

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

Departamento de Metalurgia

AQUISIÇÃO DE TEMPERATURA E ANÁLISE DA MICROESTRUTURA COM A  
VARIAÇÃO DE PARÂMETROS NA SOLDA POR FRICÇÃO COM PINO  
CONSUMÍVEL

**Jonas Trento Buzzatti**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre

2011

Dedico esta dissertação aos meus pais, irmão, família, amigos e a quem me deu força ao longo da minha formação acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Dr. Telmo Roberto Strohaecker pelo material e espaço cedido no laboratório.

Ao Dr. Vitor Frainer pelo apoio teórico durante a instrumentação e realização dos ensaios.

Meu irmão Diogo Trento Buzzatti, Graduando em engenharia metalúrgica, pelo apoio técnico na instrumentação dos corpos de prova durante os ensaios e incentivo ao longo do curso.

Gustavo Pacheco Buzzatti.

Ao professor Dr. Afonso Reguly pela ajuda nas análises metalográficas.

Mariane Chludsinski, engenheira metalúrgica, pelo material utilizado para instrumentação do ensaio.

Fabiano Mattei, engenheiro mecânico, pelo apoio teórico e técnico na operação da máquina de solda durante realização dos ensaios.

Douglas Martinazzi, o Stalone, graduando em engenharia metalúrgica pela ajuda na preparação metalográfica e aos demais colegas do GAF.

Lucien Gualdi.

Aos colegas do GECOR pelo empréstimo da solda capacitiva.

Demais colegas do PROENG.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	V
LISTA DE TABELAS .....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	X
RESUMO .....	XI
ABSTRACT .....	XII
1.0 INTRODUÇÃO .....	1
2.0 REVISÃO DA LITERATURA .....	3
2.1 Soldagem por Fricção .....	3
2.1.1 Histórico .....	3
2.1.2 Processos de Soldagem por Fricção .....	4
2.1.3 Vantagens e Limitações do processo de Soldagem por Fricção .....	5
2.1.4 Etapas da Soldagem por Fricção .....	5
2.1.5 União de Materiais Dissimilares .....	7
2.1.6 Variantes do Processo .....	8
2.1.7 Solda por Fricção com Pino Consumível .....	9
2.2 Efeito da Velocidade de Resfriamento na Transformação da Austenita .....	10
2.2.1 Diagramas de Transformações Isotérmicas .....	11
2.2.2 Diagramas de Resfriamento contínuo .....	15
2.2.3 Efeito dos elementos de liga .....	17
2.3 Aços Ligados .....	18
2.3.1 Efeito dos elementos de liga sobre o diagrama de equilíbrio Fe-C. ....	19
2.3.2 Efeito dos elementos de liga nos aços .....	20
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	23
3.1 Máquina de Solda por Atrito .....	23
3.2 Pino Consumível e Base para Solda .....	23

3.3	Aquisição de Temperatura.....	25
3.4	Diagrama CCT.....	28
3.5	Análise Metalográfica.....	29
3.6	Perfis de Microdureza.....	30
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1	Aquisição de Dados e Efetividade da Máquina.....	32
4.2	Aquisição de Temperatura.....	33
4.3	Curvas de Resfriamento e Diagrama CCT .....	37
4.4	Metalografia.....	39
4.5	Perfis de Microdureza.....	50
5.0	CONCLUSÕES .....	54
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Processo básico de solda por fricção. ....	3
Figura 2.2	Evolução dos parâmetros durante a solda por fricção. ....	6
Figura 2.3	Desenho esquemático do processo de fricção convencional. ....	7
Figura 2.4	Solda por Fricção com Pino Consumível. ....	10
Figura 2.5	Reação eutetóide. ....	11
Figura 2.6	Porcentagem de transformação versus logaritmo do tempo. ....	12
Figura 2.7	Construção do diagrama de transformação isotérmica (parte inferior) a partir de medições de porcentagem de transformação em função do logaritmo do tempo (parte superior). ....	12
Figura 2.8	Diagrama TTT completo. ....	13
Figura 2.9	Martensita em ripa (em cima) e martensita em placa (em baixo). ....	14
Figura 2.10	Martensita em ripa (em cima) e martensita em placa (em baixo). ....	15
Figura 2.11	Num resfriamento contínuo as curvas isotérmicas são deslocadas para a direita e para baixo. ....	16
Figura 2.12	Curvas representando diversas velocidades de resfriamento. ....	17
Figura 2.13	Diagrama de Equilíbrio Fe-C. ....	19
Figura 2.14	Efeito dos elementos na temperatura eutetóide. ....	20
Figura 2.15	Efeito dos elementos de liga no teor de carbono do eutetóide. ....	20
Figura 3.1	Projeto virtual da MSA 1000 e foto do equipamento montado. ....	23
Figura 3.2	Geometria do pino (acima) e da chapa da base (abaixo). ....	25
Figura 3.3	Localização dos orifícios para instalação dos termopares. ....	26
Figura 3.4	Solda capacitiva para termopares. ....	26
Figura 3.5	Termopar utilizado na aquisição de temperatura com estaque na junta quente. ....	26
Figura 3.6	Condutores do termopar soldados ao material da base da solda por fricção. ....	27
Figura 3.7	Amplificador e conversor de sinal <i>Spider 8</i> . ....	27
Figura 3.8	Posicionamento dos termopares na amostra. ....	28
Figura 3.9	Corte paralelo ao eixo de aplicação da carga. ....	28

Figura 3.10	Diagrama de resfriamento contínuo de um aço SAE 8620. ....	29
Figura 3.11	Região de análise metalográfica com destaque para os pontos de aquisição de temperatura, a região analisada do pino variou em cada corpo de prova. ....	30
Figura 3.12	Martensita revenida no material da base da solda com aumento de 1000X e ataque de nital 3%. ....	30
Figura 3.13	Perfis de microdureza no pino e no material da base da solda, as setas indicam o sentido de medição. ....	31
Figura 4.1	Soldagem no corpo de prova CP 03. ....	32
Figura 4.2	Soldagem no corpo de prova CP 04. ....	33
Figura 4.3	Soldagem no corpo de prova CP 05. ....	33
Figura 4.4	Temperaturas da amostra CP 03 soldada com 1000 rpm e 20 kN. ....	35
Figura 4.5	Temperatura da amostra CP 04 soldada com 500 rpm e 23 kN. ....	35
Figura 4.6	Temperatura da amostra CP 05 soldada com 500 rpm e 20 kN. ....	36
Figura 4.7	Cruzamento dos dados de temperatura, força e rotação do corpo de prova CP 03. ....	36
Figura 4.8	Cruzamento dos dados de temperatura, força e rotação do corpo de prova CP 04. ....	37
Figura 4.9	Cruzamento dos dados de temperatura, força e rotação do corpo de prova CP 05. ....	37
Figura 4.10	Curvas de resfriamento contínuo do corpo de provas CP 03 e diagrama CCT. ....	38
Figura 4.11	Curvas de resfriamento contínuo do corpo de provas CP 04 e diagrama CCT. ....	38
Figura 4.12	Curvas de resfriamento contínuo do corpo de provas CP 05 e diagrama CCT. ....	39
Figura 4.13	Macrografia do corpo de prova CP 03. ....	40
Figura 4.14	Macrografia do corpo de prova CP 04. ....	40
Figura 4.15	Macrografia do corpo de prova CP 04. ....	40
Figura 4.16	Zona afetada pelo calor no corpo de prova CP 03 ....	41
Figura 4.17	Zona afetada pelo calor no corpo de prova CP 04 ....	42
Figura 4.18	Zona afetada pelo calor no corpo de prova CP 05 ....	42
Figura 4.19	Falta de união metalúrgica entre o pino e a base da solda no corpo de prova CP 03. ....	43

Figura 4.20	Falta de união metalúrgica entre o pino e a base da solda no corpo de prova CP 03.....	43
Figura 4.21	Falta de união metalúrgica entre o pino e a base da solda no corpo de prova CP 03.....	44
Figura 4.22	Região do corpo de provas CP 03 onde ocorreu a solda. Detalhes de recristalização e refino de grão no pino em foto com aumento de 500x e ataque com nital 3%.....	44
Figura 4.23	Regiões do pino com grãos de diferentes morfologias. Fotos dos detalhes com aumento de 100x e ataque com nital 3%.....	45
Figura 4.24	Localização das micrografias na base da solda dos corpos de prova CP 03, CP 04 e CP 05 respectivamente. ....	45
Figura 4.25	Micrografia da região AS no Corpo de provas CP 03 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando formação de martensita. Ataque: nital 3%.....	46
Figura 4.26	Micrografia da região BS no Corpo de provas CP 03 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando formação de martensita. Ataque: nital 3%.....	46
Figura 4.27	Micrografia da região AI no Corpo de provas CP 03 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando carbonetos mais grosseiros. Ataque: nital 3%.....	46
Figura 4.28	Micrografia da região BI no Corpo de provas CP 03 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%. ....	47
Figura 4.29	Micrografia da região AS no Corpo de provas CP 04 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando carbonetos mais grosseiros. Ataque: nital 3%.....	47
Figura 4.30	Micrografia da região BS no Corpo de provas CP 04 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%. ....	48
Figura 4.31	Micrografia da região AI no Corpo de provas CP 04 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%. ....	48
Figura 4.32	Micrografia da região BI no Corpo de provas CP 04 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%. ....	48
Figura 4.33	Micrografia da região AS no Corpo de provas CP 05 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando carbonetos mais grosseiros. Ataque: nital 3%.....	49



Figura 4.34	Micrografia da região BS no Corpo de provas CP 05 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%. .....	49
Figura 4.35	Micrografia da região AI no Corpo de provas CP 05 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%. .....	49
Figura 4.36	Micrografia da região BI no Corpo de provas CP 05 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%. .....	50
Figura 4.37	Localização e sentido das medições dos perfis de micrdureza e média dos resultados em cada região do pino e no pino em CP03. ....	51
Figura 4.38	Resultado das medições nos perfis do pino do corpo de prova CP 03 (esquerda) e no perfil que abrange base da solda e pino (direita). ....	51
Figura 4.39	Localização e sentido das medições dos perfis de micrdureza e média dos resultados em cada região do pino e no pino em CP04. ....	52
Figura 4.40	Resultado das medições nos perfis do pino do corpo de prova CP 04 (esquerda) e no perfil que abrange base da solda e pino (direita). ....	52
Figura 4.41	Localização e sentido das medições dos perfis de micrdureza e média dos resultados em cada região do pino e no pino em CP05. ....	53
Figura 4.42	Resultado das medições nos perfis do pino do corpo de prova CP 05 (esquerda) e no perfil que abrange base da solda e pino (direita). ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Vantagens e Limitações do processo de Solda por Fricção. ....	5
Tabela 2.2	Processos de soldagem por fricção.....	8
Tabela 2.3	Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços. ....	22
Tabela 3.1	Relação de força axial de velocidade de rotação. ....	23
Tabela 3.2	Resultado da análise química no material base e pino. ....	24
Tabela 4.1	Resultado da análise química no material base e pino. ....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

FHPP	Solda por Fricção com Pino Consumível
ZAC	Zona Afetada Pelo Calor
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
AWS	Sociedade Americana de Soldagem
AISI	Instituto Americano de Ferros e Aços
TTT	Diagrama de transformação Isotérmica
CCT	Diagrama de Resfriamento Contínuo
rpm	Rotações por Minuto
kN	Quilonewton
kW	Quilowatts
mm	milímetros
°C	Graus Celsius
$\gamma$	Austenita
$\alpha$	Ferrita
$A_1$	Temperatura de Transformação Eutetóide
$M_s$	Temperatura de Início da Transformação Martensítica
$M_i$	Temperatura Intermediária da Transformação Martensítica
$M_f$	Temperatura Final da Transformação Martensítica

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar a técnica de Solda por Fricção com Pino Consumível ou FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*) em materiais dissimilares. Foi avaliada a influência dos parâmetros de processos de soldagem como força axial e velocidade de rotação do pino consumível sobre as taxas de resfriamento e microestrutura formada.

Foram utilizados como substratos chapas com espessura de 30 mm e pinos consumíveis de uma liga 2%FeNi. O material das chapas da base da solda foi retirado de um elo de corrente de amarração utilizada na ancoragem de plataformas petrolíferas que operam em alto mar.

Os resultados obtidos mostraram os diferentes comportamentos do material do pino consumível e da base da solda em resposta a variação dos parâmetros de soldagem, como mudanças microestruturais. Avaliou-se também a possibilidade de melhorias nos projetos de usinagem dos corpos de prova bem como de fixação dos componentes na máquina de solda.

Para atingir este objetivo foram realizados experimentos utilizando uma máquina de solda por fricção desenvolvida no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS. Durante a soldagem dos corpos de prova foram adquiridos os valores de temperatura ao longo da ZAC em quatro pontos específicos. As curvas de resfriamento foram sobrepostas aos diagramas de resfriamento contínuo do aço SAE 8620 para um efeito comparativo com a microestrutura final. Para isso foram realizadas macrografias e micrografias em microscópio óptico em regiões do pino e da base da solda, além de perfis de microdureza ao longo da solda.

## ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the Friction Hydro Pillar Process welded joints of dissimilar materials. It was evaluated the influence of process parameters axial force and rotation speed of the rod through changes in the cooling rate and microstructure.

A 30 mm thick plate and a FeNi alloy were used as base materials. The material selected as plate was obtained from a mooring chain used as anchorage in offshore platform.

To reach this objective experiments using a friction welding machine developed in the *Laboratório de Metalurgia Física* of UFRGS were performed. During welding temperature measurements were performed along the HAZ in four different positions. Cooling curves were superimposed to continuous cooling diagrams of steel SAE 8620 to a comparative effect with final microstructure. The microstructure analysis were developed using optical microscope and microhardness measurements were performed.

The results showed different behavior of the rod material and the base of weld in response to variation of welding parameters as microstructural changes. It was also evaluated the possibility of improvement in machining of the samples as well as the fixation of the components in the friction welding machine.

## 1.0 INTRODUÇÃO

A união de peças metálicas tem sido motivo de estudos ao longo de décadas, a busca pelo melhoramento dessa união gerou o desenvolvimento de diversos processos, dentre eles, a soldagem por fricção com pino consumível ou Friction Hydro Pillar Processing. O processo FHPP consiste na utilização de um pino consumível com rotação que pode variar entre 1000 a 10000 rpm e de uma força axial aplicada que faz com que o pino entre em contato com o fundo de furo previamente usinado. Este contato gera calor a partir do atrito, que plastifica o pino contra o metal base e dessa forma preenche a cavidade do furo. Diferente da maioria dos processos convencionais de soldagem, que promove a fusão dos materiais envolvidos, a soldagem por fricção une as partes sem que a fusão ocorra minimizando defeitos, tais como fragilização por hidrogênio, e problemas ligados à solidificação (ANDREWS).

A utilização de um processo que é conduzido inteiramente no estado sólido torna-se e assim limita a extensão das transformações metalúrgicas que podem causar trincas de solidificação além de fragilização pelo hidrogênio e porosidade. Como alternativa este processo pode ser utilizado para atender a demanda de reparos de estruturas submersas como tanques e tubulações de plataformas de petróleo que estão sujeitas à formação de trincas e conseqüentemente isso pode levar a rupturas e acidentes. Outra vantagem do processo é a facilidade de ser automatizado, garantindo reprodutibilidade e qualidade da solda, aumentando a confiabilidade do reparo assim como a redução do tempo de execução e custo (MEYER 200).

Os principais parâmetros de controle do processo são a velocidade de rotação, taxa de queima, força axial aplicada sobre a chapa e o tempo de aquecimento. Segundo Ellis (ELLIS 1972) o parâmetro força axial controla de forma preponderante os tempos de soldagem e também atua no perfil e nas características da zona afetada pelo calor (ZAC).

O objetivo desse trabalho é encontrar dados científicos que promovam uma maior elucidação sobre a correlação entre a carga axial aplicada, velocidade de rotação, taxas de resfriamento e microestrutura formada em diversos pontos da ZAC.

## 2.0 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Soldagem por Fricção

#### 2.1.1 Histórico

A soldagem por fricção faz parte, segundo a AWS, de um dos processos de soldagem no estado sólido (PAPRITAN 1991). O processo é conhecido desde pelo menos 1889, quando foi requerida uma patente nos E.U.A. (THOMAS 1994). Sendo que na Alemanha, durante a 2ª Grande Guerra Mundial, tubos de material termoplástico foram assim unidos. Entretanto, somente com a publicação das experiências realizadas na extinta U.R.S.S. em 1957, renasceu o interesse sobre o processo (MEYER 2002).

#### 2.1.2 Processos de Soldagem por Fricção

Este processo utiliza a transformação de energia mecânica em calor, gerado através do atrito entre as superfícies que serão unidas. A soldagem ocorre em alta temperatura, mas na fase sólida e é obtida, então, por pressão e escoamento plástico dos materiais envolvidos. (MACHADO 2007). Nessa operação, é formada uma rebarba (flash), onde as impurezas (filmes de óxidos, graxas, inclusões, etc.) encontradas nas superfícies das peças são expulsas para esta rebarba (PINHEIRO 2008). A figura 2.1 esquematiza uma solda por fricção típica, onde uma peça estacionária é mantida em contato contra a peça giratória sob pressão até a interface atingir a temperatura de solda.

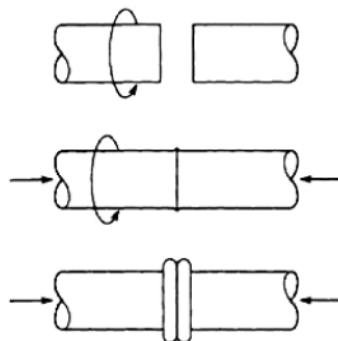


Figura 2.1 Processo básico de solda por fricção (ASM Handbook).



São listados cinco fatores principais que influenciam a qualidade da solda, sendo que os três primeiros estão relacionados a parâmetros de processo, enquanto que os dois últimos são relacionados aos materiais a serem unidos:

- Velocidade relativa das superfícies
- Pressão aplicada
- Temperatura das superfícies
- Propriedades dos materiais
- Condições das superfícies e presença de filmes

### 2.1.3 Vantagens e Limitações do Processo de Soldagem por Fricção

Como regra geral todos os materiais metálicos de engenharia que são forjáveis podem ser soldados por fricção. A Tabela 2.1 lista as vantagens e limitações do processo (MATTEI 2011).

Tabela 2.1 Vantagens e Limitações do processo de Solda por Fricção.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não é necessária limpeza ou acabamento das superfícies (no caso de solda de topo);</li> <li>• Não é necessário gás de proteção;</li> <li>• Mais seguro à saúde do operador, pois não tem radiação e nem fumos;</li> <li>• Não há riscos elétricos;</li> <li>• Não há defeito relacionado à fusão, pois a soldagem é efetuada no estado sólido;</li> <li>• Há possibilidade de fabricação de juntas de transição com materiais diferentes;</li> <li>• O processo é estável e automatizado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pelo menos uma peça precisa ser rotacionada;</li> <li>• Limitado às juntas de topo planas, cônicas e angulares desde que perpendiculares e concêntricas com o eixo de rotação;</li> <li>• O alinhamento das peças pode ser crítico;</li> <li>• O material de pelo menos um componente deve ser plasticamente deformável;</li> <li>• Custos dos equipamentos e ferramentas são elevados.</li> </ul>

#### 2.1.4 Etapas da Solda por Fricção

A descrição baseada na curva de torque de fricção, conforme Figura 2.2, divide o processo em três etapas como descrito a seguir e ilustrado na figura 2.3 (TSANG 1994).

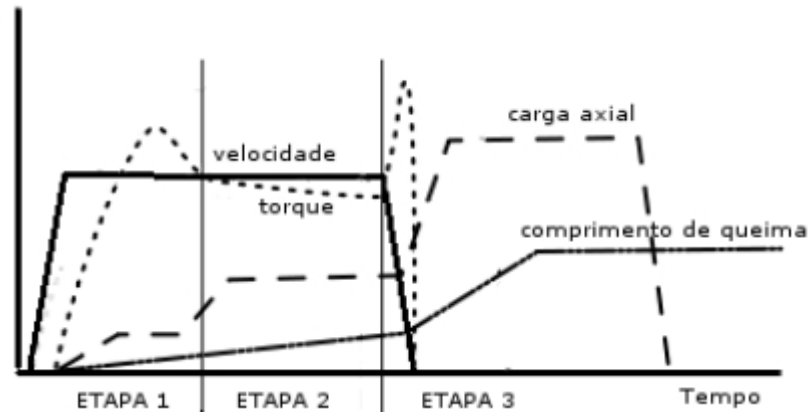


Figura 2.2 Evolução dos parâmetros durante a solda por fricção (LÓPES 2010).

1. **Etapa de Fricção:** O torque aumenta após o primeiro contato, alcança um pico e diminui antes de estabilizar marcando o fim da etapa 1 (Figura 2.3.a e 2.3.b). O rápido aumento e queda gradativa do torque estão associados ao intertravamento, microsoldas e ruptura de asperezas e subsequente amolecimento do material pelo aquecimento.
2. **Etapa de Aquecimento:** o torque mantém-se relativamente constante durante a etapa 2, indicando que o processo alcança um equilíbrio entre encruamento por deformação e amolecimento devido ao aumento da temperatura (Figura 2.3.c)
3. **Etapa de Forja:** A etapa começa no instante em que o eixo é desacelerado (Figura 2.3.d). Para efetuar a forja a carga axial é aumentada. O torque aumenta novamente formando um segundo pico antes de cair até zero. Este pico varia com a desaceleração e a força aplicada e pode ser suprimido sob algumas circunstâncias. Como a força de frenagem pode ser controlada, o tempo de frenagem pode ser uma das variáveis controladas do processo. Quando a frenagem é quase instantânea o torque cai abruptamente e a força axial maior é aplicada para produzir a forja. Quando a força axial permanece constante, menores taxas de frenagem levam a picos mais altos. Se a força axial é incrementada na fase 3, o tempo de frenagem é diminuído, mas o pico ainda aumenta em decorrência do maior carregamento. Aumentar o torque por fricção contribui na forja torsional, a qual é mais efetiva que a forja unicamente por aumento da carga axial.

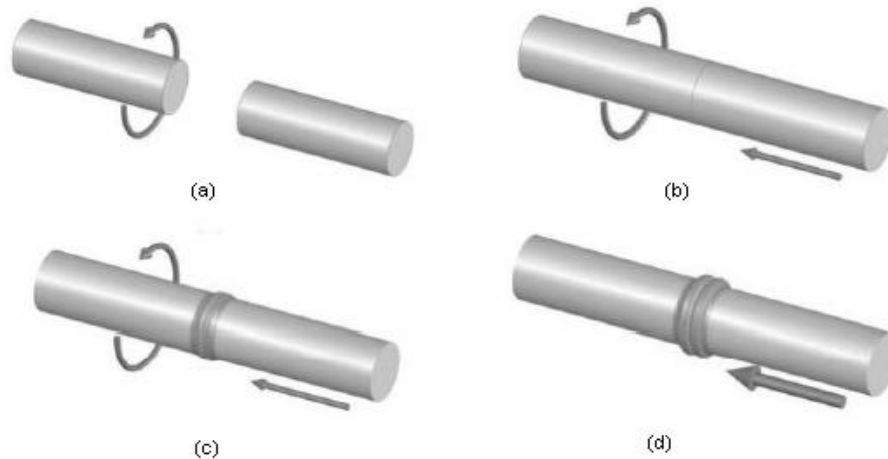


Figura 2.2 Desenho esquemático do processo de fricção convencional (AWS 1991 e PINHEIRO 2008).

### 2.1.5 União de Materiais Dissimilares

Enquanto que muitas soldas de metais similares são realizadas por fricção devido a questões econômicas, muitas soldas de materiais dissimilares são realizadas por fricção por ser a única alternativa. Exemplos deste tipos de união incluem combinações de metais dissimilares com ampla diferença de pontos de fusão e combinações que formam fases incompatíveis quando soldadas por fusão (LÓPES 2010). Exemplos citados incluem (TSANG 1994): Cobre com aço AISI 1018, aço ferramenta M2 com aço AISI 1045, liga de Níquel 718 com aço AISI 1045, aço inoxidável AISI 302 com aço AISI 1020, Alumínio AISI 6061 com inox AISI 302 e Cobre com ligas de Alumínio.

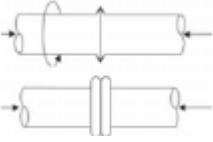


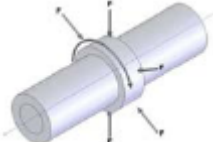
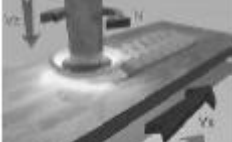

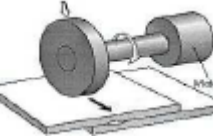
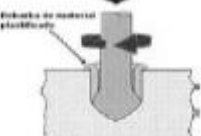
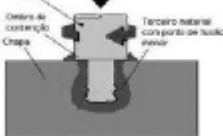

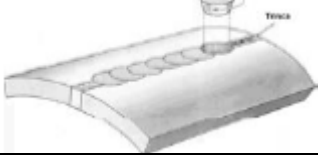

#### Aços de baixo Carbono com aços de médio Carbono.

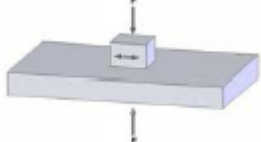
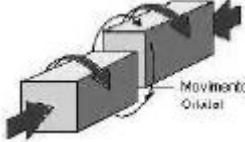
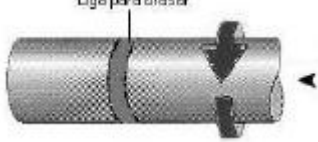
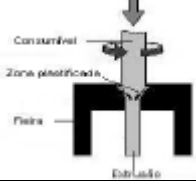
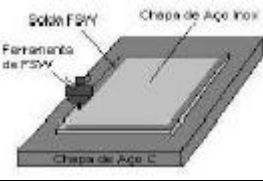

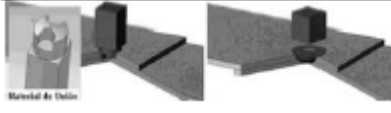
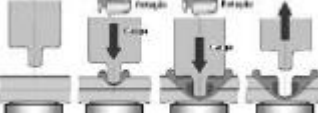

Em geral, estas combinações são unidas para uma ampla gama de condições, inclusive aços de alto teor de Carbono (C) são soldados com aços ligados usando solda por fricção. Ferramentas de aços rápidos são soldadas a hastes de aço liga para inúmeras aplicações em máquinas ferramentas. Aços com teores de Carbono tão altos como 1% podem ser unidos com ligas de menor teor de Carbono. Tratamentos térmicos pré-solda são requeridos em alguns casos para ajustar as propriedades na interface e tratamentos pré-solda para reverter as regiões de interface de aços com alto Carbono.

### 2.1.6 Variantes do Processo

Na soldagem por fricção já existem em torno de vinte e cinco variações ou formas de soldagem utilizando o princípio da fricção, conforme demonstram os estudos de diversos autores. Todas as variantes utilizam o mesmo princípio de união. A tabela 2.2 ilustra algumas destas variações de soldagem por fricção (MACEDO 2011).

Tabela 2.2 processos de soldagem por fricção

<b>Soldagem por Fricção por Arraste Contínuo ou por Inércia (<i>Rotary Drive Friction Welding</i>)<sup>1</sup></b>	<b>Soldagem por fricção Linear (<i>Friction Stir Welding</i>)<sup>2</sup></b>	<b>Soldagem de Pino por Fricção (<i>Friction Stud Welding</i>)<sup>2</sup></b>
		
<b>Soldagem por Fricção Radial (<i>Radial Friction Welding</i>)<sup>1</sup></b>	<b>Deposição por Fricção (<i>Friction Surfacing</i>)<sup>3</sup></b>	<b>Endurecimento por Transformação por Fricção (<i>Friction Transformation Hardening</i>)<sup>3</sup></b>
		
<b>Soldagem por Fricção com Costura Contínua (<i>Friction Seam Welding</i>)<sup>3</sup></b>	<b>Soldagem por Fricção Com Mergulho (<i>Friction Plunge Welding</i>)<sup>3</sup></b>	<b>Soldagem por fricção com Terceiro Corpo (<i>Third-Body Friction Welding</i>)<sup>3</sup></b>
		
<b>Soldagem por Fricção por Costura (<i>Friction Stitch Welding</i>)<sup>4</sup></b>	<b>Soldagem por Fricção Por Ponto Cônico (<i>Friction Taper Stitch Welding</i>)<sup>3</sup></b>	<b>Soldagem por Fricção com Pino Consumível (<i>Friction Hyrdo Pillar Processing</i>)<sup>4</sup></b>
		
<b>Soldagem por Fricção Linear/angular (<i>Linear/Angular Friction Welding</i>)<sup>3</sup></b>	<b>Soldagem por Fricção Orbital (<i>Orbital Friction Welding</i>)<sup>3</sup></b>	<b>Brasagem por Fricção (<i>Friction Brazing</i>)<sup>3</sup></b>

		
<b>Extrusão por Fricção (Friction Extrusion)<sup>3</sup></b>	<b>Deposição por Fricção e Mistura (Friction Stir Cladding)<sup>5</sup></b>	<b>Rebitagem por Fricção (Fricriveting)<sup>6</sup></b>
		
<b>União por Fricção por “Bit” (Friction Bit Joining)<sup>7</sup></b>	<b>Soldagem por Fricção por Ponto e Mistura Mecânica (Friction Spot Welding)<sup>8</sup></b>	<b>Soldagem por Fricção por Ponto e Mistura Mecânica com Translação (Friction Stir Spot Welding)</b>
		

### 2.1.7 Solda por Fricção com Pino Consumível

A técnica de Solda por Fricção com Pino Consumível ou FHPP (Friction Hydro Pillar Processing) envolve rotacionar um pino consumível em um furo essencialmente circular concêntrico sob uma carga axial, para gerar uma sucessão de camadas plastificadas localizadas. As camadas plastificadas aderem-se e comprimem uma fina série de interfaces de cisalhamento helicoidal rotativa adiabática, em parte de forma esférica. Durante FHPP o consumível é totalmente plastificado através do diâmetro do furo e ao longo da espessura da peça. O material plastificado desenvolve-se a uma taxa maior que a de alimentação axial do pino, o que significa que a superfície de atrito sobe ao longo do consumível para formar o depósito de material dinamicamente recristalizado. O material plastificado na interface rotacional é mantido numa condição suficientemente viscosa como para transmitir forças hidrostáticas, ambas axiais e radiais, para o interior do furo, permitindo a união metalúrgica (THOMAS E NICHOLAS 1994).

Lista de vantagens compilada por Nicholas:

- União em estado sólido, reprocessamento e manufatura de novos materiais;

- Penetração profunda, fenda estreita para reparos e uniões de materiais ferrosos e não ferrosos;
- Adequado para automatização e controle a distancia;
- Pode ser operado para reparos em ambientes de risco tais como ambientes submersos, altamente magnéticos e radiação;
- Grandes seções, capacidade de união de materiais dissimilares;
- Requer menor quantidade de material de solda, para maior espessura mais eficiente economia;
- Baixo custo de consumíveis;
- Rápido, tendo furos de 50 mm preenchidos em menos de 10 segundos

A figura 2.4 representa o processo como foi descrito. As setas indicam a direção do movimento circular e da aplicação da força axial. O material plastificado transmite o carregamento na forma de pressão contra o fundo e as laterais do furo.

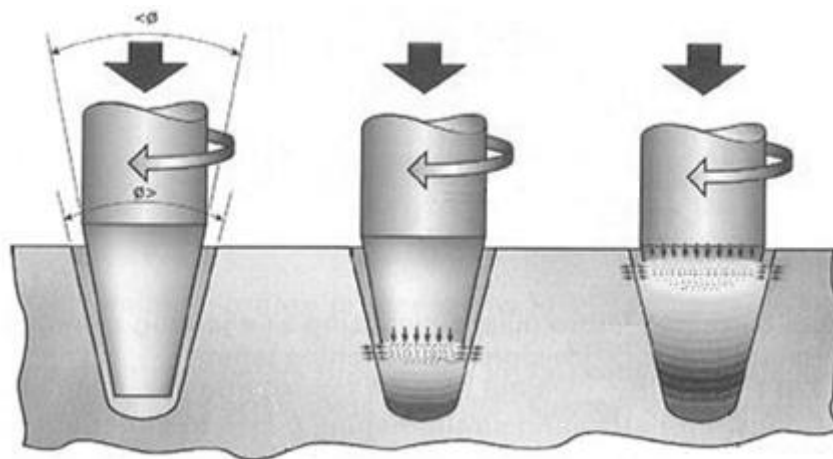


Figura 2.4 Solda por Fricção com Pino Consumível  
([http://www.hera.org.nz/Story?Action=View&Story\\_id=1397](http://www.hera.org.nz/Story?Action=View&Story_id=1397))

## 2.2 Efeito da Velocidade de Resfriamento na Transformação da Austenita

A formação da ferrita e cementita (consequentemente da perlita) exige a mudança do reticulado cristalino do ferro, assim como o movimento dos átomos, por difusão, através da austenita sólida; tais modificações levam tempo. Se o aço for resfriado mais rapidamente, não haverá tempo suficiente para uma completa movimentação atômica e as reações de

transformação da austenita se modificam, podendo mesmo deixar de formar os constituintes normais e surgirem novos constituintes (CHIAVERINI 1977).

### 2.2.1 Diagramas de Transformações Isotérmicas

Considerando uma reação eutetóide ferro-carboneto de ferro,  $\gamma(0,77\%C \text{ em peso}) \rightarrow \alpha(0,022\%C \text{ em peso}) + Fe_3C(6,70\%C \text{ em peso})$ , que dá origem à perlita, um microconstituente composto pelas fases ferro  $\alpha$  e cementita. A temperatura desempenha um importante papel na transformação da austenita em perlita. A dependência em relação à temperatura de uma liga ferro-carbono de composição eutetóide conforme indicado na Figura 2.5, é mostrada na Figura 2.6, através das curvas em forma de S da porcentagem de transformação versus o logaritmo do tempo em três diferentes temperaturas. Para cada curva, dados foram coletados após resfriamento rápido de uma amostra composta de 100% de austenita à temperatura indicada; a temperatura foi mantida constante através de todo o curso da reação (CALLISTER 1991).

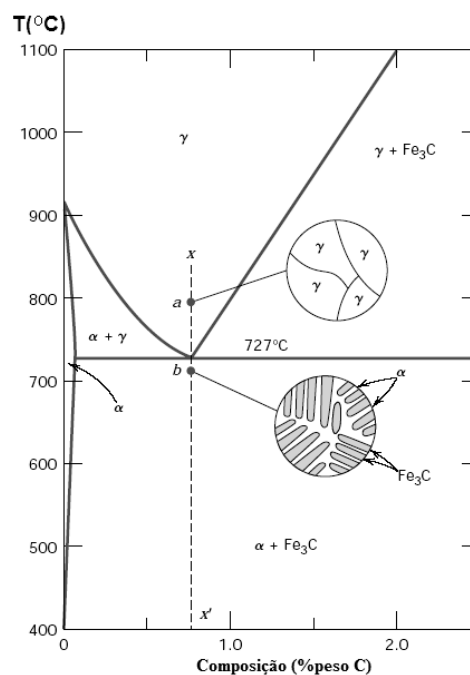


Figura 2.5 Reação eutetóide

(<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>).



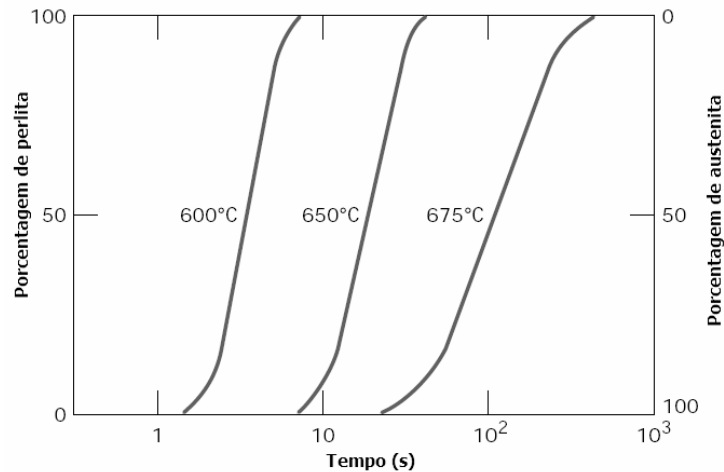


Figura 2.6 Porcentagem de transformação versus logaritmo do tempo.  
(<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

Repetindo-se a experiência com novas amostras convenientemente austenitizadas, resfriadas e mantidas a outras temperaturas, tem-se uma série de tempos os quais marcam, para as várias temperaturas, o início e o fim da transformação. Com esta série de pontos de início e de fim de transformação ligados entre si originam-se duas curvas com a forma de um *C* como pode-se observar na parte inferior da figura 2.8 (CHIAVERINI 1977). A curva em forma de *S* na parte superior da Figura 2.7 ilustra como é feita a transferência de dados.

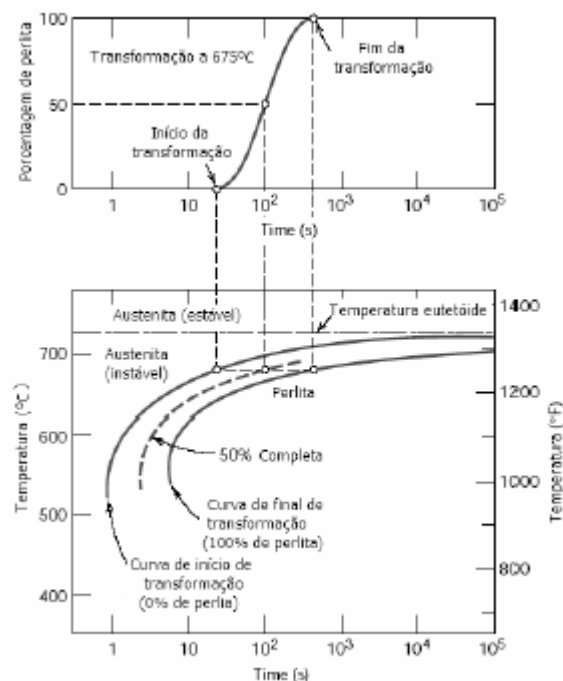


Figura 2.7 Construção do diagrama de transformação isotérmica (parte inferior) a partir de medições de porcentagem de transformação em função do logaritmo do tempo (parte superior). (<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

Várias restrições são impostas ao uso de diagramas tais como os da Figura 2.7. Primeiro este gráfico particular é válido apenas para uma liga ferro-carbono de composição eutetóide; para outras composições, as curvas terão diferentes configurações. Condições de temperatura constante são denominadas isotérmicas; assim, gráficos tais como estes são referidos como diagramas de transformações isotérmicas, ou às vezes como gráfico tempo – temperatura – transformação (ou T-T-T).

### Constituintes Resultantes da Transformação da Austenita

Os constituintes resultantes da transformação da austenita nas diferentes faixas de temperatura aparecem na seguinte sequência, conforme ilustrado na Figura 2.8 (CHIAVERINI 1977):

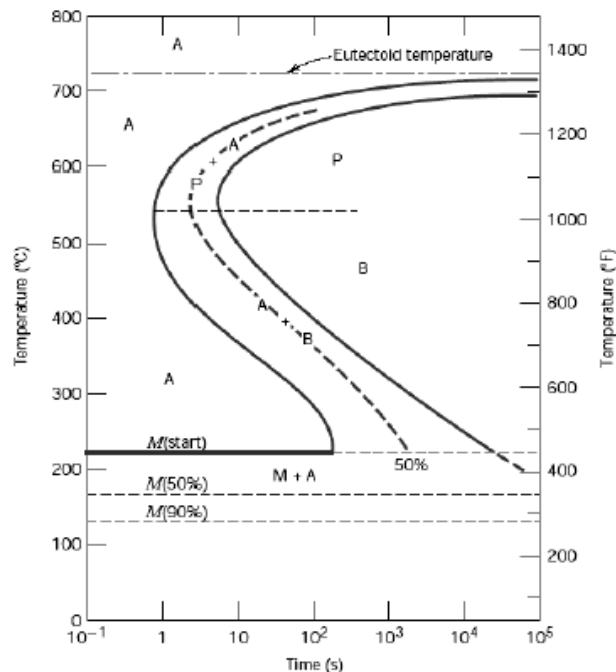


Figura 2.8 Diagrama TTT completo

- Logo abaixo da  $A_1$ , zona em que a velocidade de transformação é muito baixa, forma-se a *perlita grossa*, de granulação grosseira e de baixa dureza (inferior a 20 Rockwell C);
- Nas proximidades do cotovelo da curva, em torno de 550°C, a perlita que se forma adquire textura cada vez mais fina e dureza cada vez mais elevada (Rockwell C de 30 a 40), chamada de *perlita fina*. A Figura 2.9 mostra uma perlita grossa e uma perlita fina.

- c) À temperatura entre 550°C e 200°C, o produto de transformação resultante varia de aspecto, desde um agregado de ferrita em forma de pena e carboneto de ferro muito fino, em torno de 450°C, chamado de *bainita superior*, até um constituinte em forma de agulhas com coloração escura (em torno de 200°C) e sua dureza varia de 40 a 60 Rockwell C.
- d) Na faixa de temperaturas de  $M_s$  (em torno de 200°C) a  $M_f$  (em torno de 100°C) forma-se um constituinte cuja transformação depende exclusivamente da temperatura, a *martensita*. Esta fase pode se apresentar na forma de ripas para aços de baixo a médio carbono ou em placas para aços de médio a alto carbono. A figura 2.10 mostra a martensita em ripas e em placas.

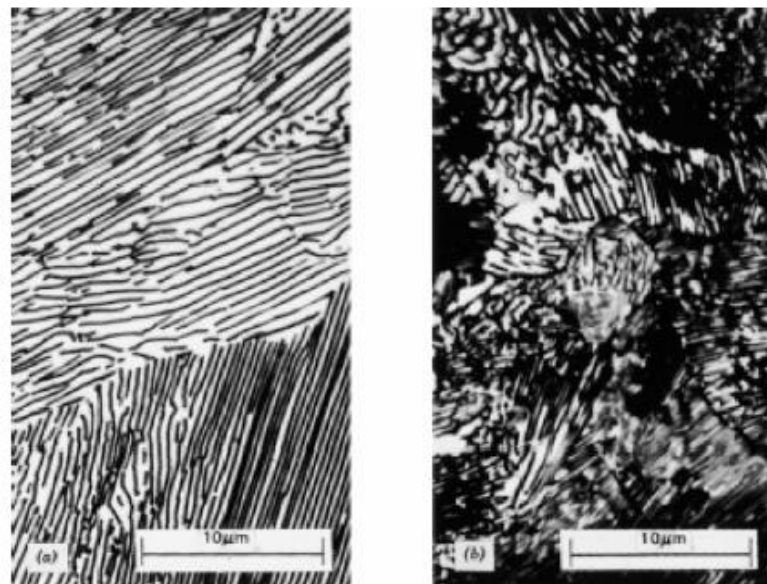


Figura 2.9 Perlita grossa a esquerda e perlita fina a direita.  
(<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

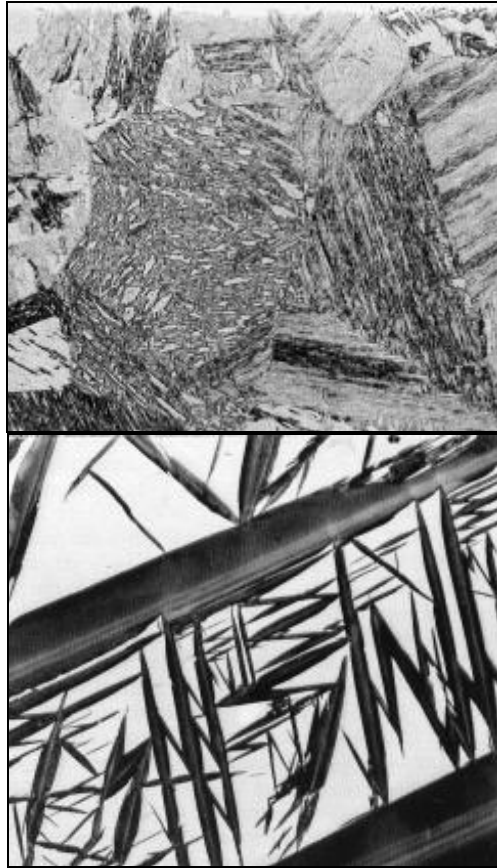


Figura 2.10 Martensita em ripa (em cima) e martensita em placa (em baixo)  
(<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

### 2.2.2 Diagramas de Resfriamento Contínuo

As curvas em *C* dos gráficos TTT são típicas das transformações que operam a uma temperatura constante. Do ponto de vista prático, as transformações que mais interessam são as que se verificam quando a temperatura decresce continuamente.

Em condições de resfriamento contínuo, as transformações são retardadas, o que faz com que as curvas isotérmicas sejam deslocadas para tempos mais longos e temperaturas mais baixas, como na Figura 2.11 (CALLISTER 1991).

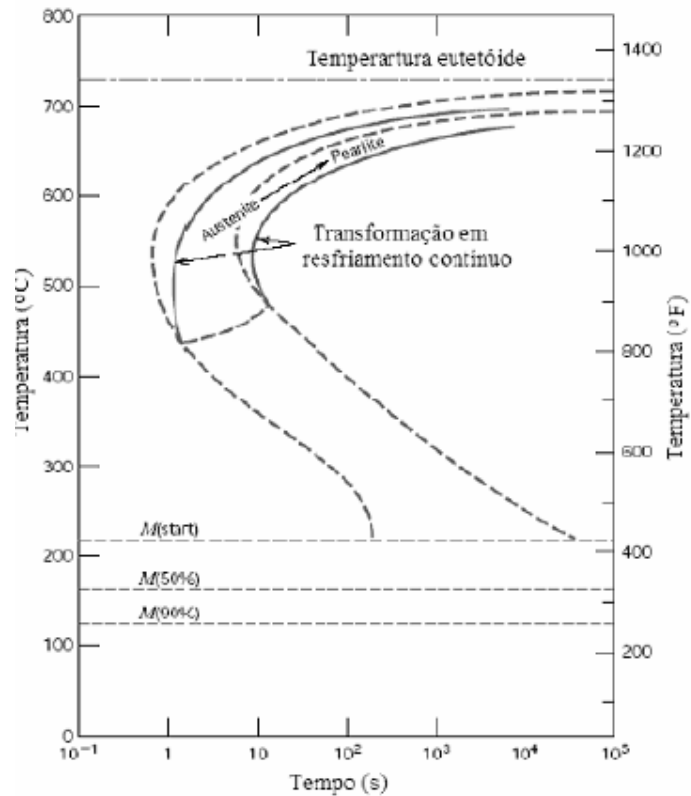


Figura 2.11 Num resfriamento contínuo as curvas isotérmicas são deslocadas para a direita e para baixo. (<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

Para o resfriamento contínuo, uma vez ultrapassadas as curvas de início e de fim de transformação, numa determinada velocidade de resfriamento, nada mais ocorre, pois as transformações previstas se completaram. Na parte inferior do diagrama restarão apenas as linhas  $M_i$  e  $M_f$  correspondentes à formação de martensita.

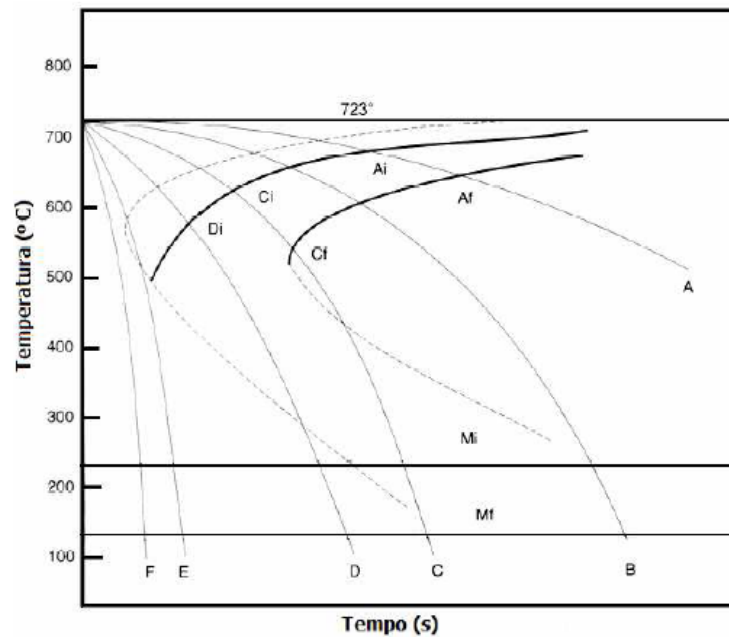


Figura 1.12 Curvas representando diversas velocidades de resfriamento. (<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

Da Figura 2.12 podem-se tirar as seguintes conclusões sobre a microestrutura final obtida após cada velocidade de resfriamento:

- A. Perlita grossa
- B. Perlita fina
- C. Perlita mais fina
- D. Perlita mais martensita
- E. Martensita
- F. Martensita

Conhecida a relação que liga o diagrama de resfriamento contínuo ao isotérmico, com as curvas do primeiro deslocadas para abaixo e para a direita das do segundo, pode-se para fins práticos usar o diagrama de transformações isotérmicas. Sobre estas, portanto, são superpostas curvas de resfriamento, toda vez que se desejar conhecer os constituintes resultantes, a várias velocidades de resfriamento típicas dos tratamentos térmicos usuais.

### 2.2.3 Efeito dos elementos de liga

No que se refere à composição química, todos os elementos de liga que são adicionados ao aço, inclusive o carbono e com exceção do cobalto, deslocam as curvas de

início e de fim de transformação para baixo e para a direita, ou seja, retardam a transformação. Os elementos de liga, durante o resfriamento, ao entrarem na zona crítica, procuram dispor-se de acordo com sua tendência, quer se dissolvendo na ferrita, quer formando carbonetos. Essas reações requerem apreciável tempo para se iniciar e para se completar, atrasando o início e o fim da transformação da austenita (CHIAVERINI 1977).

Uma das razões para a adição de elementos de liga é a facilidade de formação de martensita em aços ligados com seções relativamente espessas ou quando em meios de resfriamentos menos severos. Também ocorre a presença do cotovelo de formação da bainita para condições de resfriamento contínuo, o que não acontece para os aços ao carbono (CALLISTER 1991).

### 2.3 Aços Ligados

O aço é basicamente uma liga de ferro e carbono, alcançando seus níveis de resistência e de dureza principalmente através da adição de carbono. Os aços carbono são classificados quanto à composição química em quatro grupos, dependendo de seus níveis de carbono.

- baixo carbono - até 0,14% carbono;
- aço doce - de 0,15% até 0,29% carbono;
- aço de médio carbono - de 0,30% até 0,59% carbono;
- aço de alto carbono - de 0,60% até 2,00% carbono.

Aços de baixa liga são geralmente definidos como aqueles que possuem teor total de liga de 1,5% a 5,0%. Os elementos de liga mais comuns são o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio. Aços de baixa liga podem conter quatro ou cinco desses elementos de liga em diversos teores. Aços de média liga são definidos como aqueles que possuem teor de elementos de liga entre 5% e 10%. Apresentam características semelhantes às dos aços de baixa liga, requerendo, porém, maiores cuidados em sua fabricação e soldagem. O grupo de aços de alta liga, caros e para uso específico, contém teor de elementos de liga ultrapassando 10%, resultando em propriedades químicas e mecânicas excepcionais (FORTES 2004).

### 2.3.1 Efeito dos elementos de liga sobre o diagrama de equilíbrio Fe-C

O ferro existe em duas formas alotrópicas (alfa e gama) estáveis em diferentes faixas de temperatura, com pode ser visto no diagrama de equilíbrio da Figura 2.13. Essas formas se caracterizam por poderem manter em solução sólida, dentro de ampla faixa de teores vários elementos de liga que podem participar da composição química dos aços. As diferentes solubilidades dos vários elementos de liga nessas duas formas alotrópicas do ferro levam a modificações nas faixas de temperaturas em que ocorrem as transformações estruturais dos aços (CHIAVERINI 1977).

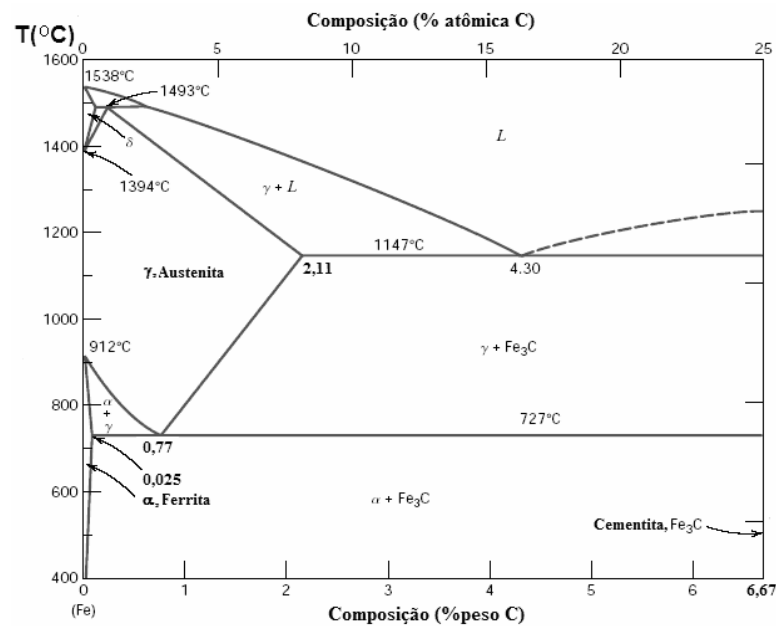


Figura 2.13 Diagrama de Equilíbrio Fe-C  
(<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

Duas categorias de elementos de liga podem ser adicionadas aos aços, isto é, os estabilizadores da ferrita, como o Cr, Mo, W e aqueles que estabilizam a austenita, como Ni, Mn, C etc. Os elementos estabilizadores da ferrita e austenita expandem os respectivos campos. Uma forma de avaliar o efeito de um elemento de liga no diagrama Fe-C é observar se a temperatura eutetóide aumenta ou diminui com a adição destes elementos. A temperatura do eutetóide é reduzida, expandindo a faixa de temperaturas na qual a austenita é estável com a adição dos elementos estabilizadores da austenita. A Figura 2.14 mostra as mudanças na temperatura eutetóide produzidas por alguns elementos de liga. A adição dos elementos de liga também reduz a quantidade de carbono da austenita no ponto eutetóide com pode-se observar na Figura 2.15 (KWIETNIEWSKI E KISS 2010).



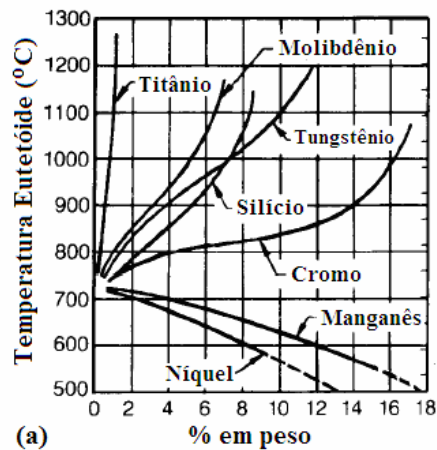


Figura 2.14 Efeito dos elementos na temperatura eutetóide (<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

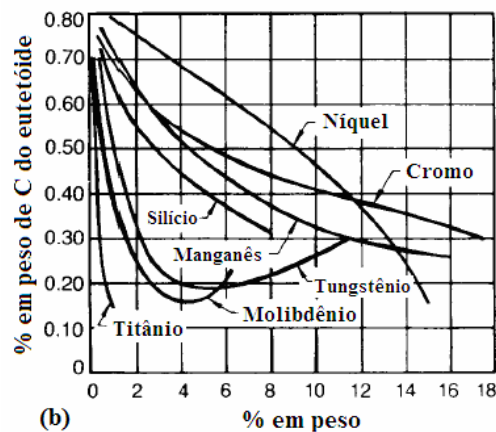


Figura 2.15 Efeito dos elementos de liga no teor de carbono do eutetóide (<http://aulas.demet.ufrgs.br/tratamentosI/PPTtratamentos.pdf>)

### 2.3.2 Efeito dos elementos de liga nos aços

Os principais efeitos dos elementos de liga sobre as propriedades mecânicas, microestruturais, tratamentos térmicos e outras características são (CHIAVERINI 1977):

- Aumentar a temperabilidade pelo deslocamento para a direita das curvas de início e fim da transformação da austenita, no diagrama TTT;
- Aumentar a dureza e a resistência mecânica da ferrita, quando se dissolvem nesse constituinte, com conseqüente aumento de dureza e resistência mecânica do aço, mesmo sem qualquer tratamento térmico;
- Abaixar a faixa correspondente à formação da martensita, o que, em princípio, é uma desvantagem uma vez que as tensões originadas durante o resfriamento para a têmpera

serão maiores. Entretanto, a adição de elementos de liga permite abaixar o teor de carbono para uma determinada aplicação além de tornar possível usar menor velocidade de resfriamento (devido ao deslocamento das curvas em C para a direita). Logo, a desvantagem aparente desaparece;

- Aumentar a temperatura de revenido ou o tempo à certa temperatura, para uma determinada dureza. Isto se torna mais evidente em relação aos aços com elementos de liga que tem a tendência a formar carbonetos, como o cromo, molibdênio, vanádio e outros os quais não só elevam a temperatura de revenido como também provocam um retardamento no amolecimento do aço pelo revenido, podendo-se verificar até mesmo o fenômeno de “endurecimento secundário”;
- Aumentar a resistência à corrosão. O cromo em teores elevados, torna o aço inoxidável;
- Aumentar a resistência ao desgaste;
- Aumentar capacidade de corte;
- Modificar características elétricas e magnéticas.

A Tabela 2.3 resume as principais funções dos elementos de liga nos aços (METALS HANDBOOK):

Tabela 2.3 Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços

Elemento	Principais funções
Al	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desoxidante eficiente</li> <li>2. Restringe o crescimento de grão (pela formação de óxidos ou nitretos dispersos);</li> <li>3. Elemento de liga nos aços para nitretação.</li> </ol>
Cr	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumenta a resistência à oxidação e a corrosão;</li> <li>2. Aumenta a endurecibilidade;</li> <li>3. Melhora a resistência a altas temperaturas;</li> <li>4. Resiste ao desgaste (com alto C)</li> </ol>
Co	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contribui para a dureza a quente pelo endurecimento da ferrita.</li> </ol>
Mn	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Contrabalança a fragilidade devida ao S.</li> <li>2. Aumenta a endurecibilidade economicamente</li> </ol>
Mo	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita;</li> <li>2. Produz maior profundidade de endurecimento;</li> <li>3. Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido;</li> <li>4. Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência;</li> <li>5. Melhora a resistência a corrosão dos aços inoxidáveis;</li> <li>6. Forma partículas resistentes à abrasão.</li> </ol>
Ni	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumenta a resistência de aços recozidos;</li> <li>2. Aumenta a tenacidade de aços ferríticos-perlíticos (sobretudo a baixas temperaturas);</li> <li>3. Estabilizador da austenita em ligas Fe-Cr.</li> </ol>
P	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aumenta a resistência de aços de baixo carbono;</li> <li>2. Aumenta a resistência à corrosão;</li> <li>3. Aumenta a usinabilidade em aços.</li> </ol>
Si	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Desoxidante;</li> <li>2. Elemento de ligas para chapas elétricas e magnéticas;</li> <li>3. Aumenta a resistência a corrosão;</li> <li>4. Aumenta a endurecibilidade dos aços contendo elementos não grafitizantes;</li> <li>5. Aumenta a resistência do aço de baixo teor de liga.</li> </ol>
Ti	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Reduz a dureza martensítica e a endurecibilidade em aços ao Cr de médio Cr;</li> <li>2. Impede a formação de austenita em aços de alto Cr.</li> </ol>
W	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Forma partículas duras e resistentes ao desgaste em aços-ferramenta;</li> <li>2. Promove dureza e resistência a altas temperaturas.</li> </ol>
V	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita (promove refino de grão);</li> <li>2. Aumenta a endurecibilidade (quando dissolvido);</li> <li>3. Resiste ao revenido e causa acentuado endurecimento secundário.</li> </ol>

### 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Máquina de Solda por Atrito

Os ensaios de solda por atrito foram realizados num equipamento denominado MSA 1000 (conforme figura 3.1) desenvolvido no LAMEF – UFRGS. O equipamento com uma potencia máxima de 132 kW permite aplicação de carga axial de até 1000 kN, velocidade de rotação de até 2000 rpm e deslocamento vertical de até 150 mm. As amostras foram fabricadas variando-se força axial e velocidade de rotação conforme a tabela 3.1.

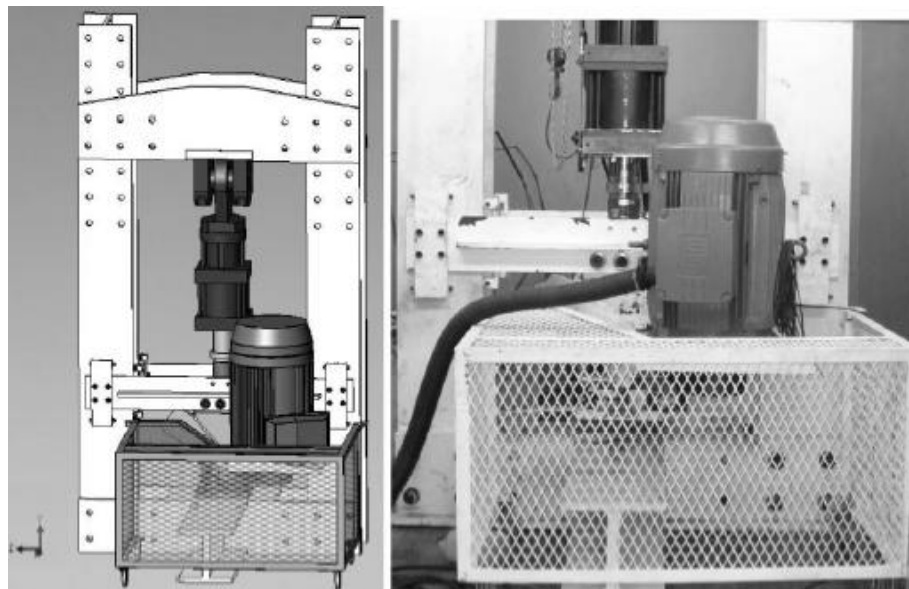


Figura 3.1 Projeto virtual da MSA 1000 e foto do equipamento montado (MATTEI 2011)

Tabela 3.1 Relação de força axial de velocidade de rotação

AMOSTRA	FORÇA AXIAL (kN)	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (rpm)
CP 03	20	1000
CP 04	30	500
CP 05	20	500

#### 3.2 Pino consumível e base para solda

Como alternativa para retirada do material das chapas para a base da solda foi escolhido o elo de uma corrente de amarração utilizada na ancoragem de plataformas

petrolíferas que operam em alto mar. A classificação deste material não se baseia na sua composição química, mas em propriedades mecânicas como tensão de escoamento e resistência a tração segundo as normas [DNV 2008]. Os pinos consumíveis foram feitos através de moldagem por injeção de pós-metálicos e são compostos por uma liga 2%Fe-Ni. Ensaios de microdureza realizados indicaram um valor médio de 85,41 HV<sub>0,3</sub> para um pino não processado.

As composições químicas do material da base da solda e do pino consumível foram realizadas no espectrômetro de marca SPECTRO, modelo Spectrolab e estão descritas na tabela 3.2. Os parâmetros geométricos do pino e da base foram iguais em todos os ensaios e são mostrados na Figura 3.2.

Tabela 3.2 Análise química do material base da solda e pino consumível

<b>Elemento (% em peso)</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>
Base da solda	0,186	0,256	1,30	0,0146	0,00340	1,96	0,454	1,28	0,0241
Pino	0,0119	---	---	---	---	---	0,014	2,010	---

O carbono equivalente para o material da base da solda é de  $C_{eq} = 0,982$  pôde ser calculado através da equação:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%C + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Sendo  $C_{eq}$  o valor de carbono equivalente, %Mn o percentual de massa atômica de manganês, %C o percentual de massa atômica de carbono, %Mo o percentual de massa atômica de molibdênio, %V o percentual de massa atômica do vanádio, %Ni o percentual de massa atômica de níquel e %Cu o percentual de massa atômica de cobre.

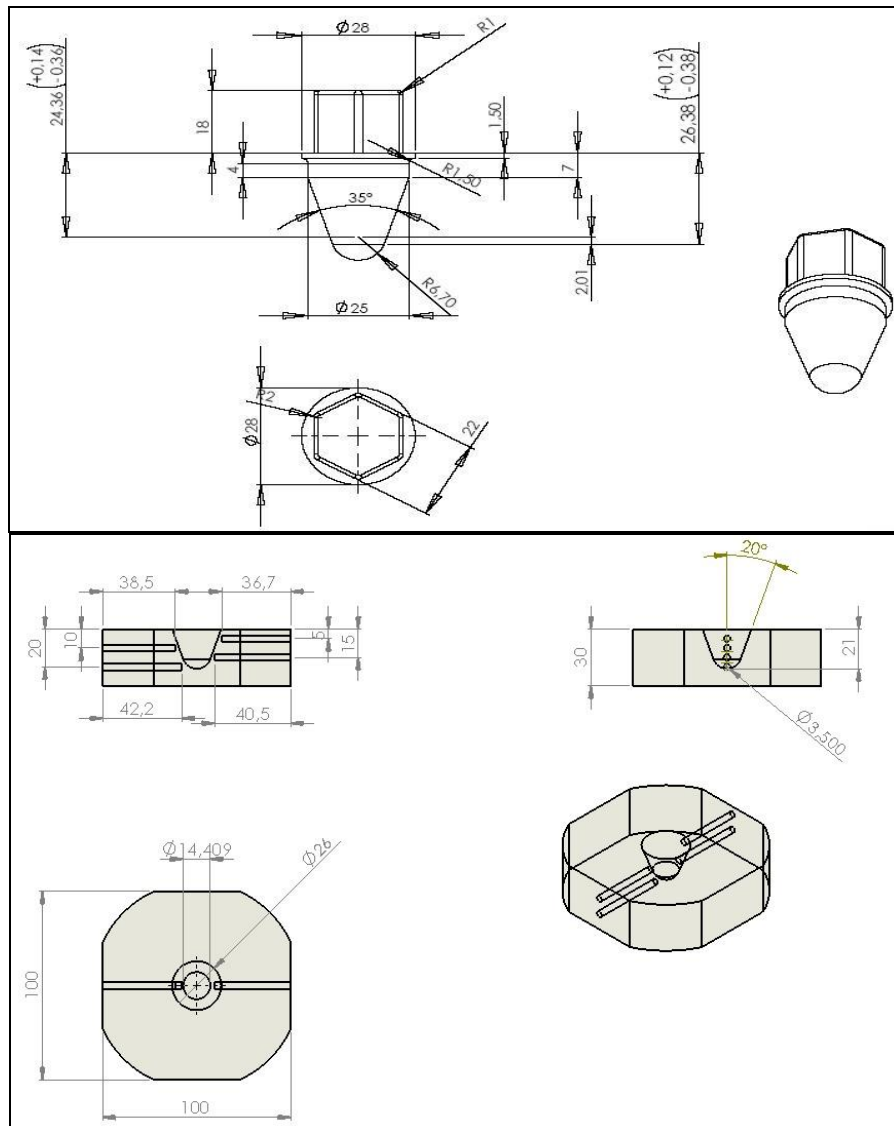


Figura 3.2 Geometria do pino (acima) e da chapa da base (abaixo)

### 3.3 Aquisição de Temperatura

Para a aquisição de temperatura interna dos corpos de prova foram utilizados quatro termopares tipo K. Os termopares foram localizados na base dos corpos de prova conforme a Figura 3.4, onde foram usinados dois orifícios com 4,5 mm de diâmetro e aproximadamente 18 mm de profundidade em duas faces opostas. Em uma das faces o centro do primeiro está localizado a 05 mm da face superior o segundo a 15 mm, na outra face centro do primeiro está localizado a 10 mm da face superior o segundo a 20 mm. A partir destes uma continuação com orifícios de diâmetro 3,5 mm sendo que a profundidade da furação foi usinada de modo que o final localizava-se a aproximadamente 2 mm da face de soldagem.

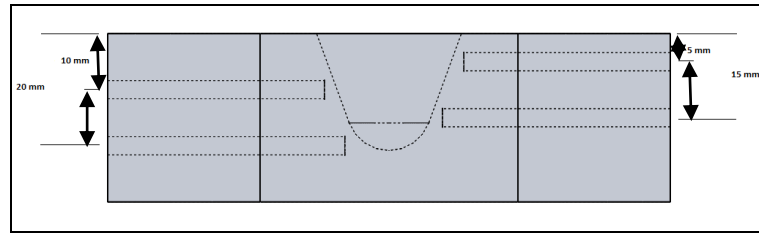


Figura 3.3 Localização dos orifícios para instalação dos termopares.

Para a aquisição de temperatura, os termopares foram inseridos nos orifícios e soldados com um aparelho de solda capacitiva para termopares da marca TGK, mostrado na figura 3.4. A junta quente foi feita de forma que houvesse a menor superfície de contato possível entre os condutores (figura 3.5). A figura 3.6 ilustra o efeito da solda capacitiva na fixação do termopar no corpo de prova.



Figura 3.4 Solda capacitiva para termopares.

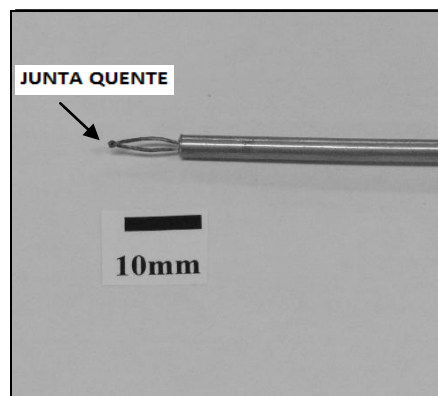


Figura 3.5 Termopar utilizado na aquisição de temperatura com destaque na junta quente.

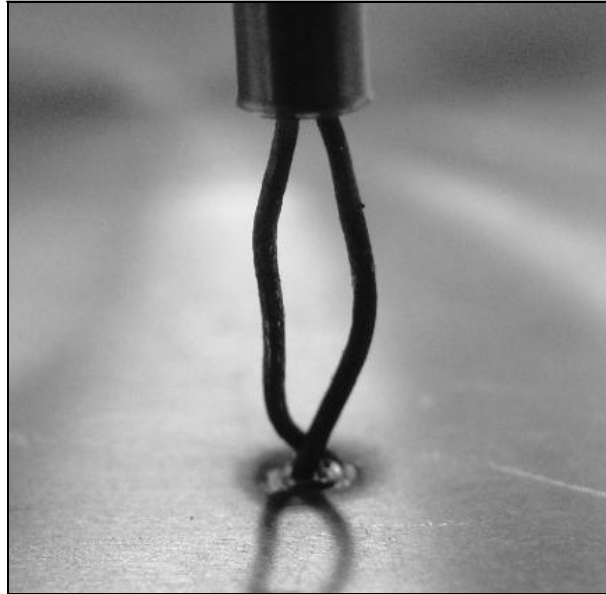


Figura 3.6 Condutores do termopar soldados ao material da base da solda por fricção.

A aquisição da temperatura durante a soldagem dos corpos de prova foi realizada com um amplificador e conversor Analógico/Digital marca HBM modelo *Spider 8*, conforme a Figura 3.7. Este conversor é conectado a um computador no qual através do *software Catman* é programada a frequência e o modo da aquisição dos dados.



Figura 3.7 Amplificador e conversor de sinal Spider 8

Todas as amostras foram divididas em lado A e lado B, cada lado recebeu dois termopares. Os termopares foram caracterizados como AS (A Superior) para o termopar mais próximo à superfície de inserção do pino e AI (A Inferior) para os termopares mais próximos da base no lado A, do mesmo modo BS e BI para o lado B.



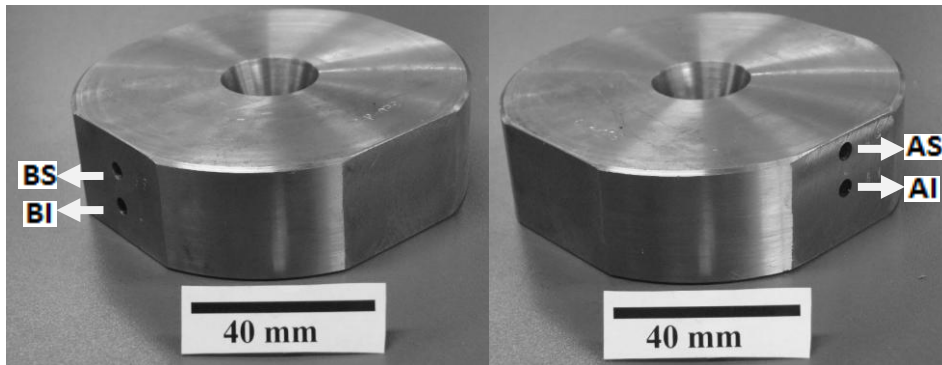


Figura 3.8 Posicionamento dos termopares na amostra

Após a soldagem as amostras foram submetidas a cortes por eletroerosão, paralelos ao eixo de aplicação da carga axial, para realização de macrografias. A vista do plano de corte é ilustrado na figura 3.9. Após a realização destes cortes, as amostras foram submetidas as etapas de preparação metalográfica começando pelo lixamento com granulometria de 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Depois desta etapa as amostras foram submetidas a ataque químico com nital 10%. Através de montagens (feitas a partir de metalografias com aumento de 50x) foi possível obter uma imagem macrográfica com alta qualidade e resolução, revelando seção completa que representa a visualização do material do pino, da base e zona afetada pelo calor e atrito durante a soldagem.

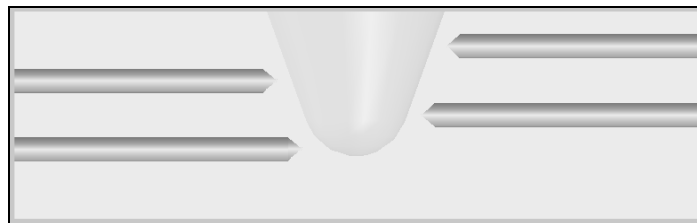


Figura 3.9 Corte paralelo ao eixo de aplicação da carga

### 3.4 Diagrama CCT

As curvas de resfriamento foram sobrepostas aos diagrama de resfriamento contínuo do aço SAE 8620 que está ilustrado na figura 3.10. Foi escolhida esta liga por ter composição aproximada a do material das bases para solda [HEAT TREATER'S GUIDE]

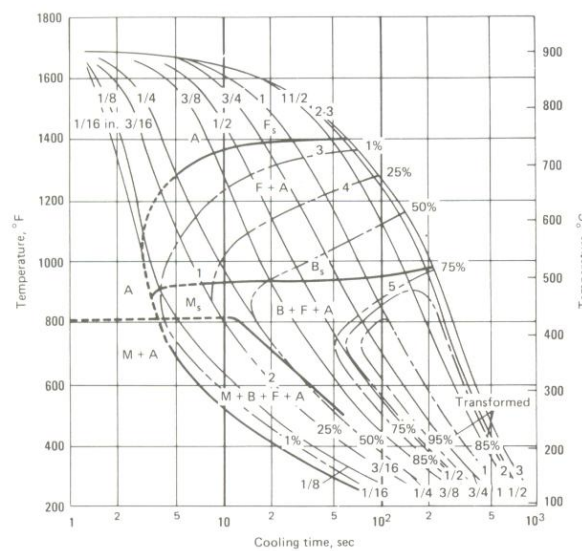


Figura 3.10 Diagrama de resfriamento contínuo de um aço SAE 8620 (HEAT TREATER'S GUIDE)

### 3.5 Análise Metalográfica

A análise metalográfica visa à identificação das microestruturas (fases e constituintes) ao longo da região paralela a interface pino/base distante aproximadamente 2 mm da interface (figura 3.11), utilizando microscopia ótica e eletrônica. Os equipamentos utilizados foram: microscópio ótico (MO) OLYMPUS (modelo BX51M, com câmera acoplada, reflexão de luz branca, com ampliações de 100X e 200X). As amostras, inicialmente, foram polidas progressivamente em lixas d'água de granulação grosseira até uma granulação mais fina, finalizando o polimento com pasta de diamante. A Figura 3.12 mostra que a microestrutura original do material da base da solda trata-se de martensita revenida.

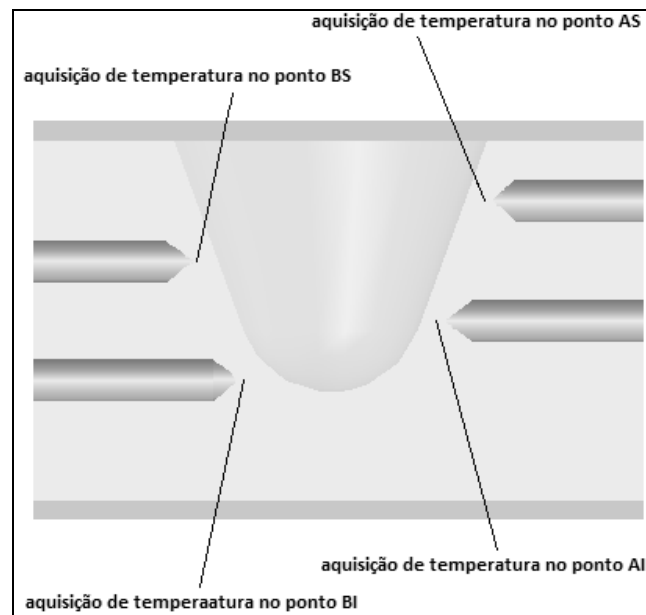


Figura 3.11 Região de análise metalográfica com destaque para os pontos de aquisição de temperatura, a região analisada do pino variou em cada corpo de prova.

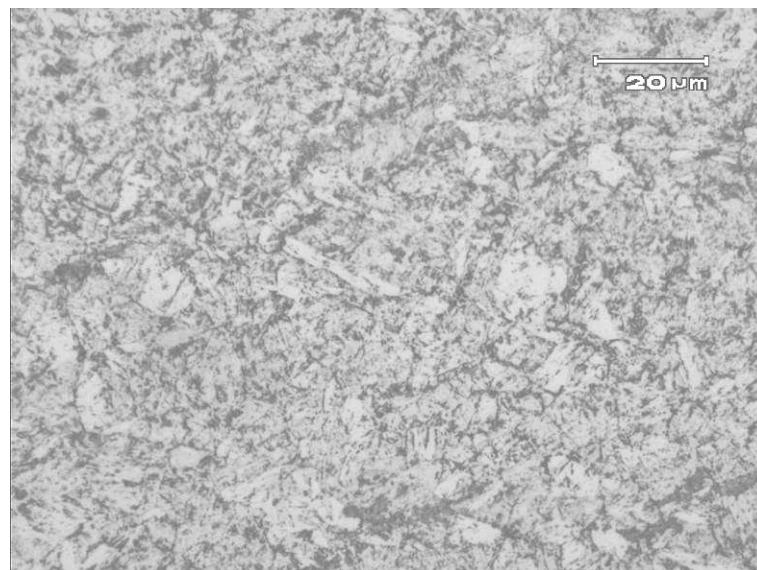


Figura 3.12 Martensita revenida no material da base da solda com aumento de 1000X e ataque de nital 3%

### 3.6 Perfis de microdureza

Os perfis de microdureza Vickers na base da solda foram realizados de forma que registrassem valores de dureza para o material da base com e sem transformações microestruturais. No pino foram traçados perfis horizontais nas alturas dos pontos AS, BS e AI. Por haver uma simetria os perfis no pino foram traçados partindo das bordas até o centro apenas. A Figura 3.12 ilustra os perfis traçados no pino e na base da solda. As medidas de

microdureza Vickers foram realizadas num equipamento da marca INSTRON modelo tukon 2100 B, com capacidade de medição de 0,01 a 50 HV e resolução de 3g. Foi utilizada carga de 0,3kg e distância entre indentações de 0,3mm.

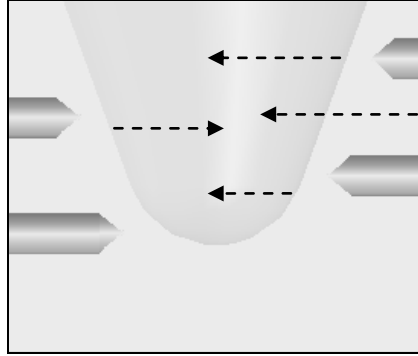


Figura 3.13 Perfis de microdureza no pino e no material da base da solda, as setas indicam o sentido de medição.

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Aquisição de dados e efetividade da máquina

O sistema de controle MTS permite que sejam realizadas aquisições de dados durante o processo de realização de ensaios. As aquisições dos sinais dos parâmetros de resposta das soldagens foram realizadas com dez aquisições por segundo para não gerar arquivos de difícil 101 pós-processamento. Foram adquiridos sinais de tempo, deslocamento, força, rotação e potência do motor. As visualizações dos gráficos de soldagens adquiridos estão na Figura 4.1 à Figura 4.3.

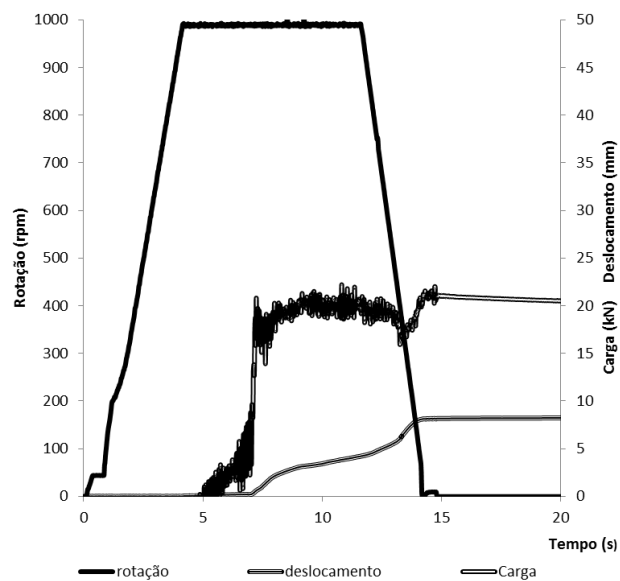


Figura 4.1 soldagem no corpo de prova CP 03

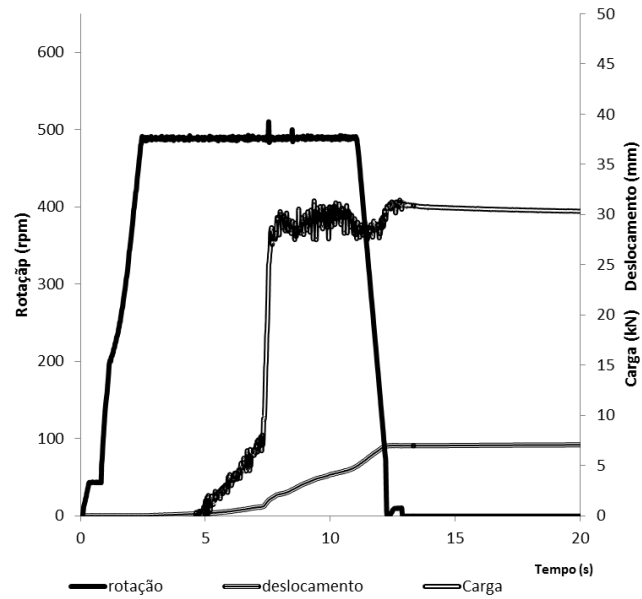


Figura 4.2 soldagem no corpo de prova CP 04

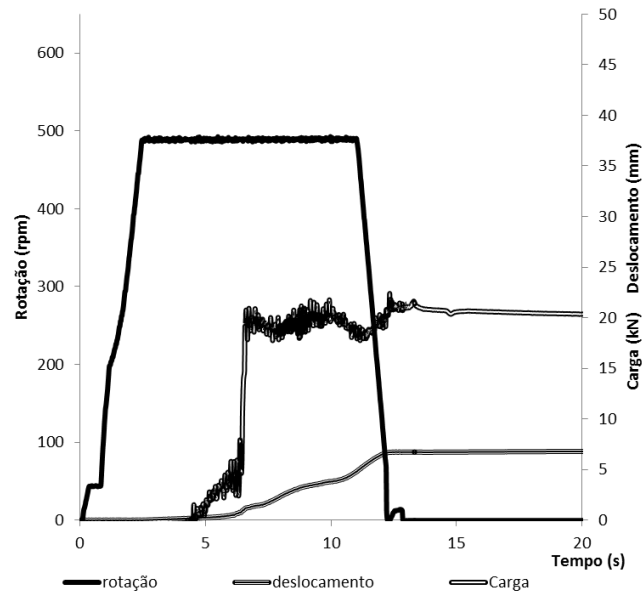


Figura 4.3 Soldagem no corpo de prova CP 05

#### 4.2 Aquisição de temperatura

Os corpos de prova foram soldados com forças diferentes para que fosse observada a variação de temperatura durante esta soldagem. As amostras soldadas com suas forças de soldagem e recalque encontram-se na Tabela 3.1.

As temperaturas máximas adquiridas e sua posição correspondente encontram-se na Tabela 4.1, em alguns termopares houve a perda de sinal e estes foram desconsiderados. Na mesma tabela é calculada uma média dos dados válidos de cada corpo de prova independente

da posição dos termopares, o objetivo é observar a temperatura média aproximada a uma região de dois mm da interface de soldagem do corpo de prova.

Tabela 4. 1 Temperaturas máximas medidas e posição dos termopares

<b>Descrição</b>	<b>AS</b>	<b>AI</b>	<b>BS</b>	<b>BI</b>	<b>Média</b>
CP 03 Temperatura (°C)	1013	519	913	---	815
Distância do Termopar (mm)	2,35	1,18	0,99	1,80	1,58
CP 04 Temperatura (°C)	611	482	526	123	436
Distância do Termopar (mm)	1,87	1,01	0,96	2,03	1,47
CP 05 Temperatura (°C)	610	405	543	235	448
Distância do Termopar (mm)	2,12	0,96	1,15	1,61	1,46

Os valores médios nos corpos de prova CP 04 e CP 05, que foram soldados com mesma velocidade de rotação foram inversamente proporcionais as forças de soldagem, mas com pouca variação de temperatura máxima nas regiões AS, AI e BS. Os valores médios dos corpos de prova CP 03 e CP 04, que foram soldados com mesma carga mudaram proporcionalmente com a velocidade de rotação. Os gráficos de aquisição que mostram as mudanças de temperaturas encontram-se na Figura 4.4 a Figura 4.6. Em cada gráfico estão inseridos os valores máximos com uma ampliação. Na comparação entre os corpos de prova CP 04 e CP 05 (mesma velocidade de rotação e carga de 30kN e 20kN respectivamente) observa-se que os termopares situados no lado “A” indicaram temperaturas maiores para a maior carga enquanto os termopares do lado “B” indicaram temperaturas maiores para a carga mais baixa. Na comparação entre os corpos de prova CP 03 e CP 04 (mesma carga e velocidade de 1000rpm e 500rpm respectivamente) os três termopares mais próximos da superfície da solda apresentaram temperaturas maiores. Houve a perda de sinal do termopar mais afastado da superfície da solda no corpo de prova CP 03. Alguns ruídos foram detectados durante a aquisição das temperaturas devido à interferência do reversor da máquina de solda por atrito.

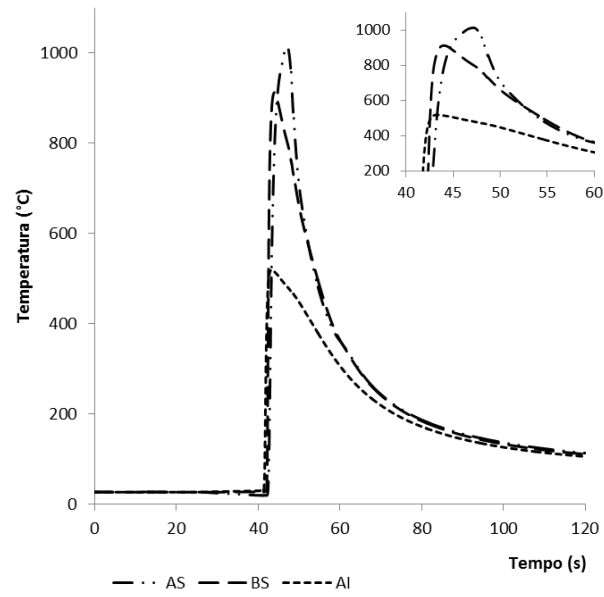


Figura 4.4 Temperaturas da amostra CP 03 soldada com 1000 rpm e 20 kN

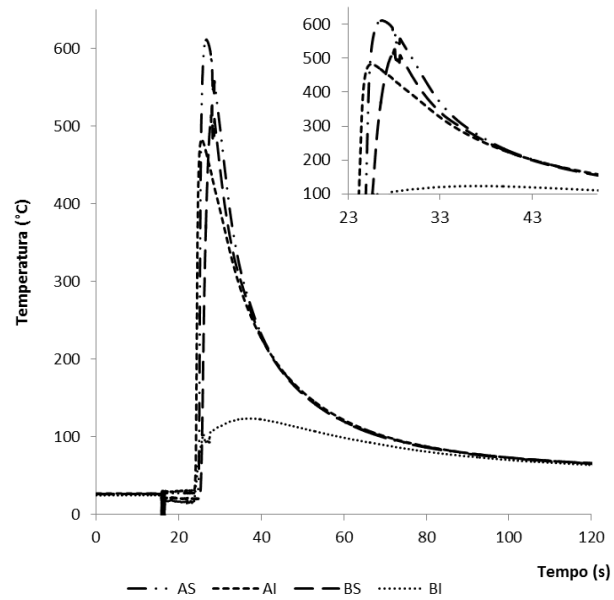


Figura 4.5 Temperaturas da amostra CP 04 soldada com 500 rpm e 30 kN



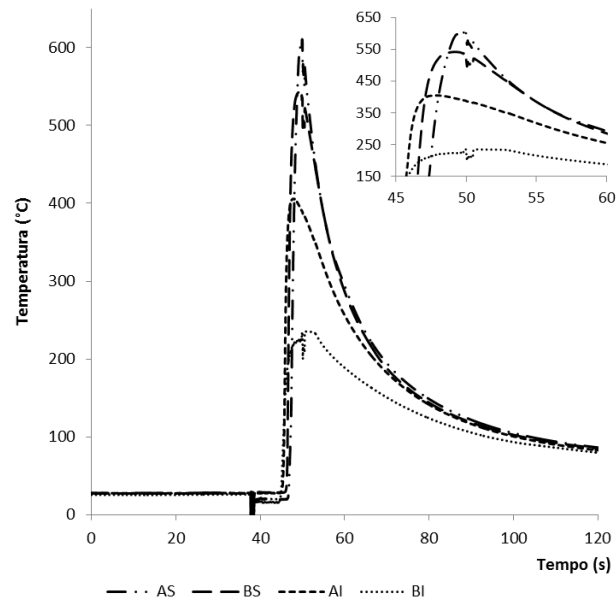


Figura 4.6 Temperaturas da amostra CP 05 soldada com 500 rpm e 20 kN

Para um efeito comparativo, foi realizado o cruzamento dos dados de aquisição de temperatura e os dados de rotação e força de soldagem, conforme a Figura 4.7 a Figura 7.9. Percebe-se que, a elevação da temperatura coincide com ao início da aplicação da carga. No início da soldagem, os termopares inferiores começam a medir o aumento da temperatura antes dos termopares superiores. Os termopares superiores são os que atingem maiores temperaturas.

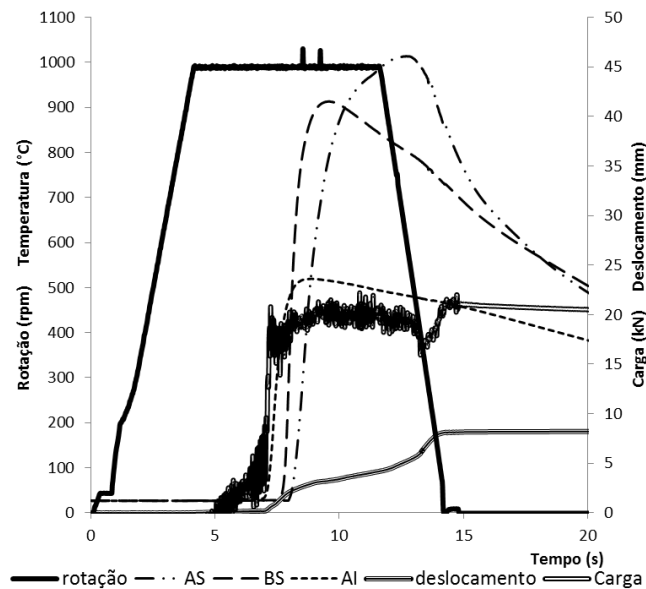


Figura 4.7 Cruzamento dos dados de temperatura, força e rotação do corpo de prova CP 03.

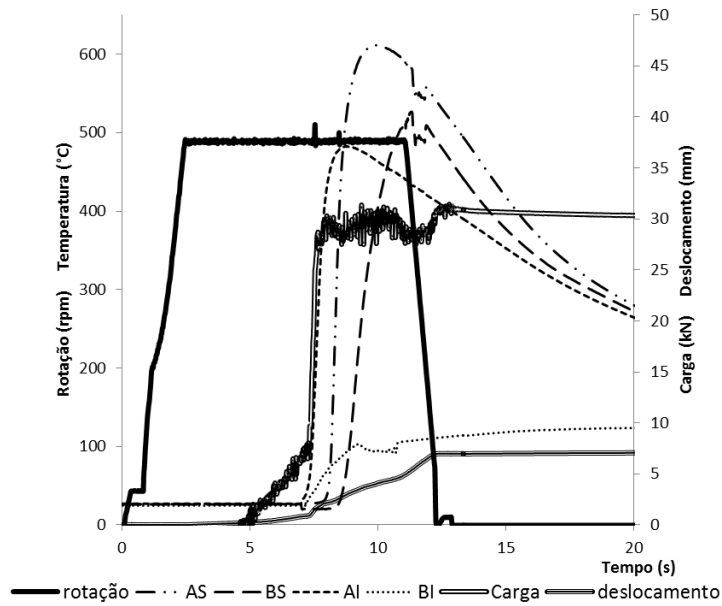


Figura 4.8 Cruzamento dos dados de temperatura, força e rotação do corpo de prova CP 04.

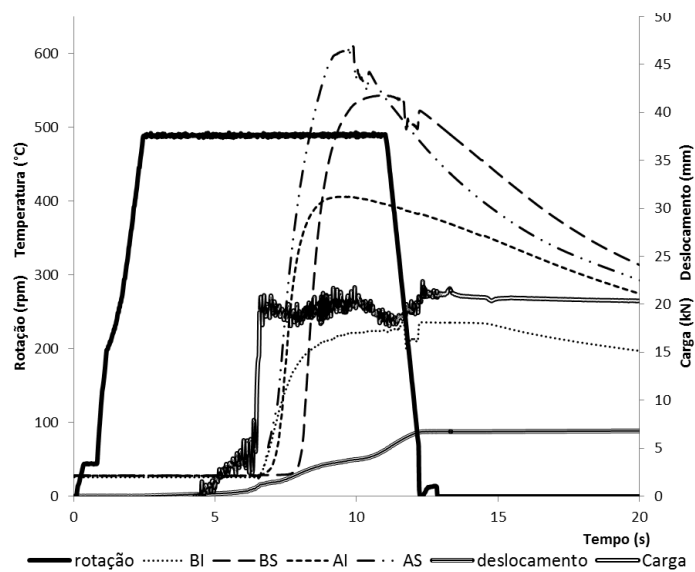


Figura 4.9 Cruzamento dos dados de temperatura, força e rotação do corpo de prova CP 05.

#### 4.3 Curvas de resfriamento e diagrama CCT

As curvas de resfriamento contínuo foram sobrepostas ao diagrama CCT de um aço SAE 8620 para uma estimativa das transformações ocorridas no material da base da sola. As curvas e diagramas podem ser vistos na Figura 4.10 a Figura 4.12.

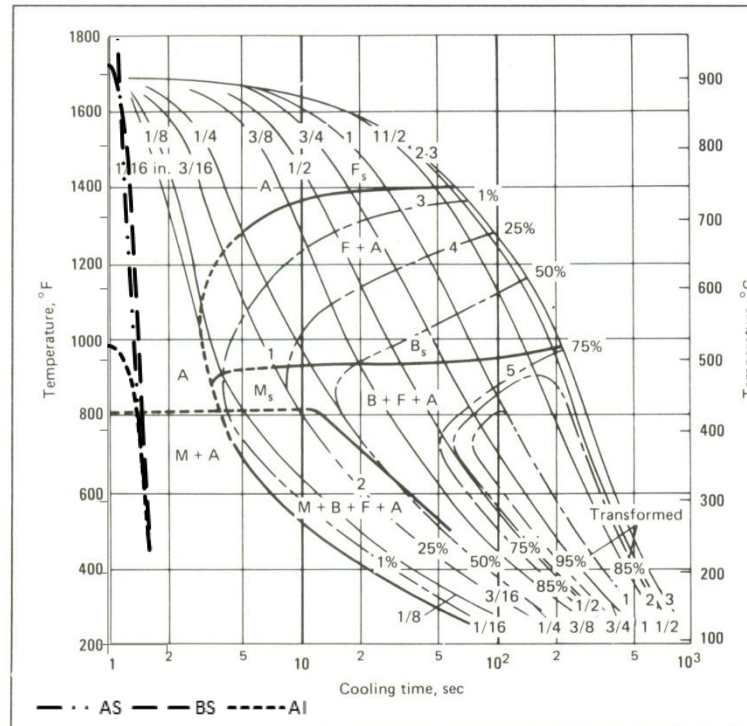


Figura 4.10 Curvas de resfriamento contínuo do corpo de provas CP 03 e diagrama CCT

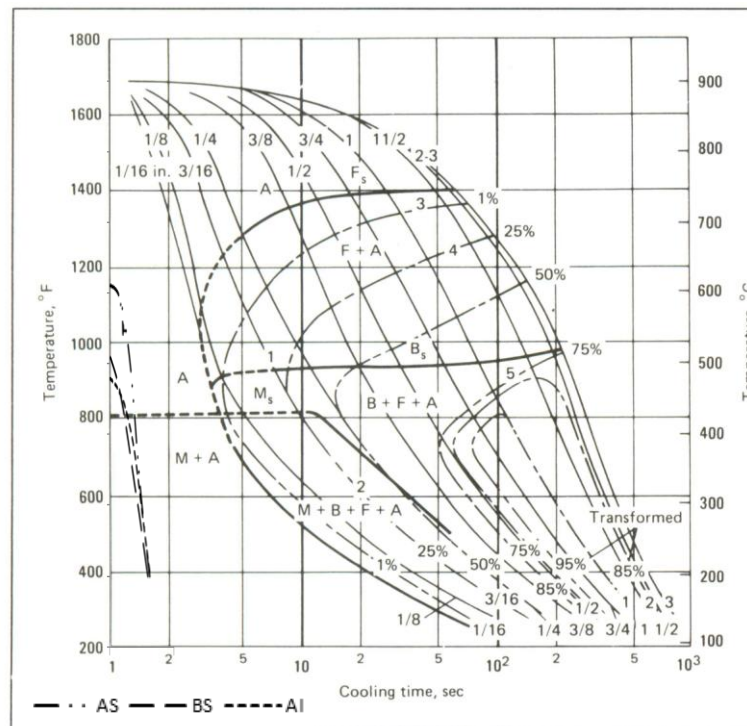


Figura 4.11 Curvas de resfriamento contínuo do corpo de provas CP 04 e diagrama CCT

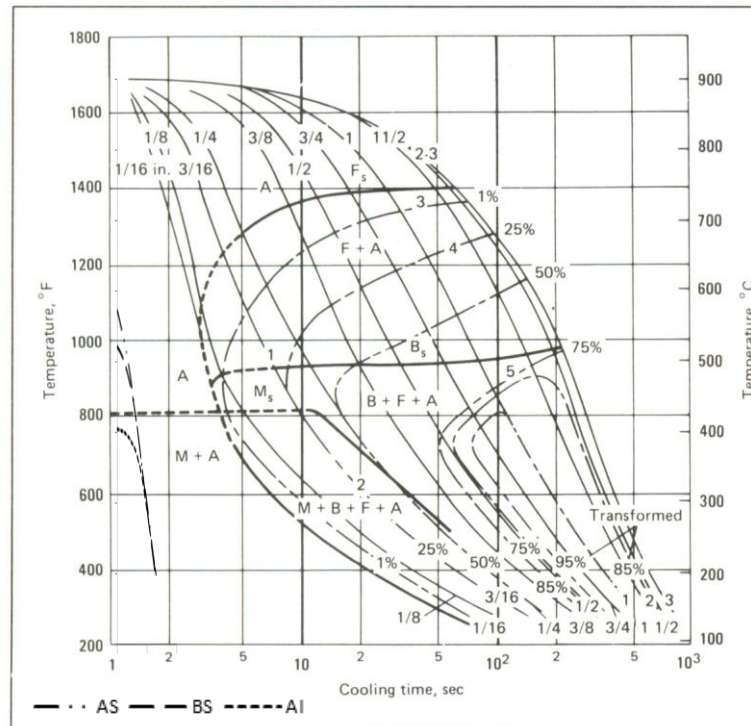


Figura 4.12 Curvas de resfriamento contínuo do corpo de provas CP 05 e diagrama CCT

As curvas referentes aos termopares dos pontos BI não foram sobrepostas aos diagramas devido à baixa temperatura alcançada nestes pontos nos corpos de prova CP 04 e CP 05 e por ter se perdido o sinal do termopar referente a este ponto no corpo de prova CP 03. Nos corpos de prova CP 03 e CP 04 os termopares referentes aos pontos AS, BS e AI indicaram temperaturas que alcançaram a região de austenitização prevendo a formação de martensita nestas regiões. No corpo de prova CP 05 apenas as temperaturas correspondentes aos pontos AS e BS alcançaram tal região.

#### 4.4 Metalografia

Inicialmente são apresentadas as macrografias dos corpos de prova CP 03, CP 04 e CP 05 na Figura 4.13 a Figura 4.15. As macrografias foram feitas através de montagens (feitas a partir de fotos com aumento de 50x) para definir melhor as discontinuidades na interface entre o pino e o material base e também as deformações dos grãos no interior do pino.



Figura 4.13 Macrografia do corpo de prova CP 03

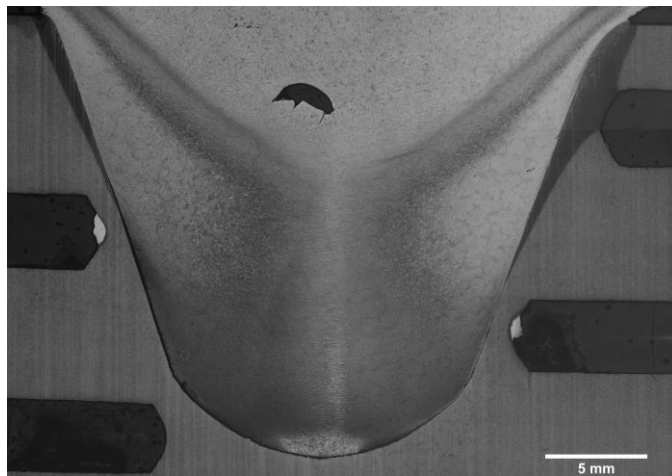


Figura 4.14 Macrografia do corpo de prova CP 04

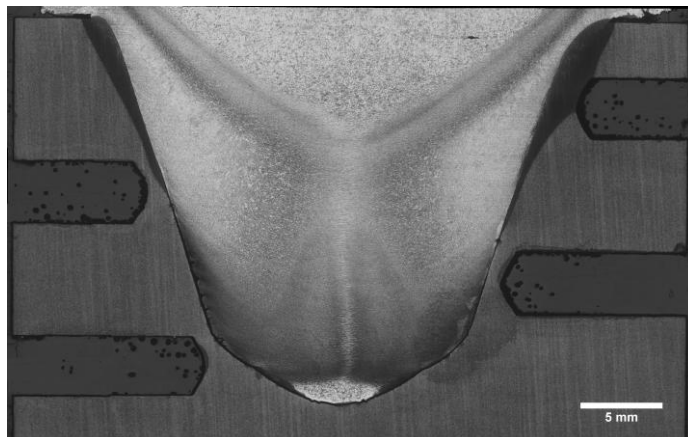


Figura 4.15 Macrografia do corpo de prova CP 05

Nesta Figura 4.16 a Figura 4.18 pode-se observar em detalhe a zona afetada pelo calor em cada uma das três amostras. A ZAC localiza-se na parte superior das bases da solda em todos os corpos de prova, correspondendo às regiões que alcançaram maior temperatura

durante a soldagem. Nota-se, também que a zona afetada pelo calor é maior no corpo de prova CP 03 onde as temperaturas registradas foram maiores. Percebe-se, pela forma da região da ZAC, que próximo aos termopares ocorreu uma influencia na dissipação do calor devido aos furos usinados para colocação dos termopares.

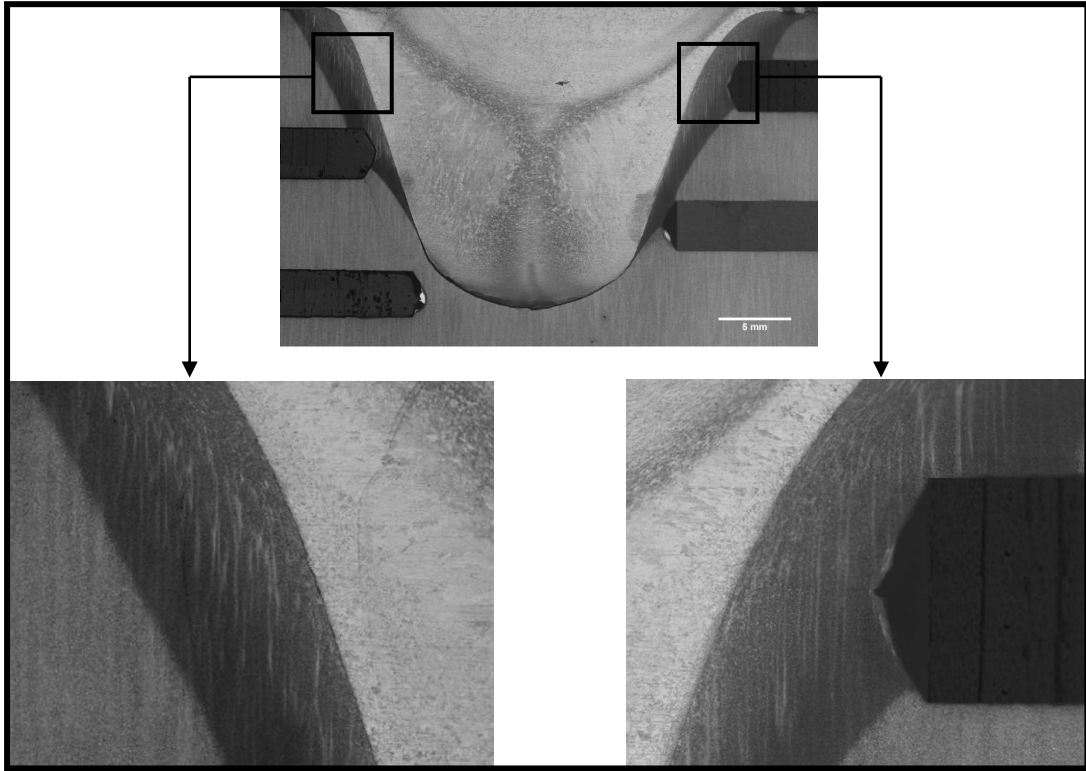


Figura 4.16 Zona afetada pelo calor no corpo de prova CP 03

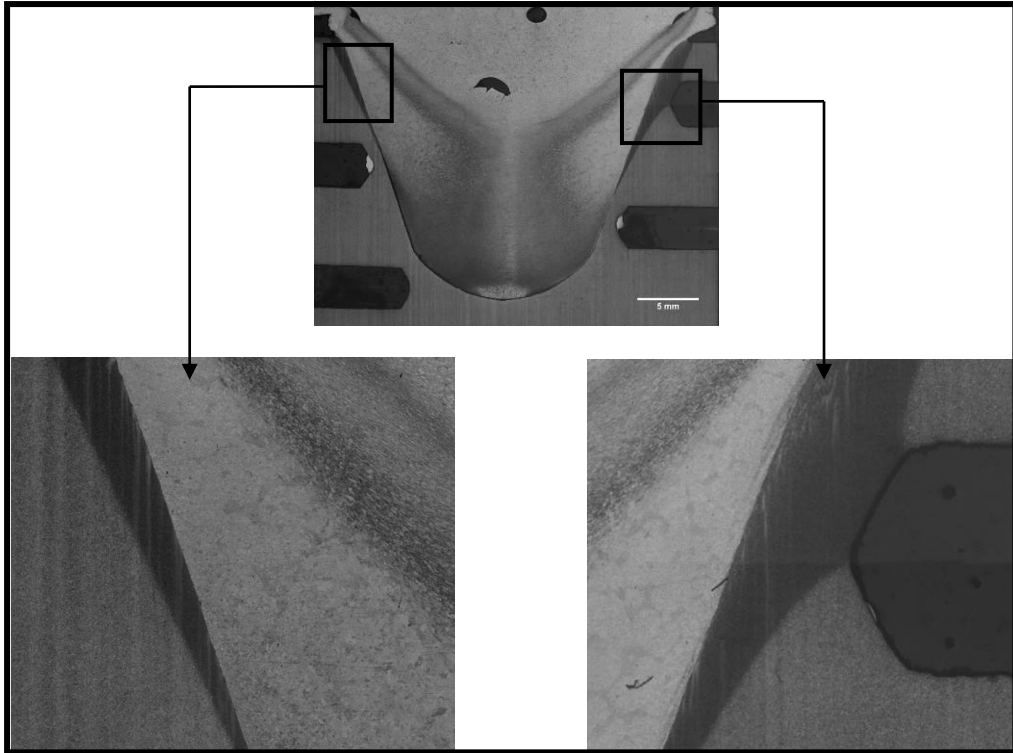


Figura 4.17 Zona afetada pelo calor no corpo de prova CP 04

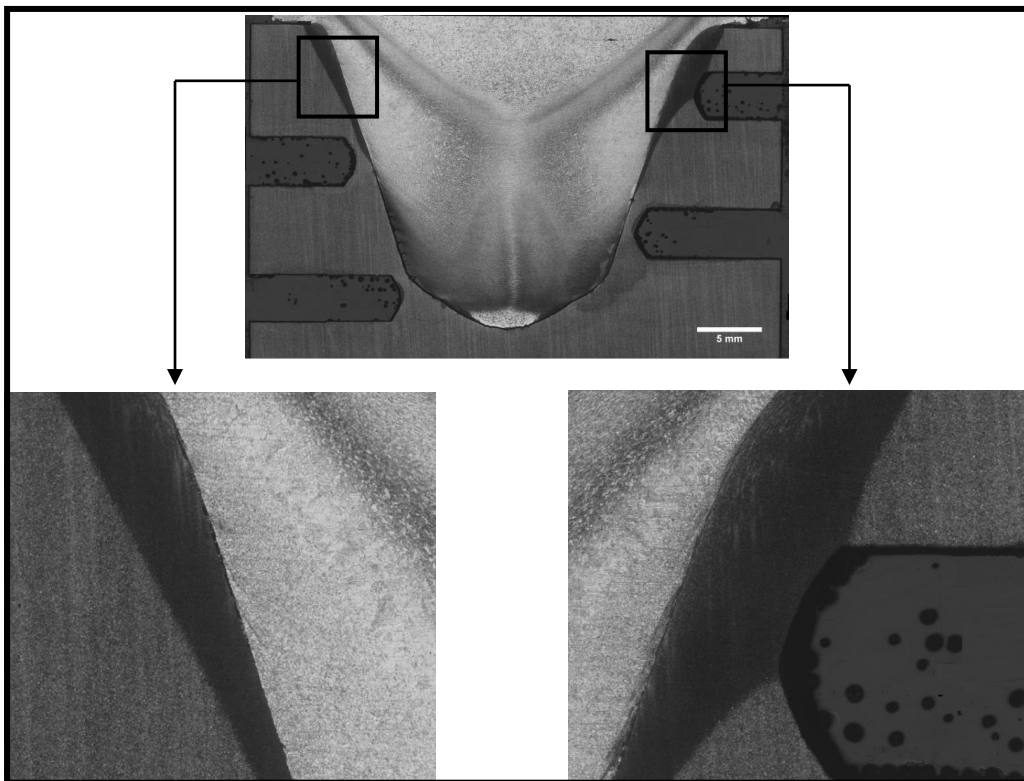


Figura 4.18 Zona afetada pelo calor no corpo de prova CP 05

A falta de união metalúrgica entre o pino e a base da solda está destacada na Figura 4.19 a Figura 4.21. Em todas as amostras a desunião se mostra mais evidente na parte inferior

da interface entre o pino e a base da solda. Percebe-se, também, que os espaços entre o pino e a base da solda não são iguais nos dois lados de cada corpo de prova sendo maiores no lado “B”. Apenas o corpo de provas CP 03 mostrou sinais de união metalúrgica entre pino e base em regiões da interface mais próximas de onde se registraram maiores temperaturas. A Figura 4.22 mostra com detalhes esta união e o local de onde foi tirada a foto, onde se percebe inclusive sinais de recristalização e refino de grão no pino.

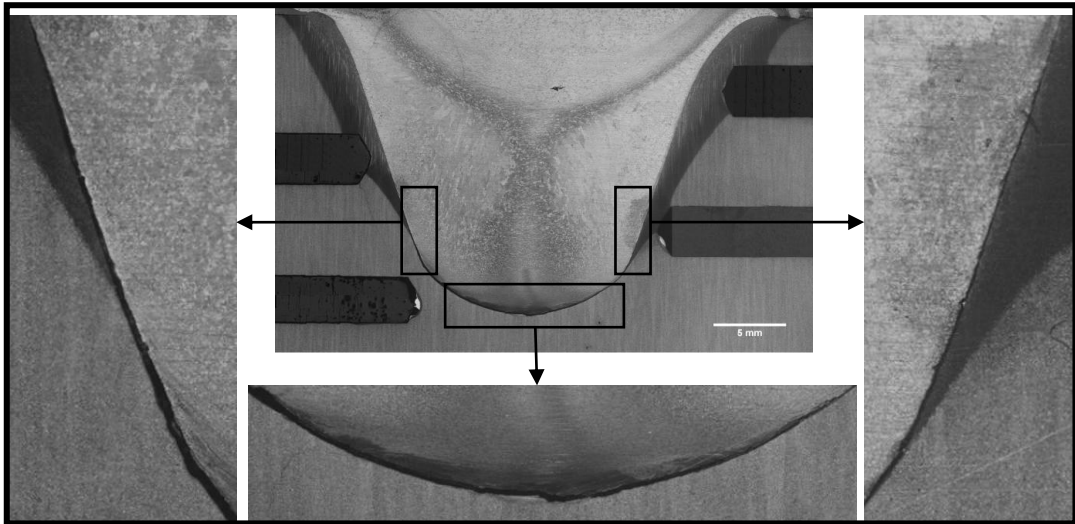


Figura 4.19 Falta de união metalúrgica entre o pino e a base da solda no corpo de prova CP 03.

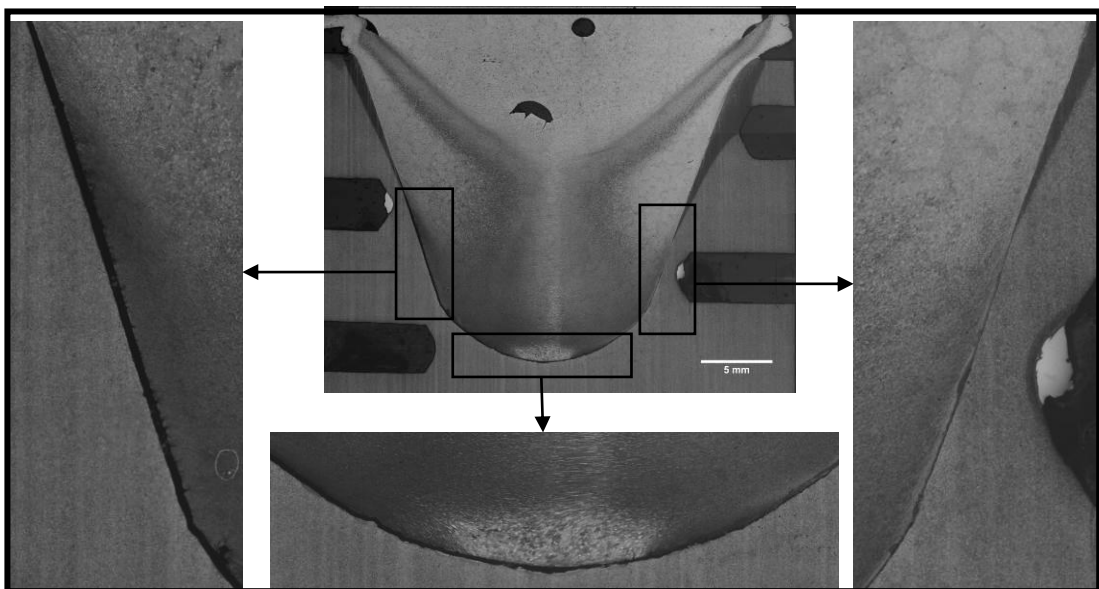


Figura 4.20 Falta de união metalúrgica entre o pino e a base da solda no corpo de prova CP 04.



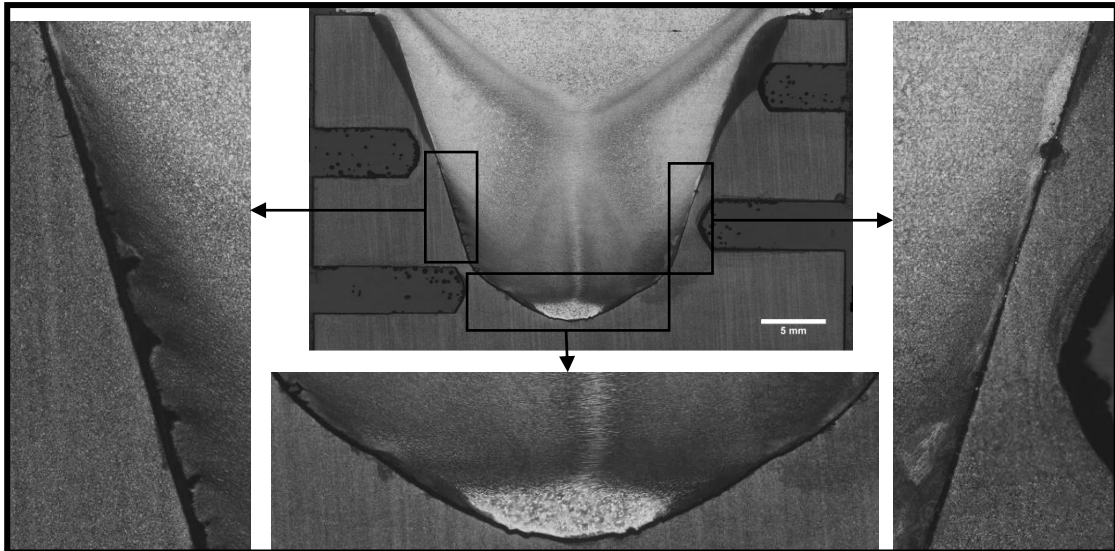


Figura 4.21 Falta de união metalúrgica entre o pino e a base da solda no corpo de prova CP 05.

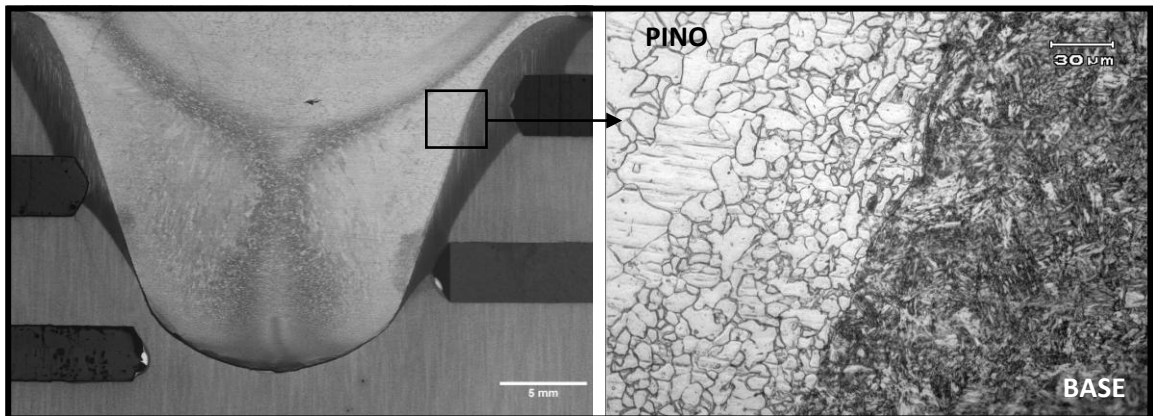


Figura 4.22 Região do corpo de provas CP 03 onde ocorreu a solda. Detalhes de recristalização e refino de grão no pino em foto com aumento de 500x e ataque com nital 3%.

Analisando a microestrutura do pino percebem-se deformações nos grãos que indicam sinais de cisalhamento possivelmente por se tratar de um material mole. Este efeito foi característico nos três corpos de provas. Foi escolhida a amostra CP 05 para ilustrar estas constatações. Na Figura 4.23 são demonstrados diversos locais onde os grãos apresentaram diferentes morfologias após a realização da solda.

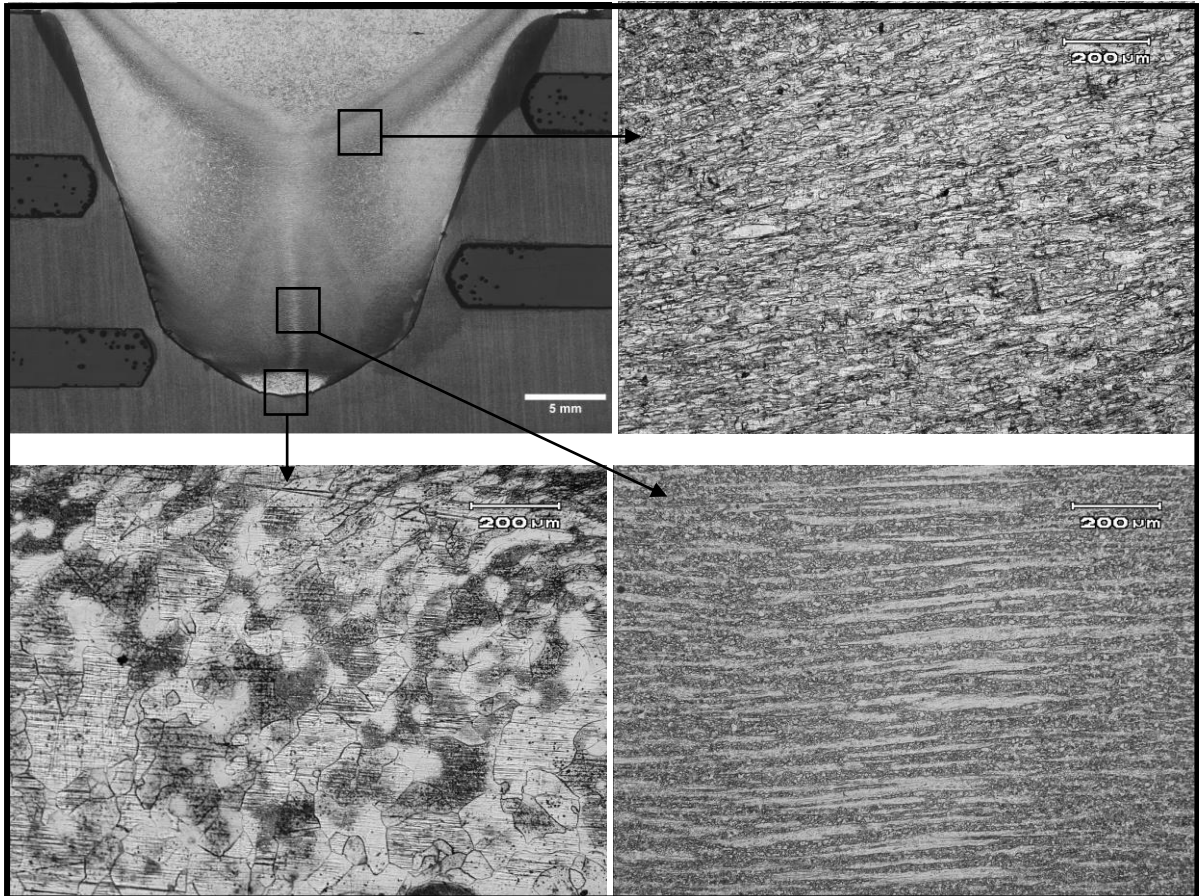


Figura 4.23 Regiões do pino com grãos de diferentes morfologias. Fotos dos detalhes com aumento de 100x e ataque com nital 3%

A seguir são demonstradas as áreas onde foram feitas micrografias para revelar as microestruturas formadas nas regiões da base da solda próximas aos pontos de aquisição de temperatura (Figura 4.24).

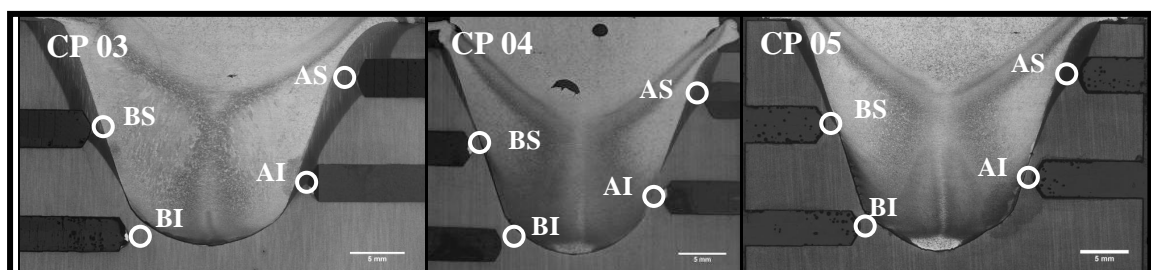


Figura 4.24 Localização das micrografias na base da solda dos corpos de prova CP 03, CP 04 e CP 05 respectivamente.

As micrografias do corpo de provas CP 03 são mostradas na Figura 4.25 a Figura 4.28. Percebe-se a formação de martensita AS e BS devido à austenitização e resfriamento rápido durante o processo de soldagem. Na região AI não houve formação de martensita, apenas um coalescimento dos carbonetos devido à elevação da temperatura. Devido ao baixo

aquecimento na região BI não se verificou alteração na microestrutura original do material da base da solda.

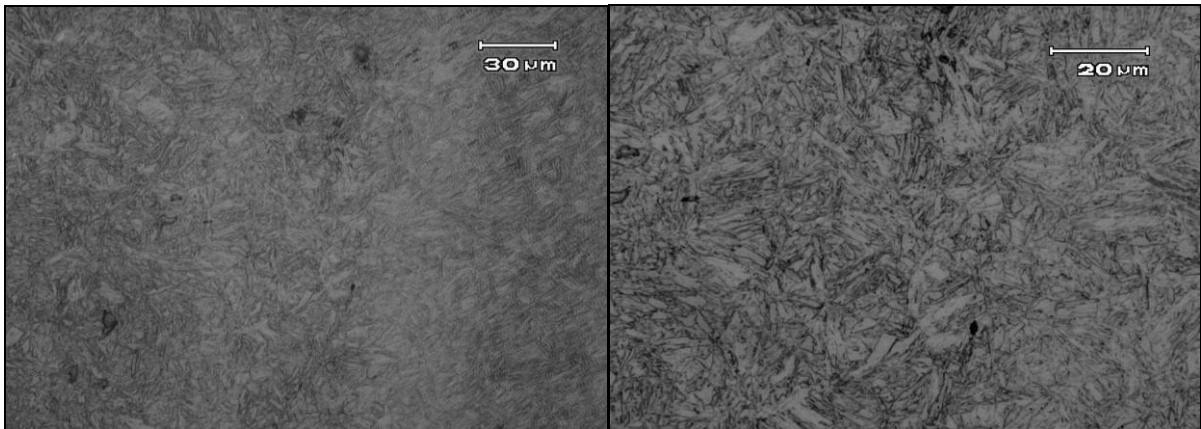


Figura 4.25 Micrografia da região AS no Corpo de provas CP 03 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando formação de martensita. Ataque: nital 3%.

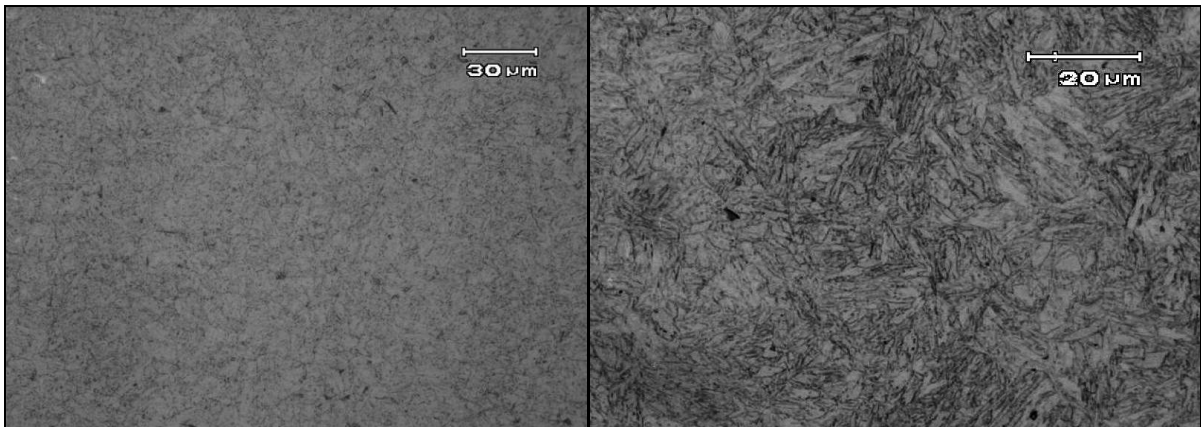


Figura 4.26 Micrografia da região BS no Corpo de provas CP 03 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando formação de martensita. Ataque: nital 3%.

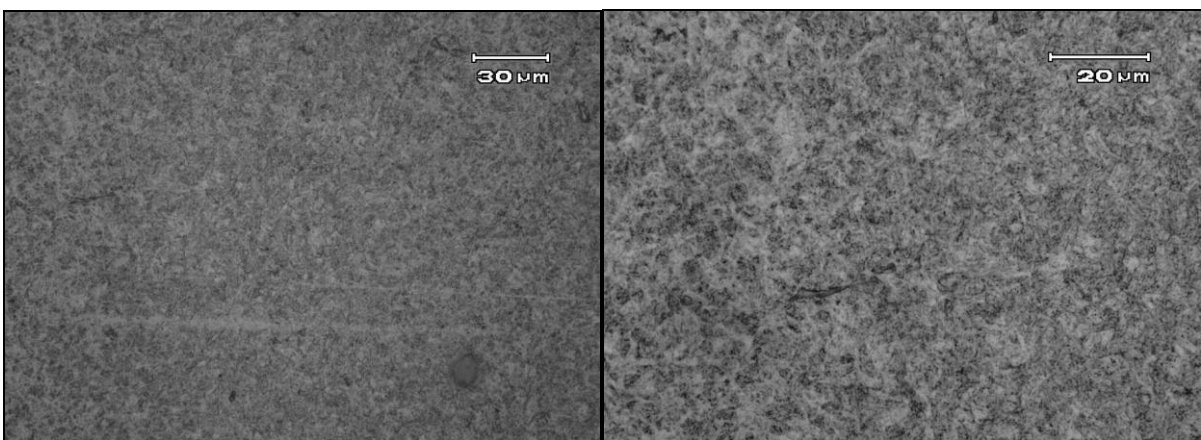


Figura 4.27 Micrografia da região AI no Corpo de provas CP 03 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando carbonetos mais grosseiros. Ataque: nital 3%.

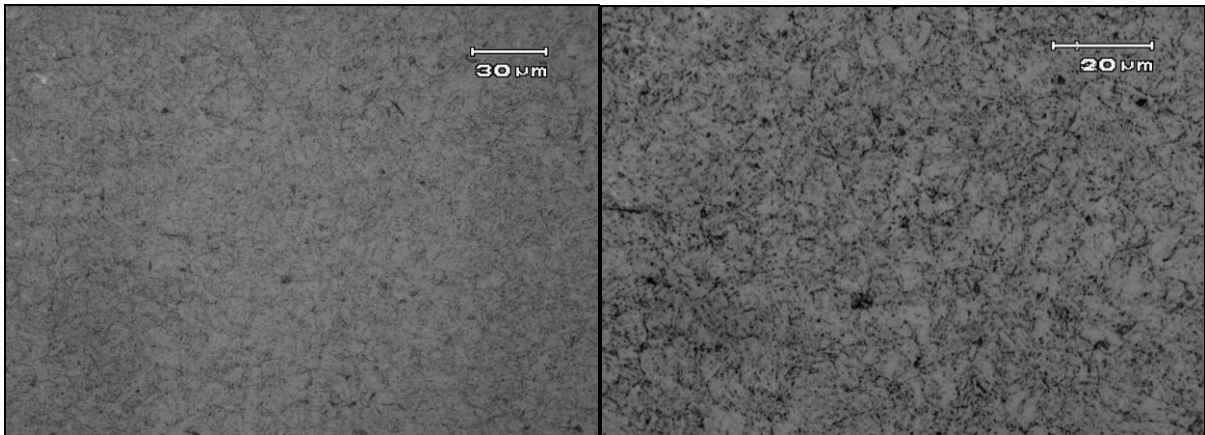


Figura 4.28 Micrografia da região BI no Corpo de provas CP 03 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%.

A Figura 4.29, Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32 mostram as micrografias do corpo de provas CP 04. Na região AS percebe-se a formação de martensita. Nas regiões BS e AI houve apenas o coalescimento dos carbonetos devido à elevação da temperatura. Na região de BI não foi verificadas alterações da microestrutura original do material, formada por martensita revenida.

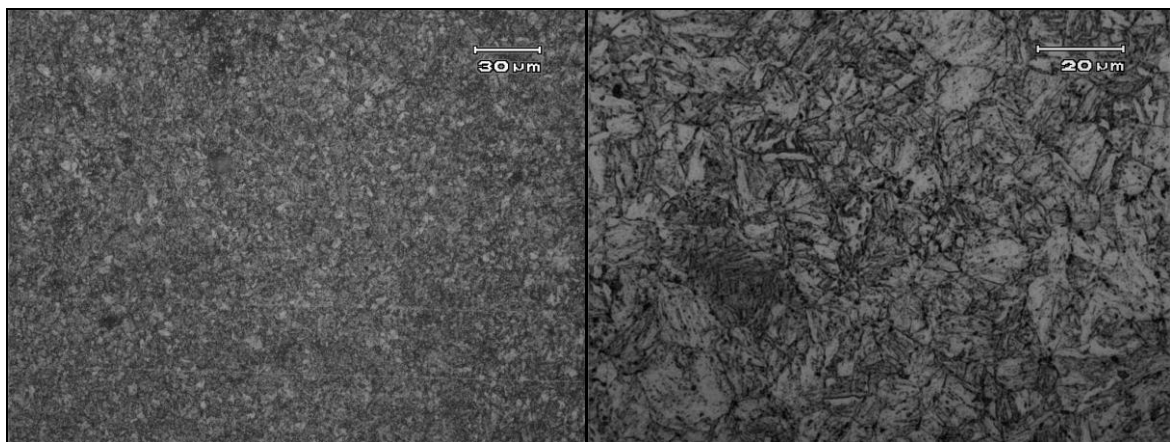


Figura 4.29 Micrografia da região AS no Corpo de provas CP 04 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando formação de martensita. Ataque: nital 3%.

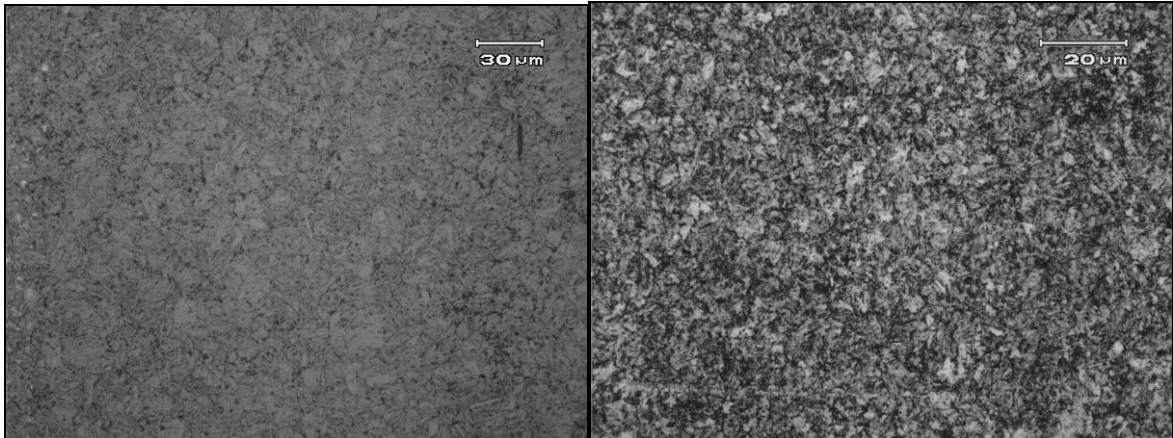


Figura 4.30 Micrografia da região BS no Corpo de provas CP 04 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando carbonetos mais grosseiros. Ataque: nital 3%.

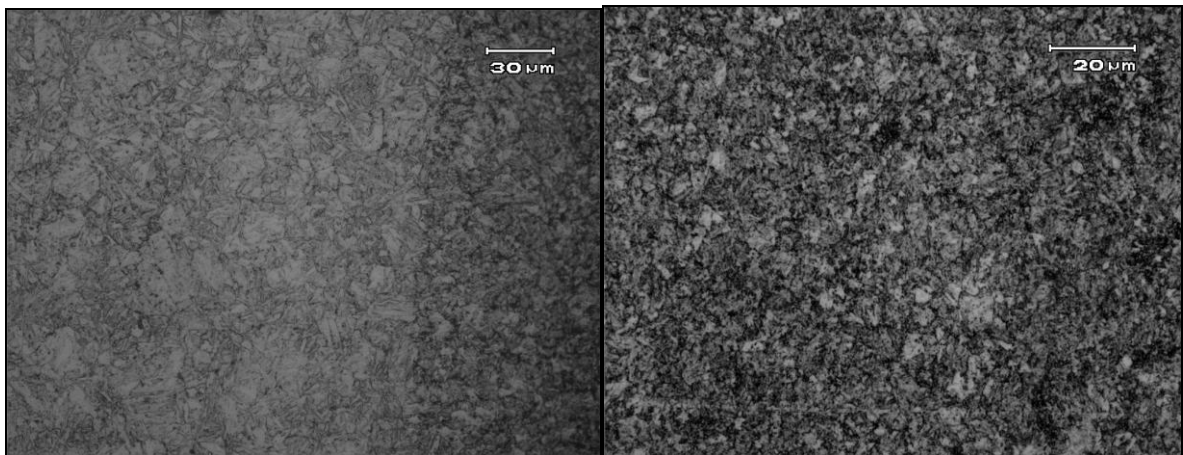


Figura 4.31 Micrografia da região AI no Corpo de provas CP 04 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando carbonetos mais grosseiros. Ataque: nital 3%.

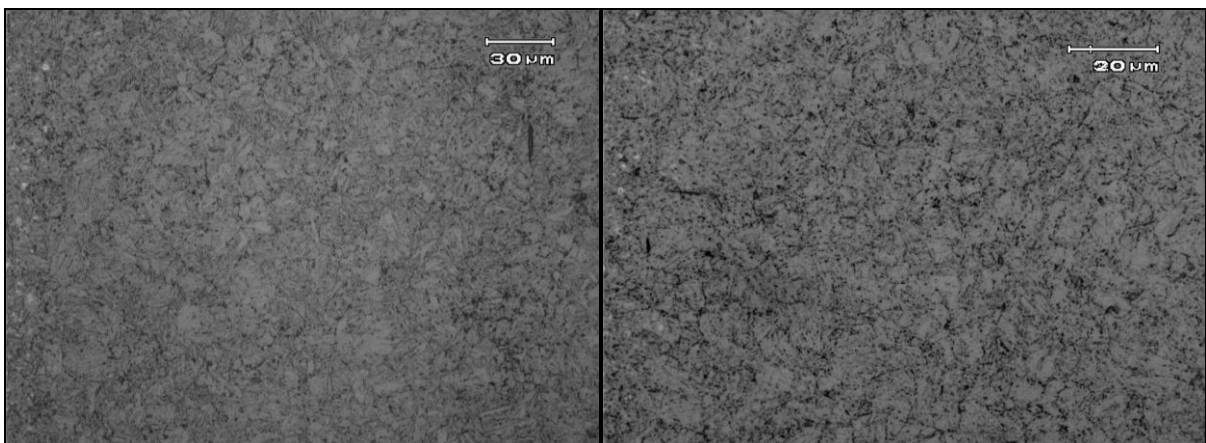


Figura 4.32 Micrografia da região BI no Corpo de provas CP 04 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%.

As micrografias realizadas no corpo de prova CP 05 são mostradas na Figura 4.33 a Figura 4.36. Apenas a região AS e Bs mostraram alguma alteração na microestrutura

apresentando carbonetos mais grosseiros. As regiões AI e BI continuaram como martensita revenida original do material.

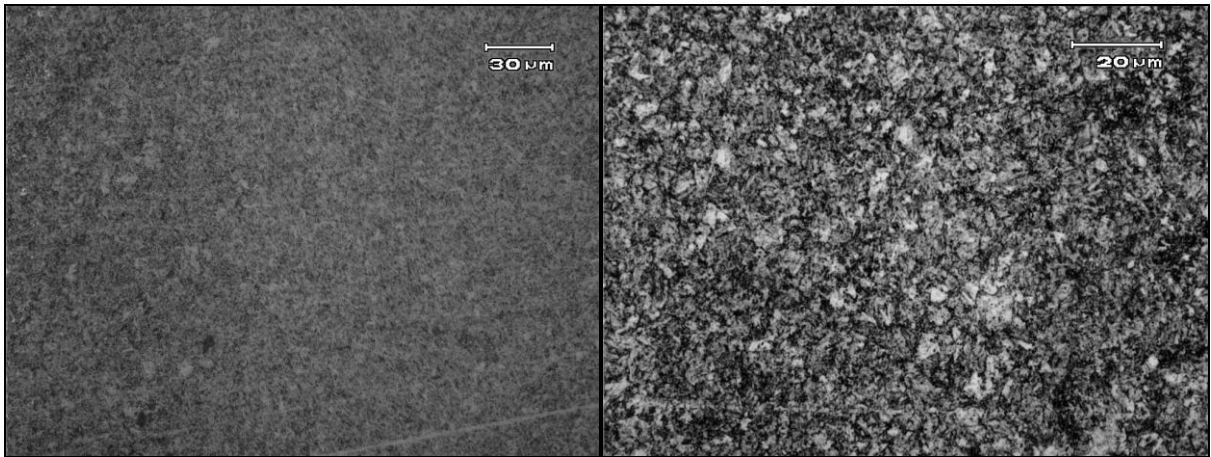


Figura 4.33 Micrografia da região AS no Corpo de provas CP 05 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando carbonetos mais grosseiros. Ataque: nital 3%.

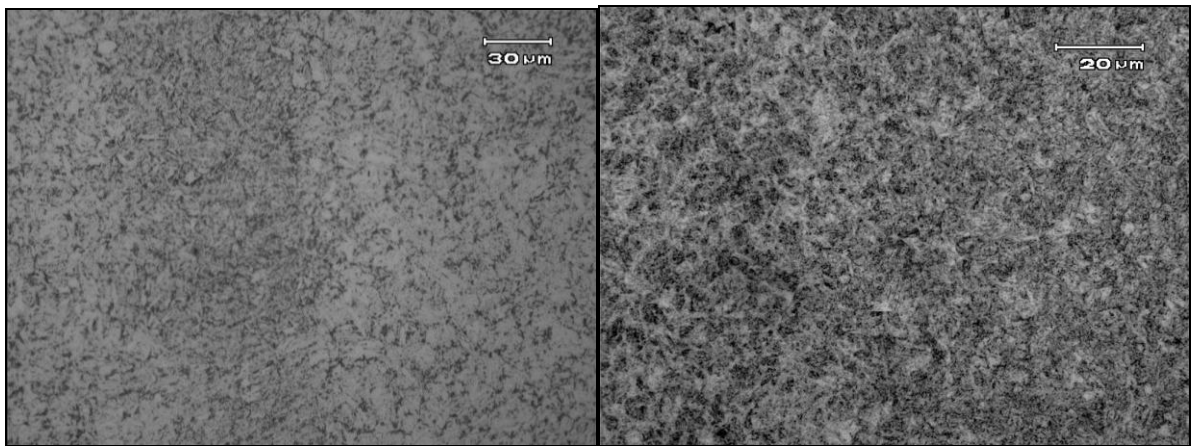


Figura 4.34 Micrografia da região BS no Corpo de provas CP 05 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%.

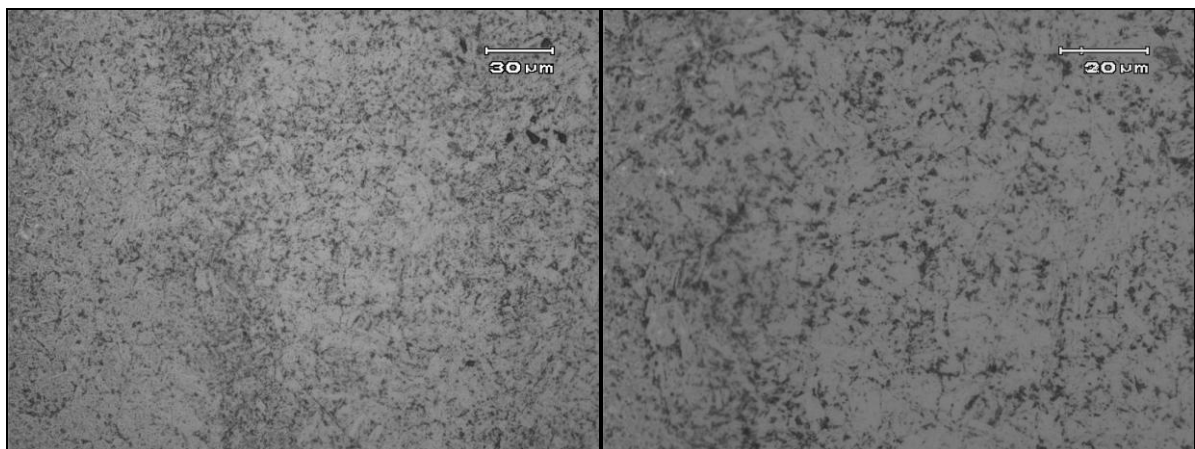


Figura 4.35 Micrografia da região AI no Corpo de provas CP 05 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%.

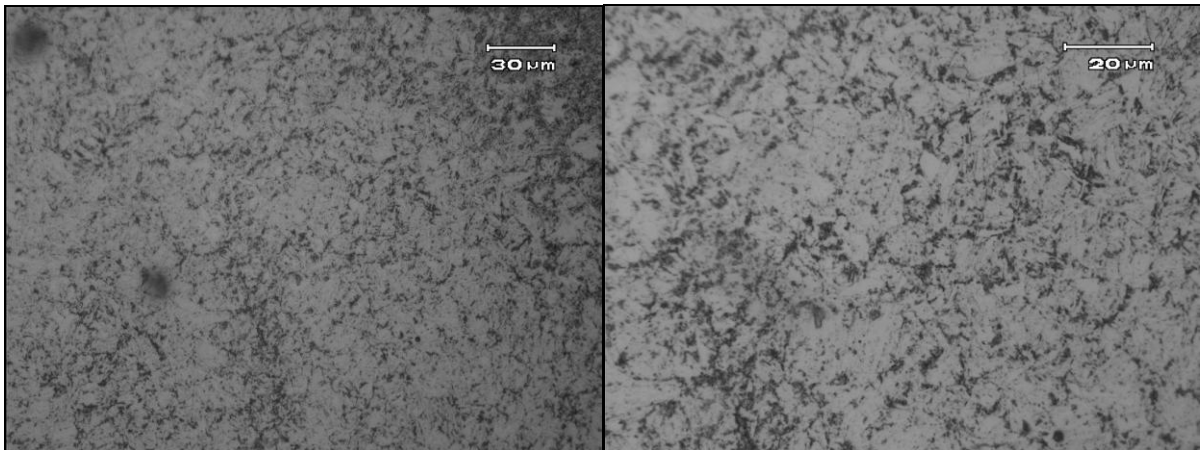


Figura 4.36 Micrografia da região BI no Corpo de provas CP 05 com aumento de 500x (esquerda) e 1000x (direita) revelando a martensita revenida original. Ataque: nital 3%.

#### 4.5 Perfis de Microdureza

Na Figura 4.37, Figura 4.39 e Figura 4.41 são ilustradas as regiões e sentidos dos perfis de dureza em cada amostra bem como a dureza média de cada perfil traçado no pino e do pino como um todo. Os pontos vermelhos distam aproximadamente 1 mm de acordo com a escala da foto. No corpo de prova CP 03 foi traçado um perfil a mais iniciando no metal da base da solda e adentrando o pino. A Figura 4.38, Figura 4.40 e Figura 4.42 mostra o resultado das medições nos perfis de microdureza.

Em todos os perfis traçados a dureza média foi maior do que a apresentada pelo pino como não processado. O corpo de provas que registrou a maior dureza média para o pino foi o corpo de provas CP 05. Na comparação entre os corpos de prova CP 04 e CP 05, os quais foram soldados com a mesma rotação nas cargas diferentes (30kN e 20kN respectivamente) a dureza média do pino variou de maneira inversamente proporcional a aplicação da carga. Entre os corpos de prova soldados com mesma carga e rotação diferente, CP 03 a 1000 rpm e CP 04 a 500 rpm, a dureza do pino variou proporcionalmente a velocidade de rotação. Os três corpos de provas apresentaram maiores durezas próximo à interface entre o pino e a base da solda nas três alturas (AS, BS e AI).

O corpo de provas CP 03 apresentou a menor dureza média no perfil da altura correspondente a AS, tendo os outros dois perfis durezas médias muito próximas. Nos corpos de prova CP 04 e CP 05 a menor dureza média foi constatada nos perfis correspondentes a altura AI, sendo que os outros dois perfis de cada corpo de prova também tiveram dureza média aproximada.

O perfil traçado desde o material da base da solda até o pino, em CP 03, revelou um grande acréscimo na dureza da ZAC, coincidindo com a martensita revelada pela micrografia da região AS. A dureza do material da base da solda se mostrou maior do que a do pino como soldado.

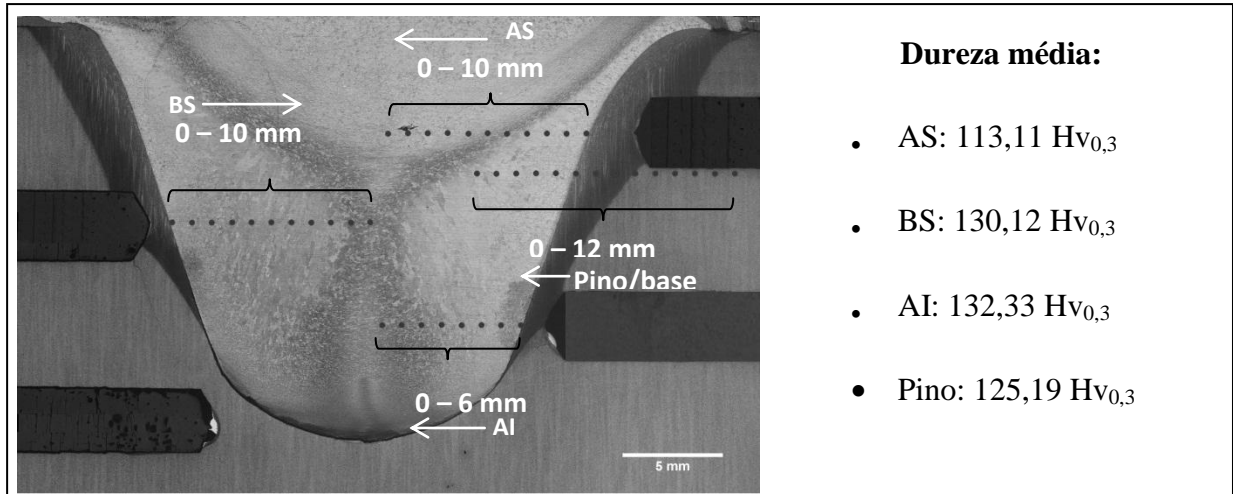


Figura 4.37 Localização e sentido das medições dos perfis de microdureza e médias dos resultados em cada região do pino e no pino em CP03.

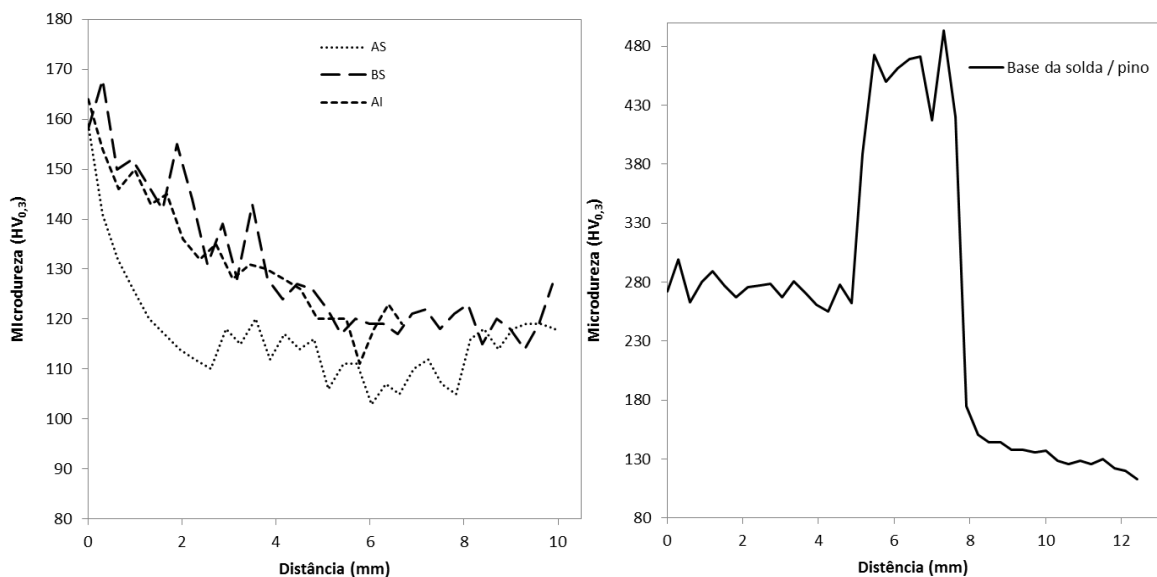


Figura 4.38 Resultado das medições nos perfis do pino do corpo de prova CP 03 (esquerda) e no perfil que abrange base da solda e pino (direita).



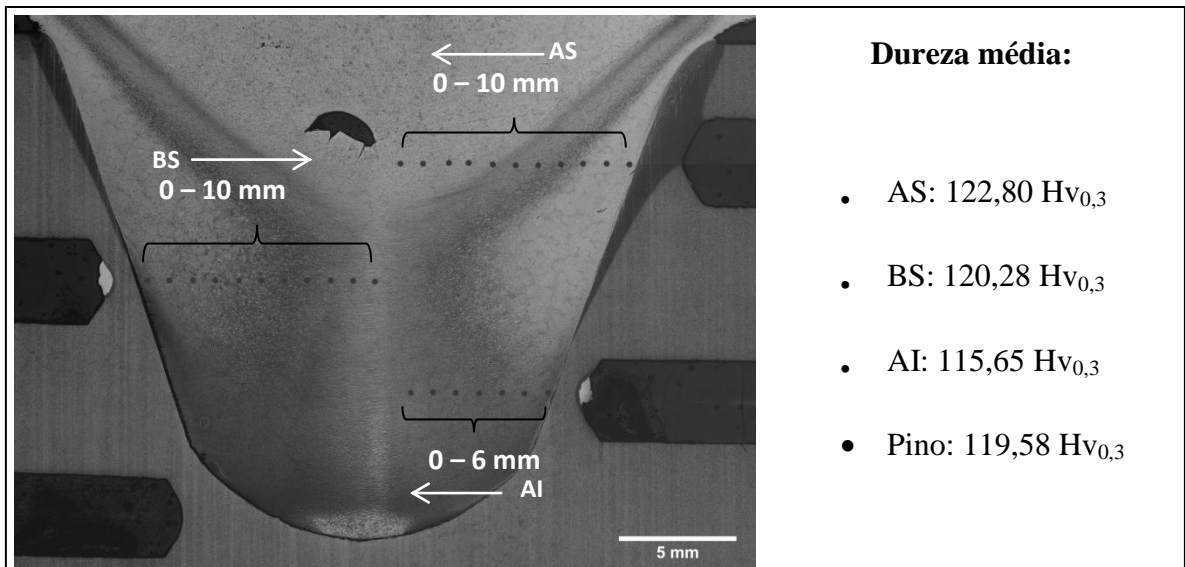


Figura 4.39 Localização e sentido das medições dos perfis de microdureza e médias dos resultados em cada região do pino e no pino em CP 04.

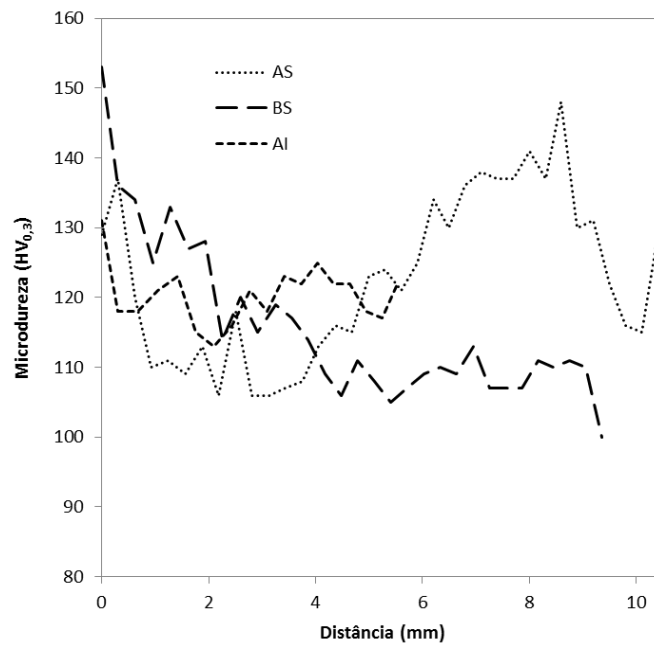


Figura 4.40 Resultado das medições nos perfis do pino do corpo de prova CP 04.

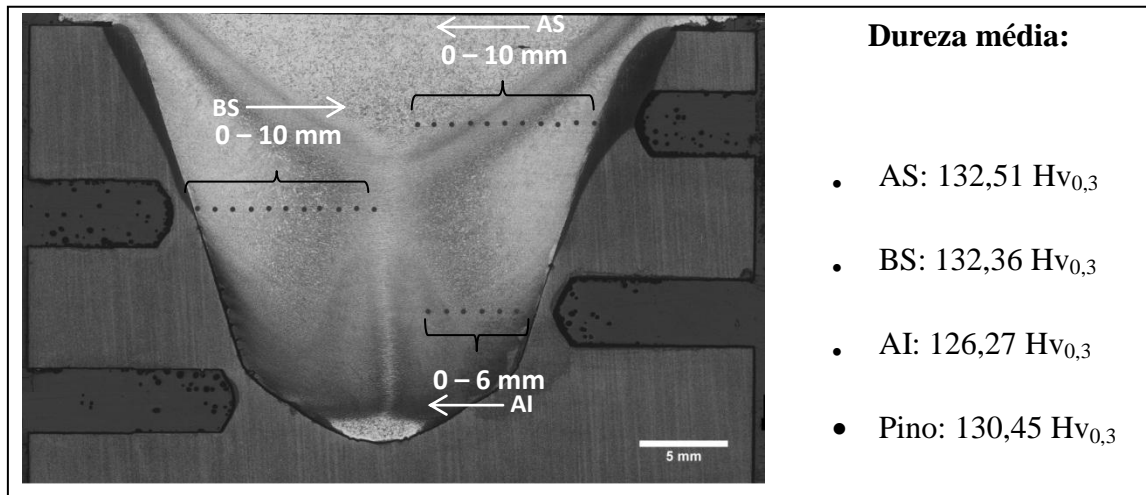


Figura 4.41 Localização e sentido das medições dos perfis de microdureza e médias dos resultados em cada região do pino e no pino em CP 05.

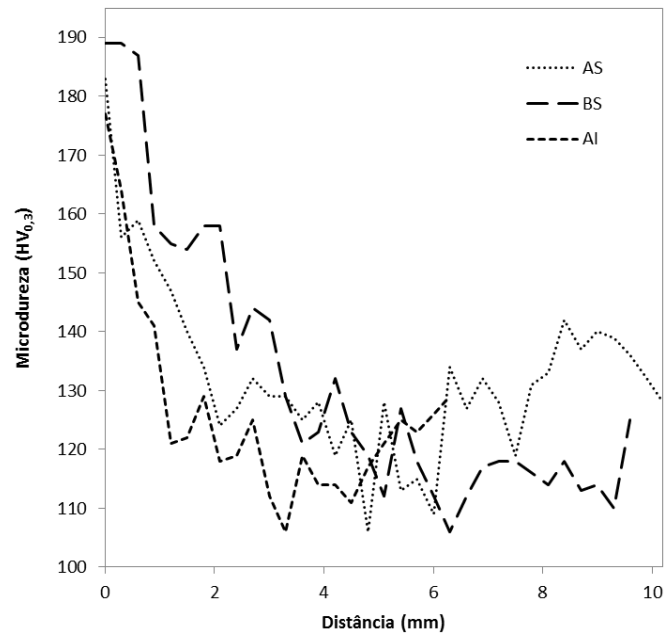


Figura 4.42 Resultado das medições nos perfis do pino do corpo de prova CP 05.

## 5.0 CONCLUSÕES

A comparação entre os parâmetros de soldagem e temperaturas medidas mostrou que a alteração nas cargas, e conseqüentemente no tempo de atrito entre o pino e a base, não promoveu grandes alterações no aquecimento.

As regiões inferiores no interior da base começaram a aquecer antes, pois é onde o atrito ocorre primeiro. Porém com o decorrer do processo as regiões superiores alcançam maiores temperaturas devido à geometria do pino, ou seja, quanto maior for o diâmetro do pino maior será a velocidade tangencial e conseqüentemente o aquecimento.

Pôde-se verificar sinais de cisalhamento no interior do pino. Os perfis de microdureza revelaram que o encruamento foi maior no pino processado com maior carga. Este efeito pode ter diversas causas como: mau dimensionamento do furo da base para receber um material de dureza não muito elevada como a do pino, ferramentas e acabamento final do processo de usinagem do furo e ainda mecanismo de fixação dos componentes na máquina de solda. Este último evidenciado pela descentralização entre o pino e o furo usinado, como pode ser observado em macrografias realizadas nas três amostras.

Conforme pode ser observado nos gráficos de aquisição de dados da máquina de soldagem o consumo total dos pinos foram equivalentes a deslocamentos na faixa de sei a oito milímetros, variando conforme a carga e rotação aplicada. Entretanto, a configuração do parâmetro deslocamento da máquina de solda foi de apenas quatro milímetros para os três corpos de prova. Isto se deve ao fato de material do pino ter dureza muito baixa. Sendo assim, a força axial atuante promove um aumento no deslocamento e, conseqüentemente, no consumo do pino de modo que haveria um excesso de rebarba para parâmetros de deslocamento maiores que os quatro milímetros.

A centralização entre pino e base da solda durante a soldagem é decisiva para o aquecimento uniforme dos componentes. Este fato é comprovado por as temperaturas

máximas do lado “A” terem sido maiores que as do lado “B” na amostra que foi soldada com maior carga em comparação com a de menor carga e mesma velocidade de rotação.

Temperaturas na faixa de 611°C e 1013°C promoveram formação de martensita no material da base da solda. Houve coalescimento de carbonetos nas regiões que atingiram temperaturas de 482°C e 610 °C. Abaixo de 405°C não ocorreu alteração na microestrutura do material da base da solda. Duas temperaturas muito próximas (610°C e 611°C) corresponderam a microestruturas diferentes.

As mudanças microestruturais observadas não coincidiram com o diagrama CCT, pois o tempo de permanência na temperatura de austenitização pôde não ter sido suficiente para total dissolução dos carbonetos e solubilização dos elementos de liga em solução sólida.

O corpo de prova que mostrou união metalúrgica entre os materiais dissimilares não apresentou resultado favorável quanto à microestrutura, pois sofreu tempera. O perfil de microdureza mostrou que o material se apresentou com dureza muito elevada próximo à interface entre o pino e o material da base revelando um acentuado gradiente de dureza entre base da solda e pino.

## **6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Avaliar as diferentes mudanças microestruturais ocorridas para temperaturas máximas muito próximas durante o processo de soldagem.
- Realizar ensaios com outras geometrias para o furo da base da solda, possibilitando avaliar o consumo do pino.
- Realizar alterações na composição química do pino consumível, aumentando a dureza do material.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREWS, R. E. and MITCHELL, J. S., **Underwater Repair by Friction Stitch Welding. Metals and Materials**. Vol. 6, No. 12, pp. 796-797. Dec. 1990.
- CALLISTER, **Engenharia e Ciência dos materiais: introdução**, Cap.10, 1991.
- CHIAVERINI, V., **Aços e Ferros Fundidos**, cap. 2, pp.39-48, 1977.
- DNV-OS-C 101, Offshore Standard – **Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)**, 2008.
- ELLIS, C. R. G., **Continuous Drive Friction Welding of Mil Steel**, Welding Journal, p 183s- 197s, 1972.
- FORTES, C., **Metalurgia da Soldagem**, cap. 1, pp. 6-8, 2004.
- HEAT TREATER’S GUIDE, **Practices and Procedures for Irons and Steels**, pp.441, 1995.
- LÓPES, F. S., **Montagem e Avaliação de uma Máquina de solda por Fricção**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- KWIETNIEWSKI, C.E.F. E KISS, F.J., **Metalografia e Tratamentos Térmicos de Aços e Ferros Fundidos**, cap. 5, pp. 99-122, 2010.
- MACEDO, M. L. K., **Caracterização de Depósitos Realizados pelo Processo de Deposição por Fricção em Chapas de Aço de Alto Carbono**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do sul, 2011.
- MACHADO, I. G., **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**, cap. 13, pp. 279-287, 2007.
- MATTEI, F., **Desenvolvimento de Equipamento para Estudo de Soldagem por Fricção**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing: Bonding Mechanism and Properties**, Tese de Doutorado, Technischen Universität Braunschweig, 2002.
- PAPRITAN, J.C. **Friction Welding**, Welding Handbook, Vol. 2, chapter 23, 8th edition, pp.139-164, 1991.

**PINHEIRO, G.A., local Reinforcement of Magnesium Components by Friction Processing: Determination of Bonding Mechanism and Assessment of Join Properties**, Tese de Doutorado, Universität Hamburg-Harburg, 2008.

**THOMAS, W.M. and NICHOLAS, E.D., Friction Surfacing and New Methods of Friction Cladding (review)**, Paton Welding Journal, 6 (3), pp.179-185, 1994.

**TSANG, S. Welding, Brazing and Solderin**, ASM Handbook, vol. 6, cap. Solid-State Welding, Brazing, and Soldering Process, 1994.