito na qualidade das juntas soldadas dos aços SAE 4140 e BS 4360. Para atingir o objetivo proposto foram realizadas as seguintes análises: macrografia, para identificar a ZTA e ZTMA; micrografia, visando determinar as microestruturas presentes; análise da composição química e perfis de microdureza tendo em vista a caracterização dos materiais. De acordo com os resultados obtidos são apresentadas conclusões a respeito da microestrutura formada na região das soldas e sugestões para trabalhos futuros e seguimento da pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: Solda por Atrito, FHPP, ZTA, ZTMA, Análises, Microestruturas.

ABSTRACT

This work intends to present a metallurgical analysis of the welding process known as “FHPP” (Friction Hydro Pillar Processing), identifying its main characteristics and the influence of the different process variables involved on the weld quality. During the welding tests, the burn-off, the axial and the forging forces were changed to study its influence on the welding quality of the joints made with the steels SAE 4140 and BS 4360. The methodology applied was: macrograph to identify the “ZTA” and the “ZTMA”; micrography to establish the present microstructures; the chemical composition analysis e micro hardness profiles. According to the results obtained, conclusions are presented respect of the microstructure formed.

KEYWORDS: Friction Welding, FHPP, ZTA, ZTMA, Analyses, Microstructures.

1.0 INTRODUÇÃO

A necessidade de produzir componentes com maior qualidade e menor custo para as mais diversas aplicações, tornou imperativo o desenvolvimento de novos processos de união/soldagem ou mesmo o aperfeiçoamento dos já existentes, com a finalidade de manter as propriedades mecânicas do material adquiridas durante o processo de fabricação e a realização de soldas livres de defeitos.

Este trabalho apresenta o processo de solda por atrito FHPP, *Friction Hydro Pillar Processing*, o qual possui grande aplicação principalmente para indústrias do petróleo e naval (ambiente *offshore*), onde muitas vezes se encontram limitações que afetam a integridade das soldas, as quais são comumente realizadas através de processos de soldagem por arco elétrico. Este último também apresenta restrições quanto à aplicação, em locais onde o trabalho a quente não é indicado, por exemplo, em áreas onde a presença de resíduos de hidrocarbonetos, como dentro de equipamentos que trabalham com petróleo.

Especificamente no caso da soldagem dentro d'água, a principal dificuldade encontrada na execução de reparos estruturais, decorre do alto teor de hidrogênio presente neste tipo de ambiente em conjunto com o efeito da pressão hidrostática, em função da profundidade. Tais dificuldades tornam o uso de reparo por soldagem convencional a arco elétrico muito restrito ou improvável de ser utilizado num ambiente subaquático. Essas dificuldades reforçam a busca de alternativas visando recuperar estruturas com trincas em equipamentos críticos na área petroquímica utilizando-se técnicas menos intrusivas, e potencialmente imunes ao meio subaquático.

O processo FHPP surge como uma alternativa inovadora ao convencional método de soldagem por fusão, justamente por não ter fase líquida, visto que em condições normais de execução, a soldagem por atrito é inteiramente realizada no estado sólido. A ausência desta fase líquida evita o surgimento dos problemas convencionais gerados pela absorção de gases, (oxigênio, nitrogênio e hidrogênio), tais como porosidade e trincas induzidas pelo hidrogênio, normalmente observados em cordões de solda onde ocorra a

fusão do material. Esta técnica também pode ser adaptada para reparo de equipamentos de grande porte e para aços de difícil soldabilidade, tais como aços de baixa liga (por exemplo, aço AISI 4140), fundidos ou forjados, os quais são comuns na indústria *offshore* e normalmente encontrados em grandes espessuras.

Este processo consiste na rotação e introdução de um pino consumível onde são aplicadas forças compressivas a fim de soldá-lo a uma peça contendo um furo, o qual representa o local do defeito. Seus principais parâmetros são: velocidade de rotação, força axial, torque, comprimento de queima e força de forjamento. A variação dos parâmetros de força axial, força de forjamento e comprimento de queima têm como objetivo determinar o parâmetro ótimo de operação através da análise da solda produzida.

2.0 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo descrever o processo de solda por atrito FHPP, indicando suas etapas e apresentando os parâmetros relevantes ao processo.

O procedimento experimental realizado tem como objetivo específico:

- Caracterização dos aços selecionados antes da realização do processo de soldagem;

- Analisar a microestrutura presente nas juntas soldadas;

- Descrever a metodologia de realização das análises mencionadas;

- Apresentar os efeitos decorrentes da variação dos parâmetros de soldagem na qualidade da solda e microestrutura obtida;

- Debater as questões principais e apresentar conclusões referentes aos itens acima citados.

3.0 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Soldagem por Atrito

A soldagem por atrito é um processo de união em estado sólido, que produz a coalescência através de rotação ou movimento relativo entre as superfícies de duas peças sob a ação de forças compressivas, gerando calor e deslocamento plástico do material nas superfícies de atrito (AWS 1991).

Embora seja considerado um processo em estado sólido, alguns autores reconhecem sob determinadas condições, a possibilidade da formação de um filme de material fundido entre as superfícies em atrito (WICHELHAUS 1975). No entanto, as características finais da solda não devem evidenciar a formação de uma estrutura fundida decorrente do intenso trabalho a quente ao qual o material é submetido, por esta razão, grande parte dos autores considera que durante o processo de soldagem, não ocorre fusão de material (CROSSLAND 1971).

O processo de soldagem é exemplificado na Figura 3.1, onde primeiramente uma das peças é fixada, enquanto a outra é rotacionada e é pressionada contra a superfície da peça fixa. Em seguida ocorre o contato inicial entre as peças, devido à aplicação de força axial, este contato gera calor, favorecendo um fluxo plástico entre as mesmas (Figura 3.1 B e C). Então a rotação é interrompida, e a força axial pode ou não ser mantida por um dado intervalo de tempo, caracterizando a etapa de forjamento, e ao final deste, é concluído o processo de soldagem (Figura 3.1 D) (MARQUES 2009).

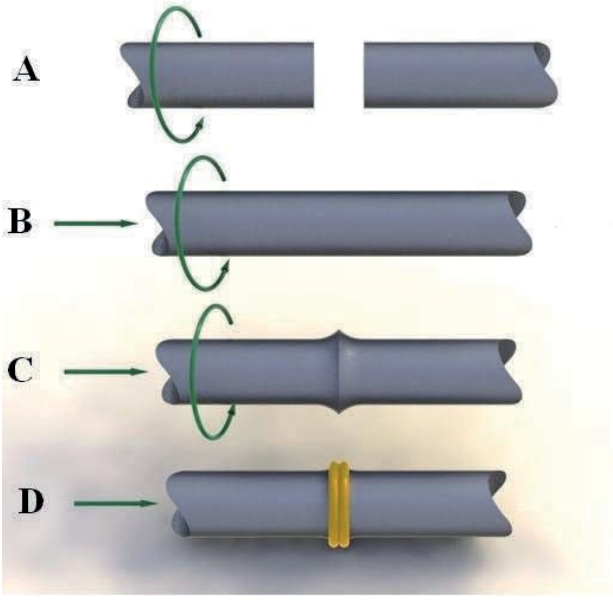

Figura 3.1 Sequência básica da solda por atrito. (A) Rotação de uma das peças; (B) Início da aplicação de força axial; (C) Início da união soldada; (D) Solda concluída (MARQUES 2009).

As características presentes após a soldagem por atrito nas superfícies unidas são: ausência de uma região fundida; estreita zona termicamente afetada (ZTA); formação característica de material deformado plasticamente ao redor da união (*flash*).

A resistência da junta soldada é função dos seguintes parâmetros: das propriedades dos materiais empregados; do grau de deformação plástica na interface durante o aquecimento e dos parâmetros do processo. O sucesso da formação de uma forte união metalúrgica apresenta as seguintes condições: remoção dos filmes de óxido, bem como de materiais adsorvidos das superfícies a serem unidas, além da existência de substancial deformação plástica das camadas superficiais do metal (LEBEDEV 1992).

3.1.1 Métodos de Geração de Energia

Há dois métodos distintos de geração de energia em soldas por atrito: método por atrito convencional e método por atrito inercial (AWS 1991).

Método por Atrito Convencional

Neste método uma das peças a ser unida é conectada a unidade motora, sendo então rotacionada a uma velocidade constante, enquanto a outra peça que esta fixa é impelida contra a primeira, então as peças são postas em contato íntimo devido à ação de uma força axial pré-determinada. Após um intervalo de tempo ou de deslocamento axial das peças, a rotação é interrompida e uma força igual ou superior à empregada no ensaio é mantida por alguns segundos, finalizando a etapa de forjamento e concluindo o processo. A energia total fornecida neste processo é função da potência total empregada pelo motor e da força axial empregada, conseqüentemente uma potência relativamente alta é necessária (PIRES 2007).

Método por atrito inercial

No método por atrito inercial a peça girante é acoplada a um volante de inércia, acelerado-a a uma dada velocidade de referência. Posteriormente, o volante é então desacoplado da unidade propulsora e as peças postas em contato íntimo. Neste método, a velocidade varia ao longo do processo, de um valor máximo até zero, mediante a transferência da energia armazenada no volante para a execução da união. No método inercial as variáveis do processo são: o momento de inércia do volante; a velocidade de rotação; a força de forjamento (PIRES 2007).

3.1.2 Fases do Processo

A divisão do processo em fases diferentes é uma forma comum para descrever o ciclo de soldagem e seus mecanismos. Diferentes autores dividem o ciclo em diferentes números de fases. A AWS e a ASM dividem o processo em duas fases enquanto Vill e Crossland dividem em três fases. A subdivisão mais detalhada tem sido proposta por Neumann e Schober, Pauly Böhme e Hermann e Nentwig, com quatro fases e por Ellis, com cinco fases. A divisão em quatro partes é a mais comum e esta representada na Figura 3.2.

Fase I: Atrito

Durante a primeira parte da fase I, o contato entre as superfícies de atrito resultam em um nivelamento destas superfícies. O restante da fase I é brevemente caracterizado pelo emperramento e microadesão (MEYER 2002).

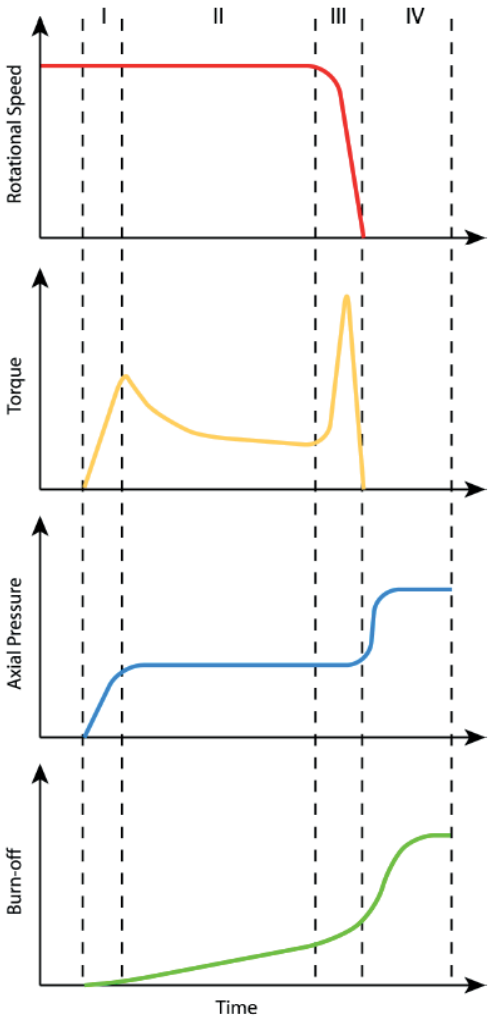

Figura 3.2 Ilustração esquemática dos parâmetros durante o processo de soldagem por atrito pelo método convencional (I: Atrito, II: Aquecimento, III: Desaceleração, IV: União) (MEYER 2002).

No início da fase I, somente uma parte limitada da superfície de soldagem realmente faz contato. Dessa forma, a pressão nessas pequenas áreas atinge valores extremamente elevados, promovendo deformação plástica e, conseqüentemente, nivelando as superfícies de atrito. Além dessas tensões relativamente elevadas, as outras regiões da solda estão sujeitas a velocidades rotacionais também relativamente elevadas entre as superfícies de atrito (NENTWIG 1991). Devido ao atrito, a rugosidade da superfície é

atenuada em parte por deformações plásticas, elásticas e “fusões” locais (MEYER 2002). Na primeira etapa, a região compreendida entre 0,3 e 0,7 de raio esta sujeita a severos aquecimentos e deformações, enquanto o restante da superfície permanece quase inalterado. Este fenômeno é apresentado na Figura 3.3, em dois pinos de aço inoxidável que foram separados após curtos períodos de atrito. Anéis de deformação plástica estão representados no material pela região escurecida, e podem ser vistos em até aproximadamente 0,7 de raio. A parte externa apresenta oxidação devido ao aquecimento, enquanto a região interna ainda apresenta superfície inalterada com marcas de usinagem (MEYER 2002).

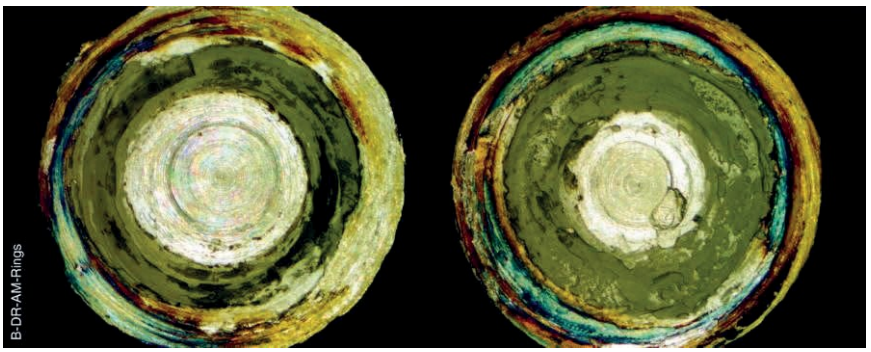

Figura 3.3 Anéis de deformação plástica em pinos de aço inoxidável após diferentes períodos de atrito (MEYER 2002).

O aquecimento e plastificação no início do processo são preferíveis em rotação em conjunto, produzindo uma desigualdade na ZTA e decréscimo na deformação. Em locais isolados ocorre eventualmente uma microadesão, a qual é imediatamente cisalhada. O cisalhamento destas microadesões leva a um aumento no aquecimento ao redor do material. Se a temperatura aumenta localmente, alcançando o ponto de fusão ou mesmo valores mais elevados, a geração de calor decresce substancialmente. A dissipação de calor aumenta e a fusão não poderá ser mantida. Se o material esta plastificado, a taxa de recristalização é inferior à taxa de deformação, resultando no cisalhamento local da microadesão. O mecanismo de transformação e fonte de energia é apresentado em maiores detalhes por Bethlehem (MEYER 2002).

Devido aos processos descritos acima, ocorre o rompimento dos óxidos e das camadas de adsorção e as contaminações presentes na superfície serão removidas. Novos óxidos serão formados devido às reações químicas induzidas por atrito e pelas bruscas elevações locais de temperatura que ocorrem em um curto intervalo de tempo. Particularmente em regiões externas, partículas isoladas são transportadas para fora da

região de atrito devido as elevadas forças radiais, conhecido como efeito de hidro-extração (CROSSLAND 1971).

Um dos principais efeitos da fase I é o nivelamento que ocorre nas áreas externas da superfície de atrito durante as primeiras rotações da peça. Quando o nivelamento nestas áreas está quase concluído, ele começa a evoluir para o centro rotacional da junta. No restante das áreas quase não é produzido aquecimento durante esta fase intermediária devido à redução do atrito (as superfícies de contato estão planas) e da presença de camadas de óxidos geradas no início da fase I (MEYER 2002).

A redução das forças axiais e a restrição do fluxo de material, próximas ao centro rotacional, obstruem o efeito de hidro-extração de partículas contaminadas na superfície. Então, uma concentração do material pode ser observada na área circular, sua distância do centro de rotação da peça é de 1/2 a 2/3 do raio de atrito superficial (Figura 3.4) (MEYER 2002).

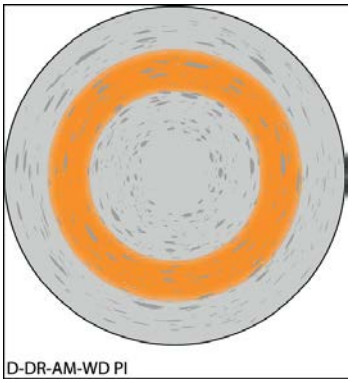

Figura 3.4 Ilustração esquemática da superfície de atrito durante a fase I: Concentrações de material plastificado em um anel entre 1/2 a 2/3 de raio (MEYER 2002).

Essa concentração provoca aquecimento local, formando uma fina película plastificada de material cisalhado. A ampliação da área anelar leva a um aumento de contato da área de soldagem, produzindo mais microadesões em locais isolados. Devido à condução de calor a temperatura também sobe no material axial adjacente. Nas zonas plastificadas pode-se observar uma redução na taxa de deformação devido ao aumento de temperatura (THOMAS 1992). Como resultado dos processos descritos acima, o torque de atrito se eleva ao seu primeiro pico (Figura 3.2). A taxa de aquecimento e a temperatura aumentam significativamente. A fase I é concluída logo que o torque de atrito atinge o seu máximo. Este pico é causado pela remoção do filme de contaminantes que saí pelas laterais

e pelo atrito causado pela rugosidade. A extração do filme com contaminantes permite o contato íntimo das superfícies metálicas com um considerável aumento do coeficiente de atrito (MEYER 2002).

Fase II: Aquecimento

O aumento da temperatura na região anelar de material plastificado (Figura 3.4) obtido ao decorrer da fase I provoca a compressão do material altamente plastificado para zonas mais frias da área de atrito. Devido ao rápido resfriamento do material plastificado, um atrito intenso é novamente produzido nestas zonas em particular e a área anelar é ampliada em direção ao centro rotacional (NICHOLAS 1995). A temperatura nessa área é relativamente baixa devido à reduzida deformação radial, provocada pela baixa velocidade relativa. As partículas encapsuladas no anel e não redissolvidas no material plastificado são transportadas ao centro rotacional da zona de solda (Figura 3.5).

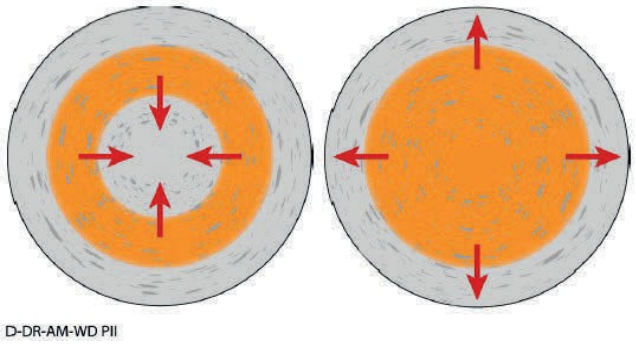

Figura 3.5 Ilustração esquemática da superfície de atrito durante a fase II: Área Plastificada aumenta inicialmente em direção ao centro da peça e por fim para a região externa (MEYER 2002).

A temperatura de equilíbrio é alcançada quando um efeito de auto ajuste é mantido. Este efeito é descrito da seguinte forma: com o aumento da temperatura, o metal se torna mais plástico e o torque é reduzido. Isto produz um amolecimento do material, resultando em menos trabalho de deformação e redução da temperatura. Nas outras regiões da solda, o material é facilmente comprimido para fora das superfícies de atrito, devido à grande plastificação e baixa resistência a deformação (BLAKEMORE 1999). Como a temperatura do material e a espessura da camada plastificada aumentam, ocorre redução na resistência da força axial e o material é comprimido para fora da área de atrito formando uma rebarba (*flash*). A espessura da zona plastificada diminui permitindo que as áreas frias entrem em

atrito, então elas se aquecem e tornam altamente plastificadas. Este processo é mantido enquanto a temperatura e a espessura da zona plastificada podem ser mantidas em equilíbrio, resultado em mais material comprimido para a rebarba (CROSSLAND 1971).

O equilíbrio dessas ações resulta em saturação de calor na área de atrito e das zonas correspondentes. A temperatura atinge um campo estacionário, reduzindo as superfícies de atrito e o torque de atrito (Figura 3.2). Deste ponto em diante é determinada uma comprimento de queima praticamente constante. Com o aumento da saturação térmica das peças, a energia necessária para reduzir a plastificação acarreta em um torque de atrito menor. Porém, o crescimento da rebarba aumenta o atrito superficial e, conseqüentemente, o torque de atrito. A opinião comum é que estes fenômenos equilibram um ao outro, resultando em um torque de atrito quase constante. Somente Eichhorn provou que o torque de atrito esta constantemente diminuindo, sem permanecer numa condição determinada.

Fase III: Desaceleração

Se o método por atrito convencional for aplicado, a fase de desaceleração inicia com uma redução controlada da velocidade rotacional (Fase III, Figura 3.2). Devido ao efeito de auto ajuste descrito acima à temperatura cai. Além disso, ocorre aumento na resistência de cisalhamento devido à menor taxa de deformação, e como conseqüência o torque de atrito atinge seu segundo pico. Este aumento no torque de atrito provoca deformação adicional em materiais que ainda não tenham sofrido deformação. É importante ressaltar que a resistência à deformação nestas áreas é relativamente baixa, desde que estejam próximas da temperatura de atrito superficial (devido à saturação térmica na direção axial) antes de serem sujeitas a deformação de fato (MEYER 2002).

Uma velocidade rotacional inferior também resulta em um comprimento de queima mais elevado. Neumann e Schober descreveram que o aumento da temperatura de rebarba é causado pela compressão do material nas regiões internas da solda. Em um momento crítico a rotação é reduzida a um nível tão baixo que as temperaturas das superfícies de atrito não podem ser mantidas. Então a resistência ao cisalhamento do material aumenta e a deformação angular ocorre em uma região maior ao longo da peça. O torque de atrito aumenta consideravelmente, sendo constante por alguns milissegundos (THOMAS 1992).

Fase IV: União

O mecanismo de união inicia na fase de aquecimento, apesar da união não ser homogênea ao longo da superfície de contato. Uma união homogênea é alcançada ao longo de toda a seção quando uma força de forjamento é aplicada durante a fase de união. Embora a opinião mais aceita seja de que o uso da força de forjamento melhora significativamente as propriedades da solda, alguns ensaios mostram que soldas de boa qualidade podem ser obtidas sem que seja preciso aumentar a força após concluir a rotação, o que significa sem o uso de qualquer força de forjamento (PINHEIRO 2001).

A variação no atrito devido à força de forjamento deverá ocorrer no final da fase de desaceleração (Figura 3.2). A elevada força de soldagem resulta em um aumento brusco do comprimento de queima e no torque de atrito. As camadas de óxidos causadas pelo atrito insuficiente são expulsas das regiões externas da solda. Após a rotação ser interrompida, o processo de amolecimento dinâmico, ou seja, a deformação é concluída, mas os processos de difusão prosseguem. Como o material começa a resfriar lentamente, ocorrem recristalização estática, regeneração cristalina e um lento processo de fluência. As tensões internas são consideravelmente eliminadas, caracterizando um fator determinante para as propriedades mecânicas de uma solda por atrito (MEYER 2002).

3.1.3 Parâmetros Relevantes ao Processo

Os parâmetros do processo de soldagem por atrito podem ser divididos em seis: força axial, velocidade de rotação, comprimento de queima (*burn-off*), tempo de aquecimento, tempo requerido para desaceleração, bem como a força e o tempo de forjamento (PIRES 2007). Destes, os quatro primeiros merecem maior atenção, devido às suas características mais relevantes na qualidade da união, sendo descritos em maiores detalhes a seguir.

Força Axial

Este parâmetro apresenta relevância significativa no processo. Esta deve ser conservada em valores que permitam manter as superfícies de atrito muito próximas, de modo a evitar a presença de partículas indesejáveis na interface e a formação de filmes de óxido. No entanto, valores muito elevados podem dificultar o controle do processo, em vista das elevadas temperaturas locais e das altas taxas de comprimento de queima. Ellis

(1972) apresentou de forma bem detalhada a influência da força axial na qualidade da união. Além de esta controlar de forma efetiva os tempos de soldagem, a mesma atua no perfil e características da ZTA. As maiores forças conduzem a um estreitamento da ZTA, a qual se propaga, na direção axial, semelhantemente a um perfil cônico, com origem no centro da solda e estendendo-se para o exterior. Para as menores forças, a ZTA é apresentada com um perfil mais abrangente, propagando-se de forma paralela à superfície de atrito. Recomenda-se o emprego de maiores forças para a obtenção de uma microestrutura mais refinada, evitando-se a formação de ferrita de Widmanstätten, proporcionando-se assim um relativo ganho nas propriedades de tração, dureza e tenacidade (AWS 1991).

Velocidade de Rotação

A velocidade de rotação possui uma grande faixa de variação, sem provocar sensíveis perturbações na qualidade da solda (AWS 1991). Segundo Vill (1962 citado por MEYER 2002), existem certas velocidades ótimas para cada combinação de materiais e aplicações. Nas mais altas velocidades de rotação, as interações entre as asperidades são acompanhadas por uma ação de polimento entre as superfícies em atrito. Este comportamento pode estar relacionado às condições viscoplásticas do material interfacial, o que conduz a um maior tempo de aquecimento para serem alcançadas as condições plásticas ideais, favorecendo-se assim a propagação de calor e intensificação da ZTA. As altas velocidades irão ocasionar, além do maior volume de material aquecido, uma menor taxa de resfriamento e queda nas propriedades mecânicas, tais como limite de resistência e dureza (ELLIS 1972). Já as mais baixas velocidades implicarão em menor *input* de energia de soldagem e um menor aquecimento periférico na superfície em atrito.

Contudo, principalmente em elevadas pressões axiais, é necessário uma unidade com maior potência a fim de superar os esforços resistivos a baixa rotação. As baixas rotações também podem ser um agravante, devido às mais altas taxas de resfriamento, podendo ocasionar, dependendo do meio de resfriamento, a formação de fases com excessiva dureza. Foi observado que, maiores velocidades privilegiarão uma estrutura mais grosseira de Widmanstätten, com propriedades mecânicas de resistência inferiores àquelas obtidas a baixas rotações (PINHEIRO 2001).

Comprimento de Queima

Descreve a velocidade com que ocorre o deslocamento entre as superfícies de atrito das peças em contato. Este parâmetro é utilizado para controlar o ciclo de soldagem, ou seja, início e fim do processo, além de ter significante influência na qualidade da união. Apresenta forte influência da força axial e velocidade de rotação, de modo que, altas forças e baixas velocidades propiciam os mais elevados comprimentos de queima. Ellis (1972) demonstrou que os maiores comprimentos de queima tendem a desenvolver maiores valores de limite de resistência. O controle do processo através deste parâmetro apresenta a desvantagem de se necessitar de um adequado alinhamento entre as seções a serem unidas, bem como a presença de rebarbas largas e defeitos superficiais. Esses fatores levam uma redução na qualidade da união soldada (NICHOLAS 1995).

Tempo de aquecimento

Definido como sendo o período de tempo compreendido entre o contato inicial das superfícies de atrito e o final da fase de frenagem (velocidade nula). Este parâmetro é por sua vez dependente da força aplicada e da velocidade de rotação, sendo inversamente proporcional ao primeiro parâmetro e diretamente proporcional à velocidade. Este parâmetro é de importância na quantidade de calor gerado e propagado ao longo da região soldada e ZTA. A microestrutura final dependente tanto do nível de aquecimento atingido ao longo do processo como das taxas de resfriamento (ELLIS 1972).

3.1.4 Vantagens e Limitações da Soldagem por Atrito

A seguir são apresentadas as vantagens e desvantagens do processo de soldagem por atrito, com base nas descrições apresentadas por Meyer (2002).

Vantagens do processo:

- Em geral, não é necessária uma atenção especial com a limpeza das superfícies a serem unidas, uma vez que o processo é considerado autolimpante, pois o atrito tende a romper, deslocar e por fim remover as impurezas da superfície de solda para a região da rebarba;
- Não é necessário o uso de metal de adição e gás protetor. O processo é considerado seguro, não há emissão de gases tóxicos prejudiciais à saúde do operador, além de

não haver fagulhas, radiação ou mesmo riscos com problemas elétricos envolvendo altas tensões;

- Ausência de defeitos relacionados aos fenômenos de solidificação, tais como: porosidade, segregação e adsorção de hidrogênio, porque é um processo em estado sólido;
- Baixo calor produzido e os rápidos ciclos do processo são características, que o tornam adequado para aplicações em oleodutos operantes, linhas de gás e metanol;
- Formação de uma ZTA estreita;
- Permite a união de metais dissimilares, difíceis ou até mesmo impossíveis de serem soldados por outros processos;
- O processo pode ser facilmente automatizado, permitindo a produção em série de soldas com alto controle de qualidade. O equipamento poder ser operado a longas distâncias, apropriado para aplicação em áreas classificadas de difícil acesso pelo operador;
- Permite a realização de solda em atmosfera explosiva, sem risco de ignição, adequada para emprego na indústria petrolífera, além da possibilitar a realização de soldas sem a necessidade de paradas na linha de produção;
- Baixos custos, facilidade de operação, instalações simples, baixo consumo de energia e o curto ciclo de soldagem, fazem com que o custo efetivo deste processo seja atrativo comparado a outros existentes;
- Não requer operadores com habilidades manuais específicas;
- Na grande maioria dos casos, a resistência da solda é igual ou até mesmo superior à dos metais de base.

Limitações do processo:

- Ao menos uma das peças deve ter um eixo de rotação, de modo que a peça gire sobre o eixo do plano de soldagem;
- Um dos materiais a serem unidos deve ser passível de deformação plástica;
- A preparação e o alinhamento das peças podem ser um ponto crítico na realização de uma deformação plástica uniforme e aquecimento da superfície de atrito;

- O processo é normalmente limitado a realização de soldas de topo planas e angulares (ou cônicas);
- Elevado custo inicial com equipamentos e ferramentas.

3.2 Processo de Soldagem por Atrito com Pino Consumível

O processo de soldagem por atrito com pino consumível, também conhecido como *Friction Hydro Pillar Processing* (FHPP), é considerado um método muito recente, sendo desenvolvido ao longo da década de 90 no *The Welding Institute* (TWI) e caracterizado como um processo de soldagem por atrito não convencional. Esta técnica apresenta um forte atrativo industrial, principalmente para indústrias do petróleo, devido à capacidade de utilização do processo no reparo de trincas por atrito em estruturas *offshore*, tubulações de gás e petróleo, bem como na indústria naval (PIRES 2007).

Em virtude do restrito número de publicações acerca desta técnica, se conhece relativamente muito pouco sobre os fenômenos envolvidos, bem como a influência real dos parâmetros do processo e suas faixas ótimas de operação, visto que estes também dependem do tipo de material trabalhado (MEYER 2002).

3.2.1 Descrição e Caracterização do Processo

O processo de soldagem por atrito com pino consumível pode ser dividido em duas etapas: a. abertura de um furo cego (não passante), com geometrias tanto cônicas, quanto cilíndricas; b. preenchimento deste furo por meio de um pino (consumível), primeiramente rotacionado, e posteriormente inserido coaxialmente ao furo, sendo, então, submetido a um esforço normal de compressão (NICHOLAS 1995).

Devido às interações entre as superfícies de atrito, é gerado calor que provoca o aquecimento e conseqüente redução do limite de escoamento do material. Este efeito térmico forma um fluxo plástico, que, mediante as forças existentes, propaga-se axialmente ao longo da seção do consumível do pino, promovendo o completo preenchimento do orifício (THOMAS 1992). Um esquema do processo é apresentado na Figura 3.6.

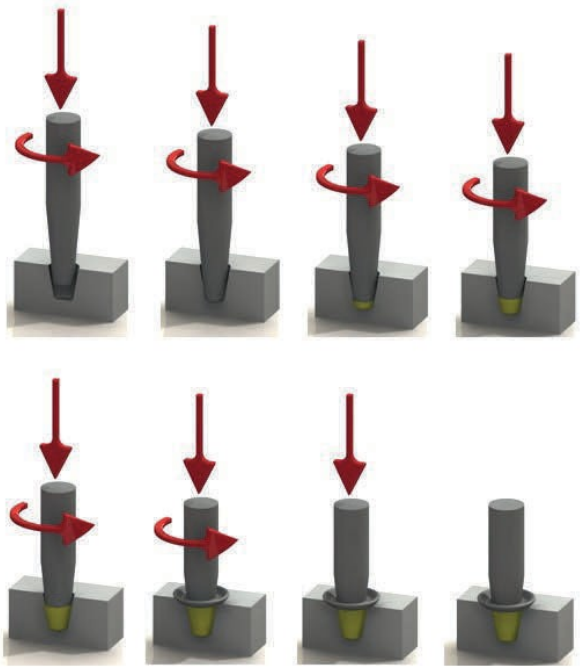

Figura 3.6 Ilustração esquemática das diferentes etapas de soldagem pelo processo FHPP (PINHEIRO et al. 2001).

A soldagem por atrito com pino consumível, foi patenteada por Thomas e outros (1995), sendo certificada pelo TWI. É derivada da técnica chamada *Tapered Plug Welding*, ilustrada na Figura 3.7. Este processo foi apresentado por Andrews e Mitchell (1990), com o objetivo de realizar reparos de estruturas *offshore*, em condições subaquáticas. O *Tapered Plug Welding* difere do FHPP, pelo fato de trabalhar com orifícios passantes, onde a maior concentração de deformação plástica encontra-se nas paredes laterais, e não ao longo de grande parte da seção transversal do pino.

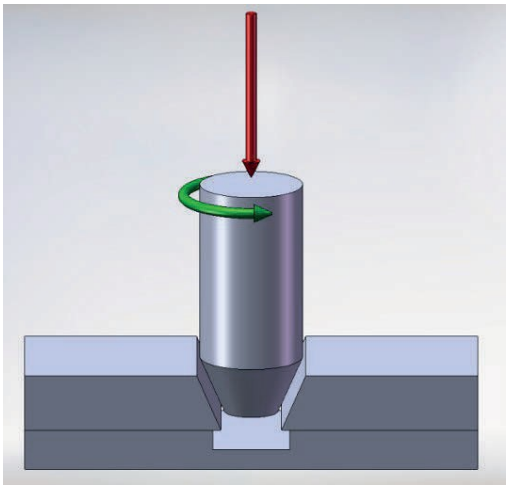

Figura 3.7 Ilustração do processo *Tapered Plug Welding* (PIRES 2007).

As mesmas vantagens tecnológicas apresentadas para a soldagem por atrito também estão presentes no processo de soldagem por atrito com pino consumível. Como o processo é realizado dentro da fase sólida, este não é influenciado pela pressão ambiente, o que evidencia a sua aplicação em locais subaquáticos, a elevadas profundidades (NIXON 1986).

Em vista do intenso trabalho mecânico a quente que o consumível (pino) está sujeito, suas propriedades mecânicas de limite de resistência e dureza finais tendem a ser mais elevadas que aquelas apresentadas pelo material de origem, podendo estas, ainda, ser alteradas mediante práticas de tratamento térmico (MEYER 2002).

3.2.2 Influência da Geometria do Corpo de Prova na Qualidade da Solda

O processo de soldagem por atrito com pino consumível conta com duas configurações geométricas distintas, sendo uma geometria constituída por uma forma cilíndrica e outra por um perfil cônico (Figura 3.8).

A geometria cilíndrica é indicada para a realização de reparos em estruturas de parede grossa, e o perfil cônico, é preferencial às estruturas de paredes mais finas. No caso de estruturas de grande espessura, seria necessário um considerável aumento no diâmetro do pino cônico, tornando indispensável o uso de equipamentos mais robustos, o que é inconveniente para aplicações práticas (PINHEIRO et al. 2001).

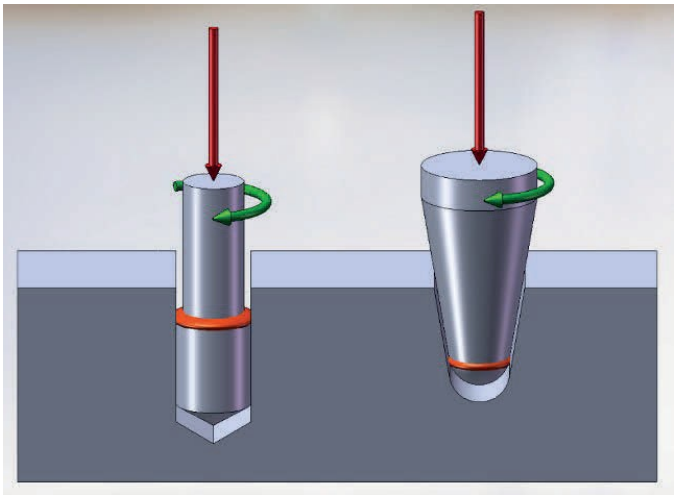

Figura 3.8 Ilustração do processo FHPP, geometrias cilíndrica e cônica (PIRES 2007).

Devido à intensa deformação plástica na região de processamento do pino, um material suficientemente viscoso se forma, permitindo a distribuição das tensões no pino de forma hidrostática, ou seja, as pressões na ponta do consumível serão iguais àquelas verificadas nas paredes laterais (THOMAS 1997). Dentro deste contesto, foi proposto que o perfil cônico favorece a decomposição da força axial em uma componente normal à interface pino/bloco, intensificando as condições de fluxo plástico e as uniões metalúrgicas (NICHOLAS 1995). Contudo, Meyer (2002) argumentou que as condições do material viscoplástico são insuficientes para a existência de um comportamento hidrostático das forças, sendo verificado que as mesmas atuam diferentemente, tanto nas paredes laterais, quanto na ponta do pino.

Deste modo, Meyer (2002) sugere que as diferenças nas condições das uniões metalúrgicas, bem como das propriedades mecânicas e microestruturas obtidas para a geometria cônica, são mais coerentemente compreendidas mediante diferenças na duração do processo e no ciclo termomecânico. Foi admitido, que o perfil cônico permite a realização de ensaios com cargas axiais mais elevadas, com o intuito de intensificar a qualidade da união, sem, contudo, ocasionar taxas de comprimento de queima muito elevadas (PIRES 2007).

A geometria do pino e do furo são fatores de extrema importância na obtenção de completos preenchimentos, sem a presença de falhas na região do reparo. É de conhecimento, que a região de preenchimento, compreendida entre o fundo do furo e as paredes laterais, é considerada um ponto de concentração de defeitos, decorrentes da falta de união metalúrgica, e de estreitamento da ZTA (MEYER 2002).

Em seu trabalho, Meyer (2002) pesquisou detalhadamente os efeitos de modificações geométricas nas pontas dos pinos e no fundo dos furos, buscando eliminar defeitos. A avaliação foi realizada utilizando tanto pinos cilíndricos, quanto cônicos, com pontas cegas, chanfradas e arredondadas, sendo também, confeccionado, o fundo dos furos com características semelhantes, com fundo chanfrado ou arredondado.

Foi constatada a presença de defeitos principalmente quando eram utilizados blocos chanfrados, e pinos de ponta cega ou chanfrada. Quando da utilização de blocos com fundos arredondados, houve um grande incremento na qualidade da solda nas extremidades inferiores da região de preenchimento, independentemente do tipo de geometria do pino empregada. Indicando que a geometria do bloco é de grande importância no incremento da

qualidade da solda, sendo a responsável pela eliminação de falhas de preenchimento na união (PIRES 2007).

Resumindo, Meyer (2002) mostrou que o uso de uma geometria que favoreça o melhor aporte térmico na superfície inferior, bem como condições menos restringentes ao fluxo plástico, são essenciais na obtenção de uniões com qualidades superiores. Estes estudos compreendem a etapa inicial na busca de um melhor entendimento dos efeitos geométricos, servindo como base para pesquisas futuras (PIRES 2007).

3.2.3 Influência dos Parâmetros do Processo na Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Solda

Ao transcorrer das análises feitas por Meyer (2002), a respeito da influência dos parâmetros força axial e velocidade de rotação, foi demonstrado que, a ZTA tende a ser maior com velocidades de rotação mais elevadas. Podendo estar relacionado às maiores energias de soldagem aportadas, quando do uso de altas rotações.

A influência da velocidade sobre o tempo de processamento não ficou muito clara. O tempo de processo apresentou variações irrelevantes, sem relação com a velocidade. Somente uma ligeira tendência à redução nos valores de dureza foi notada, quando aplicado velocidades de rotações mais elevadas (PIRES 2007).

O parâmetro força axial é essencial nos tempos de processamento, apresentando redução considerável destes tempos com o aumento da força. Em conseqüência deste comportamento e das maiores taxas de comprimento de queima, foi observado que a ZTA sofre um estreitamento com aumento de força axial, visto que os menores tempos conduzem a uma menor propagação de calor.

Meyer (2002) observou que para aumentos da força axial, há uma propensão a atingir valores maiores de limite de resistência e de dureza, na região do reparo. O tempo de processamento serve como referência da qualidade final obtida na solda, onde a força axial assume um papel de maior destaque frente à velocidade de rotação (ELLIS 1972). Como base nos resultados apresentados por Meyer (2002), verificou-se que, dentro da região de reparo, bem como na ZTA, as propriedades mecânicas, avaliadas em termos de dureza, limite de escoamento e limite de resistência são relativamente aumentadas, e uma queda na capacidade de alongamento é observado. Entretanto, a avaliação do efeito dos

parâmetros do processo sob tais propriedades não é algo que se mostrou bem definido, o que ficou mais nítido nos perfis de microdureza (PIRES 2007).

Na maioria das vezes a interface pino/bloco é de sutil identificação, sendo caracterizada pela formação de Ferrita Acicular e Martensita, devido às altas taxas de resfriamento presentes no processo. A região localizada no centro da solda é composta por Ferrita Acicular, e as regiões que sofrem maior aquecimento compostas por ferrita de Widmanstätten mais grosseira, com maior disposição a formar plaquetas. As variações microestruturais, na região da solda são conseqüência do curto ciclo térmico do processo, representado por altas taxas de geração de calor, que se propagam axialmente ao pino, combinado com taxas de resfriamento distintas para cada região do reparo (PIRES 2007).

4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Apresentação da Unidade de Solda por Atrito

Os ensaios de soldagem por atrito foram realizados em um equipamento denominado Unidade de Solda por Atrito, desenvolvido pelo Laboratório de Metalurgia Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Figura 4.1). O equipamento possibilita a aplicação de uma carga axial de até 50 kN, força de forjamento de até 50 kN e velocidade máxima de rotação de até 8.000 rpm. A Figura 4.2 permite uma melhor compreensão dos componentes do equipamento.

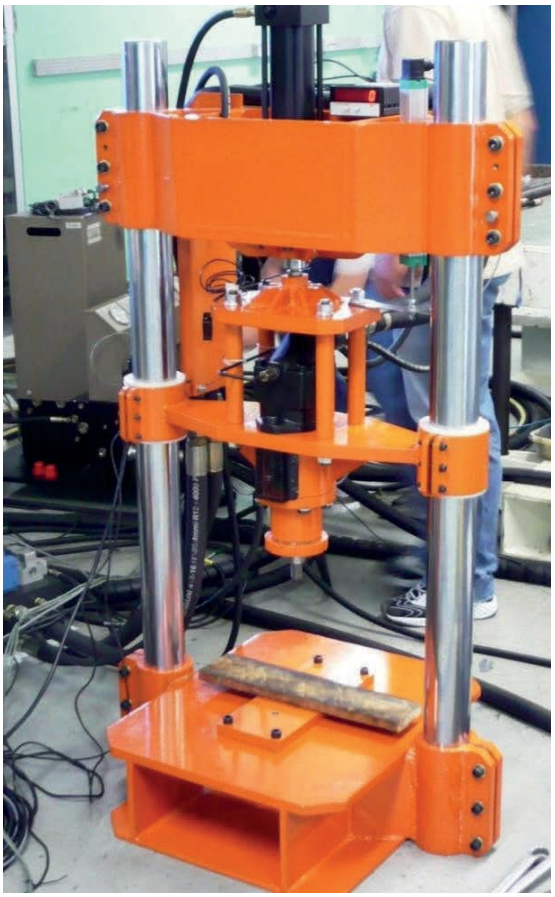

Figura 4.1 Apresentação da Unidade de Solda por Atrito.

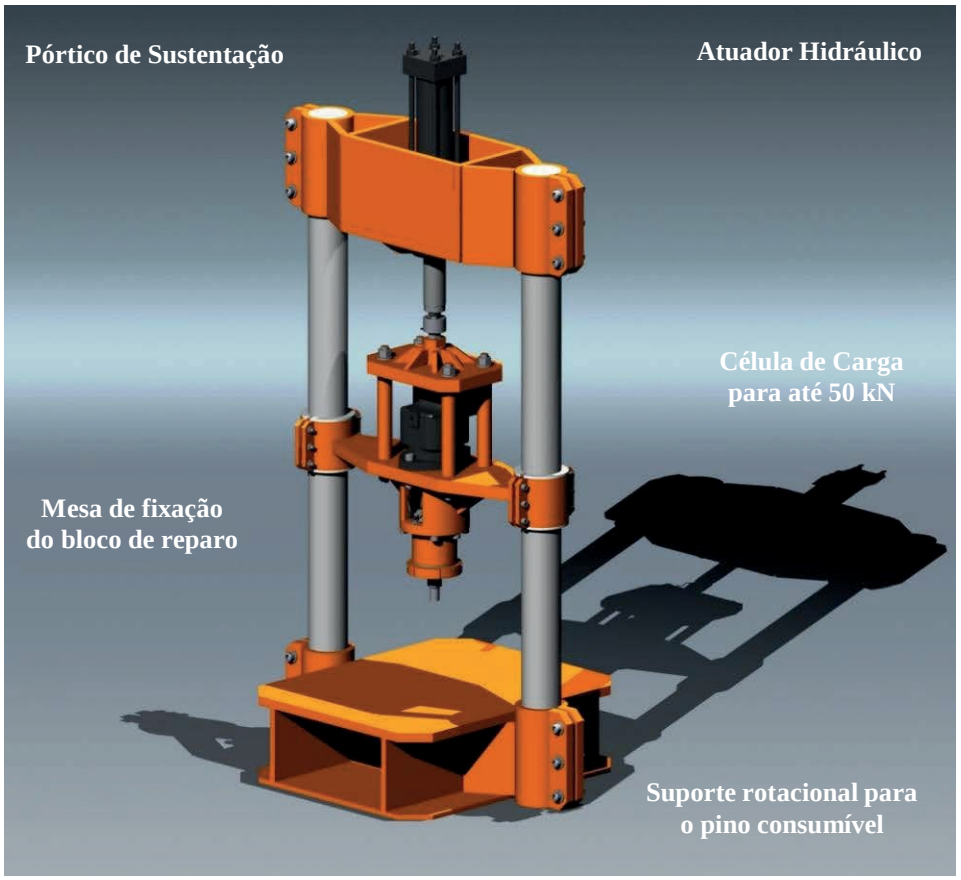

Figura 4.2 Descrição dos componentes da unidade de solda por atrito.

A Unidade de Solda por Atrito é formada basicamente por um conjunto de componentes mecânicos e um sistema de controle, interface entre operador e máquina.

O conjunto de componentes mecânicos pode ser divido através das seguintes partes:

- Pórtico de sustentação;
- Atuador hidráulico;
- Célula de Carga;
- Suporte rotacional para o pino consumível;
- Mesa de fixação do bloco para reparo;
- Unidade de bombeamento hidráulica.

O equipamento permite a variação dos seguintes parâmetros:

- Força axial;
- Velocidade de rotação;

- Comprimento de queima;
- Força e tempo de forjamento.

O sistema de controle e monitoramento dos parâmetros operacionais é realizado através de um conjunto de controladores digitais servo-hidráulicos *Flex Test Workstation* da MTS. Este *software* tem como característica principal a sua interface gráfica simples e funcional (Figura 4.3) que permite o envio dos dados de entrada necessários para o controle e execução do processo em tempo real.

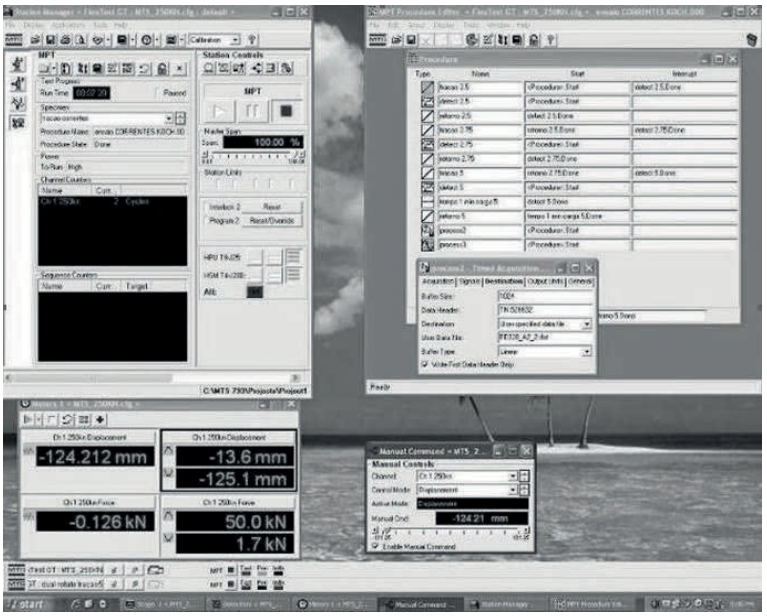

Figura 4.3 Interface gráfica do sistema de controle e monitoramento.

4.2 Materiais Analisados

Os materiais selecionados para a realização dos ensaios de soldagem por atrito pertencem a duas classes diferentes de aços. O pino (consumível) foi produzido em aço SAE 4140, enquanto para o bloco de reparo foi utilizado o aço BS 4360. As composições químicas destes materiais foram determinadas através de espectrometria de emissão óptica, modelo SPECTROLAB, sendo realizadas três análises em cada uma das peças, a fim de obter uma média aritmética como resultado final. A composição química (% em massa) do pino SAE 4140 é apresentada na Tabela 4.1, assim como a do bloco de reparo BS 4360 na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 Composição química (% em massa) do pino SAE 4140.

Elemento Químico	C	Mn	Ni	Mo	Cr	Cu
% em massa	0,37	0,88	0,040	0,15	0,96	0,019

Tabela 4.2 Composição química (% em massa) do bloco de reparo BS 4360.

Elemento Químico	C	Mn	Ni	Mo	Cr	Cu
% em massa	0,15	1,40	0,025	0,005	0,026	0,010

4.3 Geometria dos Corpos de Prova

A geometria cônica foi à selecionada para a realização dos ensaios, pois segundo a literatura é a mais indicada para este tipo de processo de soldagem, visto que facilita a remoção de impurezas, tais como óxidos e também favorece a decomposição da força axial em um componente normal ao conjunto pino/bloco, melhorando as condições de fluxo plástico e das uniões metalúrgicas. A seguir são apresentadas, respectivamente, as figuras do conjunto pino/bloco (Figura 4.4), bloco (Figura 4.5) e do pino (Figura 4.6). Nas duas últimas, são indicadas as dimensões em milímetros (mm).

Figura 4.4 Conjunto pino/bloco.

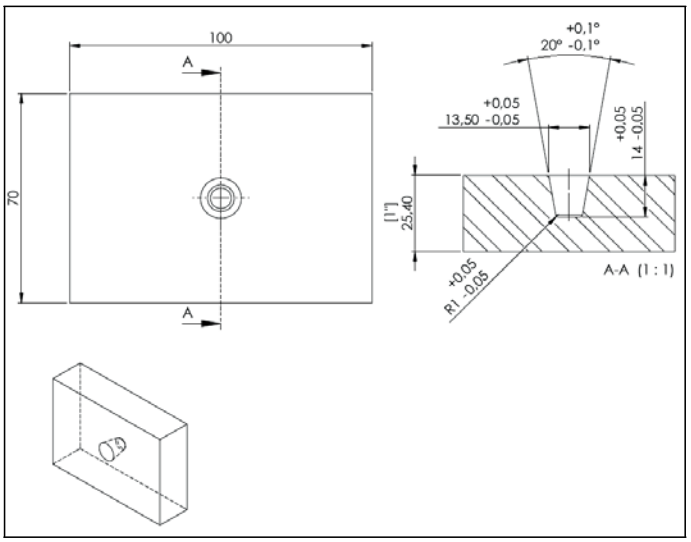

Figura 4.5 Croqui do bloco de reparo, dimensionado em milímetros.

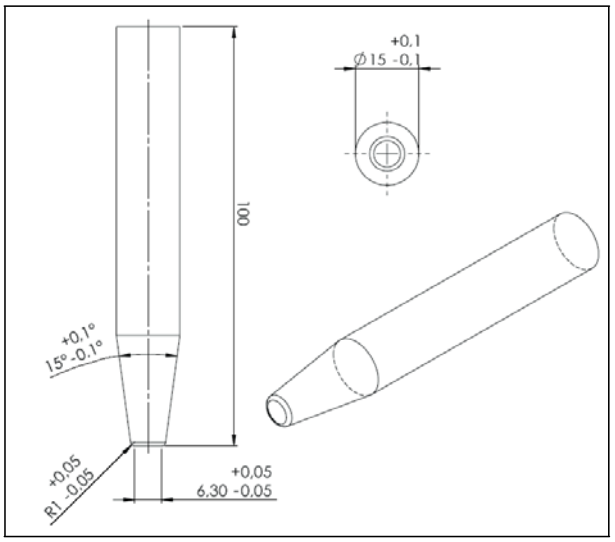

Figura 4.6 Croqui do pino, dimensionado em milímetros.

4.4 Parâmetros de Soldagem

A fim de verificar a relevância dos diferentes parâmetros na qualidade da solda obtida (Figura 4.7), foram realizadas variações na força axial aplicada sobre o pino; comprimento de queima, que representa o avanço do pino em direção ao substrato; e força de forjamento, mantida constante durante 5 segundos após cessar a rotação. Em todos os ensaios realizados foram mantidas constantes as geometrias dos corpos de prova e da velocidade de rotação, conforme consta na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Parâmetros utilizados nas soldas por FHPP.

Corpo de Prova	Força Axial (kN)	Velocidade de Rotação (rpm)	Comprimento de Queima (mm)	Força de Forjamento (kN), por 5 s
1	15	8000	8,0	25
2	25	8000	6,0	35
3	35	8000	6,0	45

Figura 4.7 Soldagem do corpo de prova pelo processo FHPP.

4.5 Preparação Metalográfica

Após a realização dos ensaios, as amostras foram preparadas metalograficamente, visando à análise dos corpos de prova, através de inspeção visual (a olho nu), bem como através do auxílio de microscópio óptico. Esta preparação é necessária para a realização dos perfis de microdureza Vickers e análise metalográfica. A metalografia foi dividida em duas partes, a primeira visando caracterizar a macroestrutura e a segunda, a microestrutura.

4.5.1 Macrografia

Primeiramente, as amostras foram submetidas a um processo de corte por eletroerosão, visto que este método não provocar consideráveis mudanças microestruturais. Em seguida, o bloco foi seccionado longitudinalmente em relação ao pino, ao longo de um plano paralelo ao centro do furo, deste modo, preservando a seção central para inspeções e estudos de qualificação da solda.

A superfície a ser analisada foi lixada, seqüencialmente por lixas de diferentes granulometrias, tais como, 220, 320, 400 e 600 *mesh*.

Após as amostras foram atacadas com solução de Nital 4%. O tempo de imersão das amostras no reagente variou em média de 5 a 10 segundos.

Com a superfície atacada, foram feitas inspeções visuais da macroestrutura das amostras, a fim de identificar a presença ou não de defeitos na solda. Nesta etapa, foi dada maior atenção às regiões da interface pino/bloco, em especial, a interface inferior, além da verificação da ocorrência ou não de uma união metalúrgica nestas regiões. Também foi observada a morfologia da macroestrutura ao longo do preenchimento, e o desenvolvimento da ZTA no metal base. A macrografia das amostras foi obtida por digitalização a partir de um scanner.

4.5.2 Micrografia

Após a análise macrográfica, as amostras foram lixadas com lixas de granulometrias de 600 a 1.200 *mesh*, seguido do polimento das mesmas com pasta de diamante de granulometria 3,0 μm. A superfície foi então atacada com solução de Nital 2%, com tempo médio de imersão variando entre 7 a 10 segundos.

Posteriormente, as amostras foram examinadas através de microscopia óptica, visando identificar e caracterizar as microestruturas formadas antes e após o processo de soldagem por atrito. A observação foi executada na região de processamento do metal de adição (pino), ao longo da interface pino/bloco e no metal base (bloco), englobando-se assim a ZTA. As imagens das microestruturas foram obtidas com o auxílio de um microscópio óptico.

4.6 Perfil de Microdureza

A mesma superfície preparada para as análises metalográficas foi utilizada para a realização dos perfis de microdureza Vickers, aplicando uma carga de 300 gramas. O levantamento destes perfis tem como objetivo à avaliação das propriedades mecânicas da solda bem como regiões vizinhas (ZTA) em termos de microdureza, além de desempenhar função preponderante na caracterização microestrutural.

A fim de comparar as variações decorrentes do processo de soldagem, foram previamente realizados ensaios de dureza antes da solda, tanto no pino quanto no bloco, apresentando aos valores de 318 HV e 165 HV respectivamente.

Foram selecionados quatro perfis de microdureza, sendo um vertical, com 20 mm de comprimento e três horizontais, com 15 mm de comprimento cada. O perfil vertical tem início na face superior do bloco, passando pelo centro do pino. O primeiro perfil horizontal inicia a 5,0 mm de altura em relação à face superior do bloco, o segundo a 7,5 mm e o terceiro, a 13 mm desta. Todos têm início no centro da amostra e avançando em direção às faces laterais. A Figura 4.8 demonstra o procedimento de posicionamento destes perfis.

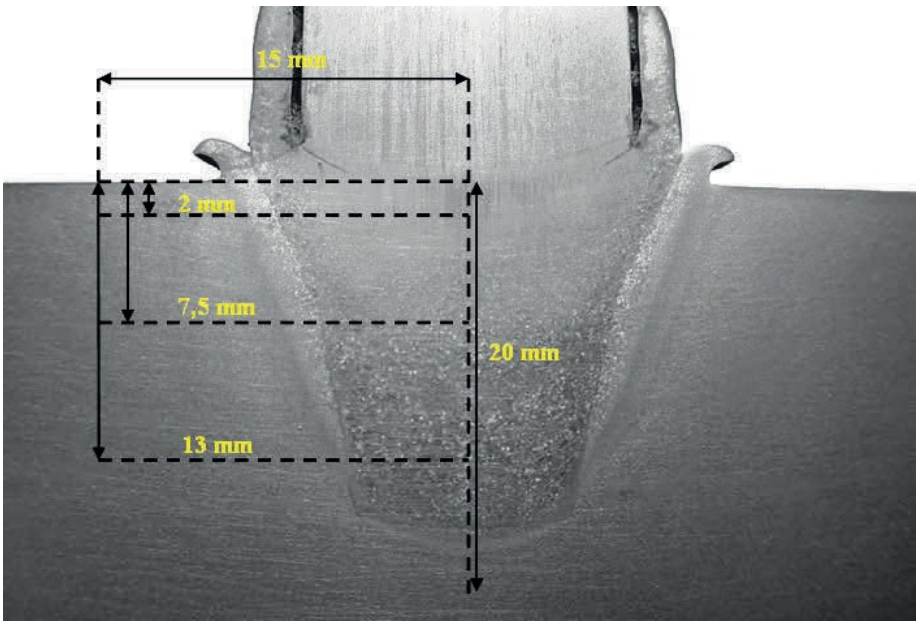

Figura 4.8 Distribuição dos perfis de dureza.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes às análises realizadas. A apresentação dos resultados segue uma seqüência lógica, de acordo com as etapas previstas para preparação das amostras obtidas nos ensaios de soldagem por atrito FHPP. Deste modo serão discutidos os resultados, referentes: às análises metalográficas, aos ensaios de microdureza Vickers e, por fim, aos parâmetros de soldagem.

5.2 Caracterização Metalográfica

As macrografias obtidas ao longo da seção longitudinal do pino consumível, referentes aos corpos de prova 1, 2 e 3 da Tabela 4.3 são apresentadas nas Figura 5.1, Figura **5.2** e Figura **5.3** respectivamente, onde também são indicadas a ZTA, ZTMA, MB (bloco) e MA (pino). A princípio houve uma forte união entre a interface pino/bloco, a qual é constituída de materiais dissimilares, caracterizando a existência de uma união metalúrgica na região. Além disso, é possível constatar a ausência de falhas de preenchimento nos três corpos de prova, independente das variações impostas nos parâmetros de soldagem. Esse comportamento sugere que o parâmetro primordial para evitar falhas de preenchimento venha a ser o parâmetro geométrico

Nos corpos de prova 1, 2 e 3, os quais foram soldados com a mesma rotação e valores distintos de força axial, é visível a tendência à redução de tamanho da ZTA, na medida em que se eleva o valor da força de forjamento. Nota-se também uma aparente homogeneização da macroestrutura com este aumento na força.

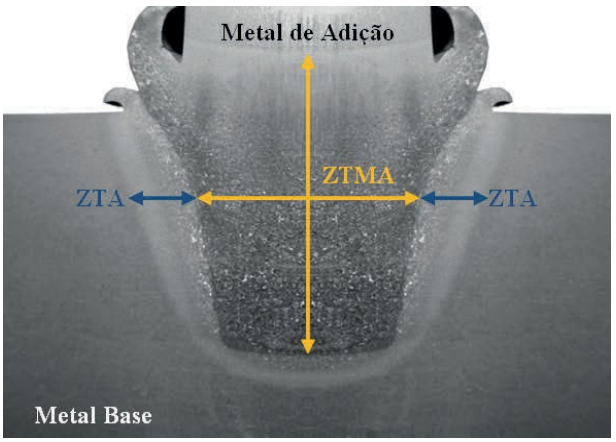

Figura 5.1 Macrografia do CP1.

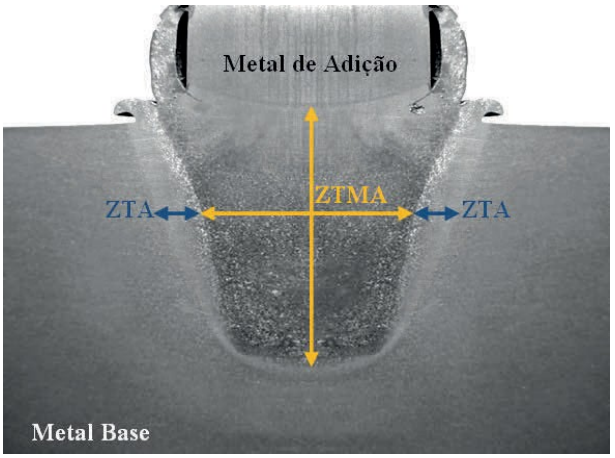

Figura 5.2 Macrografia do CP2.

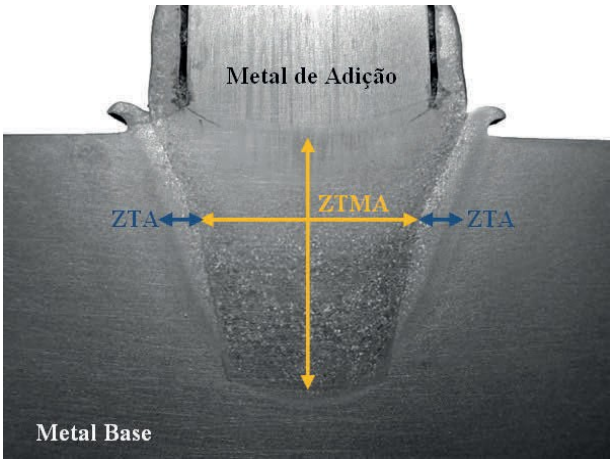

Figura 5.3 Macrografia do CP3.

Nos CP1 (Figura 5.1) e CP2 (Figura 5.2) foi constatada a formação de uma ZTA maior, com formato arredondado em torno da região inferior da interface pino/bloco, provavelmente devido às baixas forças axiais aplicadas. O aumento do tempo de atrito

entre o pino e o bloco durante o processo de soldagem, produz maior aquecimento no local, aumentando a ZTA e, conseqüentemente alterando sua forma.

O estreitamento da ZTA no CP3 (Figura 5.3) possivelmente tenha ocorrido em função dos menores tempos de preenchimento com o aumento da força axial, resultando em um menor aporte térmico no conjunto (MEYER 2002). Tal particularidade pode vir a ser indesejada, pois de acordo com a literatura um menor aporte térmico, em um nível crítico, pode originar defeitos decorrentes do preenchimento incompleto, tanto nos cantos, quanto no centro da interface inferior. Estes defeitos revelam-se como pontos escuros (vazios) nesta região.

Prosseguindo a análise metalográfica, mas agora sob um aspecto microscópico, são apresentadas as microestruturas das seções longitudinais (A; B) e transversais (C; D) do metal de adição SAE 4140 (Figura 5.4), compostas pelos constituintes ferrita, perlita fina (PF) e perlita grossa (PG). As microestruturas apresentam textura alinhada devido à presença de perlita bandeada, característico do processo de laminação, estrias de ferrita em tons diferentes.

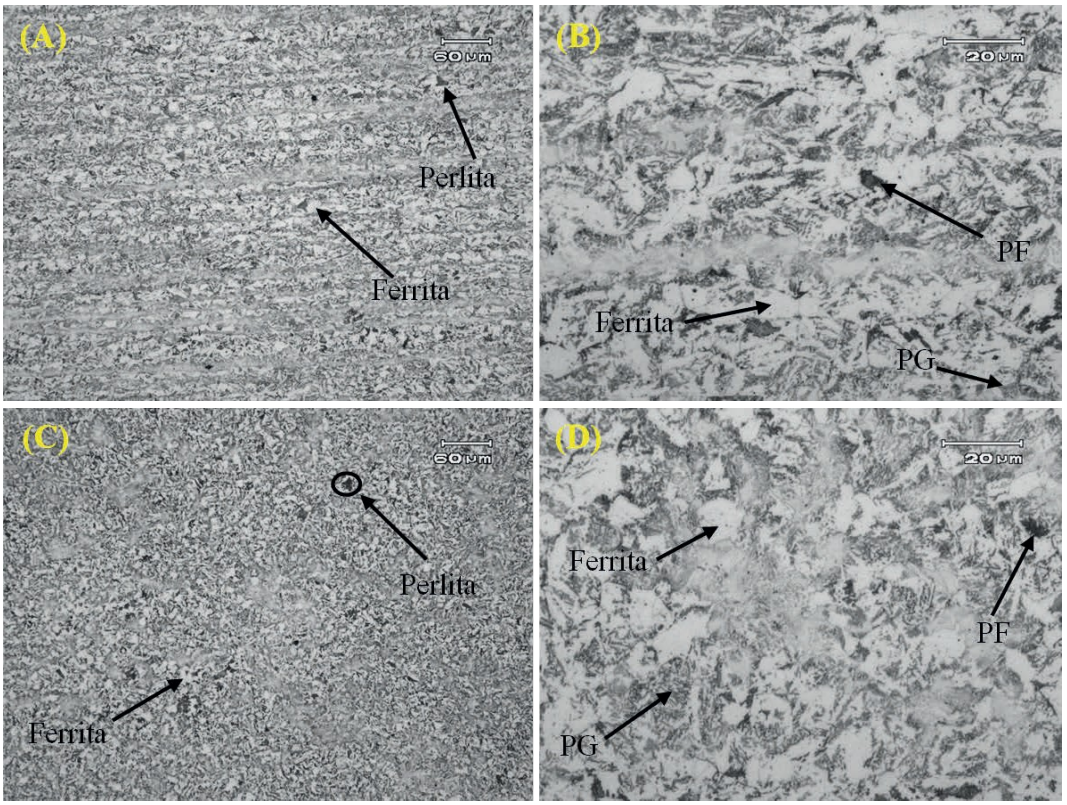

Figura 5.4 Microestrutura do metal de adição (pino). (A) Seção longitudinal 200x; (B) Seção longitudinal 1000x; (C) Seção transversal 200x; (D) Seção transversal 1000x.

Observando a Figura 5.5 nota-se que tanto o MB BS 4360 quanto o MA SAE 4140 possuem microestruturas similares, sendo visível neste último maior quantidade de perlita, em função do maior teor de carbono no material. A microestrutura do MB é composta pelos mesmos constituintes ferrita e perlita, com textura alinhada no sentido longitudinal da peça, devido ao processo de laminação, responsável pelo aumento de dureza e resistência mecânica do material. A Figura 5.5 B indica a presença dominante de perlita grossa no material.

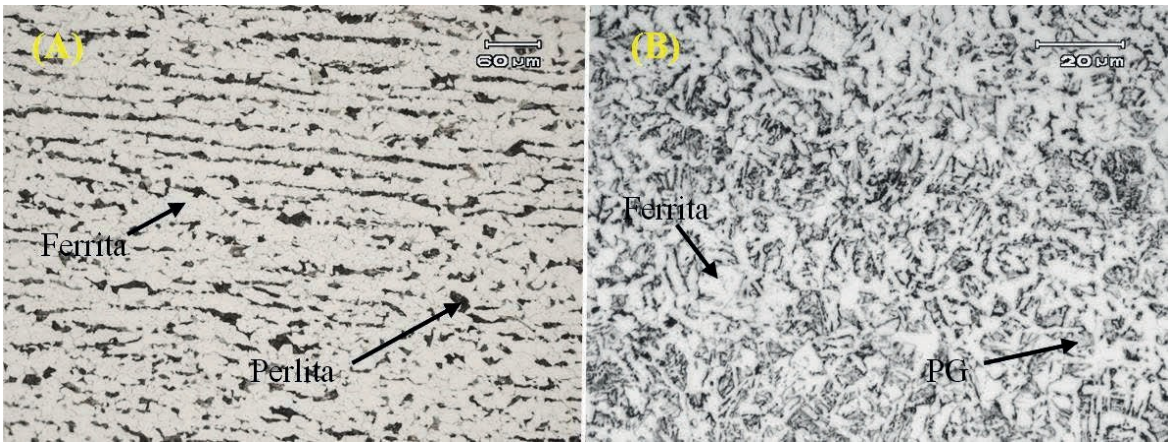

Figura 5.5 Microestrutura do metal base (bloco). (A) Seção longitudinal 200x; (B) Seção transversal 1000x.

As regiões selecionadas para a análise microestrutural dos corpos de prova após o processo de soldagem (Tabela 4.3) são indicadas na Figura 5.6, localizados onde provavelmente tenham ocorrido mudanças microestruturais decorrentes do processo de soldagem por atrito.

As microestruturas presentes na região da interface pino/bloco não podem ser claramente definidas mesmo em maiores ampliações. Nestas regiões foram encontradas diversas estruturas características deste tipo de processo de soldagem, tais como martensita, bainita, perlita, austenita e ferrita. As áreas abaixo a interface, indicadas pela Figura 5.7 A e Figura **5.7** B consistem em uma mistura de martensita em conjunto com ferrita e austenita, havendo também a formação de bainita, indicada pela forma acicular e coloração escura. Esta grande variação microestrutural é decorrente das elevadas taxas de resfriamento no início da solda, considerando que bloco no qual o pino é atritado encontra-se na temperatura ambiente e possui maior massa em relação ao mesmo, permitindo uma maior extração de calor em comparação ao pino, que tem menor área para dissipar o calor produzido durante o processo de soldagem.

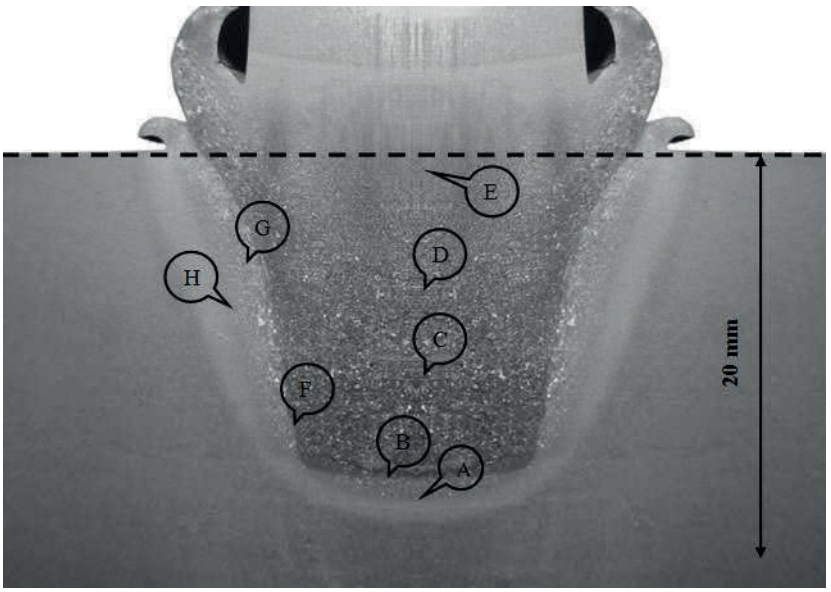

Figura 5.6 Regiões para análise microestrutural.

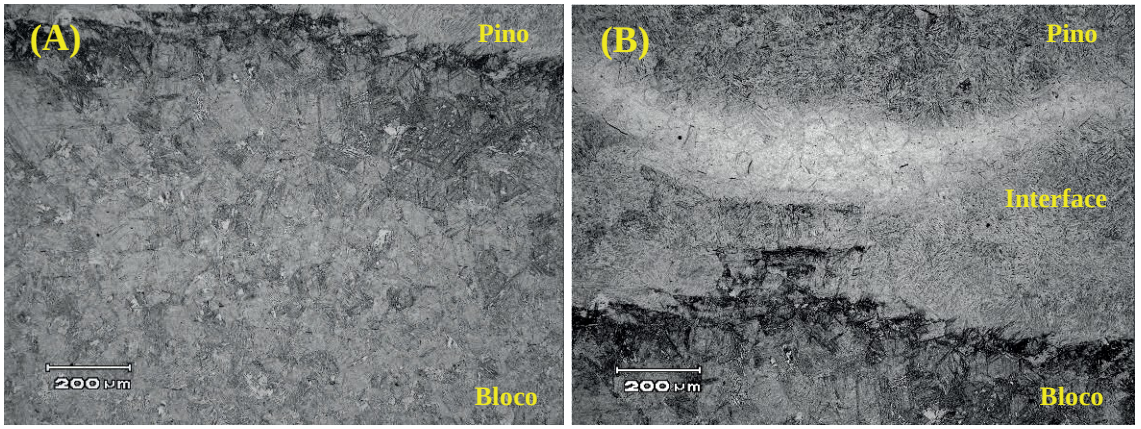

Figura 5.7 Microestruturas das regiões A e B.

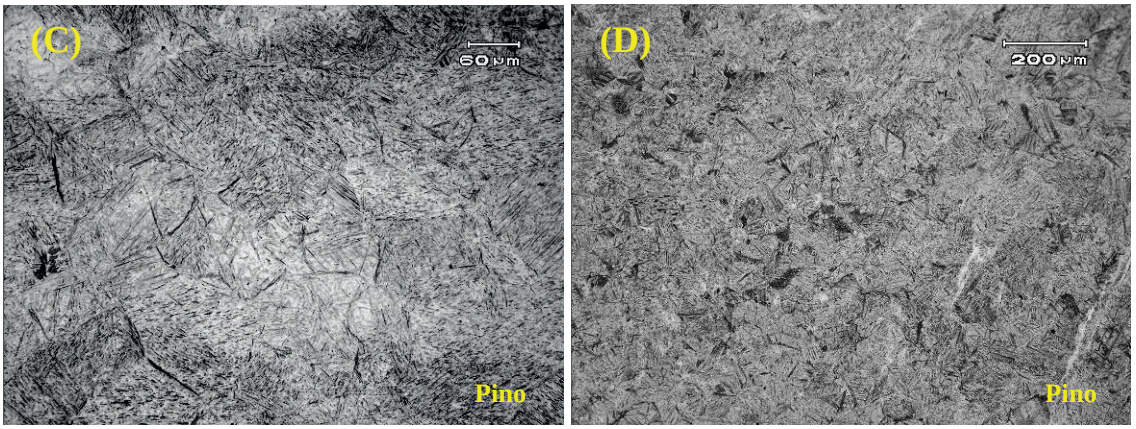

Figura 5.8 Microestruturas das regiões C e D.

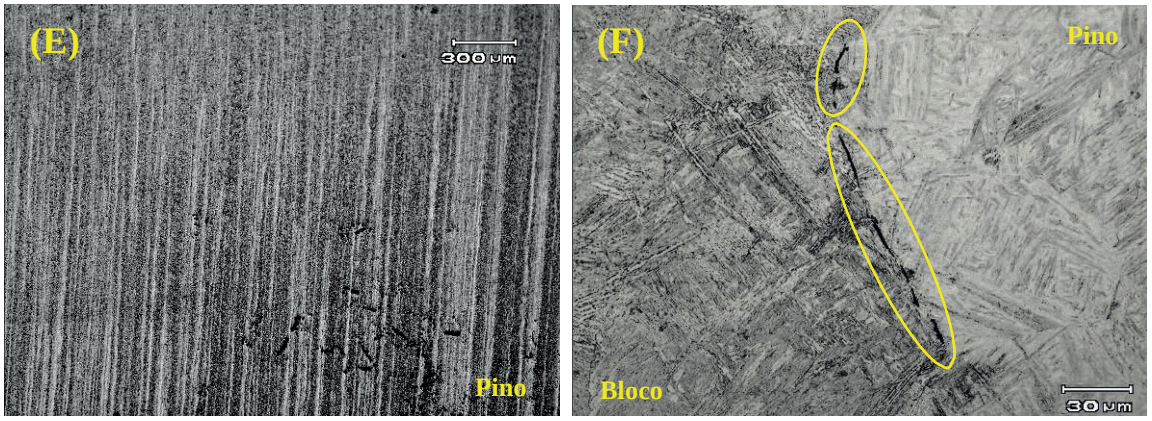

Figura 5.9 Microestruturas das regiões E e F.

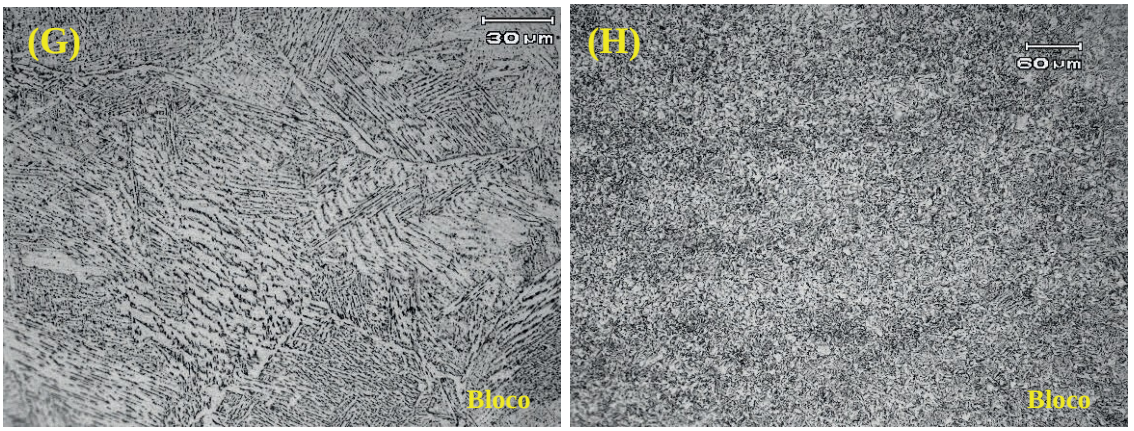

Figura 5.10 Microestruturas das regiões G e H.

Avançando em direção ao topo do bloco, no sentido longitudinal ao pino, inicialmente encontra-se grandes placas de martensita não revenida, austenita retida e pequena quantidade de martensita em ripas (Figura 5.8 C). Logo acima ainda observamos a fase martensita, entretanto ela encontra-se mais refinada, indicando um possível processo de têmpera, cuja origem seja a ocorrência de um aporte térmico maior nesta região do pino (Figura 5.8 D). Enfim observando a microestrutura do pino, aproximadamente na linha da superfície do bloco de reparo (Figura 5.9 E), foi constatada a ocorrência do fenômeno conhecido como bandeamento. O bandeamento é uma condição microestrutural, desenvolvido principalmente em aços ligados e de resfriamento lento, os quais apresentam bandas alternadas de ferrita e perlita, paralelas ao sentido de laminação/trefilação (KRAUSS 2007).

Na lateral esquerda da interface de solda (Figura 5.9 F), região indicada pelos círculos, houve a formação de microtrincas devido às temperaturas insuficientes para realizar a união metalúrgica dos materiais. A presença destas microtrincas também está

vinculada aos parâmetros: força axial; velocidade de rotação; comprimento de queima e força de forjamento, os quais favoreceram a uma contração térmica não uniforme durante o resfriamento, causando posteriormente falta de preenchimento no local. Deste modo, comprometendo a qualidade da solda e influenciando negativamente em sua confiabilidade em serviço. Em relação a estruturas presentes no bloco, observamos martensita, agregados de ferrita-carboneto, indicados pelos tons escuros, e ferrita de Widmanstätten, sendo está última considerada indesejável devido sua forma em agulhas e sua mínima diferença de orientação cristalina, o que pode causar a fragilização da estrutura e também atuar como um caminho preferencial para a ocorrência de microtrincas (PIRES 2007). Enquanto no pino, junto a interface, a estrutura predominante é de martensita não revenida, evidenciada pelas grandes e largas agulhas.

Na ZTA, próximo à interface pino/bloco, uma área em específico recebeu maior atenção devida sua forte coloração branca em meio ao cinza predominante do local. A área em questão apresenta grande variedade microestrutural, entretanto todas são variações da fase ferrita (Figura 5.10 G). Estas fases são de difícil identificação, entretanto é possível verificar a presença de ferrita acicular, ferrita de Widmanstätten, ferrita intergranular e ferrita de contorno de grão (MARQUES 2009). Por fim, afastando-se deste ponto em direção a lateral esquerda do bloco (Figura 5.10 H), a microestrutura obtida é uma mistura de ferrita e perlita muito refinadas, semelhante àquelas encontradas no bloco antes do processo de solda (Figura 5.5), no entanto não estão mais alinhadas e sim finamente dispersas. Assim sendo uma tendência na redução da variação microestrutural é observada, pois o calor originado pelo atrito perde efeito gradualmente conforme se distancia da interface de contato pino/bloco.

5.3 Ensaios de Microdureza Vickers

As modificações microestruturais decorrentes do processo de solda por atrito resultaram em grandes alterações nos valores de dureza nos corpos de prova, como mostrado nas Figura 5.11 a Figura **5.13**. Conforme essas figuras, todas as soldas apresentaram aumento nos valores de dureza nas regiões da ZTA (interface pino/bloco) e ZTMA (pino), entretanto os valores máximos de dureza foram observados neste último, com valores na média de 700 HV, tendo em vista que a dureza deste material antes da solda era de 318 HV. Tanto os perfis verticais quanto os perfis horizontais exibem uma transição acentuada da dureza do MB (bloco) para o pino. O aumento da dureza na região

da ZTA, bem como na ZTMA, estão relacionadas às modificações microestruturais decorrentes do trabalho termomecânico, resultando na formação de grandes quantidades de martensita, como observado na Figura 5.8 C e Figura **5.8** D.

De acordo com os perfiz de dureza, as regiões correspondentes ao MB (bloco) indicam através dos menores valores medidos, que a microestrutura original praticamente não sofreu alterações pelo calor gerado no processo, mantendo assim a dureza na faixa de 165 HV, valor verificado em ensaio de dureza antes da solda. Na segunda região, ZTA, os valores medidos apresentam diferenças consideráveis em relação um ao outro, principalmente em função dos diferentes parâmetros utilizados nas soldas por atrito conforme pode ser visto na Tabela 4.3. O CP1 apresenta uma ZTA maior comparado aos outros, pois seus parâmetros influenciaram no aumento do aporte térmico na região, criando condições para homogeneizar a microestrutura presente entre o MB e a ZTMA (Figura 5.11), indicando valores de microdureza entre 350 HV a 200 HV. Em relação aos CP2 e CP3, observamos que a ZTA fica mais estreita neste último, decorrente da maior força axial e de forjamento aplicadas. Também é importante ressaltar que de acordo com a literatura, na soldagem por atrito convencional, é de se esperar um aumento de dureza em função da força axial (PIRES 2007). Com relação à velocidade de rotação, não há indicação nítida de alteração dos perfis de microdureza em função da posição (MEYER 2002).

É possível, identificar através das Figura 5.11 a Figura **5.13**, a tendência das durezas de apresentarem valores mais elevados, em posições axiais superiores, representadas pelas posições 13 mm; 7,5 mm; 2,0 mm, sendo esta última à posição axial superior (Figura 4.8). Esse efeito, como já mencionado, é decorrente dos tempos de ensaios, o que reflete diretamente no aumento do calor gerado no processo, e, conseqüentemente, na intensificação e maior alcance das modificações microestruturais.

Seguindo em direção a ZTMA, as durezas apresentaram comportamento médio praticamente constante em função da posição, com tendência a se estabilizarem quando mais próximas à superfície superior do bloco. Quanto às variações de dureza observadas na região da ZTMA; os picos provavelmente tenham origem em função de o identador ter atingido algum carboneto (alta dureza) disperso na matriz martensítica enquanto que nos vales sua origem é determinada pela presença de austenita retida (baixa dureza).

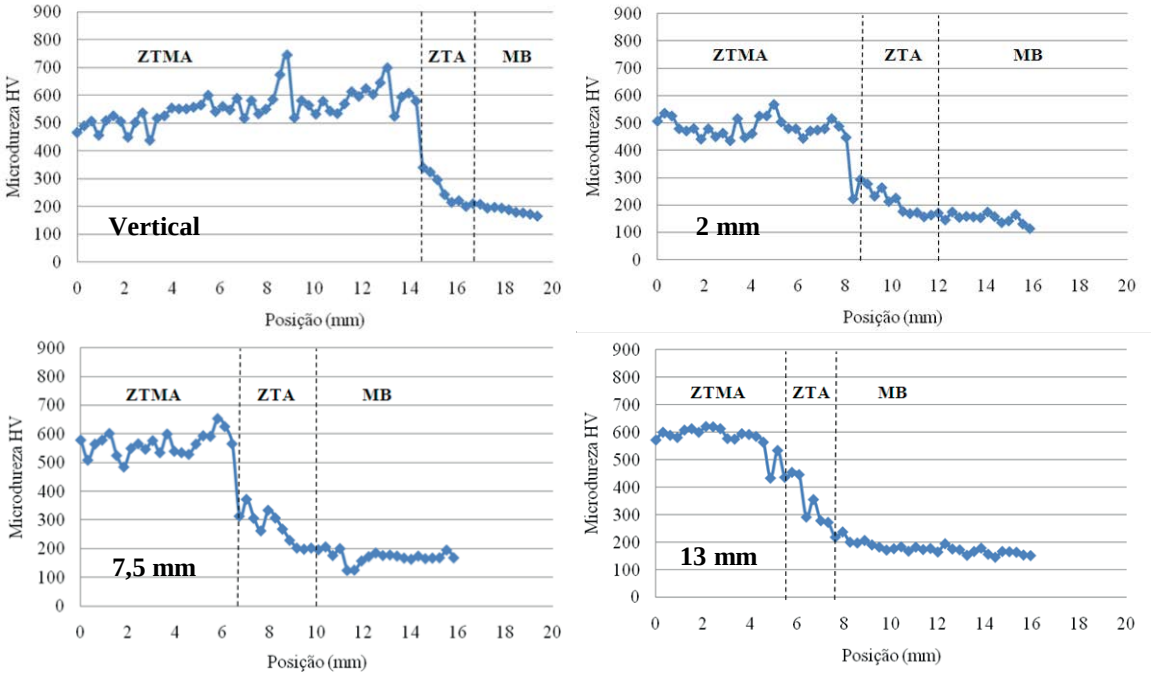

Figura 5.11 Perfis de microdureza do CP1: vertical e horizontais.

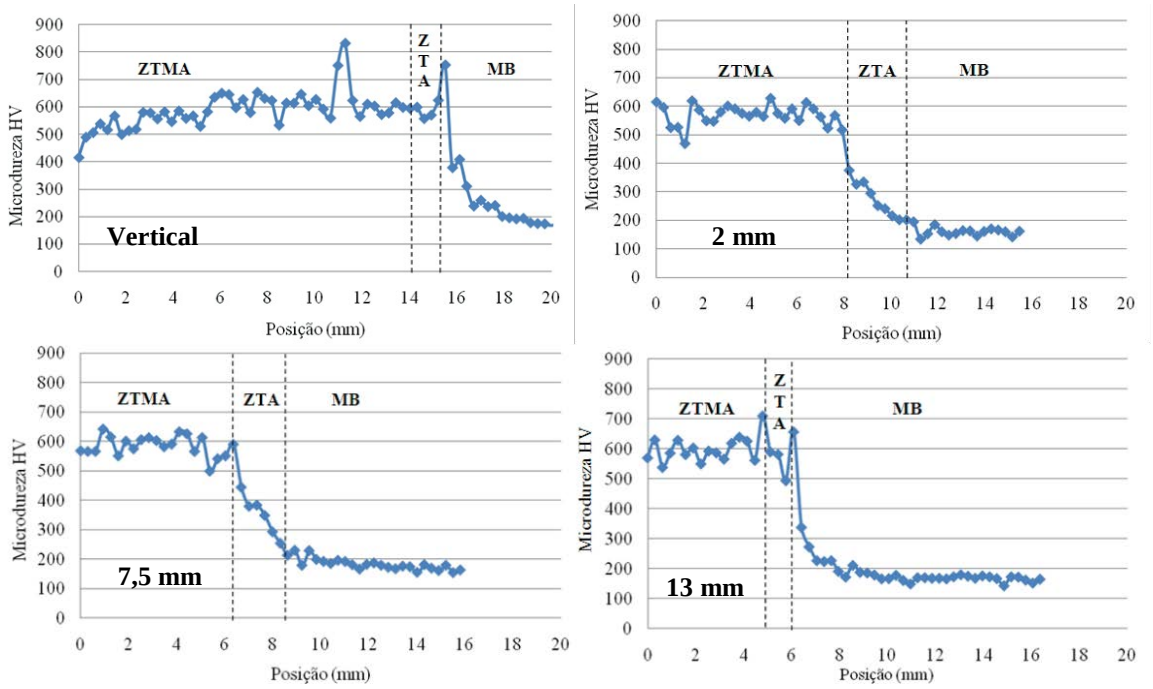

Figura 5.12 Perfis de microdureza do CP2: vertical e horizontais.

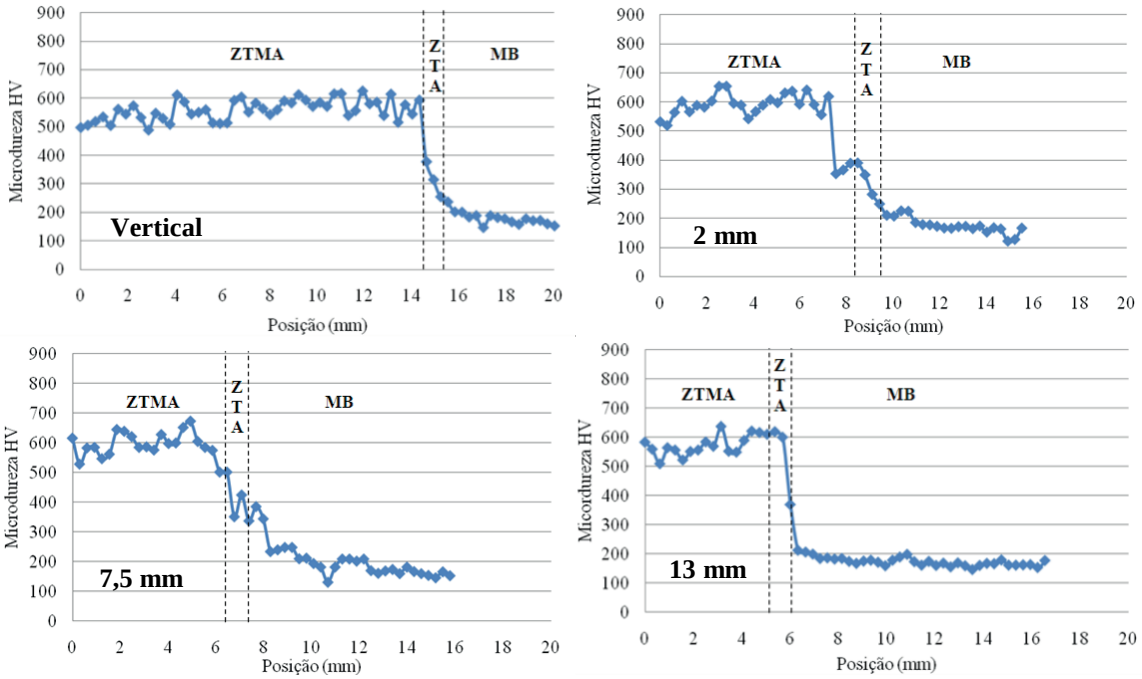

Figura 5.13 Perfis de microdureza do CP3: vertical e horizontais.

6.0 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho permitem as seguintes conclusões:

- A força axial aparece como fator dominante na qualidade da solda obtida, vinculada diretamente aos tempos de soldagem. Este parâmetro obedece à seguinte relação; quanto maior a força axial aplicada, menores serão os tempos de soldagem e conseqüentemente menor o aquecimento no local. Portanto como observado no CP3, que possui a maior força axial dos ensaios realizados, a extensão da ZTA diminui devido ao menor aquecimento;
- A origem da grande variedade microestrutural presente nos corpos de prova está intimamente relacionada com as elevadas taxas de resfriamento produzidas e o gradiente de temperatura formado na região de atrito. Em função disto são atribuídas as presenças de martensita não revenida, bem como de austenita retida na região da ZTA;
- A ocorrência de defeitos, mais especificamente microtrincas, foi observada na lateral da interface pino/bloco. As mesmas estão vinculadas aos parâmetros, força axial, velocidade de rotação, comprimento de queima e força de forjamento, os quais favoreceram a uma contração térmica não uniforme durante o resfriamento. Conseqüentemente, causando falta de preenchimento no local e formação de tensões residuais associadas às mudanças de volume. Para evitar este tipo de problema é indicado realizar mudanças no processo que reduzam as diferenças nas taxas de resfriamento na interface do conjunto, como por exemplo, aumentando os tempos de soldagem e diminuindo a velocidade de rotação do pino;
- Em média os perfis de dureza apresentaram valores semelhantes, tanto os perfis horizontais quanto verticais. Algumas variações podem ser observadas na região da ZTMA e ZTA, atribuídas principalmente a presença

de alguns carbonetos (alta dureza) dispersos na matriz e também de austenita retida (baixa dureza). A elevada taxa de resfriamento em conjunto com o gradiente térmico originado após a soldagem justificam a formação destas microestruturas;

- A diferença existente entre os valores de dureza nas regiões da ZTMA, ZTA e do bloco não são desejáveis em uma junta soldada, pois podem fragilizar o material, podendo causar a falha do componente em serviço.

7.0 CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

Sugestões para trabalhos futuros a serem realizados a partir dos resultados obtidos:

- Desenvolver novos estudos visando maior compreensão e detalhamento dos parâmetros relativos ao processo;
- Ampliar o número de pesquisas a fim de descobrir novas aplicações para o método FHPP nos diversos setores da indústria;
- Realizar análises mais aprofundadas acerca das microestruturas formadas na soldagem por atrito, bem como avaliar as propriedades mecânicas das mesmas.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM**: Standard Test Method for Guided Bend Test Ductility of Welds. E 190-92, 2003.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS**: Welding Handbook. Vol. 2, 8th Ed, Miami, 1991.

BLAKEMORE, G. R. **Friction Stud Welding in Hazardous Areas. Welding & Metal Fabrication**, p.428-430, December 1993.

BLAKEMORE, G. R. **Friction Welding: Technology for the New Millennium**. In: OFFSHORE CONFERENCE, Houston, Texas, May 1999.

CROSSLAND, B. **"Friction Welding: Recommended Practices for Friction Welding"**. In: Contemporary Physics, 12(6), p.559-574, 1971.

ELLIS C. R. G. **Continuous Drive Friction Welding of Mil Steel**. Welding Journal, p.183-197, April 1972.

KRAUSS, G. **"Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels"**. Journal Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 34, Number 6, December, 2003

LEBEDEV, V. K.; CHERNENKO, I. A. **Friction Welding**. Vol. 4, p.59-168, 1992.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. 2007.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 363 p. 2ª Ed. revista e ampliada. UFMG, 2009.

MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing**. Dr.Ing. Thesis an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2002.

NENTWIG, A. W. E.; WELT, W.; TENSI, H. M. **"Analyse des Reibschweißablaufes beim Rotationsreibschweißen von metallischen Werkstoffen gleicher und unterschiedlicher Warmfestigkeit".** p.10-14, DVS Berichte, 1991.

NICHOLAS, E. D. **"Friction Hydro Pillar Processing"** In 11th Annual North American Welding Research Conference. Nov. 7-9, 1995.

NICHOLAS, E. D. **Underwater Friction Welding for Electrical Coupling of Sacrificial Anodes**. In: 16th Annual OTC. Houston, Texas, May 7-9, 1984.

NIXON, J. **Effects of Water Depth on Friction Stud Welding Parameters**. School of Welding and Joining Technology. Cranfield University. England, 1986.

PINHEIRO, G. A.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V.; MEYER, A.; DOS SANTOS, J.F.; BLAKEMORE, G. R. **Costura por Atrito: Fundamentos e Aplicações**. 1º Cobef. Abril, 2001.

PIRES, R. R., **Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito**. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.

The Welding Institute. <http://www.twi.co.uk/content/friction_index.html> Acesso em 12 Ago. 2009.

THOMAS, W. **"The need for gas shielding: positive advantages for two friction processes"**. TWI Bulletin, p.84-88, Sep/Oct, 1997.

THOMAS, W.; NICHOLAS, D. **"Friction Hydro Pillar Processing (FHPP)"**. TWI Connect. June, 1992.

Thompson Innovators in Friction Welding. <http://www.thompsonfw.co.uk/> Acesso em 22 Set. 2009.

WICHELHAUS, G. **"Berechnung der Stoßflächentemperatur beim Reibschweißen"**. In Schweißen und Schneiden, 27 (1), p.9-10, 1975.

Wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_welding> Acesso em 3 Set. 2009.