

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO DE UNIÃO POR SOLDA DE TÔPO EM BARRAS
CA-50 COM ELETRODOS REVESTIDOS**

MARCELO DE BARROS ALONSO

ORIENTADOR: PROF. AUGUSTO JOSÉ DE A. BUSCHINELLI, DR. ING.

MARÇO - 2006

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARACTERIZAÇÃO DE UNIÃO POR SOLDA DE TÔPO EM
BARRAS CA-50 COM ELETRODOS REVESTIDOS**

MARCELO DE BARROS ALONSO

**Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
MESTRE PROFISSIONAL EM ENGENHARIA**

ESPECIALIDADE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Augusto J. de A. Buschinelli, Dr. Ing. – Orientador

Prof. Júlio César Passos, Dr. – Coordenador

Prof. José Antonio Bellini da Cunha Neto, Dr. – Coordenador do Programa

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Carlos Enrique Niño Bohorquez, Dr. Eng.

Prof. Pedro Amedeu Nannetti Bernardini, Dr. Eng.

Dedico a toda minha família que me apoiou, compreendeu a minha ausência, o meu esforço e especialmente aos meus pais (in memorem) que, no passado, contribuíram para a minha formação, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos meus colegas que desde o início trabalharam junto comigo em todas as atividades do Mestrado.

Agradeço ao Professor Augusto J. de A. Buschinelli pela paciente e dedicada orientação e aos demais professores da Universidade Federal de Santa Catarina que participaram direta e indiretamente na execução desta dissertação.

Agradeço a Braskem, ao Professor José Amaro e demais professores da Universidade Federal da Bahia que me deram a oportunidade da minha inscrição no Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da UFSC.

Agradeço aos membros da Equipe de Metalurgia da Soldagem e Processos Afins do LABSOLDA/UFSC e em especial ao Eng. Guber Eduardo Guerrero pela cooperação nos ensaios e análises realizados.

Agradeço a Precicast/São José-SC e o Laboratório L.A. Falcão Bauer Ltda. / SP que respectivamente realizaram as análises químicas e ensaios mecânicos necessários a elaboração deste estudo.

RESUMO

Há grande necessidade da execução de emendas por solda de topo na construção civil utilizando o processo a arco elétrico com eletrodos revestidos. Nesse contexto, apesar das usinas siderúrgicas nacionais fabricarem o vergalhão CA-50 classificado como soldável, verificou-se junto a empresas de construção uma demanda por maiores informações sobre o comportamento dessas barras de aço, principalmente nas bitolas maiores, ou seja, com diâmetros de 20, 25, 32 e 40 mm, quando soldadas em condições típicas de um canteiro de obras.

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi elaborar um procedimento de soldagem para atender aos profissionais que utilizam a emenda por solda de topo de barras nervuradas do aço CA-50 na bitola de 32 mm, agregando recursos e informações técnicas que satisfaçam as necessidades dos clientes.

São apresentados resultados comparativos sobre o comportamento de barras fornecidas por 2 grandes fabricantes do país. Análises química e metalográfica, medidas de dureza e ensaios mecânicos, tanto no aço no estado como fornecido como após testes de soldabilidade, mostraram que, apesar de pequena diferença na temperabilidade, associada ao carbono equivalente, ambos os materiais mostram boa soldabilidade, dispensando o preaquecimento nas condições típicas de soldagem em campo: emprego de eletrodos revestidos de maior diâmetro e elevado aporte térmico (maior que 15 kJ/cm).

Emendas de topo foram aprovadas em ensaios de tração, entretanto ensaios de dobramento acusaram que a ductilidade pode ser afetada pela elevada energia de soldagem.

PALAVRAS CHAVES:

Soldabilidade do aço CA-50, especificação do procedimento de soldagem, propriedades da barra de aço CA-50 soldada.

ABSTRACT

There is great need of the execution of butt welding in the building site using the shielded metal arc welding. In that context, in spite of the national steelworks to manufacture the reinforcing CA-50 steel, classified as weldable, it was verified that in the construction companies there are a demand for more information about the behavior of those bars of steel, mainly in the larger gages, such as 20, 25, 32 and 40 mm diameter rods, when welded in typical conditions of a construction site.

In that way, the objective of this research is to elaborate a welding procedure to assist the professionals that use the butt welding joints in the reinforcing CA-50 steel bar for concrete in the building sites, joining resources and scientific information to satisfy the customers' needs.

Comparative results are presented about the behavior of bars supplied by 2 great manufacturers of the country. Chemistry and metallographic analyses, measures of hardness and mechanical tests, so much in the steel as supplied in the market as after weldability tests, showed that, in spite of small difference in the capacity of harden, associated to the equivalent carbon, both materials show good weldability, sparing the preheating in the typical conditions of welding in field: application of covered electrodes of larger diameter and high heat input (larger than 15 kJ/cm).

Butt-welded joints were approved in traction tests, however bend tests accused that the ductility can be affected by the high welding energy.

KEY WORDS:

Weldability of reinforcing CA-50 steel, welding procedure specification, proprieties of CA-50 steel welded bar.

SUMÁRIO

Resumo	v
Abstrat	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1- Normas brasileiras relacionadas com a soldagem dos aços para construção civil	3
2.1.1 - NBR 7480 Barras e Fios de Aço destinados a armadura para Concreto Armado	3
2.1.2 - NBR 6118 Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado	4
2.1.3 - NBR 8965 Barra de Aço CA 42-S com características de soldabilidade destinadas a concreto armado	6
2.1.4 - NBR 8548 Barras de Aço destinadas a armadura para concreto armado com emenda mecânica ou por solda - determinação da resistência à tração	7
2.1.5 - NBR ISO 6892 Materiais Metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente	10
2.1.6 - NBR 6153 Produtos Metálicos - Ensaio de Dobramento semi-guiado	10
2.2- O Tratamento Térmico do CA-50 soldável	10
2.3- Conceitos gerais sobre a soldagem a arco e a ZTA	12
2.4- O Aporte térmico e a sua influência no ciclo térmico de soldagem	14
2.5- O Passe de revenimento para redução de dureza na ZTA	15
2.6- O Teste prático de HIGUCHI	16
2.7- Processos e consumíveis que visam evitar trincas a frio	17
2.8- O Carbono Equivalente e a soldabilidade dos aços	18
2.9- Dureza e Microestruturas	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1- As propriedades do metal base e do metal de adição	22
3.2- Planejamento dos ensaios mecânicos das emendas soldadas com ou sem passe de revenimento	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1- Caracterização das barras de aço CA-50 das amostras A e B	34
4.2- Resultados dos testes com cordões circunferenciais para estimar o passe de revenimento	39

4.3-Resultados dos testes com cordões longitudinais de simples deposição	40
4.4- Avaliação de solda de topo: tração, dobramento e metalografia	43
4.5- Especificações e procedimentos de soldagem	50
5 CONCLUSÃO	53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DAS FIGURAS

Fig.1.1	Tipos de uniões mecânicas aplicadas nas barras nervuradas	1
Fig.1.2	Etapas da soldagem por caldeamento com chama	2
Fig.2.1.1	Tipos de uniões por solda nas barras nervuradas de aço	6
Fig.2.1.2	União com luva rosqueada	8
Fig.2.1.3	União com luva de pressão	8
Fig.2.1.4	Emenda com luva de termite	9
Fig.2.2.1	Tratamento Térmico do Aço CA-50 Soldável	11
Fig.2.2.2	Constituintes do Aço CA-50 Temperado e Revenido	11
Fig.2.3.1	Nomenclatura das diferentes regiões da ZTA de um passe único	12
Fig.2.3.2	Nomenclatura das diferentes regiões da ZTA reaqueladas numa soldagem multipasses	13
Fig.2.4.1	Influência do Aporte Térmico no ciclo térmico da soldagem	15
Fig.2.5.1	Esquema de posicionamento do passe de revenimento	16
Fig.2.6.1	Esquema da realização do teste de Higuchi	17
Fig.2.7.1	Correlação entre os carbonos equivalentes CEN e Pcm	19
Fig.2.8.1	Curva de resfriamento contínuo do aço alemão CK 15-0,3%C, similar ao aço CA-50	21
Fig.3.1.1	Máquina de Tração Universal	23
Fig.3.1.2	Detalhe do extensômetro acoplado na barra identificada como "Lado B" para determinação do limite de escoamento	24
Fig.3.2.1	Tipo de Chanfro duplo V60° radial	27
Fig.3.2.2	Geometria de um cordão de solda típico	27
Fig.3.2.3	Cabeçote de rotação utilizado na soldagem dos cordões circunferenciais	28
Fig.3.2.4	Bancada do Labsolda/UFSC para soldagem dos cordões circunferenciais	28
Fig.3.2.5	Disposição dos cordões com e sem passe de revenido	29
Fig.3.2.6	Corpos de prova com cordões longitudinais	30
Fig.3.2.7	Cantoneira utilizada como dispositivo de soldagem	31
Fig.3.2.8	Soldagem dos corpos de prova das barras nervuradas de aço CA-50	32
Fig.3.2.9	Etapas do ensaio de dobramento a 180°	33
Fig.4.1.1	Macrografia da barra nervurada CA-50 da Amostra A	34
Fig.4.1.2	Perfil de dureza medido da superfície ao centro da barra nervurada CA-50 da Amostra A	34
Fig.4.1.3	Macrografia da barra nervurada CA-50 da Amostra B	35
Fig.4.1.4	Perfil de dureza medido da superfície ao centro da barra	

nervurada CA-50 da Amostra B	35
Fig.4.1.5 Micrografia da seção transversal do aço CA-50 da Amostra A: a)Macrografia;b)Região central; c)Região intermediária; d) Região periférica	36
Fig.4.1.6 Micrografia da seção transversal do aço CA-50 da Amostra B: a)Macrografia;b)Região central; c)Região intermediária; d) Região periférica	37
Fig.4.2.1 Geometria de um cordão circunferencial para o aporte de 11 kJ/cm	39
Fig.4.2.2 Geometria de um cordão circunferencial para o aporte de 16 kJ/cm	39
Fig.4.2.3 Posicionamento do Passe de Revenimento	40
Fig.4.3.1 Inclusão no metal base do aço CA-50 da Amostra B, deformada pela laminação	42
Fig.4.4.1 Gráfico da curva carga x deslocamento	45
Fig.4.4.2 Detalhe da região da fratura	46
Fig.4.4.3 Microestrutura da ZAC junto ao pé do último cordão de solda em CA-50 composta de grãos grosseiros contendo ferrita e perlita Amostra B	48
Fig.4.4.4 Microestrutura da ZAC junto ao pé do último cordão de solda em CA-50 composta de grãos grosseiros contendo ferrita e perlita Amostra A	49
Fig.4.4.5 Aspecto micrográfico dos grãos contendo ferrita e perlita da ZTA-GG na região central da junta soldada no aço CA-50 da Amostra B	50
Fig.4.5.1 Barra nervurada do aço CA-50 soldado	51

LISTA DE TABELAS

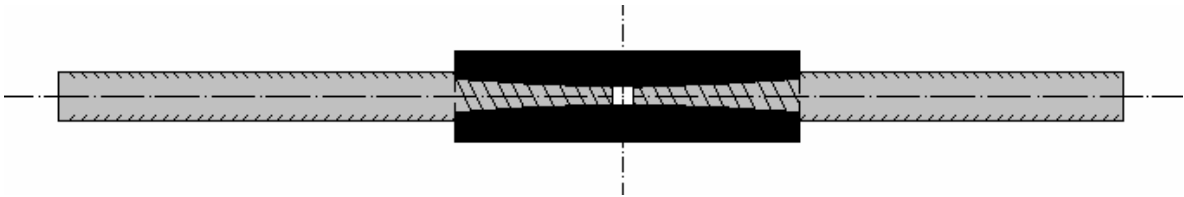
Tab.2.1.1	Propriedades mecânicas exigíveis das barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado	4
Tab.2.8.1	Carbono equivalente versus n°. referente à soldabilidade	20
Tab.3.1.1	Composição Química	22
Tab.3.1.2	Bitola do vergalhão x diâmetro do eletrodo	24
Tab.3.1.3	Indicação da corrente x \emptyset do eletrodo	25
Tab.3.2.1	Planejamento dos corpos de prova das Amostras A e B para ensaios de tração	26
Tab.3.2.2	Parâmetros de soldagem ajustados	29
Tab.3.2.3	Parâmetros de soldagem dos cordões de solda longitudinais	31
Tab.3.2.4	Planejamento dos CP's da Amostra A para ensaio de dobramento	32
Tab.4.3.1	Medidas de dureza máxima na ZAC no CP da Amostra A	41
Tab.4.3.2	Medidas de dureza máxima na ZAC no CP da Amostra B	41
Tab.4.4.1	Ensaio de tração das barras nervuradas CA-50 na bitola \emptyset 32 mm	43
Tab.4.4.2	Ensaio de tração das barras CA-50 soldadas da Amostra A na bitola \emptyset 32 mm	44
Tab.4.4.3	Ensaio de tração das barras CA-50 soldadas da Amostra B na bitola \emptyset 32 mm	44
Tab.4.4.4	LE e Alongamento da barra CA-50 soldada da Amostra A	45
Tab.4.4.5	Ensaio de dobramento das barras CA-50 soldada da Amostra A na bitola \emptyset 32 mm	46
Tab.4.4.6	Dureza em junta soldada de CA-50 da Amostra B	47

1. INTRODUÇÃO

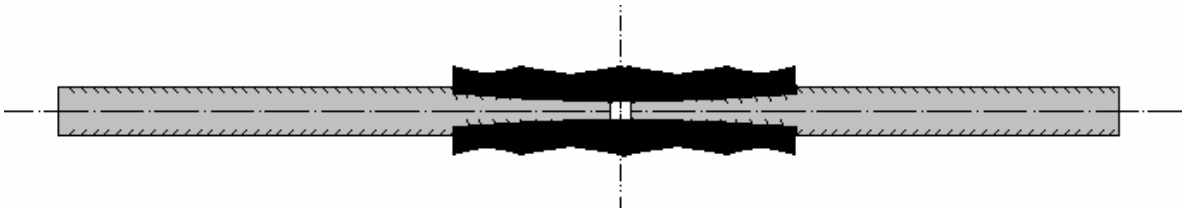
É de fundamental importância na construção civil o emprego de barras de aço com superfícies nervuradas obtidas por laminação a quente. São conhecidas por vergalhões de aço e a união destas barras nervuradas possui um campo de aplicação extenso na construção e recuperação das armaduras de concreto. Especificamente, tem grande importância a emenda por soldagem a arco elétrico, pois permite a sua realização em locais de difícil acesso.

A NBR 6118 [1] prevê que os vergalhões sejam unidos de topo através de luvas rosqueadas, por solda, por caldeamento e outras uniões mecânicas. Nas junções mecânicas são empregados elementos que estabelecem a união das barras nervuradas à serem emendadas. A norma NBR 8548 [2] considera os seguintes tipos de emendas mecânicas:

a) União com luva rosqueada.



b) União com luva prensada.



c) União com luva preenchida.



Fig. 1.1 – Tipos de uniões mecânicas aplicadas nas barras nervuradas [2].

A emenda de topo por caldeamento se utiliza de uma máquina para produzir o aquecimento das extremidades das barras através de passagem de corrente elétrica e aplicar uma pressão mecânica nestas. A máquina de solda por caldeamento baseia-se no princípio da solda por resistência elétrica, com o uso de mão de obra específica ao referido processo. É importante ressaltar que o aquecimento das extremidades dos vergalhões pode também ser feito através de um moderno processo japonês desenvolvido por Yamamoto et al [3], que utiliza uma chama oxiacetilênica e pressão mecânica, como visto na figura 1.2 Após o término da soldagem, ocorre em seguida um desbaste a quente para remoção do material projetado perifericamente. A solda por caldeamento facilita bastante a união dos vergalhões com grandes comprimentos.

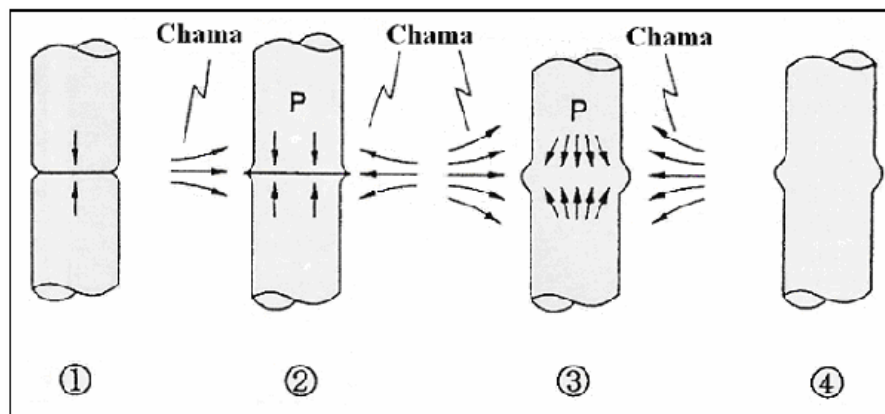


Figura 1.2 – Etapas da soldagem por caldeamento com chama [3].

Entretanto, apesar da existência de vários tipos de emendas e de processos para unir os vergalhões, a solda a arco elétrico com eletrodos revestidos possui um vasto campo de aplicação a ser expandido, pois a sua execução é tecnicamente viável e de baixo custo. Com os avanços tecnológicos dos processos de soldagem e da produção dos aços de alta qualidade, as indústrias siderúrgicas afirmam garantir a fabricação do aço CA-50 para concreto armado com excelentes características de soldabilidade sem prejuízo de suas propriedades mecânicas. Logo, torna-se necessário um estudo mais abrangente de como unir corretamente as barras nervuradas de aço CA-50 utilizando solda a arco elétrico a fim de suprir as empresas que atuam na área de construção civil com maiores informações técnicas sobre este tema.

O objetivo deste estudo está centrado nas aplicações de uniões por solda de topo no vergalhão CA-50 na bitola de 32 mm, utilizando eletrodos revestidos com recomendações diversas que visam executá-las com eficiência e qualidade, proporcionando economia de material devido ao aproveitamento das pontas dos vergalhões.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nos últimos quarenta anos, progressos consideráveis foram obtidos na indústria siderúrgica brasileira, com o uso do oxigênio na produção dos aços através do conversor LD e da automatização da laminação programada. Porém, somente em julho de 1985 surgiu a norma brasileira NBR 8965 [5] que determinou as condições para encomenda, fabricação e fornecimento de barras de aço CA-42-S, com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado. Anteriormente só eram relevantes as propriedades mecânicas das barras nervuradas, não existindo um controle eficaz da sua composição química. A produção do aço CA-42-S não teve êxito conforme esperado, principalmente devido à falta de controle dos processos de fabricação e de soldagem.

No início dessa década as indústrias brasileiras já fabricavam o aço CA-50 para concreto armado com característica de ser soldável, sendo de grande importância o estudo das regiões que são afetadas pelo calor e do uso do passe de revenimento para evitar o endurecimento excessivo e as trincas a frio nas juntas soldadas.

2.1- NORMAS BRASILEIRAS RELACIONADAS COM A SOLDAGEM DOS AÇOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

A ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas é o Fórum Nacional de Normalização. Suas normas são elaboradas por comissões de estudo (CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, fazendo parte delas: produtores, consumidores e entidades (universidades, laboratórios e outros). As normas citadas abaixo têm por finalidade definir critérios de fabricação, de inspeção, características do uso dos produtos, assim como fixar condições para execução de uniões de barras nervuradas empregadas na construção civil.

Tendo em vista a extensão, a abrangência e a quantidade de informações existentes, estão descritas abaixo algumas das normas mais relevantes:

2.1.1 – NBR 7480 – BARRAS E FIOS DE AÇO DESTINADOS A ARMADURA PARA CONCRETO ARMADO [4].

A Norma brasileira NBR 7480 [4] foi revista e a partir de 1 de abril de 1996 passou a vigorar, atualizando os processos de fabricação das categorias de aço

existentes destinados a armaduras de concreto armado. Nesta nova versão foi eliminada a categoria CA-40 mantendo as categorias CA-25, CA-50 e CA-60 conforme as propriedades mecânicas relacionadas na tabela 2.1.1 do anexo B da norma apresentada a seguir:

Tabela 2.1.1 - Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado

CATEGORIA	ENSAIO DE TRAÇÃO (valores mínimos)			ENSAIO DE DOBRAMENTO	
	TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO σ_y (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO σ_r (MPa)	ALONG. EM 10 \emptyset A_{10} (%)	DIAM. DE PINO ^(D) (mm)	
				$\emptyset < 20$	$\emptyset \geq 20$
CA-25	250	$1,20\sigma_y$	18	2 \emptyset	4 \emptyset
CA-50	500	$1,10\sigma_y$	8	4 \emptyset	6 \emptyset
CA-60	600	$1,05\sigma_y$	5	5 \emptyset	-

(D) As barras de diâmetro nominal \emptyset maior ou igual a 32 mm das categorias CA-50 devem ser dobradas sobre pinos de 8 \emptyset (oito vezes o diâmetro).

Fonte: NBR 7480

Na revisão anterior ao ano de 1985 a Norma NBR 7480 [4] distinguia as classes A e B, as quais eram definidas pelo processo de fabricação das barras ou fios. Para o processo de laminação a quente o produto era denominado classe A e para os processos de laminação a frio ou trefilação era denominado classe B.

Na versão de 1996 as classes A e B foram eliminadas e as categorias de aço CA-25 e CA-50 foram consideradas fabricadas por laminação a quente, devendo todo fio, caso típico do CA-60, ser fabricado por trefilação ou através de processo equivalente, por exemplo estiramento ou laminação a frio.

Ressalta-se que a categoria do aço CA-60 é utilizada principalmente na fabricação dos estribos das vigas de concreto, e conseqüentemente a NBR 7480 [4] estabeleceu as seguintes bitolas: $\emptyset 3,4$ - $\emptyset 4,2$ - $\emptyset 5,0$ - $\emptyset 6,0$ - $\emptyset 7,0$ - $\emptyset 9,5$ - $\emptyset 10$ mm.

Quanto à soldagem dos aços destinados à construção civil esta Norma menciona que deve ser conforme as normas NBR 6118 [1] e NBR 8965 [5] as quais serão destacadas a seguir:

2.1.2 – NBR 6118 – PROJETO E EXECUÇÃO DE OBRAS DE CONCRETO ARMADO [1].

Esta norma estabelece os tipos de união que podem ser:

- por transpasse,
- por luva com preenchimento metálico, rosqueadas ou prensadas,
- por solda,
- por outros dispositivos devidamente justificados.

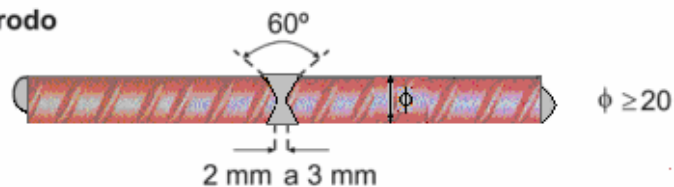
Quanto às uniões por solda, podem ser (vide figura 2.1.1) :

- de topo, por caldeamento, para bitola não menor que 10 mm;
- de topo, com eletrodo, para bitola não menor que 20 mm;
- por transpasse com pelo menos dois cordões de solda longitudinais, cada um deles com comprimento não inferior a $5 \varnothing$, afastados no mínimo $5 \varnothing$ (cinco vezes o diâm.);
- com outras barras justapostas (cobrejuntas), com cordões de solda longitudinais; fazendo-se coincidir o eixo baricentrico do conjunto com o eixo longitudinal das barras soldadas, devendo cada cordão ter comprimento de pelo menos $5 \varnothing$.

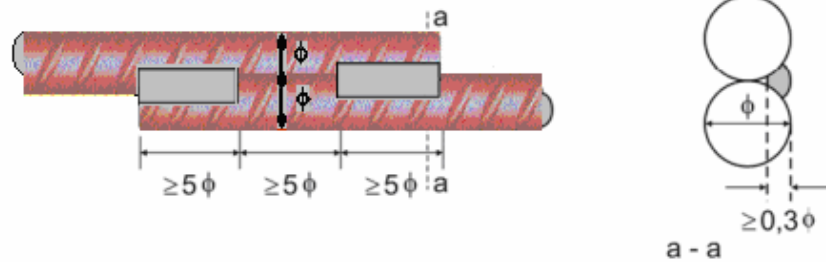
de topo por caldeamento



de topo com eletrodo



por transpasse



com barras justapostas

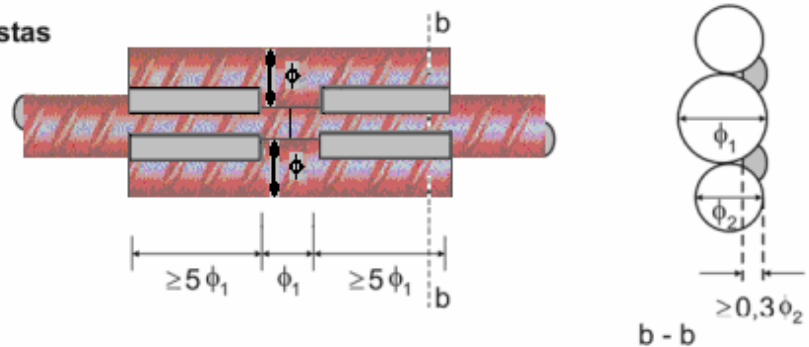


Figura 2.1.1 – Tipos de uniões por solda nas barras nervuradas de aço [1].

- As emendas por solda podem ser realizadas na totalidade das barras em uma seção transversal do elemento estrutural. Devem ser consideradas como na mesma seção as emendas que de centro a centro estejam afastadas entre si menos que 15ϕ medidas na direção do eixo da barra.

- A resistência de cada barra emendada deve ser considerada sem redução. Em caso de barra tracionada e havendo predominância de carga intermitente, a resistência deve ser reduzida em 20%.

2.1.3 – NBR 8965 – BARRA DE AÇO CA 42-S COM CARACTERÍSTICAS DE SOLDABILIDADE DESTINADAS A CONCRETO ARMADO [5].

Esta norma determina que um aço é considerado soldável quando sua composição química obedece os seguintes teores máximos:

Carbono	-	0,35%
Manganês	-	1,50%
Fósforo	-	0,050%
Enxofre	-	0,050%
Silício	-	0,50%

Além das limitações de composição química, acima citadas, a NBR 8965 [5] limita o carbono equivalente (CE) máximo em 0,55%, calculado pela seguinte equação:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (1)$$

Esta Norma estabeleceu uma nova categoria de aço para construção civil, denominada CA 42-S, com 420 MPa de escoamento e 500 MPa de limite de resistência a tração.

Esta categoria foi concebida para obras civis que necessitassem uniões com solda com bastante intensidade, porém não houve a devida aceitação no mercado, talvez por falta de uma maior divulgação deste produto soldável. É importante ressaltar que antes havia uma forte resistência em aceitar um aço destinado à construção civil com a qualidade de ser soldável, pois não havia um eficaz controle da composição química do aço das barras nervuradas, sendo relevante apenas as suas propriedades mecânicas.

2.1.4 – NBR 8548 – BARRAS DE AÇO DESTINADAS A ARMADURA PARA CONCRETO ARMADO COM EMENDA MECÂNICA OU POR SOLDA – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO [2].

A norma NBR 8548 [2] considera os seguintes tipos de emendas: uniões mecânicas, por solda, por caldeamento.

Cada tipo de união acima citada possui características próprias e algumas desvantagens, mencionadas a seguir. Na emenda com luva rosqueada, para evitar a perda de seção provocada pelo recorte das roscas, podem-se encorpar as extremidades das barras na forja, ou soldar de topo, pedaços de barras com diâmetro maior, rosqueados e pré-fabricados conforme a figura 2.1.2.a. Pode-se evitar o enfraquecimento das barras laminado-se a rosca do tipo parafuso WD, devendo as extremidades das mesmas ser previamente conformadas (vide figura 2.1.2.b).

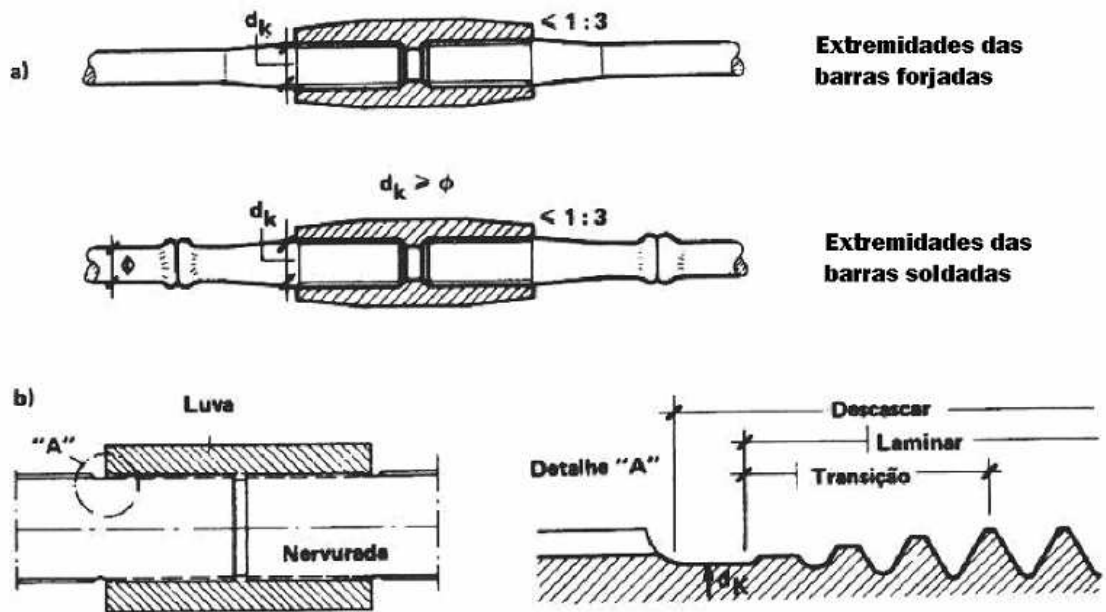


Figura 2.1.2 - União com luva rosqueada [6].

- a) Com extremidades das barras forjadas e rosca usinada;
 b) Com rosca laminada, "ligação tipo parafuso WD".

Quanto à ligação com luva prensada, os tubos-luva são comprimidos com prensa hidráulica na obra, ou seja, no próprio local da barra a ser montada (vide figura 2.1.3). Para a compressão da luva, é necessário um espaçamento entre as barras de pelo menos 10 cm, para a prensa hidráulica conseguir executar a prensagem do tubo-luva.

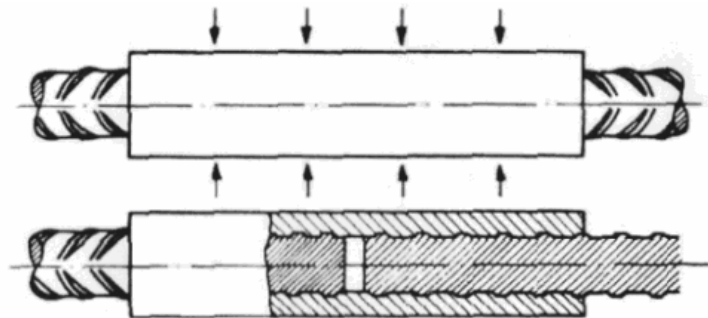


Figura 2.1.3 – União com luva de pressão [6].

Já na união com luva termite, o espaço vazio entre a luva internamente rosqueada e as extremidades das barras nervuradas, é preenchido com a liga **termite**. A fusão processa-se em um cadinho, ligado à luva por meio de um suporte com tubo de alimentação, acendendo-se uma mistura em que predomina óxido de ferro e alumínio, ambos em pó (vide figura 2.1.4). Na reação aluminotérmica forma-se

alumina e ferro numa temperatura aproximadamente de 3000° C. O ferro líquido é mais denso que a escória de alumínio e escorre para dentro da luva.

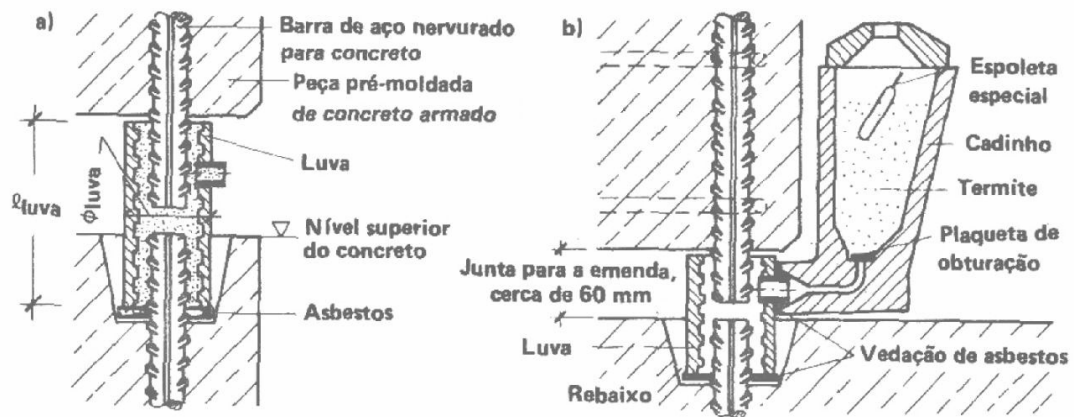


Figura 2.1.4–a) Emenda com luva termite; b) Emenda com luva termite com cacinho conectado [6]

Várias são as desvantagens da emenda com luva termite, tais como:

- Necessidade de cuidados especiais quanto à segurança do operador e do local.
- Necessidade de moldes específicos para cada aplicação.
- Custo elevado de operação se comparado com outros tipos de união.
- Tempo de preparação do molde relativamente longo.

Esta norma estabelece os critérios para a realização do método de ensaio de tração para determinar o limite de resistência à tração de barras de aço nervuradas com ou sem uniões, tipos mecânicas ou por solda.

O ensaio de tração das barras nervuradas soldadas deve ser conduzido conforme a Norma NBR ISO 6892 [7] e deve satisfazer ao limite convencional de resistência à tração do metal base dos vergalhões conforme a tabela 2.1.1 da NBR 7480 [4].

Para o cálculo do valor da resistência convencional à ruptura deve-se utilizar o valor nominal da área de seção das barras. Quanto à localização do local da fratura, deve-se determinar a distância da ruptura ao centro da solda, em mm.

2.1.5 – NBR ISO 6892 – MATERIAIS METÁLICOS – ENSAIO DE TRAÇÃO À TEMPERATURA AMBIENTE [7].

Esta norma cancela e substitui a NBR 6152 de 1992 e é equivalente a Norma NBR ISO 6892 [7] de 1998. Tem como objetivo a especificação do método do ensaio de tração em materiais metálicos e define as propriedades mecânicas que podem ser determinadas à temperatura ambiente. A norma NBR ISO 6892 [7] possui disposições que constituem prescrições para a norma NBR 8548 [2].

2.1.6 – NBR 6153 – PRODUTOS METÁLICOS – ENSAIO DE DOBRAMENTO SEMI-GUIADO [8].

- No ensaio de dobramento o corpo de prova do material é submetido a um dobramento de 180° utilizando um pino de diâmetro padronizado conforme a tabela 2.1.1 (do anexo B da NBR 7480 [4]).
- O corpo de prova é considerado aprovado quando após o dobramento de 180° não apresenta quebra ou fissura na região dobrada.
- Este ensaio somente é aplicado para barras nervuradas não emendadas.

2.2 – O TRATAMENTO TÉRMICO DO CA-50 SOLDÁVEL.

A técnica conhecida para melhorar a soldabilidade do aço CA-50 será apresentada a seguir. Os pontos mais importantes na produção do aço CA-50 para torná-lo soldável referem-se ao seu carbono equivalente, e a obtenção de dois tipos de microestruturas localizadas em regiões distintas, ou seja, na camada superficial e no núcleo da barra nervurada. O controle do carbono equivalente é importante pois aço com baixos teores de carbono, manganês e outros elementos químicos facilitam a execução de emenda soldada.

Os aços CA-50 são tratados termicamente em laminadores apropriados, esquematicamente apresentados na Figura 2.2.1.

CA50 Soldável

Processo de Resfriamento Controlado

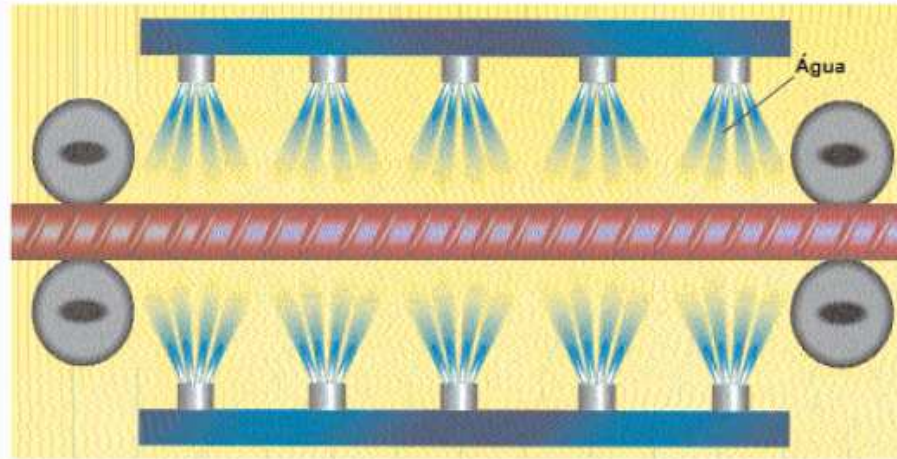


Figura 2.2.1– Tratamento Térmico do Aço CA-50 Soldável [9].

Após a passagem no último passe de laminação, a barra de aço é submetida a uma condição severa de resfriamento controlado, reduzindo a sua temperatura superficialmente a fim de obter uma camada superficial endurecida. O núcleo da barra, que permanece quente, reaquece esta camada endurecida e promove o seu revenimento para diminuir a sua dureza. Então, o vergalhão obtém uma camada superficial com alto valor de escoamento proveniente da martensita revenida e um núcleo com alta ductilidade devido à microestrutura ferrita-perlita fina . Ver Figura 2.2.2.

Corte Transversal da Barra de Aço

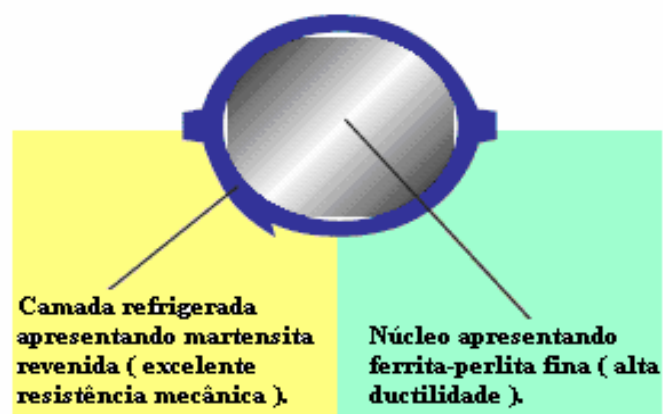


Figura 2.2.2 – Constituintes do Aço CA-50 Temperado e Revenido [9].

2.3 – CONCEITOS GERAIS SOBRE A SOLDAGEM A ARCO E A ZTA

Segundo Okumura e Taniguchi [10] o processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido consiste em um arame de material adequado, coberto com um revestimento fundente, e que é consumido através de um arco gerado entre a sua extremidade livre e o metal que se deseja soldar. A região da solda é composta de três zonas bem distintas: a zona fundida, a zona termicamente afetada e o metal-base.

A zona de fusão corresponde à região onde efetivamente houve a fusão e a subsequente solidificação do metal. A zona termicamente afetada (ZTA) é a região do metal base adjacente à zona de fundida, caracterizando-se por apresentar um ciclo térmico de rápido aquecimento, seguido de um rápido esfriamento, causado pela fonte de energia utilizada na soldagem.



Figura 2.3.1 - Nomenclatura das diferentes regiões da ZTA de um passe único [11].

A ZTA da soldagem de passe único apresenta três regiões: A região de grãos grosseiros, a região de grãos refinados e a região intercrítica que segundo Kou [12] é uma região de grãos parcialmente refinados (vide fig. 2.3.1)

Niño [11] cita que a ZTA grosseira pode ser dividida em várias regiões, dependendo da temperatura de pico T_p que o material tenha experimentado numa soldagem multipasses (vide figura 2.3.2):

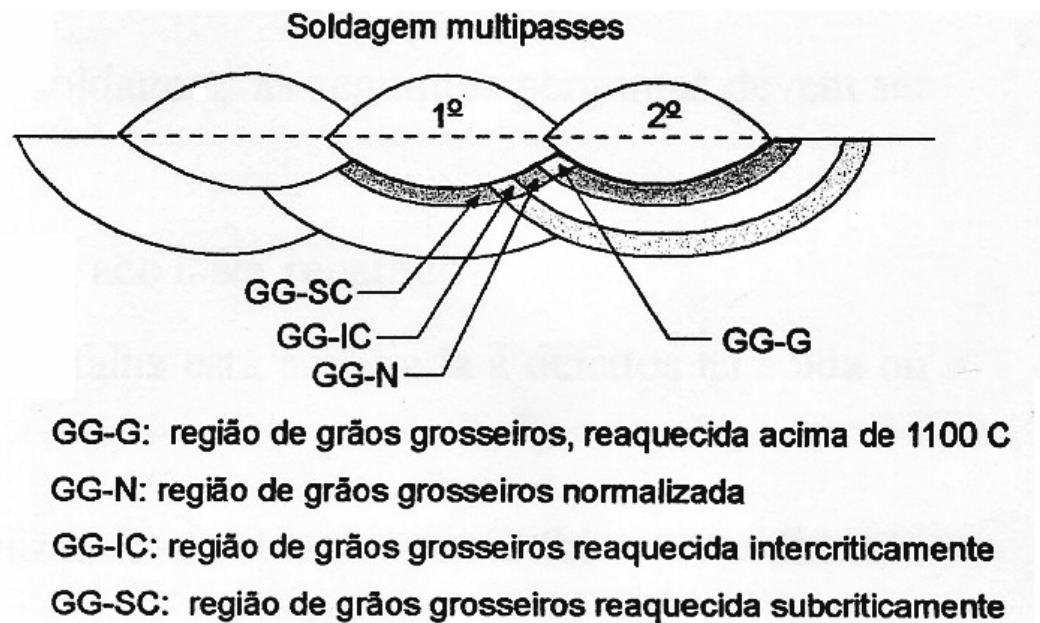


Figura 2.3.2 - Nomenclatura das diferentes regiões da ZTA reaquecidas numa soldagem multipasses [11].

- **GG-G** - Região de grãos grosseiros – São regiões que atingem temperaturas de pico entre 1100 e 1500°C e seus grãos austeníticos crescem significativamente com a elevação da temperatura durante o ciclo térmico.
- **GG-N** - Região de grãos grosseiros normalizados – São regiões que são aquecidas entre a temperatura de transformação dinâmica A_{c3} e 1100°C. Geralmente atingem a um tamanho de grão fino e uniforme e usualmente possui relativamente boas propriedades mecânicas.
- **GG-IC** - Região de grãos grosseiros reaquecida inter-criticamente – Abaixo das zonas totalmente reaustenitizadas, onde o aquecimento se dá entre as temperaturas de transformação A_{c1} e A_{c3} , a austenita é transformada parcialmente.
- **GG-SC** - Região de grãos grosseiros reaquecidos sub-criticamente – É nesta região que o aço na zona aquecida subcriticamente não consegue se transformar em austenita mas pode sofrer efeitos tais como o revenimento.

2.4 – O APORTE TÉRMICO E A SUA INFLUÊNCIA NO CICLO TÉRMICO DE SOLDAGEM

A energia fornecida pelo arco por unidade de comprimento de solda é conhecida por energia de soldagem, e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$E_{\text{FORN}} = 0,06 \frac{U \cdot I}{v_s} \quad (2)$$

Onde: E_{FORN} é a energia de soldagem [kJ/cm]

U é a tensão do arco [V]

I é a corrente de soldagem [A]

v_s é a velocidade de soldagem [cm/min]

Somente uma parcela da energia do arco é efetivamente transferida para a solda pois grande parte da energia fornecida acaba servindo simplesmente para aquecer o eletrodo, ocorrendo também perdas de calor para o ambiente. Para calcular o aporte térmico, ou seja, a energia absorvida efetivamente pela peça, é necessário utilizar a seguinte expressão:

$$E = \eta E_{\text{FORN}} \quad (3)$$

Onde: E é o aporte térmico [kJ/cm]

η é o rendimento térmico do processo de soldagem

E_{FORN} é a energia de soldagem dada pela equação (2)

Para o processo a arco elétrico com eletrodo revestido, Grong [13] admite valores para rendimento térmico η entre 0,66 a 0,85.

O processo de aquecimento e resfriamento durante a soldagem é conhecido por ciclo térmico da soldagem. Exemplos de ciclos térmicos no processo de soldagem a arco elétrico são mostrados na figura 2.4.1 para os valores de aporte térmicos de 10 e 20 kJ/cm de dois cordões de solda distintos depositados sobre uma chapa de aço com espessura de 20 mm.

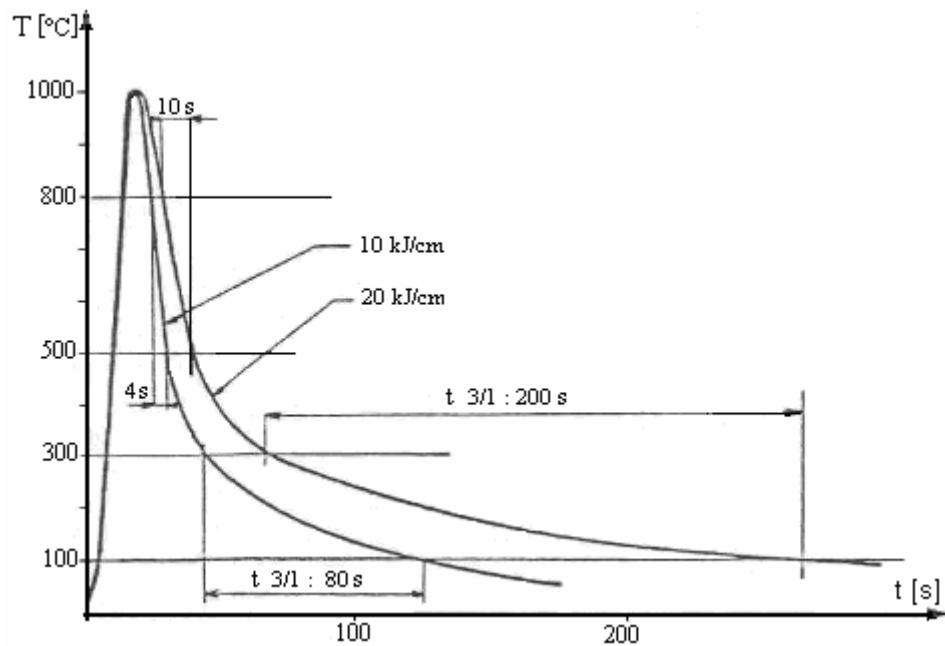


Fig. 2.4.1 – Influência do Aporte Térmico no ciclo térmico da soldagem [14].

É importante observar que, durante um ciclo térmico, o tempo de resfriamento de uma determinada faixa de temperatura influi muito no desempenho da junta soldada.

A microestrutura e as propriedades mecânicas, como a resistência à propagação a trincas da zona termicamente afetada, dependem fundamentalmente do tempo de resfriamento em uma faixa de temperatura entre 800 e 500°C. As trincas a frio, nas quais o hidrogênio desempenha um papel preponderante, são controladas também pelo tempo de resfriamento na faixa de 300 a 100°C.

2.5 – O PASSE DE REVENIMENTO PARA REDUÇÃO DE DUREZA NA ZTA

Não somente para minimizar a dureza na ZTA como para diminuir o risco de ocorrer trincas a frio, utiliza-se o passe de revenimento (temper bead). Niño [11] descreve que esta técnica consiste na aplicação e posicionamento adequado do passe de revenimento em relação ao passe a revenir, de modo que a isoterma A_{c1} do primeiro, coincida justamente com a linha de fusão do último passe a ser revenido. Conseqüentemente, a região reaustenizada do passe a revenir seria metal de solda que não é susceptível a desenvolver elevada dureza, enquanto a sua ZTA poderia ser revenida ao ser reaquecida a temperatura abaixo da faixa em que ocorre reaustenitização (vide Fig. 2.5.1).

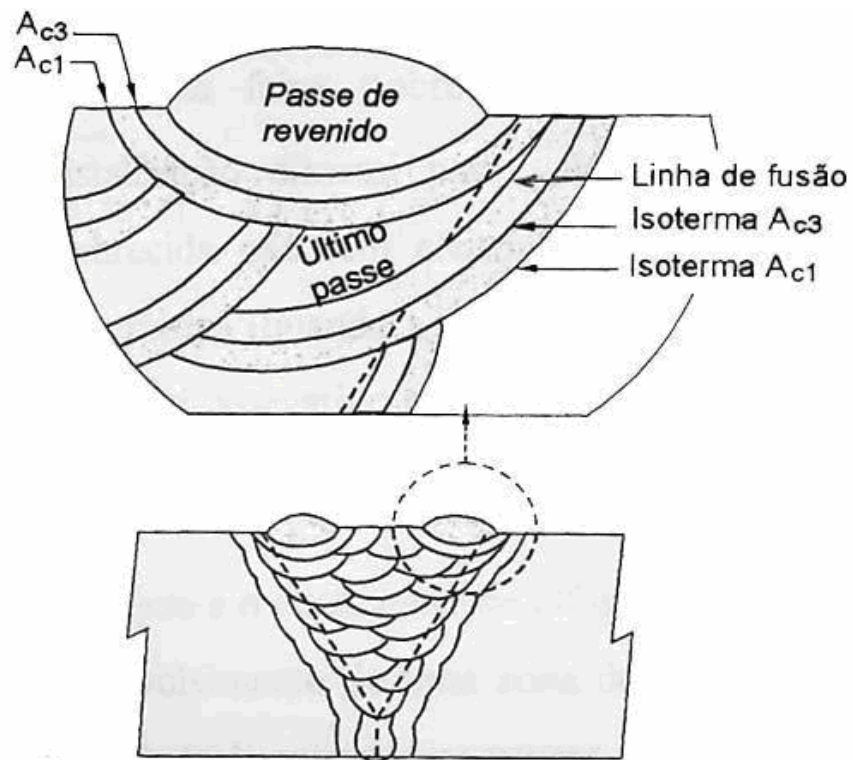


Figura 2.5.1- Esquema de posicionamento do passe de revenimento [11].

Em outras palavras, a região da ZTA grosseira na solda multipasses, é revenida pelo calor resultante da deposição dos passes subseqüentes.

Segundo Niño et al [15], para aumentar o grau de refino é importante trabalhar com as velocidades de soldagem máximas possíveis, pois se evita assim o excessivo crescimento de grão na zona de grãos grosseiros (ZGG).

Assim sendo, soldar com baixos aportes de energia, também minimiza o crescimento de grão na ZTA grosseira.

2.6 – O TESTE PRÁTICO DE HIGUCHI

A dureza é uma característica muito importante na metalurgia da soldagem. Diversos tipos de microestruturas podem ocorrer na ZTA (zona termicamente afetada pelo calor) em função dos elevados gradientes de temperatura. Estas microestruturas presentes na ZTA podem ser correlacionadas com o perfil de dureza ao longo da ZTA. A dureza máxima é limitada na norma americana ANSI/AWS D1.1- 90 [16] em 350 HV para evitar trincas a frio, pois o controle da dureza implica no controle da microestrutura.

O teste de Higuchi [17] consiste em depositar sobre a chapa do metal base previamente temperada cordões de solda com diferentes níveis de energia a fim de avaliar a extensão de zonas revenidas e retemperadas pelo calor de soldagem.

Na seção do cordão da figura 2.6.1, o perfil de dureza é levantado na direção perpendicular à linha de fusão, em função da dimensão do cordão, para determinar a extensão das regiões revenidas e retemperadas da ZTA.

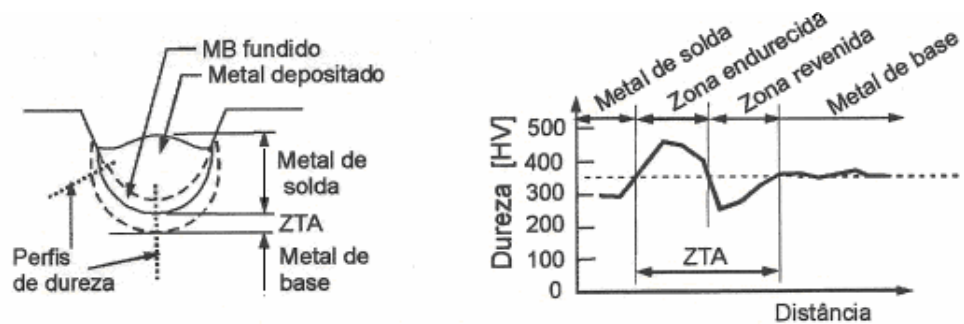


Fig. 2.6.1. Esquema da realização do teste de Higuchi: a) deposição de um passe sobre chapa temperada; b) perfis de dureza medidos perpendicularmente à linha de fusão [17].

2.7 – PROCESSO E CONSUMÍVEIS QUE VISAM EVITAR TRINCAS A FRIO [14].

A fratura frágil, de modo geral, ocorre repentinamente em uma estrutura mesmo que ela esteja sendo submetida a um nível de tensão abaixo do nível correspondente ao escoamento. Portanto as trincas induzidas pelo hidrogênio na soldagem dos aços ferríticos surgem quando os seguintes fatores estão presentes simultaneamente:

- Microestrutura susceptível (martensita).
- Tensões residuais elevadas.
- Hidrogênio difusível no metal de solda.
- Temperatura relativamente baixa ($T < 200^{\circ}\text{C}$).

Buschinelli [14] relata que a martensita, particularmente a de alto carbono, é dura, frágil e especialmente susceptível às trincas de hidrogênio. Como a temperatura de início de formação de martensita (M_s) é relativamente baixa, as trincas tendem a ocorrer a baixas temperaturas. Essas trincas surgem geralmente na ZTA e em alguns casos, quando na soldagem de aços de alta resistência, no metal da solda. As trincas a frio originadas na ZTA podem ser transgranulares, intergranulares ou mistas. As trincas originadas na ZTA estão associadas com a região de grãos grosseiros, pois

como esta região atinge elevadas temperaturas, os grãos austeníticos crescem significativamente, aumentando assim a sua temperabilidade e diminuindo a sua ductilidade em relação a outras regiões da junta soldada. É importante ressaltar que o hidrogênio fragiliza os aços ferríticos em temperaturas relativamente baixas (-100 a 200°C), podendo ocorrer trincas durante a soldagem ou minutos e até horas após o término desta.

Para minimizar o crescimento de grão na ZTA grosseira, é necessário que a soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos das barras nervuradas de aço CA-50 sejam executadas com baixo aporte de energia. Além disso é necessário que as uniões possuam baixo grau de restrição e que haja controle direto do nível do hidrogênio. Assim sendo, é preciso utilizar consumíveis adequados, ter cuidado na sua armazenagem, de modo que não absorvam umidade do ambiente e respeitar as recomendações quanto a eventual ressecagem destes em forno a elevadas temperaturas (250 a 450°C). A limpeza de superfícies do aço é fundamental para que esteja livre de contaminação por óxidos, óleos, graxas e tintas.

Gomes et al [18] sugerem como metal de adição o eletrodo revestido de baixo hidrogênio AWS E-10018-G para uso na soldagem dos vergalhões de aço CA-50, energia de soldagem entre 13 a 35 kJ/cm e temperatura entre passes menor do que 250°C.

2.8– O CARBONO EQUIVALENTE E A SOLDABILIDADE DOS AÇOS [14].

A influência dos elementos de liga na suscetibilidade a trincas a frio na zona termicamente afetada é geralmente estimada por meio de índices de carbono equivalente, CE, que podem ser calculados através de várias expressões, algumas delas apresentadas abaixo:

- Equação formulada pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (4)$$

- Equação formulada pelo Japanese Welding Engineering Society Standard (WES)

$$CE_{WES} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (5)$$

Atualmente a WES japonesa utiliza o parâmetro de carbono equivalente:

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (6)$$

- Equação formulada pelo European Committee for Standardisation (CEN)

O WTIA – Welding Technology Institute of. Australia recomenda o cálculo do número referente à soldabilidade dos aços baseado na fórmula do Carbono equivalente do International Institute of Welding conforme a tabela 2.8.1 .

Tabela 2.8.1 - Carbono equivalente versus nº. referente à soldabilidade

CARBONO EQUIVALENTE (CE)	Nº. REFERENTE A SOLDABILIDADE	CARBONO EQUIVALENTE (CE)	Nº. REFERENTE A SOLDABILIDADE
Abaixo de 0,30	1	0,55 : 0,60	7
0,30 : 0,35	2	0,60 : 0,65	8
0,35 : 0,40	3	0,65 : 0,70	9
0,40 : 0,45	4	0,70 : 0,75	10
0,45 : 0,50	5	0,75 : 0,80	11
0,50 : 0,55	6	Acima de 0,80	12

Os números referentes à soldabilidade são proporcionais ao CE_{IIW} , ou seja, quanto maior o valor do carbono equivalente, maior o nº. referente à soldabilidade e conseqüentemente maior o risco de ocorrer trincas a frio na junta soldada.

Por exemplo, para o número referente à soldabilidade igual a **4** o WTIA indica ser fácil a soldagem dos aços de baixo carbono porém para espessura combinada da junta igual ou maior que 50 mm, a melhor prática é o uso de eletrodo de baixo hidrogênio associada a uma baixa temperatura de pré-aquecimento.

Para os nºs referentes à soldabilidade igual ou maior que **5**, a recomendação prática é maior controle do hidrogênio no processo de soldagem e o uso de pré-aquecimento.

2.9 – DUREZA E MICROESTRUTURAS

A microestrutura dos aços ferríticos se modifica conforme a velocidade de resfriamento, após austenizados, alterando-se suas propriedades mecânicas por meio de tratamentos térmicos específicos. Ribeiro [19] utiliza o diagrama de transformação no resfriamento contínuo do aço CK 15-0,3%C como similar ao do aço CA-50 para análise das microestruturas associadas aos seus respectivos valores de dureza, obtidas em diferentes condições de resfriamento (vide figura 2.8.1).

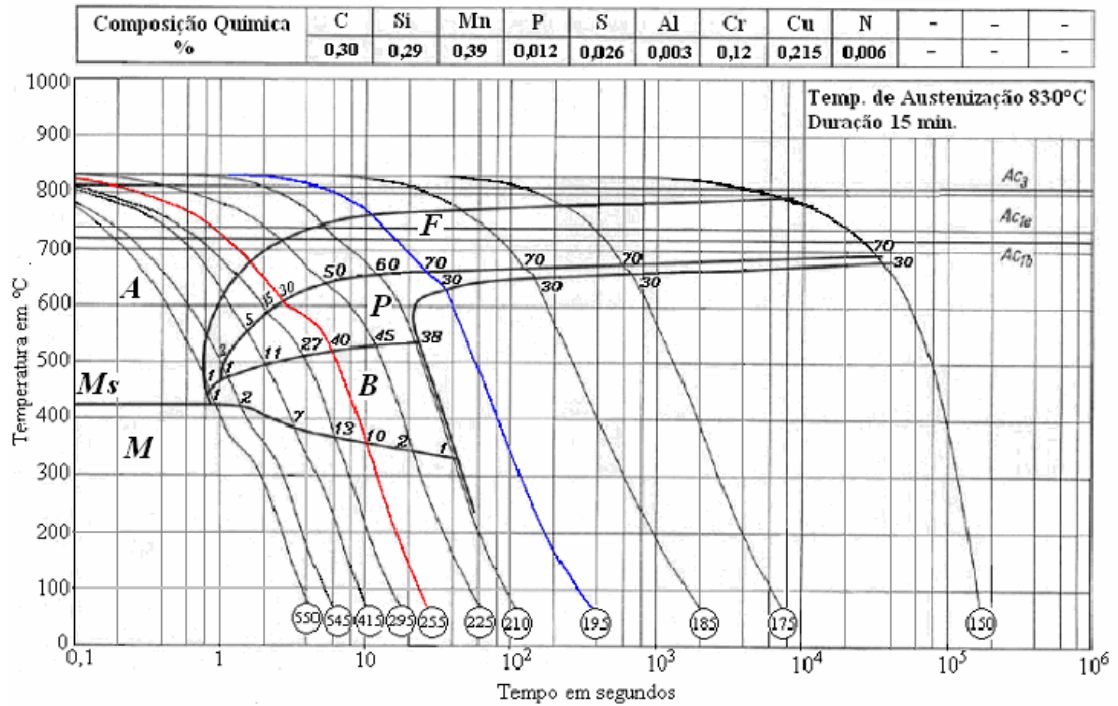


Fig.2.8.1-Curva de resfriamento contínuo do aço alemão CK 15-0,3%C, similar ao aço CA-50 [19].

O diagrama de transformação no resfriamento contínuo também denominado de diagrama CCT (Continuous Cooling Transformation), é obtido através de diferentes ciclos térmicos. Assim a estrutura e a dureza da zona termicamente afetada podem ser estimadas pela medição do tempo ou da velocidade de resfriamento a partir de 800 até 500°C, combinando-se esse tempo de resfriamento com o diagrama CCT do metal base soldado.

O diagrama de transformação no resfriamento contínuo da figura 2.8.1 é utilizado na seção 4.4.1 para auxiliar na caracterização das microestruturas das barras de aço CA-50.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

É importante descrever as propriedades do aço CA-50, do metal de adição e das técnicas do processo de soldagem a arco elétrico manual com eletrodos revestidos, visando um planejamento dos ensaios mecânicos a serem realizados. Torna-se então necessário definir o posicionamento correto do passe de revenido e dos parâmetros de soldagem a fim de se obter os corpos de provas necessários para realização dos ensaios mecânicos e metalográficos.

3.1 – AS PROPRIEDADES DO METAL BASE E DO METAL DE ADIÇÃO.

Foram retiradas amostras A e B das barras de aço CA-50 para serem analisadas pela Precicast, em São José/SC. Para a preparação das amostras fez-se necessário um preparo adequado das mesmas, faceando as superfícies a serem analisadas, através de um torno mecânico. As análises químicas das amostras A e B foram feitas pelo método de espectrometria de emissão atômica, e suas respectivas composições químicas estão relacionadas na tabela 3.1.1 a seguir.

Tabela 3.1.1 - Composição Química

ELEMENTOS	AMOSTRA A (%)	AMOSTRA B (%)
C	0,214	0,265
Si	0,198	0,133
Mn	0,768	0,718
P	0,0226	0,0419
S	0,0307	0,0338
Cr	0,0156	0,1295
Mo	0,0141	0,0414
Ni	-	0,0683
Al	-	-
Ti	-	-
Cu	0,0153	0,155
Nb	0,0069	0,0083
V	0,0019	-
Sn	-	0,0207
Fe	98,71	98,39

Fonte: Precicast

Quanto às propriedades mecânicas das barras nervuradas de aço CA-50, estas foram submetidas ao ensaio de tração conforme normas NBR 8548 [2] e NBR ISO

6892 [7], utilizando uma máquina de tração universal com capacidade de 100 toneladas, como visto na figura 3.1.1 abaixo.



Figura 3.1.1 – Máquina de Tração Universal.

As propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração devem satisfazer os valores estabelecidos na tabela 2.1.1 do anexo B da norma NBR 7840 [4].

Apesar das normas NBR 8548 [2] e NBR ISO 6892 [7] não preverem a determinação do limite de escoamento (LE) e do alongamento para barras de aço com emenda mecânica ou por solda, é necessário obtê-lo para compará-lo com o valor do limite de escoamento e do alongamento do seu metal base. Para determinação destas referidas propriedades mecânicas, o método empregado é através do uso do extensômetro acoplado na junta soldada (vide figura 3.1.2), a fim de se obter o valor do limite de escoamento e o gráfico da curva carga versus deslocamento.

É importante ressaltar que não existe consenso quanto ao valor mínimo estabelecido para efeito de aprovação do LE obtido através do ensaio de tração. Pode-se sempre questionar a qualidade da junta soldada quando o seu LE decresce mas permanece acima do valor mínimo de 500 MPa estipulado pela norma NBR 7840 [4].



Fig. 3.1.2 - Detalhe do extensômetro acoplado na barra identificada como "Lado B" para determinação do limite de escoamento

A primeira consideração para selecionar um metal de adição é que este não deve ter limite de resistência à tração inferior ao do metal base. A tabela 4.4.1, vista na seção 4.1, mostra que os limites de resistência a tração do aço das amostras A e B foram respectivamente 675 e 773 MPa. Evidentemente os eletrodos das séries E-100XX e E-110XX se aproximam desta condição pré-estabelecida pois seus valores mínimos relativos ao limite de resistência a tração são respectivamente 704 e 774 MPa. Por conseguinte, todos os corpos de prova das barras de aço CA-50 com diâmetro de 32mm foram soldados com o eletrodo revestido AWS E-11018-M ($L_R = 774$ MPa) na bitola de 3,25mm, por ajuste dos dados recomendados pelo fabricante do vergalhão, como visto na tabela 3.1.2 de sua procedência [9].

Tabela 3.1.2 - Bitola do vergalhão x Diâmetro do eletrodo

Bitola (mm)	Tipo de Passe	Diâmetro do Eletrodo (mm)
6,3	Único	2,00
8,0	Único	2,00
10,0	Único	2,50
12,5	Raiz	2,50
	Acabamento	2,50
16,0	Raiz	2,50
	Acabamento	3,25
20,0	Raiz	2,50
	Acabamento	3,25
25,0	Raiz	3,25
	Acabamento	4,00

A composição do metal depositado do eletrodo AWS E 11018-M conforme seu fabricante, possui a seguinte análise química:

C	-	0,10 %	Ni	-	1,25 – 2,50 %
Si	-	0,60 %	Cr	-	0,40 %
Mn	-	1,30 – 1,80 %	Mo	-	0,25 – 0,50 %

Outra informação importante dada pelo fabricante é que o tipo de corrente é CC(+) e deve soldar conforme a instrução da Tabela 3.1.3.

Tabela 3.1.3 - Indicação da corrente x Ø do eletrodo

Ø Eletrodo (mm)	3,25	4	5	8
Corrente (Amperes)	100 - 130	130 - 170	170 - 230	230 - 300

O eletrodo AWS E-11018-M possui revestimento básico. Os eletrodos deste tipo têm um revestimento contendo quantidades importantes de carbonato de cálcio e/ou outros carbonatos básicos e fluorita. Possuem escória pouco abundante e compacta.

Estes eletrodos são higroscópicos, portanto é preciso estocá-los em locais secos, a fim de evitar ocorrência de porosidades no cordão. Caso eles já tenham absorvido umidade, é preciso secá-los, antes do emprego, seguindo as instruções dadas pelo fabricante. Quando eles estão bem secos, o depósito da solda tem baixo teor de hidrogênio e a fissuração sob cordão não deve ser temida, quando se solda aços susceptíveis de apresentarem endurecimento na zona afetada pelo calor – ZAC.

3.2 – PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS MECÂNICOS DAS EMENDAS SOLDADAS COM E SEM PASSE DE REVENIMENTO.

Para soldar os corpos de prova foi utilizada uma retificadora de solda mod. Super Bantan 402 DC da ESAB que possui uma corrente nominal de 180A para um fator de trabalho de 100%, tendo capacidade de corrente máxima de 400A. Sua tensão em vazio é 78,5V, podendo atingir uma potência aparente nominal de 27,5 kVA.

Os corpos de prova das amostras A e B foram então elaborados com os seguintes parâmetros de soldagem:

Tensão do arco $U = 26$ volts

Corrente $I = 120$ amperes

Velocidade de soldagem $V_s = 7$ cm/min.

Rendimento térmico $\eta = 0,75$

Logo, o aporte térmico utilizado possui o seguinte valor:

$$E = \frac{\eta \times 0,06 \times U \times I}{V_s} = \frac{0,75 \times 0,06 \times 26 \times 120}{7} \approx \mathbf{20 \text{ kJ/cm}}$$

Foram planejados dez CP's de juntas soldadas segundo a tabela 3.2.1.

Tabela 3.2.1 - Planejamento dos corpos de prova das amostras A e B para ensaio de tração

CP	IDENTIFICAÇÃO DOS CP's	APORTE TÉRMICO kJ/cm	OBSERVAÇÃO
1	Amostra A Metal base	-	Temperatura Ambiente
2	Amostra B Metal base	-	Temperatura Ambiente
3	Amostra A com passe de revenido	20	Sem pré-aquecimento
4	Amostra A sem passe de revenido	20	Sem pré-aquecimento
5	Amostra B com passe de revenido	20	Sem pré-aquecimento
6	Amostra B sem passe de revenido	20	Sem pré-aquecimento
7	Amostra A com passe de revenido	20	Com pré-aqueci- mento de 150°C
8	Amostra A sem passe de revenido	20	Com pré-aqueci- mento de 150°C
9	Amostra B com passe de revenido	20	Com pré-aqueci- mento de 150°C
10	Amostra B sem passe de revenido	20	Com pré-aqueci- mento de 150°C

Todos os corpos de provas das barras nervuradas foram chanfrados em forma de um “tronco de cone” conforme a figura 3.2.1.



Figura 3.2.1 – Tipo de chanfro duplo V 60° radial.

Ao se utilizar da técnica do passe de revenimento, torna-se necessário realizar testes com cordões circunferenciais para estimar o posicionamento do referido passe nas uniões soldadas. Para verificar a temperabilidade e o risco de endurecimento excessivo recorre-se também aos testes com cordões longitudinais de simples deposição a fim de se comprovar a real necessidade do uso do passe de revenimento.

Tendo como objetivo o revenimento da ZTA-GG é importante definir a largura total da zona termicamente afetada (LTzta), a largura da ZTA (Lzta) e outras dimensões características da geometria do cordão (vide figura 3.2.2), tais como a penetração (Pe) e o reforço da solda (R). Todas estas características sofrem variações em função do aumento do aporte térmico.

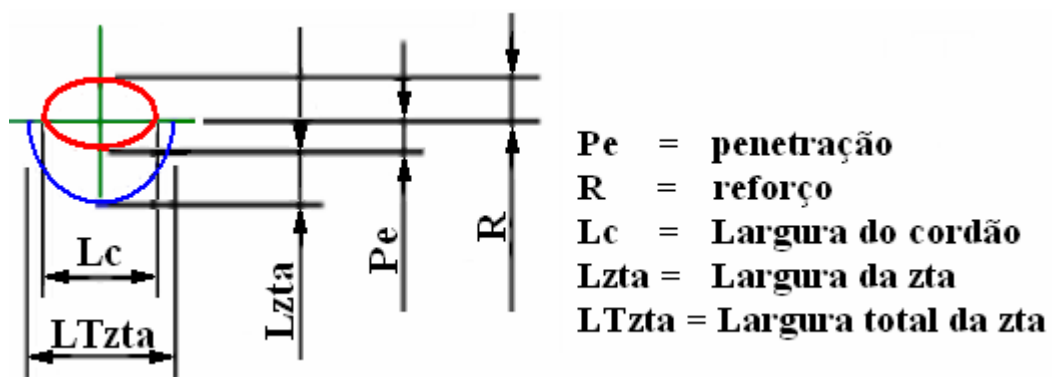


Figura 3.2.2 – Geometria de um cordão de solda típico .

Assim foram realizadas soldas circunferenciais por deposição manual, controlando a velocidade de soldagem mediante um dispositivo de rotação mostrado na fig. 3.2.3 , o qual consiste de um cabeçote de deslocamento linear que assegura as velocidades de rotações desejadas.

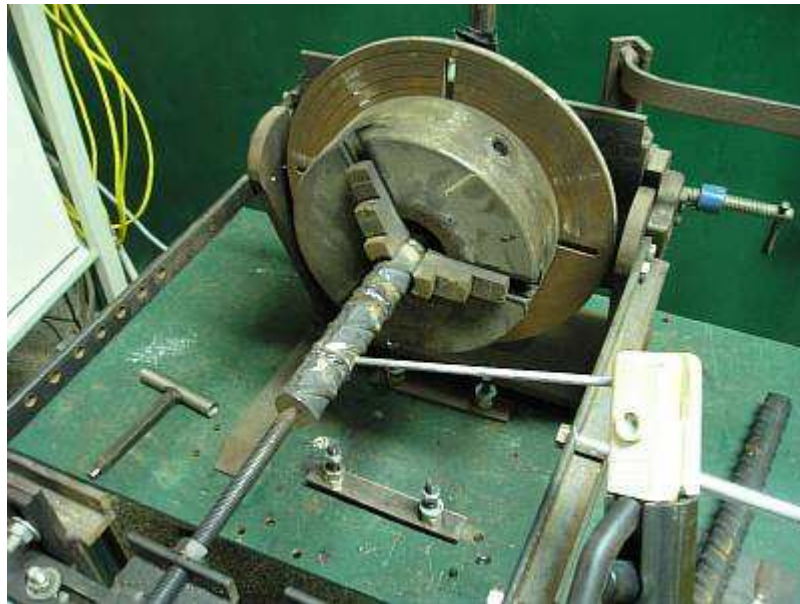


Figura 3.2.3 – Cabeçote de rotação utilizado na soldagem dos cordões circunferenciais

Foi utilizada uma fonte TEM DIGITEC 450, fabricada e desenvolvida na LABSOLDA/UFSC, que fornece corrente contínua (constante ou pulsada), 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 do processo e ajuste das variáveis. Esta fonte possui uma corrente nominal de 280A para um fator de trabalho de 100%, sendo que a capacidade de corrente máxima é de 450A. Sua tensão em vazio é de 64V, tendo como potência máxima 10kVA. A obtenção dos sinais de corrente e tensão é feita através de porta paralela do computador com os programas OSCILOS e SMGPRO (vide figura 3.2.4).



Fig.3.2.4–Bancada do Labsolda/ UFSC para soldagem dos cordões circunferenciais.

Dois cordões de soldas foram efetuados e mediante o software OSCILOS, foram ajustados os parâmetros de soldagem conforme apresentados na tabela 3.2.2.

Tabela 3.2.2 - Parâmetros de Soldagem ajustados

CORDÃO	U _{ef} (v)	I _{ef} (A)	Tempo Solda (s)	V _s (cm/min)	E (kJ/cm)	ØER (mm)	To (°C)
1	25	86	17	12	11	2,5	Tamb.
2	24	90	25	8	16	2,5	Tamb.

As metalografias dos cordões 1 e 2 foram elaboradas com o objetivo de se obter as características da geometria do cordão em função dos aportes térmicos utilizados e assim estimar o posicionamento do passe de revenimento.

Os corpos de prova das amostras A e B com passe de revenimento foram preparados com 13 passes conforme figura 3.2.5a, onde os passes 10, 12 e 11,13 foram os últimos executados e portanto considerados passes de revenimento. O posicionamento destes é determinado pelo valor “x”, distância obtida, por exemplo, entre a linha de fusão do cordão 10 ao pé do cordão 6. Os corpos de prova das amostras A e B sem passe de revenimento foram preparados na seqüência de 11 passes conforme a figura 3.2.5b abaixo.

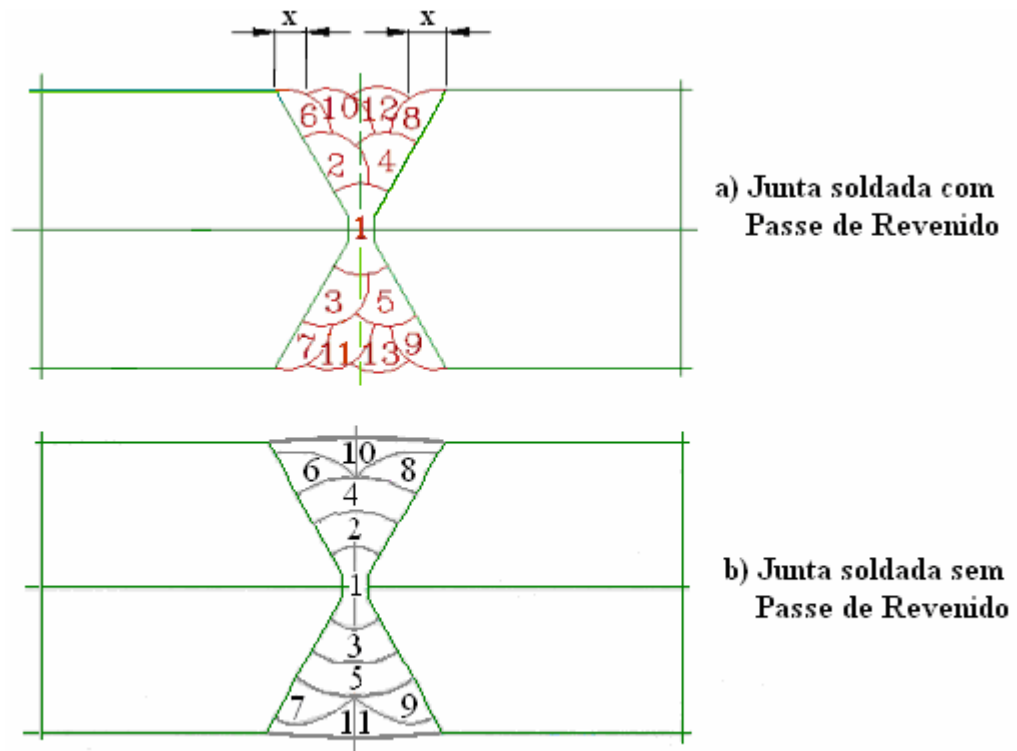


Figura 3.2.5- Disposição dos Cordões Com e Sem Passe de Revenimento.

Posteriormente foram feitos testes com cordões longitudinais depositados sob diferentes aportes térmicos nos aços CA-50 das amostras A e B, com o objetivo de verificar num ensaio direto de soldagem a temperabilidade e os riscos de endurecimento excessivo no estado como-soldado.

Inicialmente foram preparados os corpos de prova removendo a camada superficial dos vergalhões para posterior deposição dos cordões longitudinais (Ver fig. 3.2.6).



Figura 3.2.6 – Corpos de Prova com Cordões Longitudinais.

Depois de efetuado este procedimento foi feito pré-aquecimento dos corpos de prova em forno elétrico até 200°C, visando assim, atingir o patamar da temperatura de 150°C no momento de efetuar as soldas.

A seqüência de deposição apresentada na tabela 3.2.3, é a seguinte: inicialmente, foram depositados os cordões de solda com aporte térmico de 5 kJ/cm sem pré-aquecimento, depois foram efetuados os cordões de 10 kJ/cm também sem pré-aquecimento e por último foram depositados os cordões de 10 kJ/cm com pré-aquecimento de 150°C. Após cada deposição de um cordão, se deixou resfriar o corpo de prova durante 60 segundos aproximadamente, sendo esfriados posteriormente por imersão em água até atingir a temperatura ambiente.

Tabela 3.2.3 - Parâmetros de soldagens dos cordões de solda longitudinais

Vergalhão CA-50	Uef (V)	Ief (A)	Vs (cm/min)	Aporte (kJ/cm)	Ø (mm)	To (°C)
Amostra A	23,2	54	14,2	5,3	2,0	T.amb.
	22,3	108	14,2	10,2	2,5	T.amb.
	23,8	106	14,2	10,7	2,5	150
Amostra B	23,6	54	14,2	5,4	2,0	T.amb.
	24,0	106	14,2	10,7	2,5	T.amb.
	23,9	106	14,2	10,7	2,5	150

Em seguida foi medida a dureza máxima na ZAC em 4 cortes transversais para os aportes térmicos 5kJ/cm, 10kJ/cm e 10kJ/cm com pré-aquecimento. Com essas medidas de dureza obtidas será possível revisar a tabela 3.2.1 para comprovar a necessidade do uso do passe de revenimento nas condições planejadas.

Para soldar as partes das barras nervuradas centradas, ou seja, com a mesma linha de centro, foi necessário utilizar uma cantoneira de aço carbono ASTM A-36 com dimensão L 2" x 2" x 5/16" como dispositivo facilitador da soldagem.

Esta cantoneira pode ser considerada como um dispositivo de soldagem tipo livre, cuja função é apenas posicionar corretamente as partes a serem emendadas (Ver figuras 3.2.7 e 3.2.8).

**Figura 3.2.7 – Cantoneira utilizada como Dispositivo de Soldagem.**



Fig.3.2.8- Soldagem dos Corpos de Prova das Barras Nervuradas de Aço CA-50.

Elegendo então a barra nervurada da amostra A, foram planejados dois corpos de prova de juntas soldadas para serem submetidas ao ensaio de dobramento conforme a tabela 3.2.6.

Tabela 3.2.4 - Planejamento dos CP's da Amostra A para ensaio de dobramento

CP	IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	CHANFRO	APORTE TÉRMICO kJ/cm	OBSERVAÇÃO
1	AMOSTRA A COM PASSE DE REVENIDO	DUPLO V 60°	20	SEM PRÉ-AQUEC.
2	AMOSTRA A SEM PASSE DE REVENIDO	DUPLO V 60°	20	SEM PRÉ-AQUEC.

O ensaio de dobramento tem como objetivo verificar a ductilidade dos corpos de prova a serem ensaiados. Porém, como citado anteriormente na seção 2.1.6, o

ensaio de dobramento semi-guiado da norma NBR 6153 [8] refere-se apenas a barra nervurada sem emenda soldada. Todavia a execução do referido ensaio nas juntas soldadas é de prática comum para verificação de trincas ou quebras na região dobrada.

Esquema de Dobramento em Laboratório

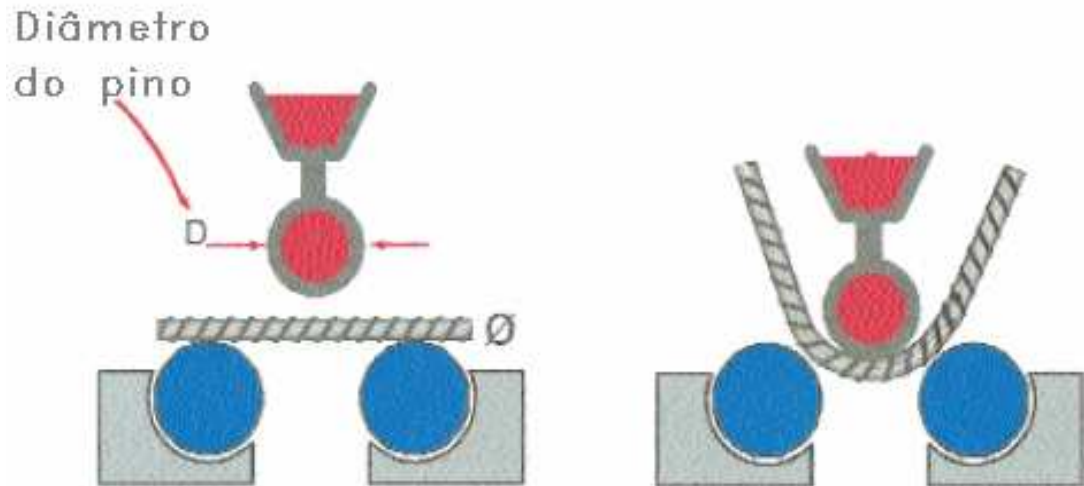


Figura 3.2.9 – Etapas do Ensaio de Dobramento a 180° [9].

O ensaio de dobramento a 180° apresentado esquematicamente na figura 3.2.9 se utiliza de pinos com diâmetros estabelecidos pela tabela 2 do anexo B da norma NBR 7480 [4] (vide seção 2.1.1). Logo, a barra nervurada de aço CA-50 de Ø 32 mm deve ser dobrada sobre pino com diâmetro oito vezes o diâmetro nominal da barra, ou seja, utilizando um pino cujo diâmetro é de Ø 256 mm.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1-CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE CA-50 DAS AMOSTRAS A e B

Para confirmar que os vergalhões de aço CA-50 das amostras A e B possuem uma camada superficial endurecida de martensita revenida e um núcleo dúctil, foram realizadas macrografias e levantados os perfis de dureza da seção transversal das barras nervuradas de cada amostra, apresentados a seguir nas figuras 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3, 4.1.4.

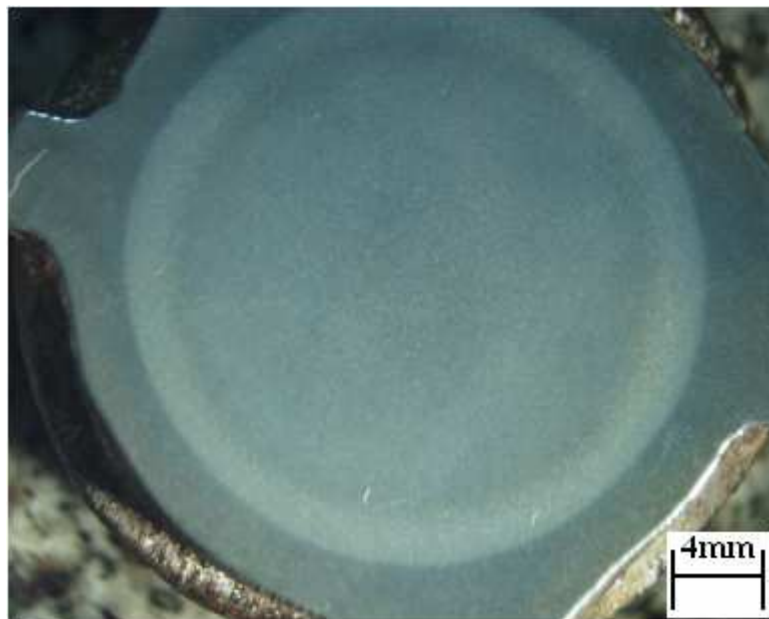


Figura 4.1.1 - Macrografia da Barra Nervurada CA-50 da Amostra A.

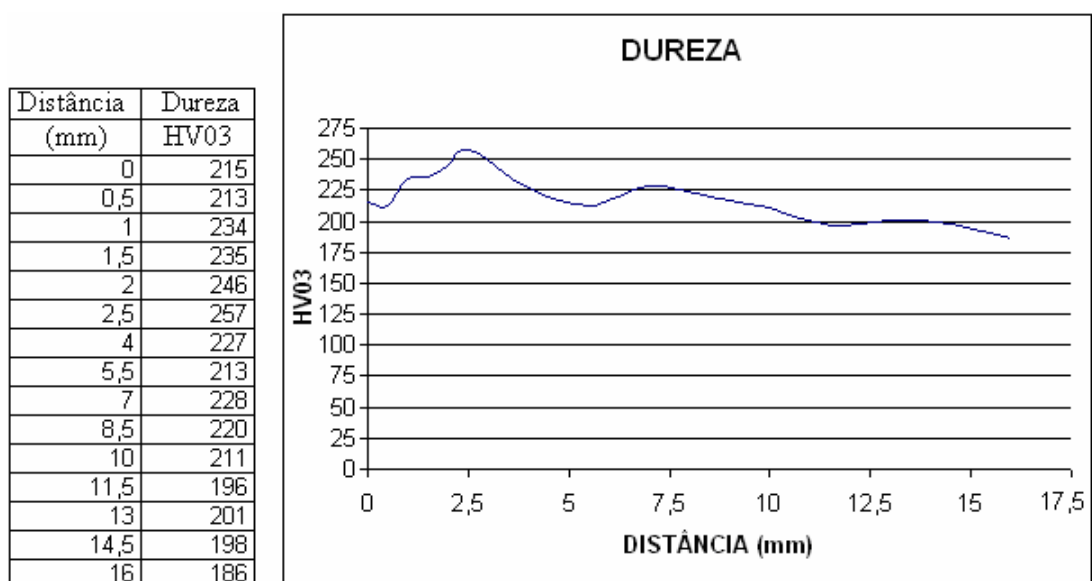


Figura 4.1.2- Perfil de dureza medido da superfície ao centro da barra nervurada CA-50 da amostra A.

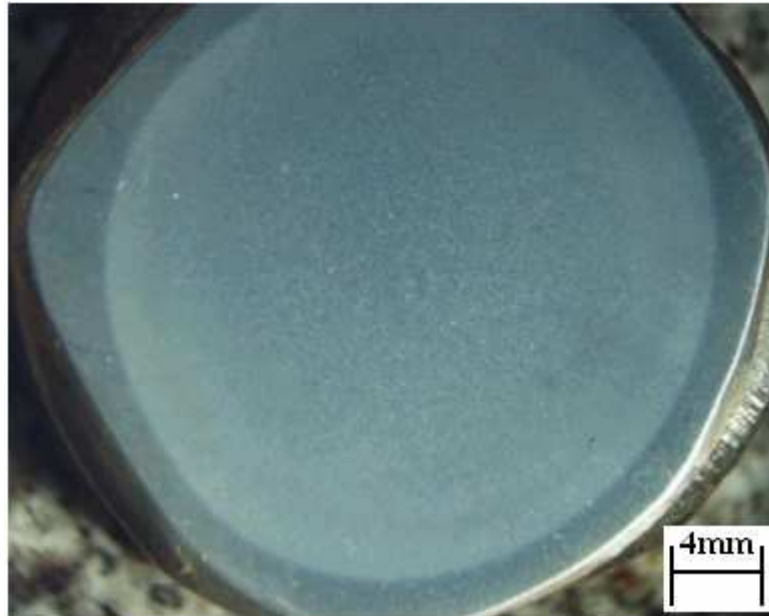


Figura 4.1.3 - Macrografia da Barra nervurada CA-50 da Amostra B.

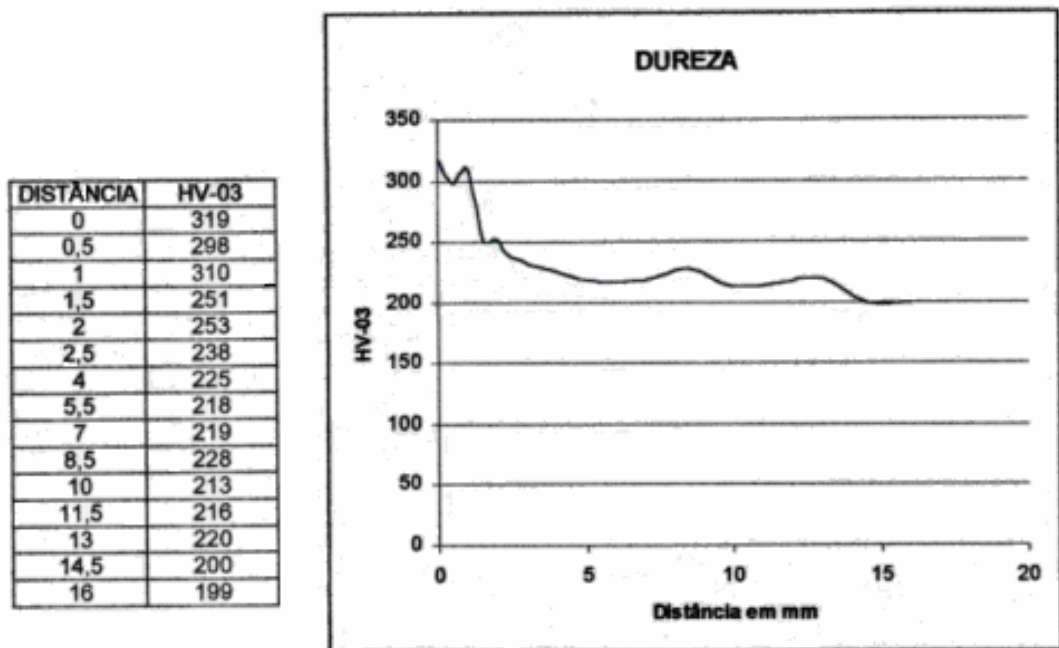
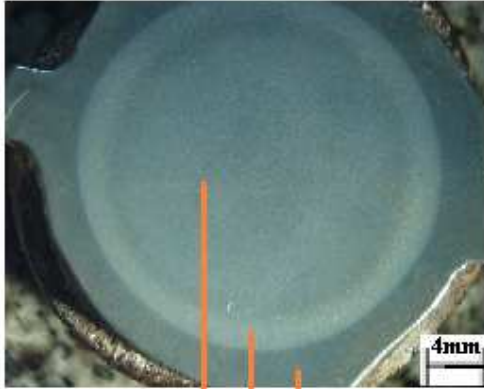


Figura 4.1.4 - Perfil de dureza medido da superfície do centro da barra Nervurada CA-50 da Amostra B.

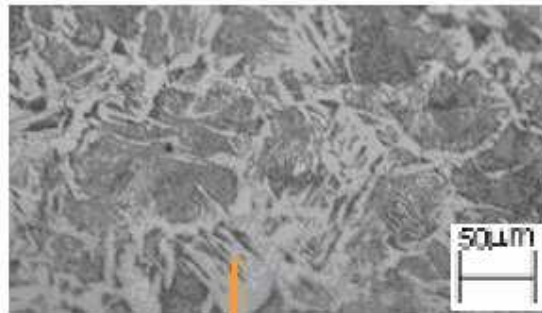
Note que em ambas macrografias existe uma coroa circular característica da camada superficial endurecida devido ao tratamento térmico produzido pelo resfriamento controlado nos processos de fabricação das barras nervuradas das amostras A e B.

Os vergalhões CA-50 das amostras A e B foram submetidos à análise metalográfica cujos resultados são apresentados nas figuras 4.1.5 e 4.1.6 respectivamente, a seguir:

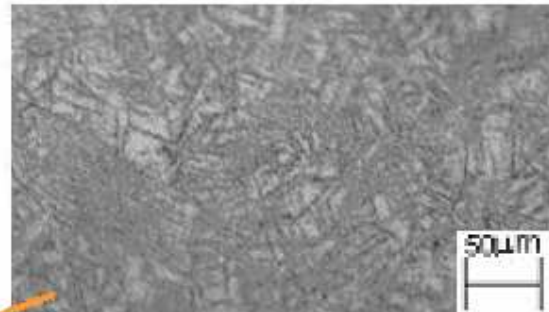
a) Macrografia do vergalhão com diferentes zonas de resfriamento.



b) Microestrutura composta de ferrita e perlita. Dureza = 198 HV.



c) Microestrutura composta de ferrita, perlita e bainita. Dureza = 227 HV.



d) Microestrutura composta de bainita e martensita revenida. Dureza = 257 HV.

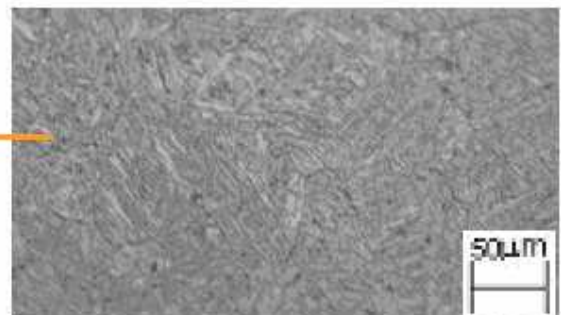
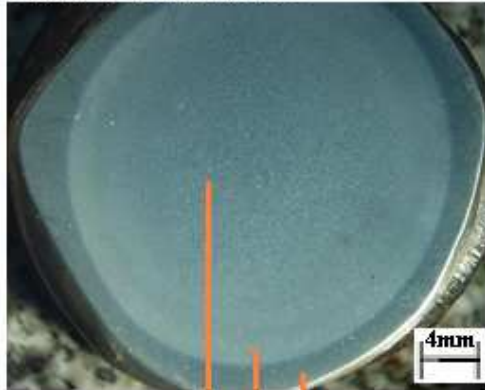


Figura 4.1.5 - Micrografia da seção transversal do aço CA-50 da Amostra A.
a) Macrografia b) Região central c) Região intermediária d) Região periférica.

a) Macrografia do vergalhão com diferentes zonas de resfriamento.



b) Microestrutura composta de ferrita e perlita. Dureza = 199 HV.



c) Microestrutura composta de ferrita, perlita e bainita. Dureza = 219HV.



d) Microestrutura composta de bainita e martensita revenida. Dureza = 319 HV.



Figura 4.1.6 - Micrografia da seção transversal do aço CA-50 da Amostra B.
a)Macrografia b)Região central c)Região intermediária d)Região periférica.

Analisando os constituintes micrográficos da seção transversal do aço CA-50 da amostra A, pode-se comprovar a existência de três regiões bem distintas. Na região central, a figura **4.1.5b** mostra grãos contendo ferrita e perlita com dureza em torno de 198 HV. A região intermediária (figura **4.1.5c**) caracteriza-se por uma estrutura composta de ferrita, perlita e bainita, com uma dureza aproximada de 227 HV. A camada periférica (figura **4.1.5d**) possui uma microestrutura composta de bainita e martensita revenida com dureza máxima de 257 HV, apresentando pequena fração de ferrita e perlita, se comparada com a microestrutura da região central.

A martensita surge na região periférica ocasionada pelo rápido resfriamento d'água nas barras nervuradas durante o término de sua fabricação. O calor residual do núcleo, reaquece esta camada superficial endurecida, transformando-a em martensita revenida após os vergalhões serem resfriados ao ar, enquanto que se obtém uma microestrutura de ferrita-perlita na região central. A martensita revenida apresenta excelente resistência mecânica, proporcionando elevado limite de escoamento ($LE_{MÍN.} = 500\text{MPa}$) ao passo que a microestrutura ferrita-perlita confere ao seu núcleo alta ductilidade.

Apesar da curva de resfriamento contínuo da figura 2.8.1 não ser específica do aço CA-50, Ribeiro [19] utiliza o referido diagrama para justificar a presença dos constituintes micrográficos ferrita, perlita, bainita e martensita na camada superficial do vergalhão CA-50. Considerando que a dureza máxima medida na camada superficial da barra CA-50 da amostra A é 257 HV (vide figura 4.1.2) e observando o ciclo térmico similar ao da linha relativa à dureza de 255 HV evidenciada na cor vermelha na figura 2.8.1, pode-se verificar que próximo de 675°C , a austenita começa a se transformar em ferrita. A transformação progride gradualmente e na temperatura em torno de 600°C a transformação da ferrita termina iniciando a formação da perlita até a temperatura próxima de 525°C . Neste instante inicia-se a formação da bainita até a temperatura de início de formação da martensita (M_s) estimada pelo diagrama em torno de 380°C . É importante ressaltar que o ciclo térmico referente à região central, isenta de grãos de martensita pode ser justificado também com o auxílio da referida curva de resfriamento contínuo, tomando como base a linha relativa à dureza de 195 HV, evidenciada na cor azul na figura 2.8.1. Devido ao tempo de resfriamento ser maior, a microestrutura do núcleo é totalmente ferrita-perlita, possuindo característica de elevada ductilidade.

4.2- RESULTADOS DOS TESTES COM CORDÕES CIRCUNFERENCIAIS PARA ESTIMAR O PASSE DE REVENIMENTO

As macrografias dos cordões circunferenciais 1 e 2 com aporte térmico de 11 e 16 kJ/cm (vide tabela 3.2.2), depositados manualmente, com velocidade de rotação controlado pelo cabeçote de deslocamento linear (vide figura 3.2.3), são apresentadas a seguir nas figuras 4.2.1 e 4.2.2.

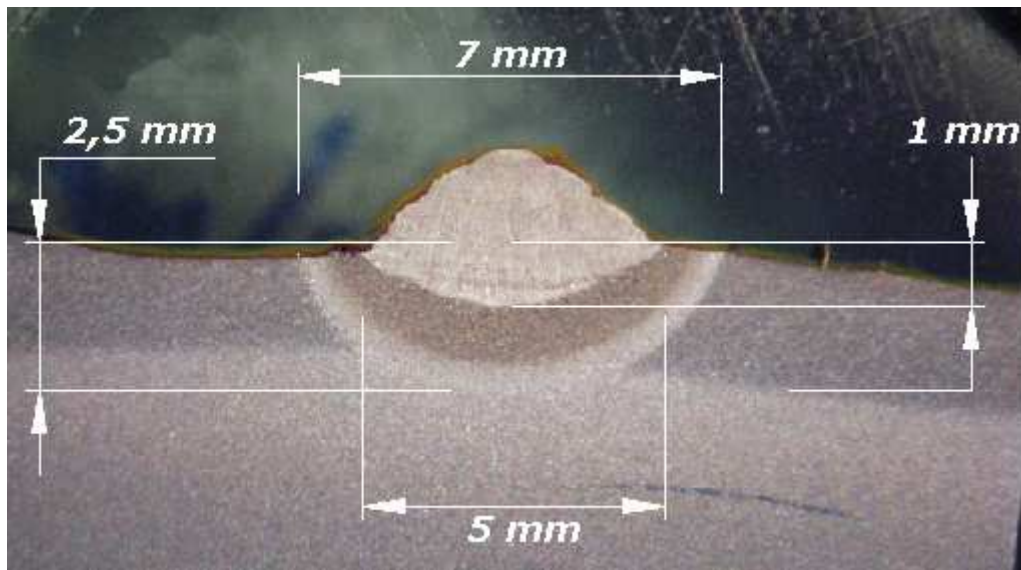


Fig. 4.2.1 – Geometria do Cordão Circunferencial para o Aporte de 11 kJ/cm.

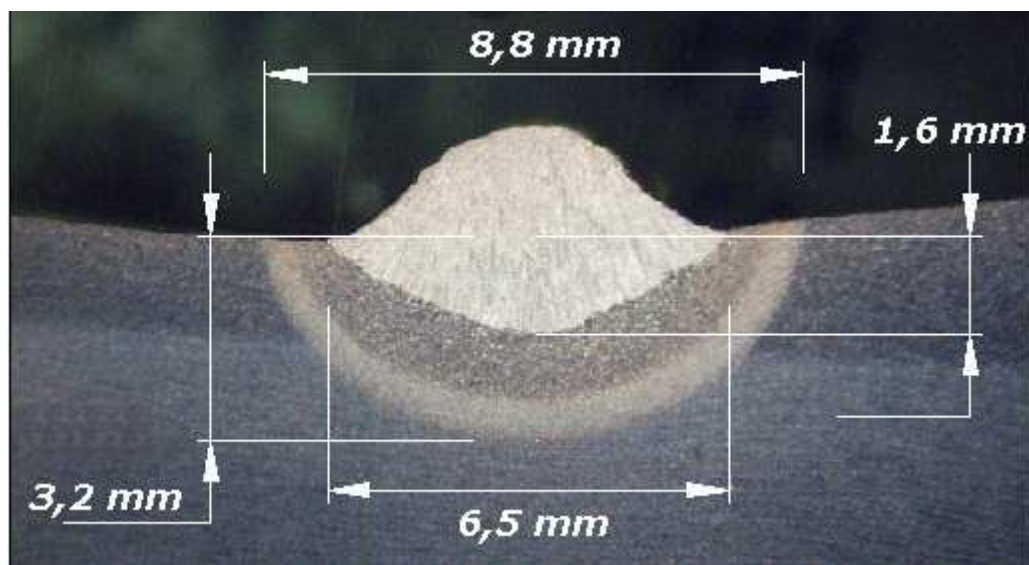


Fig. 4.2.2 – Geometria do Cordão Circunferencial para o Aporte de 16 kJ/cm.

Sabendo-se que as características geométricas do cordão de solda variam proporcionalmente com o aporte térmico, podemos estimar a distancia “x” entre a isotérmica Ac1 do passe de revenido e a linha de fusão do passe a revenir como sendo 1,3 mm (vide figura 4.2.3).

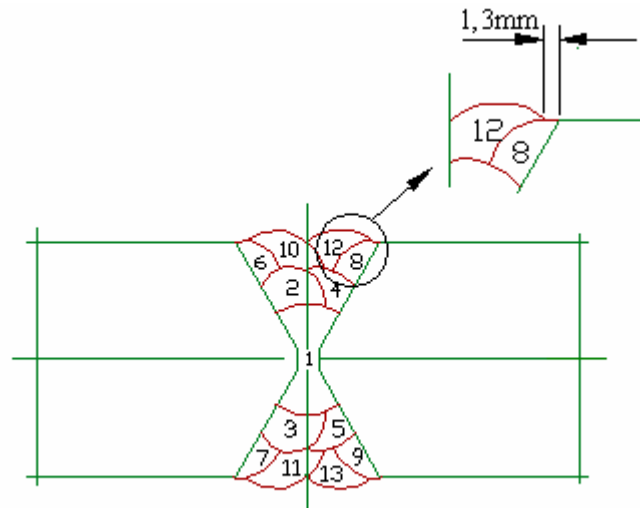


Figura 4.2.3 - Posicionamento do Passe de Revenimento.

É importante destacar que Niño [11] menciona que diversos autores, tais como Olsen e Kiefer, alertam a dificuldade em posicionar o passe de revenimento dentro dos limites de tolerância muito estreitos, de alguns décimos de milímetros. Questionam a efetividade de se usar a técnica na soldagem manual, sugerindo que tais tolerâncias poderiam ser conseguidas com melhor êxito na soldagem automatizada pois a experiência tem mostrado que a localização do passe de revenido em soldagens em campo é difícil de controlar.

Durante a preparação dos corpos de provas realizada com passe de revenimento, estas dificuldades acima mencionadas foram encontradas, principalmente devido à luminosidade do arco elétrico que prejudica o posicionamento correto do passe de revenimento.

4.3 – RESULTADOS DOS TESTES COM CORDÕES LONGITUDINAIS DE SIMPLES DEPOSIÇÃO

Para avaliar a temperabilidade e o risco de se formar trincas a frio, foram feitos testes com cordões longitudinais depositados sob diferentes aportes térmicos (vide tabela 3.2.3). Posteriormente foi medida a dureza máxima na ZAC em 4 cortes

transversais para os aportes térmicos de 5 kJ/cm, 10 kJ/cm e 10 kJ/cm com pré-aquecimento de 150 °C. Os resultados estão indicados nas tabelas 4.3.1 e 4.3.2 respectivamente para as amostras A e B.

Tabela 4.3.1 - Medidas de dureza máxima na ZAC no CP da Amostra A

CA - 50 da Amostra A			
DUREZA MÁXIMA na ZAC			
Nº	5kJ/cm	10kJ/cm	10kJ/cm (pré-aquec.)
1	326	258	234
2	376	239	235
3	345	178	246
4	351	226	230

Tabela 4.3.2 - Medidas de dureza máxima na ZAC no CP da Amostra B

CA - 50 da Amostra B			
DUREZA MÁXIMA na ZAC			
Nº.	5kJ/cm	10kJ/cm	10kJ/cm (pré-aquec.)
1	479	407	234
2	463	429	245
3	412	421	275
4	475	419	265

Observando a tabela 4.3.2 da amostra B pode-se concluir que este material (com maior carbono equivalente) possui valores de dureza elevados, ou seja, acima de 460 HV para o baixo aporte de 5 kJ/cm e para o aporte térmico de 10 kJ/cm, seus valores de dureza estariam em torno de 420 HV. Logo, para os aportes térmicos de 5 kJ/cm e 10 kJ/cm, as suas respectivas durezas estariam acima de 350 HV, justificando

assim o uso do passe de revenimento. Já para o aporte térmico de 10 kJ/cm com pré-aquecimento de 150°C, o passe de revenimento não se torna necessário pois as durezas encontradas estão em torno de 235 HV (abaixo de 350 HV não há risco de trincas a frio).

Calculando o carbono equivalente (CE_{IIW}) pela fórmula do Instituto Internacional de Soldagem – IIW, obtêm-se os seguintes resultados:

Para a amostra A - $CE_{IIW} = 0,35$

Para a amostra B - $CE_{IIW} = 0,43$

Os valores acima do Carbono Equivalente (CE_{IIW}) indicam que a temperabilidade do aço CA-50 da amostra B é mais acentuada se comparada com o CA-50 da amostra A. Por conseguinte, as durezas máximas da tabela 4.3.2 (Amostra B) são mais altas do que as da tabela 4.3.1 (Amostra.A), justificando que a soldabilidade do aço CA-50 da amostra A é maior que a da amostra B. A pior qualidade do aço deste último também se pode ser avaliada devido à presença constante de inclusões que foram deformadas pelo processo de conformação do vergalhão da amostra B, como é visto na micrografia da figura 4.3.1.

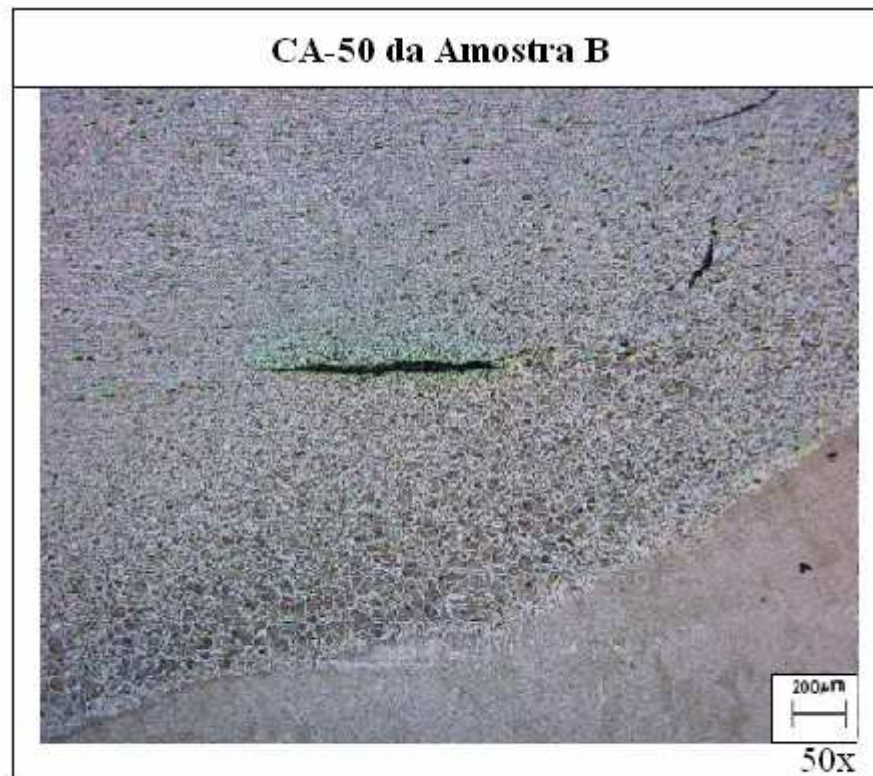


Figura 4.3.1 - Inclusão, no metal base do aço CA-50 da Amostra B, deformada pela laminação.

Quanto a tabela 4.3.1 da amostra A para o aporte térmico de 10 kJ/cm com ou sem pré-aquecimento de 150°C, não haveria também necessidade do uso do passe de revenimento pois todas as durezas medidas estão abaixo de 350 HV. Para o baixo aporte térmico de 5 kJ/cm encontram-se apenas os valores de 372 HV (próximo de 350 HV) o que permite considerar uma condição próxima do limite superior de boa soldabilidade, que previne trincas a frio.

É importante ressaltar que a solda dos corpos de prova tanto da amostra A assim como da amostra B foi feita com aporte térmico em torno de 20 kJ/cm. Isto permite prever que até para a amostra B não haverá necessidade do uso do passe de revenimento pois não se atingirá a dureza de 350 HV, devido a execução da soldagem com elevado aporte térmico de 20 kJ/cm. Tendo em vista o uso de eletrodos revestidos com diâmetro de 3,25 mm e aporte térmico de 20 kJ/cm, a tabela 3.2.1 relativa ao planejamento dos corpos de prova para o ensaio de tração foi revisada, suprimindo-se as amostras A e B soldadas com pré-aquecimento de 150°C. Assim os corpos de prova n.^{os} 7, 8, 9 e 10 da tabela 3.2.1 não foram preparados, sendo mantidos os corpos de prova das amostras A e B soldadas com passe de revenido, n.^{os} 3 e 5 respectivos, apenas para verificar o eventual efeito das macroestruturas nos resultados dos ensaios de tração e dobramento.

4.4- AVALIAÇÃO DE SOLDAS DE TOPO: TRAÇÃO, DOBRAMENTO E METALOGRAFIA

Os metais base das amostras A e B foram submetidos ao ensaio de tração no Laboratório Falcão Bauer, cujos resultados são apresentados na tabela 4.4.1.

Tabela 4.4.1 - Ensaio de tração das barras nervuradas CA-50 na bitola Ø 32 mm

CP	IDENTIFICAÇÃO DOS CP's	LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	ALONG. A ₁₀ (%)
*		500 MÍN.	550 MÍN.	8 MÍN.
1	Metal Base CA-50 Amostra A.	534	675	16,3
2	Metal Base CA-50 Amostra B	597	773	12,3

Fonte: L.A. Falcão Bauer

Valores estabelecidos pela Norma NBR 7840

Todos os resultados obtidos estão conforme a norma NBR 7840 [4], satisfazendo plenamente seus respectivos valores mínimos estabelecidos.

Quanto à execução do ensaio de tração conforme norma NBR ISO 6892 [7] nas amostras A e B soldadas, seus respectivos resultados são mostrados nas tabelas 4.4.2 e 4.4.3 a seguir.

Tabela 4.4.2 - Ensaio de tração das barras CA-50 soldadas da Amostra A na bitola Ø 32 mm

CP	IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	LOCAL DE RUPTURA
*	-	500MÍN.	-
3	Amostra A com passe de revenido	684	na solda
4	Amostra A sem passe de revenido	678	na solda

Fonte: L.A. Falcão Bauer

* Valor estabelecido pela Norma NBR 8548

Tabela 4.4.3 - Ensaio de tração das barras CA-50 soldadas da Amostra B na bitola Ø 32 mm

CP	IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	LIMITE DE RESISTÊNCIA (MPa)	LOCAL DE RUPTURA
*	-	550MÍN.	-
5	Amostra B com passe de revenido	616	na solda
6	Amostra B sem passe de revenido	684	na solda

Fonte: L.A. Falcão Bauer

* Valor estabelecido pela Norma NBR 8548

Apesar de todas as juntas soldadas, tanto da amostra A assim como da amostra B, submetidas ao ensaio de tração terem rompido na solda, os limites de resistência a tração são elevados se comparados com o valor estabelecido de 550 MPa. Portanto todos os resultados obtidos são considerados aprovados.

Para determinar o limite de escoamento (LE) e o alongamento (A_{10}) da barra de aço CA-50 soldada, foi preparada um corpo de prova da amostra A, especialmente para obter estas referidas propriedades mecânicas. Os resultados obtidos estão na

tabela 4.4.4 e no gráfico da curva carga versus deslocamento apresentado na figura 4.4.1 a seguir.

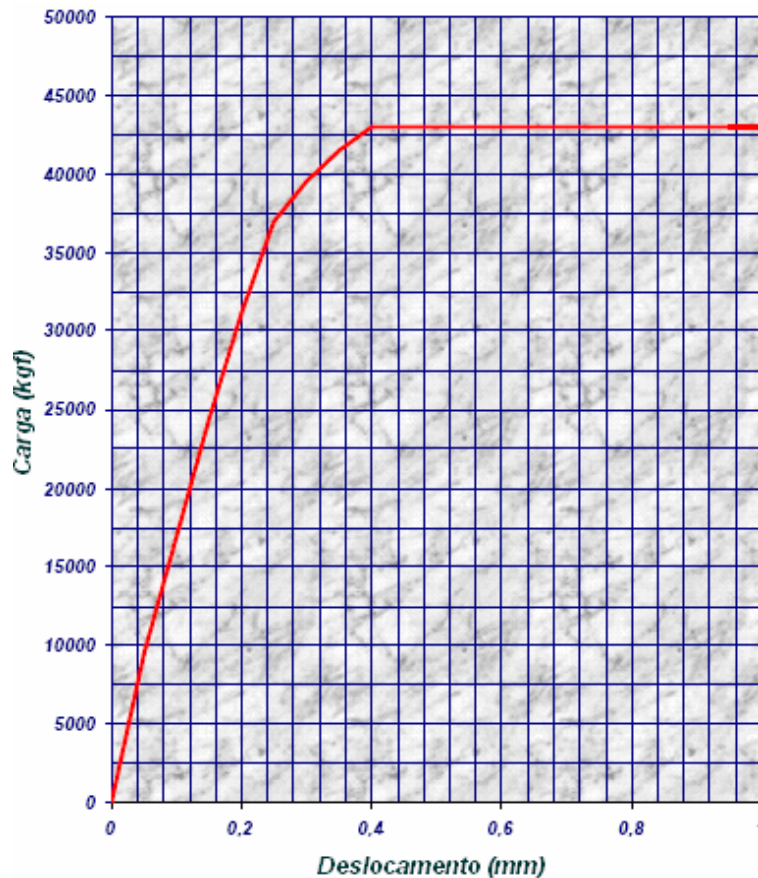


Figura 4.4.1 - Gráfico da curva Carga x Deslocamento

Tabela 4.4.4 - LE e Along. da barra CA-50 soldada da Amostra A

CP	LE (MPa)	LR (MPa)	ALONG. A ₁₀ (%)	DIST.DA FRATURA AO CENTRO DA SOLDA (mm)	LOCAL DE RUPTURA
*	500 MÍN.	550 MÍN.	-	-	-
1	535	678	18	363	Na barra (lado B)

Fonte: L.A. Falcão Bauer

* Valor estabelecido pela Norma NBR 7480

É interessante observar que os resultados obtidos do limite de escoamento do metal base do aço CA-50 e da junta soldada da amostra A são respectivamente 534 MPa (vide tabela 4.4.1) e 535 MPa (vide tabela 4.4.4), portanto pode-se considerar como ótimo resultado obtido.

Quanto ao alongamento, o metal base do CA-50 da amostra A apresentou um alongamento de 16,3 % (vide tabela 4.4.1) enquanto o valor da junta soldada foi de 18% (vide tabela 4.4.4). O resultado de 18% de alongamento demonstra ser uma

ótima medida de eficiência da junta soldada, mas não pode ser considerado como boa medida de ductilidade da solda. A solda realizada mostrou ter resistência mecânica maior que a do metal base pois a deformação se deu quase que totalmente nele, deixando a solda quase inalterada. Porém não se pode concluir através do alongamento como permaneceu a ductilidade da solda, sendo portanto necessárias análises micrográficas da região da ZAC – GG.

A figura 4.4.2 apresenta detalhe da região da fratura, sendo esta classificada como dúctil devido à elevada deformação plástica ocorrida durante o ensaio de tração.

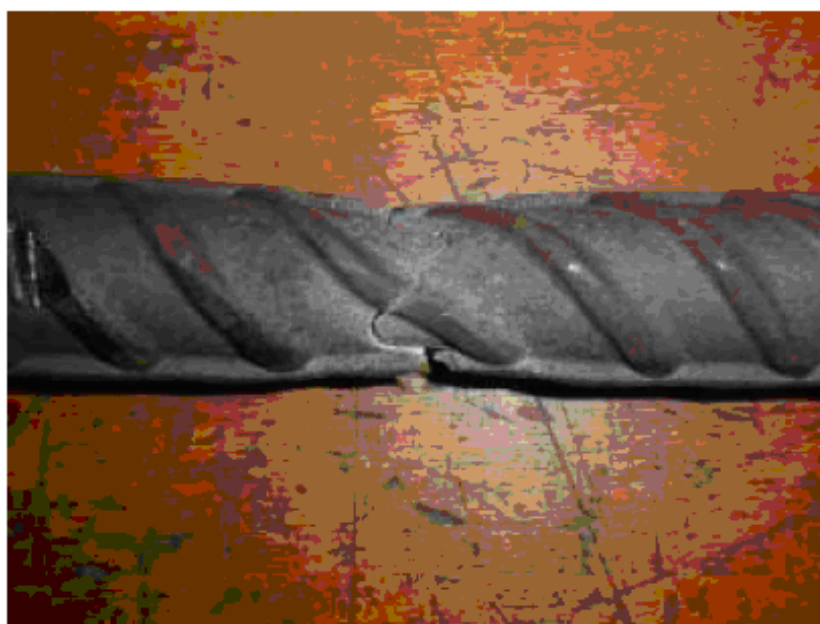


Figura 4.4.2 - Detalhe da região da fratura

Quanto ao ensaio de dobramento, este foi realizado nas juntas soldadas da amostra A, consideradas por terem o metal base mais dúctil do que do aço CA-50 da amostra B (vide tabela 4.4.1), cujos resultados obtidos pelo Laboratório de Análise Falcão Bauer são apresentados na tabela 4.4.5, a seguir:

Tabela 4.4.5 - Ensaio de dobramento das barras CA-50 soldadas da Amostra A na bitola Ø 32 mm

CP	IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	DIÂM. DO PINO (mm)	ÂNGULO DE RUPTURA DAS BARRAS	LOCAL DE RUPTURA
1	Amostra A com passe de revenido	256	144°	NA ZAC
2	Amostra A sem passe de revenido	256	131°	NA ZAC

Fonte: L.A. Falcão Bauer

Os corpos de prova são considerados como aprovados quando, após o dobramento de 180°, não apresentam rupturas ou trincas na região dobrada. Logo, os resultados dos ensaios de dobramento comprovam que a ductilidade dos corpos de prova foi afetada consideravelmente.

Ribeiro [19], no seu estudo da soldabilidade do aço CA-50, utilizando o processo MAG e corpos de prova usinados, obteve resultado semelhante, destacando que o decréscimo da ductilidade deve-se a transformação da martensita na ZTA-GG numa estrutura perlita-ferrítica de grãos grosseiros, associada com uma diminuição da dureza da estrutura martensita. Ribeiro [19] ressalta que tal fato se deu porque foi imposta uma alta energia de soldagem com velocidade de resfriamento lenta, devido à baixa perda de calor por condução através do vergalhão, o que impossibilitou a formação da martensita.

A utilização de corpos de prova usinados é questionada por alguns autores. Portanto, para o ensaio de tração ser considerado como representativo, tem que ser realizado em juntas soldadas equivalentes às barras nervuradas instaladas no concreto armado. Conseqüentemente corpos de prova usinados devem ser evitados, pois segundo Defourny e Bragards [20], quando estes são submetidos ao ensaio de tração, suas propriedades mecânicas obtidas podem divergir significativamente em relação aos corpos de prova sem usinagem.

Analisando a micrografia da ZAC junto ao pé do último cordão de solda no vergalhão CA-50 da Amostra B (vide figura 4.4.3 abaixo), e com medidas de dureza feitas no **metal base, na ZAC e na solda** (vide tabela 4.4.6 abaixo), pode-se verificar que houve variação de dureza na ZAC após a soldagem com aporte térmico elevado de 20kj/cm. A camada superficial do aço CA-50 da Amostra B tinha dureza acima de 300 HV (vide figura 4.1.4) devido à martensita revenida que se transformou em perlita/ferrita no ciclo térmico lento da solda reduzindo a dureza da ZAC para 211 HV.

Tabela 4.4.6 - Dureza em junta soldada de CA-50 da Amostra B.

LOCAL	DUREZA HV
Zona Fundida	272
ZAC	211
M.Base (periferia)	310

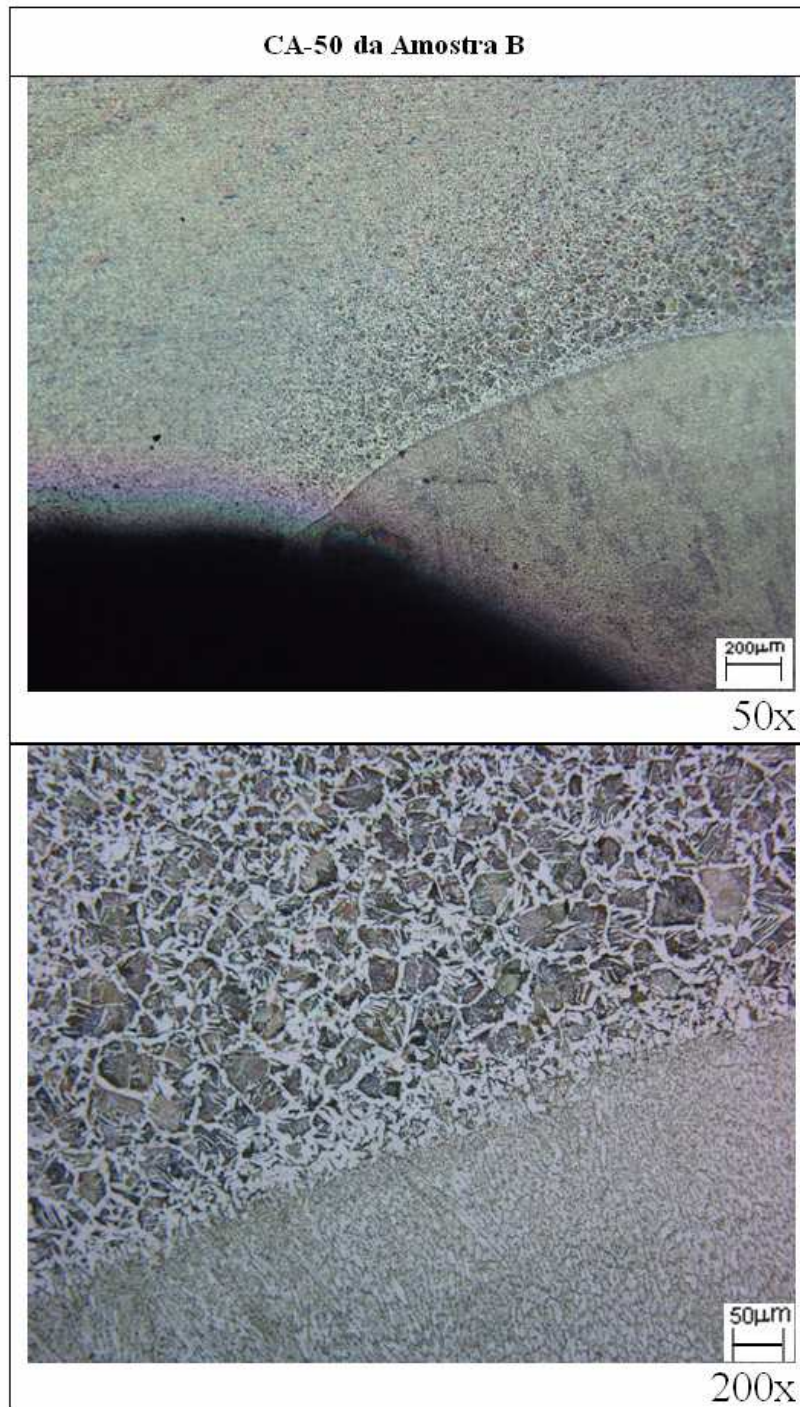


Figura 4.4.3 - Microestrutura da ZAC junto ao pé do último cordão de solda em CA-50 composta de grãos grosseiros contendo ferrita e perlita

Portanto, o aporte térmico de 20 kJ/cm considerado alto, acaba sendo prejudicial pois diminui a dureza na camada periférica, ocasiona queda da ductilidade da solda, e conseqüentemente ruptura na região submetida ao ensaio de dobramento.

A figura 4.4.4 abaixo indicada é similar à figura 4.3.4 da amostra B pois também apresenta o aspecto micrográfico próximo ao pé do último cordão de solda no aço CA-50 da amostra A. Sua microestrutura é portanto composta de grãos grosseiros contendo ferrita e perlita.

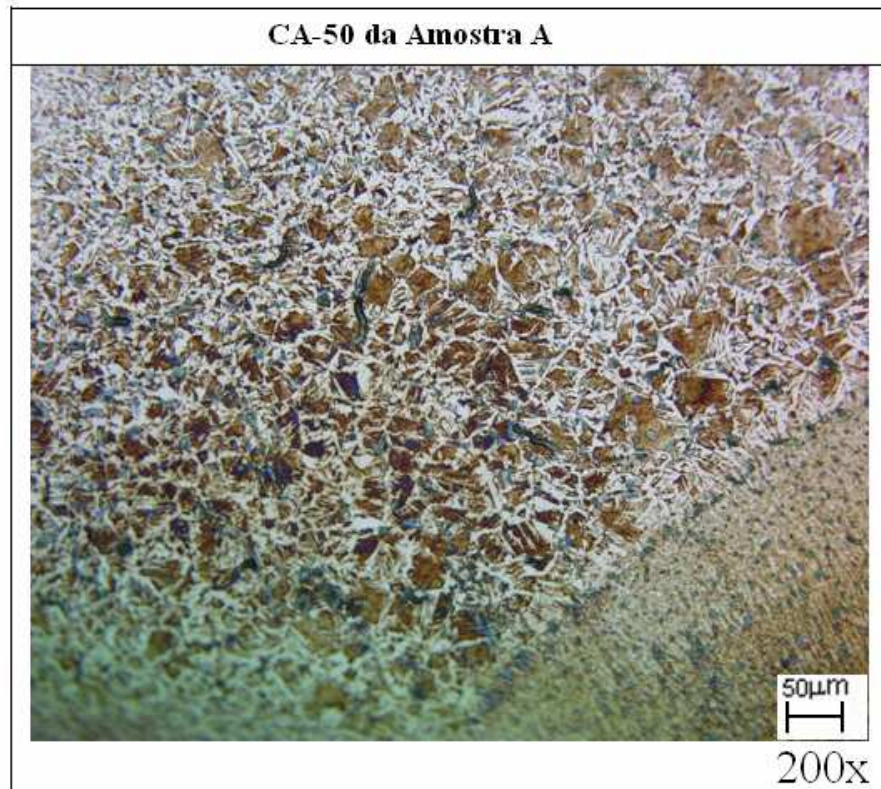


Figura 4.4.4 - Microestrutura da ZAC junto ao pé do último cordão de solda em CA-50 composta de grãos grosseiros contendo ferrita e perlita

Nas micrografias da figura 4.4.5 abaixo indicada, o aço CA-50 da amostra B, apresenta grãos grosseiros contendo ferrita e perlita na ZTA-GG na região central da junta soldada, com aspecto bastante similar ao obtido da ZAC próximo ao pé do último de cordão de solda, como visto na figura 4.4.3. Logo é correto afirmar que a ductilidade da junta soldada decresceu devido aos ciclos térmicos ocorridos durante a soldagem com aporte térmico elevado, modificando assim a microestrutura do metal base do aço CA-50 .

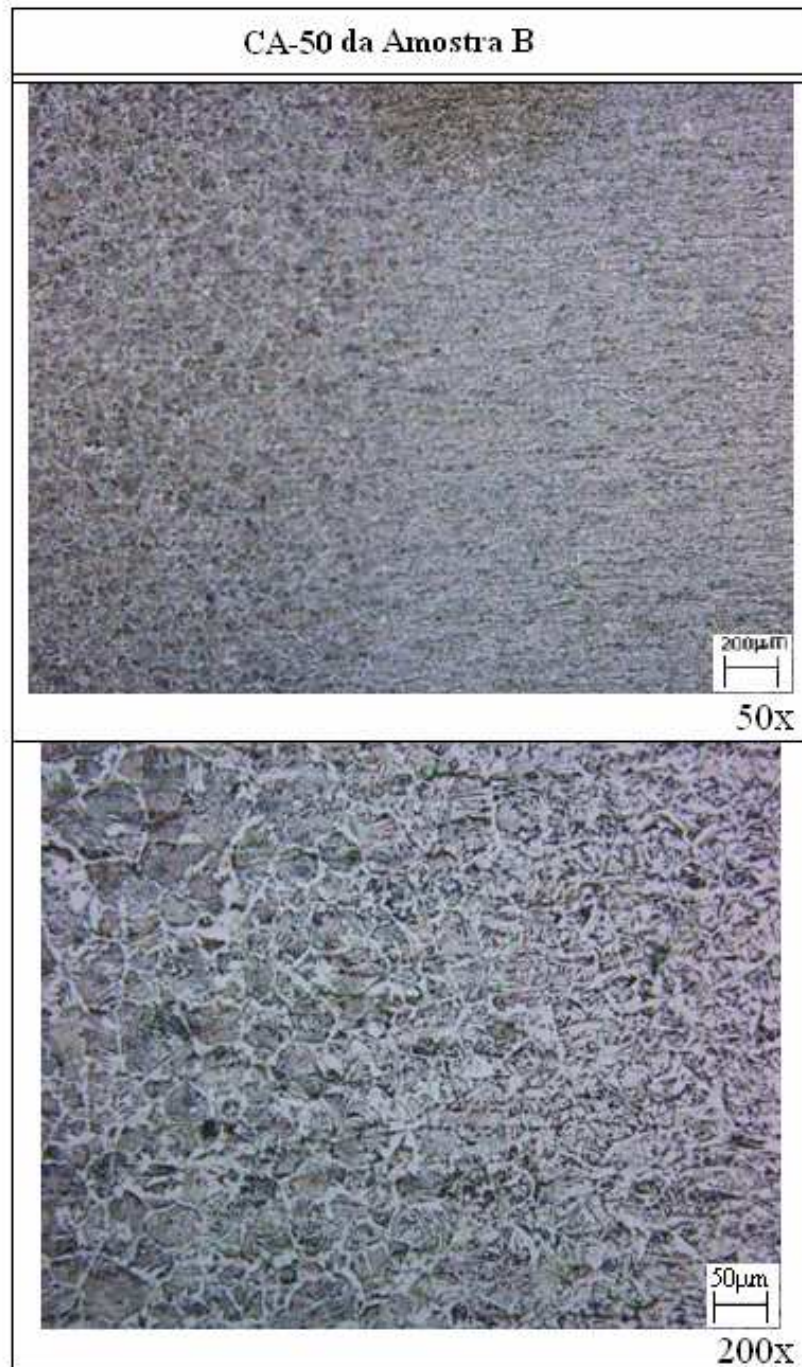


Figura 4.4.5-Aspecto micrográfico dos grãos contendo ferrita e perlita da ZTA-GG na região central da junta soldada no aço CA-50

4.5-ESPECIFICAÇÕES do PROCEDIMENTO de SOLDAGEM.

Após todas as análises e testes realizados seguem abaixo as especificações do Procedimento de Soldagem para ser utilizado nas emendas das barras nervuradas CA-50 de 32 mm de diâmetro conforme a figura 4.5.1 abaixo indicada:



Figura 4.5.1- Barra nervurada de aço CA-50 soldada

A-CARACTERÍSTICAS DA SOLDAGEM.

A.1- Processo: manual a arco elétrico com eletrodos revestidos

A.2- Material base: barra de aço CA-50

A.3- Diâmetro da barra: Ø 32 mm

A.4- Metal de Adição: AWS E – 11018-M

A.5- Tipo de Revestimento : Básico.

B-PREPARATIVOS ANTERIORES A SOLDAGEM.

B.1- Limpeza da peça: remoção de óleos e graxas.

B.2- Geometria da junta: tronco de cone Duplo V60° (vide fig. 3.2.1)

B.3- Abertura da raiz: 3 a 4 mm

B.4- Tipo do dispositivo de alinhamento: Cantoneira (vide fig. 3.2.7).

B.5- Pré-Aquecimento: é aconselhável 150° C apenas para $E \leq 10$ kJ/cm (vide tabela 4.3.2).

C-PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA JUNTAS DE TÔPO.

C.1- Posição da soldagem: Plana (vide fig. 3.2.8)

C.2- Direção da Soldagem: tangencial

C.3- Bitola do eletrodo: Ø 3,25 mm

C.4- Numero de passes: 13 passes (ver fig. 3.2.5a)

C.5- Corrente de soldagem: 100 – 130 Amperes.

C.6– Voltagem do arco: 25 – 27 Volts.

C.7– Velocidade da soldagem: 6 – 8 cm/min.

C.8– Aporte térmico: 15 – 20 kJ/cm

D–PROCEDIMENTOS POSTERIORES A SOLDAGEM.

D.1– Pós-Aquecimento: não é necessário.

D.2– Resfriamento: natural, sem necessidade de controle.

E- RECOMENDAÇÕES.

E.1– Secar os eletrodos e limitar seu tempo de exposição à atmosfera.

E.2– Remover a escoria criteriosamente.

E.3– Limitar o insumo de calor.

E.4– Caso necessário, utilize o passe de revenido para prevenir o endurecimento do pé do cordão.

É importante comentar mais detalhadamente o item **E.4**. Esta recomendação sobre o uso do passe de revenido se justifica quando a soldagem for feita com baixo aporte térmico e sem pré-aquecimento (vide tabela 4.3.2). Nestas condições ocorre alta dureza e conseqüentemente fragilidade no pé do cordão, sendo neste caso aconselhável a utilização do passe de revenido. Entretanto, se a solda for feita com insumo de calor mais elevado, por exemplo 20 kJ/cm, o uso do passe de revenido não é mais necessário devido a diminuição da dureza na camada periférica e queda da ductilidade na ZAC-GG no pé do cordão (vide figura 4.4.3).

5 – CONCLUSÃO

Os resultados dos testes de soldabilidade e os dados experimentais obtidos nos ensaios mecânicos e metalográficos das barras de aço CA-50 soldadas de topo com eletrodos revestidos, permitem as seguintes conclusões:

- 1) Frente aos resultados experimentais obtidos, é possível afirmar que barras nervuradas de aço CA-50 fabricadas pelas usinas siderúrgicas brasileiras A e B, ilustradas neste trabalho pelas Amostras A e B respectivamente, apresentam boa soldabilidade: ou seja a soldagem de barras com diâmetro de 32mm no campo, por exemplo com 20kJ/cm, pode ocorrer sem pré-aquecimento.
- 2) Os produtos analisados diferem em sua composição química, ficando a amostra B com o carbono equivalente igual a 0,43, portanto no limite superior de boa soldabilidade. Esta limitação é procedente pois este aço endurece excessivamente para soldagem com menor aporte térmico ($\leq 10\text{kJ/cm}$), com visto na tabela 4.3.2. O risco de fragilidade ou trincas a frio exigiria um pré-aquecimento ou aplicação de passe de revenido.
- 3) Nas juntas soldadas da Amostra A, com aporte térmico acima de 10 kJ/cm não é necessário o uso do passe de revenimento devido as suas durezas medidas estarem bem inferiores ao da dureza limite de 350 HV, pois abaixo deste valor não há risco de trincas a frio (vide tabela 4.3.1).
- 4) Os resultados dos ensaios de tração indicados nas tabelas 4.4.2 e 4.4.3 mostram que as juntas soldadas apresentam um desempenho muito próximo as do metal base em relação à resistência mecânica. Isto pode ser explicado pelo limite de ruptura mínimo do metal de adição da serie AWS E-110XX (774 MPa) ser bem próximo ao do metal base tanto da Amostra A (675 MPa) assim como da Amostra B (773 MPa), que podem ser vistos na tabela 4.4.1.
- 5) Quanto aos ensaios de dobramento realizados nas juntas soldadas da Amostra A, demonstraram um desempenho inferior ao do metal base quanto a sua ductilidade, apresentando ângulo de ruptura de 131° e 144° nos dois corpos de provas ensaiados, rompendo próximo à solda (vide tabela 4.4.5). Este decréscimo da ductilidade deve-se a transformação da martensita na ZTA-GG numa estrutura perlítica-ferrítica contendo grãos grosseiros, com dureza inferior a da martensita revenida.

O ensaio de dobramento a 180° de barras de aço emendadas não é exigido por norma apesar de ser um importante teste para verificação da ductilidade da solda. O

decréscimo da ductilidade limita o uso das barras nervuradas soldadas em algumas operações de dobramento. Esta limitação preocupa bastante pois o dobramento de vergalhões é indispensável para área da construção civil.

O uso do passe de revenido mostrou-se de difícil aplicação no processo manual a arco elétrico, sendo necessário pesquisas para o aperfeiçoamento desta técnica, ou então utilizar outros processos de soldagem, a fim de se obter ciclos térmicos mais rápidos, de maneira que seja evitada microestruturas na ZAC de grãos grosseiros durante a soldagem do aço CA-50.

Resumindo, pode-se concluir que as juntas soldadas de barra de aço CA-50 soldável, destinadas a armaduras de concreto possuem características adequadas para a maioria das aplicações na indústria da construção civil, sendo sua soldagem fácil de ser realizada nos canteiros de obras, com rapidez e economia de material, devido ao aproveitamento das pontas dos vergalhões.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Projeto e Execução de obras de concreto armado. NBR 6118-85**
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Barras de Aço destinadas a armaduras para concreto armado com emenda mecânica ou por solda. Determinação da resistência à tração – Método de Ensaio. NBR 8548-84.**
- 3 YAMAMOTO, R; FUKADA, Y; UEYAMA, K; TATSUMI, M and OISHIBASHI, H. – Gas pressure welding method for steel reinforcing bars. Welding Journal Research Supplement, may 1998, pages 188-s to 192-s.**
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. NBR 7480-96.**
- 5 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Barras de aço CA-42-S com características de soldabilidade para concreto armado. NBR 8965-85.**
- 6 FRITZ, L.; Mönning, E. – Construções de Concreto - Princípios Básicos sobre a Armação de Estrutura de Concreto Armado , vol.3, Editora Interciencia Ltda., 1ª.edição/1978.**
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Materiais Metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente. NBR ISSO-6892-02.**
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Ensaio de Dobramento semi-guiado. NBR ISSO 6153-88.**
- 9 COMPANHIA SIDERÚRGICA BELGO MINEIRA – Apostila Processo de Fabricação Belgo50 e Belgo60. Disponível<[www.belgomineira.com.br / pro/belgo5060](http://www.belgomineira.com.br/pro/belgo5060)>. Acesso em 25/01/2004.**
- 10 KUMURA,T.;TANIGUCHI, C. – Engenharia de Soldagem e Aplicações, 1982, 461p.**
- 11 NIÑO, C.E. – Especificação de Procedimento de reparo por soldagem sem tratamento térmico posterior – Efeito de revenimento produzido pelos ciclos térmicos – Tese de Doutorado CPGEM/UFSC – Brasil, junho de 2001, 172 p.**
- 12 KOU, S. – Welding metallurgy, 1st edition, John Wiley & Sons, USA, 1987, 410 p.**

- 13 GRONG, O. – Metallurgical modeling of welding. 1st ed., The Institute of Materials, Trondheim, Norway, 1994, 581 p.
- 14 BUSCHINELLI, A.J.A. – Curso de Metalurgia de Soldagem de Pós Graduação/BRASKEM, vol.1, Salvador-BA, julho 2003.
- 15 NIÑO, C.E.; CORRÊA, J.A.S; BUSCHINELLI, A.J.A. – Técnica de reparo por soldagem em aços 5Cr – 0,5 Mo. Soldagem e Materiais, vol. 4, n 2, abril/junho 1992, p.28-33.
- 16 AMERICAN WELDING SOCIETY. Guideline on Alternative Methods for Determining Preheat – Appendix XI of ANSI/AWS D1.1 – 90, Structural Welding Code – Steel, p 281-290.
- 17 HIGUCHI, M; SAKAMOTO, H; TANIOKA, S. – A study on weld repair through half bead method. IHI Engineering Review, v13, n2, 1980, p 14-19.
- 18 GOMES, A.M; BUONO, V.T.L; MARQUES, P.V – Soldagem de barras de aço para concreto da classe CA-50 A. Soldagem e Materiais, vol 3, n 2, abril/junho 1991, p 40-43.
- 19 RIBEIRO, H.O. – Soldabilidade do Aço CA-50 pelo Processo MAG – PGMAT/UFSC – Brasil, setembro 2002, 8 p.
- 20 DEFOURNY, J; BRAGARD, A. – Guide for Welding and Weldability of Reinforcing Steel for Concrete Structures. Weld. World, vol.24, n 11-12, p 260-277, 1986