



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**



**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO MARTELAMENTO PARA O ALÍVIO
DE TENSÕES EM SOLDAS DE AÇOS**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção de grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS

RICARDO TOLEDO BERGAMO

Florianópolis, abril de 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO MARTELAMENTO PARA O ALÍVIO
DE TENSÕES EM SOLDAS DE AÇOS

RICARDO TOLEDO BERGAMO

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Sendo aprovada na sua forma final.

Prof. Dr. Eng. Carlos Enrique Niño – Orientador

Prof. Rer. Nat. Alexandre Lago – Coordenador do Programa

BANCA EXAMINADORA

Prof. D.Sc. Carlos Augusto Silva de Oliveira - Presidente

Prof. Dr. Ing. Augusto José de Almeida Buschinelli

Prof. Dr. Eng. Pedro Amedeo Nannetti Bernadini

DEDICO ESTE TRABALHO:

A Deus: pela vida, pela saúde e pela família com que me presenteou; aos meus pais, Rubem e Maria José, por todo amor que sempre me deram, pela dedicação e carinho com que me educaram e pelos exemplos de honestidade e caráter com que guiaram e me guiam;

Aos meus irmãos Rubem, Adriana, Cristiane e Paulo Roberto, por todos os anos de partilha, que me ensinaram a conviver e compartilhar a vida.

A minha querida filha Maria Luiza e ao meu amor Cristiane, por todo amor e companheirismo nos momentos presentes, pela compreensão e paciência durante as ausências, pelo incentivo nos momentos de fraqueza e por me trazer de volta à realidade nos momentos de devaneios....vocês tornam tudo melhor e mais fácil.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Carlos Niño, pela orientação e estímulo para a elaboração do presente trabalho.

Ao Prof. Augusto Buschinelli, pela confiança e apoio que me proporcionou nos momentos de dificuldades.

À CAPES pelo estímulo da bolsa de mestrado.

Aos bolsistas e colaboradores deste projeto, Marcio Pincinato, Bruno Ventura, Rodrigo Sensaki, Vladimir, pela colaboração durante a realização dos ensaios.

Aos amigos Carlos Augusto, Luiz Scheid, Jaime Villanueva, Vitor Vegara, Guber Eduardo, Wilson Tafur, Fernando Abdalla, Nilceu Novicki, pelos bons momentos de descontração que eles me proporcionaram.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais.

Aos membros do LABSOLDA e do LABMAT e todos outros que por ventura não mencionei aqui.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELA.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRAT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Deformação dos metais.....	3
2.1.2 Deformação elástica dos metais.....	3
2.2 Deformação plástica de cristais metálicos.....	3
2.2.1 Propriedades dos metais deformados plasticamente.....	3
2.2.2 Deformação plástica a frio “encruamento”.....	4
2.2.3 Recristalização.....	4
2.2.4 Recuperação.....	5
2.2.5 Deformação plástica a quente.....	5
2.3 Desenvolvimento das tensões residuais.....	6
2.4 Tensões residuais em soldagem.....	6
2.5 Métodos para a determinação das tensões residuais nos materiais.....	10
2.5.1 Difração de raios-X.....	11
2.5.2 Difração de nêutrons.....	11
2.5.3 Método do furo cego com extensômetros.....	12
2.5.4 Método do furo com técnicas ópticas.....	12
2.5.5 Técnicas ultra-sônica para a medição das tensões residuais	13
2.5.6 Método do contorno.....	13
2.5.7 Método pela distorção angular.....	16
2.6 Métodos de alívio de tensões residuais.....	17
2.6.1 Alívio de tensões por tratamento térmico.....	17
2.6.2 Alívio de tensões por processos mecânicos.....	17
2.6.3 Jateamento por granalha (Shot peening).....	17
2.6.4 Martelamento (Hammer Peening).....	20
2.6.5 Controle do processo.....	21
2.6.6 Procedimentos para o martelamento.....	21
2.6.7 Efeito do martelamento na redução das tensões residuais.....	22

2.6.8	Efeitos nas propriedades mecânicas.....	25
3.	OBJETIVOS.....	31
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1	Materiais.....	32
4.2	Aquisição do Ciclo térmico no cordão de solda.....	32
4.3	Temperaturas de martelamento.....	33
4.4	Sistema de Soldagem.....	34
4.5	Parâmetros de soldagem.....	35
4.6	Confecção dos corpos de provas.....	36
4.6.1	Soldagem em camadas.....	36
4.7.2	Soldagem em junta “V”.....	37
4.7	Procedimento de martelamento.....	40
4.7.1	Soldagem em camadas.....	40
4.7.2	Soldagem em junta “V”.....	40
4.8	Determinação das tensões residuais.....	41
4.8.1	Método do contorno soldagem em camadas.....	41
4.8.2	Método da distorção angular soldagem em junta “V”.....	43
4.9	Avaliação das propriedades mecânicas do metal de solda martelado.....	44
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1	Ciclo térmico no cordão de solda.....	45
5.2	Determinação das tensões residuais pelo método do contorno (soldagem em camadas).....	47
5.3	Resultados das tensões residuais pelo método da distorção angular (soldagem em junta “V”).....	51
5.3.1	Martelamento do metal de adição E-7018.....	51
5.3.2	Martelamento do metal de adição E-316-16.....	61
5.3.3	Martelamento do metal de adição E-502-15.....	70
5.3.4	Martelamento do metal de adição E-505-15.....	78
6.	CONCLUSÕES.....	87
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
APÊNDICES		
Apêndice 1	– Resultados das medições de planezas das faces.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Δ = Variação.

θ = Temperatura.

σ_e = Tensão de escoamento.

σ_t = Tensão Transversal.

σ_l = Tensão longitudinal.

σ_{YS} = Limite de escoamento.

α = Coeficiente de expansão

E = Módulo de elasticidade.

k = Condutibilidade térmica.

ΔU = Energia interna do material.

ΔS = Variação da entropia.

ΔF = Variação da energia livre.

ΔH = Variação da entalpia.

ρ = densidade de discordâncias num instante t.

ρ_0 = densidade inicial de discordâncias.

P = Pressão.

V = Volume.

T = Temperatura.

V_s = Velocidade de Soldagem.

CP = Corpo de prova.

MB= Metal de Base.

MS= Metal de solda.

LF= Linha de Fusão.

ZAC= Zona Afetada pelo Calor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cinética de recuperação de um metal encruado.....	5
Figura 2 - Distribuição transversais de temperaturas e tensões residuais em uma deposição de metal de solda.....	8
Figura 3 - Distribuição típica de tensões residuais em uma união de topo.....	7
Figura 4 - Distribuição de temperatura e zona plastificada de uma chapa soldada.....	8
Figura 5 - Distribuição de tensões longitudinais e transversais transversalmente a uma chapa soldada.....	9
Figura 6 - Variação das tensões residuais transversais (σ_t) de uma chapa soldada.....	10
Figura 7 - Exemplo prático de uma fonte de raio-X, executando o ensaio em uma amostra.....	11
Figura 8 - Distribuição dos extensômetros ao redor do furo realizado na chapa.....	12
Figura 9 - Ilustração do princípio de superposição elástica de Bueckner's que é aplicado ao método do contorno.....	14
Figura 10 - Medidor de coordenadas que utiliza um apalpador com um toque de 1.5 μm de repetibilidade.....	15
Figura 11 - Uma curva típica obtida pelo medidor de coordenadas.....	15
Figura 12 - Distorções básicas: (a) Contração transversal; (b) Contração longitudinal e (c) Distorção angular.....	16
Figura 13 - Esquema com a utilização de chapa Almen.....	18
Figura 14 - Elementos para a medição da intensidade do jateamento: (a) Plaquetas de Almen ; (b) Bloco de apoio da plaqueta; (c) Dispositivo de medição e controle da plaquetas Almen.....	20
Figura 15 - Martelo de punção.....	22
Figura 16 - O modelo de ferramenta utilizado no martelamento por DeGarmo, Jonassem e Meriam.....	23
Figura 17 - Ferramentas tipo "CHISEL".....	25
Figura 18 - Comparação entre as curvas de impacto do metal martelado lentamente com o martelado rapidamente e o não martelado.....	26
Figura 19 - Comparação entre as curvas de impacto dos metais martelados e sobremartelados.....	27
Figura 20 - Efeito do Martelamento nas curvas de impacto dos metais de solda depositados com eletrodos E-6010 e E-6016.....	28

Figura 21 - Efeito do martelamento nas curvas de impacto dos metais de solda depositados com eletrodos E-6010 e solda ao arco submerso.....	29
Figura 22 - Perfis de dureza do CP martelado.....	30
Figura 23 - Sistema de aquisição do ciclo térmico.....	32
Figura 24 - Pontos de imersão do termopar ao longo do cordão.....	33
Figura 25 – Sistema de soldagem; (a) fonte de soldagem; (b) Sistema de deslocamento.....	34
Figura 26 - Desenho esquemático do dispositivo para restrição dos CPs.....	36
Figura 27 - Seqüência de soldagem dos cordões que foram distribuídos homogeneamente ao longo da chapa.....	37
Figura 28 - Desenho esquemático do corpo de prova com união em “V”.....	37
Figura 29 - O amanteigamento com os eletrodos E-316L-16; E-502-15; E-505-15 realizado com duas camadas seguido de esmerilhamento para correção da geometria da borda antes da soldagem do chanfro.....	38
Figura 30 - Dispositivo utilizado para fixação e preaquecimento dos CPs.....	39
Figura 31 - Dimensões da ferramenta utilizado no martelamento: (a) Punção; (b) Agulhas.....	40
Figura 32 - Preparação das amostras para medir as tensões pelo método do contorno: (a) Posições do corte por eletro-erosão a fio (b) posicionamento das retas no medidor de coordenadas.....	42
Figura 33 - Preparação das secções de corte onde serão avaliadas as distorções angulares: (a) Corte da secção transversal; (b) desbaste do excesso de material do passe de raiz; (c) medição da distorção.....	43
Figura 34 - Esquema da macroestrutura da solda e do cordão onde foram realizados os ensaios.....	44
Figura 35 - Região onde o termopar foi imerso para a aquisição da taxa de resfriamento, E-7018, T= 20 segundos, I= 125 A.....	45
Figura 36 - Aquisição dos Ciclos térmicos com seus respectivos tempos.....	46
Figura 37 - Superfícies marteladas; (a) com punção (b) com agulhas.....	48
Figura 38 - Indica as faces e sentido de soldagem para referência do martelamento a baixa, média e alta temperatura.....	46
Figura 39 - Gráficos tridimensionais da planicidade encontrados em cada face espelhada, correspondendo ao martelamento a baixa temperatura cujas as faces são 1-F ₁ 2- F ₁	50

Figura 40 - Distorção angular dos corpos de provas devido às tensões geradas na soldagem, em CPs soldados com eletrodo E-7018; (a) Sem martelar; (b) Martelado a alta temperatura; (c) Martelado a baixa temperatura.....	52
Figura 41 - Macrografias a 10x das soldas realizadas com metal de adição E-7018 ; (a) Sem martelamento; (b) com martelamento a alta temperatura; (c) com martelamento a baixa temperatura.....	53
Figura 42 - Microestruturas do CP E-7018 sem martelamento.....	55
Figura 43 - Microestruturas do CP E-7018 martelado a alta temperatura.....	56
Figura 44 - Microestruturas do CP E-7018 martelado a baixa temperatura.....	57
Figura 45 - Micrografias do último cordão do E-7018 onde podem ser observadas as impressões de dureza: (a) CP sem Martelamento, (b) CP martelado a alta temperatura, (c) CP martelado a baixa temperatura.....	58
Figura 46 - Valores das microdurezas realizadas nos CPs E-7018.....	59
Figura 47 - As profundidades de encruamento para os CPs martelados.....	60
Figura 48 - Distorção angular dos corpos de provas devido às tensões geradas na soldagem, em CPs soldados com eletrodo E-316L-16; (a) Sem martelar; (b) Martelado a alta temperatura; (c) Martelado a baixa temperatura.....	61
Figura 49 - Macrografias a 10x das soldas realizadas com metal de adição E-316L-16 ; (a) Sem martelamento; (b) com martelamento a alta temperatura;(c) com martelamento a baixa temperatura.....	62
Figura 50 - Microestruturas do corpo de prova E-316L-16 sem martelamento.....	64
Figura 51 - Microestruturas do CP E-316L-16 martelado a alta temperatura.....	65
Figura 52 - Microestruturas do CP E-316L-16 martelado a baixa temperatura.....	66
Figura 53 - Micrografias do último cordão do E-316L-16 onde podem ser observadas as impressões de dureza: (a) CP sem Martelamento, (b) CP martelado a alta temperatura, (c) CP martelado a baixa temperatura....	67
Figura 54 - Valores das microdurezas realizadas nos CPs E-316L-16.....	68
Figura 55 - As profundidades de encruamento para os CPs martelados.....	69
Figura 56 - Ferramenta danificada em função da alta dureza do material de solda E-502-15.....	69
Figura 57 - Distorção angular dos corpos de provas devido às tensões geradas na soldagem, em CPs soldados com eletrodo E-502-15; (a) Sem martelar; (b) Martelado a alta temperatura; (c) Martelado a baixa temperatura.....	70

Figura 58 - Macrografias a 10x das soldas realizadas com metal de adição E-502-15 ; (a) Sem martelamento; (b) com martelamento a alta temperatura;(c) com martelamento a baixa temperatura.....	71
Figura 59 - Microestruturas do CP E-502-15 isento de martelamento.....	72
Figura 60 - Microestruturas do CP E-502-15 martelado a alta temperatura.....	73
Figura 61 - Microestruturas do CP E-502-15 martelado a baixa temperatura.....	74
Figura 62 - Micrografias do último cordão do E-502-15 onde podem ser observadas as impressões de dureza: (a) CP sem Martelamento, (b) CP martelado a alta temperatura, (c) CP martelado a baixa temperatura...	75
Figura 63 - Valores das microdurezas realizadas nos CPs E-502-15.....	76
Figura 64 - As profundidades de encruamento para os CPs martelados.....	77
Figura 65 - Distorção angular dos corpos de provas devido às tensões geradas na soldagem, em CPs soldados com eletrodo E-505-15; (a) Sem martelar; (b) Martelado a alta temperatura; (c) Martelado a baixa temperatura.....	78
Figura 66 - Macrografias a 10x das soldas realizadas com metal de adição E-505-15; (a) Sem martelamento; (b) com martelamento a alta temperatura; (c) com martelamento a baixa temperatura.....	79
Figura 67 - Microestruturas do CP E-505-15 sem de martelamento.....	80
Figura 68 - Microestruturas do CP E-505-15 martelado a alta temperatura.....	81
Figura 69 - Microestruturas do CP E-505-15 martelado a baixa temperatura.....	82
Figura 70 - Micrografias do último cordão do E-505-15 onde podem ser observadas as impressões de dureza: (a) CP sem Martelamento, (b) CP martelado a alta temperatura, (c) CP martelado a baixa temperatura...	83
Figura 71 - Valores das microdurezas realizadas nos CPs E-505-15.....	84
Figura 72 - As profundidades de encruamento para os CPs martelados.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Valores relativos de propriedades de metais (aço carbono =1).....	17
Tabela 02 - Padronização das espessuras dos três tipos de plaquetas usadas no ensaio Almen.....	19
Tabela 03 - Variáveis de soldagem utilizado para a confecção dos CP.....	35
Tabela 04 - Parâmetros utilizados na confecção de todos os CPS.....	38
Tabela 05 - Taxa de resfriamento para cada instante de imersão do termopar.....	46
Tabela 06 - Temperaturas de martelamento no cordão de solda para Soldagem em camadas.....	47
Tabela 07 – Resumo dos resultados encontrados.....	86

RESUMO

AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO MARTELAMENTO PARA O ALÍVIO DE TENSÕES EM SOLDAS DE AÇOS.

Neste trabalho foi feita uma avaliação da eficácia do martelamento para a redução das distorções e o alívio de tensões em soldas envolvendo aços ferríticos e austeníticos. Para isto, foram utilizados quatro tipos eletrodos revestidos: E-7018, E-316-16, E-502-15 e E-505-15. A escolha destes metais de adição foi especialmente em função das diferenças metalúrgicas que existem entre eles, abrangendo assim desde um aço austenítico até aços com transformação martensítica. A metodologia escolhida para avaliar as tensões residuais foi a da distorção angular. A distorção foi medida em corpos de prova soldados sem martelamento e em corpos soldados e martelados em dois momentos diferentes depois de depositado cada cordão, isto para verificar os resultados do martelamento a dois níveis de temperatura diferentes. Os resultados do martelamento foram avaliados quanto à profundidade do encruamento e aos efeitos metalúrgicos nos metais de solda. Com isso pode-se concluir que: a) a deformação superficial, ou seja, a moessa impressa pelo processo de martelamento, atinge pequenas profundidades menores que 200 microns, sendo de fácil remoção por processos simples de esmerilhamento; b) o processo de martelamento mostrou-se eficaz para alívio de tensões principalmente para o metal de adição E-7018, tanto o executado a alta como o a baixa temperatura, não se notou diferença metalúrgica nos cordões que foram martelados e depois receberam o calor dos passes de solda subseqüentes; c) o metal de adição E-316L-16 mostrou-se muito sensível ao encruamento por deformação, atingindo altos valores de dureza, assim como uma grande profundidade de encruamento não sendo, portanto, adequado utilizar o martelamento nesse material; d) a transformação martensítica nas soldas realizadas com eletrodos E-502-15 e E-505-15 produziu uma forte redução da distorção angular, o que dificultou a comparação dos resultados obtidos com o martelamento em relação às tensões.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF HAMMER PEENING FOR STRESS RELIEF IN STEEL WELDS

In this work an evaluation of the effectiveness of the hammer peening was made for stress relief in welds involving ferritic and austenitic steels. For this, four types of welding consumables were used: E-7018, E-316-16, E-502-15 (5Cr0,5Mo) and E-505-15 (9Cr1Mo). The choice of these consumables was especially in function of the metallurgic difference that exists among them, thus enclosing from austenitic steel to steels with martensitic transformation. The characteristic used to evaluate the residual stresses was the angular distortion. The distortion was measured in welded samples without hammer peening and other welded and hammered at two different moments after deposited each weld bead, this to verify the results of the hammer peening at two different temperature levels. They were evaluated the strain hardening and metallurgical effects in weld metals. With this it can be concluded that: a) the superficial deformation, that is, the dent produced by the peening process reaches small depths (less than 200 microns), being of easy removal simple processes; b) the hammer peening process revealed efficient for relief of residual stresses in E-7018 welds, welds regions that had been strained by hammer peening and later were reheated by the subsequent welds; c) welds done with E-316L-16 revealed sensible to strain hardening reaching high hardness values as well as a high strain hardening depth, at whichever peening temperature; d) the martensitic transformation in welds done with E-502-15 and E-505-15 electrodes produced a strong reduction of the angular distortion, which made it difficult to compare the results obtained hammer peening in relation to the residual stresses.

1. Introdução

O martelamento é um método indicado em códigos de fabricação e literatura sobre soldagem de reparo, como sendo adequado para aliviar as tensões produzidas na soldagem como efeito dos gradientes de temperaturas.

Os efeitos atribuídos ao martelamento são diversos: (i) Indução de tensões compressivas, (ii) Alívio de tensões residuais. Ambos efeitos são benéficos nos seguintes casos: (i) componentes soldados sujeitos a esforços dinâmicos, que possam resultar em falhas por fadiga, (ii) durante a soldagem de aços temperáveis, nos quais há maior susceptibilidade às trincas a frio e (iii) no comportamento em serviço de componentes sujeitos a corrosão sob tensão.

Um processo similar conhecido em inglês como “*shot peening*” (jateamento com granalha), é bastante difundido como método de induzir tensões compressivas na superfície (por exemplo, para aumentar a resistência à fadiga de ligas de alumínio para aplicações aeronáuticas) e, às vezes, como uma forma de diminuir a porosidade de camadas de ligas macias.

Para o “*shot peening*” existem normas que prevêm a forma mais adequada de aplicá-lo e os métodos de controle do processo e da qualidade obtida. Quanto ao controle do processo, são especificados os tipos e a granulometria da granalha, a pressão de trabalho, a velocidade de impacto das partículas (existem instrumentos para medir esta velocidade), a abrangência e a energia de impacto obtida (mediante fitas “*Almen*” colocadas ao lado da peça sendo jateada, para receber o impacto em condições similares).

Por outro lado, para o “*Hammer Peening*” (martelamento), seja ele praticado de forma manual (usando um martelo de bola) ou mediante um martelete pneumático, a literatura relativa ao controle do processo é muito escassa, quase inexistente. Assim sendo, mais que um método com embasamento científico, permanece como uma “arte”, aplicada de forma empírica pelos soldadores.

A formação das tensões térmicas durante a soldagem de aços é devido ao aquecimento localizado no qual ao resfriar a peça até a temperatura ambiente, dá origem ao desenvolvimento e permanência de tensões residuais na estrutura ao final do processo.

A avaliação de componentes soldados é muito importante por questões econômicas e por razões de segurança. A integridade destes componentes depende da ausência de defeitos que possam ser prejudiciais, da presença de tensões residuais dentro de níveis aceitáveis (se sua eliminação não for possível) e da presença de uma microestrutura apropriada com as propriedades mecânicas desejadas, para que não haja degradação sob condições de operação.

O martelamento como método de alívio de tensões apresenta algumas vantagens em relação a outros processos, dentre as quais pode-se citar: (i) é de fácil execução e pouco dispendioso; (ii) é de baixo custo, pois não envolve equipamentos sofisticados, nem consumo extra de energia e/ou combustível; (iii) não requer mão de obra qualificada; (iv) pode ser realizado em todos os lugares que permitem o acesso para a soldagem. Porém, o desconhecimento dos efeitos deste processo nas propriedades mecânicas dos metais faz com que as normas existentes adotem uma posição conservativa, restringindo a sua utilização.

O presente trabalho tem por objetivo estudar a eficácia do martelamento tanto a baixas temperaturas em que pode ocorrer encruamento, como o martelamento a altas temperaturas (passíveis de resultar em recristalização) como método de alívio de tensões, e o efeito do mesmo na dureza de metais de solda depositados com eletrodos revestidos de aços ferríticos e austeníticos.

2 Revisão Bibliográfica.

2.1 Deformação dos Metais.

Os metais podem ser deformados tanto elasticamente como plasticamente. Essa deformação pode ser realizada a frio ou a quente, dependendo das características mecânicas que se desejam no material. No caso do martelamento realizado neste trabalho serão discutidos os fenômenos que ocorrem na deformação plástica e as propriedades finais obtidas no material.

2.1.2 Deformação Elástica dos Metais.

A deformação elástica precede à deformação plástica. Quando uma pequena tensão (trativa ou compressiva) é aplicada a uma porção de metal ou, de uma maneira geral, a um cristal qualquer, ocorre a deformação elástica. Quando a solitação trativa é aplicada, o cristal se torna levemente mais comprido na direção da tensão; a remoção da carga faz com que o espécime volte às dimensões originais. Dentro da região de comportamento elástico, a deformação é resultado de uma pequena alongação da célula unitária [1].

2.2 Deformação Plástica de Cristais Metálicos.

Os materiais podem ser solicitados por tensões de tração, de compressão ou de cisalhamento. Como os dois primeiros tipos podem ser decompostos em componentes de cisalhamento e como a maior parte dos metais é significativamente menos resistente ao cisalhamento que a tração ou à compressão, os metais se deformam pelo cisalhamento plástico ou escorregamento de um plano cristalino em relação aos demais. O escorregamento causa um deslocamento permanente (deformação plástica) de modo que ao remover a tensão aplicada os planos cristalinos não retornam às suas posições originais.

2.2.1 Propriedades dos Metais Deformados Plasticamente.

A deformação plástica altera a estrutura interna de um metal; logo, deve-se esperar que a deformação mude as propriedades de um metal. Medidas de resistividade fornecem evidências dessas mudanças.

2.2.2 Deformação Plástica a Frio ou “Encruamento”.

O encruamento é o fenômeno pelo qual um metal se torna mais duro e resistente quando submetido a uma deformação plástica. Algumas vezes esse fenômeno também é chamado de “*endurecimento por trabalho a frio*”, para significar que a deformação é efetuada abaixo da temperatura de recristalização do material. [2].

A energia despendida nos processos de conformação a frio é na maior parte perdida na forma de calor. Entre 2 e 10% dessa energia utilizada na deformação são armazenados no metal na forma de defeitos cristalinos (discordâncias), sendo que, quanto maior a deformação, o percentual de energia armazenada tende a ser menor [3].

A densidade e distribuição dos defeitos gerados na deformação plástica dependem de fatores tais como: (i) estrutura cristalina do metal, (ii) temperatura, (iii) quantidade e velocidade de deformação, (iv) pureza do metal e (v) energia de falha de empilhamento.

2.2.3 Recristalização.

A recristalização pode ser iniciada por diversos fatores como: a) um recozimento, após uma peça ser trabalhada a frio; b) recristalização dinâmica que ocorre junto com uma deformação realizada a quente. Durante o recozimento cada região do metal passa pela seqüência indicada de mudança microestrutural [3]:

- (1) Reação entre defeitos puntiformes levando a uma diminuição da quantidade dos mesmos;
- (2) Aniquilação das discordâncias de sinais opostos e encolhimento dos anéis de discordâncias;
- (3) Rearranjo de discordâncias de modo a formar configurações de menor energia (por exemplo, contornos de baixo ângulo).
- (4) Formação de contornos de alto ângulo;
- (5) Absorção de defeitos puntiformes e discordâncias por contornos de alto ângulo em migração e;
- (6) Redução da área total de contornos de grão.

Os processos citados podem se superpor local e cronologicamente durante o recozimento, mas, como a distribuição de defeitos cristalinos é geralmente heterogênea, cada região do material pode passar pela seqüência de mudanças acima em tempos diferentes. Os processos (1), (2), (3) e (4) são definidos como recuperação e os processos (5) e (6) correspondem à recristalização e crescimento de grão, respectivamente.

2.2.4 Recuperação.

As mudanças microestruturais ocorridas na recuperação levam a uma restauração parcial das características do material, que pode ser avaliada pelas variações na resistividade elétrica e tensões residuais.

A cinética da recuperação pode ser quantificada através de medidas indiretas, mediante a equação [1]:

$$1/\rho - 1/\rho_0 = k \cdot t \quad [1]$$

Onde, ρ_0 = densidade inicial de discordâncias, ρ = densidade de discordâncias no instante t, t= tempo de recozimento e k= constante. A curva que representa o fenômeno é mostrada na figura 1 [3].

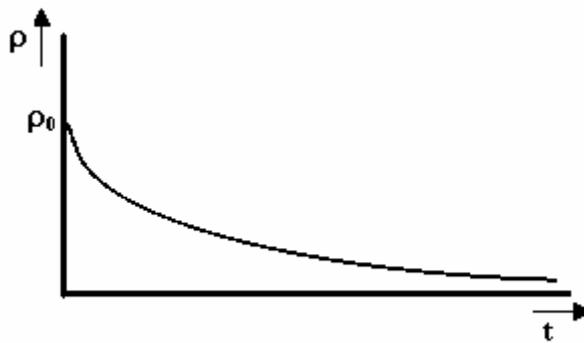


Figura 1 - Cinética de recuperação de um metal encruado [3]

2.2.5 Deformação Plástica a Quente.

Também chamada de “trabalho a quente”, é qualquer operação de deformação de um metal que seja realizada acima da temperatura de recristalização.

A maioria dos materiais metálicos passa em alguma etapa de sua fabricação por processos de deformação a quente. Nestes processos ocorrem alterações microestruturais simultâneas como encruamento, recuperação e recristalização. Os processos de recuperação e recristalização, quando ocorrem durante a deformação, são denominados de recuperação dinâmica e recristalização dinâmica, respectivamente.

A temperatura no qual ocorre a recristalização depende do material que está sendo deformado e do grau de deformação imposto. Por exemplo, o chumbo recristaliza dinamicamente ao ser deformado a temperatura ambiente.

Existem dificuldades experimentais para se observar a evolução microestrutural que ocorre durante a deformação.

2.3 Desenvolvimento das Tensões Residuais.

As tensões residuais estão associadas à densidade e à distribuição dos defeitos cristalinos nos materiais. As regiões onde se desenvolvem tensões residuais podem variar muito em escala, desde a ordem de grandeza atômica até grandes volumes de material, podendo ser classificadas em macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas, conforme Masubuchi [4].

As tensões macroscópicas estendem-se sobre grandes volumes quando comparadas com o tamanho de grão do material e por isso as deformações originadas são praticamente uniformes para muitos grãos. Um exemplo típico de região macroscópica de tensão residual é a normalmente encontrada em uma união soldada.

As tensões residuais microscópicas atuam numa área do tamanho de um grão ou parte de um grão, assim sua região de influência no equilíbrio estende-se a um número pequeno de grãos.

Tensões residuais submicroscópicas são resultantes de imperfeições da rede cristalina, ocorrendo sempre em áreas próximas às discordâncias ou defeitos pontuais. A região de influência no equilíbrio destas tensões se estende ao longo de pequenas frações de um grão.

2.4 Tensões Residuais na Soldagem

As tensões residuais na soldagem são tensões internas, em equilíbrio, que permanecem no material após a execução da operação de soldagem. Estas tensões são geradas por escoamentos parciais localizados, que ocorrem durante o ciclo térmico da soldagem. Podem ser tanto trativas como compressivas, dependendo da região considerada (zona fundida, zona afetada pelo calor, material de base) e de alguns fatores tais como aporte térmico, pré-aquecimento, grau de restrição da junta, quantidade de passes de solda, velocidade de soldagem, etc.

A figura 2 [4] apresenta um esquema mostrando as distribuições transversais de temperaturas e tensões residuais, originadas durante a deposição de material de solda, para vários pontos da chapa. Conforme se pode observar, estas tensões variam com a distância ao centro do cordão, podendo ser trativas em algumas regiões e compressivas em outras. As figuras 3 (a) e (b) mostram respectivamente, a distribuição típica de tensões residuais longitudinais e transversais ao cordão de solda em uma união de topo [4].

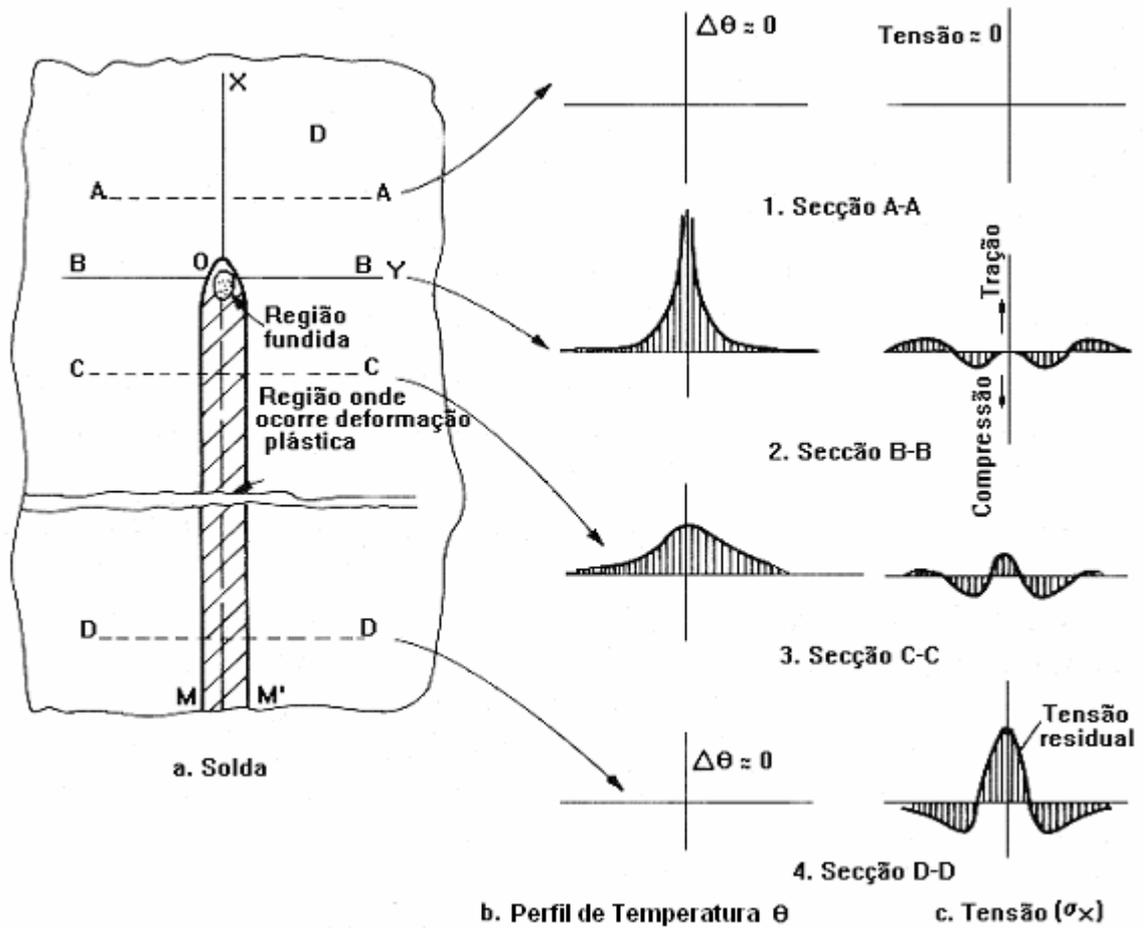


Figura 2 - Distribuições transversais de temperaturas e tensões residuais em uma deposição de material de solda [4].

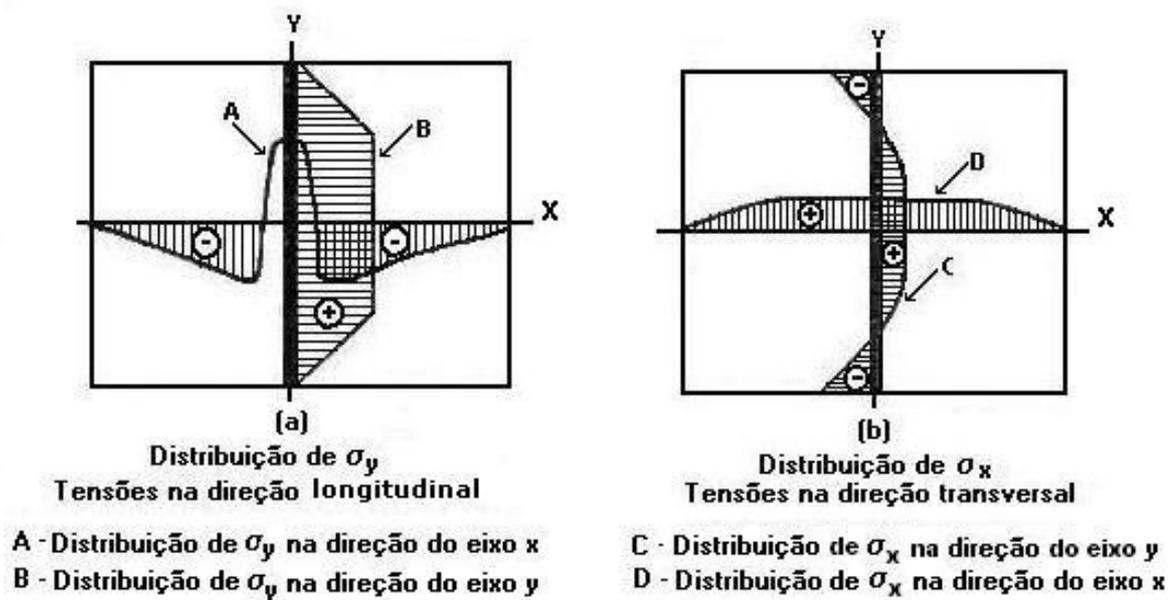


Figura 3 - Distribuição típica de tensões residuais em uma união de topo [4].

De acordo com a abordagem de Silveira e Barros [5], as principais fontes de tensões residuais em uma junta soldada são:

(a) Contração durante o resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a soldagem.

Esta é a principal fonte de tensão residual. Durante a realização da soldagem o aquecimento desigual da peça provoca tensões de compressão em alguns locais e tensões de tração em outros, devido às dilatações térmicas. O nível de tensões residuais depende do grau de restrição da estrutura na direção considerada. Se as tensões de contração atuam em duas ou três direções, dependendo da forma e dimensões da peça, as possibilidades de plastificação diminuem e as tensões residuais de contração podem atingir valores superiores ao limite de escoamento, determinado pelo ensaio de tração uniaxial. Na maioria dos casos a restrição é total na direção longitudinal do cordão de solda. Verificações experimentais confirmam que nesta direção as tensões são muito próximas do limite de escoamento.

A figura 4 [5] mostra esquematicamente a distribuição de temperatura na chapa, transversalmente à solda. Mostra também que na região aquecida acima de θ_1 (temperatura acima da qual ocorre deformação plástica para o nível de tensão a que está submetido), surgem tensões residuais trativas. Pode-se observar pela figura 5 [5] que as tensões trativas podem atingir valores da ordem da tensão de escoamento do material no centro do cordão. A figura 5 mostra também a distribuição de tensões residuais longitudinais e transversais ao cordão de solda.

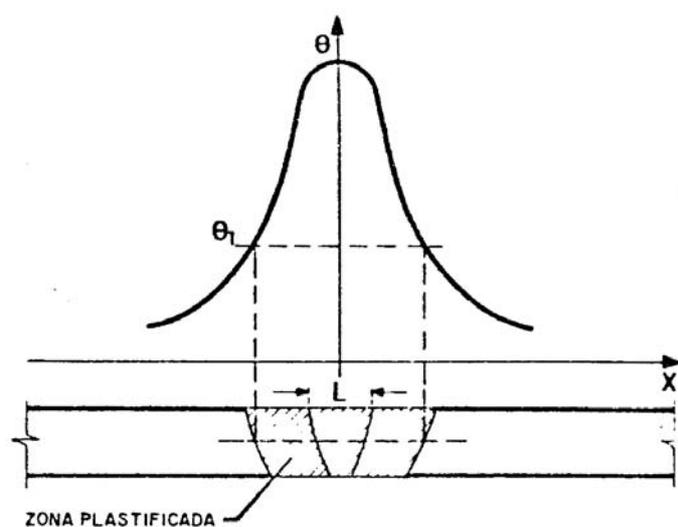


Figura 4 - Distribuição de temperatura e zona plastificada de uma chapa soldada [5]

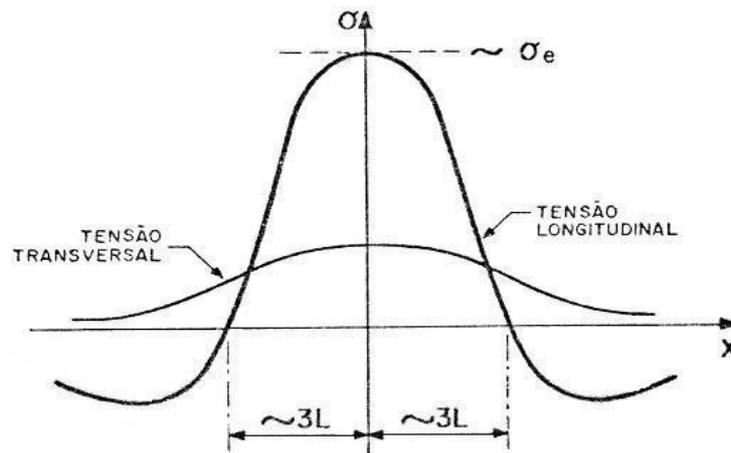


Figura 5 - Distribuição de tensões longitudinais e transversais ao longo de uma linha transversal ao cordão de solda [5].

(b) Resfriamento heterogêneo na superfície.

O resfriamento de uma chapa soldada não é uniforme ao longo de sua espessura. A superfície se resfria mais rapidamente que o seu interior, mesmo que o resfriamento seja ao ar, por convecção natural. Assim, além do gradiente de temperatura ao longo da largura e do comprimento da chapa soldada, haverá também um gradiente ao longo da espessura. Este gradiente de temperatura irá ocasionar deformação plástica localizada e, conseqüentemente, tensões residuais. No caso de chapas espessas este gradiente de temperatura é bastante elevado resultando em maiores tensões residuais. Considerando o resfriamento superficial mais rápido como única fonte de tensão residual atuante, irá se obter uma distribuição de tensões residuais de compressão na superfície, em equilíbrio com tensões residuais de tração na região interna do cordão.

(c) Transformação de fase.

A transformação de fase da austenita para ferrita, bainita ou martensita ocorre com aumento de volume. Assim, em uma junta soldada, o material da zona fundida e da zona termicamente afetada que sofrem uma transformação de fase tende a se expandir, porém será impedido pelo restante do material mais frio e não transformado. Assim é explicada a geração de tensões de compressão na região transformada e tensões de tração na região não transformada durante o resfriamento.

Na prática, as três fontes principais de tensões residuais mostradas acima, que ocorrem durante a soldagem, não são independentes. Elas se superpõem gerando uma distribuição de tensões bastante complexa, conforme pode ser visto na figura 6 [5]. Esta figura mostra a

distribuição de tensões residuais transversais (σ_t), ao longo de uma linha transversal ao cordão de solda, em uma chapa de aço de 6 mm de espessura, soldada por feixe de elétrons.

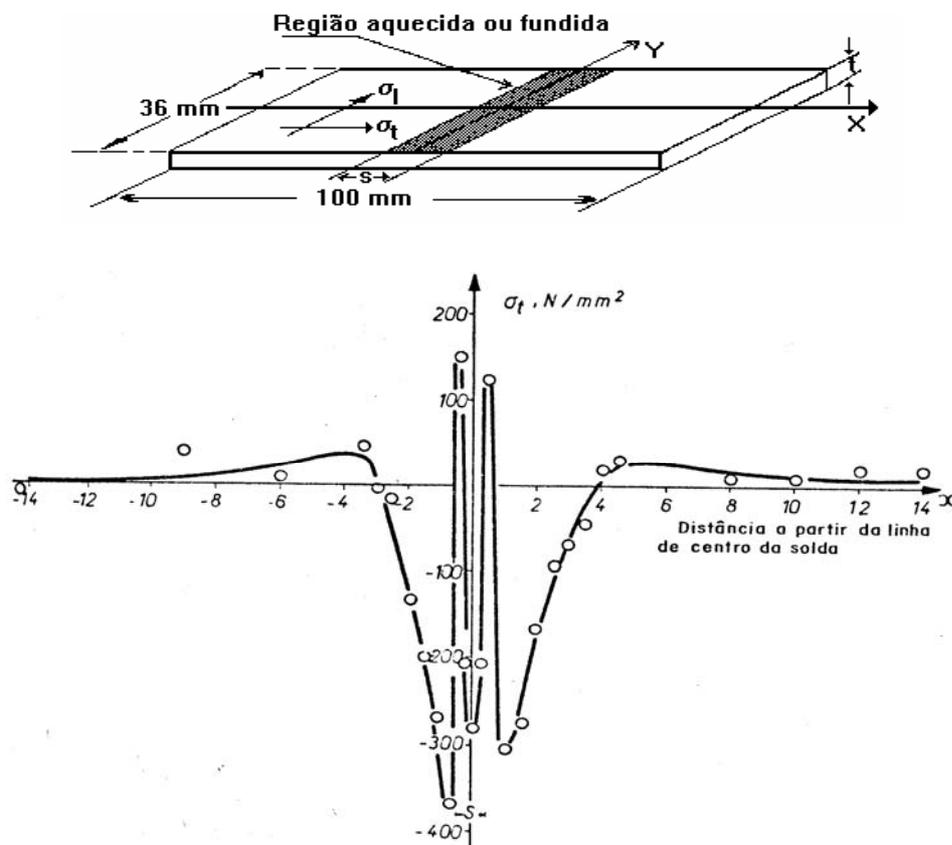


Figura 6 - Variação das tensões residuais transversais (σ_t) de uma chapa soldada [5].

2.5 Métodos para a Determinação das Tensões Residuais nos Materiais

A grande necessidade em se determinar às tensões residuais dos materiais bem como compreender melhor os seus efeitos incentivou o desenvolvimento de uma série de técnicas, dispositivos e instrumentos de medição baseados em diferentes princípios. Existem técnicas destrutivas, semidestrutivas e não-destrutivas. Apesar de seu grande número ainda é necessária muita evolução dessas técnicas para torná-las de ampla utilização, mediante a garantia de baixas incertezas, alta repetitividade e fácil aplicação na maioria dos casos e para a maioria dos materiais. [6].

Os primeiros métodos qualitativos eram baseados no alívio das tensões através de cortes, ou remoção de camadas por usinagem, ou pela medição do empenamento resultante no

material. Estes recursos ainda hoje são utilizados, porém, com técnicas mais sofisticadas de medição das deformações.

Cada método possui seu domínio de aplicações bem delimitado. A seleção do mais adequado depende de vários fatores, tais como: a) natureza do campo de tensões residuais que se pretende medir, b) incerteza admissível, c) tempo disponível para a medição, d) localização e extensão da região de interesse (superficial, sub-superficial ou em todo o volume do material).

As principais técnicas experimentais de medição de tensões residuais são descritas brevemente a seguir.

2.5.1 Difração de raios-X.

Este método consiste na medida da variação do espaçamento atômico na rede cristalina do metal sob tensão através do uso de feixes estreitos e colimados de raios-X. É uma técnica bastante utilizada atualmente por ser não-destrutiva e permitir a medida em campo em tempo real, porém, avalia apenas a camada superficial da peça, até em torno de 10 μm de profundidade. [7].



Figura 7 – Exemplo prático de uma Fonte de raios-X, executando o ensaio em uma amostra [8].

2.5.2 Difração de nêutrons.

Segue o mesmo princípio do método de difração dos raios-X com a diferença fundamental de que os raios de nêutrons são capazes de penetrar em toda espessura do material, possibilitando a determinação das três componentes principais de tensão. A incerteza deste método é praticamente a mesma da difração de raios-X

2.5.3 Método do Furo Cego com Extensômetros.

O método do furo cego é bastante utilizado para se avaliar as tensões residuais devido à sua praticidade e flexibilidade. Tem como princípio a modificação do estado de tensão interna de uma peça, após a usinagem de um furo cujo objetivo é aliviar o campo de tensões. Esta modificação do estado de tensões é manifestada através de deslocamentos e deformações na superfície ao redor do furo. Os extensômetros colados ao redor deste furo é que irão medir as deformações radiais causadas pelo alívio de tensões. A profundidade do furo é de aproximadamente 1,2 vez o seu diâmetro. O procedimento deste ensaio é padronizado pela Norma ASTM E 837 [1995]. A figura 8 mostra como são distribuídos os extensômetros ao redor do furo realizado na chapa. Dentre os inconvenientes deste método estão a dificuldade na furação e no alinhamento do furo com as rosetas extensométricas. É necessário que além de haver uma área mínima de 10x10mm disponível para colocar os extensômetros, o local seja acessível para a usinagem do furo. O tempo exigido para este ensaio também é bastante longo, pois a fixação dos extensômetros na superfície da chapa requer cuidadosa limpeza, preparação, e colagem é requerida também habilidade do operador. O custo dos extensômetros é alto. Apesar dessas dificuldades, pela sua confiabilidade esta técnica é empregada para a medição de tensões residuais tanto em laboratório como em campo [9].

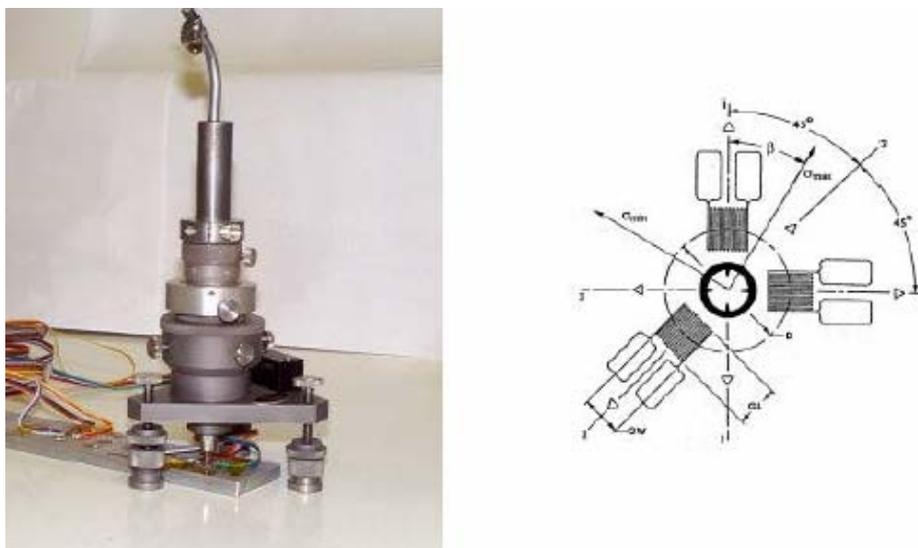


Figura 8 - Distribuição dos extensômetros ao redor do furo realizado na chapa [8]

2.5.4 Método do Furo com Técnicas Ópticas.

Algumas das limitações apresentadas com o uso de extensômetros de resistência podem ser minimizadas pelo uso de técnicas ópticas. Por exemplo, quando as peças são muito

pequenas para permitir a colagem dos extensômetros, quando se deseja medir tensões residuais localizadas, em situações onde se desejam resultados com menores incertezas, etc. Existem diversos tipos de técnicas ópticas de medição tais como: fotoelasticidade por reflexão, interferometria Moiré, holografia interferométrica, holografia eletrônica, holografia “shearing” eletrônica [9].

2.5.5 Técnica Ultra-Sônica para a Medição das Tensões Residuais.

Tradicionalmente o ultra-som é empregado como ensaio não-destrutivo para localizar e dimensionar discontinuidades. Atualmente sua aplicação vem se estendendo para outros tipos de ensaios tais como a avaliação da textura dos materiais, medição de tensões residuais, determinação do tamanho de grão, estudo de constantes elásticas, avaliação de porosidades em materiais cerâmicos e outros.

A técnica ultra-sônica apresenta grande destaque por ser não destrutiva, e ter como principal potencial a possibilidade de caracterizar o estado de tensões em todo o volume do material. Ela se baseia em fenômenos acustoelásticos, que fazem com que uma variação no estado de tensões do material afete a velocidade da onda ultra-sônica. Porém, as grandes dificuldades no emprego desta técnica estão na resolução e exatidão nas medidas do tempo de percurso da onda ultra-sônica, uma vez que as variações de velocidade em função das tensões resultam em alterações do tempo da ordem de nanosegundos; além disso, a textura do material também causa variações no tempo de percurso da onda da mesma ordem de grandeza daquelas causadas pela tensão. Uma outra dificuldade é a necessidade de uma amostra de referência com a mesma microestrutura do material a ser analisado, para a determinação do seu coeficiente acustoelástico. Em decorrência disto, em princípio, não é possível se determinar a distribuição com precisão das tensões residuais num do cordão de solda [11].

2.5.6 Método do Contorno.

O método do contorno é um novo método de relaxamento das tensões foi desenvolvido originalmente por Grant [12]. A peça é cortada em duas, e o contorno ou perfil da sua nova superfície é medido de modo a determinar os deslocamentos causados pelo relaxamento das tensões residuais.

Esta técnica não requer a remoção de material camada por camada; o corpo de prova é simplesmente cortado no plano de interesse. Além disso, a variação 2-D das tensões residuais pode ser diretamente determinada pela medida da deformação. A solução direta é possível

porque a deformação é medida na superfície criada pelo corte, cujo relevo é provocado pelo alívio de tensão.

A teoria do método do contorno é baseada no princípio da variação da superposição elástica de Bueckner's, que diz:

“Se um corpo fraturado é submetido a cargas externas ou a deslocamentos nos limites (bordas) existem tensões residuais nas superfícies de fratura, estas forças podem ser equivalentes à distribuição da tensão de um corpo sem fratura, que tenha a mesma geometria, submetidas às mesmas cargas externas”.

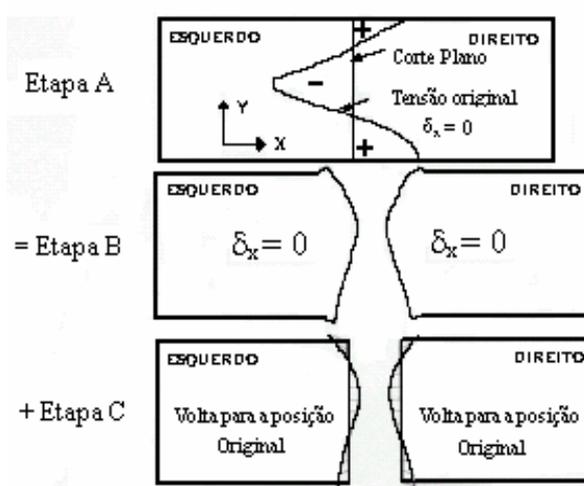


Figura 9 - Ilustração do princípio de superposição elástica de Bueckner's que é aplicado no Método do Contorno.

Na etapa A, a parte perturbada é composta de duas metades que estão originalmente submetidas às tensões residuais. Na etapa B, a peça é cortada em duas partes, resultando na deformação de suas superfícies devido ao relaxamento das tensões residuais até o ponto de atingir tensões normais iguais a zero. Na etapa C, o material é “forçado” a voltar à posição original. Isto envolve aplicar a deformação medida na etapa B a um modelo de Elementos Finitos para calcular a tensão residual correspondente.

Para que o método funcione adequadamente, no corte é preciso tomar alguns cuidados, o processo ideal para a separação das peças deve: (i) produzir um corte plano, com precisão; (ii) não remover nenhum material adicional das superfícies cortadas; (iii) não introduzir nenhum tipo de deformação plástica. Portanto, o processo mais adequado para o corte seria o de eletro-erosão a fio.

Já para se realizar a leitura do contorno utiliza-se uma máquina, Medidor de Coordenadas que utiliza um apalpador mecânico na sua ponta, que é levado a percorrer toda a extensão do corpo de prova, como mostra a figura 10.

Na figura 12 observa-se um exemplo de uma típica curva obtida através de um medidor de coordenadas.

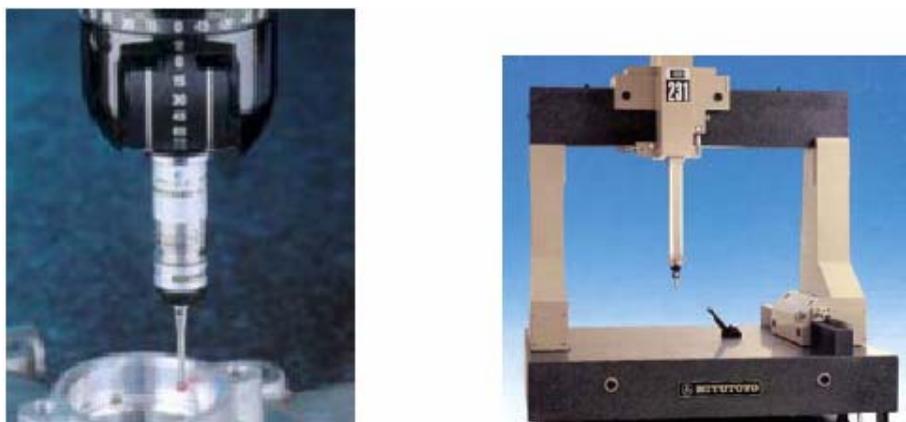


Figura 10 - Um típico Medidor por Coordenadas no qual é utilizado um apalpador na sua extremidade com um toque de $1,5 \mu\text{m}$ de repetibilidade.[12]

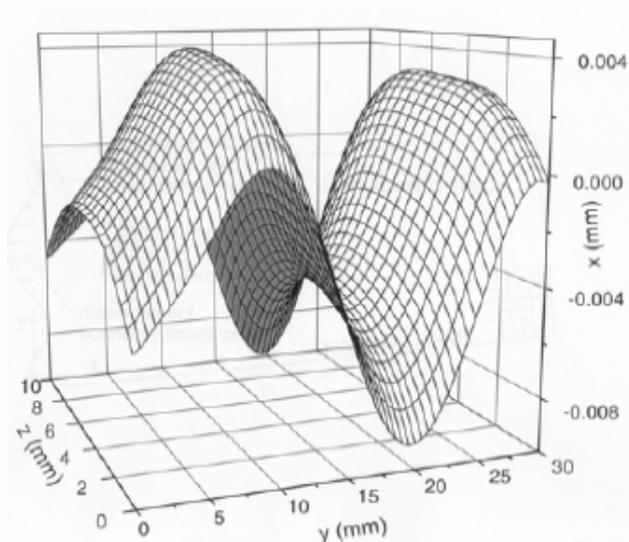


Figura 11 – Exemplo de uma superfície curva, obtida pelo medidor de coordenadas [12].

2.5.7 Método Baseado na Distorção Angular.

Distorções são alterações de forma e dimensões em componentes soldados como resultado da deformação plástica que sofre o material em função das tensões térmicas desenvolvidas durante a soldagem. A distorção final em um componente soldado é sempre oposta e, em geral, da mesma ordem de grandeza do movimento de material que ocorre durante a soldagem [13].

Em juntas simples, três tipos básicos de distorção podem ocorrer: (i) contração transversal (perpendicular à linha da solda), (ii) contração longitudinal (paralela à linha da solda) e (iii) distorção angular (rotação em torno da linha da solda) como mostra a figura 12. Estas distorções básicas causam distorções complexas em juntas soldadas reais como, por exemplo, o dobramento e a torção de vigas e a distorção por flambagem em juntas de peças de pequenas espessuras.

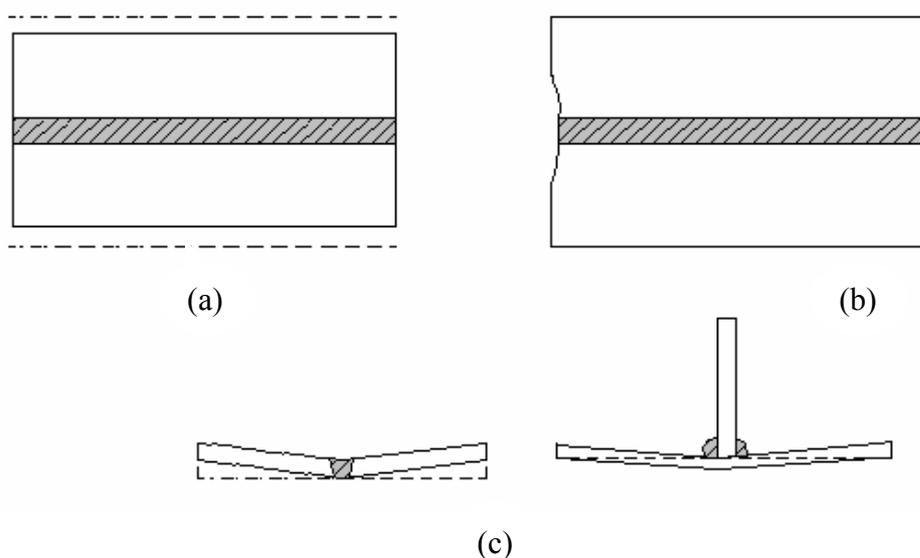


Figura 12 – Distorções básicas: (a) Contração transversal, (b) Contração longitudinal e (c) Distorção angular [13].

A distorção angular ocorre quando há contração transversal não é uniforme ao longo da espessura da junta, podendo ocorrer tanto em soldas de topo como em soldas de filete. Assim, a quantidade de distorção depende das propriedades térmicas e mecânicas do material, particularmente o seu coeficiente de expansão (α), a sua condutividade térmica (k), limite de escoamento (σ_{YS}) e o seu módulo de elasticidade (E). A tabela mostra valores relativos (considerando o valor do aço igual a 1) das propriedades discutidas.

Tabela 01 - Valores relativos de propriedades de metais (aço carbono =1) [13].

Metal	E	σ_{YS}	α	k
Aço ao carbono	1,0	1,0	1,0	1,0
Aço inoxidável	1,0	1,2	1,4	0,3
Ligas de Alumínio	0,3	0,5	1,7	4,2
Ligas de Cobre	0,5	0,3	1,3	7,5

2.6 Métodos de Alívio de Tensões Residuais.

As tensões residuais em soldagem se originam de interações de natureza mecânica e/ou térmica; em função disso, as tensões podem ser reduzidas por métodos mecânicos ou térmicos, como serão descritos a seguir.

2.6.1 Alívio de Tensões Por Tratamento Térmico.

Entre os métodos de alívio de tensões por tratamento térmico, podem-se citar dois: (i) alívio de tensões por aquecimento localizado da estrutura e (ii) alívio pelo aquecimento de toda a estrutura.

No primeiro caso, é difícil controlar a temperatura ao longo das faixas localizadas aquecidas, tornando questionável a eficácia do processo. No segundo caso, que é o mais utilizado, a eficácia do processo é amplamente comprovada na prática.

2.6.2 Alívio de Tensões por Processos Mecânicos.

O alívio de tensões por processos mecânicos consiste em induzir tensões de compressão na estrutura, de forma que a solda escoe plasticamente (aliviando as tensões internas). Este nível de tensões pode ser introduzido de várias formas, entre as quais podemos citar: (i) tensionamento da estrutura soldada; (ii) vibrações; (iii) tratamentos superficiais como *Shot Peening* (jateamento por granalha) e *Hammer Peening* (martelamento por martetele).

2.6.3 Jateamento por Granalha (*Shot Peening*).

(a) Princípio de Funcionamento.

É uma aplicação do processo de jateamento que vem ganhando terreno na área industrial em ritmo cada vez mais acelerado. Envolve tecnologia de vanguarda e requer controles e equipamentos apropriados, bem como operadores conscientes e bem treinados, requisitos

poucas vezes exigidos quando se especifica jateamento como ferramenta industrial. O processo é identificado por vários nomes conforme o idioma: “*Kugelsstrahlen*”, “*Polliatura*” etc, podendo ser traduzido por “martelamento” em português. Entretanto “*Shot Peening*” é o termo internacionalmente aceito e compreendido por suas peculiaridades.

“*Shot peening*” pode ser definido como um tratamento mecânico superficial e a frio de peças metálicas, obtido pelo impacto uniformemente distribuído de partículas metálicas ou de vidro, com velocidades controladas.

O processo está intimamente relacionado à melhoria das características superficiais dos metais, no qual introduzem tensões de compressão na superfície, assim aumentando a sua resistência à fadiga mecânica, rugosidade, porosidade, tensões residuais, conformação e outros vinculados à fabricação de peças mecânicas ou estruturas.

(b) Efeitos do Shot Peening .

O jateamento por granalha cria uma tensão de compressão uniforme em toda a superfície jateada. Ao tratar uma chapa fina em apenas um dos lados, paradoxalmente, ela se deforma adquirindo uma concavidade no lado jateado (se a peça ficar côncava é porque há tensões trativas do lado côncavo). A tensão de compressão criada pelo impacto das partículas resulta na deformação da lâmina. Nota-se que, na parte superior, a tensão é positiva e atinge pequenas profundidades, os demais valores são de tensões elásticas decorrentes da deformação (figura 13a). Jateando a superfície oposta com a mesma intensidade (de modo análogo ao anterior), as duas tensões superficiais se opõem, a deformação desaparece e o gráfico de momentos se altera (figura 13b).

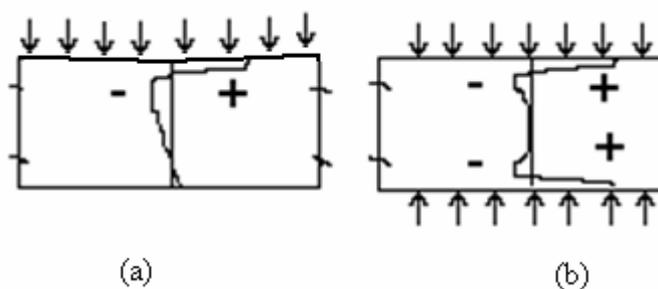


Figura 13 – Distribuição das tensões produzidas numa chapa jateada: (a) pelo lado suspenso; (b) pelos os dois lados.

(c) Conceito de Intensidade de “Peening”.

O conceito de intensidade de jateamento é intuitivo. Quanto maior a massa e velocidade de uma partícula no momento do impacto, mais intensa será a sua ação.

Avaliar a intensidade partindo de uma fórmula simples é praticamente impossível, pois, em geral as esferas, são fornecidas dentro de uma faixa de granulometria e seu tamanho pode diminuir com o desgaste. A velocidade média também não é fácil de determinar, quer seja usando ar comprimido ou unidades turbinadas.

Por outro lado, especificar uma determinada intensidade a ser reproduzida indicando as diversas variáveis envolvidas, como materiais (aço ou vidro), granulometria, pressão de ar ou rotação da turbina, ângulo de ataque, distância, tempo operacional, entre outras, não garante a precisão e a confiabilidade requeridas para uma operação de “shot peening”.

Por isso foi desenvolvido o método “*Almen*”, que é internacionalmente adotado para especificar a intensidade do jateamento. Este método parte do princípio de que deformações iguais em chapas finas padronizadas correspondem a aplicações com iguais intensidades.

Almen, o idealizador deste método, padronizou três tipos de plaquetas de aço iguais em dimensões, dureza, planicidade, acabamento, etc, variando apenas a espessura, como mostra a tabela 02.

Tabela 02 - Padronização das espessuras dos três tipos de plaquetas usadas no ensaio Almen.

Tipo de Plaqueta	Espessura (pol.)	Espessura (mm)
Tipo "N"	0,032" ± 0,001"	0,8128 ± 0,0254
Tipo "C"	0,051" ± 0,001"	1,2954 ± 0,0254
Tipo "A"	0,094" ± 0,001"	2,3876 ± 0,0254

Padronizou-se também um bloco de apoio das plaquetas e um dispositivo com micrômetro comparador para medir a flexão produzida pela deformação. A plaqueta do tipo “N” é usada para pequenas intensidades como as obtidas, em geral, com esferas de vidros; as do tipo “C” são as mais empregadas; e as do tipo “A” são para grandes intensidades, geralmente granalha de aço.

O processo é simples; a plaqueta é instalada no dispositivo com micrômetro e este é zerado, aproveitando-se para inspecionar a planicidade. Se a plaqueta já foi utilizada, ela é

fixada com o lado em que foi feita a primeira medição para baixo. O bloco de apoio é posicionado em gabaritos de modo que a plaqueta a ele fixada fique em posição que coincida com a superfície da peça a ser tratada. O dispositivo é então jateado, movimentando-se o jato e/ou a peça, nas mesmas condições a serem reproduzidas futuramente nas peças reais. A plaqueta é retirada e levada ao micrômetro e medida à flexão no mesmo ponto, no lado não jateado. Essa leitura, em polegadas ou milímetros, é o que se denomina de número de Almen, por exemplo: 0,010A a 0,015A em (polegadas) ou 0,25A a 0,38A em (mm). Isto quer dizer que a intensidade a ser aplicada na peça deve estar compreendida entre os limites que provoquem deformações na plaqueta "A" entre 0,010 e 0,015 (0,25 a 0,38 mm). O endurecimento causado pelo "shot peening" é somente superficial atingindo profundidades que atingem no máximo 0,25 mm da superfície. A figura 14 é mostrado um conjunto de medição pelo método Almen.

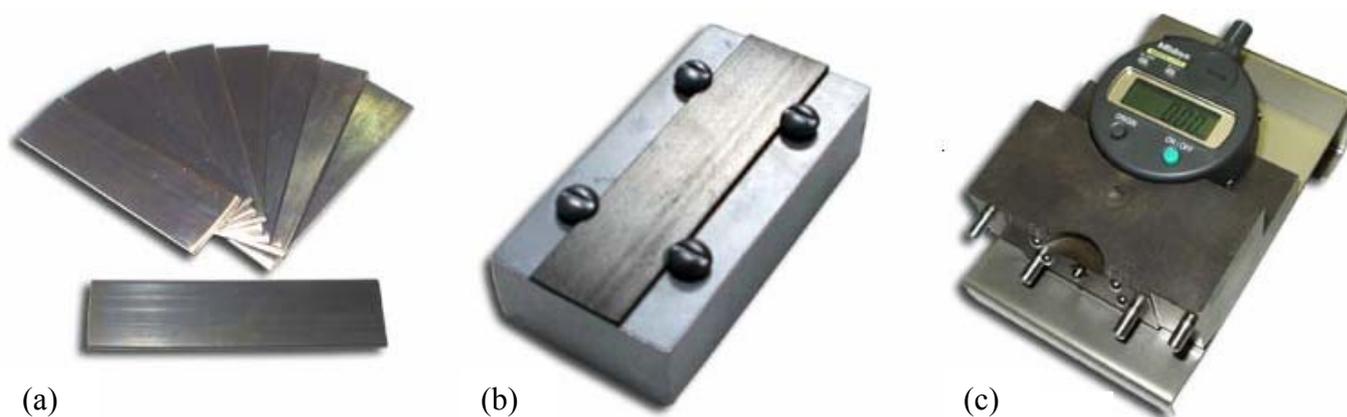


Figura 14 - Elementos para medição da intensidade do jateamento; (a) Plaquetas de Almen; (b) Bloco de apoio da plaqueta; (c) Dispositivo de medição e controle das plaquetas Almen.

2.6.4 Martelamento (Hammer Peening).

Como se pode observar neste capítulo a respeito do martelamento como alívio de tensões, em geral existe uma escassez de dados na literatura, para poder-se tirar conclusões.

2.6.5 Controle do Processo.

Apesar da técnica do martelamento para alívio de tensões, ter sido estudada na década de 40 por DeGarmo [16] e Morris [17], os procedimentos propostos não eram aceitos, o que impedia a sua inclusão em códigos de construção metálica. Com o decorrer dos anos houve novos estudos do processo, sendo que hoje nas normas a técnica é aceita, mas não há indicações detalhadas da sua forma de aplicação.

As maiores vantagens destas técnicas ocorrem em componentes soldados, sujeitos a fadiga ou corrosão sob tensão, pois promove a introdução de um campo de tensões residuais de compressão. É uma técnica aplicável localmente, a componentes sem dano, que inclusive podem ter saído da linha de produção, ou componentes já danificados (durante as tarefas de reparos), permitindo assim aumentar a segurança e a vida útil do componente.

Segundo Tomkings [14], como efeito das pancadas aplicadas esta técnica produz indentações que atingem o seu máximo efeito benéfico até profundidade de 0,6mm. Além do já referido, conforme Haagensen [15], o martelamento permite alterar a geometria do cordão de solda de forma a reduzir o fator de concentração de tensões, quando aplicado sobre o cordão de solda e, como tal, permite obter melhorias de cerca de 60% na vida de iniciação de fadiga.

2.6.6 Procedimentos para o Martelamento.

Atualmente existem técnicas de martelamento, que vão deste o martelamento ultrassônico até o martelamento com ferramenta sólida com um punção (martetele) ou um feixe de agulhas.

O procedimento para o martelamento primeiramente deve ser aplicado por um profissional experiente e devidamente treinado. Tendo em conta que esta operação é manual e os resultados serão em função do desempenho do operador, para uma boa repetibilidade do processo, o operador deve seguir um procedimento claro.

O lugar de execução da operação deve ser preparado, fazendo-se uma devida montagem do equipamento e preparação da estrutura. A região a ser martelada deve estar limpa de toda sujeira ou óxidos existentes. Nesta fase deve ser incluída a preparação do operador com equipamentos de proteção individual (EPI), como tampões para o ouvido, luvas, óculos, máscaras.

Para realizar-se o martelamento são necessários equipamentos fundamentais: (i) a ponteira de martelamento (punção ou agulhas); (ii) martelo pneumático; e (iii) um compressor pneumático.

O martelo pneumático é responsável pela aplicação da carga de martelamento; deve ter um êmbolo de 15 a 30 mm de diâmetro e operar com uma pressão de 5 a 7 bar. O número de golpes por segundo também é muito importante e deve ficar na faixa de 30 a 50 (podendo-se elevar para um valor próximo de 100 em alguns casos), bem como a energia de impacto deve ser tida em conta, ficando entre os valores entre 5 e 15 Joules [18].

A ferramenta é segundo elemento fundamental do processo. É através dela que é transmitida a força que vai produzir no componente um estado de tensões residuais de compressão. Esta ferramenta pode ser um punção com diâmetro de 6 a 18 mm e um comprimento de 150 a 250 mm [14], sendo que a escolha adequada deve ser feita tendo em conta a força a aplicar ao material e a geometria do componente a martelar.

Na figura 15 pode-se distinguir o martelo com a sua respectiva ferramenta de trabalho.



Figura 15 – Martelo de punção com uma ponteira deformável.

2.6.7 Efeito do Martelamento na Redução das Tensões Residuais.

As normas de fabricação em soldagem condenam o martelamento do primeiro e último passe, o que, como se observará, compromete a eficácia do processo em aliviar tensões. Entre os autores verifica-se em geral um consenso em relação à eficácia do processo, pois a maioria [16, 17] acredita que o método para ser efetivo, no tocante ao alívio de tensões, o último passe deverá ser martelado e, além disso, reconhecem o martelamento a frio como sendo o mais efetivo [17]. Uma boa parte dos trabalhos procura estudar o efeito do martelamento nas propriedades mecânicas do metal martelado. Considerando este aspecto, como se verificará o martelamento a frio, o sobremartelamento e o martelamento na “região de fragilidade de revenido” são considerados detrimenais às propriedades mecânicas do metal de uma maneira geral. Entretanto, como se observará essa tendência é menos acentuada em alguns materiais.

DeGarmo, Jonassem e Meriam [16] estudaram a eficácia do martelamento na redução do nível das tensões residuais considerando cinco fatores: (i) severidade do martelamento, (ii) efeito da temperatura do material durante o martelamento, (iii) efeito do martelamento dos últimos passes e (iv) restrição nos planos das chapas, durante a soldagem. Utilizaram inicialmente o procedimento de martelar todos os passes, com exceção do primeiro e do último. Usaram martelos trabalhando com pressão de 95 a 105 psi ($6,6 \times 10^5$ a $7,2 \times 10^5$ N/m²) e ferramentas do tipo “bobbing”, figura 16, mantendo a velocidade de deslocamento da ferramenta o mais constante possível. O método utilizado para medir as tensões residuais foi por extensômetros eletroresistivos.

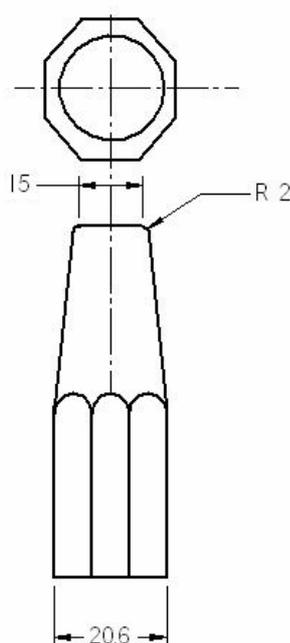


Figura 16 – Modelo de ferramenta tipo Bobbing, utilizado no martelamento por DeGarmo, Jonassem e Meriam [16].

Na primeira série de corpos de provas as soldas eram de topo, chanfro em “V” de 60°, e chapas de aço de 1” (25,4mm) de espessura. No passe de raiz utilizaram eletrodos E-6010 de $\varnothing 3/16$ ” (4,8mm) e enchimento com eletrodos de E-6012 $\varnothing 1/4$ ” (6,4mm). O martelamento se deu a temperatura entre 260 e 317°C o que eles convencionaram chamar de martelamento a “quente”. Após resfriar até no máximo a 66°C mediram então as tensões longitudinais, e verificaram que nenhum método reduzia consideravelmente as tensões residuais longitudinais, embora o martelamento a “frio”(66°C) tenha provocado um decréscimo maior no nível de tensões.

Levantaram então a hipótese de que o efeito do martelamento é eliminado pela deposição dos últimos passes. Para comprovar esta suposição desenvolveram uma nova série

de corpos de prova semelhantes à primeira diferenciando-se apenas pelo chanfro que passa a ser duplo “V”. Antes de depositar os últimos passes, as tensões dos CPs foram completamente aliviadas por recozimento. Em seguida, procederam à medição das tensões residuais. Constataram que as tensões resultantes da deposição do último passe eram da mesma ordem que as daqueles CPs em que todos os passes, exceto o primeiro e o último, foram martelados. Concluíram então que se for desejado aliviar tensões por martelamento, os últimos passes terão que ser martelados.

Uma outra série de CPs serviu para mostrar que não havia muita diferença entre se martelar a “frio” (66°C) ou a “quente” (260 a 317°C) embora o martelamento a frio fosse mais efetivo. Contudo, o autor acredita haver uma grande diferença entre se martelar ou não o último passe. De fato, o CP em que só o último passe foi martelado apresentou resultados tão bons quanto aqueles em que todos os passes foram martelados.

A fim de verificar o efeito do martelamento na redução das tensões transversais, desenvolveram uma nova série de CPs, com restrição na direção transversal, elevando o nível dessas tensões ao máximo. Observaram que a redução nas tensões transversais só era apreciável quando o metal de base adjacente era martelado 2”(50,8mm) de cada lado.

Morris [17] analisou o martelamento a frio realizado à temperatura ambiente e a quente (593°C) em soldas cujo metal de base era um aço acalmado e o metal de solda resultante da deposição de eletrodos E-6010, e, embora reconhecendo a maior facilidade de se deformar o metal a quente, se opõe a esse procedimento, com o argumento de que a contração, posterior ao martelamento, desenvolve tensões residuais que anulariam a eficácia do processo. Outro ponto considerado, é que as temperaturas nas porções inicial e final do cordão são diferentes ao efetuar-se o martelamento o que compromete a uniformidade da operação. Logo, se quiser aliviar tensões por martelamento, certamente os últimos passes terão que ser martelados, ratificando as conclusões de DeGarmo, Jonassen e Meriam [16]. Para avaliar as tensões residuais construíram um dispositivo baseado em extensômetros eletroresistivos, que mostra que o nível de tensões é reduzido pelo martelamento e aumentado pela deposição de um passe.

No “*Welding Handbook*” [18] é afirmado que no martelamento utilizado como processo de alívio de tensões, certamente o último passe terá que ser martelado.

2.6.8 Efeito nas Propriedades Mecânicas.

Morris [17] se manifesta favoravelmente ao martelamento a frio, particularmente em soldas multipasses, pois o metal deformado a frio, em consequência do martelamento, apresentará uma temperatura de recristalização mais baixa e, quando houver a recristalização provocada pela deposição dos passes subseqüentes, os novos grãos formados serão menores.

Calamari, Crum e Place [19] estudaram os efeitos do martelamento nos metais de base e de solda. Preferiram a utilização de uma ferramenta tipo “Chisel”, (veja a figura. 17), por acharem que produzia uma superfície mais plana e uniforme. Utilizaram duas velocidades de martelamento: (i) 12,7cm/min, a que chamaram de baixa, (ii) 50,8cm/min a que chamaram de alta.

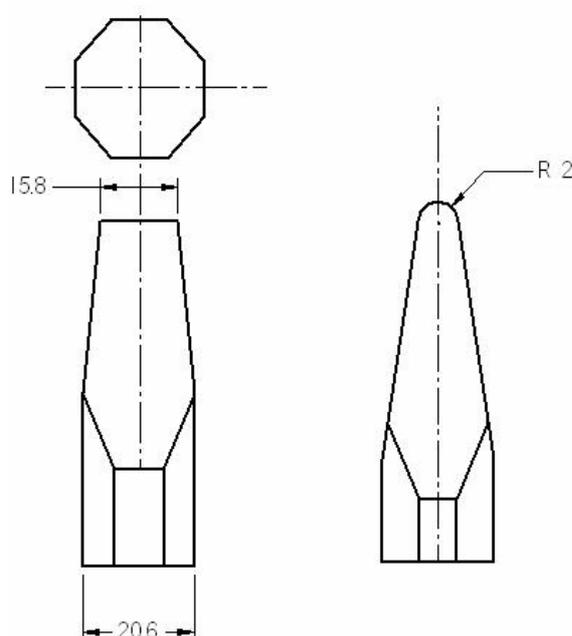
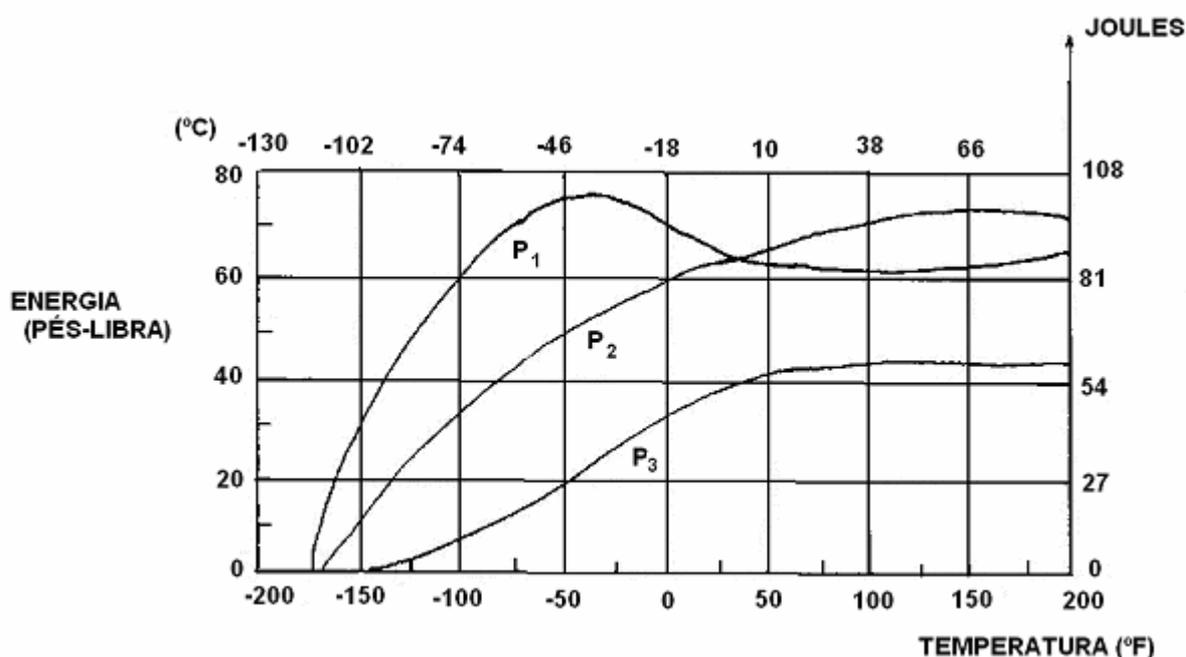


Figura 17 – Ferramentas tipo “CHISEL” [19].

Desenvolveram um CP de impacto, reproduzindo os efeitos do martelamento nos metais de base e de solda. Nos CPs em que estudaram os efeitos do martelamento, o entalhe era justamente a moessa produzida pela ação da ferramenta de um martelo montado num dispositivo fabricado para este fim. Esse dispositivo permitia regular a velocidade de martelamento e mantê-la constante, o martelo utilizado trabalhava com uma pressão de 90psi ($6,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$). Para efeito de comparação do metal martelado com o não martelado, o entalhe nesse último foi usinado sobre o depósito de solda, reproduzindo as condições de martelamento rápido (50,8 cm/min). O metal de base era um aço semi-acalmado com 0,19% C e 0,73% Mn. Os autores fazem as ressalvas que os entalhes martelados não eram tão planos,

nem uniformes, quantos os usinados, e isso possivelmente poderia afetar alguns valores obtidos. Entretanto, repetiram os testes várias vezes e a tendência geral dos resultados se manteve.

Escolheram como temperatura de transição, aquela na qual a curva “energia absorvida versus temperatura” cruza o nível de 20,3 J. Compararam os resultados obtidos em CPs do metal de base, martelado rápida e lentamente, com os CPs não martelados, figura. 28. Os corpos de prova martelados lentamente apresentaram queda nas energias de impacto maior que os martelados rapidamente. As temperaturas de transição dos três CPs foram: -109°C para o metal não martelado, -101°C para o martelado rapidamente e -57°C para o martelado lentamente.



onde:

P₁ = Entalhe usinado no metal de solda

P₂ = Um único passe de martelamento rápido a $21,1^{\circ}\text{C}$.

P₃ = Um único passe de martelamento lento a $21,1^{\circ}\text{C}$.

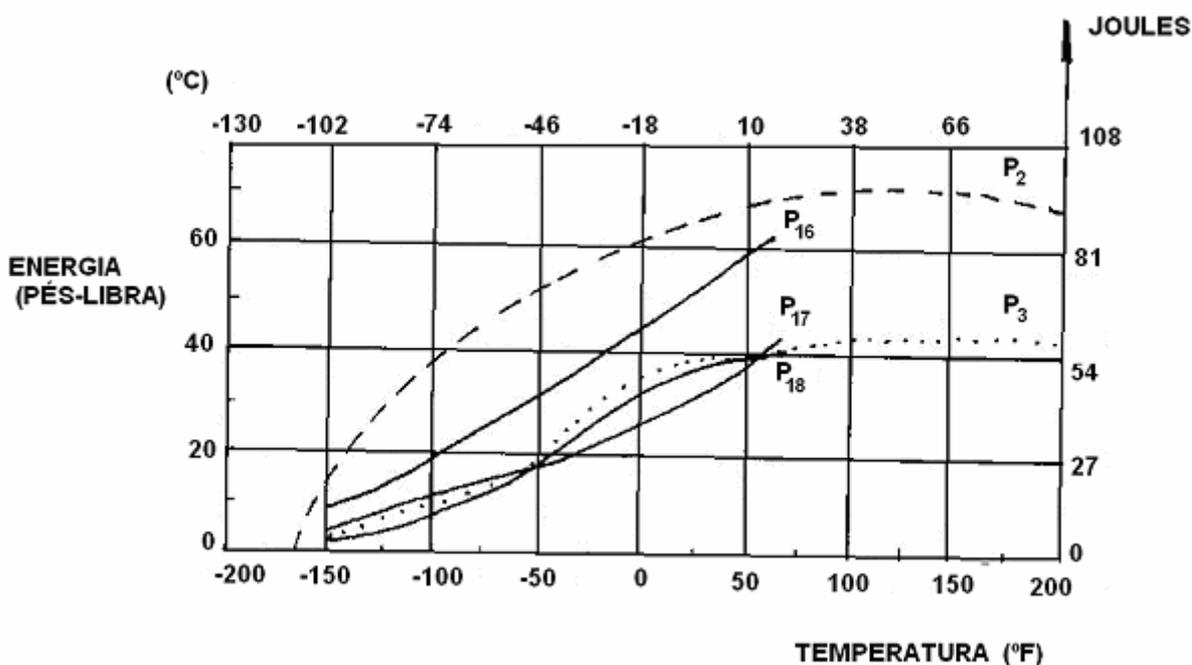
Figura 18 - Comparação entre as curvas de impacto do metal martelado lentamente com o martelado rapidamente e o não martelado [16].

Para estudar o efeito da temperatura de martelamento, ensaiaram CPs martelados a várias temperaturas entre -12°C e 482°C . Observaram que as temperaturas de transição sofrem um aumento pronunciado, acompanhado de uma queda acentuada nas energias de

impacto, para os CPs martelados lentamente a 150°C. Esse fenômeno é verificado nas amostras marteladas até 482°C e atribuíram isso à deformação do metal no intervalo de temperatura onde ocorre o fenômeno de “fragilidade de revenido”.

O CP martelado a -12°C apresentou pequena variação na energia de impacto e temperatura de transição, em relação ao CP não martelado.

Ao analisar o efeito do sobremartelamento (mais um passe de martelamento), verificaram que o mesmo promove uma queda nas energias de impacto e elevação na temperatura de transição (veja figura 19).



onde:

P₂ = Um único passe de martelamento rápido a 21,1°C;

P₃ = Um único passe de martelamento lento a 21,1°C;

P₁₆ = Dois passes de martelamento rápido a 21,1°C;

P₁₇ = Quatro passes de martelamento rápido a 21,1°C;

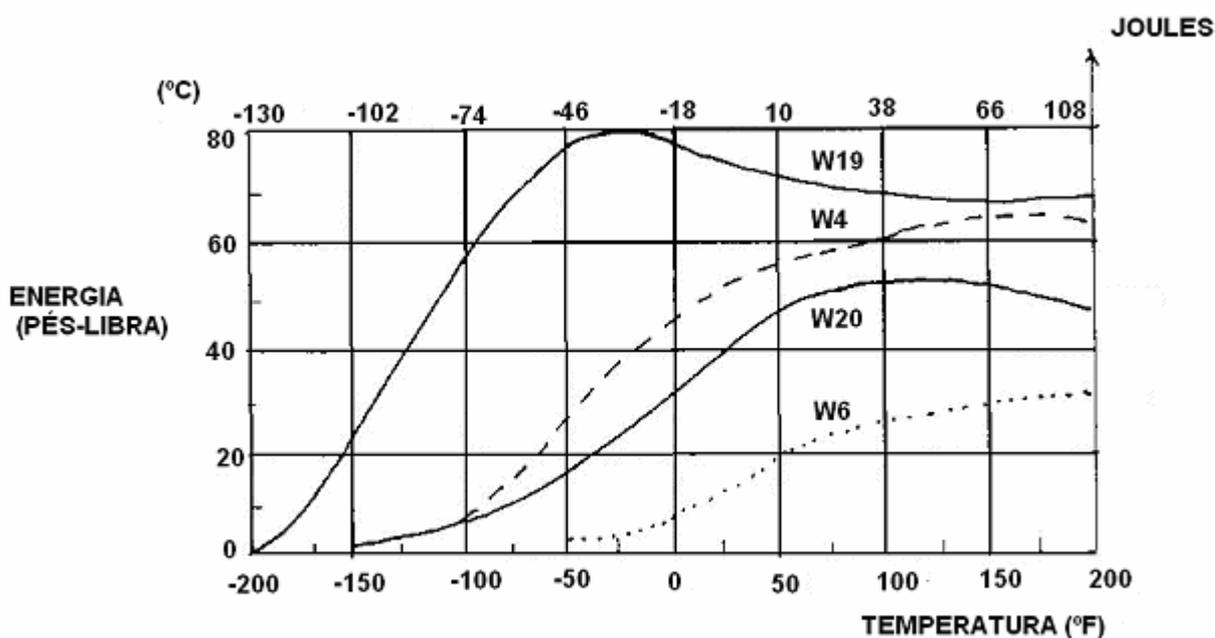
P₁₈ = Dois passes de martelamento a 21,1°C.

Figura 19 - Comparação entre as curvas de impacto dos metais martelados e sobremartelados [16].

Conduziram testes de dureza abaixo do entalhe e os CPs martelados apresentaram dureza maior que os não martelados. Os CPs martelados na região de fragilidade de revenido apresentaram as durezas mais elevadas.

Realizaram exames semelhantes no metal de solda, depositando o eletrodo E-6010 em um chanfro no metal de base, sendo que o reforço das soldas foi retirado antes dos entalhes serem introduzidos por martelamento ou usinados. Todos os corpos de prova de impacto sofreram um leve ataque metalográfico para determinar a quantidade de estrutura colunar ou refinada na base do entalhe. Alguns resultados mostraram-se semelhantes aos obtidos com o metal de base, com a queda mais acentuada das energias de impacto para o martelamento lento em relação ao rápido a 21°C, e a queda acentuada das energias de impacto para os CP's martelados a 260°C.

Observaram também o efeito de um passe após martelamento na restauração das propriedades de impacto, e o desempenho de outros eletrodos como o eletrodo E-6016 (baixo hidrogênio) e de solda a arco submerso. Em relação a estes dois últimos citados, o eletrodo E-6016 apresentou melhores propriedades de impacto que o eletrodo E-6010 nas mesmas condições, (figura 20). Entretanto, no caso da solda ao arco submerso o mesmo não se verificou, figura 21.



onde:

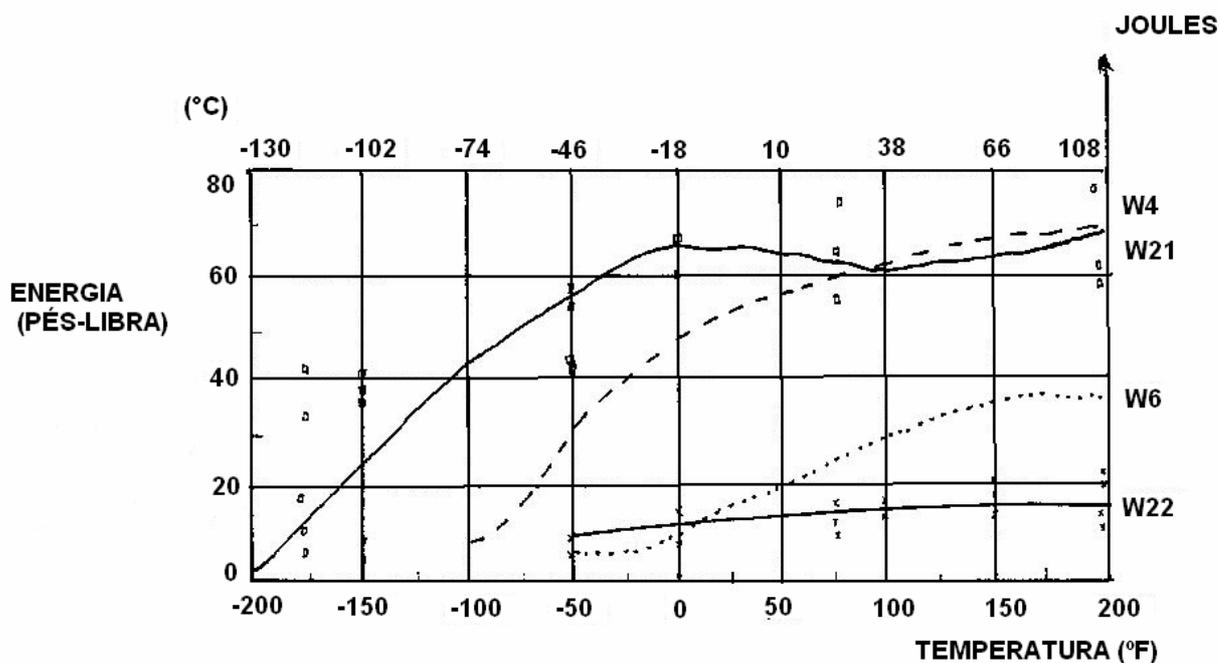
W19 = Eletrodo E-6016 entalhe usinado no segundo passe;

W20 = Eletrodo E-6016 segundo passe martelado lentamente a 21,1°C;

W4 = Eletrodo E-6010 entalhe usinado no segundo passe;

W6 = Eletrodo E-6016 segundo passe martelado lentamente a 21,1°C;

Figura 20 – Efeito do Martelamento nas curvas de impacto dos metais de solda depositados com eletrodos E-6010 e E-6016 [16].



onde:

W4 = Eletrodo E-6010, entalhe usinado no segundo passe;

W6 = Eletrodo E- 6010, segundo passe martelado lentamente a 21,1°C;

W21= Solda a arco submerso, entalhe usinado no primeiro passe;

W22= Solda a arco submerso, primeiro passe martelado lentamente a 21,1°C;

Figura 21 – Efeito do martelamento nas curvas de impacto dos metais de solda depositados com eletrodos E-6010 e solda ao arco submerso [16].

Nas metalografias realizadas constataram que a severidade e profundidade de deformação, pelo martelamento, eram mais pronunciadas no martelamento lento do que no rápido. A base do metal martelado apresentou inclusões de sulfeto dobradas e de silicato fragmentadas, além de regiões oxidadas e microtrincas.

No “*Welding handbook*” [18] são citadas várias normas e códigos que recomendam que o primeiro e o último passe não sejam martelados e, com respeito ao sobremartelamento, ressalta que as regras são em tanto confusas. Adverte para a queda nas propriedades de impacto devido ao martelamento conduzido na região de fragilidade de revenido (260 a 480°C). Afirma que as soldas ao arco submerso e as soldas com eletrodos de baixo hidrogênio E-7016 apresentam melhores propriedades de impacto quando marteladas a 21°C do que as soldas com eletrodos E-6010 marteladas na mesma temperatura.

Com respeito ao martelamento de aços de baixa liga, afirma que há razões para crer que as precauções sejam as mesmas que no caso de aços de baixo carbono. Contudo, para alguns casos, precauções especiais devem ser tomadas, como por exemplo: (i) no caso de certas séries de aços AISI 300, o endurecimento por deformação deve ser considerado, (ii) as séries de aços AISI 400 têm relativamente baixa resistência ao impacto na condição de como soldada, logo tem-se que ter um cuidado maior se o martelamento for realizado, e (iii) os valores de alongamento relativo, ou ductilidade, dos metais de base ou de solda devem ser considerados antes de se utilizar o martelamento.

No trabalho desenvolvido por Ribeiro [21], para o martelamento realizado com o intuito de introduzir tensões de compressão e melhorar a resistência à corrosão sob tensão, foi utilizado um martetele de agulhas. Houve um efeito indesejado, o encruamento da ZAC (zona afetada pelo calor), comprometendo assim a resistência do material à corrosão sob tensão.

A figura 22 mostra o perfil de dureza na superfície do corpo de prova martelado. Ocorreu neste corpo de prova um aumento significativo da dureza, bem acima do limite de 248 HV recomendado pela NACE, para conter a corrosão sob tensão. A justificativa para o encruamento na superfície se deve ao fato que o martelamento realizado com o martetele de agulhas acabou atingindo a ZAC, embora se pretendesse tratar unicamente o metal de solda..

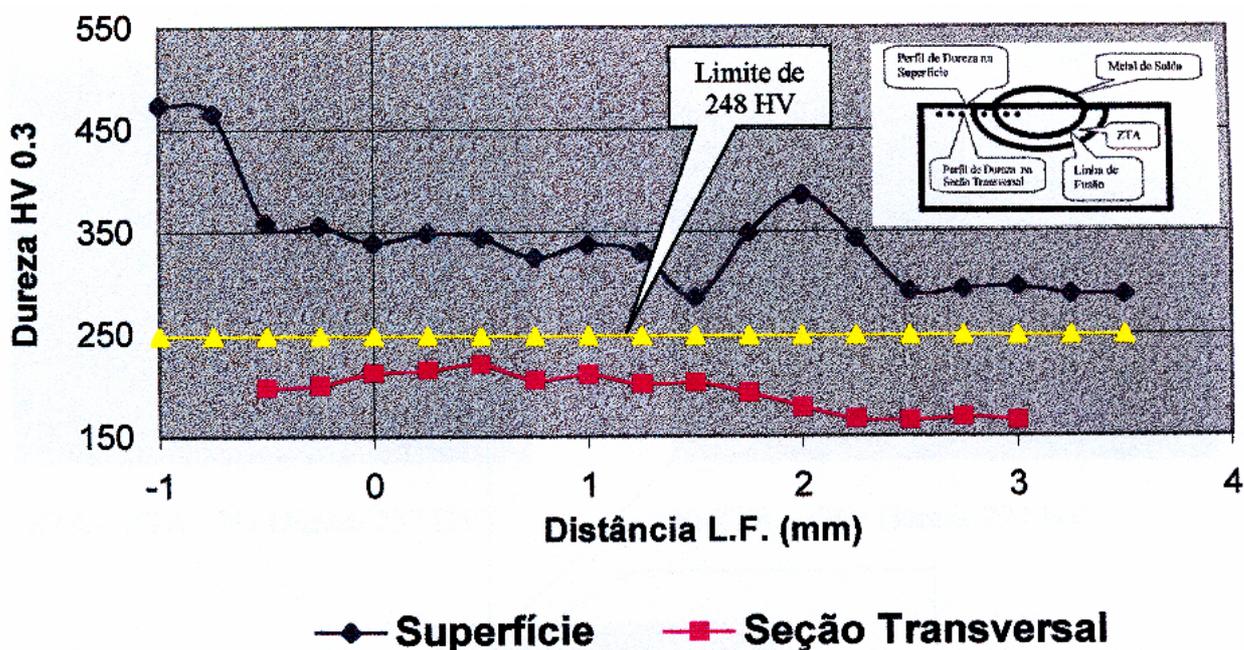


Figura 22 – Perfis de dureza do corpo de prova martelado.

3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo:

- a) Avaliar a eficácia do martelamento como método de alívio de tensões em metais de soldas obtidas com eletrodos revestidos de aços ferríticos e austeníticos.
- b) Quantificar os efeitos do martelamento na solda realizado a alta e baixa temperatura nos aspectos mecânicos e metalúrgicos

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

(a) Metal de base:

Utilizou-se como metal de base para todos os ensaios uma chapa de aço SAE 1020; com espessura de 12,7mm (1/2”), na soldagem dissimilar foi realizado o processo de amanteigamento, como será visto neste capítulo.

(b) Metal de Solda:

Realizou-se a soldagem utilizando eletrodos revestidos E-7018, E-316L-16, E-502-15 e E-505-15 (foram escolhidos devido as diferenças metalúrgicas entre eles) todos com o diâmetro de 3,25mm,

4.2 Aquisição do Ciclo Térmico no Cordão de Solda.

O ciclo térmico no cordão de solda foi fundamental para determinar as temperaturas a que o metal estaria após diferentes tempos de soldagem. Assim, foi possível definir a velocidade de martelamento, procurando que o mesmo ocorresse a temperaturas diferenciadas.

A aquisição dos ciclos térmicos foi realizada com um equipamento da National Instruments Modelo SCXI-1000, usando um programa elaborado na interface Labview 4.1.

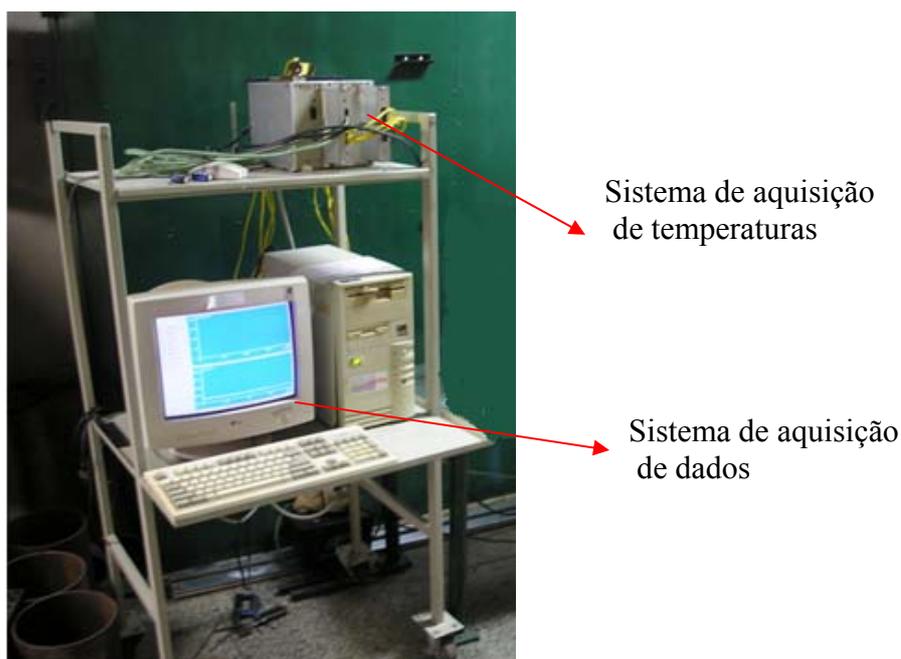


Figura 23 – Sistema de aquisição do ciclo térmico.

Os parâmetros de soldagem que foram utilizados neste ensaio: (i) deposição do cordão sobre chapa de aço SAE 1020, com nível de energia de 14 kJ/cm , (ii) velocidade de soldagem e tempo de deposição constante (12 cm/min e 40 segundos, respectivamente). Assim sendo, o comprimento do cordão foi constante (aproximadamente 8 cm).

Os ciclos térmicos foram medidos em 3 locais do metal de solda, nas extremidades e no centro do cordão (locais indicados na figura 24) por uma técnica conhecida como “*harponing*”; que consiste na inserção da junção de um termopar tipo “S” logo após a passagem do arco, imergido diretamente na poça de fusão. Isto permitiu conhecer os ciclos térmicos reais tanto no centro do cordão (onde se espera que o resfriamento seja mais lento), como nas regiões próximas do início e do fim do cordão.

Como não foi possível a imersão dos 3 termopares em seqüência, pelas dificuldades em fazê-lo sem danificar o termopar, a imersão foi feita separadamente, ou seja, um termopar em cada cordão, obedecendo os locais de mergulho do termopar na poça.

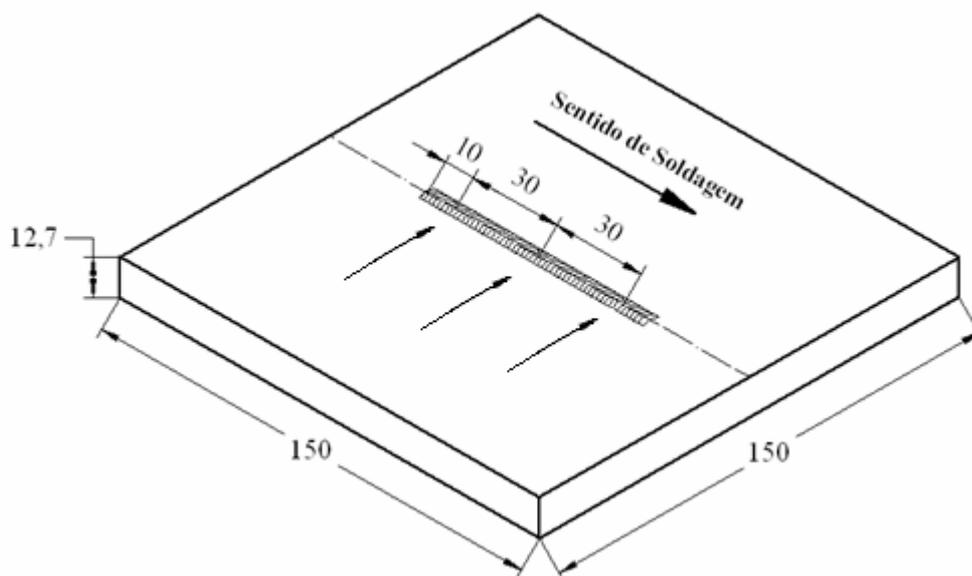


Figura 24 - Pontos de imersão do termopar ao longo do cordão.

4.3 Temperaturas de Martelamento.

Feita a aquisição dos ciclos térmicos e calculado a taxa de resfriamento, as temperaturas de martelamento foram determinadas da seguinte forma:

Com a velocidade de soldagem 12 cm/min, e tempo de deposição de 40 segundos tem-se o comprimento de cordão de 8 cm. Com uma velocidade do martelamento de 10 cm/min (suficientemente lenta para aplicar uniformemente o martelamento em toda a superfície do cordão) todo o cordão será martelado em 48 segundos. Com os tempos de imersão do termopar e o ciclo térmico de cada tempo, foi calculada a taxa de resfriamento de cada ciclo e

aplicando uma simples regra de três foi estipulada a temperatura em que o martelamento era executado.

Esta regra foi utilizada em ambos os casos: (i) soldagem em camadas e (ii) soldagem em junta em “V”.

4.4 Sistema de Soldagem.

Toda a soldagem foi feita de forma manual, com eletrodo revestido por um profissional qualificado, realizada com uma fonte de soldagem multiprocesso e microcontrolada MTE DIGITEC 450 desenvolvida e fabricada no LABSOLDA/UFSC que fornece corrente contínua, apta para os processos eletrodo revestido, TIG e MIG. A operação deste equipamento é realizada através de um painel de controle micro-processado, por meio do qual são realizados a seleção dos processos e ajuste das variáveis (figura 25a).



(a)



(b)

Figura 25 – Sistema de soldagem (a) fonte de soldagem; (b) Sistema de deslocamento linear TARTILOPE.

Para manter uma velocidade de soldagem e martelamento uniformes, foi utilizado um sistema de deslocamento linear IMC, modelo TARTILOPE V1, no qual a velocidade de deslocamento pode ser definida através de um painel portátil ou via computador e pode ser modificada durante o movimento. No carrinho foi fixada uma guia como referência para o soldador acompanhar - lá durante a execução da solda, garantido assim a velocidade de soldagem, assim como a de martelamento (figura 25 b)

4.5 Parâmetros de Soldagem.

Para chegar a um método confiável de avaliação das tensões residuais foram realizados vários ensaios preliminares.

- a) Soldagem em camada sobre chapa SAE 1020; para aplicar o método do contorno (através da medição do relevo das superfícies de corte);
- b) Solda multipasses, em junta em “V”, onde foram avaliadas as tensões através da distorção angular.

Em todos os casos foi utilizado o processo eletrodo revestido, aplicado na posição plana. Foi escolhida uma energia de soldagem suficientemente elevada de modo a resultar em temperaturas bem diferenciadas durante o martelamento. Todas as soldas foram feitas com a mesma, velocidade de soldagem e com tempo de deposição constante. Assim sendo, o comprimento do cordão também foi constante. As variáveis de soldagem foram aquelas indicadas na tabela 03:

Tabela 03 – Variáveis de soldagem utilizados para a confecção dos corpos de prova.

Parâmetros de Soldagem	Soldagem em Camadas	Soldagem em Chanfro “V”
Tensão (V)	22	22
Corrente (A)	125	125
V_{soldagem} (cm/min)	12	12
$\varnothing_{\text{Eletrodo}}$ (mm)	3,25	3,25
$T_{\text{Deposição}}$ (s)	40	25
Aporte Térmico (kJ/cm)	13	13
Comprimento do cordão (mm)	80	50

Para a Soldagem em camadas foi utilizado somente o eletrodo E-7018 na deposição da camada. Já a soldagem em junta “V” foram utilizados os seguintes tipos de eletrodos: E-7018; E-502-15; E-505-15 e o E-316L-16. Todos os eletrodos foram submetidos a uma secagem em estufa a uma temperatura de 350°C e permaneceram nesta temperatura por 1 hora, após a qual, foram mantidos numa estufa de armazenamento.

Procurou-se depositar os cordões de forma mais uniforme possível. O tempo de deposição dos cordões foi de 25 segundos, em função do qual tiveram comprimento de aproximadamente 5 cm. Foi necessário utilizar esses curtos tempos de deposição (com o pequeno comprimento decorrente) para permitir a execução da última etapa do martelamento a temperatura significativamente maior que a ambiente.

4.6 Confeção dos corpos de prova.

4.6.1 Soldagem em Camadas.

Utilizou-se para a confecção dos CPs um dispositivo restritor, onde a chapa era totalmente fixada em suas laterais por meio de bridas aparafusadas. Tomou-se cuidado de retirar as chapas já soldadas do aparato restritor somente após o seu resfriamento até a temperatura ambiente, objetivando com isso minimizar o relaxamento das tensões pela liberação das tensões exercidas pelo dispositivo (veja na figura 26 um esquema do mesmo).

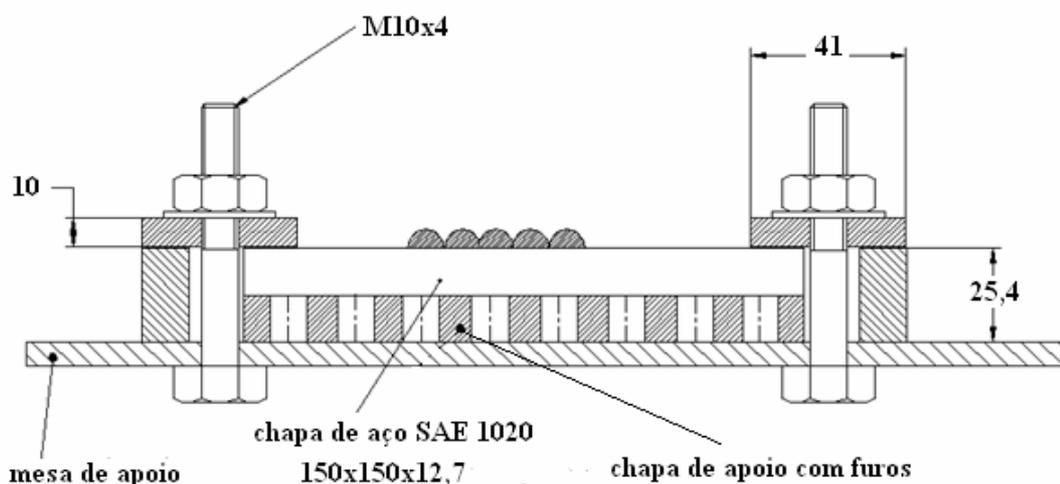


Figura 26 - Desenho esquemático do dispositivo para restrição dos CPs.

Procurou-se soldar os cordões de forma homogênea e simétrica. A disposição dos cordões foi, primeiro no centro da chapa, depois um à direita e outro à esquerda do cordão e assim sucessivamente, até totalizar 5 cordões. Cada cordão foi martelado individualmente logo após a deposição do mesmo, antes de remover a escória (para evitar o abaixamento excessivo da temperatura). O martelamento foi realizado com uma velocidade de 10 cm/min com sentido de avanço contrário àquele da soldagem, de modo que no início do martelamento o metal estivesse a uma maior temperatura (em torno de 435 °C) e no final a baixa temperatura (em torno de 230°C), figura 27.

Após cada cordão aplicado, a chapa era resfriada com jato de ar comprimido, para acelerar o resfriamento da chapa até aproximadamente 50°C e, dessa forma, diminuir o tempo despendido nos ensaios.

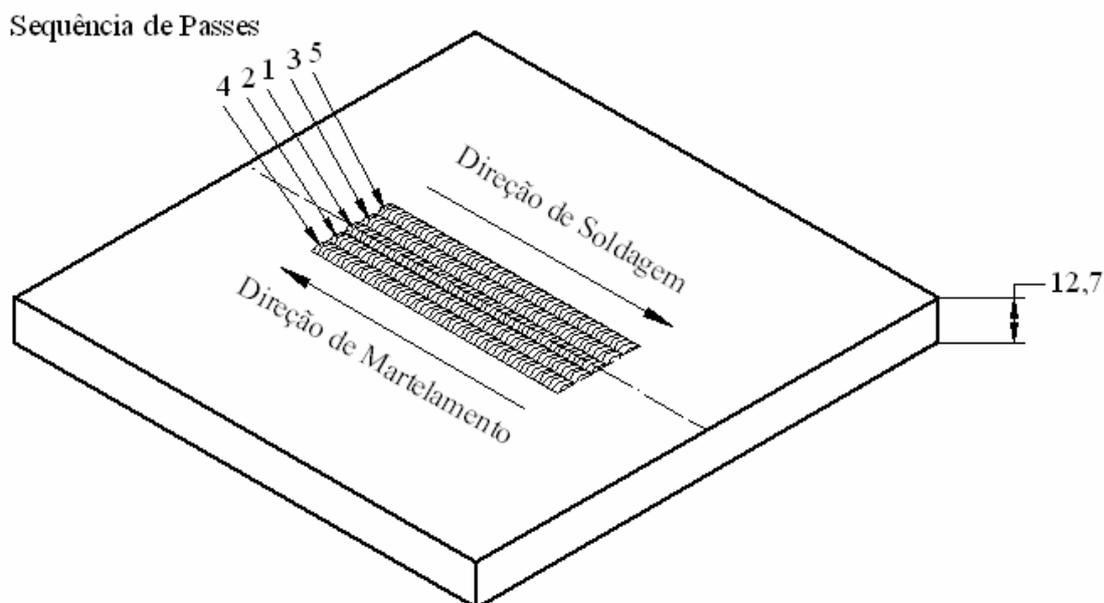


Figura 27 – Sequência de soldagem dos cordões que foram distribuídos homogeneamente ao longo da chapa.

4.6.2 Soldagem em Junta “V”.

As amostras foram preparadas e soldadas em juntas em “V” com um ângulo em cada bordo de 55° com 12,7mm (1/2”) de espessura, com comprimento de 120mm. A escolha do ângulo grande foi proposital, para dar mais contração e aumentar as tensões e distorções (figura 28).

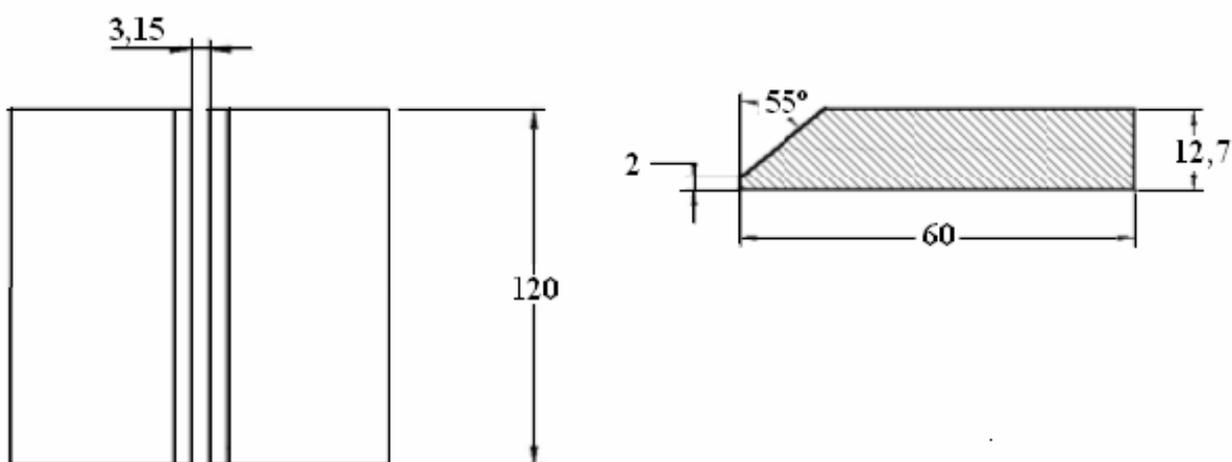


Figura 28 - Desenho esquemático do corpo de prova com união em “V”.

Nos CPs referentes aos eletrodos E-502-12, E-505-15 e E-316L-16, foram submetidos a um processo de amanteigamento, no qual foi utilizado o aço SAE 1020 como metal de base. No processo de amanteigamento foi utilizado um preaquecimento de 200°C

para todas as amostras. Após o amanteigamento foi realizada a planificação e correção da superfície a ser soldada. Foram depositadas 2 camadas de amanteigamento para obter um metal de solda com composição mais próxima daquela do metal de adição (isto é, diminuir a diluição total) como mostra a figura 29.

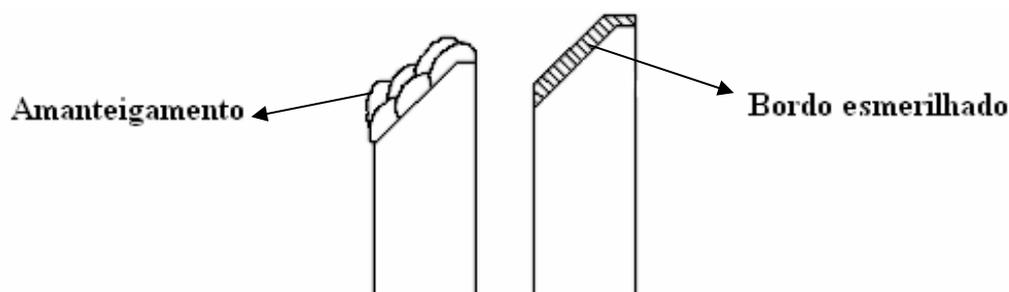


Figura 29 - Amanteigamento com duas camadas, seguido de esmerilhamento para correção da geometria da borda antes do preenchimento.

Todos os CPs seguiram a mesma seqüência para a sua fabricação, que consistiu em realizar um pré-aquecimento a 200°C. Mesmos os CPs soldados com os eletrodos E-7018 e E-316L-16 (que não precisariam deste preaquecimento), foram preaquecido nas mesmas condições que os eletrodos E-502-15 e E-505-15. Estes últimos sim necessitam de um preaquecimento devido à tendência a ocorrer trincas a frio. Para o passe de raiz foi utilizada uma corrente de 90A. Este procedimento foi realizado com o intuito de poder comparar os resultados entre si, ou seja, a mesma temperatura de preaquecimento, temperaturas de interpasses, quantidades de passes, seqüências de passes, o mesmo aporte térmico, velocidade e força de martelamento (pressão de trabalho). Estes valores estão descritos na tabela 4.

Tabela 04 - Parâmetros utilizados na confecção de todos os corpos de provas

$T_{\text{Préaquecimento}}$ (°C)	$T_{\text{Interpasses}}$ (°C)	N° Passes	$V_{\text{Martelamento}}$ (cm/min)	V_{Soldagem} (cm/min)	$F_{\text{martelamento}}$ (kg/cm ²)
200	230 - 250	5	10	12	6,3

Procurou-se soldar os cordões de forma homogênea e simétrica, da seguinte forma: (i) o passe de raiz, não foi martelado; (ii) cada um dos cordões de enchimento foi martelado, inclusive o último cordão. Ao todo foram executados 5 cordões.

Soldaram-se as chapas de tal forma que o máximo de tensões residuais fosse obtido. Para tanto, foi utilizado um dispositivo para restringir o movimento do CP e facilitar o preaquecimento. A figura 30 demonstra este dispositivo.

Foram confeccionados 3 CPs para cada tipo de eletrodo: (A) um martelado a baixa temperatura, (B) um sem martelamento, (C) um martelado a alta temperatura. Avaliando assim qual o tipo de martelamento é mais eficaz, analisando o comportamento do CP em relação à distorção angular, comparando a dureza e microestrutura e quais os benefícios e malefícios que o martelamento pode produzir nesses materiais.

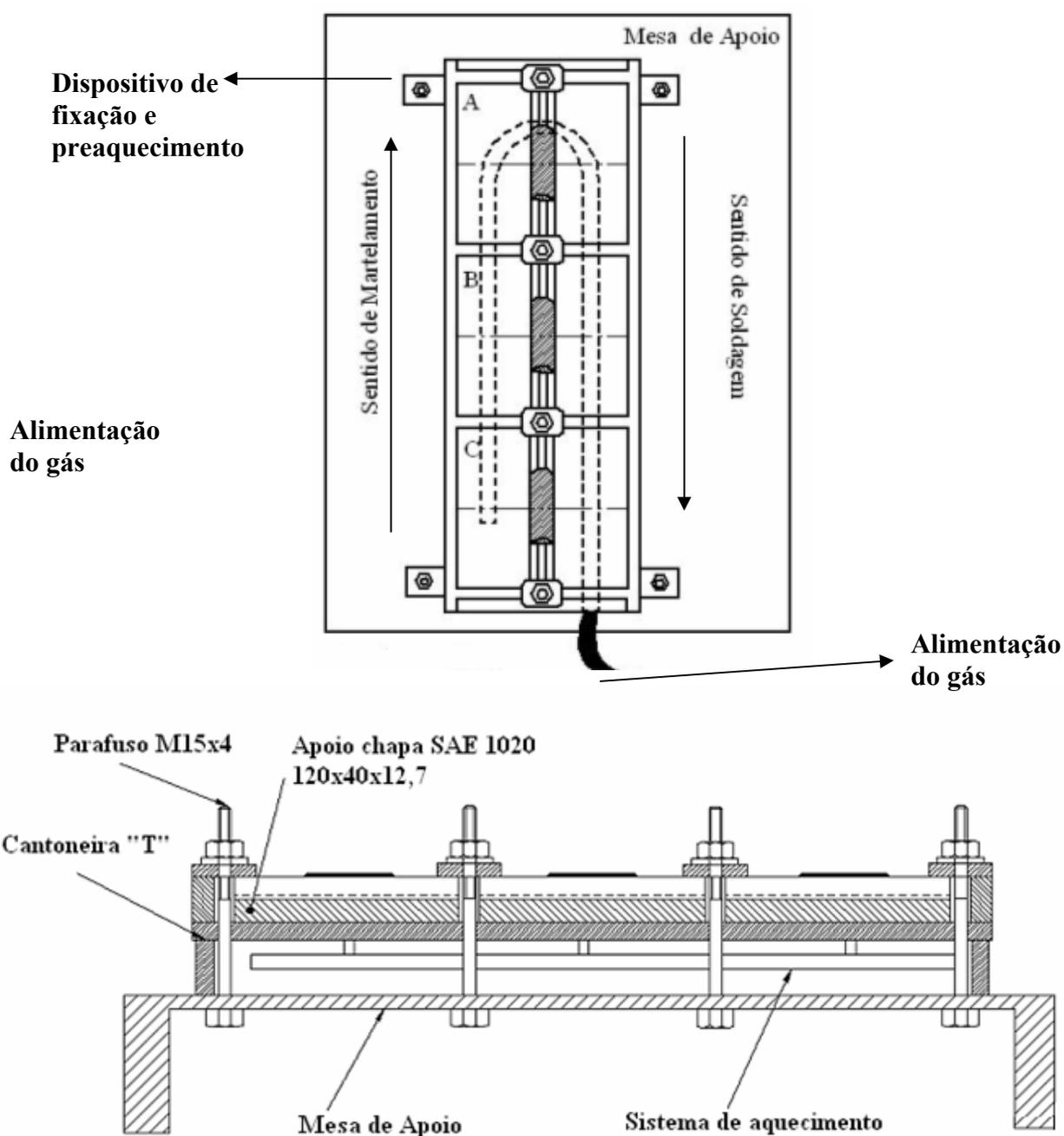


Figura 30 – Dispositivo utilizado para fixação e preaquecimento dos CPs.

4.7 Procedimento de Martelamento.

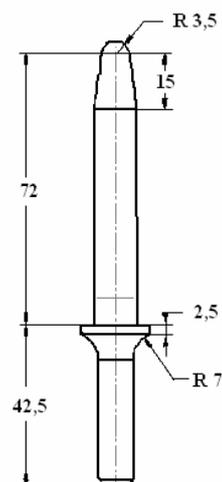
O procedimento de martelamento utilizado nos CPs serão descritos a seguir, sendo divididos em:

4.7.1 Soldagem em Camadas.

Neste processo utilizou-se um martelo pneumático, trabalhando a uma pressão de $6,3 \text{ kg/cm}^2$ (90psi). A figura 31 indica os martelos utilizados e as dimensões da ferramenta.



(a)



(b)

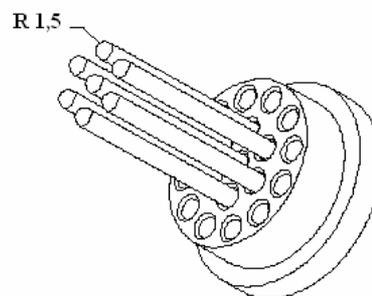


Figura 31 - Dimensões da ferramenta utilizada no martelamento: (a)Punção;

(b) Agulhas.

4.7.2 Soldagem em Junta “V”.

No martelamento destes CPs foi utilizado somente o martelo por punção; (veja a figura 33a), e, com base nos ciclos registrados, foi estipulada a velocidade de martelamento (10cm/min) para que no início do processo o martelamento se desse a alta temperatura e no final do processo a temperatura estivesse próxima de 200°C , ou seja, que correspondesse a um martelamento a baixa temperatura.

Após cada passe, estando ainda o cordão coberto pela escória, o martelamento foi realizado em uma única passada. Para fins de comparação amostras similares foram soldadas sem martelamento.

A velocidade de martelamento era mantida tão constante quanto possível. Para tanto utilizou-se o mesmo operador em todos os corpos de prova martelados, o qual foi treinado antes da operação de martelamento. Além disso, o operador seguia uma guia fixada num dispositivo de deslocamento linear (TARTILOPE V1) colocado ao lado dos corpos de prova a serem martelados. Os CPs foram fixados no dispositivo restritor antes do martelamento.

Definiu-se a quantidade de martelamento como sendo a suficiente para cobrir os CPs de mossas, tendo sido tomado o cuidado para que o mesmo ponto do cordão de solda fosse martelado apenas uma vez, evitando assim o sobremartelamento.

4.8 Determinação das Tensões Residuais.

Com o intuito de avaliar as tensões residuais, avaliaram-se estas através de algumas técnicas como:

4.8.1 Método do Contorno.

Antes da soldagem os CPs foram restringidos para que se resultasse no máximo de tensões residuais e a amostra só foi retirada deste dispositivo após completamente resfriada. Num mesmo cordão tentou-se avaliar o martelamento a frio, morno e quente.

Efetuada a soldagem, os CPs foram submetidos a corte por eletro-erosão a fio, com o qual se produziam bordos extremamente retos, como recomendado por Grant [12] (veja a figura 32a).

Após o corte, cada face foi medida em um medidor de coordenadas, no qual um apalpador fazia uma varredura em cada superfície cortada, totalizando 3 retas, sendo a reta 1 no metal de solda (ZF), a reta 2 na região da ZAC (ZF e MB), e a reta 3 no metal de base (MB), de modo a verificar possíveis deformações produzidas pelo relaxamento de tensões elásticas devido ao corte.

Na figura 32b pode-se observar os detalhes deste ensaio assim como as posições de leitura.

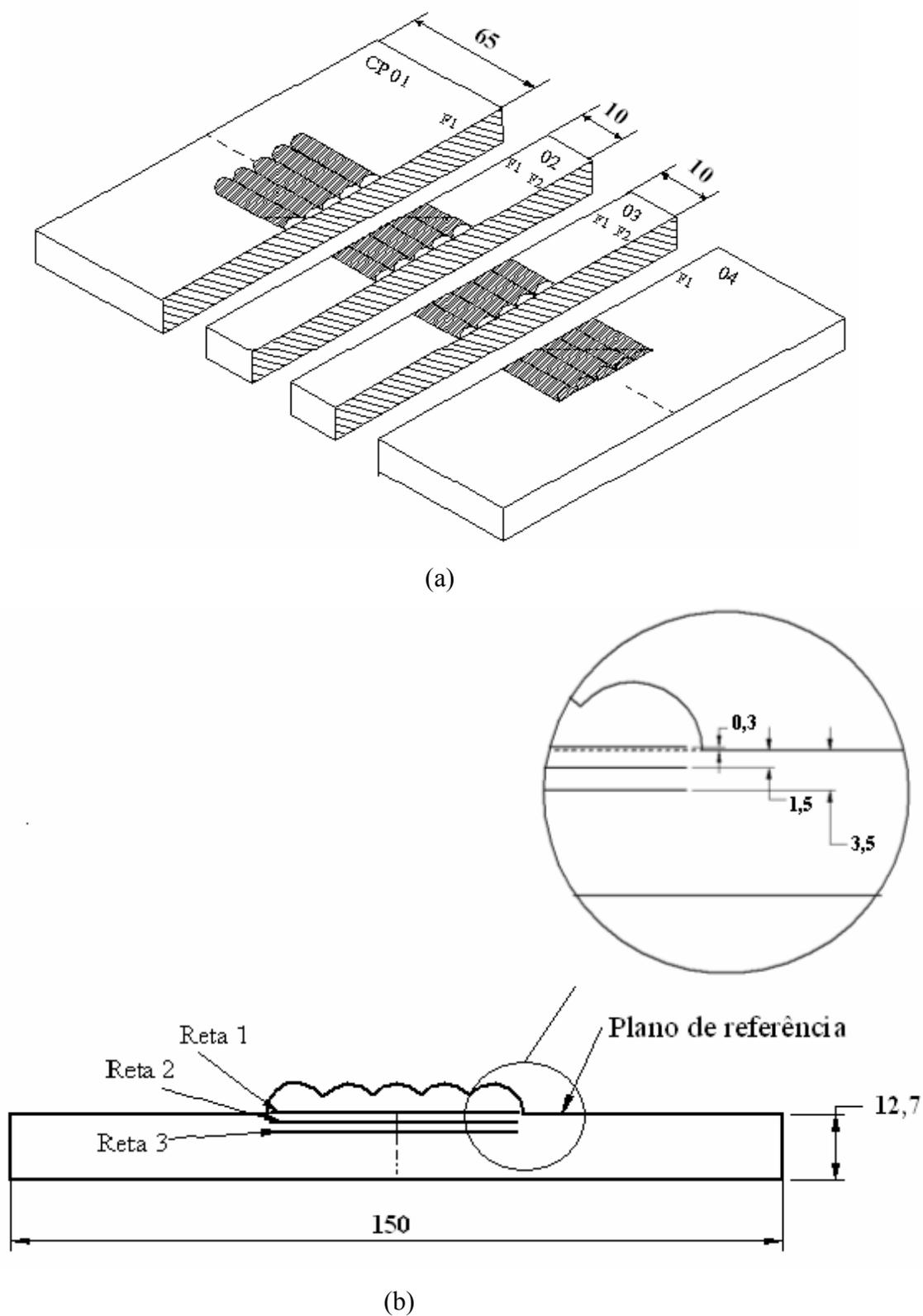


Figura 32 - Preparação das amostras para medir as tensões pelo método do contorno:
 (a) Posições do corte por eletro-erosão a fio (b) posicionamento das retas no medidor de coordenadas.

4.8.2 Método pela Distorção Angular.

Concluído o martelamento e mesmo antes de realizar a medição da distorção angular as amostras foram cortadas em sua secção transversal de forma similar (veja figura 33a) com uma serra fita. Efetuado o corte, foi realizado um esmerilhamento do excesso de material na parte inferior do passe de raiz, isto para poder permitir que a superfície do CP apoiasse na mesa desempeno.

Foi realizada a medição das distorções angulares na peça soldada com auxílio de um software de desenho a partir de uma fotografia da sua secção transversal, com a peça apoiada em uma mesa de desempeno.

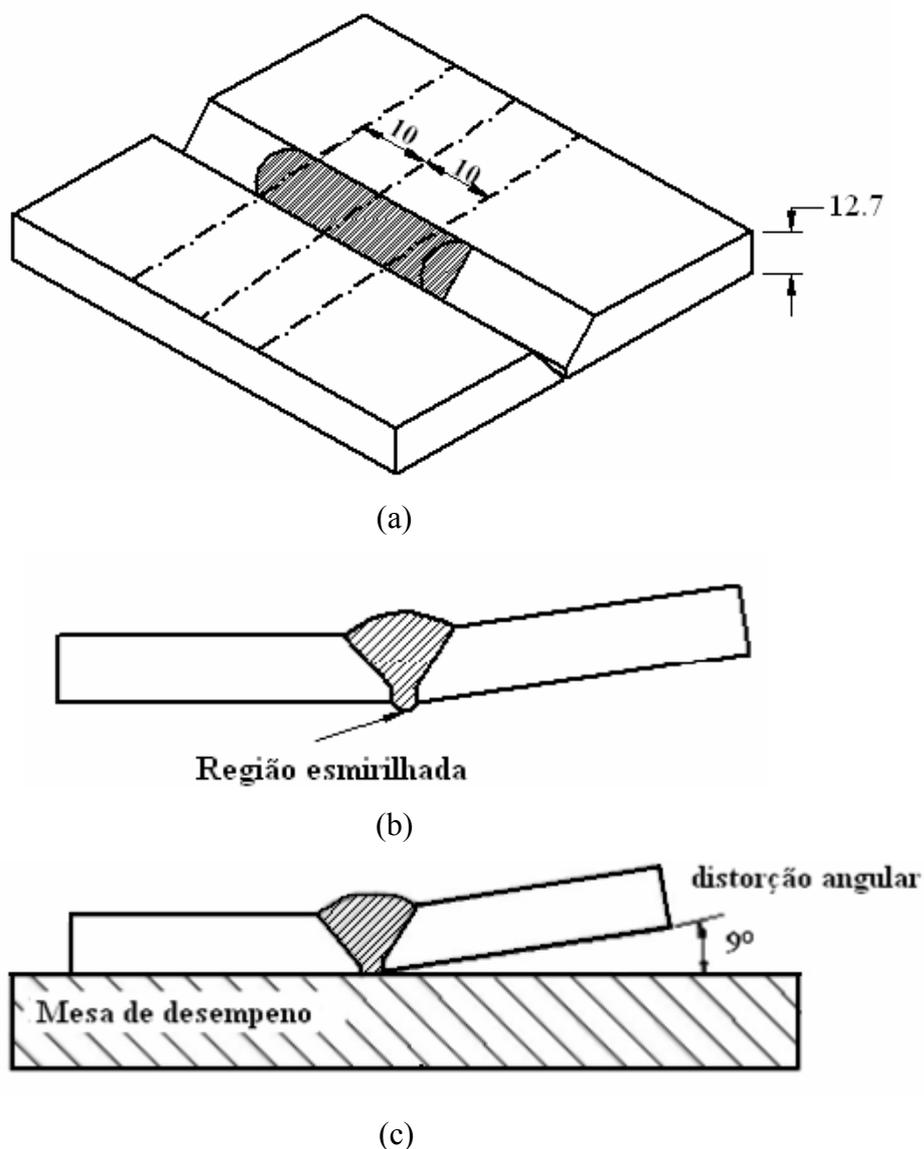


Figura 33 - Preparação das secções de corte onde serão avaliadas as distorções angulares: (a) Corte da secção transversal; (b) desbaste do excesso de material do passe de raiz; (c) medição da distorção.

4.9 Avaliação das Propriedades Metalúrgicas do Metal de Solda Martelado.

A fim de avaliar as propriedades metalúrgicas do metal de solda martelado na região que corresponde ao último cordão e penúltimo cordão depositado foram realizadas; macrografias, micrografias com diversos aumentos e a medições de durezas, como indica a figura 34.

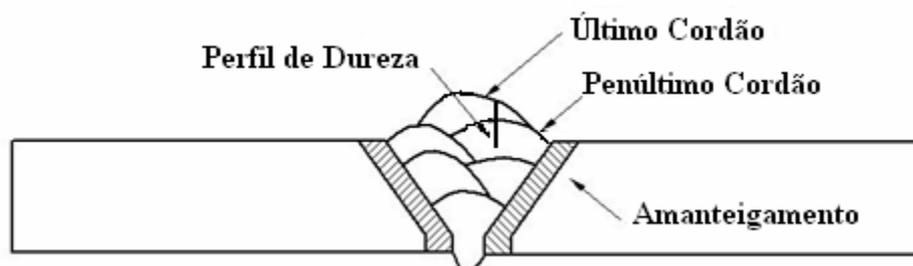


Figura 34 - Esquema da macroestrutura da solda e do cordão onde foram realizados os ensaios.

A macrografia foi realizada com lupa estereoscópica usando um aumento de 10X. As micrografias foram realizadas da seguinte forma: (i) de forma geral com uma ampliação de 100X para caracterizar a região superior da solda (topo do reforço) no centro, assim como a linha de fusão entre o último e o penúltimo cordão; (ii) micrografia com uma ampliação de 200X das regiões que apresentam características particulares como, por exemplo, até onde a deformação do martelamento ocorreu; (iii) perfil de dureza “Vickers”, na direção perpendicular à superfície das chapas soldadas, desde um ponto próximo à superfície do último cordão (sem prejudicar a precisão da medida da dureza), para verificar o efeito do martelamento, sendo utilizada uma carga de 0,5 kg aplicada durante 15 segundos; ao todo foram feitas 26 pontos de dureza, com uma distância total à superfície de 5,05 mm, para se verificar a profundidade do encruamento; (iv) após a medição de dureza foram realizadas micrografias com aumento de 50x e na imagem montada com várias fotos de regiões adjacentes (indo até a região de transição entre o penúltimo e o último cordão) puderam ser localizados os pontos onde ficou cada impressão de dureza, para associá-la à microestrutura.

5.0 Resultados e Discussão

Neste capítulo são descritos os resultados obtidos nas diferentes etapas de ensaio:

- Aquisição dos ciclos térmicos;
- Avaliação do Método do Contorno para a estimativa das tensões residuais;
- Avaliação das tensões residuais pela distorção angular;
- Avaliação dos efeitos do martelamento realizado em diversas condições sobre vários metais de solda.

5.1 Ciclo Térmico no Cordão de Solda.

Os ciclos térmicos foram adquiridos perto dos 2 extremos e no centro do cordão. O termopar inserido na poça ficava soldado à mesma, como indica a figura 35. A imersão de termopar foi feita manualmente com bastante dificuldade, devido à proximidade do arco que ocasionava às vezes a fusão do mesmo. Portanto, foram necessárias várias tentativas até alcançar estes resultados.

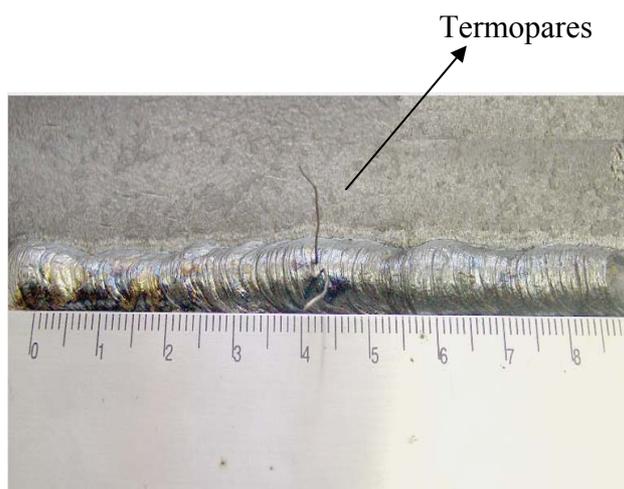


Figura 35 – Região onde o termopar foi imerso para a aquisição da taxa de resfriamento, E-7018, T= 20 segundos, I= 125A.

Todos os cordões foram depositados sobre chapa SAE 1020, utilizando eletrodo E-7018, com uma velocidade de soldagem de 12 cm/min e com tempo de deposição de 40 segundos.

O gráfico da figura 36 mostra os ciclos térmicos registrados. Observa-se que os tempos de resfriamento $\Delta t_{8/5}$ (veja tabela 5), foram praticamente idênticos, embora conforme indica a literatura fosse esperado que as extremidades resfriassem mais rápido do que o

centro, pois o calor difunde não somente na direção transversal, mas também na longitudinal (em direção a peça fria).

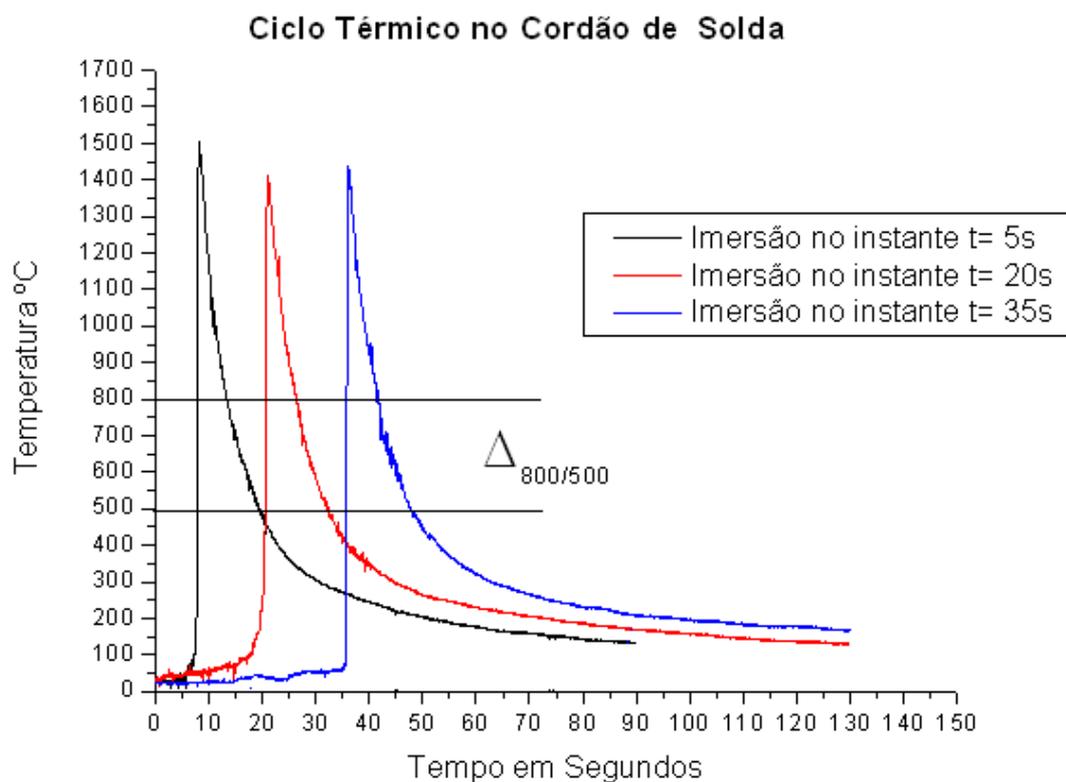


Figura 36 – Aquisição dos Ciclos térmicos com seus respectivos tempos.

Com base nestes gráficos, e considerando que entre o momento em que se termina de depositar o cordão e se prepara a ferramenta para começar o martelamento passam 3 segundos (no melhor dos casos), foi estipulada uma velocidade de martelamento suficientemente lenta (10 cm/mim) de modo a ter temperaturas do cordão bem diferenciadas no momento em que se efetua o martelamento nos dois extremos (inicial e final) e no centro.

Tabela 05 – Tempos de resfriamento para cada instante de imersão do termopar.

Tempo de Imersão do Termopar	Tempo
t = 5s	$\Delta t_{8/5} = 7$ s
t = 20s	$\Delta t_{8/5} = 6$ s
t = 35s	$\Delta t_{8/5} = 7$ s

Os valores de temperatura calculados para o instante de martelamento para a soldagem em camadas estão indicados na tabela 06.

Tabela 06 - Temperaturas de martelamento no cordão de solda para a deposição em camadas

Tipo de Martelamento	Temperatura de Martelamento (°C)
Martelamento a Baixa temperatura	150 - 180
Martelamento a Média Temperatura	230 - 260
Martelamento a Alta Temperatura	430 - 460

Para a soldas multipasses nos CPs com chanfro em “V”, o martelamento foi realizado somente com a ferramenta de punção, sendo que as temperaturas de martelamento foram:

Martelamento a baixa temperatura: 200 - 230°C

Martelamento a alta temperatura: 470 - 500°C

Estas temperaturas foram obtidas com base na velocidade de martelamento (10cm/min). A temperatura do cordão no momento final do martelamento é bastante baixa (200 - 230°C), esta temperatura final é devido ao preaquecimento de 200°C realizado em todas as amostras, foi utilizada uma energia de soldagem relativamente alta. Isso mostra que, ainda depositando cordões de pequeno comprimento (para minimizar o tempo de resfriamento) a velocidade de resfriamento de soldagem é tão elevada que em pouco segundos o cordão atinge temperaturas próximas da temperatura geral da peça.

5.2 Determinação das Tensões Residuais pelo Método do Contorno Soldagem em Camadas.

Tentou-se avaliar por este método os efeitos de dois tipos de ferramentas, (i) punção, (ii) agulhas. Foram depositados cinco cordões formando uma camada sobre uma chapa de aço SAE 1020. Cada cordão foi martelado individualmente, após o qual, com o auxílio de uma pistola de ar, apressava-se o resfriamento até obter uma temperatura na chapa similar à inicial, com o intuito de que cada cordão estivesse nas mesmas condições de soldagem que o anterior. A figura 37 mostra o aspecto dos dois CPs.

Observam-se características distintas quanto à massa impressa na camada de solda. O martelamento por punção pode ser aplicado de forma mais localizada, preservando assim o

metal de base, ao contrário do martelamento por agulhas em que, mesmo tendo cuidado, houve o martelamento do metal de base.



Figura 37 – Superfícies marteladas; (a) com punção (b) com agulhas.

As camadas foram cortadas na direção transversal em 3 locais, mediante eletroerosão a fio. Segundo Grant [12] as faces cortadas sofreriam um relaxamento das tensões no sentido do corte, ocorrendo assim deformações na superfície cortada. Teoricamente, o relevo de uma das superfícies do corte deveria ser um espelho da outra. Na prática não foi isto que aconteceu como será descrito a seguir.

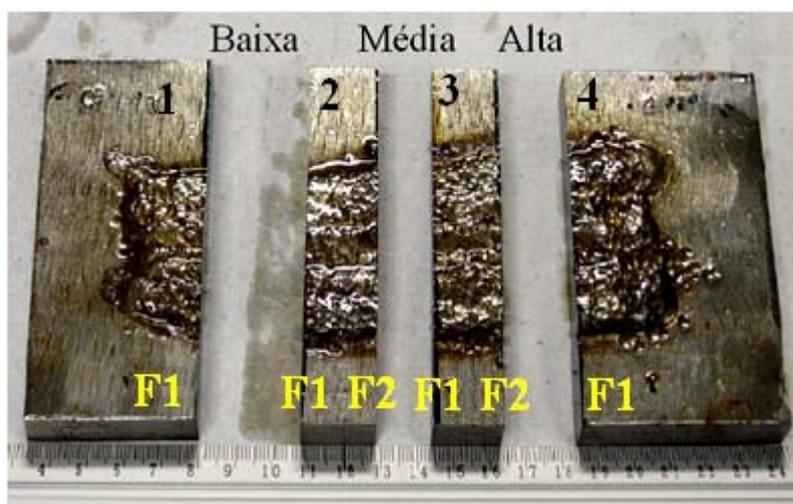


Figura 38 - Corte por eletro-erosão, onde estão indicadas as referências de cada face avaliou-se a planeza de cada face no medidor de coordenadas.

O resultado encontrado foi um gráfico tridimensional, no qual verifica-se que a altura de cada ponto de leitura sobre a superfície do corte. Utilizando-se de um modelo de elementos

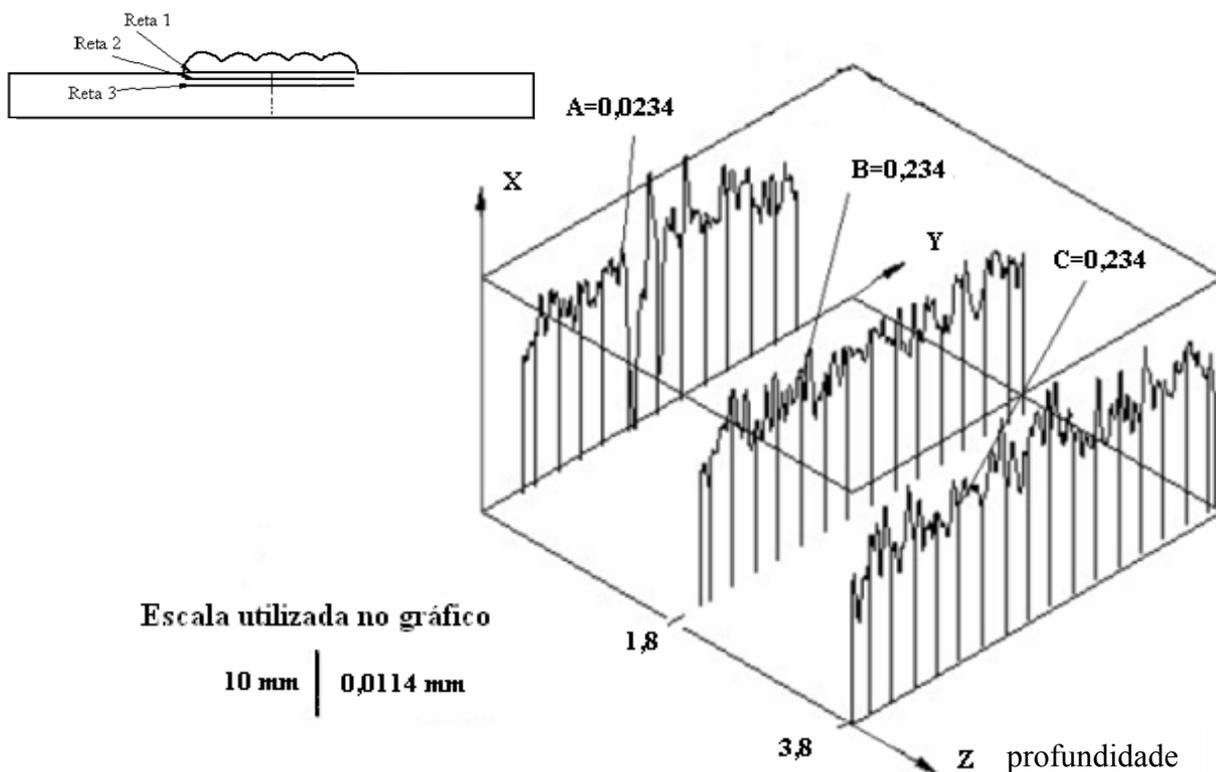
finitos (EF), as tensões residuais, podem ser calculadas, por consequência das medidas dos contornos da superfície após o corte.

Nota-se que o relevo das superfícies é significativo. Isto é, permitiria discriminar as correspondentes tensões residuais que foram aliviadas como consequência do corte. Por outro lado, os relevos das faces não são espelhos um do outro (veja a figura 39). Como as deformações elásticas produzidas pelo relaxamento das tensões ao fazer o corte deveriam ser similares em pontos correspondentes (A, B,C) das superfícies originadas pelo corte (conforme é afirmado por Grant [12]), isso significa que houve algum efeito negativo produzido pelo processo de corte que impediu a formação dos relevos só como consequência do alívio de tensões. Em se tratando de um processo termoquímico de corte, que ocorre como resultado da remoção de pequenas partículas com pouco aquecimento do metal e praticamente nenhuma deformação plástica, era de se esperar um melhor resultado, conforme é afirmado na literatura [12]. Mais isso não ocorreu.

Como cada face após o corte, se comportou de forma independente, ou seja, as deformações elásticas produzidas pelo relaxamento das tensões se comportaram de forma aleatória, dificultando assim uma comparação entre as amostras. O erro atribuído à medição, ficou muito próximo ao erro ocasionado pelo processo de corte. Ao que parece a variação no relevo da superfície produzida pela rugosidade do corte foi maior que a deformação produzida pelo alívio das tensões elásticas ao seccionar a solda transversalmente, ficando assim de difícil avaliação.

Em virtude desta dificuldade, optou-se por avaliar as tensões residuais de forma indireta a partir da distorção angular.

Planeza da superfície 1 – F1



Planeza da superfície 2 – F1

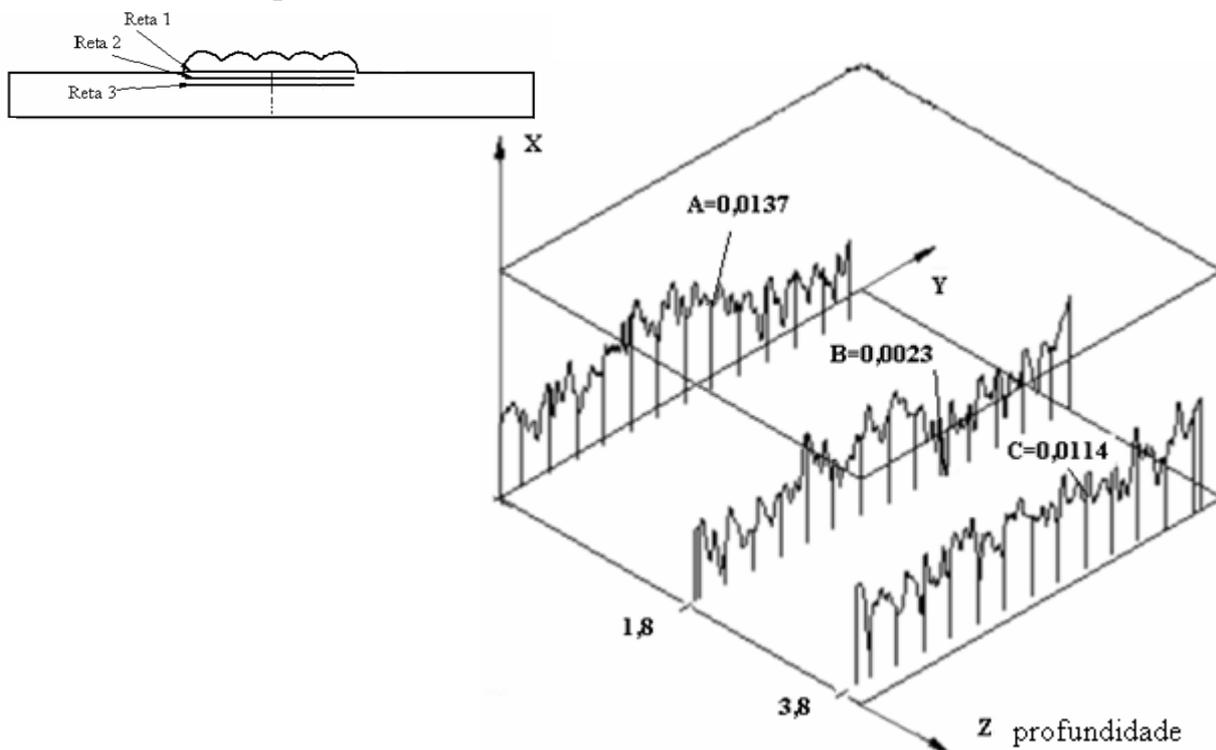


Figura 39 – Gráficos tridimensionais da planicidade encontrados em cada face (1-F₁ ; 2- F₁) espelhada, correspondendo ao martelamento a baixa temperatura.

5.3 Resultados das tensões residuais pelo método da distorção angular Soldagem em junta em “V”.

Nos seguintes ensaios foi utilizado somente o martelo de punção, devido à facilidade de posicionamento do impacto, garantido assim que somente fosse martelado o metal de solda.

Os níveis de tensões residuais foram avaliados por comparação da distorção angular entre os três tipos de amostras, que incluíam: duas condições martelamento (a alta e baixa temperatura) e uma amostra sem martelamento. Todos os CPs de provas seguiram as mesmas etapas de preparação, e também foram utilizadas as mesmas condições como velocidade de soldagem, corrente de soldagem, tempo de deposição e pré-aquecimento (mesmo os que não necessitavam de preaquecimento como o E-7018 e E-316-16).

Os resultados serão apresentados na seguinte ordem; (i) resultados das distorções angulares, (ii) macrografia dos cordões, (iii) metalografia do último cordão e, (iv) ensaio de microdureza para avaliar o grau de encruamento que o martelamento produziu.

5.3.1 Martelamento do Metal de Adição E-7018.

A medição angular da distorção foi realizada mediante a inserção de uma foto da secção transversal num software de desenho. Na figura 40 estão as macrografias transversais dos locais dos cortes dos 3 CPs.

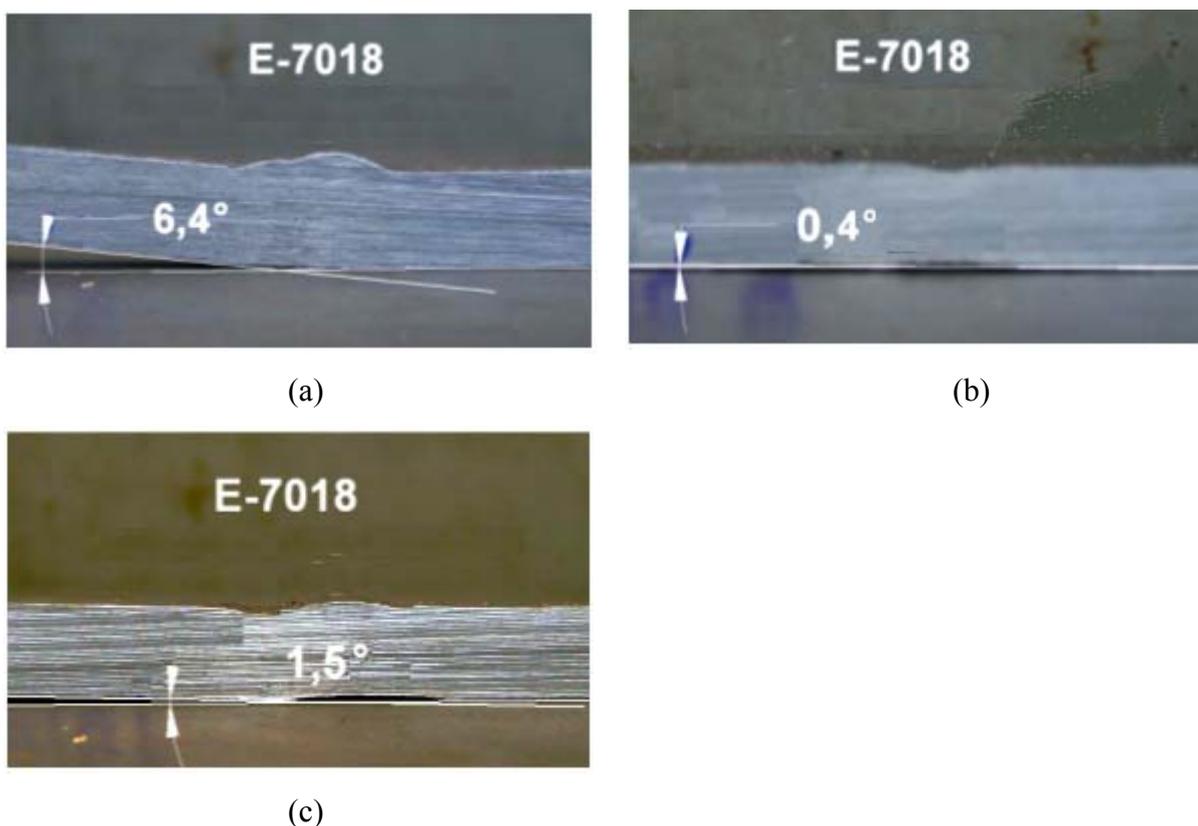


Figura 40 – Distorção angular dos corpos de provas devido às tensões geradas na soldagem, em CPs soldados com eletrodo E-7018; (a) Sem martelar; (b) Martelado a alta temperatura; (c) Martelado a baixa temperatura.

Pode-se observar que o CP sem martelamento, sofreu o maior grau de distorção angular, resultando em um ângulo de 6,4°. Já as amostras que foram marteladas a alta e baixa temperatura, a distorção angular foi de 0,4° e 1,5° respectivamente. Nota-se uma redução expressiva nas distorções angulares encontradas nos CPs submetidos aos martelamentos.

As macrografias da secção transversal do topo da solda estão mostradas na figura 41. Nelas podem-se observar o metal de solda (formado por vários cordões), as ZACs produzidas pelo aquecimento em cada passe e, à esquerda, o metal de base. Na figura também é indicada à linha sobre a qual foram feitas as medições de dureza.

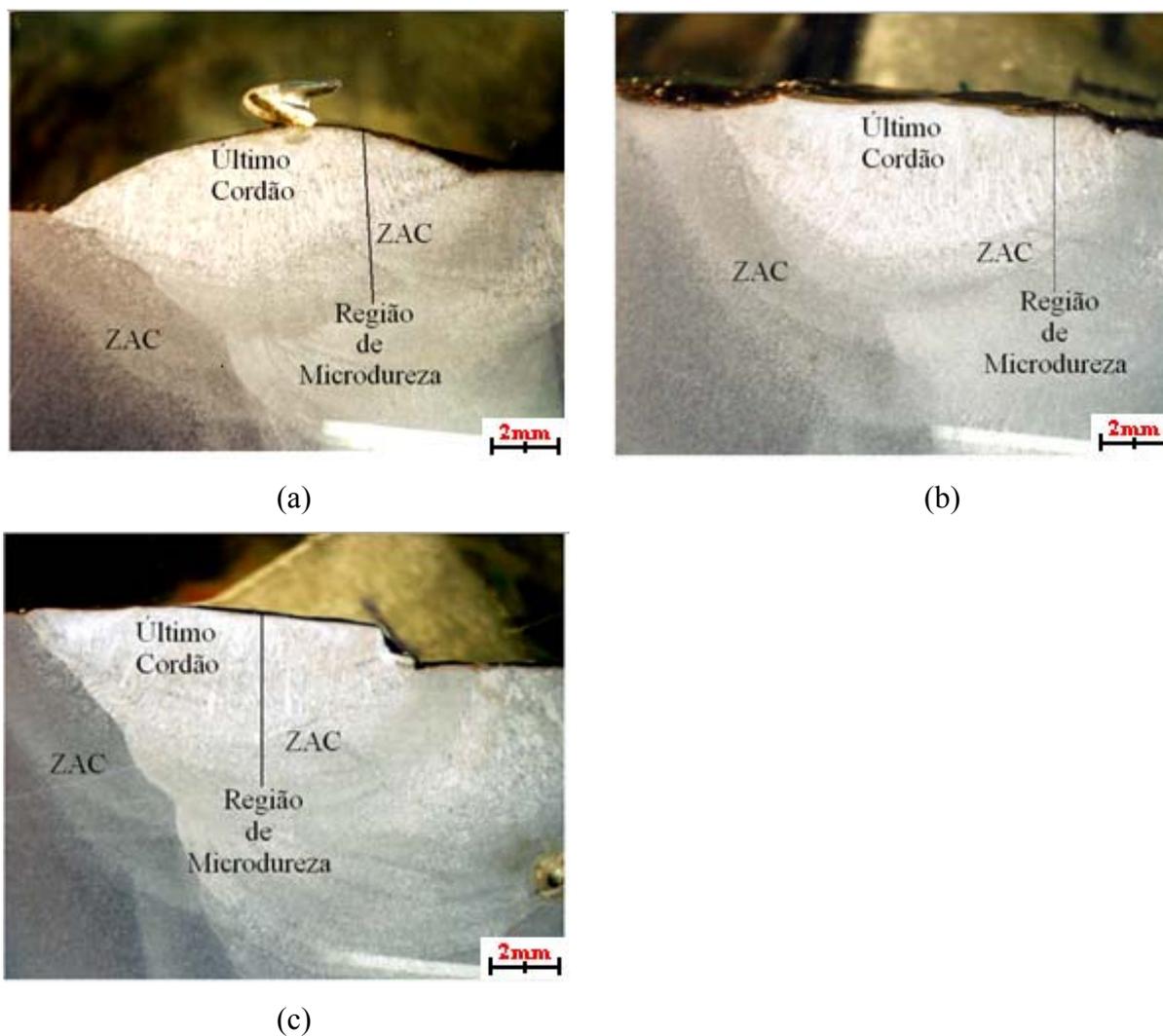


Figura 41 – Macrografias a 10x das soldas realizadas com metal de adição E-7018 ; (a) Sem martelamento; (b) com martelamento a alta temperatura; (c) com martelamento a baixa temperatura.

O CP martelado a alta temperatura sofreu uma maior deformação (menor sobremetal) no último cordão. Isto se deve ao fato de uma menor tensão de escoamento que possui o material a uma maior temperatura. Para ter uma idéia das ordens de grandeza na discussão dos resultados quanto a profundidade do encruamento e da região do cordão cuja microestrutura foi alterada pelo martelamento, vale a pena observar que a altura total do cordão (soma entre a penetração e reforço da solda) foi menor que 5 mm, para todos os casos.

A seguir discutisse cada estrutura encontrada e suas características nas propriedades mecânicas de cada CP martelado.

Na figura 42 são apresentadas as microestruturas reveladas pelo ataque metalografico. Como resultado da solidificação no resfriamento do cordão a partir do estado líquido, pode-se observar na região próxima da linha de fusão a estrutura colunar, enquanto na região da

superfície (que sofre resfriamento também pela perda de calor por convecção para o ambiente) os grãos tendem a ser equiaxiais.

Como produto da deformação resultante do martelamento, pode-se esperar o alongamento dos grãos na direção transversal ao impacto da ferramenta. Nas figuras 43a, e 44a verificasse que a camada fortemente deformada (mossa impressa na superfície pelo efeito do martelamento) tem uma espessura pequena, menor que 200 microns.

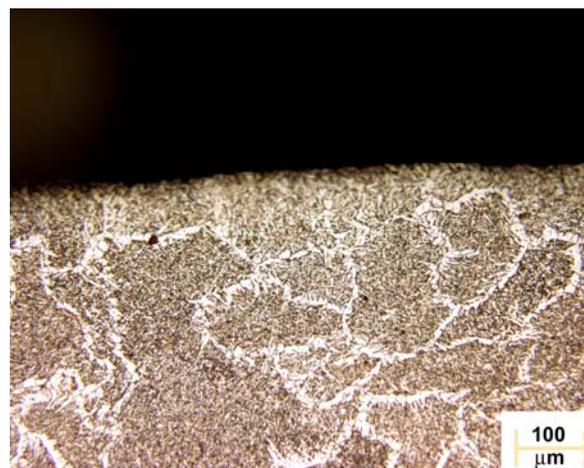
Nas macrografias destacam-se as regiões onde foram analisadas as micrografias destacando assim cada passe de cordão e os efeitos na microestrutura, em decorrente de cada passe subsequente.

Observa-se nas figuras 42b, 43b, 44b na parte central do último cordão dos CPs que todos conservam a estrutura colunar. Isso indica que não houve recristalização para os CPs martelados, mesmo no caso de ter sido feito a maior temperatura.

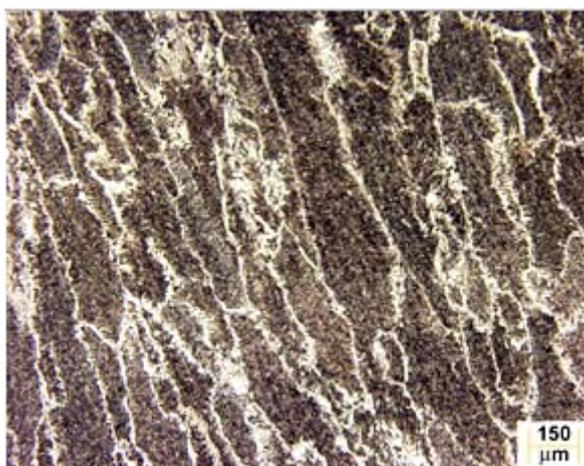
Nas figuras 43c, 44c, comparando-se com a microestrutura da figura 42c, sem martelamento as microestruturas da ZAC produzida pelo último cordão, não se pode apreciar o efeito da influência da deformação prévia sobre a recristalização do metal de solda, pois avaliando a morfologia dos grãos, estes continuam colunares. Isto se deve ao fato de não ter ocorrido recristalização, pois se a mesma houve-se ocorrido, os grãos seriam de forma equiaxiais. Pode-se explicar este fato ao efeito do martelamento na superfície do cordão deformado, no qual a moosa impressa é de pequena profundidade (200 microns), onde não se pode apreciar-se uma recristalização intensa, mesmo passando pelo aquecimento de passes subsequente.

E-7018
Sem Martelamento

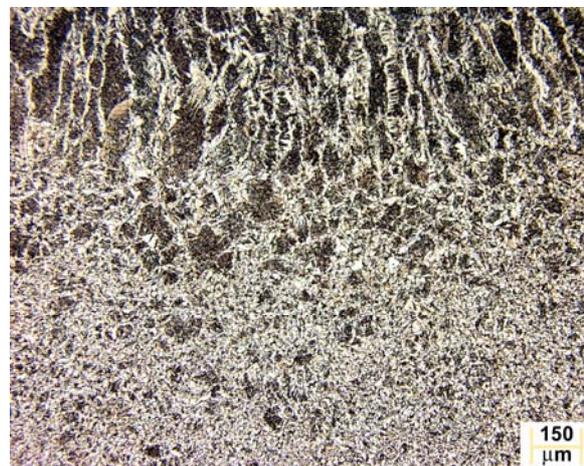
(a)



(1a)



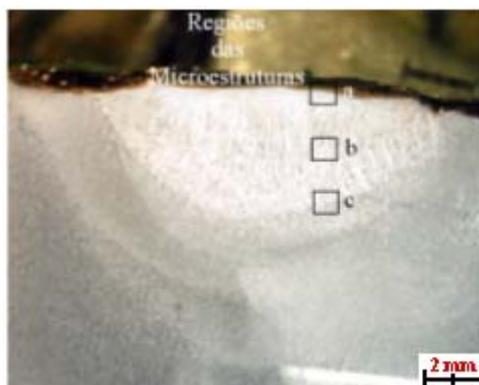
(b)



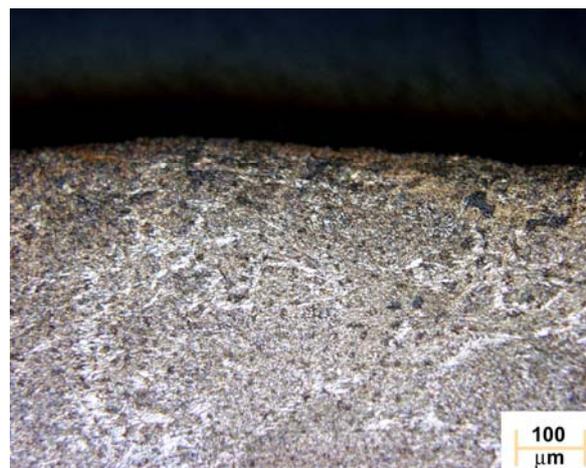
(c)

Figura 42 – Microestruturas na solda realizada sem martelamento; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 2%.

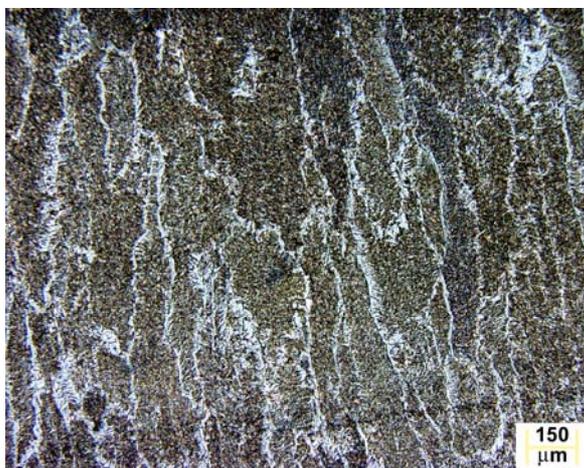
E-7018
Martelamento a Alta
Temperatura



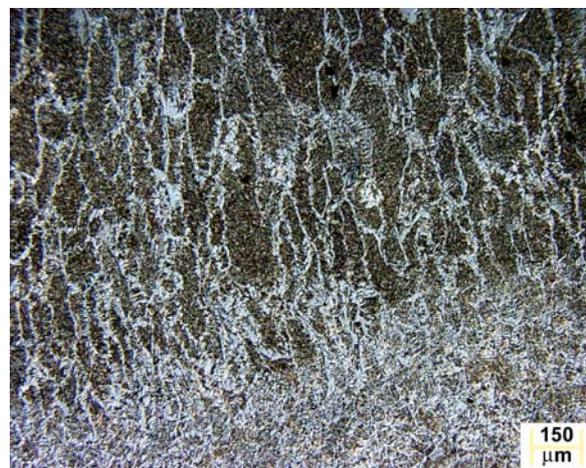
(a)



(1a)



(b)



(c)

Figura 43 – Microestruturas na solda realizada com martelamento a alta temperatura; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 2%.

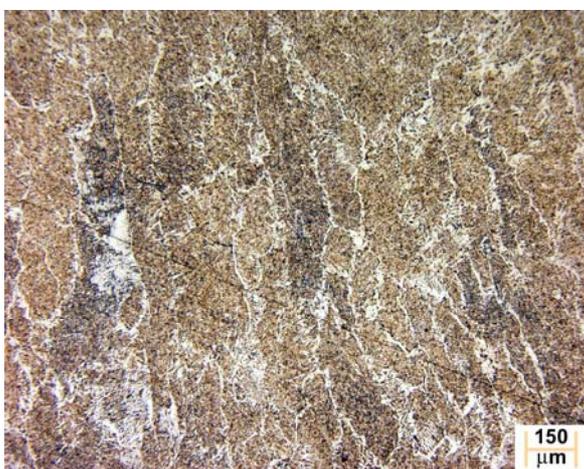
E-7018
Martelamento a Baixa
Temperatura



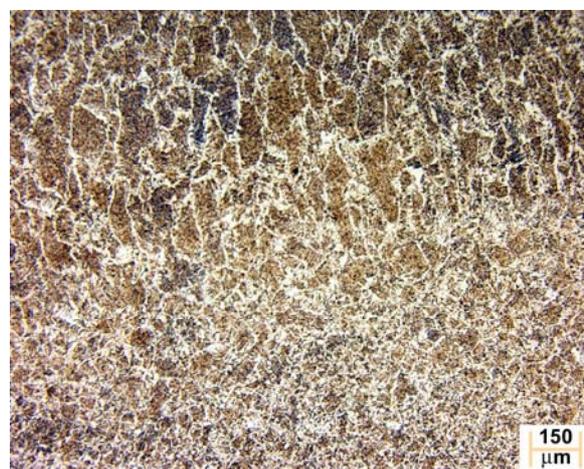
(a)



(1a)



(b)



(c)

Fig. 44 – Microestruturas na solda realizada com martelamento a baixa temperatura; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 2%.

Na figura 45 estão mostrados os pontos de dureza numa direção perpendicular a superfície das chapas soldadas, começando perto da superfície até atingir a linha de fusão do último cordão. Nela pode-se situar a linha de fusão (limite entre a ZAC e o último cordão). Nota-se que no martelado a alta temperatura, assim como, no martelado a baixa temperatura, houve uma variação significativa na região intermediária do MS, sendo encontrado 206 HV sem martelamento, 256 HV para o martelado a alta temperatura e 296 HV para o martelado a baixa temperatura. Já na região intermediária da ZAC pode-se observar que não houve uma variação de dureza, sendo encontrado 190 HV para o sem martelamento, 206 HV para o martelado a alta temperatura, e 204 HV para o martelado a baixa temperatura.

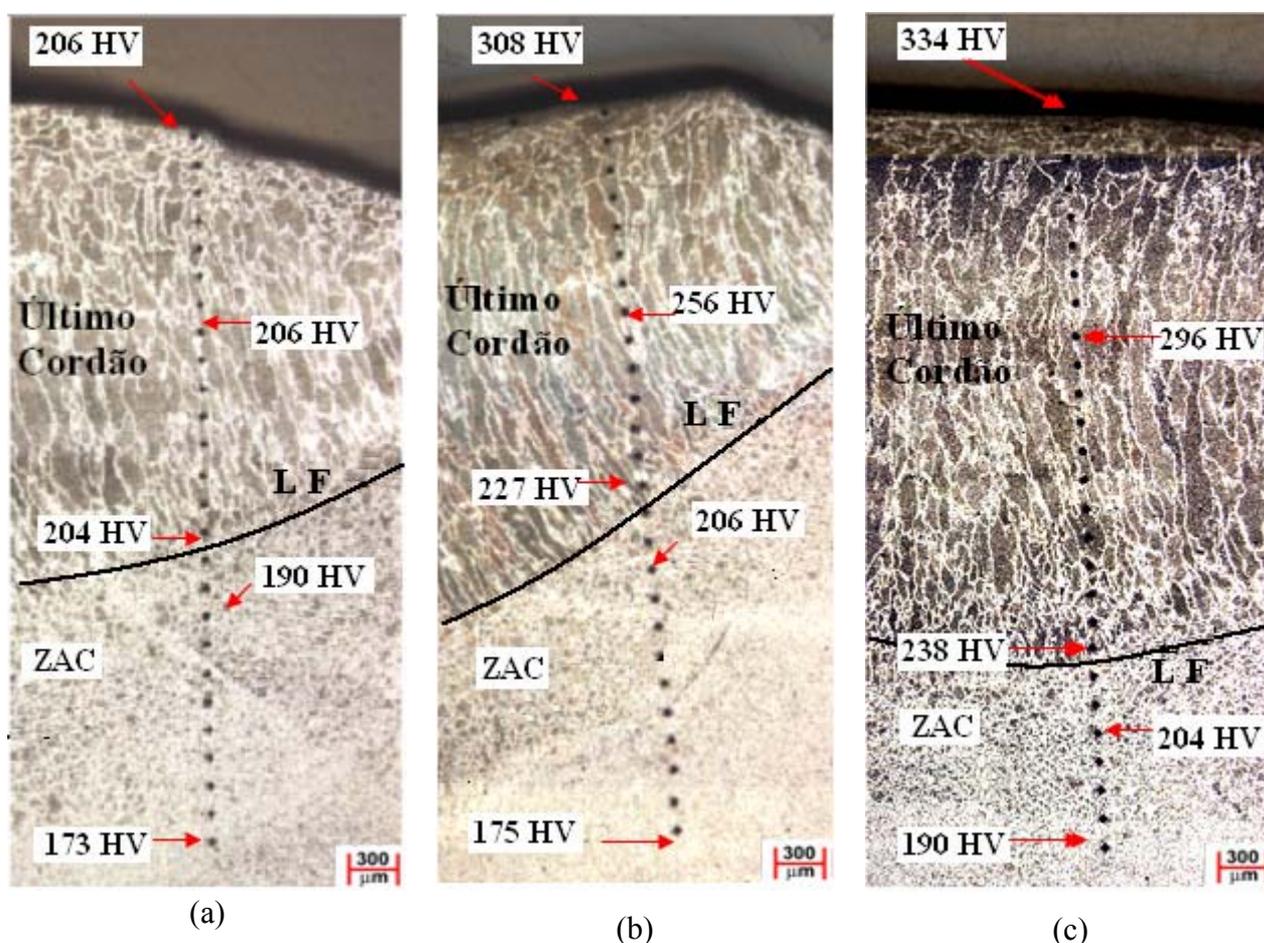


Figura 45 – Micrografias do último cordão onde podem ser observadas as impressões de dureza: (a) CP sem Martelamento, (b) CP martelado a alta temperatura, (c) CP martelado a baixa temperatura.

Verifica-se que a dureza foi medida não somente no cordão, mas também na ZAC produzida pelo mesmo sobre o cordão anterior. A existência de uma variação de dureza (mesmo que pequena) no CP sem martelamento, isto se deve ao reaquecimento que o último passe produz no penúltimo cordão.

Na figura 46 pode ser observado os perfis de microdurezas realizado nos CPs, nota-se que há aumento de dureza a medida que o ponto sob observação está mais próximo da superfície, isto indica que houve significativo endurecimento por deformação (encruamento) produzido pelo martelamento. Por exemplo, a dureza junto à superfície para o CP sem martelamento foi de 206 HV, enquanto que, para o CP martelado a baixa temperatura foi de 334 HV.

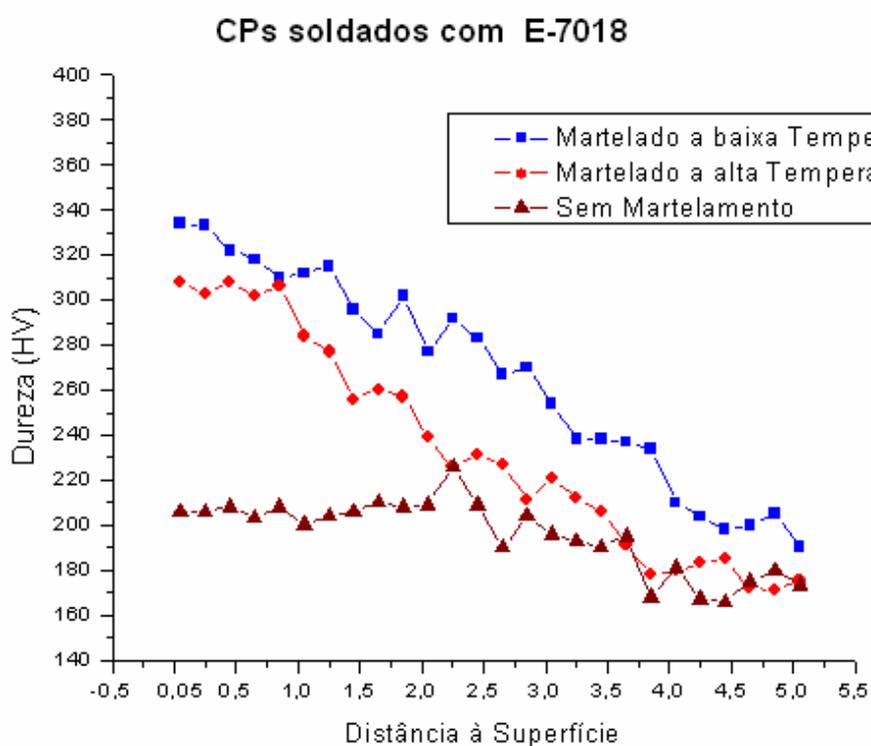


Figura 46 – Valores das microdurezas realizadas nos CPs E-7018.

Observa-se uma pequena dispersão nos perfis de dureza em todos os casos (mesmo naquele em que não houve martelamento), ficando assim, difícil determinar até que profundidade ocorreu encruamento. Uma forma proposta neste trabalho para avaliar a profundidade do encruamento, seria ajustar a reta aos dados de dureza por regressão de mínimos quadrados, que parte do princípio de adicionar aos dados do CP sem martelamento uma reta com valores 10 a 20 % maiores. A interseção das retas para os CPs com martelamento, com esta última daria as profundidades de encruamento (veja a figura 47). Se for considerado que houve encruamento significativo quando houve aumento de dureza num percentual de 10%, pode-se afirmar que as profundidades encruadas nos CPs sujeitos a

martelamento foram: 2,5 mm no CP martelado a alta temperatura; 4,1 mm no CP martelado a baixa temperatura (figura 47).

O efeito do encruamento quando realizado a martelado a baixa temperatura foi bastante significativo chegando até a linha de fusão, já no martelamento a alta temperatura o encruamento foi menor chegando até a região central do cordão. Isto se deve ao fato da condição em que foi executada, baixa temperatura onde se espera um encruamento maior como pode ser observado.

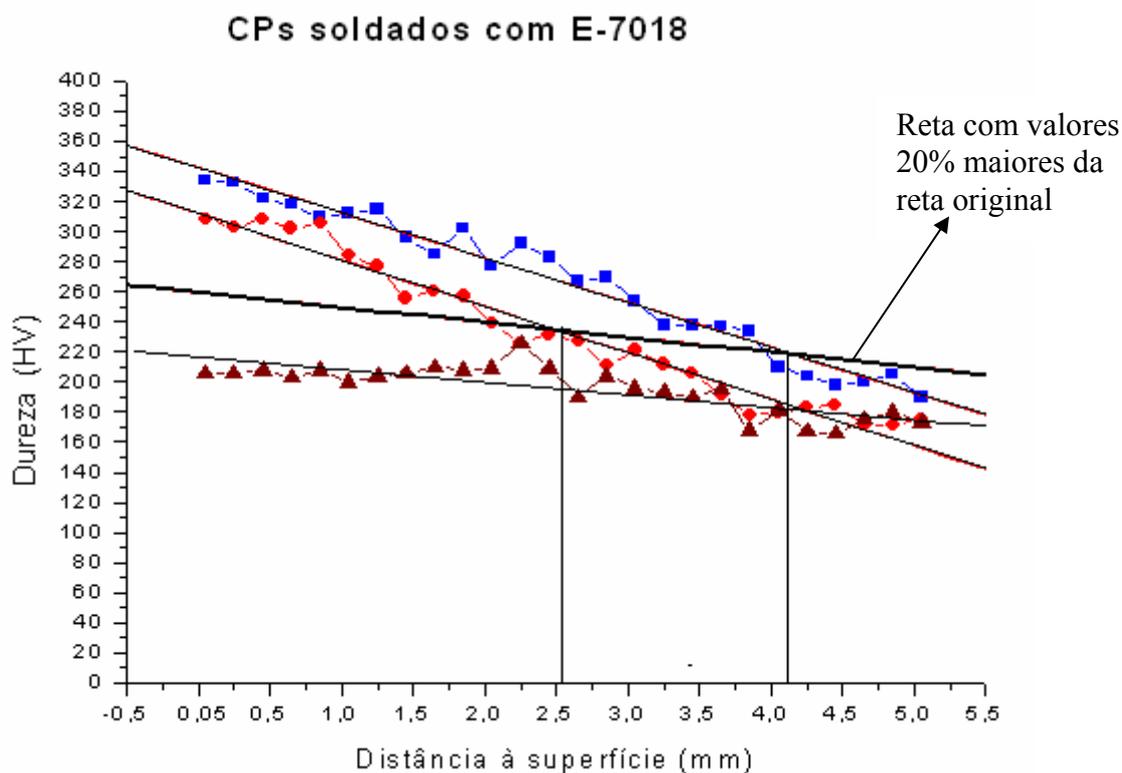


Figura 47 – As profundidades de encruamento para os CPs martelados.

5.3.2 Martelamento do Metal de Adição E-316L-16.

Pode-se observar na figura 48 que as distorções angulares entre os CPs foram muito altas e próximas nos três tipos de martelamento. Isto se pode dever ao fato de que a estrutura nos cordões, é austenítica, sendo de fácil deformação, com, um coeficiente de expansão alto e difusividade térmica baixa, o que favorece uma maior tendência à distorção na soldagem do que aços comuns.

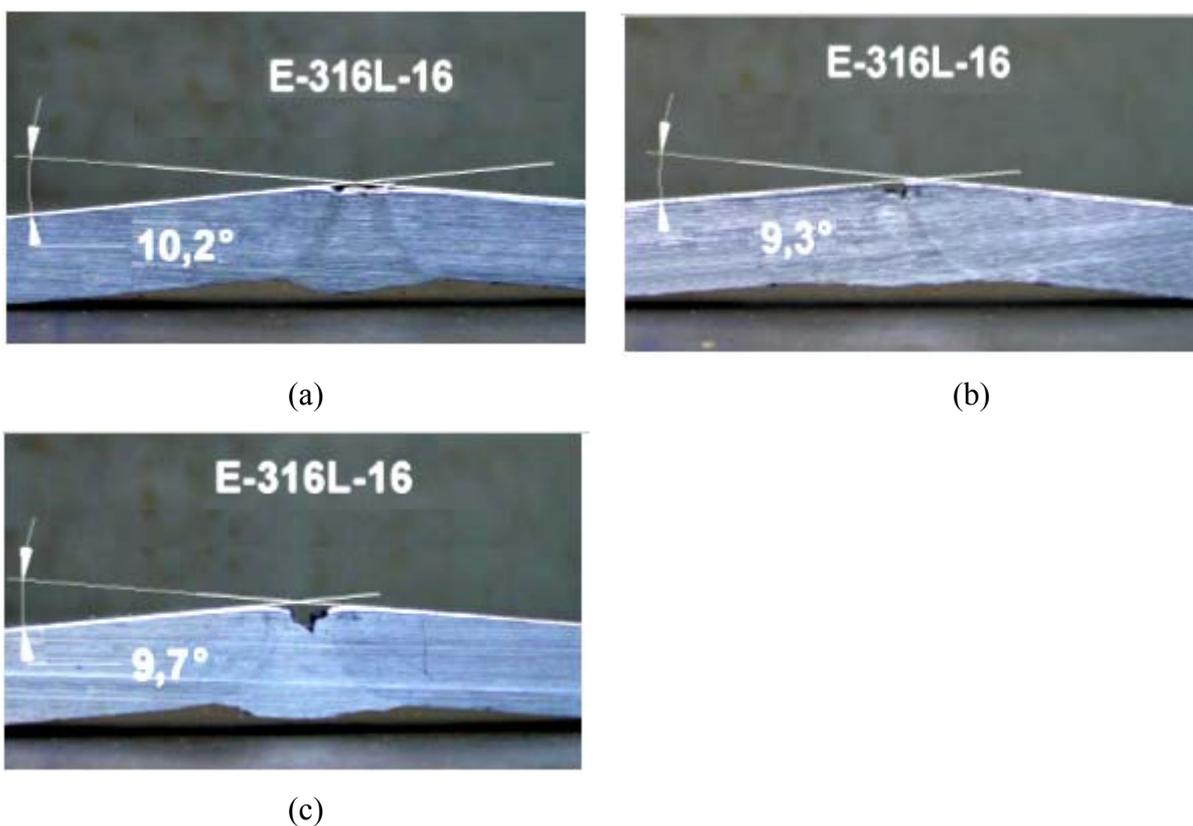


Figura 48 – Distorções angulares dos CPs soldados com eletrodo E-316L-16; (a) Sem martelar; (b) Martelado a alta temperatura; (c) Martelado a baixa temperatura .

O CP sem martelamento, sofreu o maior grau de distorção angular, resultando em um ângulo de 10,2°. Já as amostras que foram marteladas a alta e baixa temperatura, a distorção angular foi de 9,3° e 9,7° respectivamente.

Na figura 49 são apresentadas as macrografias do último cordão, a região e locais onde foram levantados os perfis de dureza (que atravessa todo o último cordão e chega a ZAC produzida por este). Observa-se, que o reforço da solda é aplainado, este efeito foi fortemente evidenciado para ambos os CPs martelados. Quer dizer que a deformação plástica é significativa, para uma estrutura austenítica, sendo ela mais dúctil. Esta deformação aumenta com a temperatura, devido à tensão de escoamento menor que o mesmo produz, nesta condição.

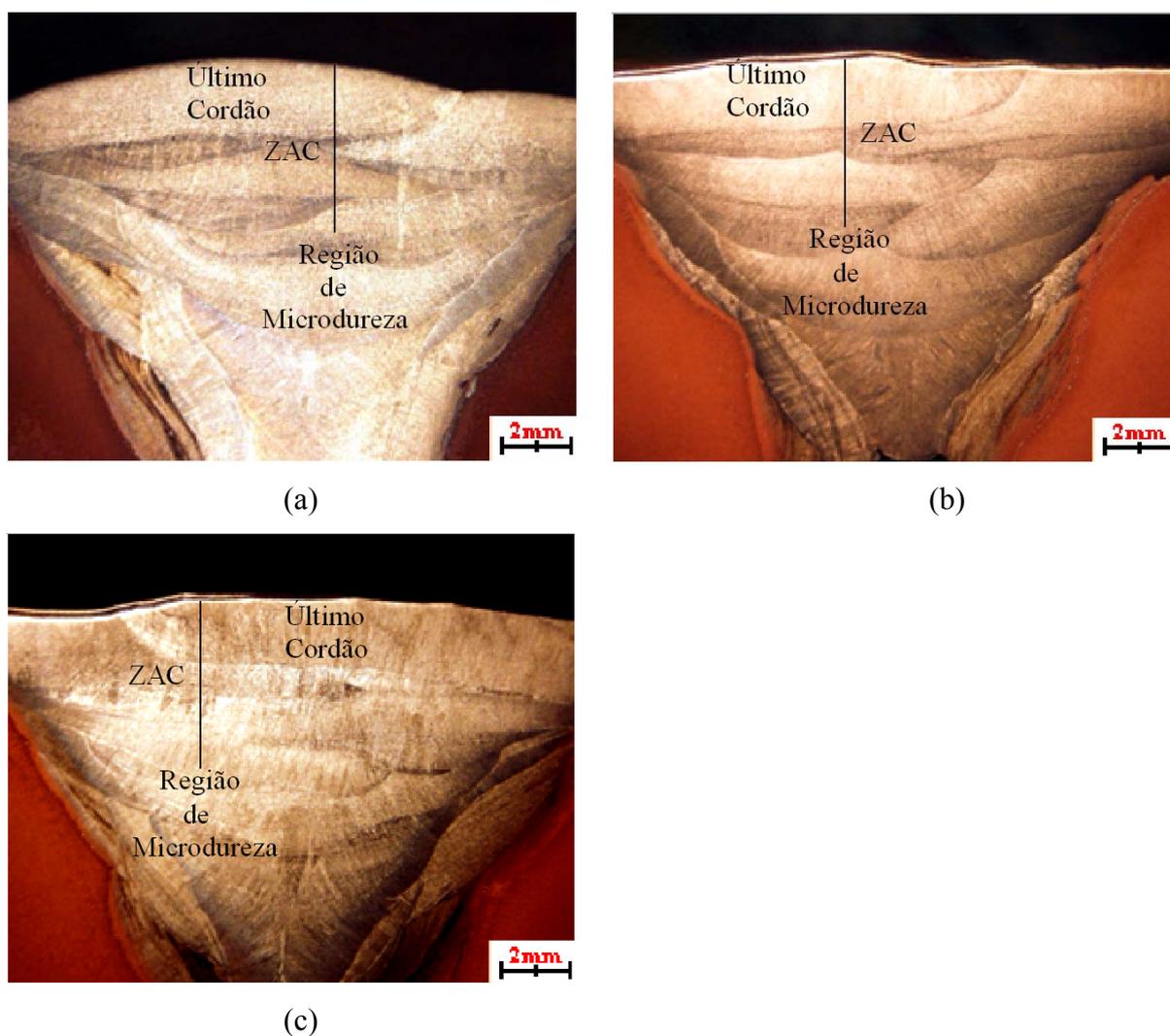


Figura 49 - Macrografias a 10x das soldas realizadas com metal de adição E-316L-16; (a) Sem martelamento; (b) com martelamento a alta temperatura; (c) com martelamento a baixa temperatura. Ataque Marble.

A seguir discutisse cada estrutura encontrada e suas características nas propriedades mecânicas de cada CP martelado.

Na macrografia no detalhe destacam-se as regiões onde foram analisadas as micrografias destacando assim cada passe de cordão e os efeitos na microestrutura, em decorrente de cada passe subsequente.

Na figura 50 encontra-se as microestruturas do CP soldado sem martelamento. No cordão de solda observa-se uma microestrutura típica de um material austenítico E-316L-16, que consiste em austenita com pequeno percentual de ferrita em espinha ou vermicular que resulta da solidificação em ferrita primária com formação de austenita tanto nas etapas finais destas como no estado sólido. A ferrita remanescente se localiza ao longo do centro das dentritas. Esta é a morfologia mais comumente observada em soldas de aços inoxidáveis austeníticos.

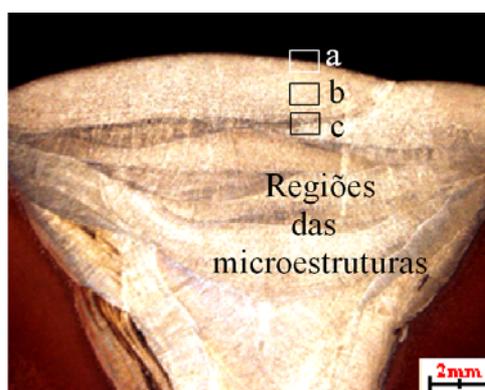
Nota-se na figura 50a-1a, como produto da deformação resultante do martelamento, pode-se esperar o alongamento dos grãos na direção transversal ao impacto da ferramenta. Verifica-se que a camada fortemente deformada tem uma espessura pequena, menor que 200 microns. A estrutura se caracteriza como sendo austenita com pequeno percentual de ferrita em espinha ou vermicular

Observa-se na figura 50b; na parte central do último cordão do CP, que se conserva a estrutura austenítica com pequeno percentual de ferrita em espinha ou vermicular. Na linha de fusão (limite entre a ZAC e o último cordão), ao comparar as microestruturas da ZAC produzida pelo último cordão (figura 50c), com as não se pode apreciar o efeito da influência da deformação prévia sobre a recristalização do metal de solda quando do aquecimento pelo passe subsequente figuras 51c.

No martelamento a baixa temperatura as figuras 52a-1a, localizado somente na parte esquerda do cordão, verifica-se que os grãos estão dispostos de uma forma desordenada, apresentando ainda um crescimento de grão localizado.

A literatura [27,28], explica que este fenômeno pode ocorrer pelos fatores; (i) alta energia de soldagem (a energia teve o mesmo nível nos 3 tipos de CP, não sendo encontrado este crescimento de grão nos casos anteriores, então ela não é a responsável pelo crescimento de grão em questão), (ii) fenômeno de recristalização secundária formados pela recristalização a partir de uma soldagem multipasse de um metal de solda em aço inox contendo uma grande quantidade de ferrita delta. Os novos cristais se formam ao longo de cada passe individual e podem atingir um comprimento de 3 a 6 mm. Seu crescimento não é impedido pela borda de ferrita pura, formada nos contornos ou limites entre os passes individuais, nem pela estrutura de solidificação primária refinada. O processo de recristalização encontrado no metal de solda não acontece somente durante o resfriamento, mas também na soldagem multipasses durante a deposição das camadas subsequentes. Por causa do reaquecimento do metal de solda pelos passes subsequentes, a recristalização da camada previamente depositada é mais intensificada. Esse fenômeno ocorre particularmente na soldagem com alta temperatura de interpasse e alto aporte térmico.

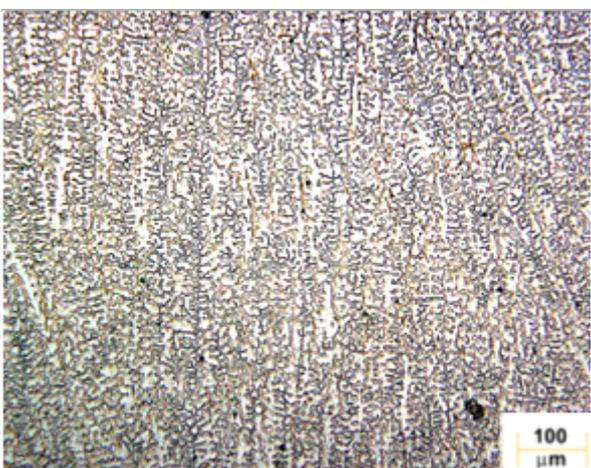
E-316L-16
Sem Martelamento



(a)



(1a)



(b)



(c)

Figura 50 – Microestruturas na solda realizada sem martelamento; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Marble.

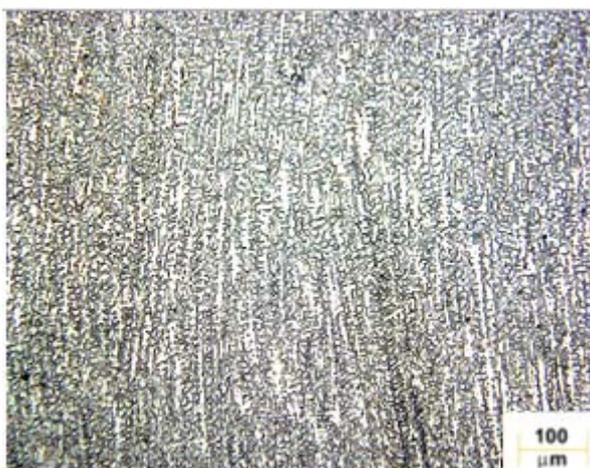
E-316L-16
Martelamento a Alta
Temperatura



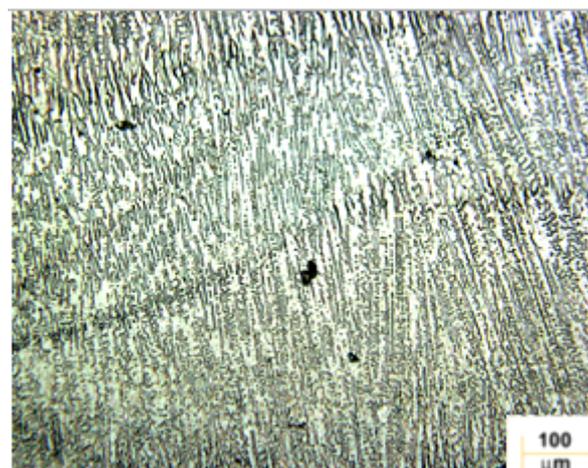
(a)



(1a)



(b)



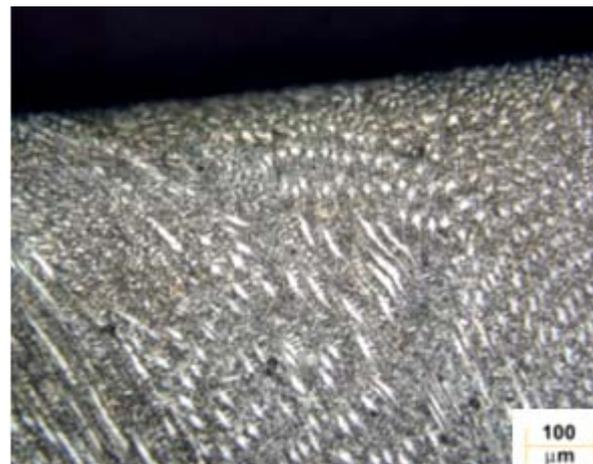
(c)

Figura 51 – Microestruturas na solda realizada com martelamento a alta temperatura; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Marble.

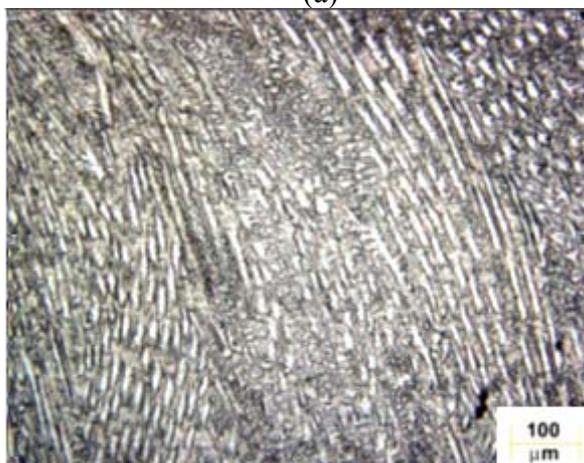
E-316L-16
Martelamento a Baixa
Temperatura



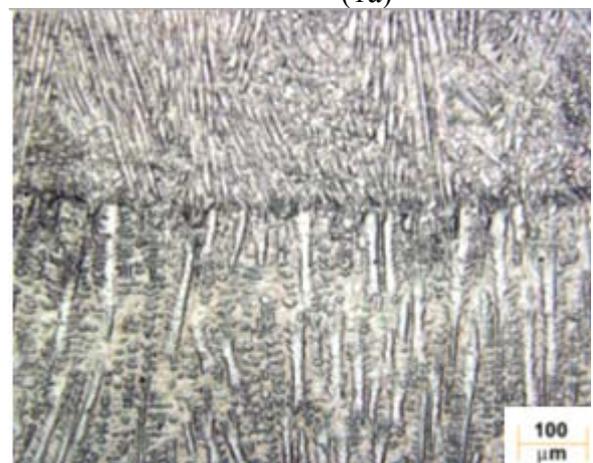
(a)



(1a)



(b)



(c)

Figura 52 – Microestruturas na solda realizada com martelamento a baixa temperatura; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Marble.

Na figura 53 estão mostrados os pontos de dureza numa direção perpendicular a superfície das chapas soldadas, começando perto da superfície até atingir a linha de fusão do último cordão. Nela pode-se situar a linha de fusão (limite entre a ZAC e o último cordão). Nota-se que para ambos os CPs, martelados a alta e baixa temperatura, houve uma variação significativa de dureza: nas regiões intermediária do MS e ZAC, foram encontradas durezas de 200 HV para o CP sem martelamento, 330 HV para o CP martelado a alta temperatura e 331 HV para o CP martelado a baixa temperatura para as regiões do MS. Já na região da ZAC os valores de dureza encontrados foram: 196 HV para o CP sem martelamento; 238 HV para o CP martelado a alta temperatura; e 291 HV para o CP martelado a baixa temperatura.

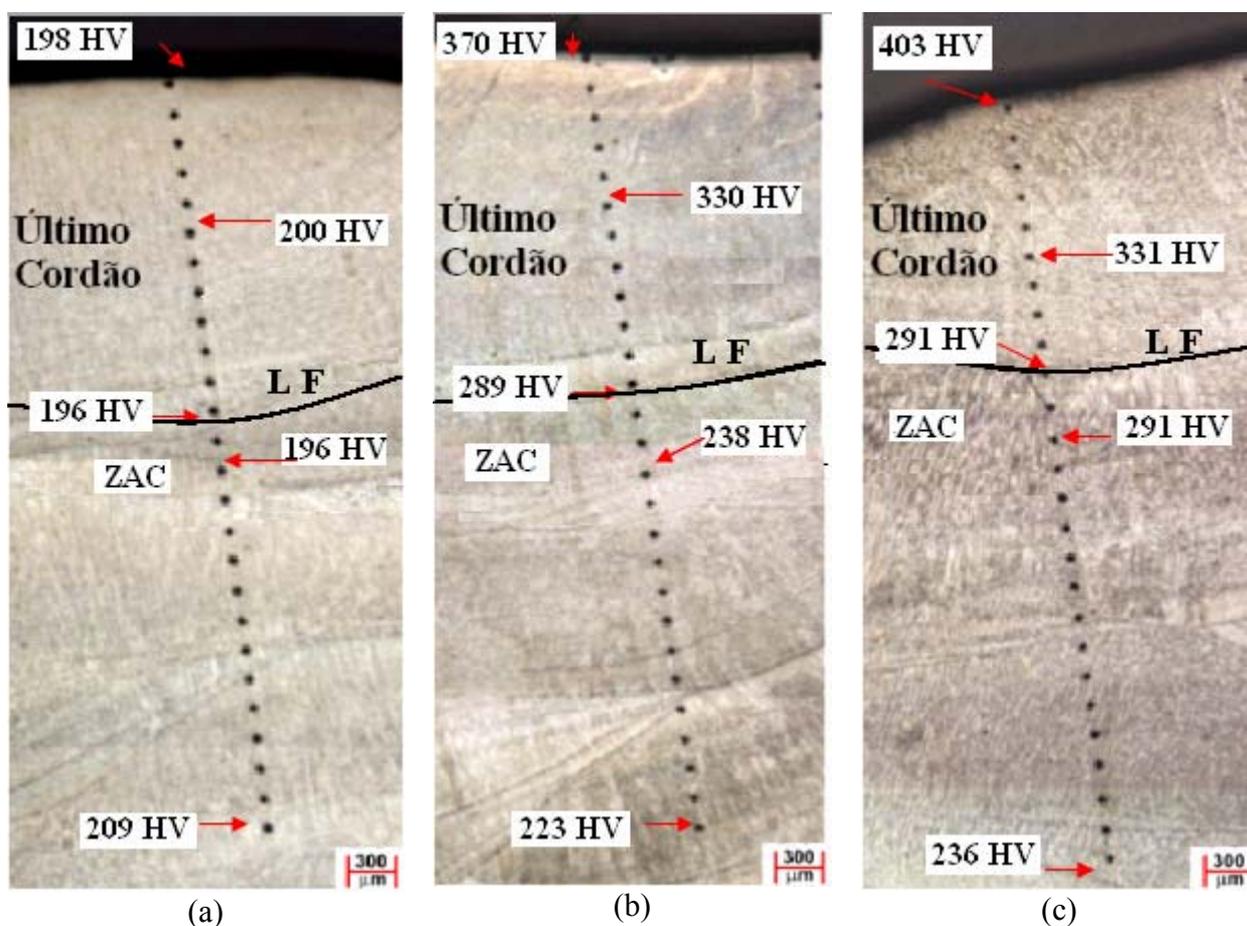


Figura 53 – Micrografias do último cordão onde podem ser observadas as impressões de dureza: (a) CP sem Martelamento, (b) CP martelado a alta temperatura, (c) CP martelado a baixa temperatura.

Verifica-se que a dureza foi medida não somente no cordão, mas também na ZAC produzida pelo mesmo sobre o cordão anterior. A existência de uma variação de dureza (mesmo que pequena) como visto também no caso anterior (E-7018) no CP sem martelamento isto se deve ao reaquecimento que o último passe produz no penúltimo cordão.

No CP soldado sem martelamento, a dureza é constante em todo o metal de solda. Na figura 54 pelos perfis de microdureza realizado, nota-se o aumento de dureza a medida que o ponto sob observação está mais próximo da superfície, isto indica que houve significativo endurecimento por deformação (encruamento) produzido pelo martelamento. Por exemplo, a dureza junto à superfície para o CP sem martelamento foi de 198 HV, enquanto que para o CP martelado a baixa temperatura foi de 403 HV.

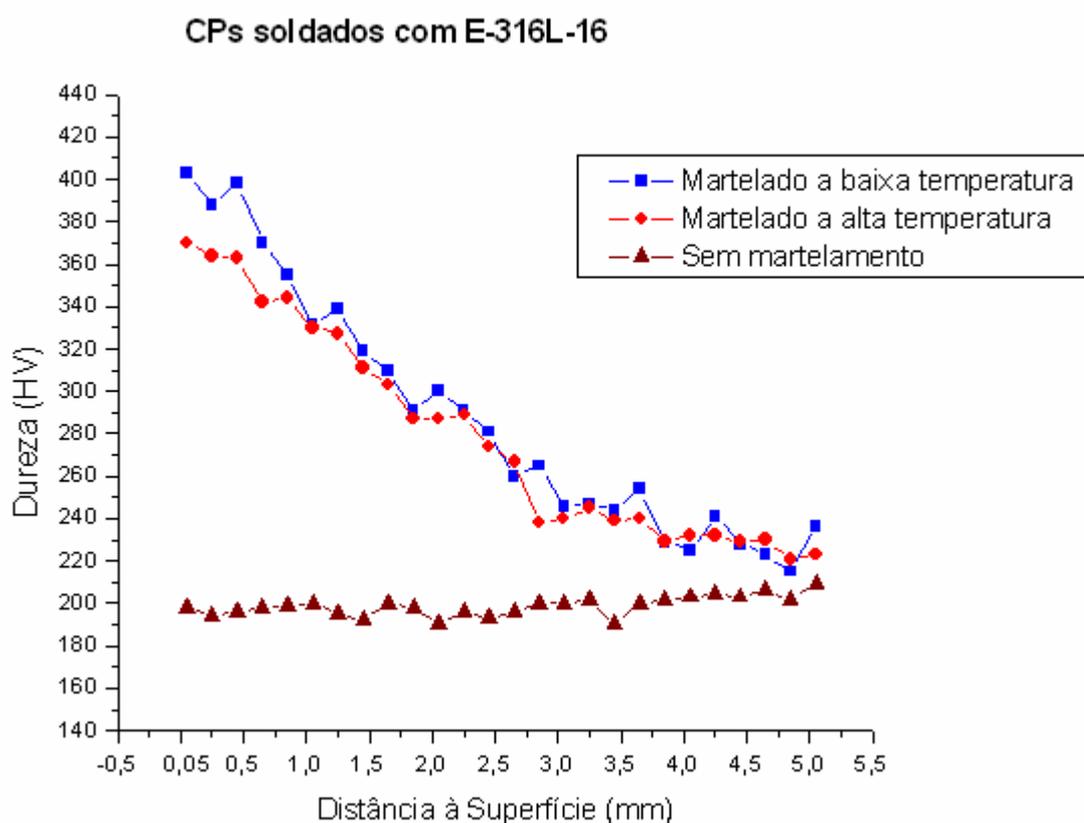


Figura 54 – Valores das microdurezas realizadas nos CPs E-316L-16.

Observa-se uma pequena dispersão nos perfis de dureza (em ambos os martelamentos), ficando assim, difícil determinar até que profundidade ocorreu encruamento. Se for considerado que houve encruamento significativo quando houve aumento de dureza num percentual de 20%, pode-se afirmar que as profundidades encruadas nos CPs sujeitos a martelamento foram: 3,7 mm no CP martelado a alta temperatura; 3,8 mm no CP martelado a baixa temperatura (veja figura 55).

Nota-se que os valores encontrados na profundidade de encruamento, assim como, na dureza superficial dos CPs martelados, indicam que o endurecimento por deformação deve ser considerado, principalmente para os aço inoxidáveis, o que mostra a sua alta sensibilidade ao encruamento.

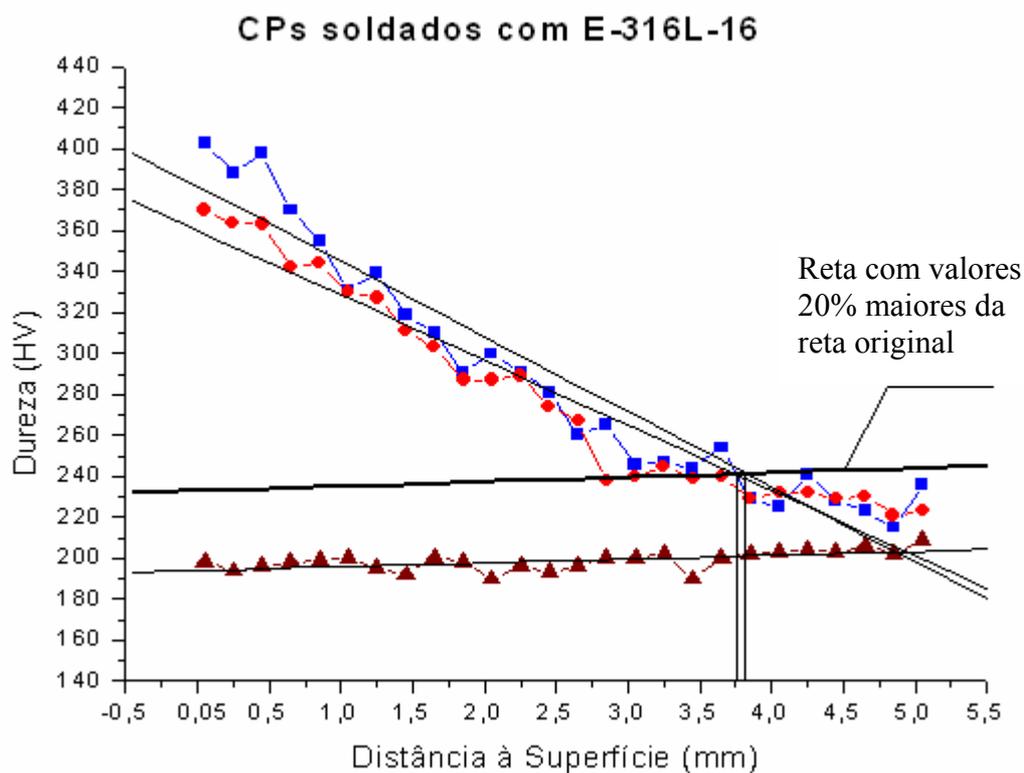


Figura 55 – Profundidades do encruamento nos CPs martelados.

5.3.3 Martelamento do Metal de Adição E-502-15.

Durante o ensaio, devido à alta dureza do metal depositado para esse material, a ponteira que realiza o martelamento sofreu uma forte deformação, não resultando assim numa moessa impressa uniforme nos cordões.



Figura 56 – Ferramenta danificada em função da alta dureza do material de adição E-502-15.

As distorções nos corpos de provas (conforme a mostra figura 57) foram muito pequenas, praticamente idênticas não havendo uma diferença realmente acentuada entre eles. A pequena deformação pode ter sido devida à transformação martensítica que sofre o metal de

solda durante o resfriamento, a qual é acompanhada de um aumento de volume. Isto acabaria compensando a contração que sofre o metal ao solidificar

A distorção angular, encontrada nos CPs foram: (i) CP sem martelamento um ângulo de $0,9^\circ$; (ii) CP martelado a alta temperatura $0,8^\circ$; (iii) CP martelado a baixa temperatura $0,6^\circ$.

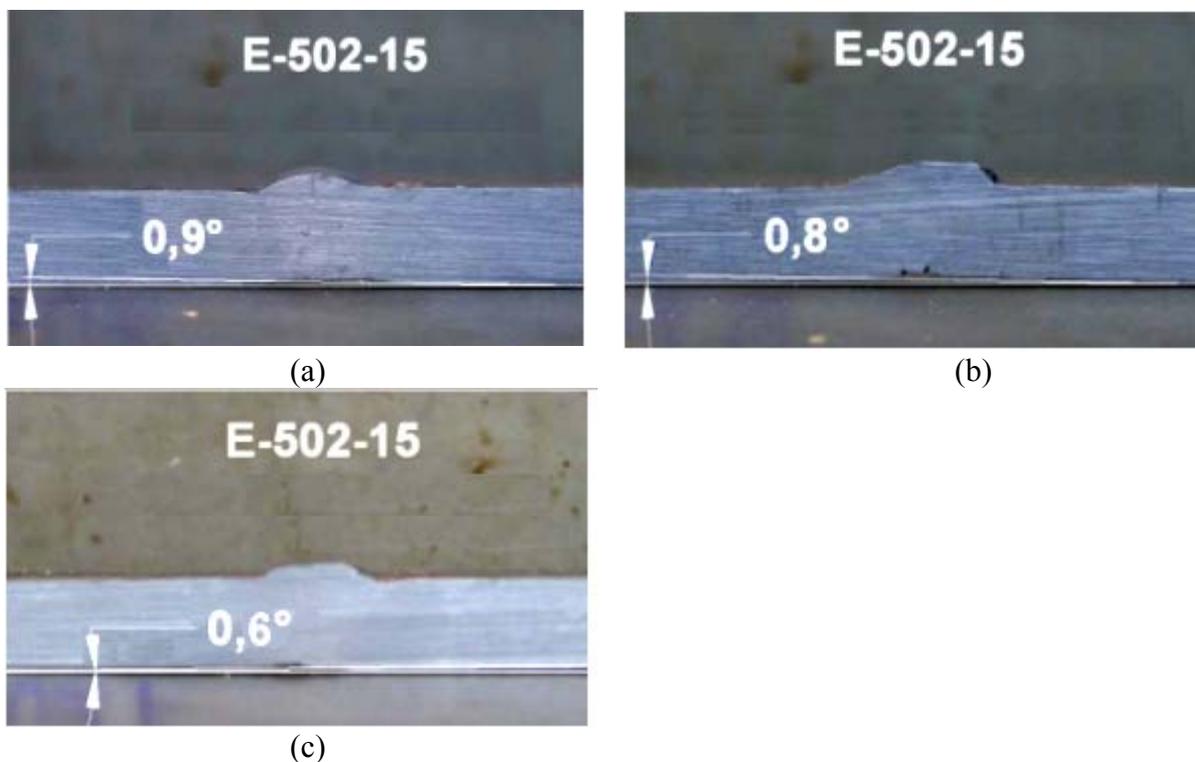


Figura 57 – Distorções angulares dos CPs soldados com eletrodo E-502-15; (a) Sem martelar; (b) Martelado a alta temperatura; (c) Martelado a baixa temperatura .

A deformação angular foi muito pequena, em todos os casos, tornando-se de difícil comparação. Como se pode observar na macrografias (figura 58) para o metal de adição E-502-15, mesmo sendo um aço de transformação martensítica, quando realizado o martelamento a alta temperatura (figura 58b) tem-se uma deformação plástica acentuada, isso quando comparada com o martelamento à baixa temperatura (figura 58c), isto se deve ao fato de ser deformado a alta temperatura, onde a tensão de escoamento é menor, caso que se repete nas amostras anteriores (E-7018) e (E-316L-16).

Na figura 58 pode-se observar o metal de solda (formado por vários cordões), as ZACs produzidas pelo aquecimento em cada passe e, à esquerda, o metal de base. Na figura também é indicada a linha sobre a qual foram feitas as medições de dureza.

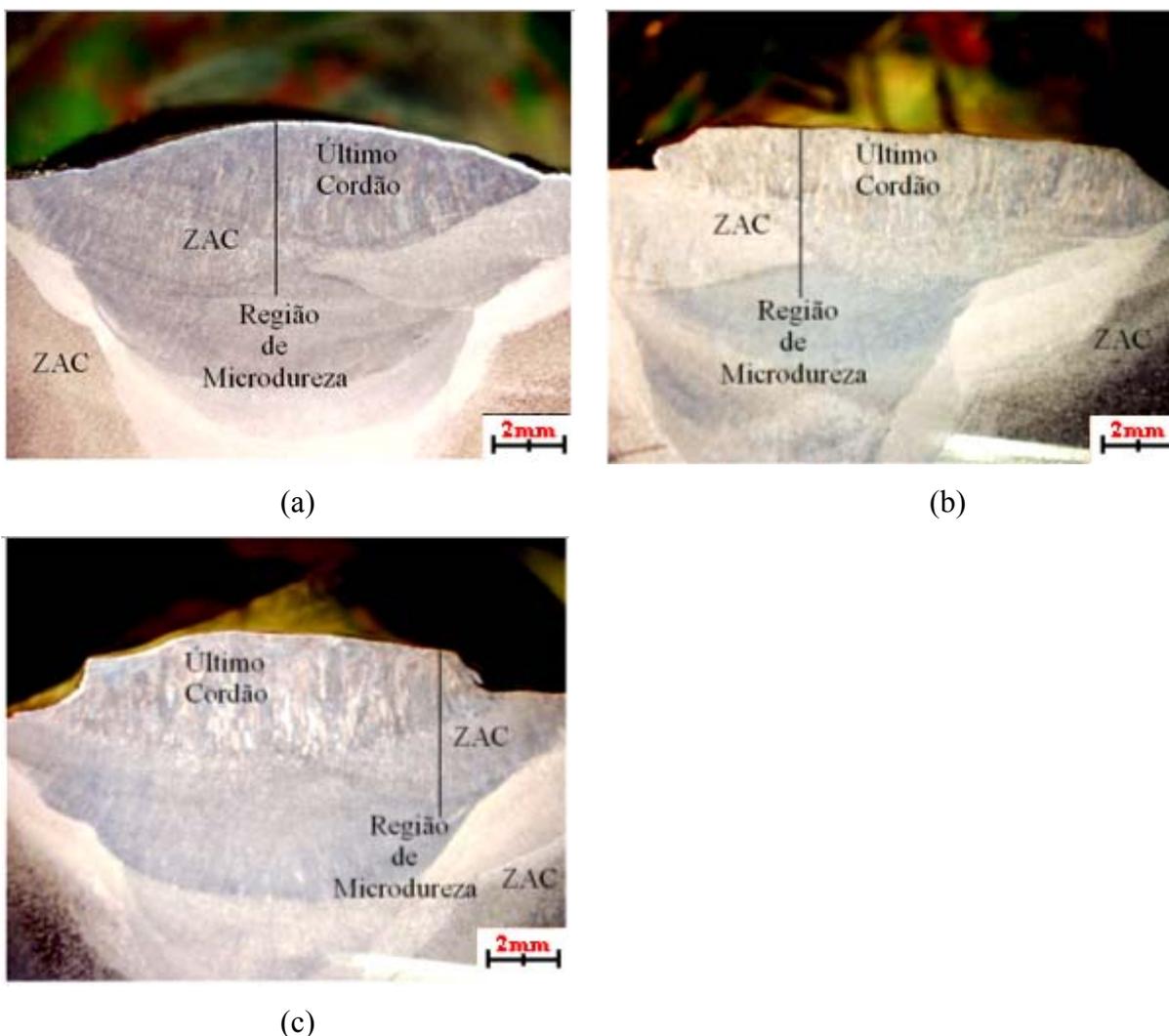


Figura 58 - Macrografias a 10x das soldas realizadas com metal de adição E-502-15; (a) Sem martelamento; (b) com martelamento a alta temperatura; (c) com martelamento a baixa temperatura. Ataque Nital 2%.

A seguir discutisse cada estrutura encontrada e suas características nas propriedades mecânicas de cada CP martelado.

Na figura 59 são apresentadas microestruturas do CP soldado sem martelamento. No cordão de solda encontra-se uma microestrutura típica de um material E-502-15 (5Cr0,5Mo), que consiste numa estrutura tipicamente martensítica.

Verifica-se que a camada fortemente deformada tem uma espessura pequena, menor que 200 microns. Pode ser observado nas figuras 59-1a, 60-1a.

Nas estruturas dos CPs onde foi executado o martelamento, pode-se observar uma estrutura martensítica, isto tanto para o último cordão, e na linha de fusão com o penúltimo cordão (veja as figuras 60 e 61).

E-502-15
Sem Martelamento

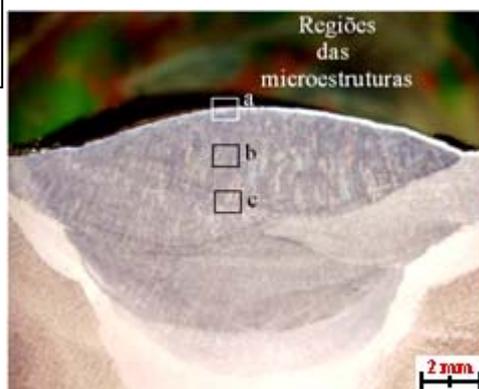
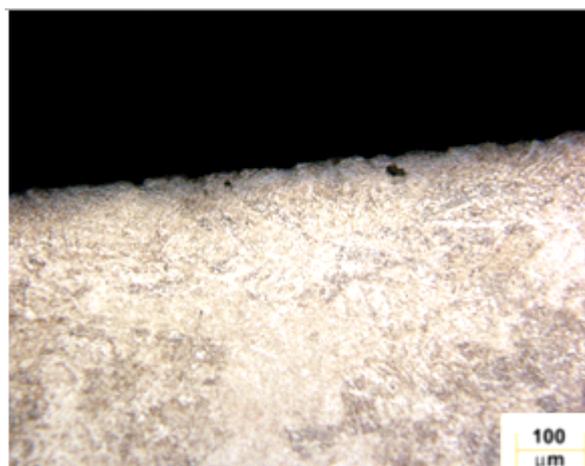


Figura 59 – Microestruturas na solda realizada sem martelamento; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 2%

E-502-15
Martelamento a Alta
Temperatura



(a)



(1a)



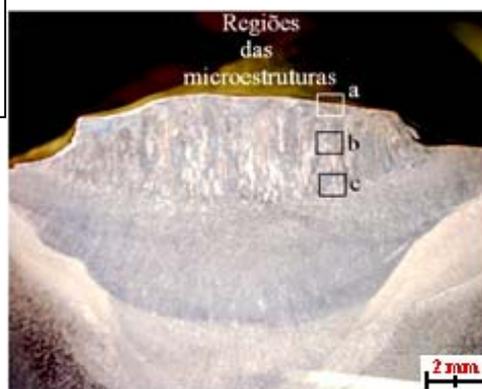
(b)



(c)

Figura 60 – Microestruturas na solda realizada com martelamento a alta temperatura; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 2%

E-502-15
Martelamento a Baixa
Temperatura



(a)



(1a)



(b)



(c)

Figura 61 – Microestruturas na solda realizada com martelamento a baixa temperatura; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 2%

Na figura 62 estão mostrados os pontos de dureza obtida numa direção perpendicular a superfície das chapas soldadas, começando perto da superfície até atingir a linha de fusão do último cordão. Nela pode-se situar a linha de fusão (limite entre a ZAC e o último cordão). Nota-se que no martelado a alta temperatura, assim como, no martelado a baixa temperatura, houve uma variação significativa somente no MS, localizando-se na região intermediária do cordão, para o CP sem martelamento foi de 347 HV; para o CP martelado a alta temperatura foi de 360 HV; para o CP martelado baixa temperatura foi de 397 HV. Já na região intermediária da ZAC pode-se observar que não houve uma variação de dureza, sendo encontrado 336 HV para o sem martelamento; 350 HV para o martelado a alta temperatura; e 350 HV para o martelado a baixa temperatura.

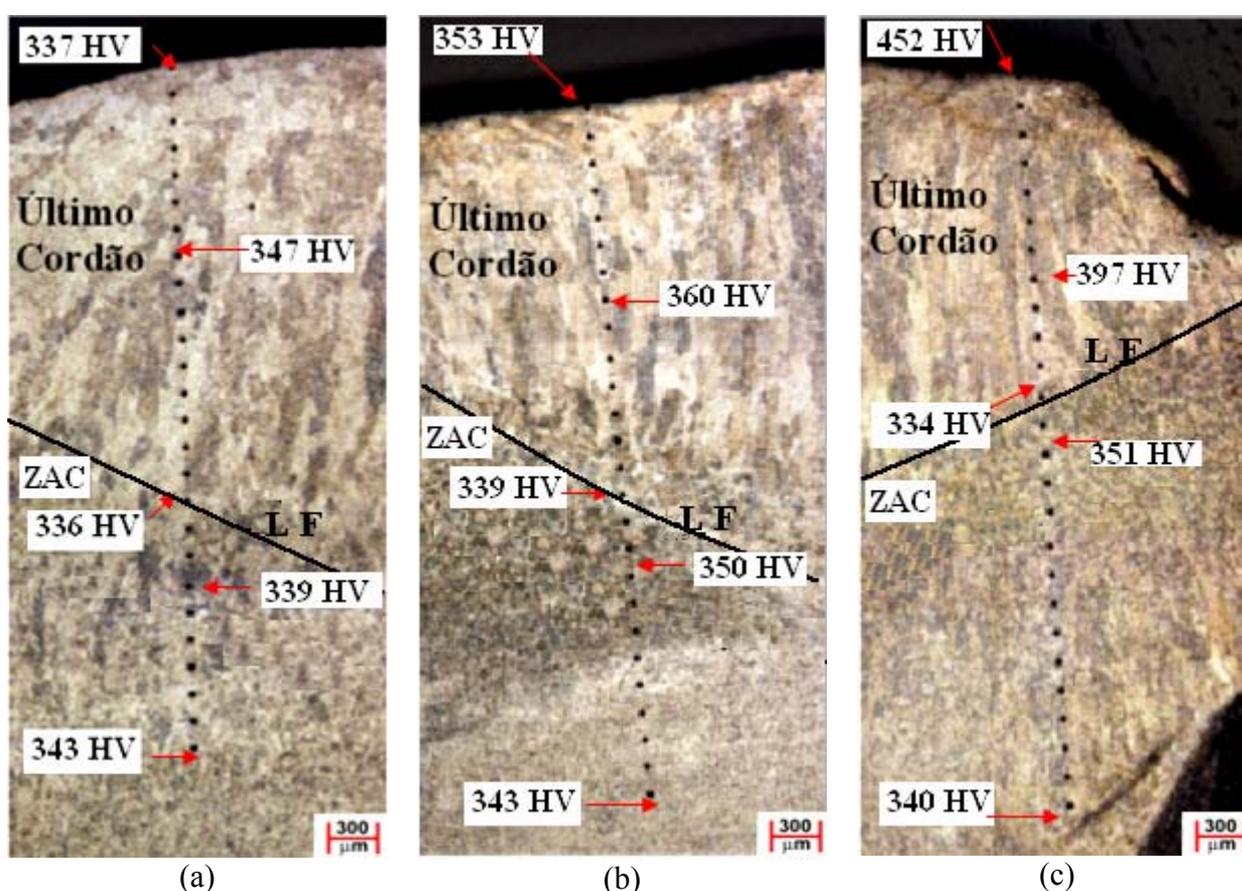


Figura 62 – Micrografias do último cordão onde podem ser observadas as impressões de dureza: (a) CP sem Martelamento, (b) CP martelado a alta temperatura, (c) CP martelado a baixa temperatura.

Na figura 63 tem-se os perfis de microdureza com suas relativas distâncias a superfície, neste caso nota-se que o martelamento realizado a alta temperatura, não sofreu um

encruamento superficial alto, apesar do último cordão de solda foi o que apresentou uma maior deformação (veja macrografia da figura 58b), ficando assim com uma dureza muito próxima ao CP sem martelamento. Já o CP martelado a baixa temperatura obteve um alto grau de encruamento superficial atingindo a dureza de 452 HV.

Verifica-se que a dureza foi medida não somente no cordão, mas também na ZAC produzida pelo mesmo sobre o cordão anterior. Na figura 63 pode ser observado os valores das microdurezas realizado nos CPs, nota-se que a aumento de dureza a medida que o ponto sob observação está mais próximo da superfície, isto indica que houve significativo endurecimento por deformação (encruamento) produzido pelo martelamento. Por exemplo, a dureza junto à superfície para o CP sem martelamento foi 337 HV, enquanto que para o martelado a baixa temperatura foi de 452 HV.

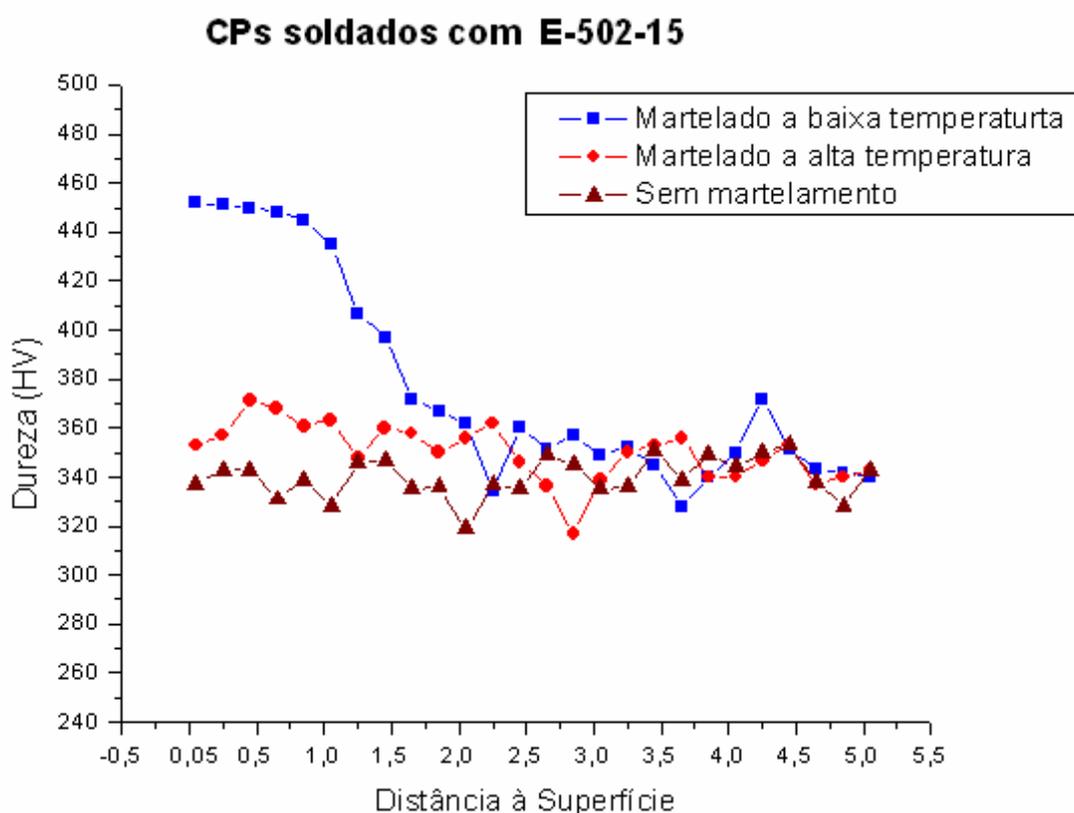


Figura 63 – Valores das microdurezas realizadas nos CPs E-502-15.

Observa-se uma pequena dispersão nos perfis de dureza (mesmo naquele em que não houve martelamento), ficando assim, difícil determinar até que profundidade ocorreu encruamento. Se for considerado que houve encruamento significativo quando houve aumento de dureza num percentual de 10%, pode-se afirmar que a profundidade encruada no CP martelado a baixa temperatura foi de 2,7 mm. Já no CP martelado a alta temperatura foi

considerado um percentual de 5%, isto foi considerado devido a sua proximidade da dureza do CP sem martelamento, pode-se afirmar que a profundidade encruado foi de 1,5 mm da superfície. (veja a figura 64).

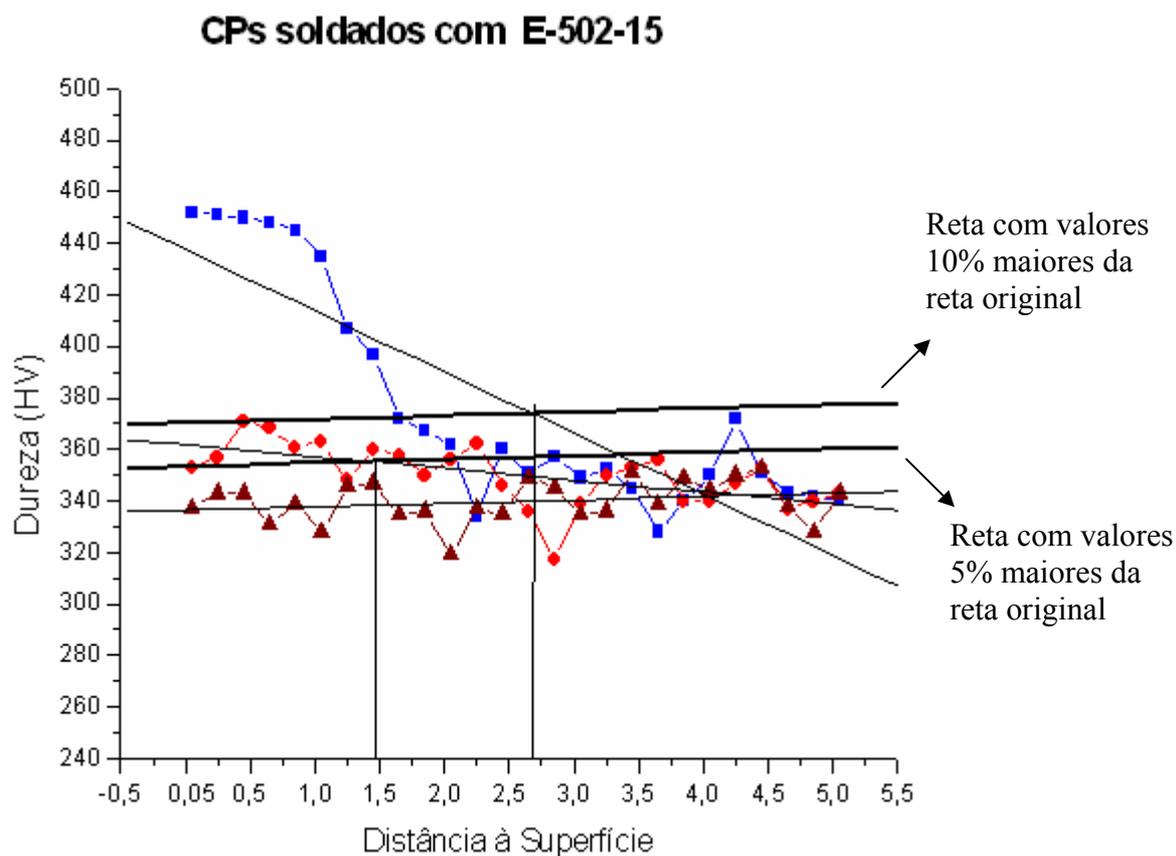


Figura 64 – Profundidades do encruamento nos CPs martelados.

5.3.4 Martelamento do Metal de Adição E-505-15.

Ao se executar o martelamento neste material, ao apresentar uma temperabilidade superior ao eletrodo anterior (E-502-15), isto implica no mesmo problema ao se executar o martelamento, ou seja, a ponteira do martelo ao final do processo ficava completamente danificada (figura 56) sendo que ser reparada, para o martelamento dos passes subsequentes.

A distorção angular nos CPs; sem martelamento e martelado a alta temperatura sofreram uma distorção negativa empenando no sentido oposto ao esperado. Pode-se observar na figura 65 que o CP isento de martelamento, sofreu uma distorção angular de $-1,7^\circ$, já o martelado a alta temperatura a distorção angular ficou com um ângulo de $-4,0^\circ$. Já a amostra que foi martelada a baixa temperatura, a distorção angular foi de $0,6^\circ$.

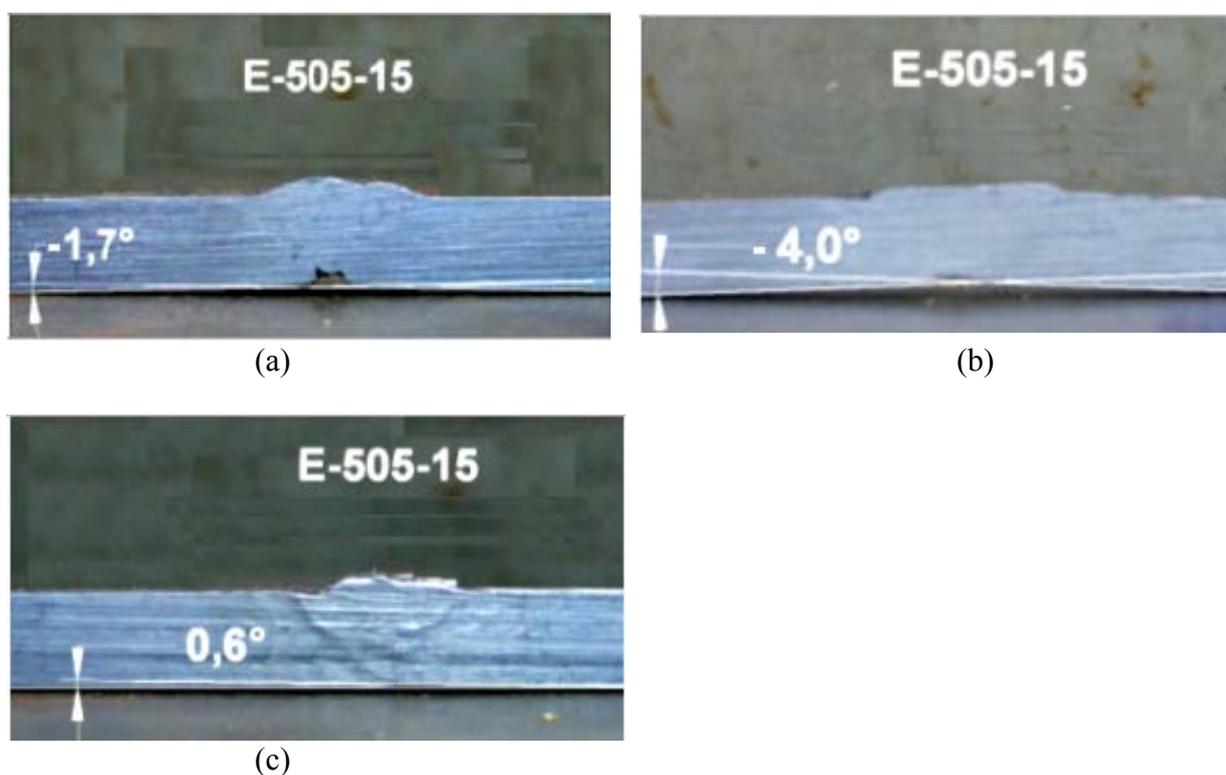


Figura 65 – Distorções angulares dos CPs do eletrodo E-505-15; (a) Sem martelar; (b) Martelado a alta temperatura; (c) Martelado a baixa temperatura .

Considerando que o efeito de deformação negativa observado na solda com E-505-15 seja real (e não o resultado de uma situação aleatória). Sabe-se que a composição química do mesmo apresenta maiores teores de Cr e Mo, logo à temperatura M_s do metal de adição E-505-15, é menor que a do E-502-15. Uma menor temperatura M_s significa que a transformação martensítica, vem acompanhada de aumento de volume, vai acontecer a uma menor temperatura no resfriamento.

É essencial para se entender os resultados em termos de tensões residuais. Lembrar que a variação volumétrica numa transformação austenita \rightarrow martensita, de um aço com 0,4% de C, medida a temperatura ambiente, é cerca de 4,2%. A variação linear é, pois de 1,4%. Para que esta variação linear fosse atingida por gradiente térmico, com um coeficiente de dilatação $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, seria necessária uma variação de temperatura de 1.167°C e, ainda mais, mesmo com restrição externa perfeita, a deformação permanente equivalente a da transformação de fase não seria atingida pois parte da dilatação térmica seria recuperada elasticamente. Vê-se que o efeito da transformação austenita \rightarrow martensita é normalmente superior ao efeito térmico.

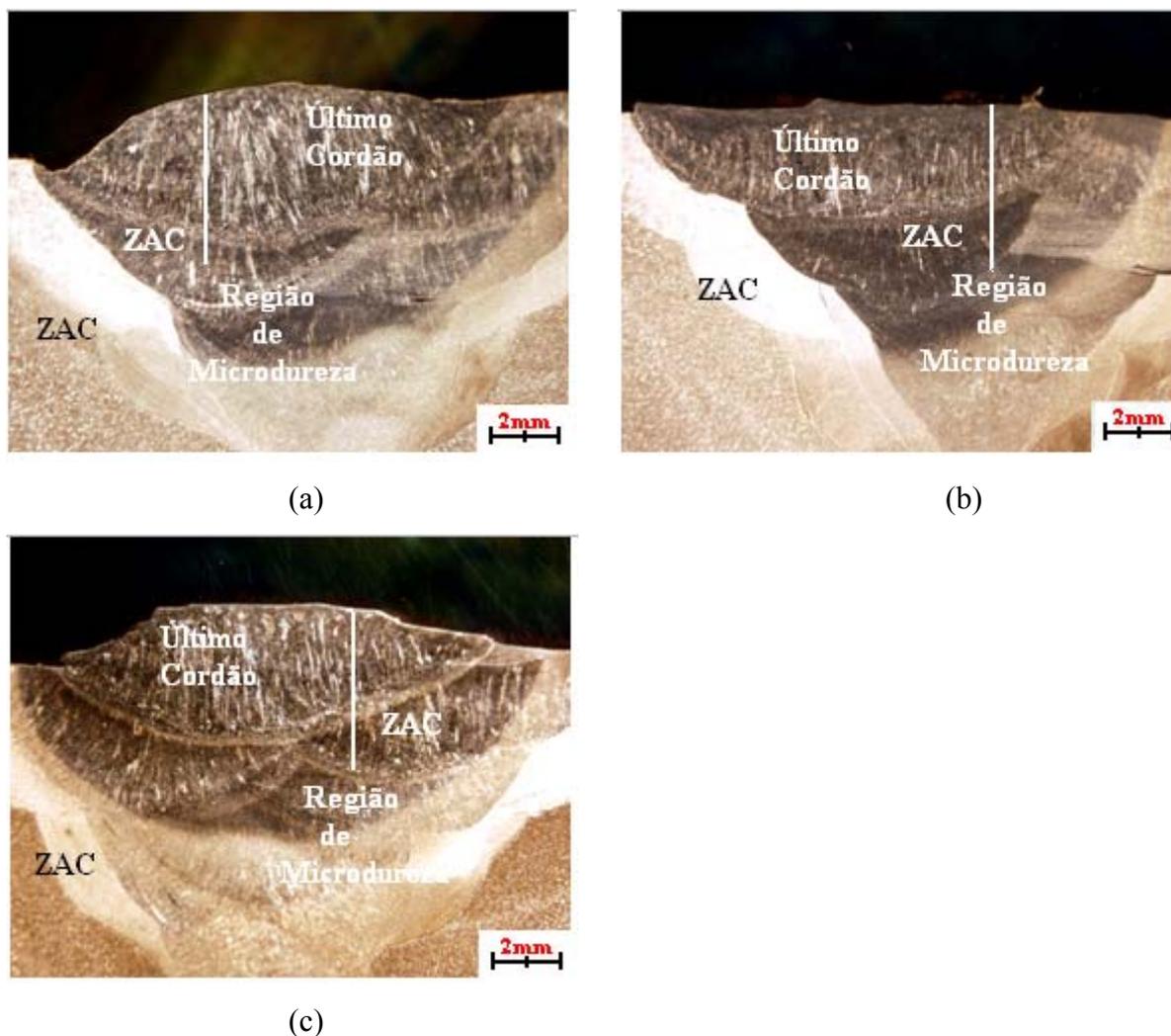


Figura 66 - Macrografias a 10x das soldas realizadas com metal de adição E-502-15; (a) Sem martelamento; (b) com martelamento a alta temperatura; (c) com martelamento a baixa temperatura. Ataque Nital 6%.

A seguir discutisse cada estrutura encontrada e suas características nas propriedades mecânicas de cada CP martelado.

Na figura 67, no CP sem martelamento encontra-se as microestruturas e nota-se haver uma grande quantidade de martensita com diferentes orientações cristalográficas das ripas de martensita.

Nas figuras 68 e 69 para os martelamentos a alta e baixa temperaturas respectivamente, tanto na superfície, região central como na linha de fusão do último com o penúltimo cordão as estruturas encontradas, não se diferenciam do sem martelamento, somente pela dureza superficial causada pelo efeito do encruamento .

Ao comparar as microestruturas da ZAC produzida pelo último cordão, não se pode apreciar o efeito da influência da deformação prévia sobre a recristalização do metal de solda quando do aquecimento pelo passe subsequente (veja as figuras 68c e 69c).

E-505-15
Sem Martelamento



(a)



(1a)



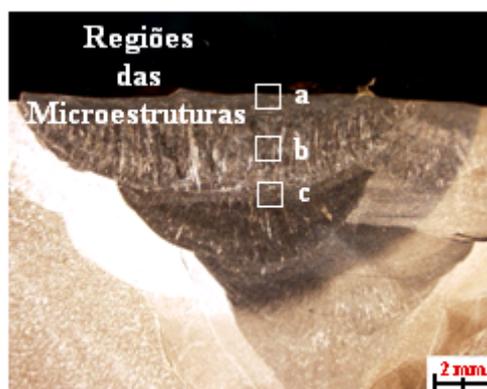
(b)



(c)

Figura. 67 – Microestruturas na solda realizada sem martelamento; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 6%

E-505-15
Martelamento a alta
temperatura



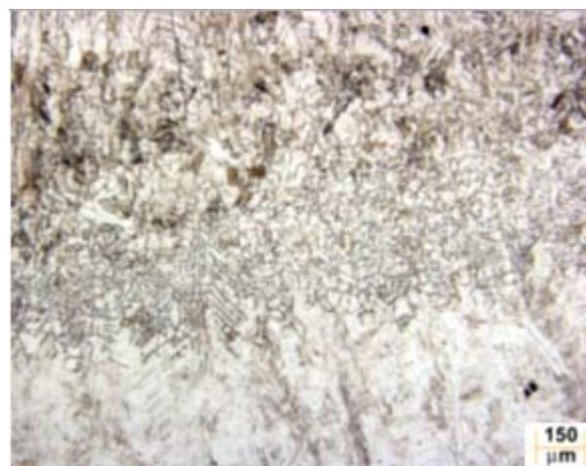
(a)



(1a)



(b)



(c)

Figura 68 – Microestruturas na solda realizada com martelamento a alta temperatura; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 6%.

E-505-15
Martelamento a baixa
temperatura



(a)



(1a)



(b)



(c)

Fig. 69 – Microestruturas na solda realizada com martelamento a baixa temperatura; (a) Região próxima à superfície do cordão observada com dois aumentos diferentes; (1a) Região próxima à superfície do último cordão; (b) região central do cordão; (c) Linha de fusão entre o penúltimo e último cordões. Ataque Nital 6%.

Na figura 70 estão mostrados os pontos de dureza numa direção perpendicular a superfície das chapas soldadas, começando perto da superfície até atingir a linha de fusão do último cordão verifica-se que a dureza foi medida não somente no cordão, mas também na ZAC produzida pelo mesmo sobre o cordão anterior, nota-se o aumento de dureza a medida que o ponto sob observação está mais próximo da superfície, isto indica que houve endurecimento por deformação (encruamento) produzido pelo martelamento. Por exemplo, a dureza junto à superfície para CP sem martelamento foi de 361 HV, enquanto que para o CP martelado a baixa temperatura, foi de 460 HV.

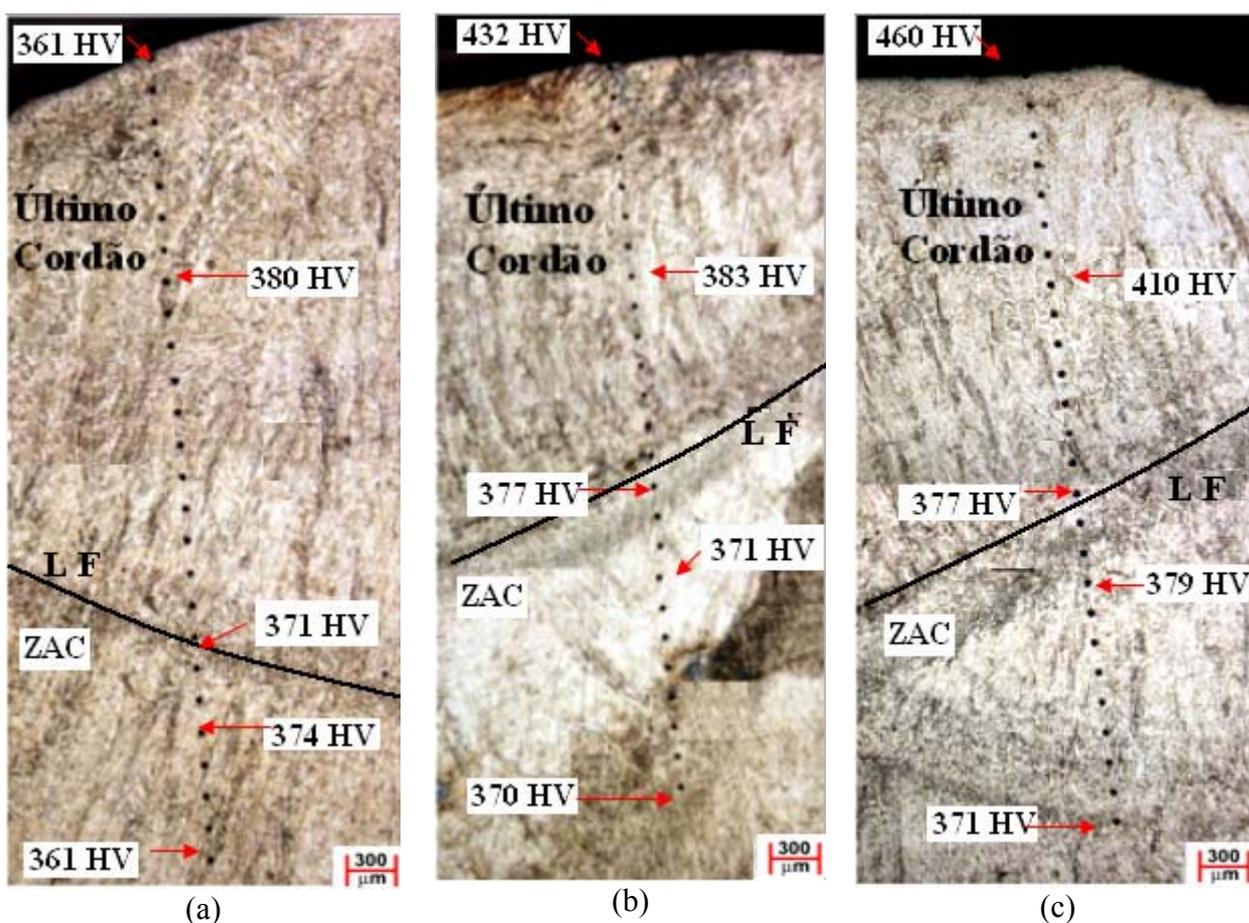


Figura 70 - Micrografias do último cordão onde podem ser observadas as impressões de dureza: (a) CP sem Martelamento, (b) CP martelado a alta temperatura, (c) CP martelado a baixa temperatura.

Nota-se que o CP sem martelamento, e CP o martelado a alta temperatura, na região central do cordão não houve uma variação significativa de dureza no MS, sendo encontrada 380 HV e 383 HV respectivamente. Já no CP martelado a baixa temperatura, neste foi encontrado uma variação significativa de dureza no MS, com uma dureza de 410 HV. Já na região intermediária da ZAC pode-se observar que não houve uma variação de dureza, sendo

encontrado 374 HV para o sem martelamento; 371 HV para o martelado a alta temperatura; e 379 HV para o martelado a baixa temperatura.

Na figura 71 tem-se a disposição das microdurezas com suas relativas distâncias a superfície, neste caso nota-se que o martelamento realizado a alta temperatura, sofreu uma recuperação, restando uma pequena parte encruada ficando muito próxima a superfície, já o martelado a baixa dureza sofreu o processo de encruamento, as durezas superficiais foram as seguintes; 337HV para o isento de martelamento, 353HV para o martelado a alta temperatura e 452HV para o martelado a baixa temperatura.

Observa-se que a dureza do CP martelado a alta temperatura, não sofreu um encruamento superficial alto, apesar do último cordão de solda ter sido o que apresentou uma maior deformação (veja macrografia da figura 68b).

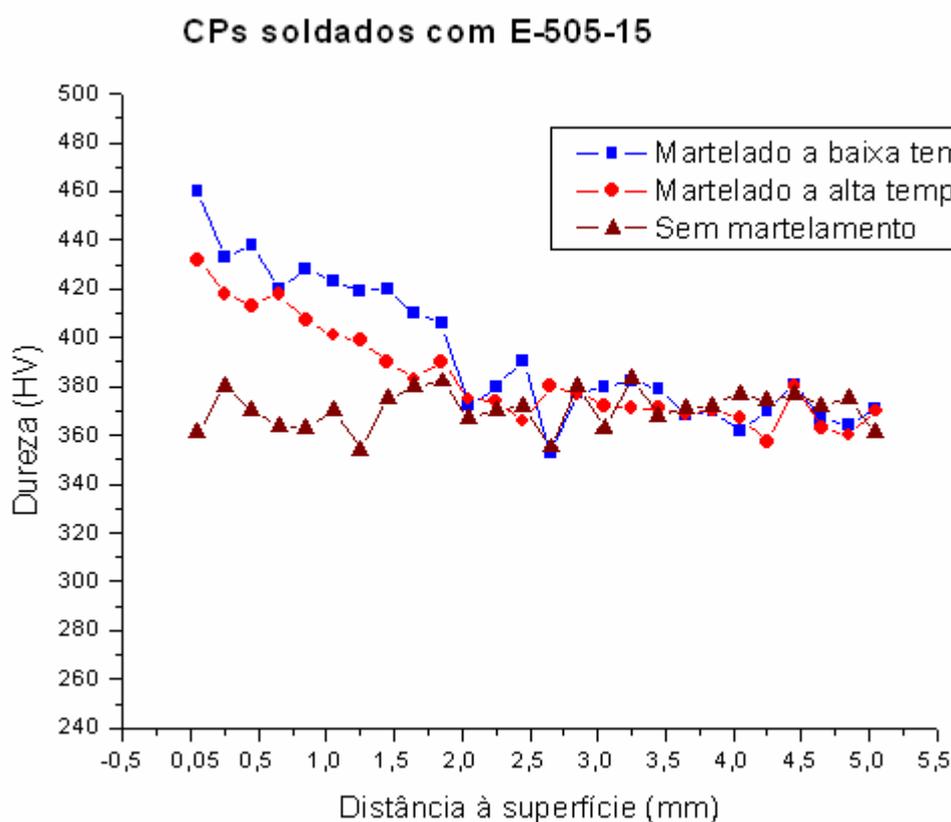


Figura 71 - Valores das microdurezas realizadas nos CPs E-505-15.

Se for considerado que houve encruamento significativo quando houve aumento de dureza num percentual de 10%, pode-se afirmar que as profundidades encruadas nos CPs sujeitos a martelamento foram: 0,6 mm no CP martelado a alta temperatura; 1,7 mm no CP martelado a baixa temperatura (veja figura 72).

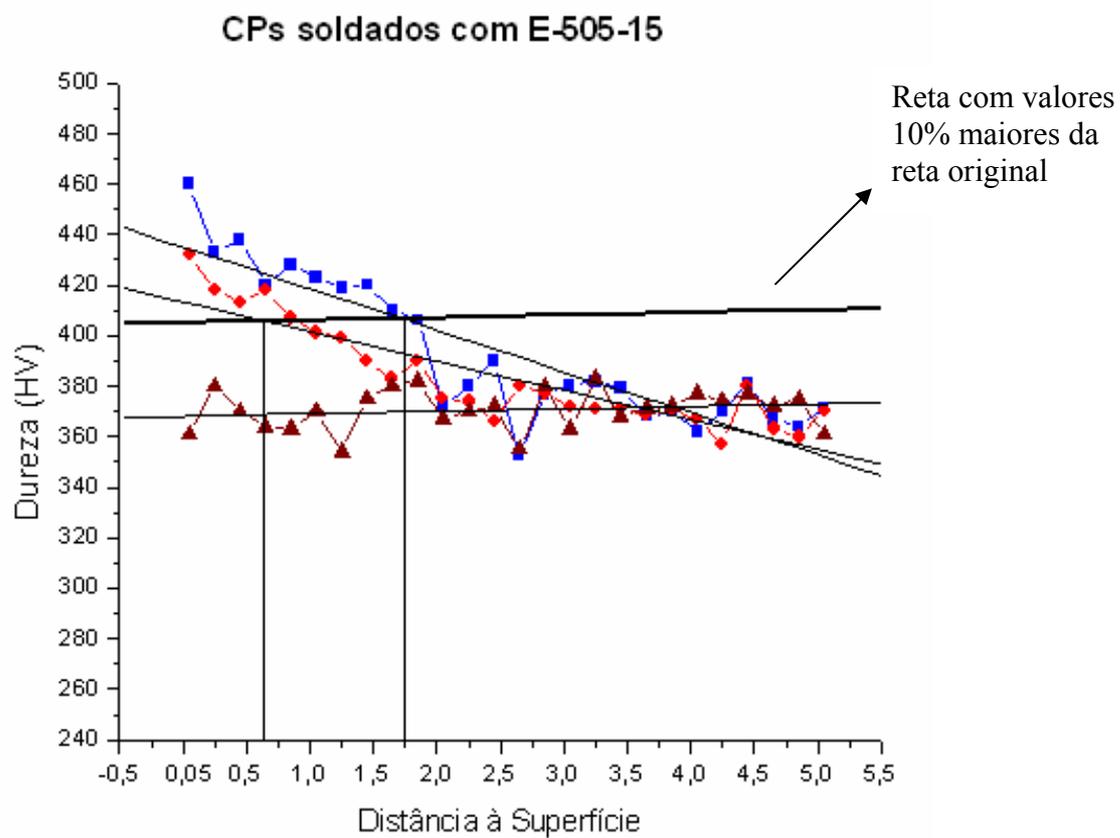


Figura 72 - Profundidades do encruamento nos CPs martelados.

Tabela 07 – Resumo dos resultados encontrados

	Sem Martelamento	Martelado a alta temperatura	Martelado a baixa temperatura
E-7018			
Distorção Angular (°)	6,4	0,4	1,5
Dureza Superficial (HV)	206	308	334
Profundidade do Encruamento (mm)	-----	4,1	2,5
E-316L-16			
Distorção Angular(°)	10,2	9,3	9,7
Dureza Superficial (HV)	198	370	403
Profundidade do encruamento (mm)	-----	3,7	3,8
E-502-15			
Distorção Angular (°)	0,9	0,8	0,6
Dureza Superficial (HV)	337	353	452
Profundidade do encruamento (mm)	-----	1,5	2,7
E-505-15			
Distorção Angular (°)	-1,7	-4,0	0,6
Dureza Superficial (HV)	361	432	460
Profundidade do encruamento (mm)	-----	0,6	1,7

6. CONCLUSÕES.

- O método do contorno não se mostrou apropriado para avaliar a distribuição de tensões residuais numa junta soldada. Ao que parece a variação no relevo da superfície produzida pela rugosidade do corte foi maior que a deformação produzida pelo alívio das tensões elásticas ao seccionar a solda transversalmente.
- A distorção angular produzida numa junta em “V” com elevado ângulo de chanfro foi uma variável suficientemente sensível para permitir diferenciar os resultados conseguidos com o martelamento realizado em diversas condições sobre juntas tendo diversos metais de solda.
- O processo de martelamento é eficaz para a redução das distorções da junta soldada o que indica que também reduz as tensões residuais. Porém, não foi possível quantificar a extensão do alívio das tensões obtida com o martelamento.
- O martelamento produz mossas, sob as quais há uma camada fortemente deformada, com espessura menor que 200 microns. Como a profundidade das mossas é pequena, as mesmas podem ser facilmente removidas por processos simples e rápidos como o esmerilhamento, quando se pretende evitar o efeito de concentração de tensões associado às mesmas.
- No martelamento executado a alta temperatura, logo após depositado o cordão, há uma maior facilidade em se deformar (aplainar) o cordão, de modo que há uma maior redução da altura do reforço da solda do que no martelamento a baixa temperatura.
- Para se executar o martelamento a alta temperatura deve-se executar cordões de pequeno comprimento, devido a que as velocidades de resfriamento na soldagem a arco são extremamente elevadas. Isto torna o martelamento a alta temperatura de difícil controle, pois inicia-se com uma temperatura e termina-se com outra muito menor. Ao contrário, o martelamento a baixa temperatura se pode aplicar a cordões longos, garantindo a temperatura de martelamento mais uniforme em toda a sua extensão.

- Verificou-se que a para o metal de adição E-7018 a deformação angular foi reduzida consideravelmente para ambos os tipos de martelamento, evidenciando assim que o processo de martelamento, para esta liga, mostrou-se eficiente para reduzir as tensões residuais. Não foi encontrada nenhuma evidência metalúrgica da recristalização nos passes anteriores (onde se esperaria uma estrutura com grãos menores), nas regiões onde houve deformação plástica (pelo martelamento) seguida de reaquecimento pelos passes subseqüentes. Nota-se que a profundidade do encruamento superficial quando o martelamento realizado a baixa temperatura atinge uma profundidade bastante significativa, chegando a 4,11 mm que deve ser levado em consideração.
- Para os aços inox austeníticos o endurecimento por deformação deve ser considerado. Nas soldas realizadas com metal de adição E-316L-16 com o martelamento houve um alto grau de endurecimento por deformação, 370 HV para o martelamento a alta temperatura, 403 HV para o martelado a baixa temperatura. Também deve ser considerada a profundidade do efeito do encruamento encontrado nesta liga, chegando a 3,73 mm para o martelado a alta temperatura e 3,83 mm para o martelado a baixa temperatura, o que evidência a sua sensibilidade ao endurecimento por deformação.
- Nos CPS confeccionados com eletrodo E-502-15 e martelados, obteve-se uma distorção angular muito pequena, muito próxima à do CP realizado sem martelamento. Isso, ao que parece, é devido ao fato de estar ocorrendo a transformação martensítica (com aumento de volume) na fase final do resfriamento. Assim como os casos anteriores não foi encontrada nenhuma evidência de refino de grão nas regiões da solda deformadas plasticamente pelo martelamento e submetidas a reaquecimento por passes subseqüentes. Para esta liga, o martelamento se mostrou mais eficiente quando executado a frio. Sendo que deve ser levado em consideração a profundidade do encruamento que o processo de martelamento a frio se mostra maior.
- No caso dos CPs elaborados com eletrodo E-505-15, como a distorção angular foi muito pequena em todos os casos, ficou difícil avaliar os efeitos do martelamento sobre as distorções. Há que ressaltar que para este material a distorção foi negativa, o que pode estar associado a um elevado aumento de volume na transformação martensítica, maior que a contração produzida pela contração térmica e pela mudança de fase sólido-líquido.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

- Executar o martelamento em solda multipasse onde somente o último cordão fosse martelado, avaliando sua eficácia para alívio de tensão.

- Avaliar a extensão do alívio ocasionado pelo processo de martelamento, pelo método do furo cego com extensômetros.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] VAN VLACK, LAURENCE. H - Princípios de Ciências dos Materiais – pg135 a 137 – 13º reimpressão 2000.

[2] CALLISTER JR., WILLIAM D. – Ciências e Engenharia de Matérias – Uma introdução – pg 119 - 5º edição 2002.

[3] PADILHA, ANGELO FERNADO – Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura – pgs 17 a 37 - 2º edição revisada e ampliada – São Paulo – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - 1996

[4] MASUBUCHI, K. – Analysis of Welded Structures – International Series on Materials and Technology – pg 148 a188 - Vol 33 1980.

[5] SILVEIRA, J. P. e Barros, S. M. – Tensões Residuais e Deformações em Soldagem – Petrobrás / Sepes / Diven – Rio de Janeiro 1982.

[6] KOBAYASHI, A. S. – Hanbook on Experimental Mechanics – Second Revision Edition – April 1993.

[7] LI, A.; TI, V.; LEBRUN, J.L.; INGELBERT, G. – Surface Roughness Effects on Stress Determination by the X-Ray diffraction Method. Experimental Techniques – March/April – 1995 Vol 19 / nº2.

[8] KANDIL, F.A. ; LORD. J.D.; FRY, A.T.; GRANT, P. V. – A Review of Residual Stress Measurement Methods – A Guide to Technique Selection – NPL Materials Centre Queens Road – Teddington, Middlesex, UK TW11 0LW - pg 25 a 42 - February 2001

[9] RODAKOSKI, M.R. – Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica – Tese de Doutorado da UFSC – outubro de 1997.

[10] TANALA, E. ; BOURSE, G.; FREMIOT, M.; BELLEVALL de J. F. – Determination of Near Surface Residual Stress on Welded Joints Using Ultrasonic Methods – pg.83 a 88 - NDT& E International – Vol 28 nº2 – 1995.

[11] MARQUEZE, CLEIDE M. – Análise por Ultra-som da textura dos materiais e tensões residuais em juntas soldadas – Dissertação de Mestrado – julho 2002

[12] GRANT, P.V. – 2D Residual Stress Mapping Using The Contour Method: A Technique Review – www.lanl.gov/coutour/ - 20 junho 2004.

[13] MODENESI, PAULO J. – Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico – pg 18 a 24 – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Dezembro de 2001

[14] TOMKINGS, A.B. – A Review of alternative Techniques for Improving Properties of Weldments – Research, Development and Testing for Industry – Worldwide – November 1993.

[15] HAAGENSEN, P.J. – IIW's Round Robin and Desing Recommendations for Improvement Methods – Proc IW 50th Annual Conference – San Francisco – pp.305 – 316 – 1997.

[16] DeGARMO, P. , JONASSEN, F. e MERIAM, J.C. – The Effect of Peening Upon Residual Welding Stresses - Welding Journal Research Supplement - October 1946 - 616s – 623s.

[17] MORRIS, J.L. – Extent of Peening Weld Deposit for Stress Relief – Welding Journal Research Supplement – March 1948 – 148s – 158s .

[18] BAPTISTA, RICARDO M.G.S – Estudo dos Parâmetros de Martelagem no Comportamento à Fadiga de Juntas Soldadas de Aços Estruturais – Julho 2002 – pgs 14 -18.

[19] WELDING HANDBOOK – Volume I – Fundamentals of Welding – 7th Edition – 1976 – pg 273

[20] CALAMARI,P.L., CRUM, F.J. e PLACE, G.W. – An Investigation on Peening – Welding Journal Research Supplement – August 1953 – 387s - 402s.

[21] RIBEIRO, O. H. – Soldagem do Aço ASTM a 516 Grau 60 para Vaso de Pressão Sujeito à Corrosão sob Tensão – Dissertação de Mestrado em Ciências e Eng^o de Materiais – Florianópolis 2001.

[22] FERREIRA, M.L.A. – Martelamento como Método de Alívio de Tensão em Juntas Soldadas – Artigo publicado nos Anais do I Congresso Ibero Americano de Soldagem e XI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – outubro 1985 – pgs. 153 - 168 .

[23] NACHER, A. – Influence of load heating and surface peening on fatigue behaviour of welded joint details' – IIW Doc. XIII – 255 – 61 – 1961.

[24] GURNEY, T. R. – Fatigue of Welded Structure – Cambridge University Press – 1980. (Available from the welding Institute).

[25] ALBERTAZZI, A., Boetter J., Kanda.C. – Medições de Tensões Residuais pelo Método do Furo: Uma Comparação entre Extensiometria e Holografia – Anais do IV Simpósio de Análise Experimental de Tensões – Rio de Janeiro 1996 – pgs.125-128.

[26] PEREIRA DA SILVA, P. S. C. – Análise de Falhas de Componentes Mecânicos em Serviço – Universidade Federal do Paraná 1999.

[27] KOU, S. – Welding metallurgy – New York, John Wiley & Sons – 1997 – Capítulo 3 pgs.78 – 80.

[28] MODENESI, P. J. – Soldabilidade dos aços Inoxidáveis – São Paulo – Senai - SP 2001.

[29] BAILEY, N. – Weldability of ferritic steels – England, Woodhead Publishing Ltd. – 1994 - pg 37.

[30] PIMENTA, J. S. – Soldagem de Reparo do Aço 9Cr-1Mo Grau P9 Sem Tratamento Térmico Posterior – Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina – 2002.

APÊNDICE 1

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE PLANEZAS DAS FACES

Segue as medições das faces realizadas no medidor de coordenadas.