

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**CLAUDIA SANTOS DE OLIVEIRA  
GUILHERME BOYNARD DENTI**

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DA REGIÃO REVENIDA PELO  
PASSE DUPLO EM SOLDAGEM SMAW DO AÇO AISI 1045**

**VITÓRIA  
2007**

**CLAUDIA SANTOS DE OLIVEIRA  
GUILHERME BOYNARD DENTI**

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DA REGIÃO REVENIDA PELO  
PASSE DUPLO EM SOLDAGEM SMAW DO AÇO AISI 1045**

Projeto de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal do Espírito  
Santo, como requisito para obtenção do  
Grau de Engenheiro Mecânico.  
Orientador: Prof. Temístocles de Souza  
Luz

**VITÓRIA  
2007**

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO DA REGIÃO REVENIDA PELO  
PASSE DUPLO EM SOLDAGEM SMAW DO AÇO AISI 1045**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. MsC Temístocles de Souza Luz**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Christian Mariani Lucas**  
**Examinador**

---

**Prof. Dr. Osvaldo Guilherme Cominelli**  
**Examinador**

**Vitória - ES, 09 de julho de 2007**

A Deus

Aos nossos pais

Aos familiares e amigos

Ao Professor Temístocles de Sousa Luz

Ao C. A. Zampieri, técnico do laboratório de materiais, UFES

A Yukiu Nishida e Sueli Bazoni, técnicos do laboratório de testes mecânicos da CST

Ao Jorge Sodré e Rodrigo Sodré, engenheiros mecânicos responsáveis pela SEISA

A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho

*“Não basta ensinar ao homem uma especialidade, porque se tornará assim uma máquina utilizável e não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto”.*

*Albert Einstein*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.....	11
Figura 2.2: Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e a resistência ao choque de um aço 1045 temperado.....	12
Figura 2.3: Zonas de uma solda com passe único .....	13
Figura 2.4: Macroestrutura de uma solda de aço carbono.....	14
Figura 2.5: Diagrama de Graville.....	17
Figura 2.6: Diagramas TRC durante tratamento térmico (linhas grossas) e durante soldagem (linhas finas) .....	18
Figura 2.7: Diagrama de Higuchi para um aço baixo carbono. ....	22
Figura 2.8: Identificação da zona dura (ZD) e da zona macia (ZM) .....	22
Figura 2.9: Esquema de um corpo de prova soldado.....	23
Figura 2.10: Esquema de superposições das camadas.....	24
Figura 2.11: Esquema das sub-regiões da ZAC em uma soldagem multipasses .....	25
Figura 2.12: Gráfico Tensão x Deformação com determinação da Tenacidade .....	26
Figura 2.13: Representação do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW), processo manual.....	27
Figura 3.1: Microestrutura original do aço AISI 1045. Ataque: Nital 2%, 500x .....	30
Figura 3.2: Posição de medições de microdureza nas amostras para o teste de Higuchi. ....	32
Figura 3.3: Seqüência de deposição.....	33
Figura 4.1: Perfil de microdureza do aço AISI 1045 temperado e não revenido. ....	34
Figura 4.2: Perfil de microdureza para a energia de 9kJ/cm. ....	36
Figura 4.3: Perfil de microdureza para a energia de 12kJ/cm. ....	36
Figura 4.4: Perfil de microdureza para a energia de 13kJ/cm. ....	37
Figura 4.5: Perfil de microdureza para a energia de 15kJ/cm. ....	37
Figura 4.6: Perfil de microdureza para a energia de 17kJ/cm. ....	37
Figura 4.7: Perfil de microdureza para a energia de 23 kJ/cm. ....	38
Figura 4.8: Gráfico de Higuchi.....	38
Figura 4.9: AD 12/12. A) Região de dupla camada; B) Região do chanfro, 100X. ....	39
Ataque: nital 2% .....	39
Figura 4.10: AD 9/15. A) Região do metal base; B) Interface da ZF com ZAC, 100X. ....	40

Ataque: nital 2% .....	40
Figura 4.12: AD 11/11. Região ZAC entre passes, 100X. Ataque: nital 2% .....	40
Figura 4.13: AD 12/9. Regiões do corpo de prova, 100X. Ataque: nital 2% .....	41

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 1045 (em %) (SOUZA, 2001) .....	10
Tabela 2 – Composição química do metal de base (em %) .....	29
Tabela 3 – Composição química eletrodo, de acordo com o fabricante. ....	30
Tabela 4 – Parâmetros de soldagem para a Técnica de Higuchi.....	31
Tabela 5 – Parâmetros de soldagem para o ensaio de dupla camada. ....	32
Tabela 6 - Parâmetros de soldagem para o preenchimento da junta.....	33
Tabela 7 – Valores de reforço e penetração.....	38
Tabela 8 - Relações de energia .....	39
Tabela 9 - Resultados do Ensaio de Impacto Charpy. ....	41

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	III
ÍNDICE DE TABELAS .....	V
ÍNDICE .....	VI
1 INTRODUÇÃO .....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	10
2.1 Aço AISI 1045 .....	10
2.2 Tratamentos Térmicos .....	10
2.3 Soldagem de Aços Carbono-Mn .....	12
2.3.1 Soldagem com Passe Único: .....	12
2.3.2 Soldagem Multipasses .....	13
2.4 Fatores Metalúrgicos na Soldagem dos Aços Carbono .....	15
2.4.1 Temperabilidade .....	15
2.4.2 Microestrutura da Zona Afetada pelo Calor - ZAC .....	19
2.4.3 Trincas na Solda .....	20
2.5 Soldagem sem Tratamento Térmico Posterior .....	20
2.6 Teste de Higuchi .....	21
2.7 Técnica da Dupla Camada .....	24
2.8 Passe de Revenido .....	25
2.9 Tenacidade de um Aço .....	25
2.10 Soldagem por Eletrodo Revestido (SMAW - Shield Metal Arc Welding) ..	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	29
3.1 Materiais .....	29
3.1.1 Corpos de Prova .....	29
3.1.2 Eletrodo Utilizado .....	30
3.1.3 Equipamento de Soldagem .....	30
3.2 Metodologia .....	31
3.2.1 Técnica de Higuchi .....	31
3.2.2 Técnica da Dupla Camada .....	32
3.2.3 Preparação dos Corpos de Prova .....	33
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	34

4.1	Teste de Higuchi.....	34
4.2	Ensaio de Impacto Charpy .....	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	42
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	43
7	BIBLIOGRAFIA .....	44

## RESUMO

Este trabalho refere-se ao estudo da tenacidade ao impacto da região revenida do material AISI 1045, soldado através do processo SMAW, eletrodo revestido, utilizando-se o eletrodo do tipo AWS 7018 e submetido à técnica da dupla camada.

O estabelecimento de parâmetros adequados à utilização em campo auxiliará a soldagem de manutenção onde o desenvolvimento de procedimentos de correção, principalmente no que tange a tratamentos térmicos, fica difícil ser executado.

Foram realizados ensaios de impacto Charpy e de microdureza, de forma a desenvolver corretamente o método e obter uma correlação entre a técnica de soldagem aplicada e as propriedades mecânicas, principalmente a tenacidade ao impacto.

Com este trabalho pretende-se fornecer contribuições tecnológicas para a soldagem do aço AISI 1045, sendo este estudo de suma importância, visto que o aço em questão é amplamente aplicado na indústria petrolífera, apresentando características de boa soldabilidade e elevada resistência mecânica.

## 1 INTRODUÇÃO

A busca constante de produtos mais eficazes e de projeto arrojados com baixo custo, vem se tornando uma grande preocupação no mundo atual. Neste âmbito tecnológico o desenvolvimento de novos materiais torna-se necessário e imprescindível, para que cada vez mais, os sonhos que antes pareciam distantes da nossa realidade, possam tornar-se realizáveis.

Estudos atuais sobre aços que alcancem propriedades mecânicas de alta resistência e elevada tenacidade, como os aços bifásicos, aços multifásicos e aços TRIP, vêm recebendo atenções especiais no que diz respeito ao aperfeiçoamento de suas técnicas de manutenção, assim como do comportamento mecânico e de suas principais aplicações.

O aço AISI 1045 é um material fortemente empregado em diversos componentes da indústria do petróleo tais como eixos de ventiladores e de bombas das torres de destilação, além de encontrar aplicação também em eixos, bases para matrizes e ferramentas manuais.

Diante de problemas operacionais dos equipamentos, faz-se necessário um desenvolvimento de uma soldagem de manutenção que dispense a aplicação de tratamento térmico posterior. Este tipo de tratamento torna a manutenção mais lenta e, consequentemente, a operação mais onerosa, devido à grande dificuldade em se realizar soldagem de manutenção em determinados locais onde os equipamentos estão locados.

Neste trabalho pretende-se oferecer uma contribuição ao desenvolvimento da aplicação da técnica da dupla camada de soldagem, como meio de substituir a soldagem com tratamento térmico posterior. O seu objetivo principal é mostrar que a tenacidade da zona afetada pelo calor (ZAC) formada neste processo é melhorada pela aplicação desta técnica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aço AISI 1045

O aço AISI 1045, segundo a NBR 172/2000 é classificado como aço para construção mecânica, ao carbono e especial. Esta última consideração deve-se às exigências de ensaio de impacto no estado temperado e revenido.

**Tabela 1 – Composição química do aço AISI 1045 (em %) (SOUZA, 2001).**

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P<sub>máx.</sub></b>	<b>S<sub>máx.</sub></b>	<b>Si</b>
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	0,10 – 0,60

De acordo com a norma NBR 172/2000 é classificado como aço para construção mecânica, ao carbono e especial. Esta última consideração deve-se às exigências de ensaio de impacto no estado temperado e revenido (ABNT,2000).

### 2.2 Tratamentos Térmicos

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas.

As propriedades dos aços dependem em princípio da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando, em consequência, na alteração mais ou menos pronunciada, de suas propriedades.

Alguns fatores capazes de influenciar no tratamento térmico dos aços são:

- Velocidade de aquecimento, temperatura de aquecimento.
- Tempo de permanência à temperatura de aquecimento.
- Resfriamento e circulação do meio de resfriamento.
- Atmosfera do forno.

O tratamento térmico de têmpera consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à sua temperatura crítica (mais ou menos 50 °C acima da

linha A1 para os hipereutetóides) em um meio como um óleo, água, salmoura ou mesmo ar. A Figura 2.1 esquematiza a operação de têmpera. O objetivo perspicuo da têmpera é a obtenção da estrutura martensítica, para o que se deve, portanto, fazer com que a curva de resfriamento passe à esquerda do cotovelo da curva em "C", evitando-se assim a transformação da austenita (CHIAVERINI, 1988).

A velocidade de resfriamento, nessas condições, dependerá do tipo de aço da forma e das dimensões das peças.

Como na têmpera o constituinte final desejado é a martensita, o objetivo dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, é o aumento do limite de resistência à tração do aço e também da sua dureza; na realidade, o aumento da dureza deve verificar-se até uma determinada profundidade (CHIAVERINI, 1988).

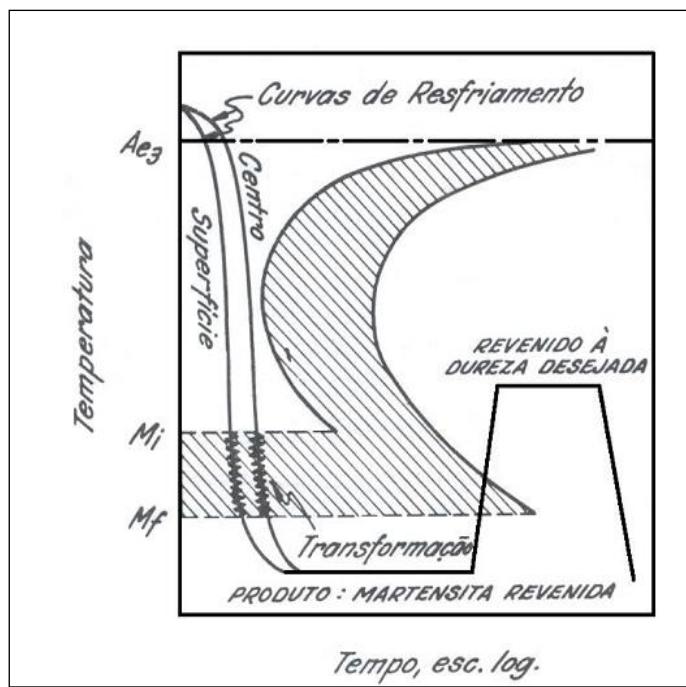


Figura 2.1: Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido (CHIAVERINI, 1988).

O revenido é o tratamento térmico que normalmente acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos durante o processo, além de aliviar ou remover as tensões internas, corrigindo as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque (CHIAVERINI, 1988). Este último efeito está indicado na Figura 2.2.

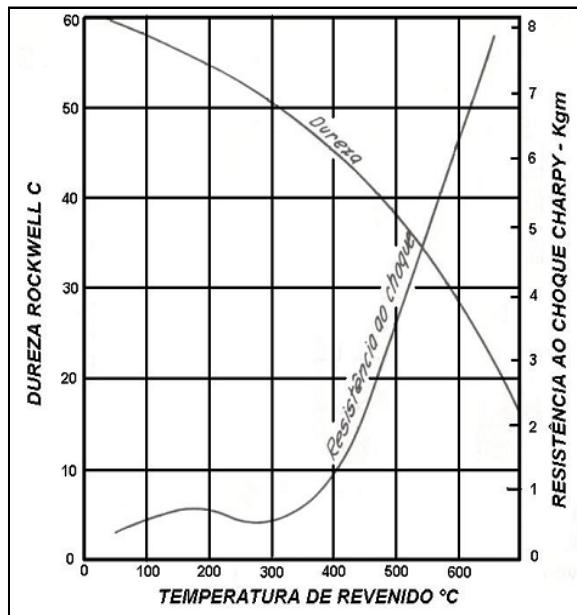


Figura 2.2: Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e a resistência ao choque de um aço 1045 temperado (CHIAVERINI, 1988).

### 2.3 Soldagem de Aços Carbono-Mn

Aços carbono são ligas de ferro e carbono (até 2% C) contendo ainda, como residuais (de matéria prima ou do processo de fabricação), outros elementos como Mn, Si, S e P. Aços de baixa liga têm uma quantidade total de elementos de liga inferior a 2%. (MODENESI, 2001).

O maior problema de soldabilidade desses aços é a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio, principalmente na zona termicamente afetada (ZTA). Outros problemas mais específicos incluem a perda de tenacidade na ZTA, ou na zona fundida (associada com a formação de estrutura de granulação grosseira, durante a soldagem com baixo aporte térmico) e a formação de trincas de solidificação (em peças contaminadas ou na soldagem com aporte térmico elevado) (MODENESI 2001).

O aço AISI 1045 está englobado na série de aços de médio carbono. Em função do maior teor de carbono e de manganês, eletrodos de baixo hidrogênio são recomendados, particularmente para peças de maior espessura.

#### 2.3.1 Soldagem com Passe Único:

A solda é dividida em três regiões: zona fundida (ZF) constituída pelo material fundido, zona de ligação (ZL) constituída por uma estreita região onde ocorre a

fusão parcial do metal base junto à zona fundida e a zona afetada pelo calor (ZAC), região do metal base que sofreu alterações microestruturais causadas pelo calor da soldagem (Figura 2.3).

Num ponto da ZAC adjacente a poça de fusão a temperatura aumenta rapidamente a um nível próximo ao da poça de fusão e diminui rapidamente produzindo um efeito como o de têmpera. Nos aços ao carbono essa região torna-se austenítica durante o aquecimento e podendo gerar o constituinte duro conhecido como martensita quando se resfria. Essa região, a qual desenvolve grãos grosseiros, é conhecida como ZAC de grãos grossos (ZAC-GG) porém um pouco mais além, onde a temperatura não foi tão alta o tamanho de grão é menor e essa zona é conhecida como ZAC de grãos fino (ZAC-GF). Mais além ainda, não há alteração no tamanho de grão, mas o calor é suficiente para reduzir a dureza dessa região e eliminar até certo ponto os efeitos de qualquer encruamento e essa região é conhecida como ZAC intercrítica (ZAC-IC). Ainda há uma região onde não são observadas mudanças estruturais visíveis que é conhecida como ZAC subcrítica (ZAC-SC) (Aguiar, 2001).

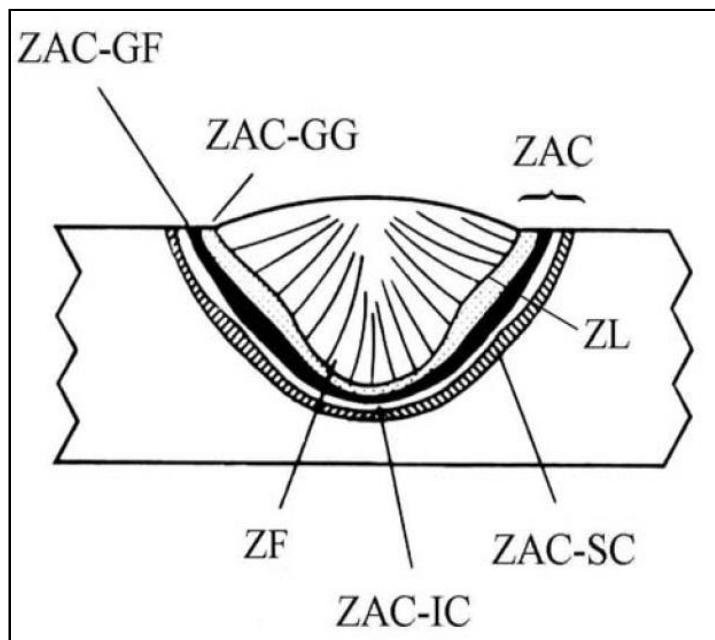


Figura 2.3: Zonas de uma solda com passe único (METALS HANDBOOK, 1991)

### 2.3.2 Soldagem Multipasses

Na soldagem com vários passes, cada passe, durante a sua deposição, pode afetar termicamente os que foram depositados anteriormente. A microestrutura

das regiões adjacentes ao passe que está sendo depositado é alterada de forma similar à que ocorre na ZTA do metal base. Em particular, as regiões mais próximas serão aquecidas a temperaturas próximas da de fusão, sendo reaustenitzadas, sofrendo um forte crescimento de grão e tendendo a perder o aspecto colunar típico que está associado com o processo de solidificação. No resfriamento, com a decomposição da austenita, microconstituíntes similares aos existentes nas regiões não alteradas da zona fundida são novamente formados. Regiões reaquecidas, mas mais afastadas do cordão sendo depositado, não atingem temperaturas suficientemente elevadas para serem austenitzadas. Nestas regiões, ilhas de martensita poderão ser revenidas, carbonetos e outros constituintes poderão ser parcialmente esferoidizados e, dependendo da composição química da solda, fenômenos de precipitação e de coalescimento de precipitados poderão ocorrer. Todas estas alterações poderão afetar o comportamento mecânico e o desempenho geral da zona fundida. A Figura 2.4 mostra a macrografia de uma solda multipasses de aço carbono, indicando exemplos das regiões da ZF não afetada (1) e afetada (2).

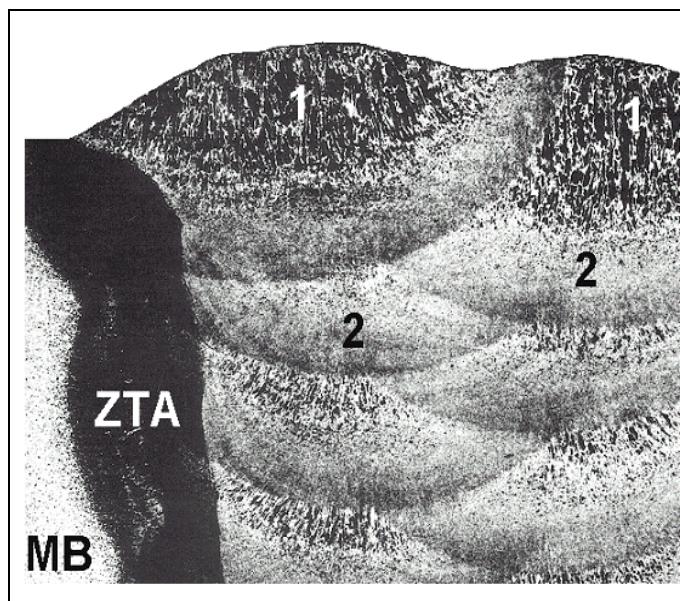


Figura 2.4: Macroestrutura de uma solda de aço carbono. MB – Metal base, ZTA – Zona termicamente afetada, (1) – Região não afetada da zona fundida e (2) – Região afetada. (ESAB, 2004)

Comparada com a soldagem de único passe, a soldagem de multipasses tem as seguintes vantagens:

- Cada passe subsequente provoca uma normalização e um refino dos grãos da camada anterior;
- O ciclo térmico provoca revenimento no metal de solda, diminuindo as tensões residuais do passe anterior;
- Devido ao calor gerado pelos ciclos térmicos do passe anterior ocorre uma redução da taxa de resfriamento do metal de base.

A técnica da soldagem de dupla camada foi inicialmente desenvolvida nos anos 60 junto a CEGB (Central Electric Generating Board) no Reino Unido para evitar as trincas de reaquecimento na ZAC que ocorriam quando da execução do tratamento térmico pós-soldagem (TTPS) em aços Cr-Mo-V. Ela utiliza um método controlado de deposição, onde a relação entre os aportes térmicos da segunda para a primeira camada de solda deve ser criteriosamente definida para promover o refino e/ou a redução da dureza da ZAC-GG do metal base.

## 2.4 Fatores Metalúrgicos na Soldagem dos Aços Carbono

O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional. Por outro lado, apesar desta simplicidade, não se pode esquecer que a soldagem pode ser muitas vezes um processo “traumático” para o material, envolvendo, em geral, a aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume do material, o que pode levar a importantes alterações estruturais e de propriedades dentro e próximo da região da solda.

Alguns fatores metalúrgicos importantes a serem considerados na soldagem dos aços são a temperabilidade, as microestruturas do metal de solda, as microestruturas da ZAC, a composição química do aço e a presença de inclusões não metálicas. A seguir são abordados os principais fatores a serem observados na soldagem. (MODENESI, 2006)

### 2.4.1 Temperabilidade

A temperabilidade tem sido usada como um indicador de soldabilidade e como um guia para a seleção de materiais e processos, de forma a evitar um excessivo endurecimento e, consequentemente, a ocorrência de trincas na ZAC.

Aços com alta temperabilidade proporcionam uma elevada fração volumétrica de martensita na ZF e na ZAC. Como se sabe, dependendo do seu teor de carbono, essa microestrutura pode ser altamente suscetível a trincas induzidas por hidrogênio (MODENESI, 2004).

Quanto maior for o carbono equivalente maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida. Outros fatores importantes para se determinar a temperatura de pré-aquecimento são a espessura e o tamanho do componente. A temperatura de pré-aquecimento aumenta com o tamanho e a espessura do componente.

Para o cálculo do carbono equivalente determina-se o teor aproximado de outros elementos de liga que produzem a mesma dureza que 1% de carbono. Uma fórmula muito usada é a recomendada pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW):

$$\text{CE} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{1} \quad (01)$$

Esta fórmula, sendo mais antiga, é adequada para aços carbono e carbono-manganês cujo teor de carbono é superior a 0,16%. Para aços com menores teores de carbono, a seguinte fórmula seria mais adequada:

$$\text{CE} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{10} \quad (02)$$

O carbono equivalente, juntamente com o teor de carbono, são usados para situar uma metodologia adequada para previsão de regiões com problemas de fragilidade. Para identificação dessas regiões é usado o diagrama de Graville, Figura 2.5, que mostra a susceptibilidade a trincas induzidas por hidrogênio em função do teores de carbono e do carbono equivalente.

O diagrama de Graville, representado na Figura 2.5, mostra a susceptibilidade a trincas induzidas por hidrogênio em função do teor de carbono e do carbono equivalente. Nessa figura a zona I é própria dos aços de baixo carbono e baixa temperabilidade, os quais não são muito susceptíveis a trincas induzidas por hidrogênio. Na zona II os aços têm carbono mais alto que os da zona I, mas ainda apresentam baixa temperabilidade, sendo, portanto, possível evitar microestruturas sensíveis a trincas pelo controle do resfriamento da ZAC. Isso pode ser alcançado através do controle da energia de soldagem e da utilização de preaquecimento. Na

zona III, os aços têm elevados teores de carbono e a temperabilidade alta, podendo facilmente produzir microestruturas sensíveis às trincas. Para se evitar as trincas induzidas por hidrogênio nessa zona, deve-se usar processos de baixo hidrogênio, preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem (AZEVEDO, 2002).

Pode-se ver nessa figura a zona I, própria dos aços baixo carbono e baixa temperabilidade, muitos susceptíveis a trincas induzidas por hidrogênio. A zona II é característica dos aços de maior carbono que a zona I, ainda apresentando baixa temperabilidade, mas nos aços desta zona consegue-se evitar microestruturas sensíveis à trincas, através do controle de resfriamento da ZAC, aplicando a energia correta de soldagem e utilizando um preaquecimento. Na zona II, pode-se perceber o alto teor de carbono e alta temperabilidade dos aços desta zona. Assim, esses aços podem conter microestruturas sensíveis à trincas. O impedimento da ocorrência de trincas induzidas por hidrogênio, neste caso, se dá pela utilização de processos de baixo hidrogênio, preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem (AZEVEDO, 2002).

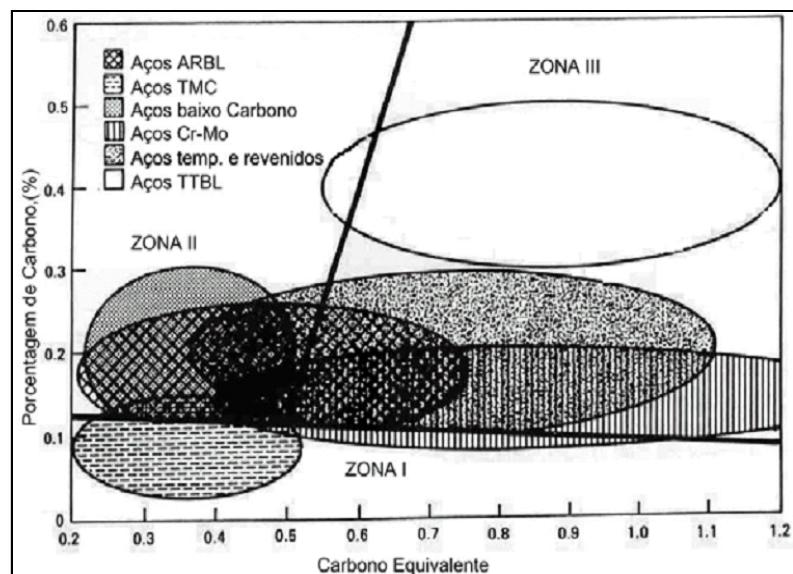


Figura 2.5: Diagrama de Graville (GRAVILLE, 1976)

Aços com carbonos equivalentes menores que 0,45%, de modo geral, não apresentam problemas de trincas. Se o carbono equivalente estiver entre 0,45% e 0,60%, é provável a ocorrência de trincas na soldagem, sendo recomendado um preaquecimento na faixa de 95 a 400 °C. Já para um carbono equivalente acima de 0,60%, a probabilidade de ocorrer trincas na solda é muito alta, sendo necessário

um preaquecimento e tratamento térmico posterior a soldagem para que a solda seja eficiente (AZEVEDO, 2002).

Uma análise da estrutura da ZAC de granulação grosseira de um aço pode ser feita com a utilização de diagramas de Transformação de Resfriamento Contínuo (TRC), especialmente desenvolvidos para soldagem. Este diagrama, representado na Figura 2.6, para o aço AISI 1045, registra o desenvolvimento de transformações à medida que a temperatura decresce, para diferentes taxas de resfriamento. Próximo à temperatura de início de transformação da martensita,  $M_I$ , na mesma temperatura de resfriamento, a curva de transformação para soldagem desloca-se para a direita, em relação à curva de transformação de tratamento térmico (TTT), assim a probabilidade de se ter a formação de martensita na soldagem é maior que durante o tratamento térmico (AZEVEDO, 2002).

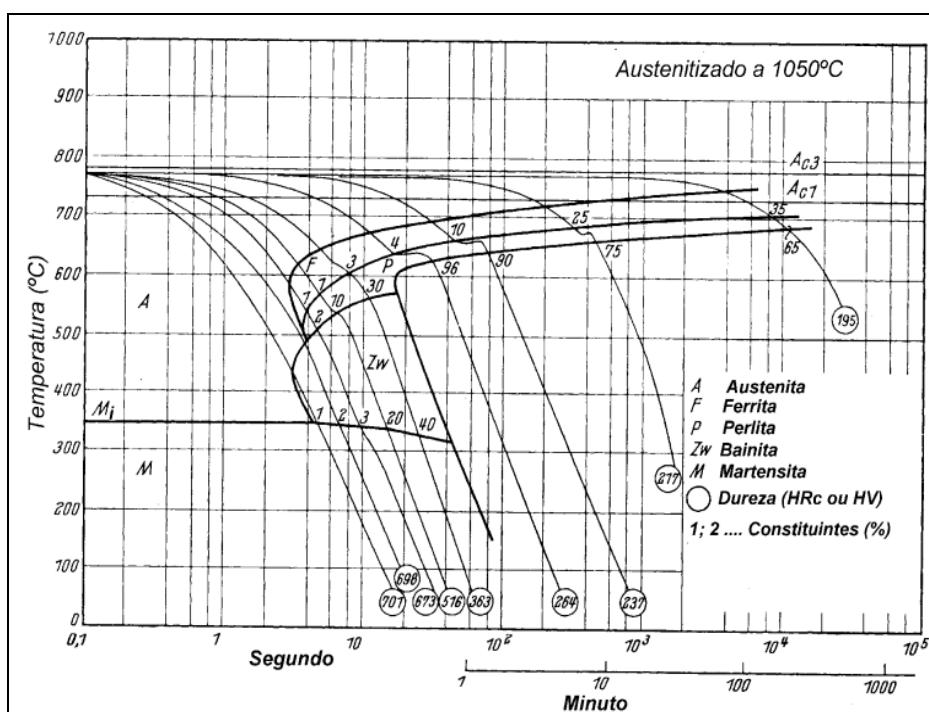


Figura 2.6: Diagramas TRC durante tratamento térmico (linhas grossas) e durante soldagem (linhas finas) (MODENESI, 2006)

A posição do diagrama TRC é um indicativo da temperabilidade do aço, consequentemente, da sua soldabilidade. Quanto mais para a direita o diagrama estiver posicionado mais fácil será a formação de martensita, portanto, pior a soldabilidade.

A composição química do metal de base, o tamanho do grão da austenita e a sua homogeneidade são os fatores que influenciam na posição do diagrama TRC.

Considerando-se à composição química do aço, todos os elementos tradicionalmente utilizados na fabricação dos aços, exceto o cobalto, deslocam o diagrama para a direita, como aumentam o tempo de incubação da austenita, retardam o início de transformação em produtos como ferrita e perlita, facilitando, assim, a formação de martensita (AZEVEDO).

#### 2.4.2 Microestrutura da Zona Afetada pelo Calor - ZAC

A ZAC – região localizada entre a zona de ligação e o metal de base não afetada pelo ciclo térmico – pode ser visualizada na Figura 2.3. sua largura pode ser calculada por:

$$\frac{1}{T_M} = \frac{4}{T_{f_d}} \cdot \frac{Y}{T_f} + \frac{1}{T_f} \quad (03)$$

Onde,

Y = largura da ZAC, mm.

$T_M$  = temperatura máxima a uma distância Y, °C.

$T_0$  = temperatura de preaquecimento, °C.

$T_f$  = temperatura de fusão ou temperatura líquidus, °C.

e = espessura da peça, mm.

$\rho C$  = calor específico volumétrico, J/mm<sup>3</sup> °C.

$E_{liq}$  = energia de soldagem, J/mm, dada pela equação 04:

$$E_{liq} = \frac{UI}{V_s} \cdot \eta \quad (04)$$

Onde,

U = tensão de soldagem (V);

I = corrente de soldagem (A);

$V_s$  = velocidade de soldagem (mm/s);

$\eta_T$  = rendimento térmico do processo.

Quanto maior for a energia de soldagem, mais grosseira será a granulação dessa região e maior a sua extensão. O tipo de microestrutura ZAC-GG depende dos teores de carbono e de elementos de liga no aço, do tamanho do grão austenítico e da velocidade de resfriamento.

A ZAC-GF está logo após a ZAC-GG e possui um estrutura de grãos refinados. Para os aços temperados e revenidos, pode apresentar menor resistência mecânica que o metal de base.

Após a ZAC-GF está a região intercrítica, ZAC-IC, que possui parte de sua estrutura em austenita, e esta, dependendo da velocidade de resfriamento, pode vir a torna-se martensita.

Na região subcrítica (ZAC-SC), os aços temperados e revenidos podem ser submetidos a um superrevenimento da ZAC, ocasionando uma ZAC-IC de maior extensão e de menor dureza que a do metal de base (MODENESI, 1992).

#### **2.4.3 Trincas na Solda**

As trincas são consideradas uns dos tipos mais sérios de descontinuidades em soldas. Estas se desenvolvem quando tensões de tração atuam em um material fragilizado, isto é, incapaz de absorver estas tensões por deformação. Os tipos de trincas que podem ser desenvolvidas são normalmente classificados em função da sua localização na solda como: trinca de cratera, trinca transversal na ZF, trinca transversal na ZAC, longitudinal na ZF, trinca de margem, trinca sob o cordão, trinca na zona de ligação e trinca na raiz da solda. Em aços carbono ferríticos podem ocorrer com mais freqüência, as trincas induzidas pelo hidrogênio e as trincas de reaquecimento (AZEVEDO, 2002)

Os tipos mais comuns de trincas são normalmente classificados de acordo com sua localização na solda, como, por exemplo, trinca de cratera, trinca transversal na ZF, trinca transversal na ZAC, longitudinal na ZF, trinca de margem, trinca sob cordão, trinca na zona de ligação e trinca na raiz da solda (MODENESI, 1992).

### **2.5 Soldagem sem Tratamento Térmico Posterior**

Os aços temperáveis, após sofrer um processo de soldagem, necessitam de tratamento térmico para diminuir as tensões internas e melhorar suas propriedades mecânica.

O desenvolvimento de um método de soldagem que dispense o tratamento térmico posterior é de grande importância para operações realizadas principalmente em lugares de difícil acesso durante uma manutenção, pois com a eliminação do tratamento após a soldagem, tem-se economia de tempo e de custos.

## 2.6 Teste de Higuchi

O teste de Higuchi (Higuchi, 1980) tem por objetivo realizar uma simples deposição de solda sobre uma placa do metal base, no estado temperado e não revenido onde, na seção transversal do cordão, levanta-se o perfil de microdureza da ZAC. Através desse perfil, identificam-se as regiões retemperadas (duras) e revenidas (macias), bem como suas extensões para as diversas energias de soldagem utilizadas. Esse teste tem por objetivo prático, conhecer o alcance das regiões revenidas (macias) e de retêmpera (duras) ao longo da ZAC. Com base nos perfis de microdureza da ZAC e nos valores de reforço e penetração do cordão de solda, são construídos os gráficos de Higuchi como exemplificado na Figura 2.7, para um aço baixo carbono.

As extensões das zonas duras e macias são assim determinadas: a zona dura (ZD) se estende da zona de ligação, onde  $X=0$ , e vai até a distância em que a dureza medida corresponde com a dureza do metal base. A zona macia (ZM) se estende a partir desse ponto até a distância em que a dureza se iguala a dureza do metal base, veja Figura 2.8 (AGUIAR, 2001).

Com a realização do teste de Higuchi consegue-se selecionar as energias que serão utilizadas para a primeira e segunda camadas, realizando-se o refino do grão da ZAC-GG da primeira camada através do ciclo térmico imposto pela segunda camada. Para determinação das energias da primeira e segunda camadas segue-se os critérios a seguir.

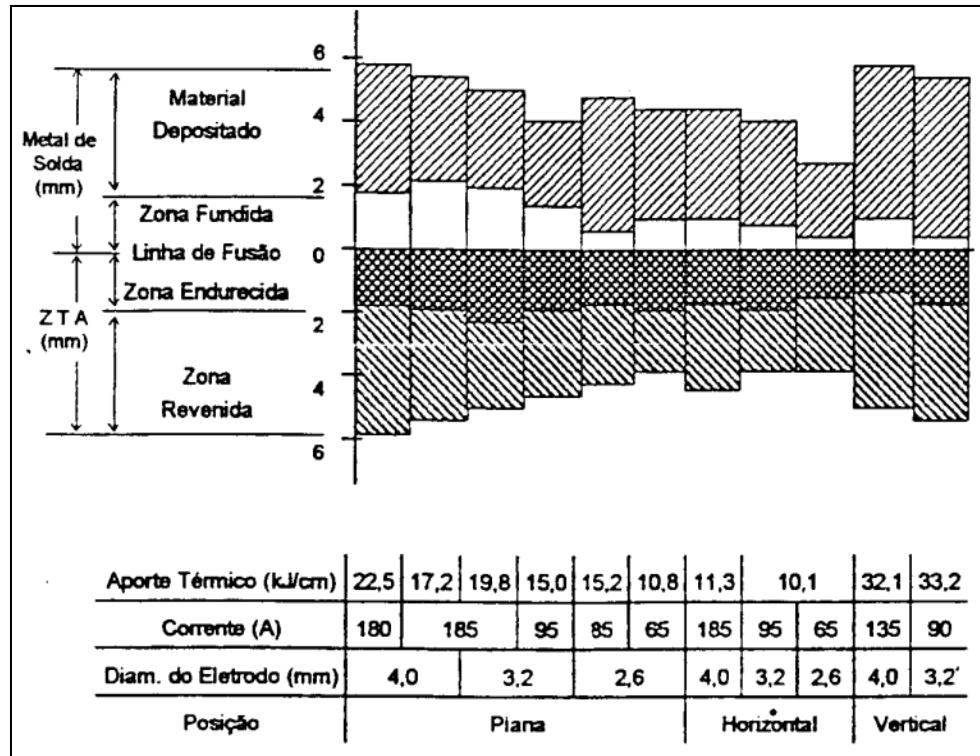


Figura 2.7: Diagrama de Higuchi para um aço baixo carbono (NIÑO, 2001).

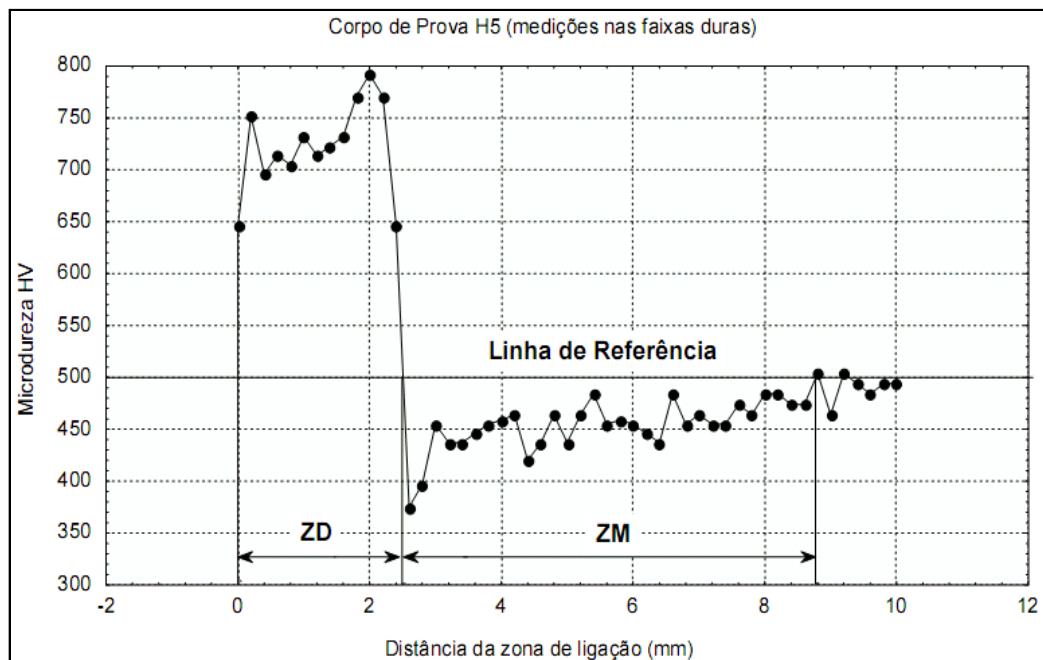


Figura 2.8: Identificação da zona dura (ZD) e da zona macia (ZM) (AGUIAR, 2001)

$$1^0) P_{ZM2} > P_{ZD} \quad (05)$$

$$2^0) P_{ZD2} < R_1 + P_1 \quad (06)$$

Sendo:

$PZM_2$  = profundidade da zona macia da segunda camada;

$PZD_1$  = profundidade da zona dura da primeira camada;

$PZD_2$  = profundidade da zona dura da segunda camada;

$R_1$  = reforço da primeira camada;

$R_2$  = reforço da segunda camada;

A primeira condição atendida significa que o calor alcançado nesta faixa da ZAC da segunda camada provoque o refino e revenimento da zona dura da primeira camada. Atendendo à segunda condição, a zona dura da primeira camada não será retemperada (AZEVEDO, 2002).

A Figura 2.9 representa uma seção transversal de um cordão de solda com a zona fundida, zona dura (ZAC-GG) e zona macia (ZAC-GF). Na Figura 2.10 pode-se observar um corpo de prova soldado com duas camadas, onde se destacam os cordões da primeira e da segunda camadas, incluindo as regiões de reforço, penetração, zona dura e zona macia, e seus respectivos gráficos de Higuchi (AZEVEDO, 2002).

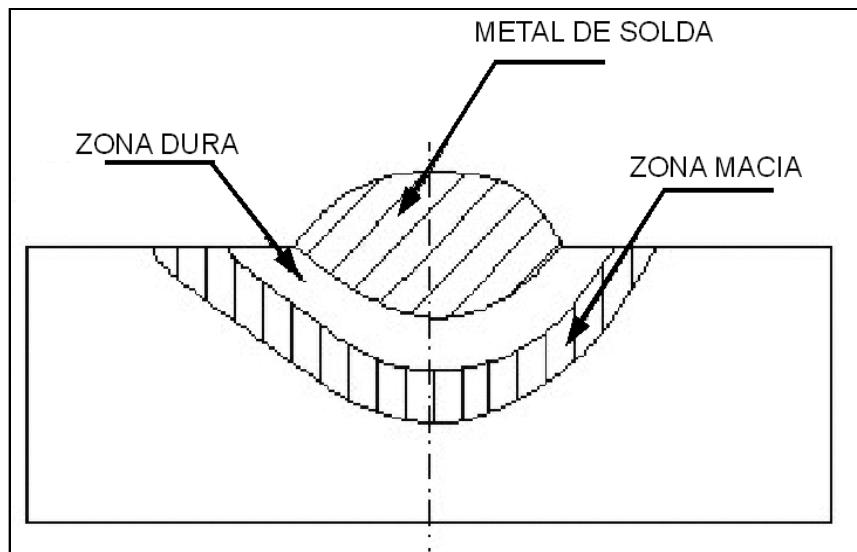


Figura 2.9: Esquema de um corpo de prova soldado (AZEVEDO, 2002).

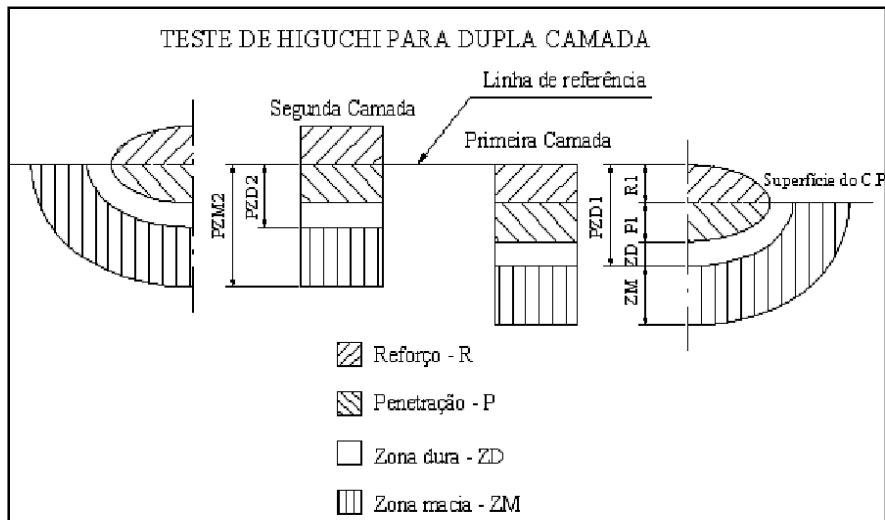


Figura 2.10: Esquema de superposições das camadas (AGUIAR, 2001).

## 2.7 Técnica da Dupla Camada

A técnica da dupla camada é desenvolvida, seguindo as ações mostradas a seguir (NINÔ, 2001):

- Estimativa da penetração, da largura e do reforço do cordão de solda em função das condições de soldagem.
- Determinação do grau de revenimento e de refino do grão e dos fenômenos de precipitação e segregação, através dos ciclos térmicos de soldagem.
- Cálculo dos ciclos térmicos de soldagem e determinação da distribuição das temperaturas de pico na peça.

Esta técnica tem a finalidade de promover uma adequada sobreposição dos ciclos térmicos de tal forma que a segunda camada promova o refino e o revenimento da ZAC-GG da primeira camada (NINÔ, 2001).

O refino na ZAC-GG da 1<sup>a</sup> camada é conseguido ao ser usar a energia da segunda camada maior que a da primeira. Esta relação deve ser determinada em função da velocidade de soldagem, do tipo de eletrodo e dos parâmetros do processo de soldagem adotado (NINÔ, 2001).

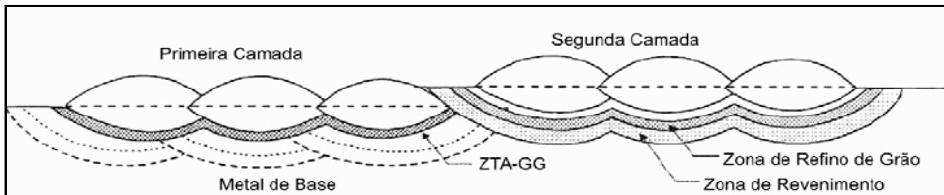


Figura 2.11: Esquema das sub-regiões da ZAC em uma soldagem multipasses (NINÔ, 2001).

## 2.8 Passe de Revenido

O passe de revenido visa reduzir a dureza da ZAC por imposição do ciclo térmico. Para isso o segundo passe deve ser posicionado adequadamente em relação ao primeiro, de modo que a isoterma  $Ac_1$  da camada subsequente encoste-se à linha de fusão da camada anterior, assim o metal de solda é reaustenitizado e o resto da ZAC é revenida abaixo da faixa de temperatura de transformação.

Para se conseguir o revenimento de um ponto da ZAC-GG, o cordão de revenido dever ser posicionado com precisão, de tal forma que a isoterma  $Ac_1$  desse cordão fique logo acima da linha de fusão do último passe (Olsen et al, 1982).

## 2.9 Tenacidade de um Aço

Tenacidade é a energia mecânica, ou seja, o impacto necessário para levar um material à ruptura. Tal energia pode ser calculada através da área num gráfico Tensão x Deformação do material bastando integrar a curva que define o material, da origem até a ruptura conforme mostrado na Figura 2.12

Segundo essa definição os materiais podem ser separados quanto a tenacidade em friáveis (materiais frágeis e quebradiços que podem ser quebrados ou reduzidos a pó com facilidade), maleável (pode ser transformado facilmente em lâminas), séctil (podem ser facilmente cortados), dúcteis (podem ser facilmente transformados em fios), flexíveis (podem ser dobrados porem não recuperam a forma anterior) e elásticos (podem ser dobrados porem recuperam a forma anterior).

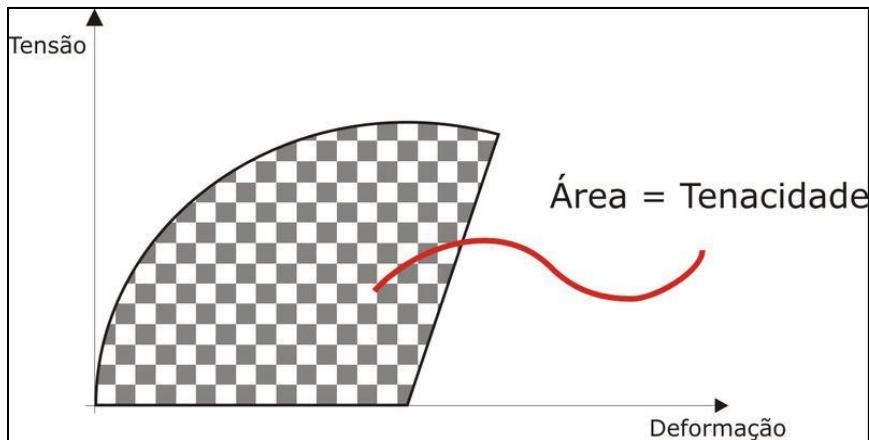


Figura 2.12: Gráfico Tensão x Deformação com determinação da Tenacidade

## 2.10 Soldagem por Eletrodo Revestido (SMAW - Shield Metal Arc Welding)

Segundo Wainer, este processo teve início no começo do século passado, com a utilização de arames nus para cercas, ligados à rede elétrica. Arames enferrujados ou cobertos de cal proporcionavam uma melhor estabilidade do arco, deste modo, no início da primeira década o revestimento ácido foi adotado. Revestindo o arame com asbestos (pó de silicato), a poça de solda ficava protegida, enquanto o uso de algodão aumentava a penetração do arco, dando início ao revestimento celulósico. Em meados da década de 30 desenvolveu-se os revestimentos rutílicos. No início da década de 40 desenvolveu-se os revestimentos básicos, e em meados da década de 50 adicionou-se o pó de ferro. No Brasil esse processo é o mais utilizado, sendo empregado em grande variedade de aplicações.

A maioria dos procedimentos de soldagem manual é executada com processos a arco elétrico com eletrodos revestidos. Neste processo, mostrado na Figura 2.13 o eletrodo é colocado em uma garra para estabelecer contato elétrico e é posicionado pelo soldador. O revestimento obtido pelo uso de eletrodos totalmente revestidos é feito com um material de tal composição, que grandes quantidades de gases são produzidos no aquecimento do arco, protegendo o metal de solda contra a ação do nitrogênio e do oxigênio da atmosfera, já que nenhum gás protetor é utilizado. O revestimento é fundido em uma razão mais lenta que o metal do núcleo, o que direciona e concentra o fluxo do arco. O revestimento também forma uma escória que flutua sobre o metal fundido protegendo-o da contaminação atmosférica enquanto resfria, além de controlar a taxa de resfriamento, contribuindo no

acabamento do cordão. Essa escória é facilmente removida após ocorrer o resfriamento (GAYLORD, 1992).

O revestimento também possui a função de isolamento elétrico, pois ele é um mau condutor de eletricidade, isolando a alma do eletrodo, evitando-se assim aberturas de arcos laterais e consequentemente orientando o arco; função de ionização, pois contém silicatos de sódio e potássio que ionizam a atmosfera do arco, facilitando a passagem da corrente elétrica, originando um arco estável; função metalúrgica, pois pode contribuir como um elemento de liga, de maneira a alterar as propriedades da solda.

A corrente de soldagem controla todas as características operatórias do processo, o aspecto do cordão, as propriedades da junta soldada, além de controlar a magnitude e a distribuição da energia térmica presente no arco. A intensidade da corrente é um parâmetro determinante, levando em consideração a taxa de deposição, e é também o mais importante efeito controlador da penetração da solda, da largura e do reforço do cordão (metal de solda excedente depositado para reforçar o cordão), além da diluição (metal base fundido na soldagem). A corrente de soldagem possui também um efeito inversamente proporcional sobre a velocidade de resfriamento (WAINER, 1992).

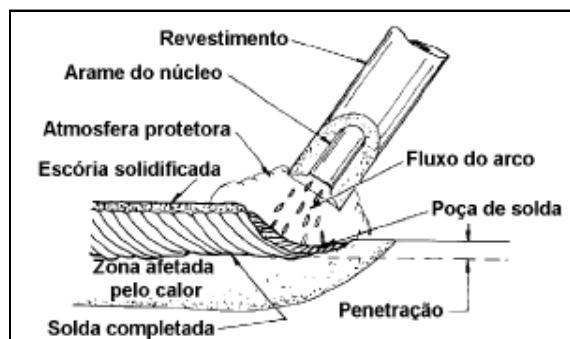


Figura 2.13: Representação do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW), processo manual. (OWENS, 1989)

A segunda mais importante variável operacional é a velocidade de avanço. A altura e a largura do cordão variam inversamente com a velocidade de avanço. Considerando altas correntes a energia de soldagem pode ser mantida reduzida, com o uso de altas velocidades de avanço.

Um dos principais fatores limitantes da faixa útil de corrente de soldagem é o diâmetro do eletrodo. Ele controla a densidade de corrente por unidade de área de

seção transversal da alma do eletrodo. A escolha de um maior diâmetro de eletrodo maximiza a taxa de deposição, e esse maior diâmetro é função de fatores como a posição de soldagem, formato do chanfro e tipo de revestimento.

O ângulo do eletrodo em relação à peça e a polaridade são também variáveis importantes pois ajustam o fluxo térmico, controlam o banho na poça de fusão e influenciam no formato do cordão.

Este é certamente o processo mais versátil, podendo ser usado em todas as posições de soldagem. Além disso, o eletrodo pode ser conduzido a locais de difícil acesso, onde outros processos não atingem e a montagem do processo é extremamente simples. É provavelmente, o processo mais comum em fabricação de estruturas.

Segundo Owens, 1989, a qualidade da soldagem é relacionada com a habilidade do operador. Um bom soldador tem que possuir amplo conhecimento do processo e um alto nível de habilidade de manipulação. Devido à necessidade de bons soldadores e velocidades de deposição relativamente baixas, este pode ser um processo caro. Ele foi tradicionalmente respeitado como o processo que foi capaz de produzir as mais altas qualidades de soldas, mas esta reputação é agora ameaçada pelos recentes avanços de outros processos mais eficientes.

O equipamento de soldagem para este processo consiste de uma fonte de energia, cabos de ligação, um porta eletrodo, um conector terra, além do próprio eletrodo. Deve-se salientar que o suprimento de energia pode ser tanto corrente contínua quanto alternada.

Diâmetros típicos de eletrodos para trabalhos estruturais variam entre 2,5 e 6 mm. Voltagem de circuitos abertos são usualmente 50-90 V, dependendo do eletrodo; tão logo quando o arco é formado, a voltagem cai para valores entre 20 e 35 V. Correntes típicas alcançam de 50 a 400 ampères, depositando com velocidades entre 20 e 100 g/min. Aplicável a espessuras acima de 2 mm.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a tenacidade ao impacto do aço AISI 1045 utilizando a técnica da dupla camada, foi escolhido o processo de soldagem por eletrodo revestido. Este processo de soldagem, apesar de suas limitações de aplicação, é um processo versátil e de vasta aplicação em setores de manutenção.

As relações de energia a serem aplicadas na técnica da dupla camada foram escolhidas com base no teste de Higuchi e análise da técnica de dupla camada. (ASSUMPCÃO, 2006).

Foi realizada primeiramente a têmpera dos corpos de prova, seguido do teste de Higuchi e aplicação da técnica da dupla camada para se alcançar o revenimento da ZAC-GG da primeira camada, em seqüência, a padronização do corpo de prova e, por fim, o ensaio Charpy, para análise da tenacidade da ZAC-GG da primeira camada e comparação com um metal base que não passou pelo processo de soldagem.

A seguir as etapas do processo, incluindo materiais e métodos utilizados.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Corpos de Prova

Para realização dos ensaios foram utilizados corpos de prova de aço AISI 1045 com 63,5mm x 15,875mm (2 ½" x 5/8"), cuja composição química encontra-se na Tabela 2.

A microestrutura original deste aço, conforme foi fornecido, é constituída de perlita e ferrita, conforme mostrado na Figura 3.1.

**Tabela 2 – Composição química do metal de base (em %) de acordo com o certificado emitido pelo fornecedor**

C	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Si
0,480	0,750	0,030	0,027	0,140	0,060	0,040	0,017	0,210

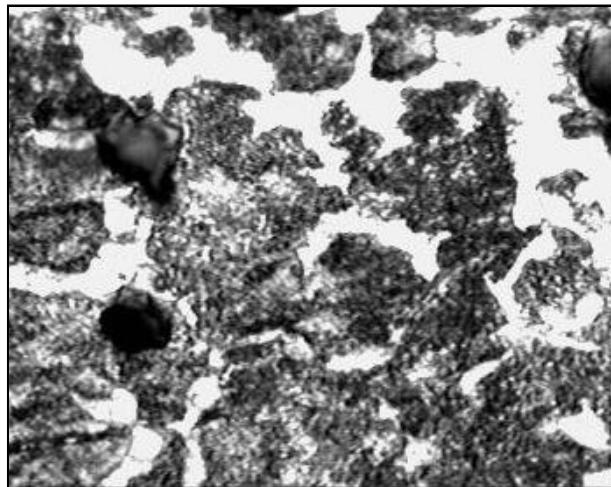


Figura 3.1: Microestrutura original do aço AISI 1045. Ataque: Nital 2%, 500x

### 3.1.2 Eletrodo Utilizado

Foi utilizado um eletrodo de classificação AWS 7018, o qual detém composição química, de acordo com o fabricante:

**Tabela 3 – Composição química eletrodo, de acordo com o fabricante D'Dalla.**

Eletrodo	C	Mn	Si
AWS 7018	0,07	1,30	0,50

### 3.1.3 Equipamento de Soldagem

- Foi utilizada a fonte de soldagem eletrônica multiprocessos (Figura 3.2). tal fonte possibilita a soldagem de diversos processos dentre os quais citem-se:
  1. Eletrodo revestido
  2. MIG/MAG
  3. TIG
  4. Arco-Submerso
  5. Plasma

### 3.2 Metodologia

Para execução deste projeto a metodologia foi aplicada em três etapas: aplicação da técnica de Higuchi, soldagem com dupla camada numa junta chanfrada e realização de ensaio de impacto Charpy.

As soldagens para o teste de Higuchi foram realizadas em juntas semi – V, na posição plana, utilizando o processo de soldagem por eletrodo revestido. As mesmas foram realizadas por um soldador qualificado da Familtec.

#### 3.2.1 Técnica de Higuchi

O teste de Higuchi foi realizado utilizando-se seis corpos de prova temperados (aquecidos em forno a uma temperatura de 840 °C, durante 40 min, resfriados em água). Para cada corpo de prova foi testado um nível de energia de soldagem, de acordo com a Tabela 4. Através da realização deste teste consegue-se encontrar uma relação entre as energias da primeira e da segunda camada, de forma a possibilitar o revenimento da ZAC-GG da primeira camada, pela superposição do ciclo térmico da segunda camada.

Após a realização da soldagem, foi levantado o perfil de microdureza das amostras, na seção transversal da ZAC, em uma única direção central e perpendicular à linha de fusão, conforme indicado na Figura 3.2. Neste ensaio foi aplicada uma carga de 200g e a distância entre as impressões foi de 0,3mm. Com os valores das durezas foram avaliadas as extensões das zonas endurecidas e zonas macias para cada energia de soldagem.

**Tabela 4 – Parâmetros de soldagem para a Técnica de Higuchi.**

Corpo de prova	Corrente eficaz (A)	Tensão eficaz (V)	Velocidade de soldagem (cm/min.)	Diâmetro do eletrodo (mm)	Energia de soldagem (kJ/cm)*
A1	108	24	14	3,25	9
A2	130	25	14	3,25	12
A3	153	27	14	3,25	15
A4	105	25	10	3,25	13
A5	127	27	10	3,25	17
A6	151	30	10	3,25	23

\*Rendimento térmico = 0,85.

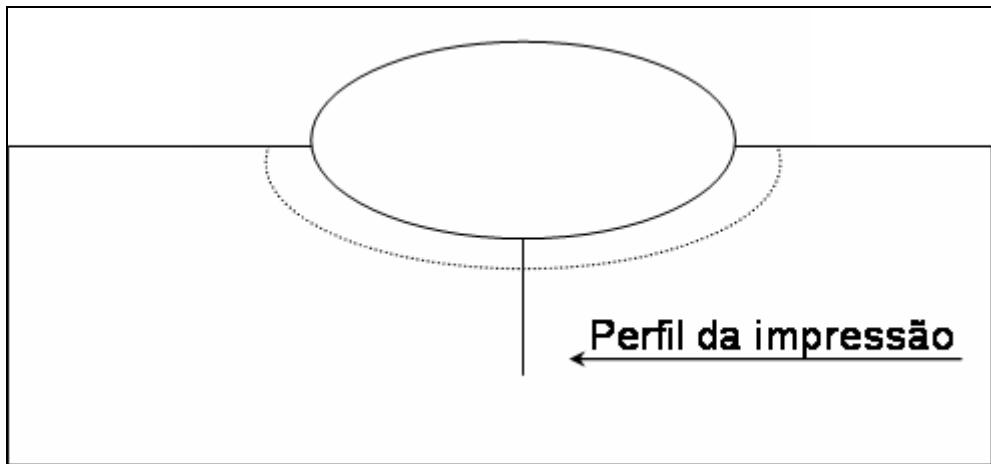


Figura 3.2: Posição de medições de microdureza nas amostras para o teste de Higuchi.

Os gráficos de Higuchi foram construídos com os valores do reforço, da penetração do cordão de solda e dos tamanhos das zonas duras e das zonas macias de cada corpo de prova, a partir das medições das microdurezas. Estes resultados foram utilizados para a realização do ensaio em dupla camada, conforme a seguir.

### 3.2.2 Técnica da Dupla Camada

Foram realizados ensaios de soldagem em dupla camada, com cinco relações de energia entre a primeira e a segunda camada. Os parâmetros utilizados no ensaio são mostrados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Parâmetros de soldagem para o ensaio de dupla camada.**

Corpo de prova		Corrente eficaz (A)	Tensão eficaz (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Energia de soldagem (kJ/cm)*
AD1 12/12	1 <sup>a</sup> camada	108	24	15	12
	2 <sup>o</sup> camada	108	24	15	12
AD2 9/15	1 <sup>a</sup> camada	108	24	15	9
	2 <sup>o</sup> camada	127	27	14	15
	2 <sup>o</sup> camada	130	25	23	12
AD4 11/11	1 <sup>a</sup> camada	130	25	15	11
	2 <sup>o</sup> camada	151	30	21	11
AD5 12/9	1 <sup>a</sup> camada	151	30	19	12
	2 <sup>o</sup> camada	130	25	20	9

As soldas foram realizadas em juntas semi-V seguindo a seqüência da Figura 3.3.

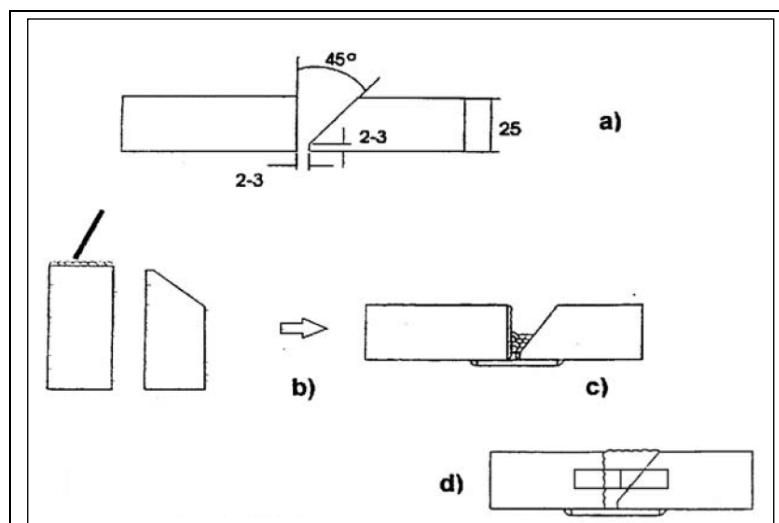


Figura 3.3: Seqüência de deposição. (a) preparação da junta, (b) amanteigamento sobre a face reta do chanfro, (c) posicionamento e preenchimento da junta e (d) retirada dos corpos de prova Charpy (BUENO, 1999).

Para realização das soldas foram empregadas as diversas relações de energia, escolhidas de acordo com os resultados do teste de Higuchi, conforme mostra a Tabela 5 mostrada anteriormente. O preenchimento da junta foi realizado conforme parâmetros de soldagem mostrados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Parâmetros de soldagem para o preenchimento da junta.**

Parâmetros	Passe de raiz	Passe de preenchimento
<b>Corrente Eficaz (A)</b>	110	151
<b>Tensão Eficaz (V)</b>	25	25
<b>Velocidade de Soldagem (cm/min)</b>	Critério do soldador	
<b>Diâmetro do eletrodo (mm)</b>	3,20	3,25

### 3.2.3 Preparação dos Corpos de Prova

Realizadas as soldagens por dupla camada, foram preparados os corpos de prova para a realização do ensaio de Charpy. Foram retiradas 3 amostras de cada corpo de prova utilizando-se serra-fita para cortar os corpos perpendicularmente as soldas e depois os mesmos foram usinados na fresa sendo os entalhes de 2 mm feitos em uma fresa.

Foi realizado ataque químico com nital 2% para assim evidenciar a ZAC de forma que o entalhe fosse feito nesta região.

## 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Teste de Higuchi

A Figura 4.1 mostra o perfil das barras submetidas à têmpera, segundo os parâmetros definidos na metodologia. Pela figura é verificado que a profundidade de atuação da têmpera é bem pequena, chegando à ordem de 2,5 mm. É verificado, no entanto, que a dureza média do material no centro do corpo de prova é na ordem de 400 HV, apresentando valores de uma martensita revenida. Tal valor é de suma importância para se estabelecer um parâmetro de referência no que tange à definição dos limites da zona dura e da zona macia.

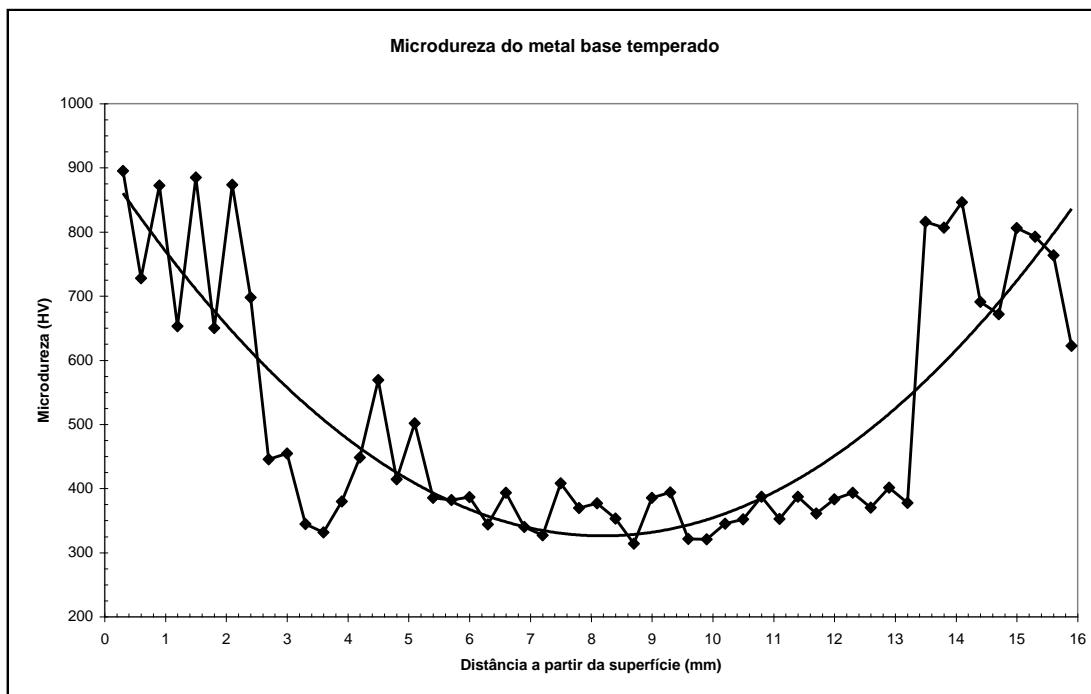


Figura 4.1: Perfil de microdureza do aço AISI 1045 temperado e não revenido.

A partir do levantamento do perfil de dureza do metal de base submetido à têmpera sem revenimento pode se verificar a atuação de cada energia imposta pelo processo de soldagem com eletrodo revestido. As Figuras 4.2 a 4.7 retratam os perfis de dureza para a solda com diferentes níveis de energia para a soldagem do aço AISI 1045, quando este é submetido à têmpera, conforme é especificado no procedimento (metodologia).

Nessas figuras é possível observar a extensão das zonas duras e macias através da interseção da linha de referência (400 HV) com a curva gerada pelo perfil de dureza. Observa-se nesses perfis de dureza que existe uma leve tendência de cisalhamento tanto na zona dura quanto na zona macia com o aumento da energia de soldagem.

A Tabela 7 retrata este efeito. De posse de tais resultados é possível verificar as condições sugeridas pelo teste de Higuchi, confrontando os resultados da Tabela com o diagrama mostrado na Figura 4.8 (Gráfico de Higuchi). Assim, levando-se em consideração que a profundidade da zona macia da segunda camada tenha de ser superior à profundidade da zona dura da primeira camada e que a profundidade da zona dura segunda camada terá de ser inferior à soma da penetração e reforço da primeira camada, pode-se chegar a pares adequados, sem a presença de fatores capazes de gerar problemas de fissuração pós-soldagem. Nessas regiões, devido a estrutura revenida pelo passe de soldagem consecutivo, os problemas de trinca estariam minimizados. A Tabela 8 mostra diversos pares de energia satisfazer os critérios sugeridos por Higuchi.

Vale ressaltar que um fator importante a ser observado em tal trabalho é a possibilidade de gerar uma base de dados capaz de ser implementada em campo, como foi proposto na metodologia. Como todas as soldagens foram desenvolvidas por um soldador, através de uma qualificação prévia, com os parâmetros abordados é possível repetir tal metodologia em campo.

Segundo a literatura (AZEVEDO 2002, AGUIAR 2001 e NINÔ, 2001), a escolha de energia em relações entre 1:1, 1:2 ou 2:1 é mais possível de se verificar a constatação do que é estabelecido por Higuchi. Assim, conforme o estudo da Tabela 8 estabeleceram-se os seguintes pares de energia para a constatação do teste de Higuchi pela técnica da dupla camada: 17/17; 9/23; 12/12; 12/23; 23/12.

Observa-se que os pares escolhidos encontram-se dentro dos limites citados pela literatura (1:1; 1:2 e 2:1).

A Tabela 10 mostra o resultado do teste de tenacidade ao impacto. Nesta tabela retrata-se tanto o resultado para a ZAC gerada pelo par de energias utilizado na técnica, quanto o resultado do material como recebido. Vale ressaltar que todos os testes foram realizados a temperatura ambiente.

Pelos dados é observado que a tenacidade ao impacto do material como recebido mostra-se em patamares inferiores aos observados pelo material

submetido à técnica de dupla camada. Como, constatou-se que, a técnica é viável, se confirmando os resultados mostrados por Assumpção 2006, onde a mesma esta técnica para o processo MIG/MAG.

Com isso mostra-se que tal metodologia é possível de ser empregada em campo com os devidos ajustes. Salienta-se a necessidade de qualificação prévia, tanto do procedimento, quanto do operador (soldador).

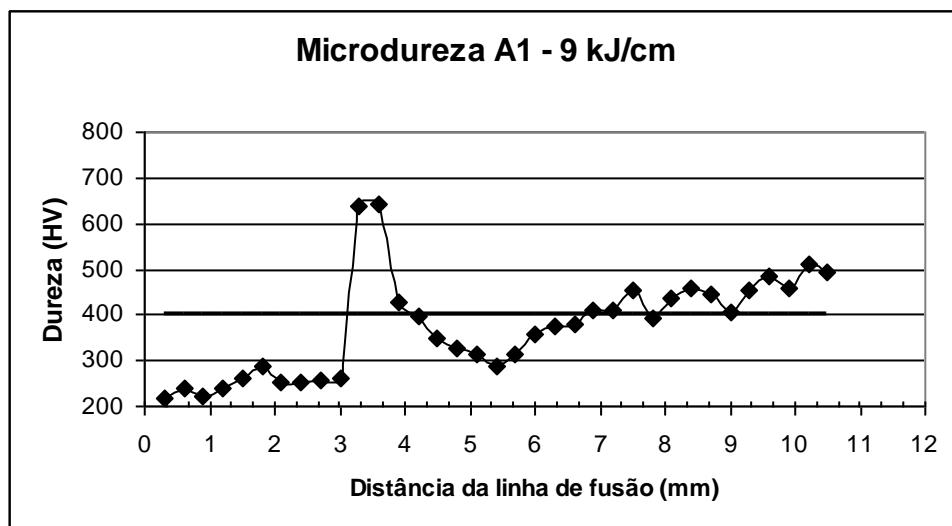


Figura 4.2: Perfil de microdureza para a energia de 9kJ/cm.

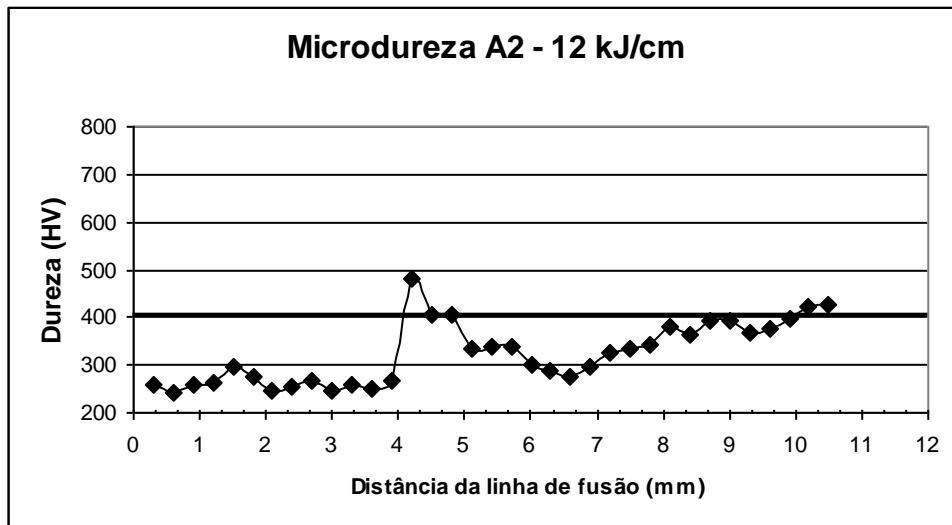


Figura 4.3: Perfil de microdureza para a energia de 12kJ/cm.

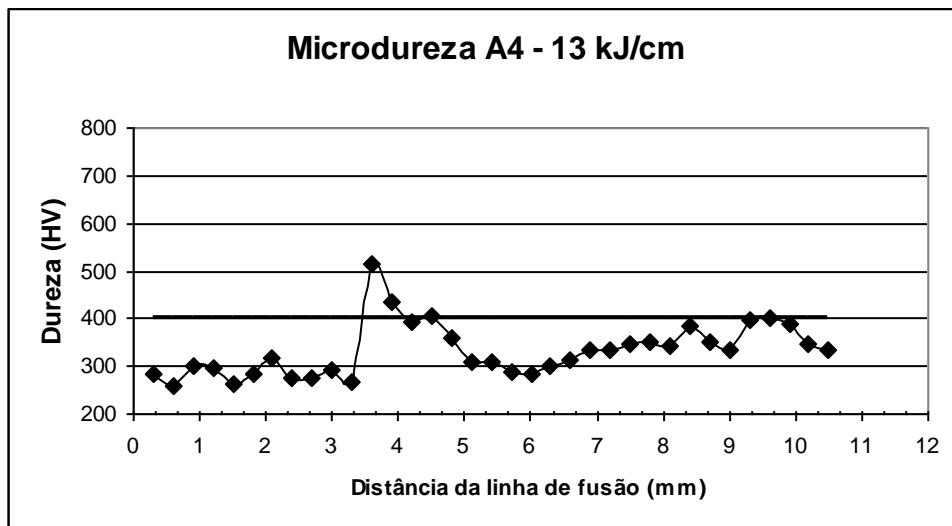


Figura 4.4: Perfil de microdureza para a energia de 13kJ/cm.

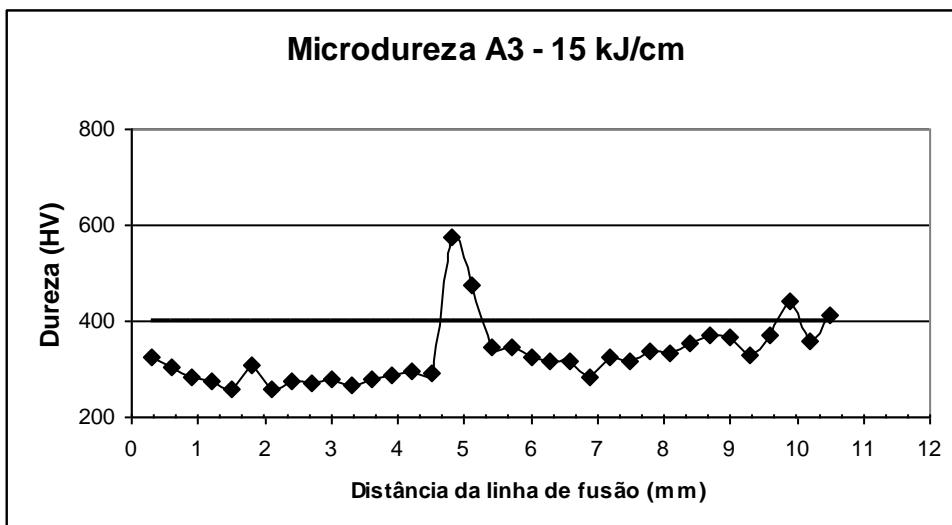


Figura 4.5: Perfil de microdureza para a energia de 15kJ/cm.

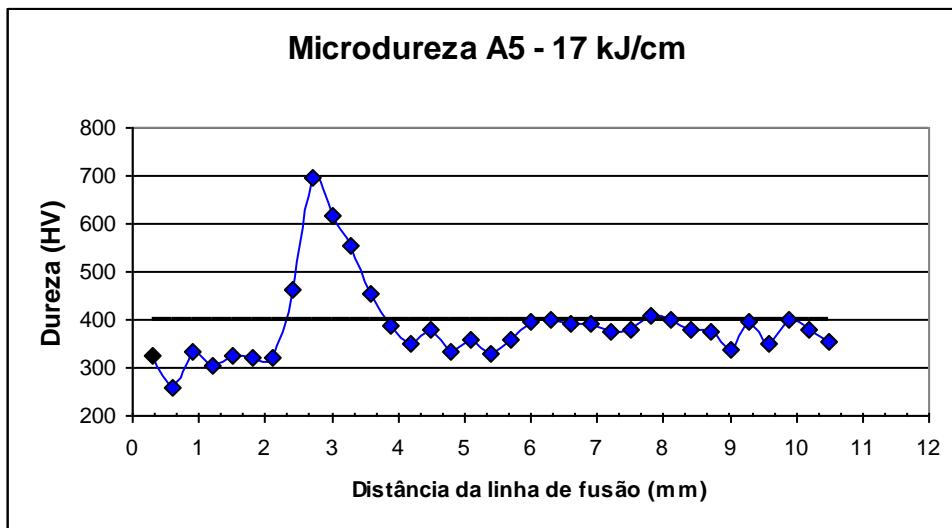


Figura 4.6: Perfil de microdureza para a energia de 17kJ/cm.

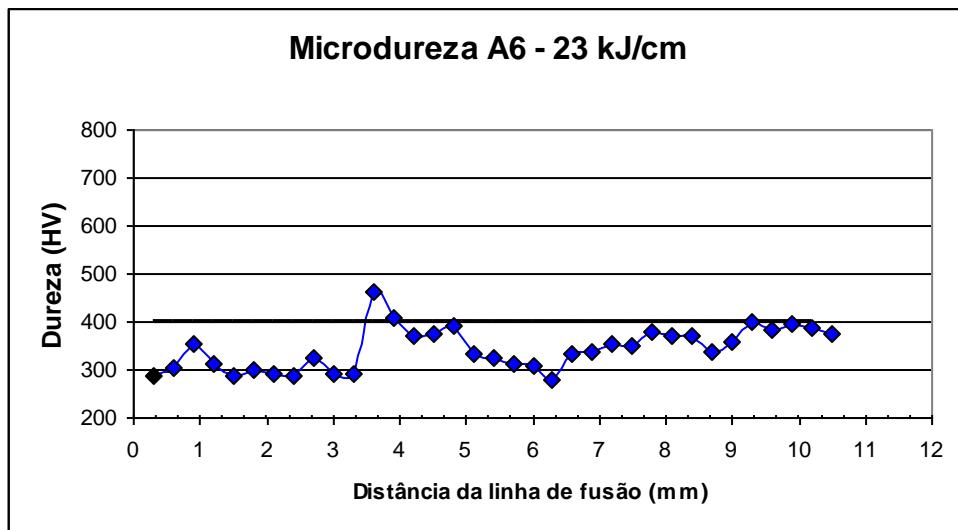


Figura 4.7: Perfil de microdureza para a energia de 23 kJ/cm.

**Tabela 7 – Valores de reforço e penetração.**

Corpo de prova	Energia de soldagem (kJ/cm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)
A1	9	1,8	1,3
A2	12	2,5	1,4
A3	15	2,6	1,6
A4	13	2,3	1,2
A5	17	2,2	1,2
A6	23	2,6	1,6

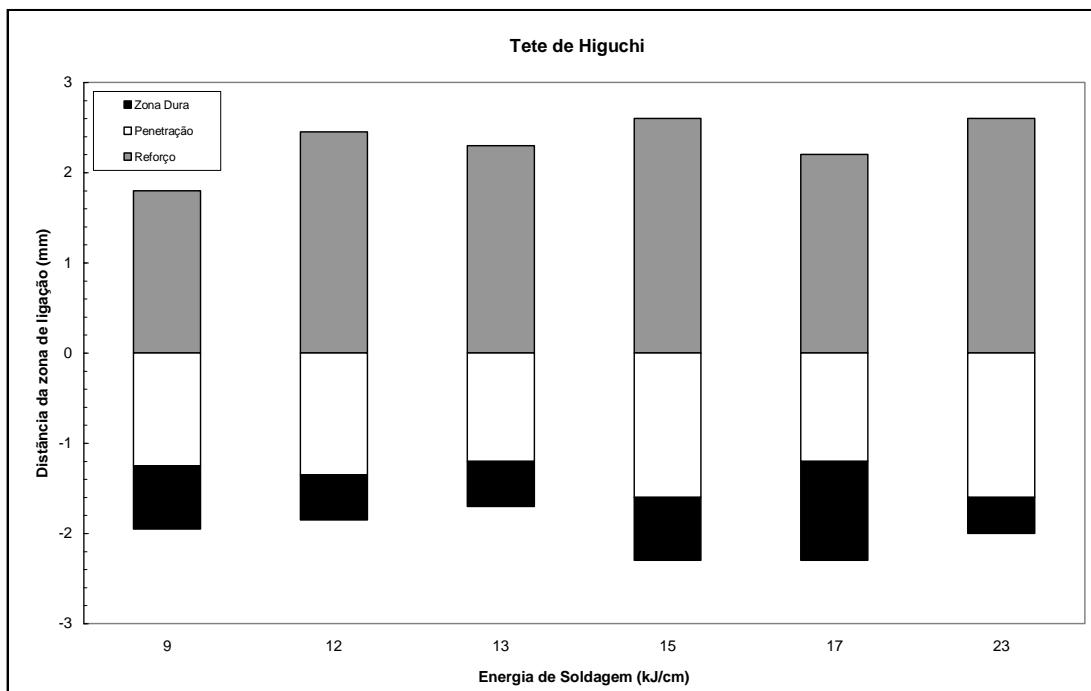


Figura 4.8: Gráfico de Higuchi

Na Tabela 8 verifica-se a avaliação deste critério, onde a maioria dos resultados é favorável a esta condição.

**Tabela 8 - Relações de energia**

Relações de Energia	Relação atende?
9/9	ok
9/12	ok
9/13	ok
9/23	ok
12/9	não
12/12	ok
12/13	ok
12/23	ok
15/12	ok
15/13	não
9/15	ok
15/17	não
15/23	ok
17/9	não
17/12	ok
17/13	ok
17/15	ok
17/17	ok
17/23	ok
23/9	não
23/12	ok

As Figuras 4.9 a 4.13 mostram as microestruturas de alguns dos corpos de prova submetidos à soldagem de dupla camada.

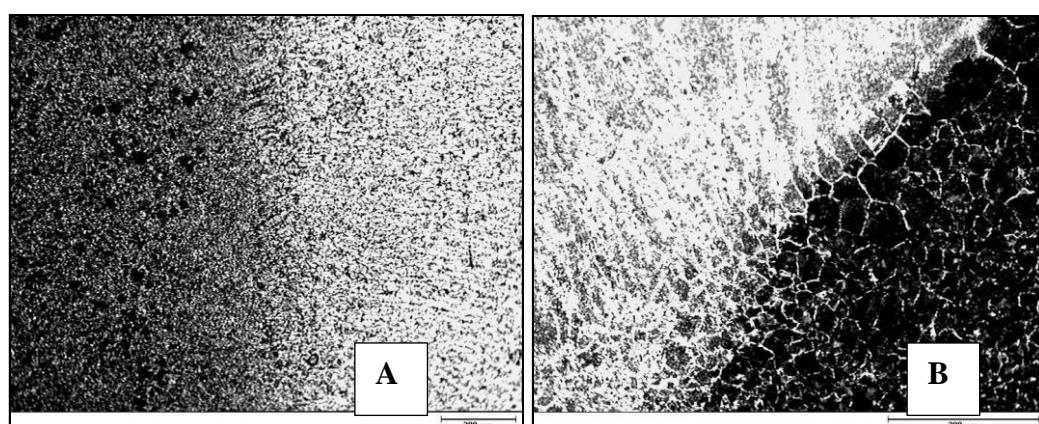


Figura 4.9: AD 12/12. A) Região de dupla camada; B) Região do chanfro, 100X.

Ataque: nital 2%

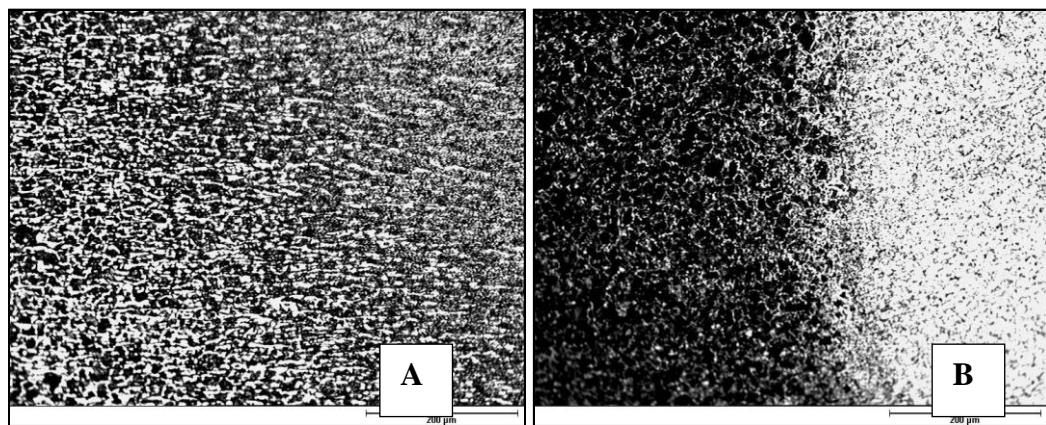


Figura 4.10: AD 9/15. A) Região do metal base; B) Interface da ZF com ZAC, 100X.

Ataque: nital 2%

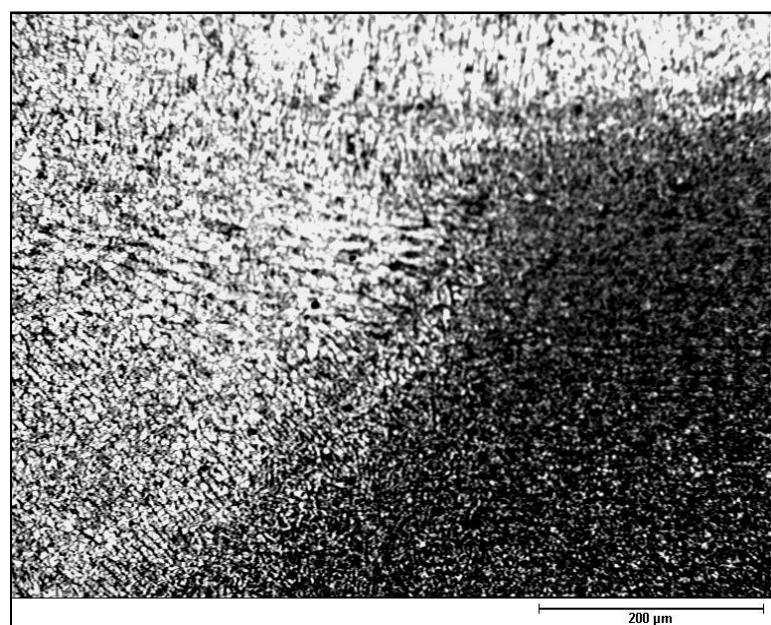


Figura 4.12: AD 11/11. Região ZAC entre passes, 100X. Ataque: nital 2%

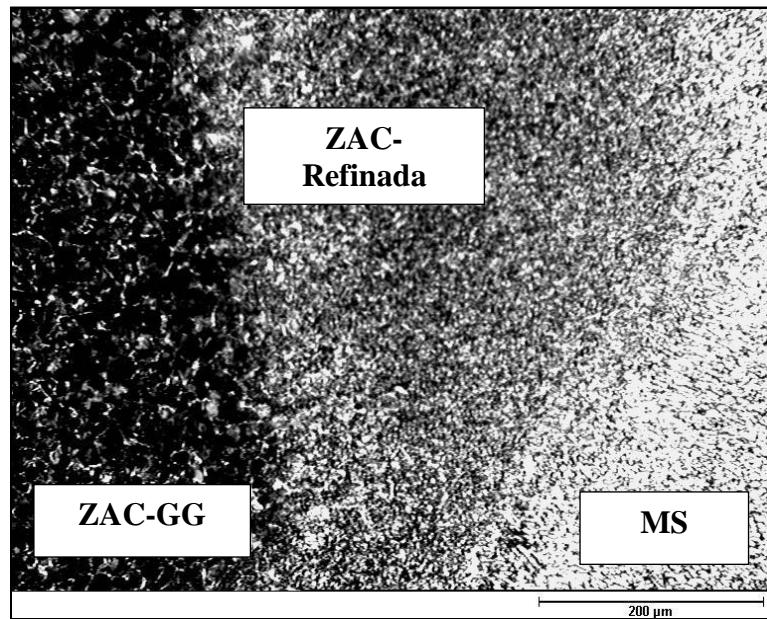


Figura 4.13: AD 12/9. Regiões do corpo de prova, 100X. Ataque: nital 2%

Realizadas as soldas, seguiu-se com o preparo dos corpos de prova Charpy.

## 4.2 Ensaio de Impacto Charpy

Foram realizados os ensaios Charpy nos corpos de prova, como mostra a Tabela 10. Tais resultados foram de fundamental importância para avaliação dos procedimentos de soldagem adotados. Para cada energia foram realizados 3 ensaios, e calculada a energia média obtida nos ensaios.

**Tabela 9 - Resultados do Ensaio de Impacto Charpy.**

Corpo de Prova	Energia absorvida (J)			
	CP1	CP2	CP3	Média
AD 12/12	23	18	24	21
AD 9/15	146	33	147	33
AD 11/11	21	21	24	22
AD 12/9	15	20	18	17
<b>Metal Base</b>	15	14	13	14

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados alcançados neste trabalho, pode-se concluir que:

- Foi feito o entalhe do corpo de prova do metal base na sua direção de laminação por isso o metal base absorveu menor energia.
- A realização dos passes de soldas na dupla camada por um soldador profissional ajudou a verificar a eficiência do uso do processo de eletrodo revestido nesta técnica.
- A técnica da dupla camada aplicada ao aço AISI 1045 se mostrou eficiente, pois se verificou que a tenacidade obtida nos corpos soldados foi superior à tenacidade do metal de base.
- A eficiência na aplicação da soldagem por eletrodo revestido é de grande importância, principalmente em situações em que se precisa soldar em campo, em locais de difícil acesso.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a aplicação da dupla camada para outro processo de soldagem.

Avaliar o efeito do grau de inclusões sobre desempenho da técnica da dupla camada.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- AGUIAR, W.M., **Soldagem do aço ABNT 4140 sem Tratamento Térmico posterior**. Fortaleza, Dissertação de mestrado-Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Critério de Classificação dos Aços**, NBR NM 172/2000. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSUMPÇÃO, G. A., **Estudo da Técnica Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. Vitória, 2006. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo.
- AZEVEDO, A. G. L., **Aplicação da Técnica da Dupla Camada na Soldagem do aço ABNT 1045**. Dissertação de mestrado-Programa de Engenharia e Ciências de Materiais, Universidade Federal do Ceará, 2002.
- BUENO, E. R. **Desenvolvimento do Procedimento de Soldagem do Aço AISI 4140 sem Tratamento Térmico Posterior**. Dissertação de mestrado. Florianópolis, 1999. Universidade Federal de Santa Catarina.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 1988.
- CUNHA, L.J.G. (1985). **Solda: como, quando e por que**. Porto Alegre, Sagra Editora
- ESAB. **Apostila Técnica: Metalurgia da Soldagem**. São Paulo: 2004.
- GAYLORD, H.E.; GAYLORD, C.N.; STALLMEYER, J.E. (1992). **Design of steel structures**. 3<sup>a</sup>.ed. New York, McGraw-Hill.
- GRAVILLE, B. A., **Cold Cracking in Welds in HSLA Steels**. Welding of HSLA (microalloyed) Structural Steels, Proc. Int. Conf., American Society for Metals, 1976
- Metals Handbook., **Weldability of Steel**. 10ed. Ohio: American Society for Metals, v.4, 1991.
- MODENESI, P. J., Marques, P. V., Santos, D. B., **Curso de Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 1992. 297p.
- MODENESI, P., **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 128p.
- MODENESI, P., **Soldagem de Liga Metálicas**. Belo Horizonte: UFMG, 2001. 29p.
- MODENESI, P., **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 128p.
- NINÓ, C. E. B., **Especificação de procedimentos de reparo por soldagem sem tratamento térmico posterior -- Efeito de revenimento produzido pelos ciclos térmicos**. Florianópolis, 2001.Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

OLSEN, K. et al. **Weld bead Tempering of the Heat-Affected Zone.** Scandinavian. Journal of Metallutgy, nov/1982. p. 163-168.

OWENS, G.W.; CHEAL, B.D. **Structural steelwork connections.** London, Butterworth. 1989

QUITES, A.M.; DUTRA, J.C. **Tecnologia da soldagem a arco voltaico.** Florianópolis, 1979, EDEME.

SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços.** São Paulo, 2001.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. (1992). **Soldagem: processos e metalurgia.** São Paulo, Edgard Blücher.