

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Investigação de Passes de Revenido na Soldagem de Aços Cr-Mo

por

Luís Gustavo Caldas de Andrade

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2008



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

Investigação de Passes de Revenido na Soldagem de Aços Cr-Mo

por

Luís Gustavo Caldas de Andrade

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA  
A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Gilberto Dias da Cunha  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Ivan Guerra Machado

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio Esmério Mazzaferro

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre, 23 de Junho de 2008

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Afonso Silva de Andrade e Hilce de Oliveira Caldas, pelo apoio incondicional em todos momentos e pela confiança em mim depositada ao longo de todos estes anos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter iluminado meu caminho em todas minhas decisões, mesmo quando erradas.

Aos meus pais, Afonso Silva de Andrade e Hilce de Oliveira Caldas, que se dedicaram para me dar esta oportunidade. Por todo tipo de ajuda, emocional, financeira, por todo suporte prestado. Sempre pude contar com eles. Acreditaram em mim, mesmo quando eu não mais acreditava.

À Ana Cristina e Bartolomeu, que se fizeram presentes durante toda essa jornada, pela compreensão nos momentos onde o silêncio se fez necessário e tanta alegria trouxeram à minha vida.

À Wilmar Collovini, por ter me dado a oportunidade de ingressar no mercado de trabalho, por compartilhar seus conhecimentos de forma irrestrita e sempre ter demonstrado paciência, mesmo nos momentos mais críticos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ivan Guerra Machado, por ter me guiado durante a realização deste trabalho.

Ao Museu do Motor e seus integrantes, bem como todos amigos que fiz na Universidade em todos estes anos.

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”.

*Isaac Newton*

ANDRADE, L.G. de **Investigação de Passes de Revenido na Soldagem de Aços Cr-Mo**. 2008. 30 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

## RESUMO

O presente trabalho visa avaliar o efeito da técnica de soldagem conhecida por passe de revenido em aços Cr-Mo, e comparar os resultados obtidos com outras juntas soldadas utilizando a técnica convencional e tratamento térmico de alívio de tensões. Através da medição de dureza, micro-dureza, ensaios de tração e dobramento se pretende obter as propriedades de cada junta. Posteriormente realizou-se uma breve análise numérica para estimar tempos de resfriamento e formação de fases de acordo com a mudança dos parâmetros de soldagem. Neste trabalho foram soldadas 4 juntas a topo, de tubo 6" SCH 80, material ASTM A-335 Grau P11 (ASME IX – P Number 4).

**PALAVRAS-CHAVE:** Passe de Revenido, Soldagem, Temper Bead, Cr-Mo

ANDRADE, L.G. de. **Investigation of temper bead welding on Cr-Mo steels.** 2008. 30 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

## ABSTRACT

This paper presents the effects of a welding technique called temper bead on low alloy Cr-Mo steels. This work also aims to compare the results of this method with other welded joints used by the conventional welding technique associated with post weld stress relief heat treating. The properties of each welded joint were exploited through the measurement of hardness and microhardness, traction and bending tests. Afterwards, to estimate the cooling times and phase formation, accordingly to welding parameters, numerical analysis were used. During this investigation, 4 butt welded joints were produced, using ASTM A-335 Grade P11 (ASME IX – P Number 4) pipes.

**KEYWORDS:** Temper Bead, Welding, Cr-Mo

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Soldagem a arco com eletrodo revestido (ER / SMAW) .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Soldagem a arco com proteção por gás e eletrodo não consumível .....</b>	<b>2</b>
<b>2.3 Tratamento térmico de alívio de tensões.....</b>	<b>2</b>
<b>2.4 Técnica Passe de Revenido .....</b>	<b>3</b>
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>5</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1 Ensaio de Tração .....</b>	<b>8</b>
<b>4.2 Fotos Macro, Avaliação da extensão da ZAC .....</b>	<b>8</b>
<b>4.3 Dureza .....</b>	<b>9</b>
<b>4.4 Micro Dureza e Metalografia.....</b>	<b>10</b>
<b>4.5 Dobramento .....</b>	<b>12</b>
<b>5. ESTIMATIVA DOS TEMPOS DE RESFRIAMENTO.....</b>	<b>13</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>15</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>16</b>
<b>ANEXO I – DIAGRAMA CCT DO AÇO ASTM A335 GRAU P11 (P.Nº 4) .....</b>	<b>17</b>
<b>ANEXO II – TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZAS .....</b>	<b>17</b>
<b>ANEXO III – ESPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA DE DOBRAMENTO CONFORME ASME IX.....</b>	<b>18</b>
<b>APÊNDICE I – CROQUIS DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NESTE ESTUDO .....</b>	<b>19</b>
<b>APÊNDICE II – ACABAMENTO DAS JUNTAS SOLDADAS .....</b>	<b>20</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O primeiro uso importante dos aços Cr-Mo foi na indústria do Petróleo, para reduzir a corrosão causada pelo enxofre e seus compostos, comumente encontrados no petróleo bruto. Devido à sua resistência à oxidação, estes aços foram empregados também em aquecedores de vários tipos, por sua excelente resistência em altas temperaturas eles são amplamente usados na geração de vapor.

Mais recentemente foram empregados na fabricação de vasos de pressão com grandes espessuras de parede, para processos de hidrotreatamento na indústria petrolífera. Os aços Cr-Mo são aqui empregados devido à sua resistência ao serviço com Hidrogênio, onde outros materiais não poderiam ser empregados.

A resistência à oxidação e propriedades mecânicas a altas temperaturas (até 510°C - conforme N76, Petrobras, Rev.E) destes aços dependem da quantidade de cromo e molibdênio que possuem. O cromo contribui para resistência à oxidação a quente, enquanto o molibdênio para melhorar resistência a alta temperatura.

Resistência à oxidação, resistência à alta temperatura, e resistência à corrosão sulfídrica aumentam à medida que o teor de cromo e/ou molibdênio aumentam. O percentual de molibdênio, para aços desta categoria, varia de 0,45 até 1,1%.

Os aços Cr-Mo são endurecíveis ao ar, sofrendo transformações metalúrgicas a altas e baixas temperaturas, comuns em aços baixa liga endurecíveis ao ar. As propriedades mecânicas dependem destas transformações e daí surge a necessidade de procedimentos de soldagem corretos.

Quando estes aços são resfriados rapidamente a partir de sua temperatura sub-crítica, ocorre uma elevação na sua dureza e resistência mecânica, com redução na sua ductilidade. A ausência de grandes quantidades de carbonetos se traduz em maior ductilidade em qualquer nível de resistência mecânica quando comparados aos aços com elevado teor de carbono. Devido à sua elevada temperabilidade, estes aços podem necessitar tratamento térmico para recuperar sua tenacidade, ductilidade e outras propriedades mecânicas importantes após um resfriamento rápido, como no processo de soldagem.

Para otimizar as propriedades das soldas em aços modernos, onde o tratamento térmico pós-soldagem não é realizado ou ainda impraticável, técnicas especiais de soldagem são utilizadas. A principal técnica, entre outras, é a de soldagem por passes de revenido (Temper Bead Welding). A ASME sec. IX, 2004, define a técnica de passe de revenido como:

“Um cordão de solda em um local específico no interior ou superfície de uma solda, com o propósito de afetar as propriedades metalúrgicas da ZAC (Zona Afetada pelo Calor) ou do metal de solda depositado”.

A soldagem por passes de revenido foi desenvolvida para reduzir a necessidade de alívio de tensões pós-soldagem e dureza na ZAC “as welded”. Esta técnica de soldagem não pode ser usada como substituta de tratamento térmico em circunstâncias onde as condições de operação necessitem uma redução substancial nos níveis de tensão.

Entretanto, a técnica de soldagem por passe de revenido foi desenvolvida para simular o efeito do tratamento térmico de revenido. As propriedades mecânicas da ZAC podem ser melhoradas semelhantemente àquelas que foram tratadas termicamente. A técnica foi especificamente desenvolvida para refinar os grão com granulação grosseira na ZAC bem como o metal adjacente a esta, pela justaposição de cordões de solda e controle da energia de soldagem. Assim, objetiva-se melhorar a tenacidade à fratura bem como reduzir a dureza na ZAC.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Soldagem a arco com eletrodo revestido (ER / SMAW)<sup>1</sup>

Esse processo é o grande responsável pela expansão da soldagem e foi o primeiro a obter aceitação como método produtivo e de alta qualidade. O consumível (eletrodo revestido, neste caso), consiste em um arame (“alma”) revestido com uma massa formada por diversos minérios e compostos químicos. Entre outras funções, esse revestimento permite que o arco se mantenha; protege o metal fundido da atmosfera; estabelece as características operacionais do consumível e provê várias propriedades mecânico/metalúrgicas do metal de solda. Sendo um processo manual, o soldador inicia a operação estabelecendo um curto-circuito entre a superfície da peça e o eletrodo, afastando-o logo em seguida e formando, assim, o arco e a poça de fusão. O processo pode ser utilizado em praticamente todas as ligas ferrosas e muitas não-ferrosas, sendo inconveniente para metais altamente reativos, ou de muito baixo ponto de fusão.

### 2.2 Soldagem a arco com proteção por gás e eletrodo não consumível (TIG / GTAW)<sup>1</sup>

Esse processo geralmente se destina à realização de soldas sobre peças de pequena espessura. Entretanto, quando a qualidade for um quesito essencial, o mesmo também é empregado sobre peças espessas. O arco elétrico é formado entre um eletrodo não consumível (Tungstênio, ou outros compostos com esse elemento) sendo o mesmo e a poça de fusão protegidos por gás inerte, o qual flui num bocal envolvendo o eletrodo. Portanto, o arco atua somente como fonte de calor, sendo possível a adição de metal manualmente (vareta), ou automaticamente (arame fino). No Brasil, esse processo continua sendo mais conhecido por TIG (“Tungsten Inert Gás”). A tabela 1 mostra a distribuição de calor, de acordo com o processo e polaridade utilizada.

**Tabela 2.1: Distribuição Aproximada de Calor na Soldagem**

	CCEP	CCEN	CA
SMAW	30% Peça 70% Eletrodo	70% Peça 30% Eletrodo	intermediário
GTAW	30% Peça 70% Eletrodo	70% Peça 30% Eletrodo	intermediário

### 2.3 Tratamento térmico de alívio de tensões

Tensões residuais internas podem se desenvolver em peças metálicas devido ao resfriamento não uniforme de uma peça que foi submetida a uma temperatura elevada, tal como processo de soldagem. Distorção e empenamento podem ocorrer se essas tensões residuais não forem removidas, tensões essas que podem ser reduzidas ou até eliminadas através de um tratamento térmico de alívio de tensões, onde a peça é aquecida até a temperatura recomendada, mantida a essa temperatura por um tempo suficiente para que seja uniforme em toda peça, e finalmente resfriada até a temperatura ambiente.<sup>2</sup>

Um alto nível de tensões residuais pode ocorrer no processo de soldagem, devido à restrição do metal base adjacente durante a solidificação da poça de fusão. As tensões podem ser tão altas quanto à tensão de escoamento do material. Quando combinadas com tensões de um carregamento normal, os valores podem exceder a tensão de projeto. A remoção das tensões residuais ocorre devido ao fato de que a energia térmica recebida pelo metal permite o escorregamento e acomodação dos contornos de grão, além da remoção de defeitos metalúrgicos como discordâncias, vazios intersticiais e planos de escorregamento. O aspecto mais importante do tratamento térmico após a soldagem é a prevenção da fratura frágil. O tratamento térmico reduz a dureza das zonas endurecidas e facilita a usinagem.<sup>2,3,6</sup>

## 2.4 Técnica Passe de Revenido

Na soldagem por passe de revenido, o aporte de calor, preaquecimento e seqüência de deposição dos cordões de solda são cuidadosamente controlados para:<sup>4</sup>

- limitar energia de soldagem e preaquecimento, para evitar crescimento excessivo dos grãos na região da ZAC de “Grãos Grosseiros”;
- Aumentar a energia de soldagem de uma camada para a outra, para refinar os grãos da região de grãos grosseiros da camada anterior;
- Sobrepor a deposição dos cordões de solda corretamente, para que os efeitos de refino de grão sejam satisfatórios.

A técnica de soldagem mais utilizada no momento, e a que foi utilizada neste trabalho é a “Half Bead”, ou seja, consiste em remover mecanicamente aproximadamente 50% do material depositado em cada camada. A figura 2.1 mostra a relação entre o diagrama Fe-C e as regiões da ZAC.

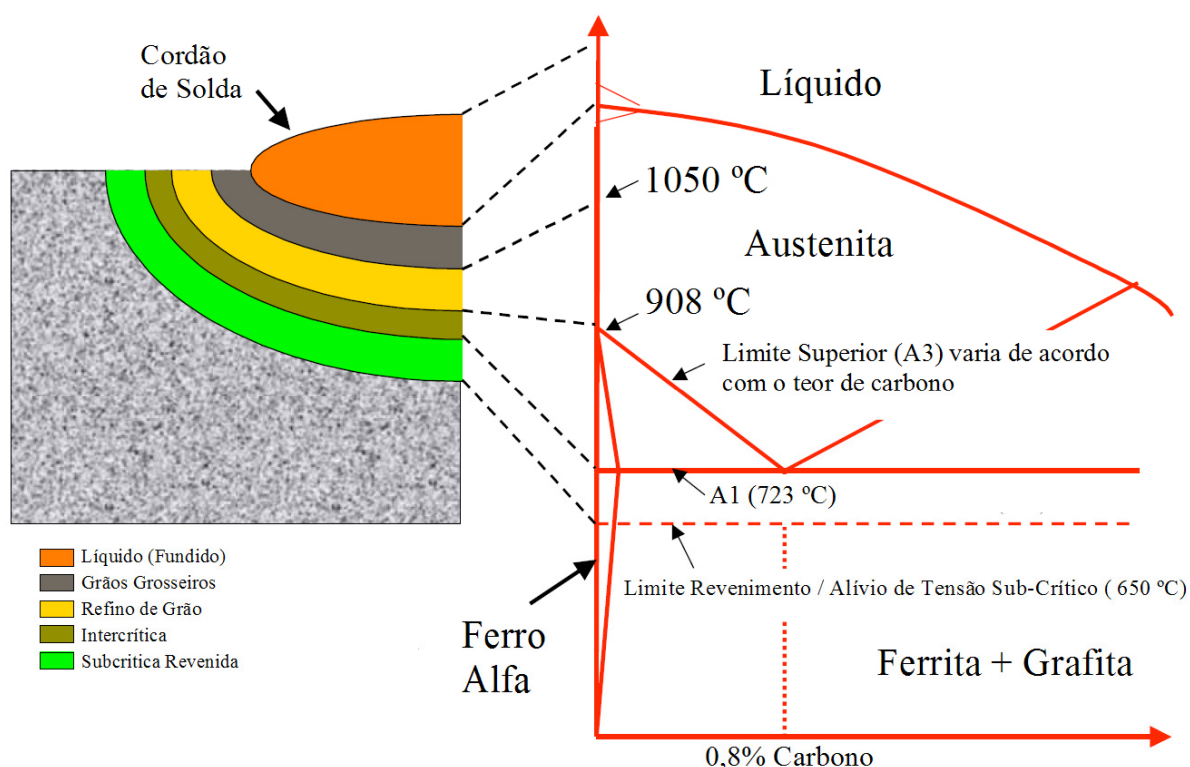
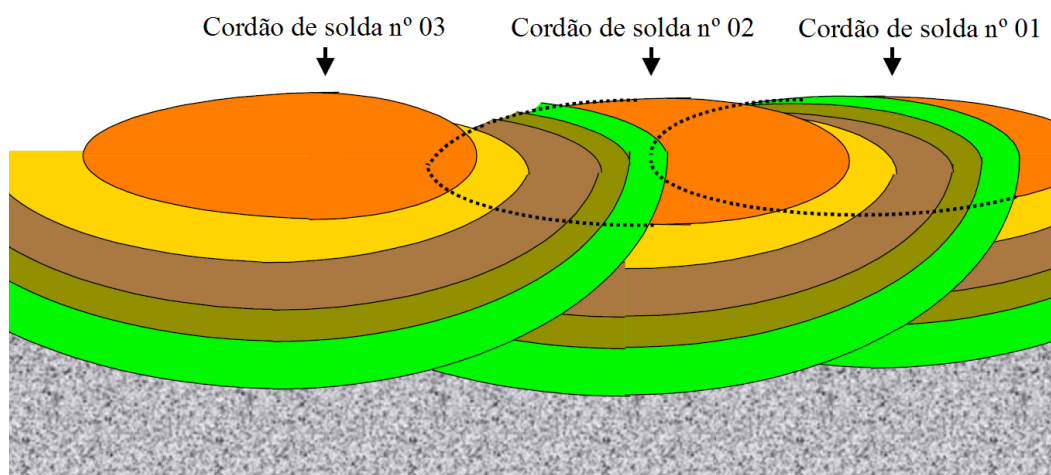


Figura 2.1: Regiões da ZAC

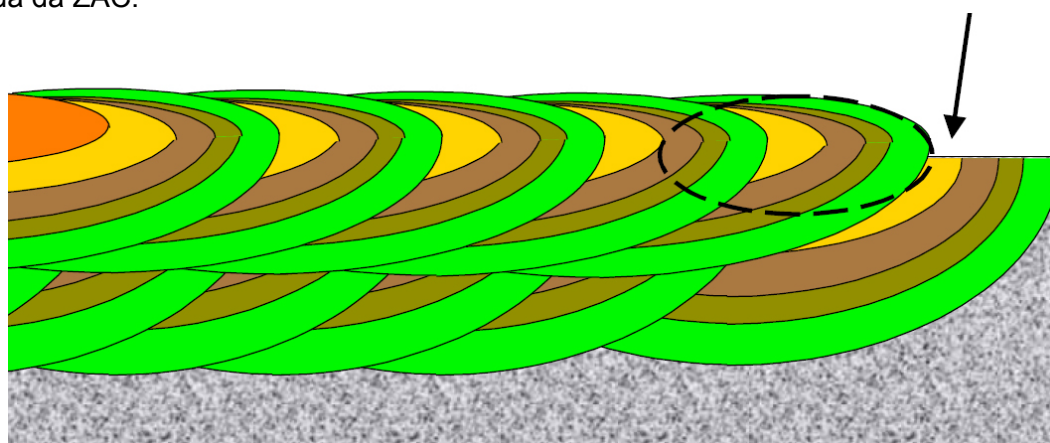
Na figura 2.2, nota-se o efeito da sobreposição de cordões de solda. As linhas tracejadas mostram as localizações prévias dos cordões de solda.

Nota-se que o cordão de solda nº02 sobrepõe-se ao cordão nº01 aproximadamente em 50%, e a ZAC remanescente do primeiro cordão é muito menor que a do segundo cordão. O cordão da esquerda é sobreposto em 10% em relação ao cordão nº02, resultando num efeito muito pequeno sobre a ZAC do cordão do meio.



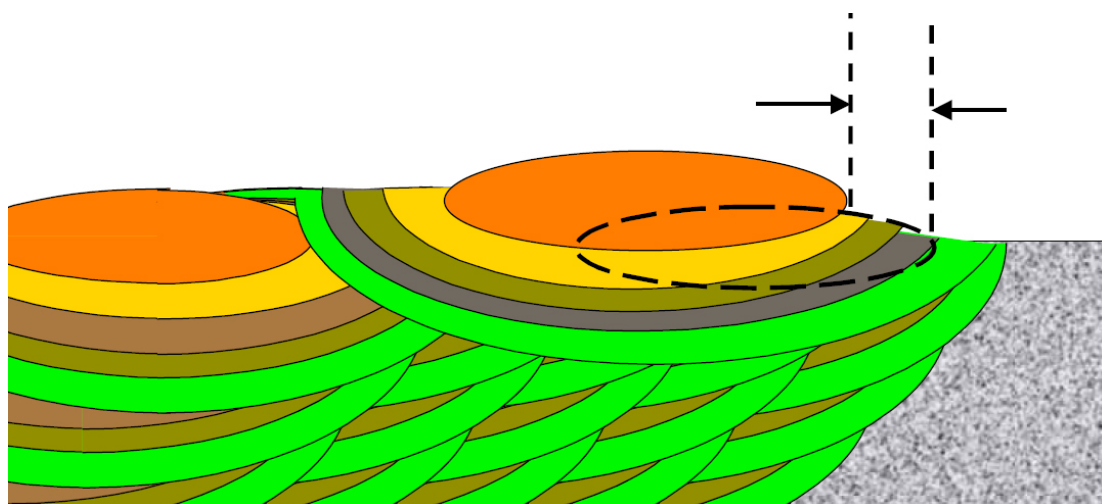
**Figura 2.2: Efeito da deposição de um cordão de solda ao lado de outro**

Na figura 2.3 pode-se observar o efeito na ZAC da primeira camada ao se depositar uma segunda camada de solda. Note que na região indicada pela seta pode-se ter uma região não revenida da ZAC.



**Figura 2.3: seta indica região não revenida da ZAC**

Para revenir a região indicada pela figura 2.3, deposita-se um cordão de solda, acima do reforço da solda (mesmo que excessivo, a ser retirado posteriormente por esmerilhamento). A distância desse passe deve ser pequena a ponto de revenir a região de interesse, mas não tão pequena a ponto de criar uma nova região não revenida. (o objetivo é fazer com que as ZAC's "casem"). A técnica correta é mostrada a seguir, na figura 2.4.



**Figura 2.4: deposição de reforço "excessivo" visa revenir toda região da ZAC**

### 3. METODOLOGIA

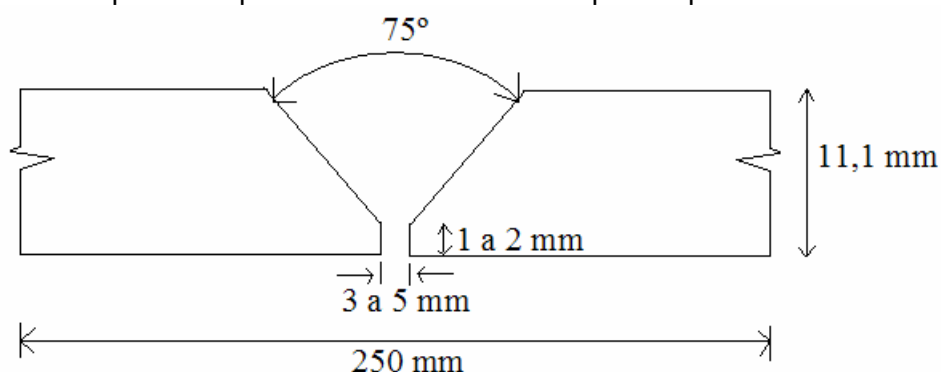
A composição do Metal Base, segundo ASME seção II, é de até 0,15%C, Cr entre 1 e 1,5% e Mo de 0,44 a 0,65%.

Foram confeccionadas 04 (quatro) juntas soldadas, para obtenção dos corpos de prova. Cada junta foi soldada de topo, com dimensões e especificações conforme tabela 3.1:

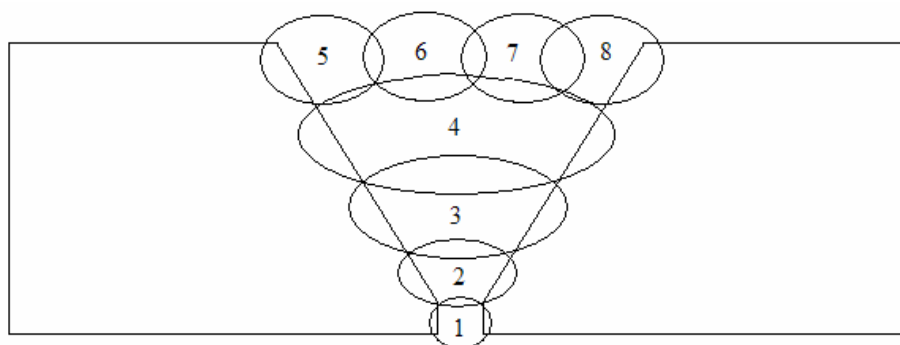
**Tabela 3.1: Descrição das Juntas Soldadas**

N ° da Junta	Preaquecimento	Pós-Aquecimento	Temper-Bead	Trat.Térmico de Alívio Tensões	Energia de Soldagem (KJ/mm)
J01	SIM	SIM	NÃO	NÃO	0,96
J02	SIM	SIM	NÃO	SIM	0,96
J03	SIM	SIM	SIM	NÃO	1,50
J04	SIM	SIM	SIM	NÃO	1,68

Todas juntas foram soldadas com preaquecimento de 200°C, e a temperatura de interpasse não ultrapassou 300°C. A figura 3.1 mostra o croqui das juntas soldadas, e suas respectivas dimensões. Conforme mostrado na figura 3.2, o passe de raiz e reforço foi feito pelo processo GTAW (TIG) e enchimento e acabamento por SMAW (ER). Optou-se pelo processo TIG na raiz e reforço por garantir maior qualidade no processo e evitar que possíveis descontinuidades venham a afetar os resultados dos ensaios, principalmente o de dobramento.<sup>5</sup> Vide apêndice I para as dimensões dos corpos de prova utilizados neste estudo.



**Figura 3.1: Croqui da Junta a ser soldada**



**Figura 3.2: Croqui das Juntas J01 e J02**

1. Raiz (TIG)
2. Reforço da Raiz (TIG)
3. Enchimento (ER)
4. Enchimento (ER)
5. Acabamento (ER)
6. Acabamento (ER)
7. Acabamento (ER)
8. Acabamento (ER)

A fórmula utilizada para calcular a Energia de soldagem (E [KJ/cm]) foi:

$$E = \frac{UxI}{V} \times 0,06 = \frac{[V][A]}{\frac{cm}{min}} = \frac{W}{\frac{10mm}{60s}} = 6J / mm = 6 \times 10^{-3} \frac{KJ}{mm} \quad (3.1)$$

onde: U = Tensão do Arco [V]; I = Corrente [A]; V = velocidade [cm/min]. Para se obter o valor em [KJ/mm] divide-se o valor obtido pela eq. 3.1 por 10.

Não foi realizado um estudo sobre as incertezas das medições neste experimento por estes valores se tratarem de valores médios, sempre oscilantes, não ficando estacionários.

A tabela 3.2 mostra os parâmetros utilizados na soldagem das juntas J01 e J02.

Tabela 3.2: dados referentes à soldagem das juntas J01 e J02

PASS E	CAMADA	ELETRODO			CORR./ POLAR.	I [A]	U [V]	V media [cm/min]	HI [KJ/mm]	PREAQ.	INTERP
		CLASS.	MARCA	Ø [mm]							
01	1	ER-80S-B2	Böhler	2,4	CCEN	105	8,5	3,73	1,435	200°C	300°C
02	2	ER-80S-B2	Böhler	2,4	CCEN	130	8,5	5,12	1,295	200°C	300°C
03	3	E 8018-B2	Böhler	2,5	CCEP	90	16	8,70	0,991	200°C	300°C
04	4	E 8018-B2	Böhler	2,5	CCEP	100	17	7,65	1,333	200°C	300°C
05	5	E 8018-B2	Böhler	2,5	CCEP	100	17	15,62	0,653	200°C	300°C
06	5	E 8018-B2	Böhler	2,5	CCEP	100	17	15,55	0,656	200°C	300°C
07	5	E 8018-B2	Böhler	2,5	CCEP	100	17	15,59	0,654	200°C	300°C
08	5	E 8018-B2	Böhler	2,5	CCEP	100	17	15,61	0,653	200°C	300°C
Energia de Soldagem Média									0,960		

A junta J02 passou por Tratamento Térmico de alívio de Tensões, seguindo estes parâmetros:

- Controle de temperatura a partir de 300°C;
- Taxa de aquecimento de 150 °C/h;
- Temperatura de patamar 720 °C ± 5 °C, durante 02h;
- Taxa de resfriamento de 150 °C/h, até 300 °C, após resfriamento natural, envolto em manta térmica;

Estes valores para tratamento térmico foram retirados da norma ASME, conforme pode ser verificado na tabela 3.3.

Base Metal P-No. or S-No. [Note (1)]	Weld Metal Analysis A-Number [Note (2)]	Base Metal Group	Nominal Wall Thickness		Specified Min. Tensile Strength, Base Metal		Metal Temperature Range		Holding Time		Brinell Hardness, [Note (4)] Max.	
			mm	in.	MPa	ksi	°C	°F	Nominal Wall [Note (3)]	Min. Time, hr		
									min/mm	hr/in.		
1	1	Carbon steel	≤ 19	≤ ¾	All	All	None	None	...	...	...	...
			> 19	> ¾	All	All	593-649	1100-1200	2.4	1	1	...
3	2, 11	Alloy steels, Cr ≤ ½%	≤ 19	≤ ¾	≤ 490	≤ 71	None	None	...	...	...	...
			> 19	> ¾	All	All	593-718	1100-1325	2.4	1	1	225
			All	All	> 490	> 71	593-718	1100-1325	2.4	1	1	225
4 <sup>10</sup>	3	Alloy steels, ½% < Cr ≤ 2%	≤ 13	≤ ½	≤ 490	≤ 71	None	None	...	...	...	...
			> 13	> ½	All	All	704-746	1300-1375	2.4	1	2	225
			All	All	> 490	> 71	704-746	1300-1375	2.4	1	2	225

Tabela 3.3: requisitos para tratamento térmico, conforme ASME B31.3, 2002

Conforme descrito anteriormente, a técnica utilizada neste trabalho é a do "Half Bead" (meio cordão de solda – onde aproximadamente 50% do material depositado é removido mecanicamente após a realização de cada passe).

Na figura 3.3, observa-se o croqui das juntas J03 e J04. As regiões hachuradas correspondem à região de material depositado que será removido. A parte indicada pela letra "A" consiste em uma soldagem de amanteigamento (realizada somente na J03 e J04). A variante, aqui, consiste em:

- Uso de maior energia de soldagem, visando baixar dureza e revenir passes anteriores;
- Remoção de 50% do material depositado;
- Uso de eletrodos de maior diâmetro (na junta J04), nas camadas 4 e 5.

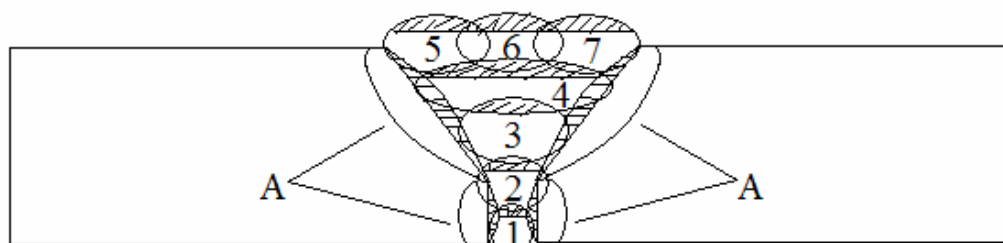


Figura 3.3: Croqui das Juntas J03 e J04

As tabelas 3.4 e 3.5 mostra os parâmetros utilizados na soldagem das juntas J03 e J04.

Tabela 3.4: dados referente à soldagem da junta J03

PASS E	CAMADA	ELETRODO			CORR./ POLAR.	I [A]	U [V]	V [cm/min]	HI [KJ/mm]	PREAQ.	INTERP
		CLASS.	MARCA	Ø [mm]							
<b>A</b>	<b>A</b>	ER-80S-B2	Böhler	<b>2,4</b>	CCEN	125	10	6,35	1,181	200°C	300°C
<b>01</b>	<b>1</b>	ER-80S-B2	Böhler	<b>2,4</b>	CCEN	135	10	5,96	1,359	200°C	300°C
<b>02</b>	<b>2</b>	ER-80S-B2	Böhler	<b>2,4</b>	CCEN	150	9,5	5,61	1,524	200°C	300°C
<b>03</b>	<b>3</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>2,5</b>	CCEP	125	20	7,87	1,906	200°C	300°C
<b>04</b>	<b>4</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>2,5</b>	CCEP	125	20	8,79	1,706	200°C	300°C
<b>05</b>	<b>5</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>2,5</b>	CCEP	135	23	12,92	1,442	200°C	300°C
<b>06</b>	<b>5</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>2,5</b>	CCEP	135	23	12,90	1,444	200°C	300°C
<b>07</b>	<b>5</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>2,5</b>	CCEP	135	23	12,88	1,446	200°C	300°C
Energia de Soldagem Média									1,501		

Tabela 3.5: dados referente à soldagem da junta J04

PASS E	CAMADA	ELETRODO			CORR./ POLAR.	I [A]	U [V]	V [cm/min]	HI [KJ/mm]	PREAQ.	INTERP
		CLASS.	MARCA	Ø [mm]							
<b>A</b>	<b>A</b>	ER-80S-B2	Böhler	<b>2,4</b>	CCEN	125	10	6,55	1,145	200°C	300°C
<b>01</b>	<b>1</b>	ER-80S-B2	Böhler	<b>2,4</b>	CCEN	135	10	6,05	1,339	200°C	300°C
<b>02</b>	<b>2</b>	ER-80S-B2	Böhler	<b>2,4</b>	CCEN	150	9,5	5,55	1,540	200°C	300°C
<b>03</b>	<b>3</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>2,5</b>	CCEP	125	20	8,75	1,714	200°C	300°C
<b>04</b>	<b>4</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>3,25</b>	CCEP	155	19,5	8,82	2,056	200°C	300°C
<b>05</b>	<b>5</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>3,25</b>	CCEP	165	19,0	9,85	1,910	200°C	300°C
<b>06</b>	<b>5</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>3,25</b>	CCEP	165	19,0	10,06	1,870	200°C	300°C
<b>07</b>	<b>5</b>	E 8018-B2	Böhler	<b>3,25</b>	CCEP	165	19,0	10,01	1,880	200°C	300°C
Energia de Soldagem Média									1,682		

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaio de Tração

Conforme pode ser observado na figura 4.1, todos os Corpos de Prova de tração romperam no metal base, fora da junta soldada e fora da ZAC. A temperatura na realização do ensaio era de 22°C, e a velocidade utilizada foi de 1,5 mm/min. A tabela 4.1 mostra os respectivos valores obtidos de tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) e tensão de ruptura ( $\sigma_{rup}$ ). Pela norma ASME, o material grupo P4 deve obter tensão de ruptura mínima de 415 Mpa.

Tabela 4.1: Resultados obtidos no Ensaio de Tração

JUNTA SOLDADA	$\sigma_{esc}$ [ MPa]	$\sigma_{rup}$ [ MPa]
J01	349,5	458,4
J02	304,2	424,2
J03	357,6	464,1
J04	327,4	465,7

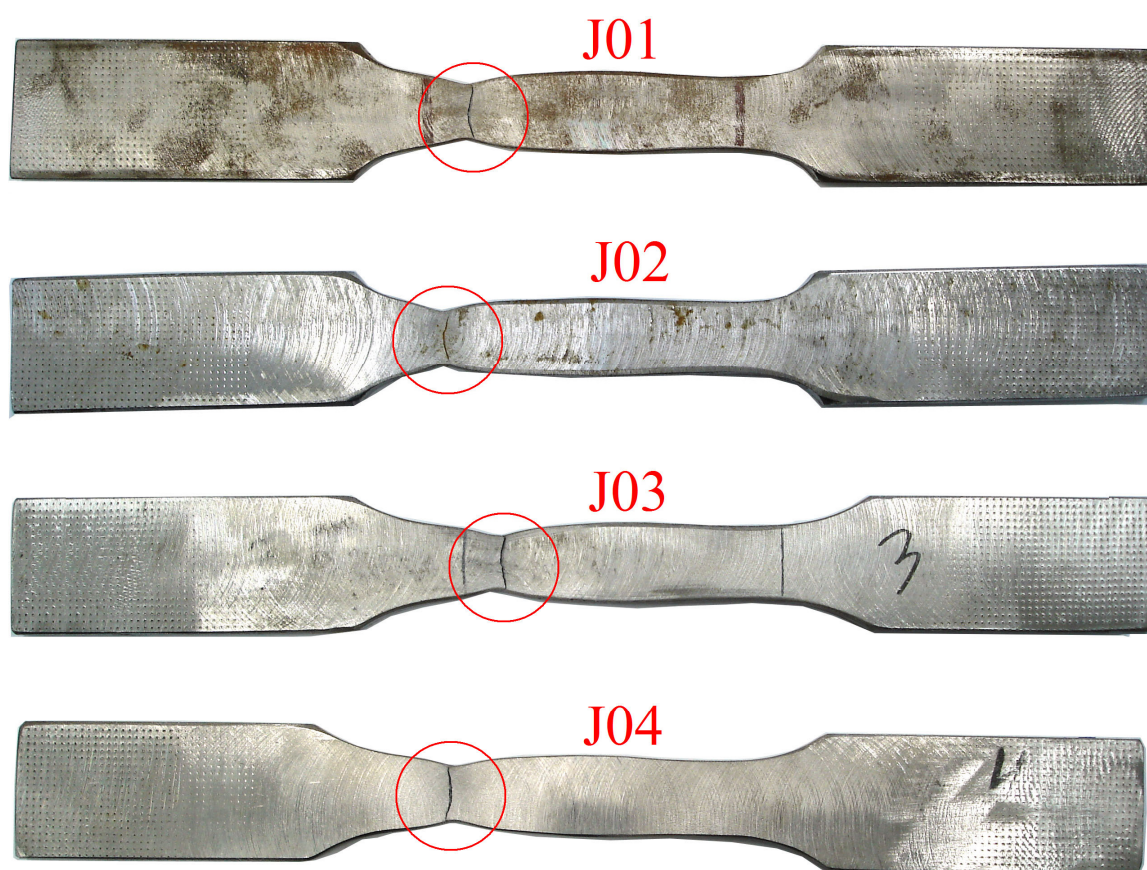


Figura 4.1: região de rompimento nos Ensaio de Tração

### 4.2 Fotos Macro, Avaliação da extensão da ZAC

Como as juntas J01 e J02 foram soldadas com os mesmos parâmetros (na realidade partiram da mesma junta soldada, apenas a J02 foi tratada termicamente), pode-se visualizar que ambas ZAC's tendem a ter tamanho semelhante. A figura 4.2 permite visualizar a ZAC criada em cada junta. O ataque utilizado foi Nital a 15%, por aproximadamente 4 minutos.



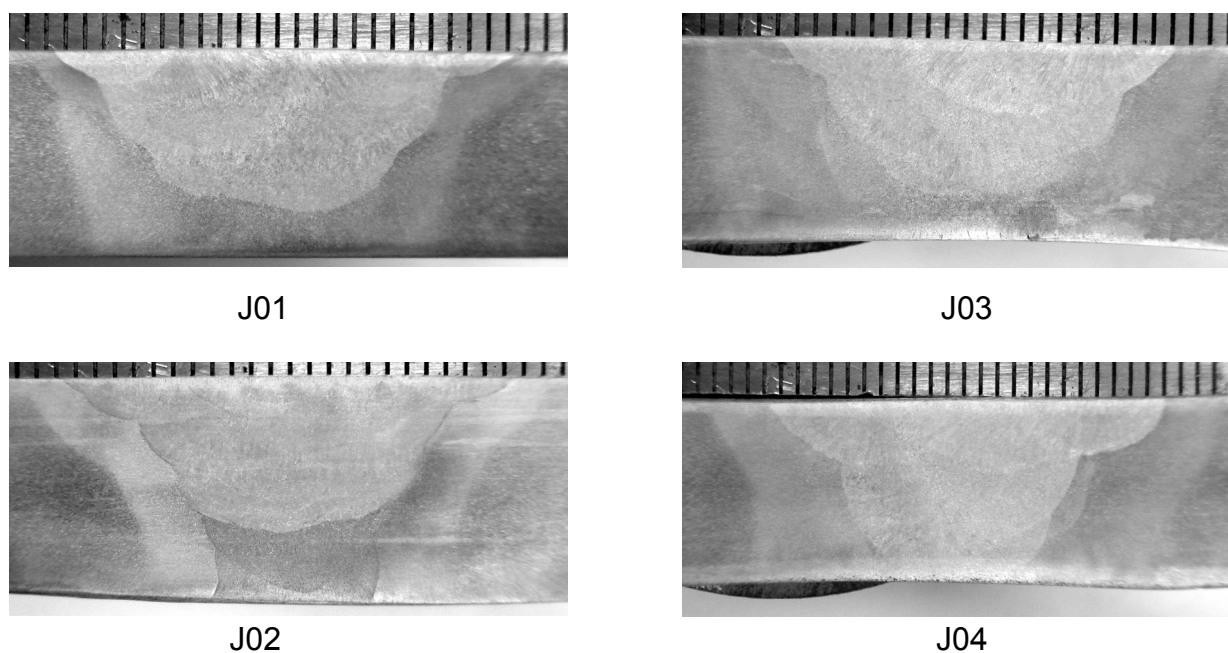


Figura 4.2: Macros das Juntas Soldadas

Nas juntas 03 e 04 percebe-se um aumento gradual da ZAC, devido à maior energia de soldagem utilizada.<sup>3,7</sup>

#### 4.3 Dureza

Com o objetivo de se obter valores para saber a eficiência da técnica de soldagem utilizada e do tratamento térmico, fez-se medições de dureza conforme figura 4.3. O durômetro usado foi da marca VEB, modelo WPM ano 68. A escala de dureza utilizada, HRB, possui carga de 100 Kgf e esfera de aço de 1/16" de diâmetro.<sup>3</sup>

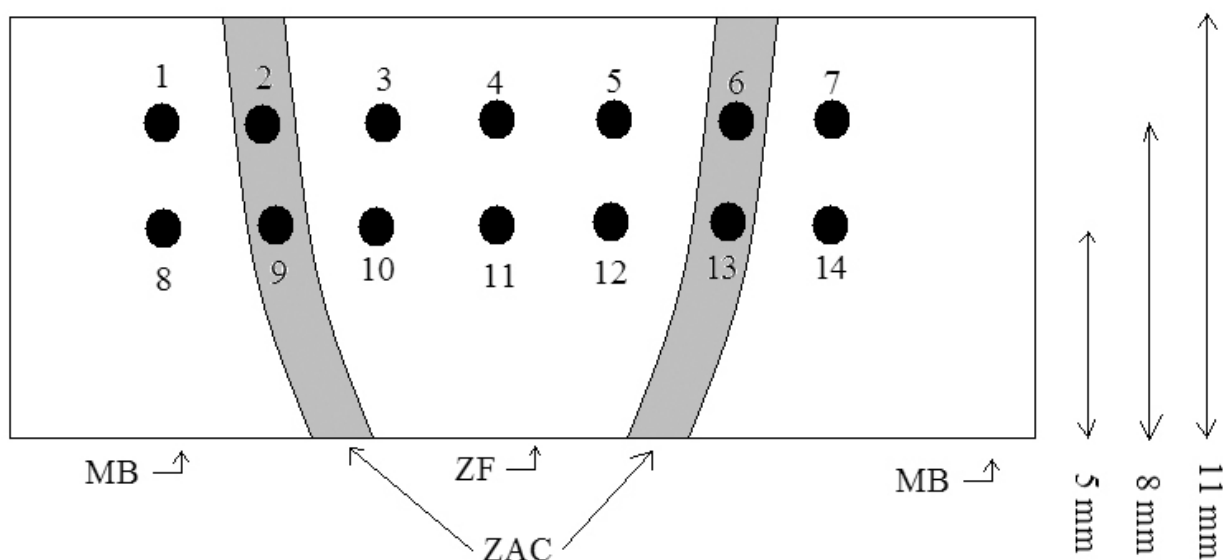


Figura 4.3: Perfil de Medição de Dureza utilizado em todas juntas soldadas

Todas medições seguiram o croqui acima, onde: MB – Metal Base, ZF – Zona Fundida, ZAC – Zona Afetada pelo Calor. Os pontos 1 até 7 compreendem a linha de medição 1, enquanto os pontos 8 a 14 compreendem a linha de medição 2. A linha 1 encontra-se a 3 mm da superfície enquanto a linha 2 esta a 6 mm da mesma.

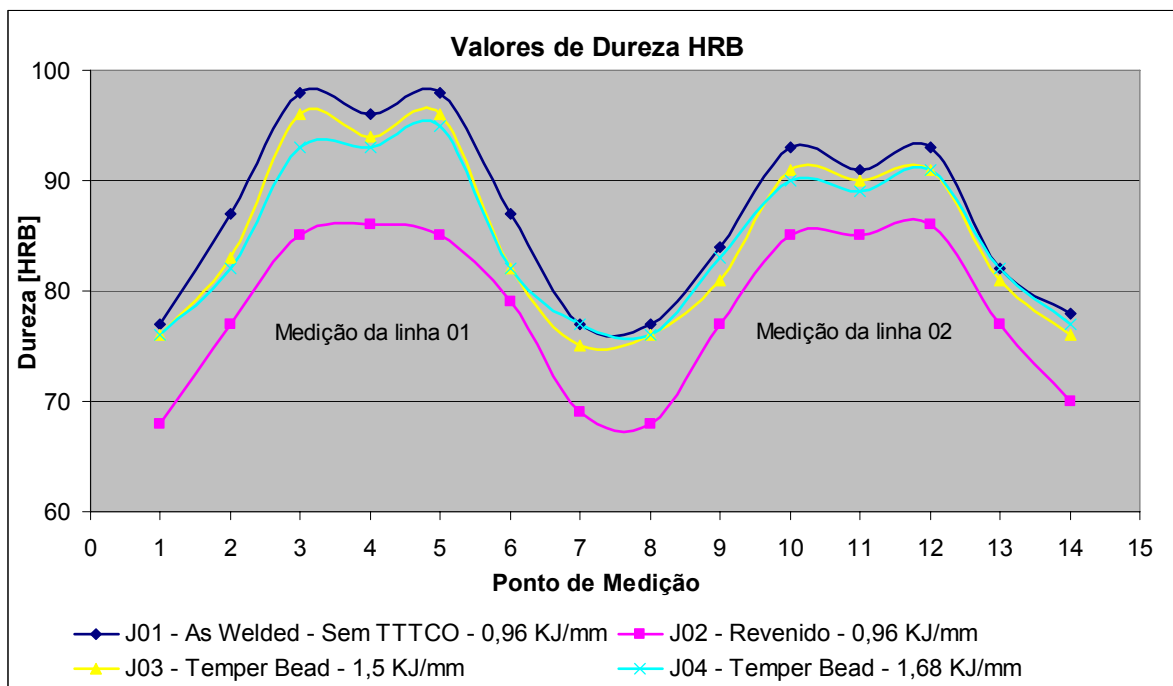


Gráfico 4.1: Durezas obtidas nas juntas soldadas

Pode-se observar que a junta J01, sem tratamento térmico, foi a que obteve maior dureza, tanto na linha 01 quanto linha 02, ficando o valor máximo em 98 HRB, que corresponde aproximadamente a 228 HB, valor este acima do permitido pela norma ASME (225 HB). Cabe também ressaltar que mesmo para a junta J01, a medição da linha 02 revelou valores mais baixos de dureza, comprovando que passes subsequentes de soldagem ajudam a baixar a dureza das camadas anteriores.<sup>7</sup>

Na Junta J02, constatou-se que a dureza variou pouco entre a linha 01 e linha 02, evidenciando que o tratamento térmico uniformizou as durezas em cada região (ZF, ZAC e MB).

#### 4.4 Micro Dureza e Metalografia

Utilizou-se um microdurômetro Shimadzu, Tipo M 92080, com carga de 100g e tempo para impressão de 15s por ponto. A figura 4.4 mostra a imagem típica obtida, sendo que o valor da dureza é o da diagonal da pirâmide, sendo depois corrigido por uma tabela conforme carga utilizada (conforme manual do fabricante). Todos os dados foram convertidos em HV, para comparação dos valores. Como os resultados podem variar muito dependendo da fase e região específica sendo medida (matriz ferrítica ou grão), para cada ponto foram feitas 4 medidas, sendo três na matriz (preferencialmente) e uma medida no grão.

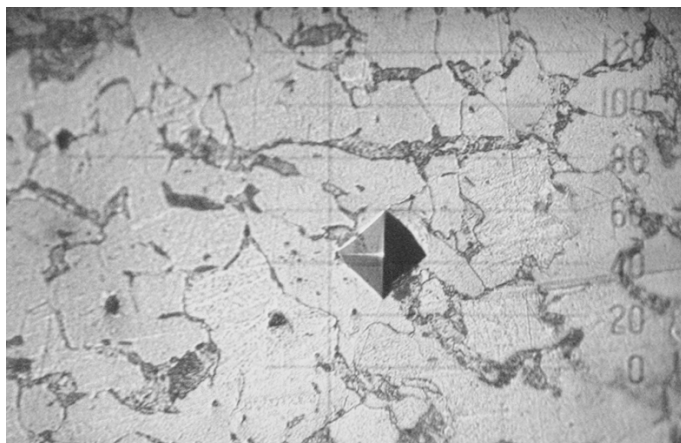


Figura 4.4: impressão típica de microdureza

Conforme pode-se ver nas figuras 4.5 e 4.6, foi levantado o perfil de dureza das juntas J01 e J02, confirmando os resultados obtidos no durômetro convencional, porém, com o microdurômetro pôde ser medida a dureza de cada cordão de solda, bem como região de grãos grosseiros da ZAC, região de refino de grão da ZAC e metal base. Todas medidas estão em HV.

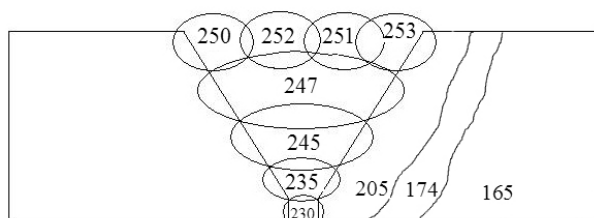


Figura 4.5: dureza média obtida na J01

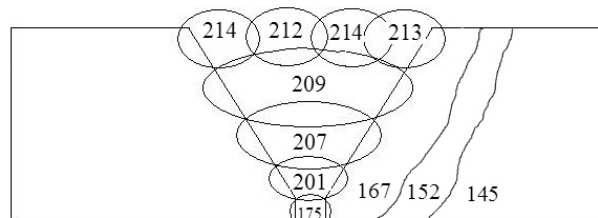


Figura 4.6: dureza média obtida na J02

As figuras 4.7 e 4.8 mostram as juntas J03 e J04 e suas respectivas durezas. Novamente, conforme esperado, o perfil de dureza aumentou no sentido da raiz para o acabamento da solda, confirmando que passes subseqüentes agem sob o passe inferior, e não só isso, quanto maior a energia de soldagem, menor a taxa de resfriamento (e maior o tempo deste), contribuindo para uma microestrutura de menor dureza. Conforme será mostrado no Capítulo 5, nitidamente o preaquecimento tem maior influência na dureza que a energia de soldagem.

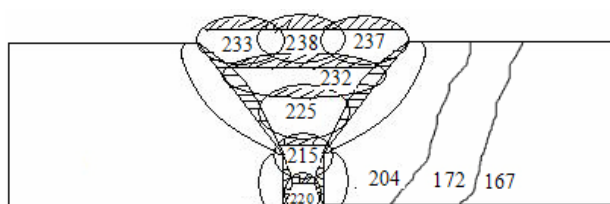


Figura 4.7: dureza média obtida na J03

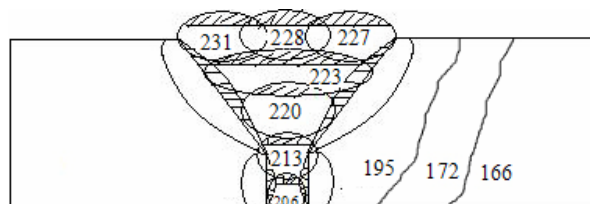


Figura 4.8: dureza média obtida na J04

A esferoidização de carbonetos próximo a uma junta soldada é um processo que inicia quando a solda está sendo executada, conforme figura 4.9. O grau de esferoidização da perlita depende de quanto tempo ela foi exposta à temperatura subcrítica. O ponto B indica a estrutura da zona aquecida acima do limite subcrítico, porém abaixo do limite crítico superior de temperatura durante a soldagem. O ponto S indica a estrutura que foi aquecida até o limite subcrítico durante a soldagem. A cementita contida na perlita foi esferoidizada. O ponto P indica a estrutura que permaneceu pelo menos 200°C abaixo da linha de temperatura subcrítica. Não ocorreu esferoidização e a estrutura é idêntica à do Metal Base. (Ferrita e Perlita).<sup>7</sup>

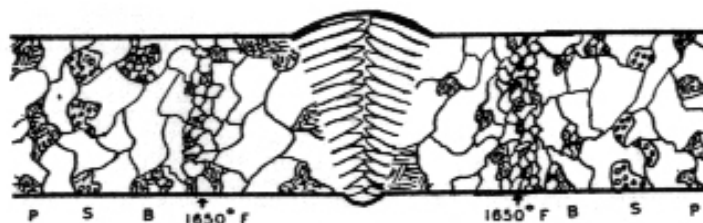


Figura 4.9: croqui demonstrando a região que a perlita tende a se esferoidizar no aço

A análise metalográfica realizada visa confirmar e fundamentar todos resultados obtidos até o momento. O ataque utilizado aqui foi Nital a 2%, por aproximadamente 45 segundos. As figuras a seguir (4.10 e 4.11, respectivamente) mostram o metal base das juntas J01 e J02.

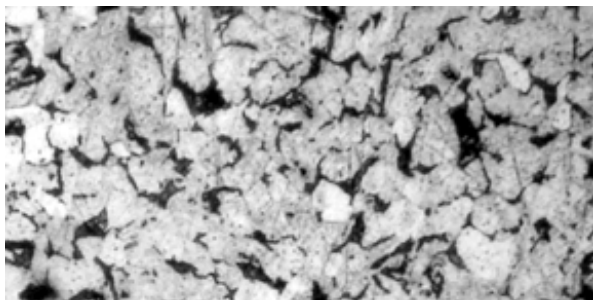


Figura 4.10: metalografia MB J01 (aumento 400X)

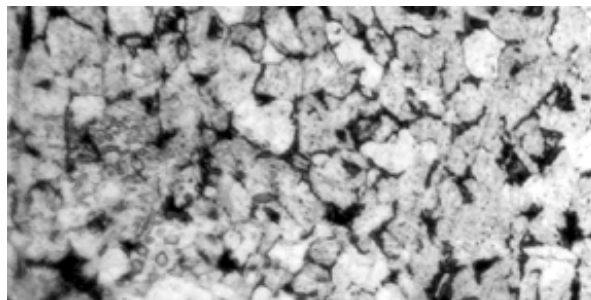
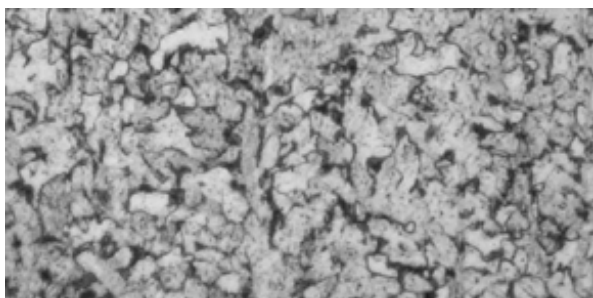


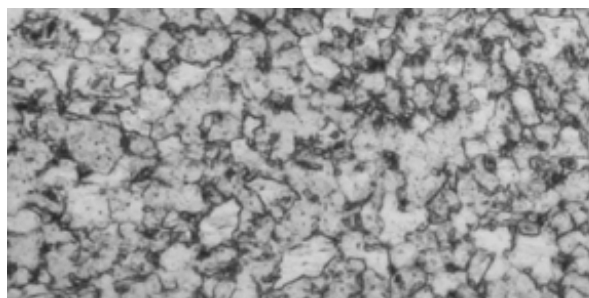
Figura 4.11: metalografia MB J02 (aumento 400X)

Pode-se observar que o tratamento térmico de alívio de tensões que foi executado na J02, teve efeitos poucos significativos na estrutura do metal base, não alterando significativamente o tamanho de grãos nem sua estrutura (ferrita e perlita). Os principais objetivos no tratamento térmico da J02 foram alcançados, dentre eles: recuperação, relaxação e revenido. A temperatura não foi alta o suficiente (e nem o tempo) para ocorrer a esferoidização (no metal base). Apesar da pouca mudança, houve redução na dureza da junta J02, às custas de menor tensão de escoamento e ruptura.

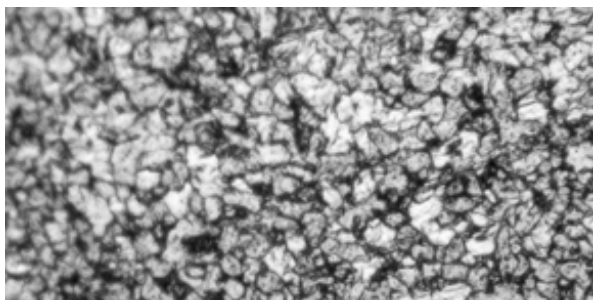
Na figura 4.12 pode-se observar que apesar da técnica de passe de revenido ter sido empregada (J03 e J04), o tamanho de grão permaneceu muito próximo.



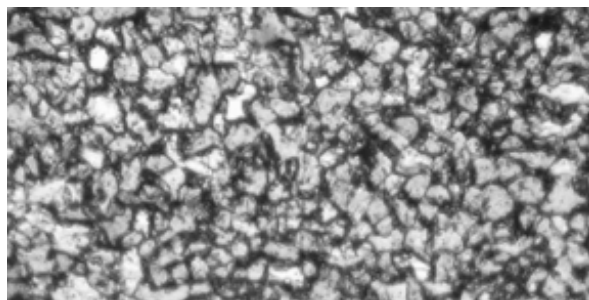
ZAC GF J01



ZAC GF J02



ZAC GF J03



ZAC GF J04

Figura 4.12: metalografias das ZAC's (região de refino de grão) das J01 à J04 (aumento 400X)

#### 4.5 Dobramento

O ensaio de dobramento consiste em submeter o corpo de prova a uma deformação lenta e constante, até que o ângulo obtido seja 180°, conforme figura 4.13. Pela norma ASME IX, caso surja uma trinca, esta não pode ter comprimento superior a 1/8" (3,25mm), independente do número de trincas que surjam. Conforme pode ser constatado pelas fotos, todas juntas foram aprovadas no ensaio de dobramento. No anexo III constam as especificações do cutelo e da máquina de ensaio. Foi realizado dobramento lateral.

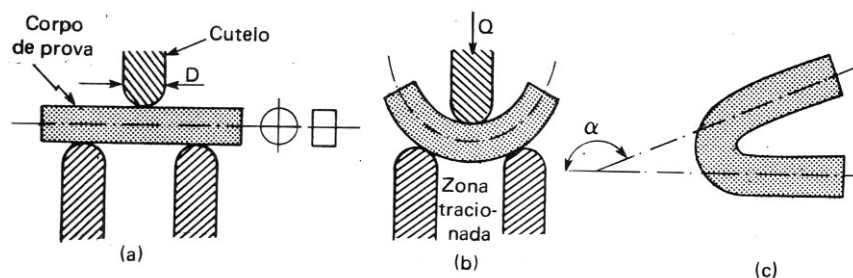
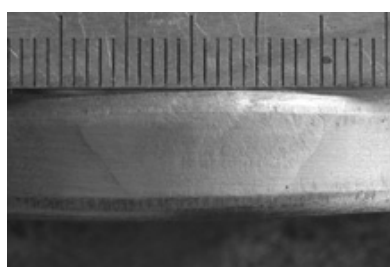


Figura 4.13: (a) posicionamento do cutelo, (b) execução do ensaio, (c) ângulo final de dobramento

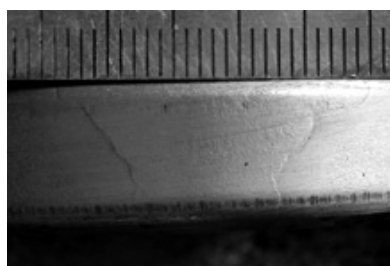
A foto 4.14 permite visualizar a região submetida ao ensaio (face convexa), e conforme pode ser visto, todas juntas foram aprovadas no ensaio de dobramento.



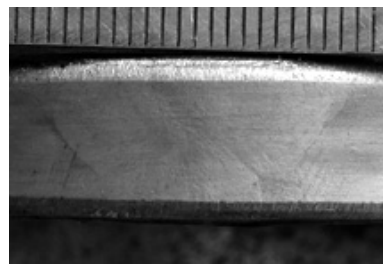
J01



J03



J02



J04

Foto 4.14: Ensaio de Dobramento das juntas J01 à J04

## 5. ESTIMATIVA DOS TEMPOS DE RESFRIAMENTO

Fez-se uma aproximação do tempo de resfriamento, entre 800 °C e 200°C, para um ponto no metal de solda, com a energia média de soldagem utilizada na J01, J02, J03 e J04.

O objetivo deste cálculo é sobrepor os tempos de resfriamento com o diagrama CCT (vide anexo I), podendo-se assim prever o tipo de microestrutura que será obtido e o percentual de cada fase. Através da equação 5.1 previu-se os tempos de resfriamento aproximados. Cabe salientar que diversas simplificações foram realizadas, e a fórmula empregada não se aplica para extração 2D do calor (passe raiz, com penetração completa), somente extração 3D (que corresponde a todos os passes, com exceção do primeiro). A energia de soldagem utilizada foi uma energia média, da junta soldada, e não individual de cada cordão de solda.<sup>8</sup>

$$\Delta T = \frac{E}{2\pi kt} \exp\left(-\frac{R^2}{4t\alpha}\right) \quad (5.1)$$

Equação da extração tri-dimensional do calor

$\Delta T = T - T_0$  onde T representa a temperatura do metal de solda e  $T_0$  o preaquecimento [°C]

E = Energia de Soldagem [J/m]

k = Condutividade Térmica [J/m.s.K]

$\alpha$  = Difusividade Térmica [m<sup>2</sup>/s]

$R^2 = Y_0^2 + Z_0^2$ , localização do ponto do metal de solda nos eixos Y e Z [m<sup>2</sup>]

t = tempo [s]

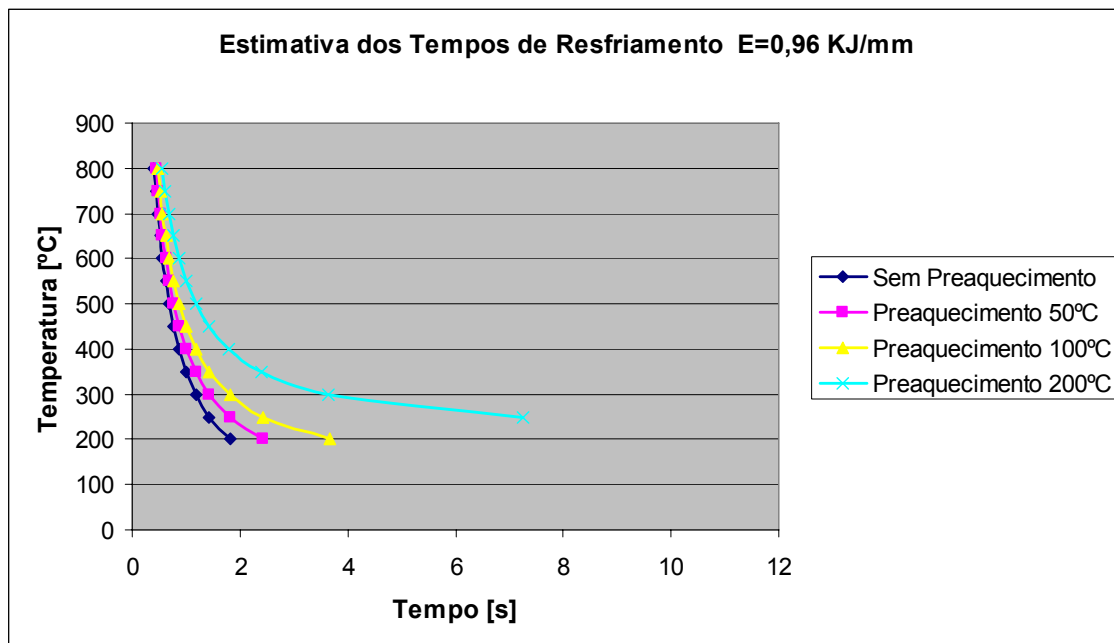
**Tabela 5.1: valores utilizados na equação 5.1**

unidade	T [°C]	T0 [°C]	E [J/m]	R <sup>2</sup> [m <sup>2</sup> ]	α [m <sup>2</sup> /s]	K [J/m.s.K]
Valor	800 ~ 200	0 ~ 200	9,6E5~ 1,5E6	(1E-3) <sup>2</sup> +(1E-3) <sup>2</sup>	9,1E-6	41

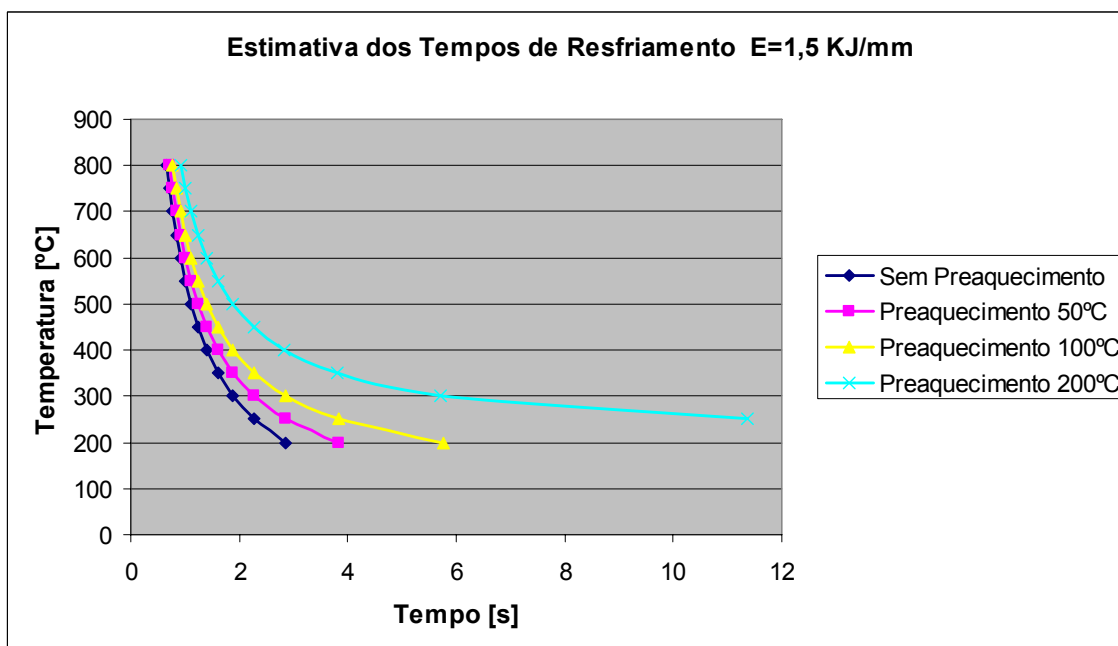
O valor utilizado para  $Y_0^2+Z_0^2$  foi de 1mm cada, ou seja, avaliou-se o metal de solda que se encontra a 1mm para a lateral do centro do cordão de solda e 1mm abaixo da superfície.

Utilizou-se o software IHT versão 2.0 para a solução da equação 6.1, de método numérico de iterações para obtenção de soluções. (a equação não permite solução analítica)

Conforme se pode observar na figura 5.1 e 5.2 os tempos de resfriamento para maior energia de soldagem são marginalmente maiores.



**Figura 5.1: Tempo de resfriamento para E=0,96 KJ/mm**



**Figura 5.2: Tempo de resfriamento para E=1,5 KJ/mm**

## 6. CONCLUSÕES

Sem dúvida pôde-se comprovar o efeito de revenido nos passes iniciais das juntas soldadas, no entanto a diminuição da dureza na Zona Fundida e ZAC se mostrou relativamente satisfatória. Para isso contribuiu a composição do material, onde Cr e Mo deslocaram as curvas TTT para a direita, aumentando a temperabilidade do material.

No processo de soldagem, onde se atinge a temperatura de fusão do metal base e consumível, os tempos de resfriamento são sempre baixos. Para aços baixo C, este tempo é suficiente para se obter uma microestrutura com baixas proporções ou até ausência de martensita, no entanto para aços baixa-liga (especialmente Cr-Mo), este tempo se torna insuficiente, fazendo com que durante o resfriamento origine fases de dureza elevada.

A execução da técnica de passe de revenido também se mostrou de elevada complexidade, onde o controle da energia de soldagem (para mantê-la no nível desejado) é de difícil execução. No processo TIG, como há apenas o arco aberto sem dependência da deposição de material, há o controle total sobre velocidade de execução do cordão de solda. Já com o emprego de Eletrodo Revestido, com o uso de maior corrente há uma tendência do soldador aumentar a velocidade de soldagem, para evitar deposição excessiva de material em um mesmo local, algo que necessita ser bem treinado para evitar a perda de corpos de prova. Como pode ser observado no apêndice II, à medida que a energia de soldagem aumenta, pior o acabamento do cordão de solda.

A retirada parcial de material dos cordões de solda, também se mostrou complexa, pois este processo é feito utilizando esmerilhadeira manual, e caso seja feita de modo incorreto (retirada excessiva ou insuficiente de material) pode comprometer os resultados da técnica de soldagem.

A técnica de soldagem por passes de revenido se mostra válida onde é impraticável a realização de tratamento térmico pós-soldagem, mas deve ser corretamente executada sob risco da ocorrência de zonas localizadas de dureza elevada e baixa utilidade, regiões estas propensas ao rompimento.

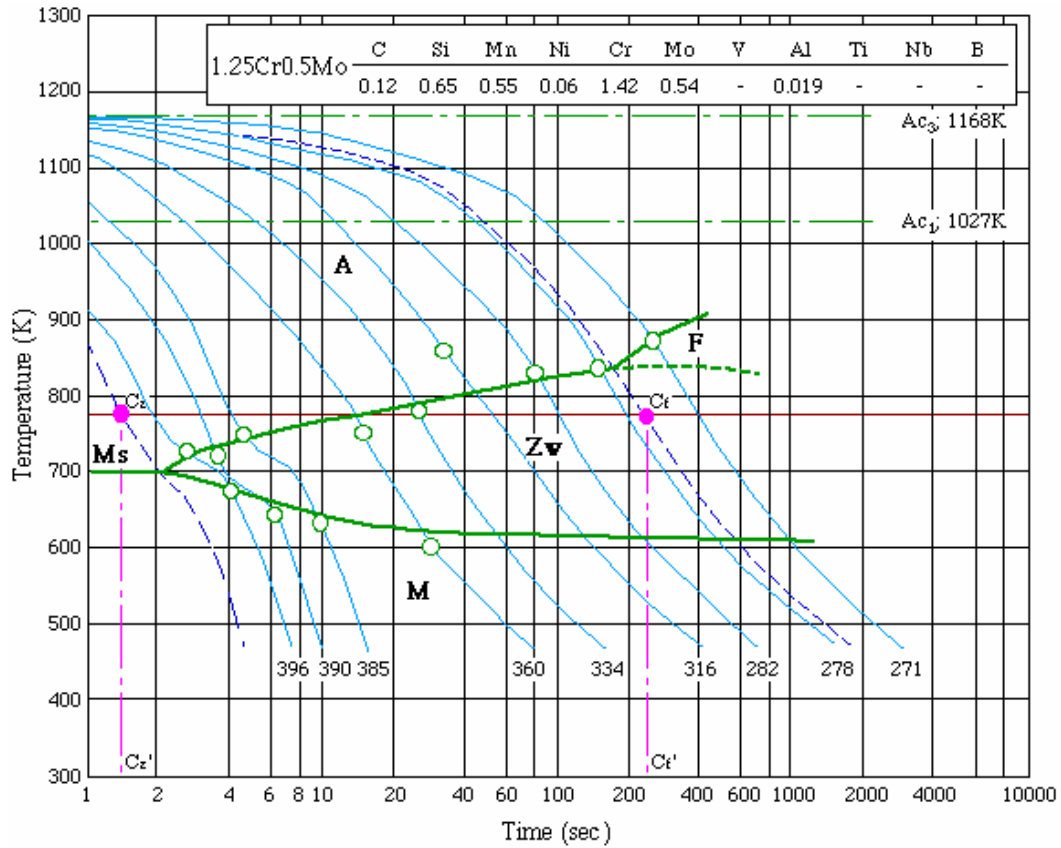
Como sugestão para estudos futuros, comparar o percentual de fases obtidas com diferentes parâmetros de soldagem, mostra-se uma opção válida para pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <sup>3</sup>AWS, "Introductory Welding Metallurgy". 3ª. Edição
- <sup>2</sup>Callister, William D. "**Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**". 5ª Ed, LTC, 2002.
- Easterling, Kenneth. "**Introduction to the Physical Metallurgy of Welding**". Butterworths, 1983.
- [http://www.corrosionsource.com/handbook/mat\\_hard.htm](http://www.corrosionsource.com/handbook/mat_hard.htm) (05/06/2008)
- <http://www.nupeg.ufrn.br/downloads.html> (download do software IHT v2.0 - 05/06/2008)
- <http://www.sperkoengineering.com/html/articles/ExploringTemperBead.pdf> (05/06/2008)
- <sup>4</sup><http://www.wtia.com.au/pdf/TGN-PE-02TemperBeadWelding.pdf> (05/06/2008)
- <sup>6</sup>Jefferson, T.B. "**Metals and How to Weld Them**". Lincoln Foundation, 1962
- Kou, Sindo. "**Welding Metallurgy**". John Wiley & Sons, 1987.
- <sup>7</sup>Linnert, George E. "**Welding Metallurgy – Carbon and Alloy Steels**" Volume 2, AWS.
- <sup>8</sup>Machado, Ivan Guerra. "**Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações**". Editora Imprensa Livre, 2000.
- <sup>1</sup>Machado, Ivan Guerra. "**Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**". Editado pelo Autor, 1996.
- Norma **ASME, seção IX e B31.3**, 1991.
- Norma **Petrobras, N-76**, Rev. E, Janeiro 1997.
- Souza, Sérgio A. de. "**Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos**" 5ª Ed, Editora Edgard Blücher, 1982.
- Telles, Pedro C. Silva. "**Materiais para Equipamentos de Processo**" 6ª. Edição, Editora Interciência, 2003.
- <sup>5</sup>Welding Handbook. "**Fundamentals of Welding**". 7ª. Edição, Volume 1
- Welding Handbook. "**Metals and their weldability**". Section four, 6th Edition.



**Anexo I – Diagrama CCT do aço ASTM A335 Grau P11 (P.Nº 4)**

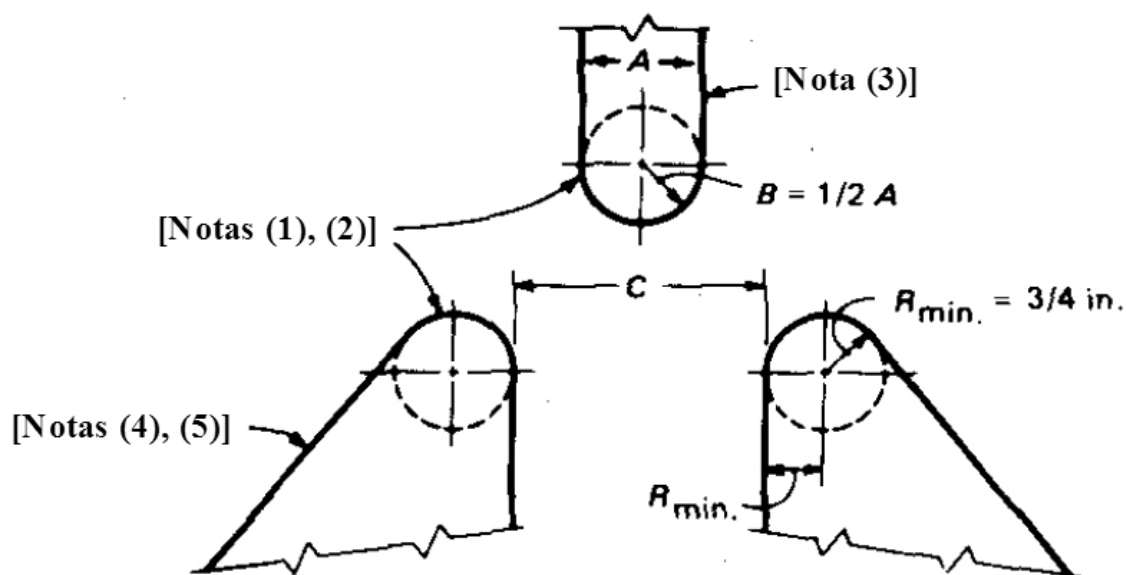


**Anexo II – Tabela de Conversão de Durezas**

ROCKWELL			SUPERFICIAL ROCKWELL			BRINELL		VICKERS OR FIRTH DIAMOND HARDNESS NUMBER	SCLERO-SCOPE	TENSILE STRENGTH	
Diamond Brale		1/16" Bull	"N" Brale Penetrator			10 m/m Ball					
150 kgm C Scale	60 kgm A Scale	100 kgm D Scale	100 kgm B Scale	15 kg Load 15 N	30 kg Load 30N	45 kg Load 45N	Diam. Of Ball Impression in m/m	Hardness Number		Equivalent 1000 lb. Sq. In.	
24	62	43	100	72	45	24	3.85	248	260	37	122
23	62	42	99	71	44	23	3.90	241	254	36	118
22	62	42	99	71	43	22	3.95	235	248	35	116
21	61	41	98	70	42	21	4.00	229	243	35	113
20	61	40	97	69	42	20	4.05	223	238	34	111
18			95				4.10	217	230	33	107
16*			94				4.15	212	222	32	102
14*			92				4.25	203	213	31	98
12*			90				4.35	192	204	29	92
10*			89				4.40	187	195	28	90
8*			87				4.50	179	187	27	87
6*			85				4.60	170	180	26	83
4*			84				4.65	166	173	25	79
2*			82				4.80	156	166	25	77
0*			81				4.80	156	160	25	74
			79				4.90	149	156	23	73
			77				5.00	143	150	22	70
			74				5.10	137	143	21	67
			72				5.20	131	137		65
			70				5.30	126	132	20	62
			68				5.40	121	127	19	60
			65				5.50	116	122	18	58

Para obter a tensão de ruptura em MPa, dividir o valor em Ksi por 0,1450377

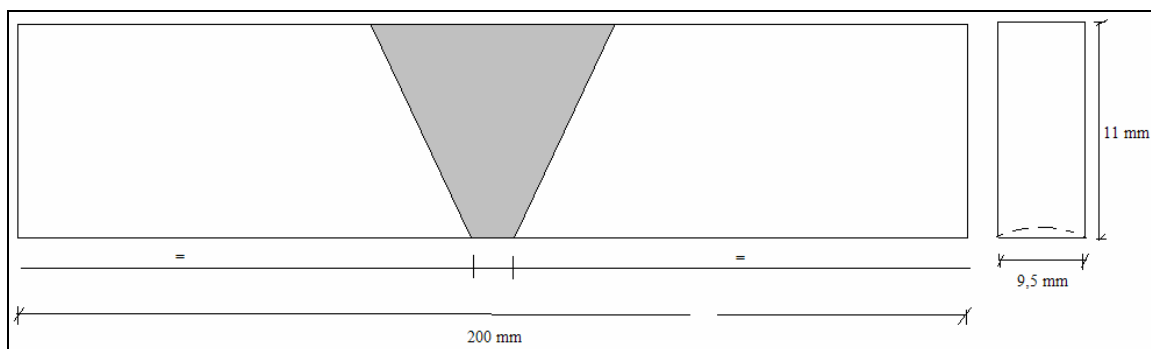
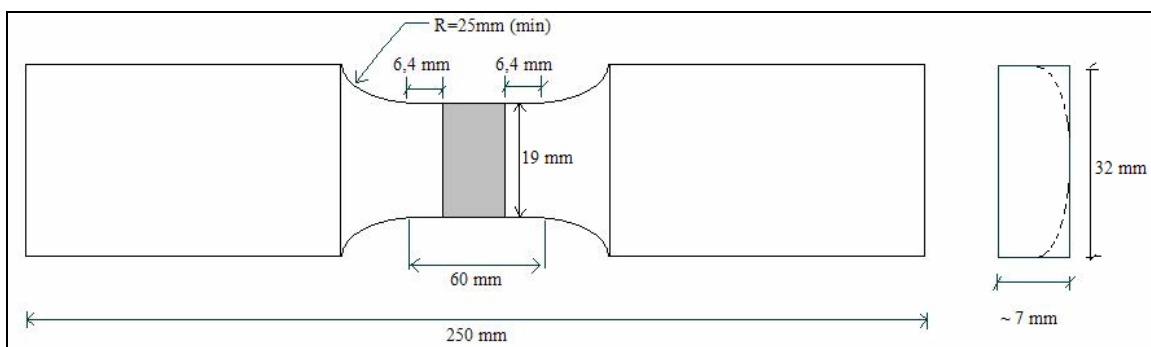
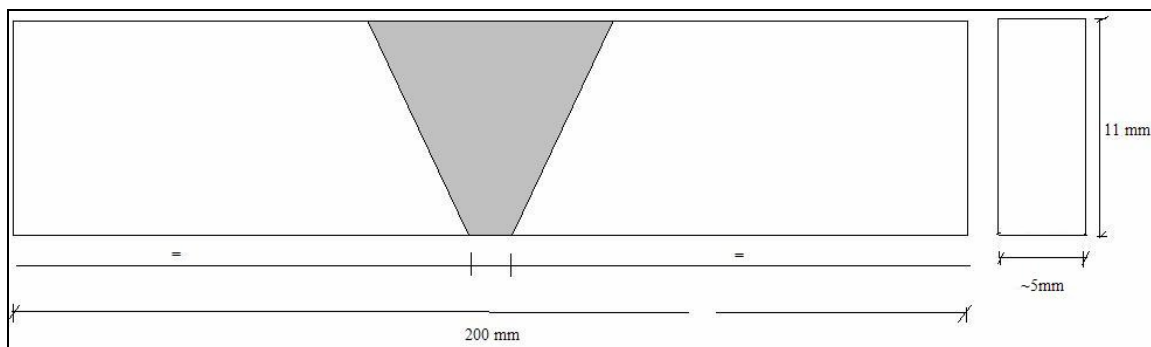
### Anexo III – Especificações da Máquina de Dobramento conforme ASME IX



#### Notas:

- (1) Os roletes podem ser fixos e lubrificados ou giratórios, em ambos os casos devem ser endurecidos;
- (2) Os roletes devem ter uma superfície mínima de rolagem de 2" para colocação do corpo de prova. Estes devem ter altura suficiente para que quando o cutelo se encontra na posição inferior o corpo de prova não encoste no fundo da máquina;
- (3) O êmbolo deve ter rigidez suficiente para que não haja deflexão ou desalinhamento durante a realização do ensaio;
- (4) Pode ser feito um suporte ajustável para os roletes, assim variando-se "C" e sendo possível o ensaio de corpos de prova com diversas espessuras;
- (5) O desenho do suporte dos roletes deve ser tal que estes se mantenham centrados e alinhados em relação ao cutelo;

Material	Thickness of Specimen, in.	A, in.	B, in.	C, in.	D, in.
P-No. 23 to P-No. 2X; P-No. 2X with F-No. 23; P-No. 35; P-No. XX with F-No. 36	1/8 $t = 1/8$ or less	2-1/16 16-1/2t	1-1/32 8-1/4t	2-3/8 18-1/2t + 1/16	1-3/16 9-1/4t + 1/32
P-No. 11; P-No. 25 to P-No. 21 or P-No. 22 or P-No. 25	3/8 $t = 3/8$ or less	2-1/2 6-2/3t	1-1/4 3-1/3t	3-3/8 8-2/3t + 1/8	1-11/16 4-1/3t + 1/16

**Apêndice I – Croquis dos Corpos de Prova utilizados neste estudo****Corpo de Prova para Dobramento Lateral****Corpo de Prova para Tração****Corpo de Prova para Macro / Dureza**

## Apêndice II – Acabamento das Juntas Soldadas



**Acabamento da Junta J01 e J02**



**Acabamento da Junta J03**



**Acabamento da Junta J04**