

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR Carlos Roberto
Camello Lima E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 23/04/93

Roseana da Exaltação
ORIENTADOR

Tese de: Mestrado

Título da Tese: EFEITO DO REVESTIMENTO ANTI-CORROSIVO
NAS PROPRIEDADES DE SOLDAS DE AÇOS
ALTA RESISTÊNCIA

Autor: Carlos Roberto Camello [Lima n. 628]

Orientador: Prof^a.Dr^a. Roseana da Exaltação [Trevisan]

Aprovado por

Roseana da Exaltação
Prof^a.Dr^a. Roseana da Exaltação Trevisan - Presidente

Maria Helena Robert
Prof^a.Dr^a. Maria Helena Robert

Celso Taniguchi
Prof.Dr. Celso Taniguchi

Campinas, 23 de Abril de 1993.



À minha mulher, IVONE

que, mesmo sendo obrigada pelas circunstâncias a abdicar de sua carreira profissional e objetivos pessoais, dedicou-se a esta causa com todo carinho e com o apoio decisivo e fundamental

e aos meus filhos, DANIEL E MARIANA
por todas e tantas privações,

eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

- À PROF^ª. DR^ª. ROSEANA DA EXALTAÇÃO TREVISAN pela oportunidade, pela orientação e amizade.
- Aos meus pais, GILBERTO e MARIA ALICE, pelo apoio constante, amplo e incondicional.
- Ao amigo CESAR BROCHADO pela ajuda na escolha do tema.
- À USIMINAS S/A. pela doação e corte da chapa de aço.
- À SUMARÉ - INDÚSTRIA QUÍMICA S/A. pela doação das tintas de revestimento.
- À VILLARES-IPANEMA de Sorocaba pela realização das análises químicas quantitativas.
- À FAPESP pelo financiamento do projeto.
- Aos funcionários do Centro de Tecnologia da UNICAMP pelo apoio durante várias fases do trabalho, desde a usinagem dos corpos de prova até a análise química qualitativa, especialmente ao Sr. ALTAMIRO.
- A todos os professores e funcionários do Depto. de Fabricação pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho, em especial ao MIRO pela execução da usinagem dos corpos de prova e à LUCIENE e MARÍLIA pela atenção e presteza.
- À RITA do Laboratório de Metalografia pela grande ajuda nos trabalhos metalográficos e de microscopia.
- A todos os amigos do Departamento de Fabricação que, de uma maneira ou outra, colaboraram na realização deste trabalho, em especial ao ALMIR, BREDÁ, BRANTS, CRISTINA, DALBERTO, DEOCLÉCIO, FELIPE, FRANK, LEANDRO, MARCÃO, MARCELO, NIEDERAUER, PICINATO, TONINHO e VALÉRIO.

RESUMO

Neste trabalho é proposto um estudo sistemático da influência de tintas de proteção anti-corrosiva na formação de trincas a frio em soldas de aço alta resistência SAR-50.

A avaliação das trincas é feita através do teste de auto restrição TEKKEK com preparação em "Y" oblíquo. Os resultados são apresentados de maneira comparativa entre soldas efetuadas sobre superfícies pintadas e sem pintura. As trincas são analisadas em relação à quantidade, localização, origem e tamanho.

A espessura da chapa de aço SAR-50 utilizada é de 25 mm e as tintas de proteção para o revestimento superficial são Zinco Etil Silicato e Epoxi Óxido de Ferro, as quais são aplicadas em espessuras variadas.

Dos resultados obtidos, nas condições experimentais efetivadas, pode-se constatar principalmente que, otimizadas as condições de soldagem, a influência da condição do revestimento superficial não é significativa na susceptibilidade do aço SAR-50 à formação de trincas a frio.

ABSTRACT

This work proposes a systematic study of the influence of anti-corrosion coating paints on the SAR-50 high-strength steel welds cold cracking.

The self-restraint Y-groove Tekken test is used to investigate the cracks. The results are presented in a comparative way among joints in coated and uncoated surfaces. The cracks are studied in relation to number, location, source and size

A 25 mm thick SAR-50 steel plate is used as specimen material. The protective paints used as surface coatings are zinc-silicate and epoxy ones, which are applied in several thicknesses.

From the results, which were obtained under specific experimental conditions, we can see that, provided welding conditions are appropriate, the surface coating condition do not have a significant influence on the SAR-50 steel cold cracking susceptibility.

ÍNDICE

I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	01
II - CONCEITOS TEÓRICOS.....	03
II.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS.....	03
II.2 - SOLIDIFICAÇÃO E CRESCIMENTO DE GRÃOS.....	06
II.2.1 - MECANISMO DE NUCLEAÇÃO.....	06
II.2.2 - MECANISMO DE CRESCIMENTO.....	09
II.3 - SOLDABILIDADE DE AÇOS ALTA RESISTÊNCIA BAIXA LIGA.....	11
II.4 - TRINCAS A FRIO.....	14
II.4.1 - HIDROGÊNIO DIFUSÍVEL.....	15
II.4.2 - MICROESTRUTURA.....	17
II.4.3 - NÍVEL DE TENSÃO.....	22
II.4.4 - ENSAIO TEKKE.....	23
II.5 - O FENÔMENO DA CORROSÃO.....	26
II.6 - SOLUÇÕES PARA EVITAR A CORROSÃO.....	29
II.6.1 - EFEITOS NA SOLDAGEM.....	32
III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	35
III.1 - MATERIAIS UTILIZADOS.....	35
III.2 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	37
III.2.1 - CORTE E USINAGEM.....	37
III.2.2 - PREPARAÇÃO SUPERFICIAL.....	39
III.3 - SOLDAGEM.....	42
III.3.1 - MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	42
III.3.2 - CARACTERÍSTICAS E PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	45
III.4 - ANÁLISE DOS CORDÕES DE SOLDA.....	47
III.4.1 -ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DAS TRINCAS SUPERFICIAIS.....	47
III.4.2 - ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DAS TRINCAS DE SEÇÃO...	47

III.4.2.1 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	48
III.4.2.1.1 - CORTE.....	48
III.4.2.1.2 - METALOGRAFIA.....	49
III.4.2.2 - ANÁLISE.....	49
III.4.2.2.1 - MICROSCOPIA ÓTICA.....	49
III.4.2.2.2 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA.....	49
III.4.2.2.3 - ANÁLISE QUÍMICA.....	50
IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
IV.1 - TRINCAS SUPERFICIAIS.....	53
IV.2 - TRINCAS DE SEÇÃO.....	54
IV.3 - MICROESTRUTURA.....	66
IV.3.1 - MICROSCOPIA ÓTICA.....	66
IV.3.2 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA.....	73
IV.4 - ANÁLISE QUÍMICA.....	74
V - CONCLUSÕES.....	77
VI - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
VIII - ANEXOS.....	84
VIII.1 - ANEXO 1 - NORMA PETROBRÁS - N-1374-d - 1990	
VIII.2 - ANEXO 2 - NORMA PETROBRÁS - N-9b - 1984	

I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Um dos grandes problemas tecnológicos ainda enfrentados pelos projetistas é a corrosão. Os custos associados à corrosão são realmente expressivos. Assim, praticamente em todos os tipos de construção metálica estrutural, faz-se necessário proteger os membros da estrutura contra a corrosão utilizando-se, via de regra, tintas de proteção anti-corrosiva. Esse procedimento está presente seja em etapas de fabricação ou montagem de componentes.

Por outro lado, aços de alta resistência são, cada vez mais, utilizados em componentes estruturais, principalmente no intuito de redução de peso para um mesmo nível de resistência e como componentes estruturais estão sujeitos à operações de soldagem.

As normas de fabricação e soldagem de estruturas metálicas em vigor no país [1,2,3] exigem a remoção das tintas de proteção antes do processo de soldagem. Isto acarreta um trabalho adicional extremamente oneroso ao processo de fabricação como um todo. Tintas de revestimento a base de Zinco e Óxido de Ferro são bastante utilizadas para proteção de aços estruturais dos efeitos da atmosfera e de meios agressivos. Esses revestimentos, quando apropriadamente aplicados, aderem fortemente ao aço e são extremamente resistentes à abrasão e ao impacto o que torna, por conseguinte, extremamente difícil sua retirada após a cura.

Alguns autores têm direcionado suas pesquisas no sentido de verificar a influência dos revestimentos anti-corrosivos nas propriedades mecânicas de soldas efetuadas em juntas de aço. Os resultados dessas pesquisas mostram que as propriedades de tração e

impacto de soldas executadas em chapas de aço galvanizadas, metalizadas ou pintadas com tintas ricas em zinco, são equivalentes às propriedades de soldas executadas em chapas de aço sem revestimento.

A influência das tintas de proteção anti-corrosiva na formação e propagação de trincas a frio não é reportada na bibliografia técnica disponível. Trinca a frio é uma função complexa da quantidade de hidrogênio, tensão, microestrutura e temperatura do aço. A trinca a frio pode se propagar e causar falha súbita. A susceptibilidade à formação desse tipo de trinca aumenta com o aumento da resistência dos aços.

Existem diversos testes para avaliação das trincas a frio, alguns de auto-restrição como o Tekken e o Teste de Severidade Térmica Controlada, outros de restrição externa, como o teste de Implante e o de Restrição Controlada.

O objetivo primordial do presente trabalho é estudar a influência de tintas de proteção anti-corrosiva na formação de trincas a frio em soldas de aços de alta resistência. Para avaliação das trincas será utilizado o Teste de auto-restrição Tekken [4].

Os resultados aqui obtidos complementarão as informações já existentes sobre a influência de tintas de proteção nas propriedades de juntas soldadas de aços alta resistência.

II - CONCEITOS TEÓRICOS

Neste capítulo são abordados, de forma sucinta e objetiva, alguns conceitos teóricos necessários ao melhor entendimento das matérias discutidas nos capítulos procedentes. Não há pretensão de se esgotar os referidos temas, mas sim respaldar as discussões e conclusões que serão apresentadas no decorrer do trabalho.

II.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS

Nos processos de soldagem a arco elétrico, uma importante característica é a tensão do arco que é dependente de outros parâmetros de soldagem como a amperagem, o comprimento do arco e o tipo de revestimento do eletrodo. A corrente de soldagem determina a taxa de deposição, para condições fixadas. A intensidade da corrente é o mais importante efeito controlador da geometria do cordão, da penetração e da diluição [5].

A velocidade de avanço é outra variável de grande importância no processo sendo, porém, difícil e impreciso o seu controle nos casos de aplicações manuais. A velocidade de avanço influencia inversamente a altura e a largura do cordão. Através da manipulação da velocidade de soldagem, torna-se possível a utilização de elevadas correntes mantendo-se, ou mesmo reduzindo-se, a energia de soldagem, como pode ser observado pela análise da Equação I [5]:

$$ES = \frac{E \times I \times 60}{V} \quad (\text{J/mm}) \quad (\text{I}) \quad , \text{onde}$$

ES = Energia de Soldagem
V = Velocidade (mm/min)
E = Tensão (Volts)
I = Corrente (Ampéres)

Os eletrodos e ou arames para soldagem também influenciam de várias maneiras no processo, sendo disponíveis em diversos diâmetros. A amperagem necessária para soldagem aumenta proporcionalmente ao aumento do diâmetro dos eletrodos.

O processo de soldagem a arco com eletrodo revestido (SAER) é um processo de soldagem no qual a coalescência dos metais é produzida pelo calor do arco elétrico mantido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal base sendo soldado [6].

Este é ainda um dos processos mais utilizados na maioria dos países por ser eficiente, simples e barato [5,6]. O equipamento básico é de configuração simples e consiste de uma fonte de energia, alicate para fixação dos eletrodos e cabos de interligação. As fontes de energia são transformadores para corrente alternada e unidades geradoras ou transformadoras-retificadoras para corrente contínua.

O processo é mostrado, de maneira esquemática, na Figura II.1.

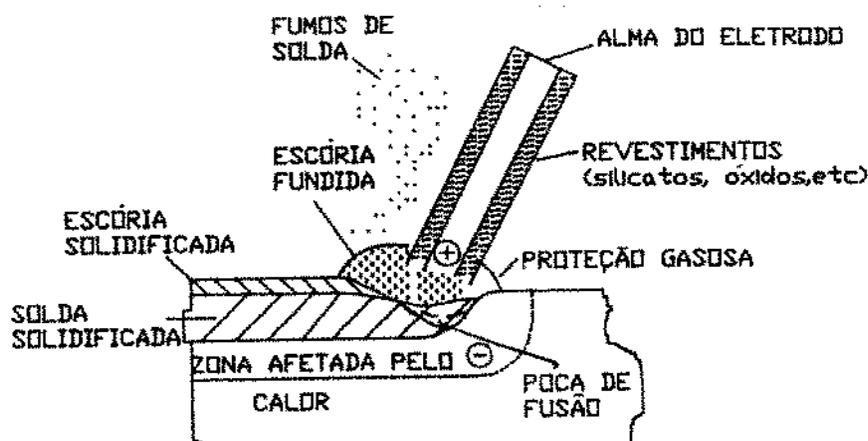


Figura II.1 - Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido [7]

A principal característica desse processo é o revestimento dos eletrodos. Os eletrodos consistem de um núcleo metálico revestido por um fluxo ou escória, composto de vários silicatos e óxidos metálicos.

Os tipos de revestimento são classificados em [8]:

Oxidante - à base de óxido de Ferro e Manganês

Ácido - à base de óxido de Ferro, Manganês e Sílica

Rutílico - À base de Rutilo (TiO_2)

Básico - Carbureto de Cálcio e Fluorita

Celulósico - Alta quantidade de materiais orgânicos

como celulose, por exemplo.

O revestimento dos eletrodos tem uma ou mais das funções abaixo [7,8]:

-Fornecer proteção gasosa para o metal fundido (poça de solda), tais como mistura de gases H_2 , CO , CO_2 produzida pela decomposição da celulose aquecida, no caso dos revestimentos celulósicos.

-Fornecer desoxidantes e agentes de fluxo. A escória sólida formada também protege o metal de solda já solidificado, porém ainda quente, da oxidação. Um dos elementos mais comuns para essa finalidade é o óxido de Manganês (MnO).

-Estabilizar o arco elétrico, fornecendo elementos estabilizadores, que são compostos ionizáveis, tais como o oxalato de Potássio e o carboneto de Lítio, os quais ajudam o arco a conduzir a corrente elétrica.

-Fornecer elementos de liga e/ou pós metálicos para a solda. Os elementos de liga ajudam a controlar a composição do cordão e os pós metálicos auxiliam no aumento da taxa de deposição.

Os eletrodos revestidos podem operar com corrente contínua ou com corrente alternada, dependendo do tipo de revestimento e do procedimento específico. O uso de corrente contínua é normalmente associado à melhor estabilidade do arco, facilidade de ignição e qualidade dos depósitos [5]. Os fabricantes

dos eletrodos, em geral, indicam o tipo de corrente a ser utilizado para os diversos tipos de eletrodos e aplicações.

II.2 - SOLIDIFICAÇÃO E CRESCIMENTO DE GRÃOS

Em muitos aspectos a solidificação da solda é fundamentalmente diferente da fundição de lingotes; por outro lado, apresenta certas características em comum com a fundição contínua [7]. Porém, é importante considerar algumas diferenças importantes, tais como o fato de a velocidade de solidificação na solda ser muito maior que na solidificação de lingotes o que, portanto, interfere na macro e na micro estrutura do fundido [9].

II.2.1 - MECANISMO DE NUCLEAÇÃO

Na soldagem por fusão, independente do processo, sempre ocorre diluição, ou seja, o metal base é parcialmente fundido, o que garante que existe um contato entre o metal de solda líquido e a superfície do metal base, isenta de filmes de óxidos e de outras impurezas [6].

A principal consequência da diluição, ou seja, o fato de o metal base ter atingido, localmente, o seu ponto de fusão é a ocorrência de crescimento de grãos do metal base, sendo este crescimento maior nas regiões que atingiram maiores temperaturas como regiões adjacentes à linha de fusão entre o metal fundido e o metal não fundido. Os grãos parcialmente fundidos do metal base atuam como um substrato ideal para a nucleação e crescimento da fase sólida. Fica assim comprovado que na soldagem por fusão o início da solidificação ocorre por epitaxia.

O fenômeno de crescimento epitaxial é mostrado na Figura II.2. Pode ser observado nessa figura que os cristais do metal de solda derivam dos grãos do metal base.

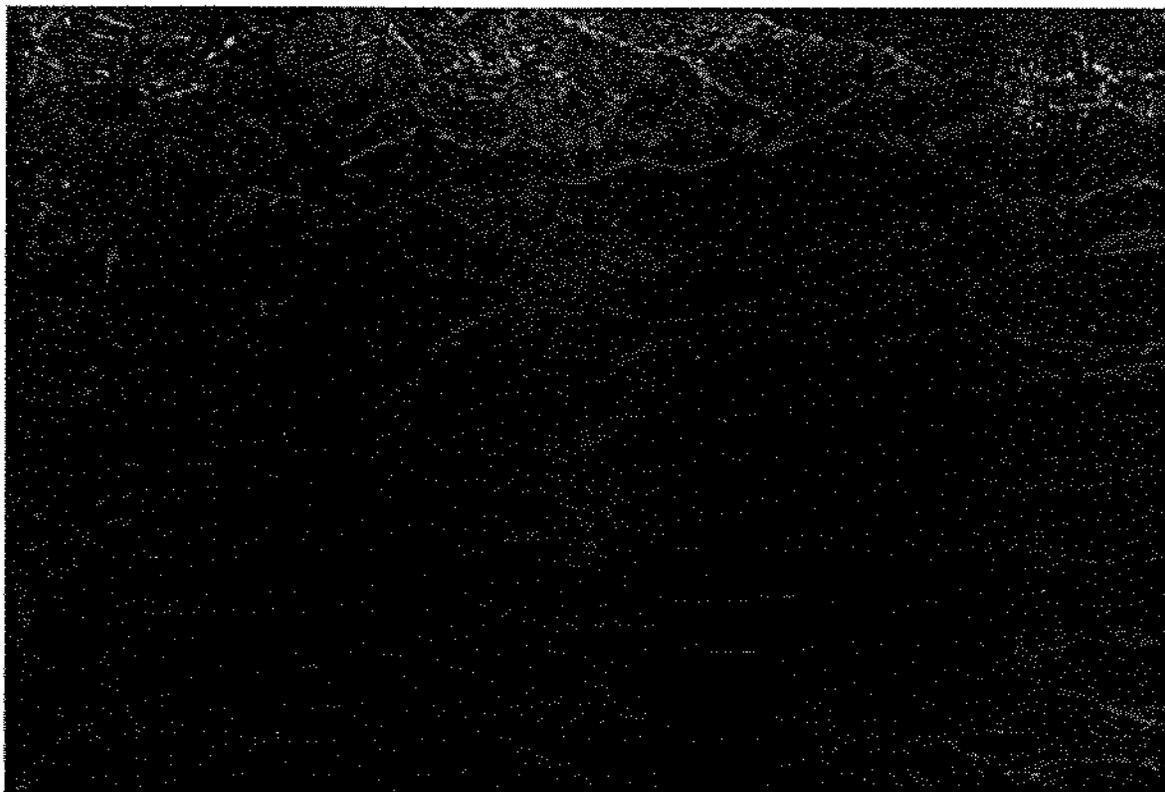


Figura II.2 - Solidificação Epitaxial da Solda

A solidificação epitaxial é um processo heterogêneo, conforme ilustra a Figura II.3.

Um embrião sólido do metal de solda se forma na superfície do metal base parcialmente fundido. A forma desse embrião depende das várias energias superficiais envolvidas, a saber:

γ_{ML} - Energia superficial entre o metal base e o líquido

γ_{SL} - Energia superficial entre o metal de solda e o líquido

γ_{SM} - Energia superficial entre o metal de solda e o metal base

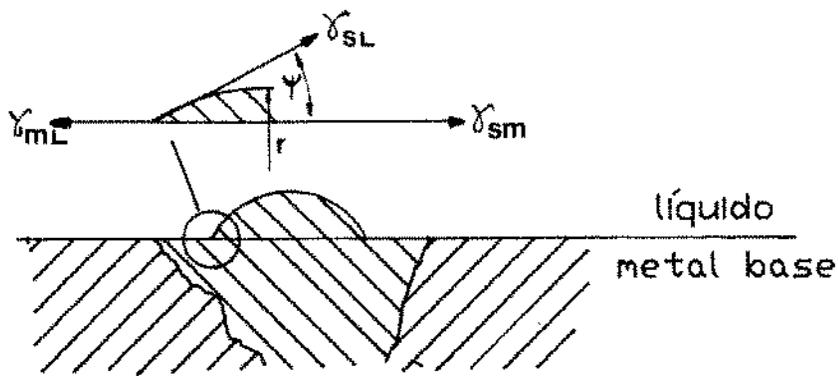


Figura II.3 - Nucleação Heterogênea [7]

Assumindo-se que a energia entre o metal de solda e o líquido é isotrópica, pode ser mostrado que, para um dado volume do embrião, a energia interfacial do sistema pode ser minimizada se o embrião tiver a forma de uma calota esférica. O ângulo que esta calota adota em relação ao metal sólido é ψ e é chamado de "ângulo de molhamento". O molhamento é, então, controlado pelo balanço de forças gerado pelas respectivas energias superficiais, como descrito pelas equações II e III [7].

$$\gamma_{ML} = \gamma_{SM} + \gamma_{SL} \cos \psi \quad (II)$$

$$\cos \psi = \frac{(\gamma_{ML} - \gamma_{SM})}{\gamma_{SL}} \quad (III)$$

Visto que a solidificação inicial do metal de solda ocorre epitaxialmente e o metal de solda ter usualmente uma composição bem similar à do metal base, as aproximações das equações IV e V são válidas, de forma que o ângulo ψ é, aproximadamente, igual a zero.

$$\gamma_{SM} \cong 0 \quad (IV)$$

$$\gamma_{ML} \cong \gamma_{SL} \quad (V)$$

Pelas equações IV e V, a barreira para a solidificação do metal de solda é negligenciável e, portanto, a solidificação ocorre de maneira uniforme sobre todo o grão do metal base.

II.2.2 - MECANISMO DE CRESCIMENTO.

O crescimento inicial dos grãos na zona de fusão tem um comportamento colunar. A estrutura do grão é governada por um mecanismo conhecido como "crescimento competitivo", de maneira análoga ao que ocorre nos lingotes [7].

Durante a solidificação, os grãos tendem a crescer na direção perpendicular à interface sólido-líquido, visto ser essa a direção de máximo gradiente de temperatura. Por outro lado, os grãos também têm sua direção preferencial de crescimento, chamada "direção de crescimento fácil" que é, por exemplo a direção $\langle 100 \rangle$ para os metais cúbicos de face centrada (cfc) e cúbicos de corpo centrado (ccc) [10].

Por isso, durante a solidificação, os grãos com sua direção preferencial de crescimento paralela à direção do máximo gradiente de temperatura crescerão mais facilmente e inibirão aqueles grãos cuja direção de crescimento preferencial desvia significativamente da direção de máximo gradiente de temperatura.

Dessa forma, a velocidade de crescimento de um cristal, R' , é dada pela equação VI:

$$R' = R \cos \theta^d \quad (VI)$$

onde: R = Vetor velocidade de crescimento dada pela velocidade de soldagem e direção de extração de calor

θ^d = Ângulo entre a direção preferencial de crescimento e R

A Figura II.4 ilustra, esquematicamente esse mecanismo, sendo "v" a velocidade de soldagem.

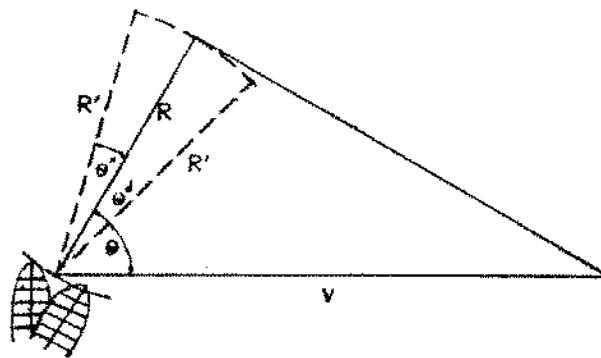


Figura II.4 - Relação entre o crescimento do cristal normal ao máximo gradiente de temperatura (R) e ao longo da direção preferencial $\langle 100 \rangle$ (R') [7]

Como a soldagem é um processo dinâmico, a fonte de calor está em constante movimento e, portanto, o gradiente de temperatura varia. A fim de manter um crescimento contínuo, os cristais têm que mudar a orientação, o que requer renucleação de grãos em direções apropriadas de crescimento.

A natureza competitiva do processo de crescimento entre os grãos colunares determina a macroestrutura de solidificação do cordão de solda, a qual tem influência significativa nas propriedades finais da zona de fusão [10].

Como a velocidade de soldagem, " v ", é constante, a velocidade de crescimento do cristal, R' , tem que variar consideravelmente, dependendo da posição do líquido. Assim, os cristais na linha de centro do cordão e atrás da fonte de calor móvel ($\theta = 0$) crescem mais rapidamente, enquanto os cristais no eixo do cordão ($\theta = 90^\circ$) crescem mais devagar. Esse efeito tem importantes consequências na microestrutura e tenacidade de soldas

[10]. A análise da Figura II.5 ilustra esse fato, ou seja, se considerarmos duas soldas de velocidades diferentes, veremos que na solda com baixa velocidade de avanço (Figura II.5-a), o crescimento do cristal pode manter coerência com o movimento da fonte de calor, de forma ordenada e simétrica. Já no caso da solda com velocidade de avanço alta (Figura II.5-b), a forma da isoterma da poça é alterada, fazendo com que os cristais tenham que fazer mudanças abruptas de direção de crescimento na linha de centro da solda, de forma a manter a continuidade da solda. Essas mudanças abruptas de direção, como mostrado na Figura II.5-b, podem ser prejudiciais à tenacidade das soldas devido a aumentar o risco de segregação na linha de centro do cordão [6,10].

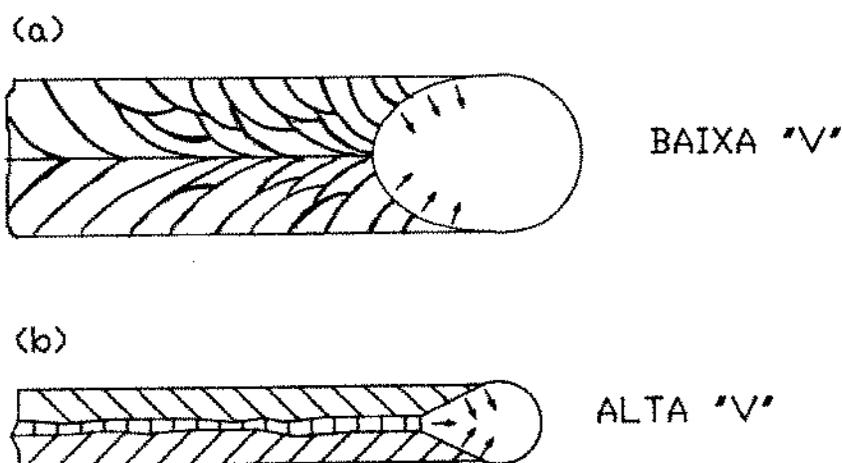


Figura II.5 - Efeito da velocidade de soldagem na forma da poça e no modo de crescimento do cristal [7]

II.3 - SOLDABILIDADE DOS AÇOS ALTA RESISTÊNCIA-BAIXA LIGA

Os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) foram desenvolvidos para aplicações onde a relação entre resistência mecânica e peso seja relevante, como por exemplo em estruturas de grande porte tais como navios e plataformas de

produção de petróleo. A diminuição de peso alcançada pela redução de espessuras de perfis e chapas estruturais, para o mesmo nível de resistência mecânica, garante ganhos significativos nas operações de produção, transporte e manutenção [11,12].

Os aços Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) estão quase sempre sujeitos a operações de soldagem e portanto devem possuir, além de elevada resistência mecânica e tenacidade, boa soldabilidade. Uma das fórmulas usadas para se avaliar previamente a soldabilidade de aços ARBL é a determinação do Carbono Equivalente (CE), como apresentado na Equação VII. Essa equação expressa, de forma simplificada, a tendência à formação de martensita.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Si + \%Ni + \%Cu}{15} \quad (VII) \quad [5]$$

Em geral, considera-se que o valor do CE deva ser menor que 0,40 para garantir boa soldabilidade, apesar de que estes valores, calculados como acima, não levam em consideração outros fatores de igual importância tais como temperabilidade, processo de soldagem, tratamentos térmicos ou características do metal de adição, entre outras [11,12].

Além disso, o CE está relacionado apenas à formação de estrutura martensítica e, conseqüentemente, à formação de trincas a frio. Outros defeitos possíveis, tais como trincas a quente, porosidade e mordeduras não são considerados quando se usa o conceito de CE.

O teor de carbono dos aços ARBL é mantido baixo, visando melhoria na tenacidade. A adição de elementos de liga nos

aços ARBL promove endurecibilidade e ajuda a controlar o tamanho de grão, o qual tem grande influência na resistência e na tenacidade [12].

Estes aços podem ser soldados por quaisquer processos de soldagem a arco, tais como Eletrodo Revestido (SAER), Arco Metálico com Proteção Gasosa (SAMG), Arco Metálico com Arame Tubular (SAT) ou Arco Submerso (SAS) [5,8]. Os processos Eletro Escória e Eletrogás podem também ser usados mas existem certas restrições de carregamento para pontes e outras aplicações [5]. Esses dois processos, assim como o processo a Arco Submerso com Eletrodo Múltiplo (mais de um cabeçote alimentador) requerem cuidados e avaliação na utilização pois, devido às características de alto insumo de calor, podem reduzir a resistência e tenacidade da junta soldada no metal de solda ou na zona afetada pelo calor [5,8]. A presença de hidrogênio no cordão deve ser evitada, seja qual for o processo, visto ser o hidrogênio extremamente prejudicial à soldagem desses aços como principal causador de fragilização [13].

O pré-aquecimento é, em geral, benéfico no controle da taxa de resfriamento da solda para reduzir ou evitar transformação martensítica na zona afetada pelo calor controlando-se, desta forma, a dureza desta região. O pré-aquecimento tende a reduzir, também, as tensões de soldagem. O pós-aquecimento pode ser necessário em alguns casos para corrigir excessivo endurecimento ou aliviar tensões [11].

As considerações na escolha dos consumíveis para soldagem dos aços ARBL, além de se basear na resistência à tração, composição e resistência ao entalhe do metal de solda, devem tentar restringir ao máximo a presença do hidrogênio, recomendação feita inclusive pelos fabricantes desses aços [11,12,14].

II.4- TRINCAS A FRIO

Trincas são, talvez, os mais sérios defeitos que ocorrem em soldas ou em juntas soldadas. São consideradas perigosas pois criam uma séria redução de resistência. Elas podem se propagar e causar súbita falha, tornando-se ainda mais sérias quando estão envolvidas cargas de impacto e serviços a baixas temperaturas [13].

Uma das formas de se classificar as trincas é com relação à temperatura. Existem trincas a quente (ou de solidificação), que ocorrem durante ou imediatamente após a solda ser executada ou durante o ciclo de resfriamento, trincas de alívio de tensão ou de reaquecimento e trincas a frio.

Trincas a frio são as que ocorrem algum tempo depois da solda concluída, após seu resfriamento à temperatura ambiente. Estas trincas podem aparecer horas ou mesmo dias após a conclusão da solda (em geral até 48 horas), sendo conhecidas também como trincas assistidas pelo hidrogênio, trincas induzidas pelo hidrogênio ou trincas retardadas. As trincas a frio podem ser intergranulares, transgranulares ou ambas [7,15,16].

Os fatores envolvidos na formação da trinca a frio são estudados extensivamente por diversos autores [13,16,17,18,19,20]. Existe consenso entre a maioria quanto à influência de três fatores interativos:

- Teor de hidrogênio difusível
- Microestrutura susceptível
- Nível de tensão

Alguns autores citam ainda outros fatores que influenciam a ocorrência da trinca a frio, tais como:

- Temperatura [17,18,19,20]

- Limite de resistência [13]

- Tenacidade a fratura da solda e da ZAC [15]

Em determinadas situações, algum dos fatores acima pode ser predominante [18]. Existe ainda na literatura referência a trincas intergranulares em aços causadas pela penetração de zinco [21,22]. Este tipo de trinca ocorre em soldas de filete, sendo que o mecanismo de sua formação é descrito como semelhante à corrosão sob tensão do aço causada pelo zinco quando ainda no estado líquido [21].

II.4.1 - HIDROGÊNIO DIFUSÍVEL-

O metal de solda absorve hidrogênio por diversos meios e acima de um certo nível crítico ocorrerá a fragilização [17,23].

Nem sempre se tem ciência da presença do hidrogênio em operações de soldagem, pois ele pode ser introduzido despercebidamente na forma de qualquer componente.

As principais fontes de hidrogênio são:

- Umidade atmosférica [7,15]
- Umidade do revestimento do eletrodo ou fluxo [6,7]
- Componentes do revestimento ou fluxo [6]
- Oxidos no eletrodo ou metal de adição [15]
- Componentes do metal de base contaminados com óleo, graxa, óxidos ou tintas [7,15].

A solubilidade do hidrogênio no aço não é afetada significativamente pela composição do aço. Entretanto, mudanças na temperatura e estrutura cristalina do aço têm um marcado efeito sobre a solubilidade do hidrogênio, como pode ser observado na Figura II.6

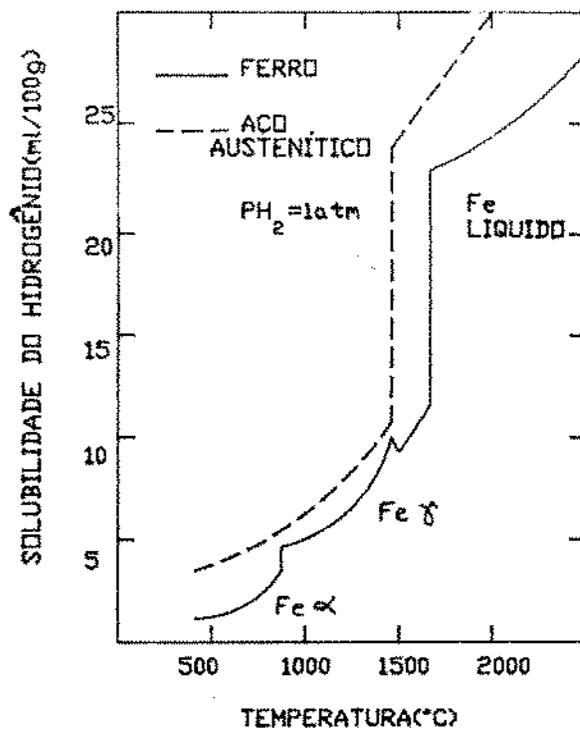


Figura II.6 - Solubilidade do hidrogênio no ferro [20]

É importante verificar na Figura II.6 que o ferro ou aço no estado líquido pode dissolver uma quantidade de hidrogênio muito maior do que sua capacidade de mantê-lo no estado sólido. Note, particularmente, que a solubilidade, em geral, diminui rapidamente com a diminuição da temperatura e que mudanças abruptas na solubilidade também ocorrem nos pontos de transformação.

A Figura II.7 ilustra a difusão do hidrogênio do metal de solda (MS) para a zona afetada pelo calor (ZAC) durante a soldagem.

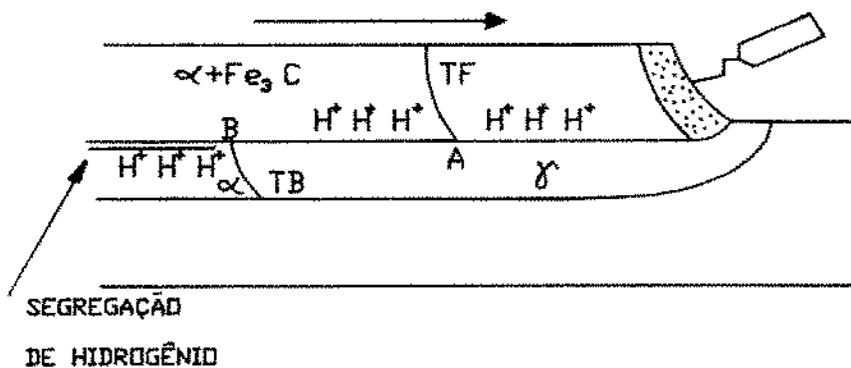


Figura II.7 - Difusão do Hidrogênio do MS para a ZAC durante a soldagem. T_F e T_B são as transformações Austenita/ (Ferrita + Perlita) e Austenita/Martensita, respectivamente [6].

Como mostrado na Figura II.7, o metal de solda, tendo usualmente teor de carbono mais baixo que o metal base, sofre a transformação de austenita (γ) em ferrita e perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) antes que a zona afetada pelo calor sofra a transformação de austenita em martensita (M). Devido à menor solubilidade do hidrogênio na ferrita do que na austenita, como mostrado anteriormente na Figura II.6, o hidrogênio é rejeitado dentro da ferrita- α próximo à interface austenita/ferrita + perlita ($\gamma / \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) do metal de solda. Devido ao crescimento de hidrogênio na ferrita- α , este tenderá a difundir para a austenita da ZAC, próximo à linha de fusão, como indicado pelas pequenas setas da Figura II.7. Este processo de difusão é encorajado pelo alto coeficiente de difusão do hidrogênio na ferrita- α . Opostamente, devido ao muito menor coeficiente de difusão na austenita, o hidrogênio nesta região não tem oportunidade de difundir para o metal base antes que ocorra a transformação austenita/martensita, promovendo então a trinca a frio [6].

O mecanismo exato para a ocorrência de trinca pelo hidrogênio não é ainda claramente entendido, embora diversas teorias tenham sido propostas [13,20,23,24].

II.4.2 - MICROESTRUTURA-

Existem estruturas cristalinas que são mais susceptíveis à formação de trincas pelo hidrogênio.

O aumento do teor de carbono, teor dos elementos de liga e o tamanho de grão da austenita influenciam na formação da estrutura martensítica. A trinca produzida pelo hidrogênio ocorre mais facilmente quando o aço tem uma microestrutura martensítica. A

susceptibilidade da martensita a esse tipo de trinca se deve, em parte, à alta tensão provocada pela transformação local, ou seja, a transformação austenita-martensita.[6]

Como visto na Figura II.6, a solubilidade do hidrogênio é maior na austenita do que na ferrita. Conforme a transformação austenita-ferrita se inicia, a austenita restante torna-se gradativamente mais enriquecida em hidrogênio. Ocorre o mesmo na transformação austenita-martensita que se dá a muito baixas temperaturas. Nesse ponto, a austenita está ainda mais enriquecida em hidrogênio. Isto pode explicar a grande sensibilidade da trinca a frio à presença da martensita.[7]

Existem dois tipos de martensita: martensita alto carbono (ou martensita maclada) e a martensita baixo carbono (também chamada de martensita escorregada ou em ripas). É consenso entre alguns autores [6,7,17,24] que a martensita alto carbono é mais susceptível a fragilização pelo hidrogênio que a martensita baixo carbono. Isto pode ser explicado pelo fato de a temperatura inicial (M_s) de transformação da martensita alto carbono ser mais baixa que a da martensita baixo carbono, correspondendo a uma maior dilatação devido à transformação de fase em mais baixas temperaturas. Além disso, o mais alto conteúdo de carbono desta martensita também aumenta sua dureza, auxiliando na fragilização [7].

Na análise microestrutural da região soldada e da zona afetada pelo calor, a formação de microestruturas susceptíveis a fragilização ocorre com facilidade devido a grande variação nas taxas de resfriamento, como mostrado na Figura II.8. A variação na coloração das regiões próximas à linha de fusão, observada na figura, equivale à variação nas taxas de resfriamento e,

consequentemente, variação na granulação e nas microestruturas.

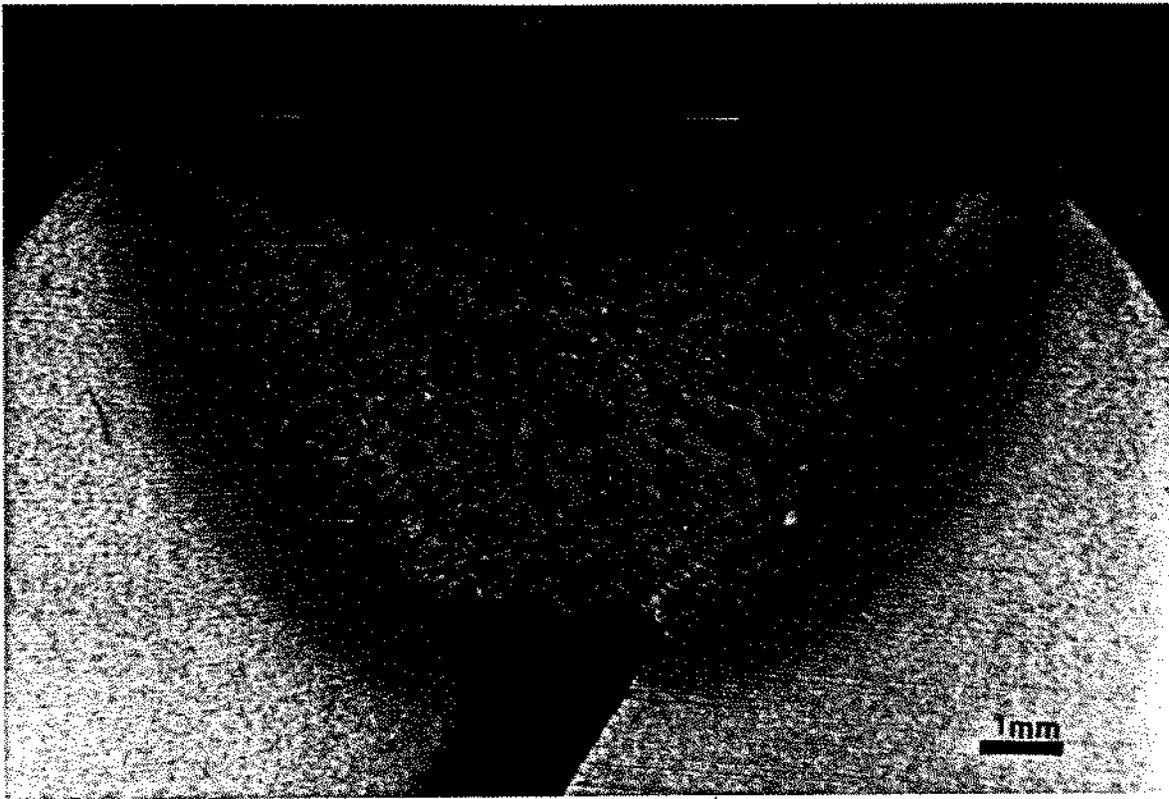


Figura II.8 - Macrografia representativa da solda e da ZAC

Na soldagem, as regiões da zona termicamente afetada atingem temperaturas de austenitização diferentes; em regiões mais próximas do metal de solda o resfriamento é mais rápido do que em regiões mais afastadas do metal de solda. A granulação nestas regiões terá grande variação. Em uma solda de passe único, existem quatro regiões características na Zona Afetada pelo Calor (ZAC), determinadas pela temperatura de pico a que a região foi exposta durante o ciclo termico da soldagem:

- I- Uma região de granulação grosseira
- II- Uma região de granulação fina
- III- Uma região de grãos parcialmente refinados
- IV- Uma região de carbeto esferoidizados

A Figura II.9 ilustra essas regiões.

A Região I foi submetida a um pico de temperatura bem acima de A_{c3} , que é a temperatura de transformação da austenita (γ) em ferrita (α), entre 912°C e 727°C , promovendo, então, o crescimento dos grãos da austenita [5].

A Região II teve picos de temperatura em torno de 1.100°C , o que significa que, seguindo a transformação α/γ durante o aquecimento, a austenita não tem tempo de se desenvolver e o grão permanece muito pequeno. Em adição, carbeto podem não ser completamente dissolvidos. A transformação γ/α no resfriamento tende a produzir uma estrutura de grãos refinados de ferrita (α) + perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) [7].

A Região III foi submetida a picos de temperatura entre A_{c1} , que é a temperatura de transformação eutetóide $\gamma / \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ (727°C) e A_{c3} . As colônias de perlita nesta região foram transformadas em austenita e expandiram ligeiramente nas colônias de ferrita, sob um aquecimento acima da temperatura A_{c1} e então foram decompostas em grãos bem finos de perlita e ferrita, durante o resfriamento [5].

A Região IV corresponde a temperaturas entre 700 e 750°C . Existe relativamente pequena transformação α / γ durante o rápido ciclo térmico, tanto que a mais importante mudança é a degradação da perlita lamelar em partículas esferoidais de Fe_3C (cementita). O acúmulo de partículas de cementita esferoidizada nos contornos de grão, faz destes contornos canais de alta difusividade para o carbono nestas baixas temperaturas [7].

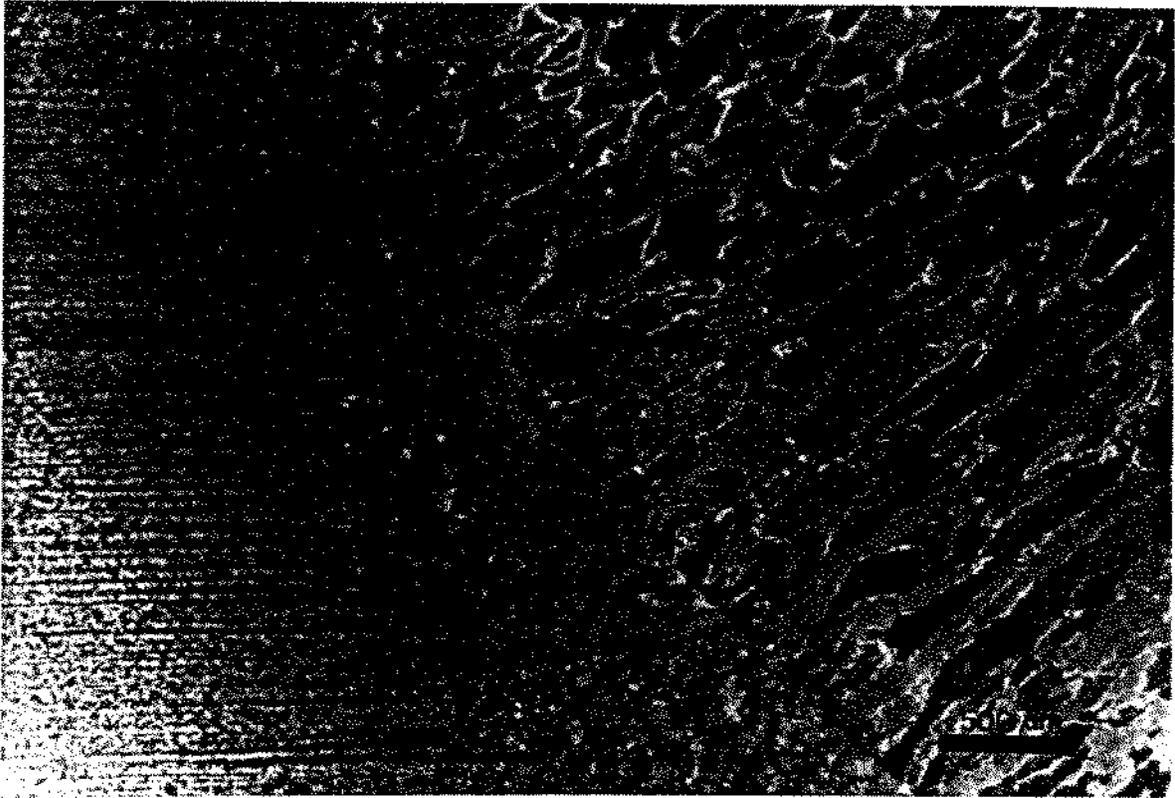


Figura II.9 - Regiões características de um conjunto soldado

O tamanho de grão da austenita prévia também tem grande influência na fragilização pelo hidrogênio [24]. É geralmente aceito que as trincas a frio iniciam na região de crescimento de grãos da Zona Afetada pelo Calor (Região I). O aumento do tamanho de grão diminui as temperaturas de transformação. A fração volumétrica dos produtos de temperatura de transformação baixas, tais como a Martensita e a Bainita aumentam. As altas densidades de discordâncias associadas a esses produtos, juntamente com partículas de precipitados finos endurecidos, resultam em uma matriz dura e de baixa ductilidade [18].

A microestrutura mais desejada é a ferrita acicular, por ter tamanho de grão pequeno (0,1 a 1 μm) e contornos de alto ângulo, características que propiciam estrutura com excelente combinação de resistência e tenacidade [19].

Em função dos constituintes do metal de adição e do ciclo térmico podem haver na soldagem grandes variações nas microestruturas formadas no metal de adição [19,25]. A temperaturas de transformação mais elevadas, associa-se a formação da Ferrita Primária(F) e Ferrita com Martensita-Austenita-Carbeto alinhados(AC), também conhecida como Ferrita de Crescimento Lateral. Com temperaturas de transformação decrescentes são associadas, progressivamente, Ferrita Acicular(AF), Agregados de Carbeto-Ferrita(FC ou Perlita), Ferrita com M-A-C não alinhados(NA) e Martensita(M) [19].

II.4.3 - NÍVEL DE TENSÃO

As fontes de tensão possíveis são:

- Transformação de fase [7,15]
- Contração térmica [7,15,26]
- Restrição mecânica [6,13]

A transformação de fase provoca uma dilatação. O grau dessa dilatação depende do pico de temperatura atingido durante a operação de soldagem [7,10].

Materiais com tamanho de grão grande favorecem a formação de estruturas de baixa temperatura de transformação, devido à redução da superfície de contorno de grão onde a fase ferrita pode nuclear [7].

As tensões de tração resultantes da transformação martensítica podem ser intensificadas por tensões adicionais causadas por contração térmica do metal de solda e da zona afetada pelo calor, por restrição da junta soldada imposta pelo projeto ou mesmo pela sequência de fabricação [11].

Lancaster [15] define que a tensão ou deformação desenvolvidas na junta soldada durante o resfriamento pode resultar numa auto restrição, numa restrição externa ou na combinação das duas. A auto restrição é causada pela contração local da solda, relacionada a sua vizinhança imediata e pela deformação local gerada pela transformação de fase. A restrição externa é devida à estrutura, a qual pode ser inflexível ou complacente, dependendo do projeto.

Estas tensões podem ser reduzidas através de pré-aquecimento para redução da taxa de resfriamento, redução do insumo de calor na solda ou revisão do projeto e da sequência de fabricação.

II.4.4 - ENSAIO TEKKEN

A susceptibilidade à trincas a frio em aços de alta resistência pode ser avaliada através de diversos ensaios de soldabilidade [7,26]. Estes ensaios têm como finalidade avaliar o fenômeno da trinca a frio, bem como avaliar as influências do teor de hidrogênio, taxa de resfriamento e temperatura na sua formação e propagação [7].

Os ensaios de soldabilidade mais utilizados são o Tekken, o Lehigh e o CTS (Severidade Térmica Controlada), que são ensaios de auto-restrição e o Ensaio de Restrição Controlada e Implante, que são de restrição externa [27].

O Ensaio Tekken, ou "Ensaio de Auto-Restrição com preparação em Y Oblíquo" é definido pela Norma Industrial Japonesa JIS-Z-3158 de 1.966, revisada em 1.978 [4].

As dimensões do corpo de prova para o ensaio Tekken

são apresentadas na Figura II.10. Após a montagem do conjunto, as soldas de restrição devem ser executadas em ambas as faces, precavendo-se contra deformações angulares e falta de penetração. Devem ser rigorosamente mantidas as tolerâncias do chanfro. A eficiência do teste está diretamente relacionada com a rigorosidade na manutenção das tolerâncias dimensionais do chanfro.

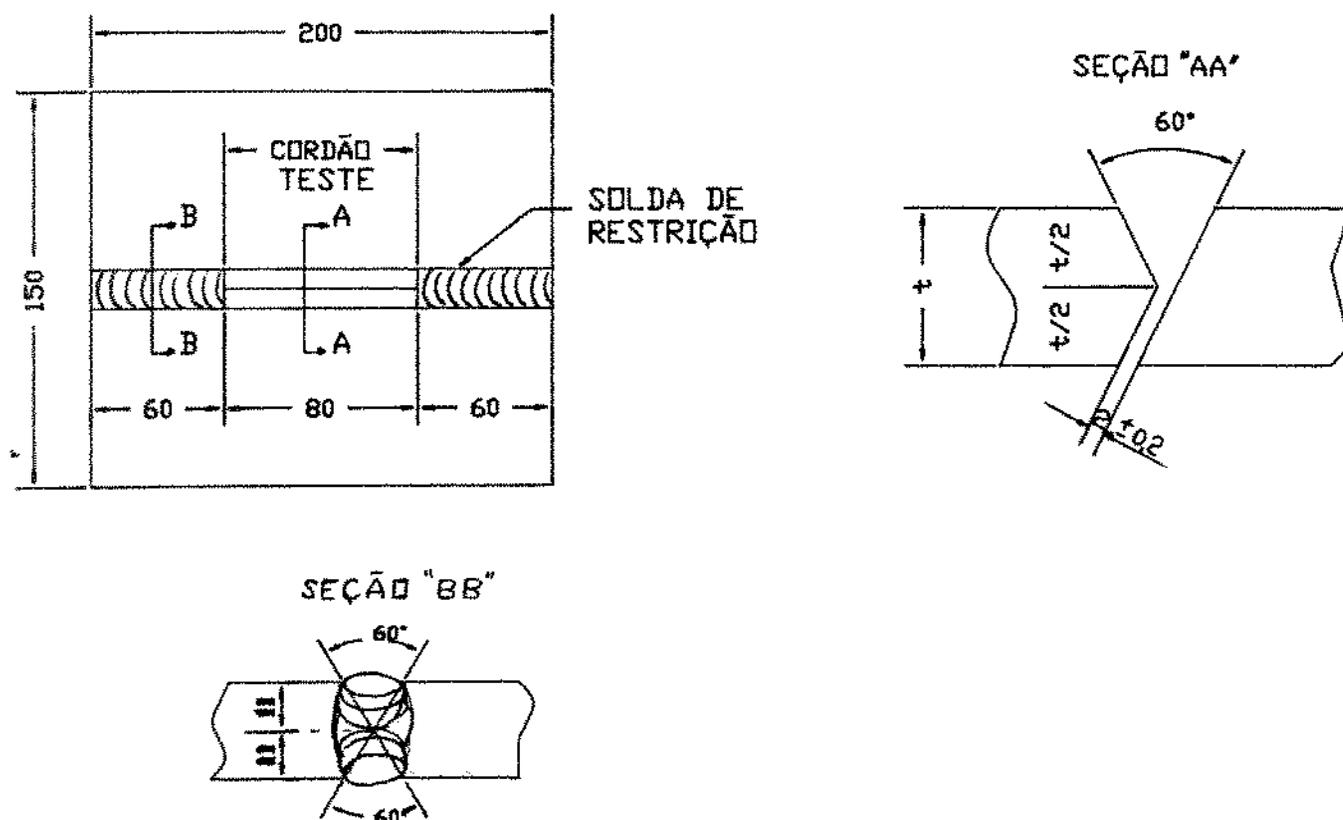


Figura II.10- Dimensões do corpo de prova para o ensaio Tekken [4]

Após a conclusão total das soldas de restrição, deve ser executado o cordão teste, em um único passe, como esquematizado na Figura II.11. Quarenta e oito horas depois de concluída a soldagem do cordão teste, efetua-se a inspeção para verificação da presença de trincas superficiais e trincas nas seções transversais, pelo método estabelecido e calcula-se a porcentagem de trincas.

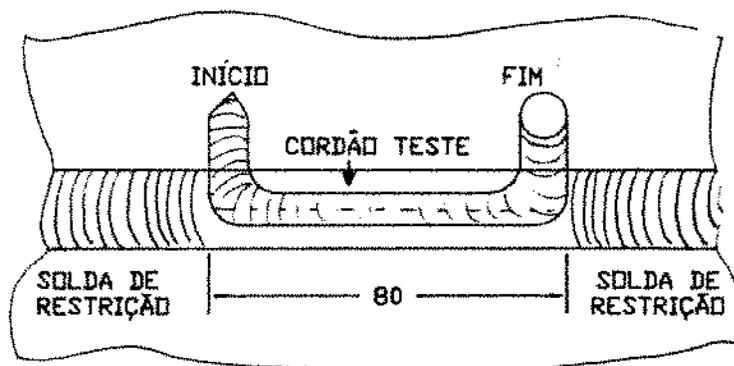


Figura II.11 - Soldagem do cordão teste Tekken [4]

As trincas superficiais são inspecionadas visualmente ou por outro método adequado e efetua-se os cálculos aplicando-se a seguinte fórmula:

C_1 = Trincas Superficiais

$$C_1 = \frac{\sum L}{L} \times 100 (\%) , \text{ onde } L = \text{Comprimento do cordão de teste}$$

$\sum L$ = Soma dos comprimentos das trincas superficiais.

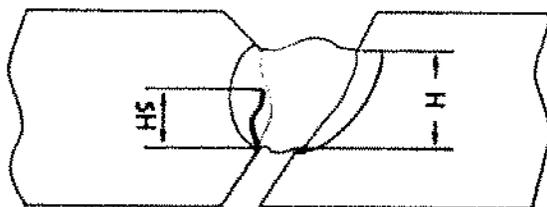
Em seguida o cordão teste deve ser colorido por um método adequado , aplica-se teste de torção ou dobramento de raiz e calcula-se as trincas de raiz, conforme a fórmula abaixo:

C_r = Trincas de raiz

$$C_r = \frac{\sum r}{L} \times 100 (\%) , \text{ onde } L = \text{Comprimento do cordão teste}$$

$\sum r$ = Soma dos comprimentos das trincas de raiz

Para análise das trincas transversais, devem ser tomadas cinco seções transversais do cordão teste e determinadas as alturas das trincas, a olho nú ou outro método adequado, como mostrado no esquema abaixo:



O cálculo das trincas de seção deve ser feito através da seguinte fórmula:

$$Cs = \frac{Hs}{H} \times 100 (\%) , \text{ onde}$$

Cs = Trincas de Seção
Hs = Altura da trinca de seção
H = Espessura mínima do cordão teste

II.5 - O FENÔMENO DA CORROSÃO

Corrosão metálica é definida como uma deterioração gradual ou alteração por um processo de oxidação químico ou eletroquímico [28,29].

A primeira razão porque o ferro ou aço corroem é que o elemento ferro, isto é, a condição do ferro como ele existe após ter sido reduzido do seu minério é termodinamicamente instável. Não existe ferro livre na natureza. O ferro existe em combinação com outros elementos como oxigênio ou enxofre. A fim de se converter o ferro do estado oxidado para o de metal, é necessário fornecer uma

grande quantidade energia ao sistema. Esta energia é então armazenada no ferro metálico. As leis fundamentais governando a conservação de energia requerem que o balanço de energia deva ser restabelecido pelo retorno do metal instável a seu estado oxidado [29].

A célula mostrada na Figura II.12 ilustra o processo de corrosão na sua forma mais simples. Esta célula inclui os seguintes componentes essenciais:

- 1- Um metal anodo
- 2- Um metal catodo
- 3- Um condutor metálico entre o anodo e o catodo
- 4- Um eletrólito em contato com o anodo e o catodo

Adicionalmente, oxigênio normalmente estará presente como um agente despolarizante.

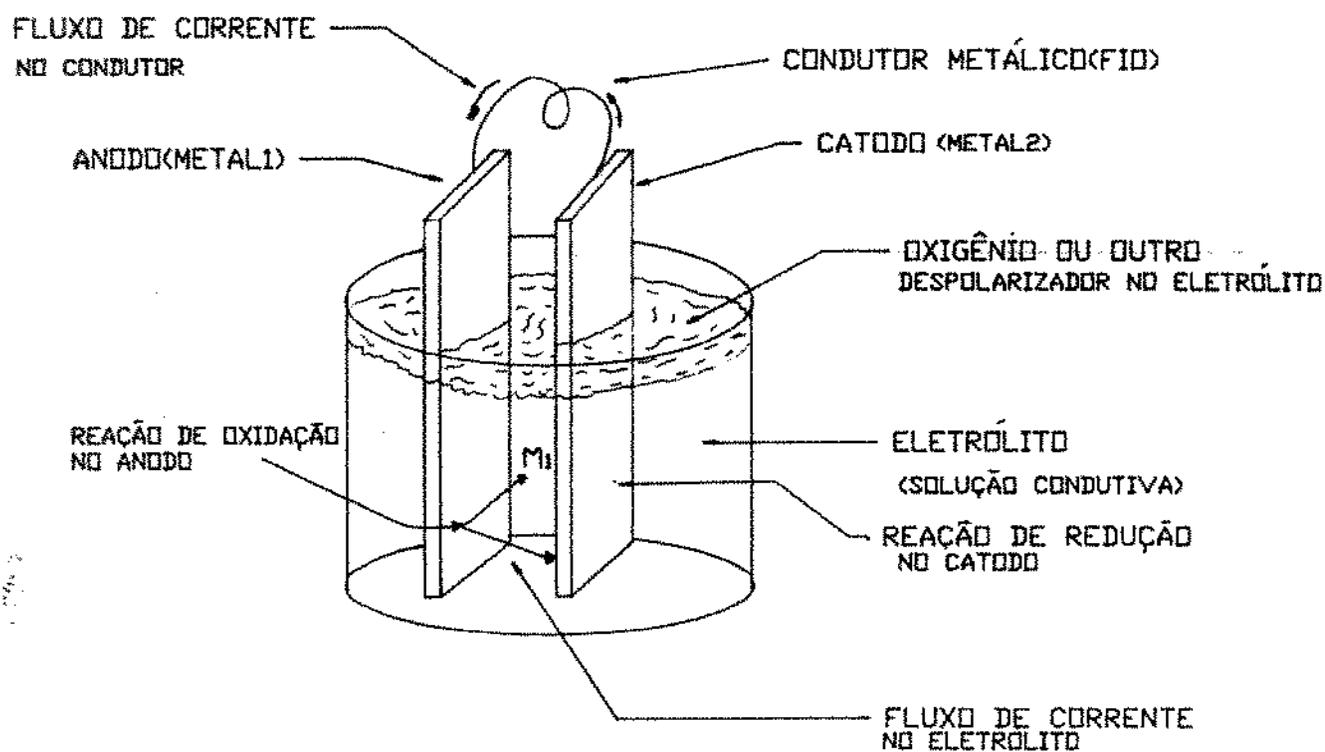


Figura II.12 - Célula simples mostrando os componentes necessários para a corrosão [29]

Como pode ser visto na figura, os componentes estão arran­jados para formar um circuito elétrico fechado. Uma corrente elétrica fluirá através do condutor metálico e do eletrólito. O anodo corroerá (ferrugem, se o anodo for de ferro); quimicamente esta é uma reação de oxidação. Simultaneamente, uma reação química não destrutiva (redução) ocorrerá no catodo, usualmente produzindo gás hidrogênio no catodo. Quando a camada de gás isola o catodo do eletrólito, o fluxo de corrente para, então ,polarizando a célula. Entretanto, oxigênio ou outro agente despolarizador está normalmente presente para reagir com o hidrogênio, reduzindo esse efeito e então a célula volta a funcionar. Existirá, assim, uma diferença de potencial entre os eletrodos.

A série de força eletromotriz dos metais, ou série galvânica, tem a mesma orientação referente à energia requerida para a conversão minério/metal. Esta série mostra qual metal pode deslocar um outro metal na solução e sofrer corrosão no processo.

A corrosão atmosférica, embora não seja uma forma isolada de corrosão, é singularmente importante devido a existirem diversas estruturas externas, tais como edifícios metálicos, pontes, cercas, torres, automóveis, navios e inúmeras outras aplicações que estão expostas ao ambiente atmosférico. Os custos associados resultantes da corrosão atmosférica podem ser estarrecedores. Por isso, muita atenção é dedicada a esse respeito [29,30].

A corrosão atmosférica depende não apenas do conteúdo de umidade, mas também da temperatura do ar, do conteúdo de pó e a presença de outras impurezas no ar, as quais têm marcado efeito na

condensação de umidade sobre a superfície do metal e na corrosividade resultante. A corrosão atmosférica é um processo descontínuo, pois nem sempre se tem a presença de um eletrólito [31].

A adsorção da água pode ser devida a: [31]

a-Umididade relativa do ar.

b-Propriedades físicas e químicas dos produtos de corrosão.

c-Propriedades dos materiais depositados no ar (partículas de carbono, óxidos de metais, ácido sulfúrico, cloreto de sódio, sulfato de amônia, etc.).

d-Ou os três fatores em conjunto.

As taxas de corrosão atmosférica são afetadas pelas condições locais, sendo mais severas em regiões marinhas ou industriais [32].

II.6 - SOLUÇÕES PARA EVITAR A CORROSÃO

A forma usual de prevenir a corrosão dos metais é o revestimento das superfícies através de galvanização, zincagem e outros tipos de metalização, ou por pintura, que é o caso mais comum na proteção de aços estruturais.

Uma vez selecionada a tinta ou outro revestimento a ser utilizado é imperativo que o mesmo seja aplicado de forma a se conseguir o máximo benefício de proteção contra a corrosão.

Com esse objetivo, um dos fatores de extrema importância a ser verificado é a preparação da superfície onde será aplicado o revestimento. Inicialmente, uma pré-inspeção da superfície deve ser feita, de forma a eliminar os possíveis cantos vivos, respingos de solda, resíduos de óleo, graxa ou outros

contaminantes [29].

A preparação da superfície a ser revestida varia com o sistema de pintura ou revestimento a ser utilizado, podendo requerer desde uma simples limpeza com solventes e ferramentas manuais do tipo "escova" até o jateamento abrasivo ao "metal branco", onde são removidos toda a ferrugem visível e contaminantes, sendo esse acabamento definido como "uma superfície com uma cor metálica branco-acinzentado, uniforme, levemente rugosa" (para permitir melhor aderência do revestimento) [33].

As tintas, em geral, são uma mistura de partículas insolúveis de pigmento suspenso em um veículo aquoso ou orgânico contínuo. Pigmentos normalmente consistem de óxidos metálicos (TiO_2 , Pb_3O_4 , Fe_2O_3 ...) ou outros componentes como ZnCrO_4 , PbCO_3 , BaSO_4 , etc. O veículo pode ser, por exemplo, um óleo de linhaça natural. Quando estes chamados "óleos secantes" são expostos ao ar, eles oxidam e polimerizam como sólidos, processo que pode ser acelerado por pequenas quantidades de catalizadores como chumbo, manganês ou cobalto. Resinas sintéticas estão sendo atualmente muitas vezes empregadas como veículos ou componentes de veículos, particularmente para contato contínuo com água ou onde a resistência a ácidos, álcalis ou temperaturas mais elevadas é requerida. Essas resinas podem secar por evaporação do solvente no qual elas são dissolvidas ou polimerizam através da aplicação de calor ou por adição de catalizadores convenientes. [29]

Resinas epoxi (sintéticas), por exemplo, tem grande adesão ao substrato, são resistentes a solventes e a numerosos outros produtos químicos, têm muito boa resistência ao impacto, calor e abrasão. Devem ser co-polimerizadas com outras resinas (da família amina ou poliamida) para formar um revestimento protetor

durável. [34]

Outros tipos de revestimentos utilizados são inorgânicos. Entre os revestimentos inorgânicos mais utilizados estão as tintas inorgânicas ricas em zinco, baseadas em soluções de silicato, as quais após a cura ou secagem, cristalizam e formam uma matriz inorgânica, mantendo as partículas de pó de zinco juntas e aderentes ao substrato. Têm grande dureza, ótima aderência, grande resistência à abrasão e proteção catódica semelhante ao "galvanizado" [28].

As primeiras tintas de revestimento a base de zinco eram pós-curadas (pela aplicação de calor ou ácidos), baseadas em soluções aquosas de silicato de sódio e, mais tarde, silicatos de lítio, potássio e outros foram usados. Entretanto, elas eram difíceis de ser aplicadas e um tanto trabalhosas pois, após sua aplicação deveria ser aplicada uma solução de cura. Consequentemente, foram desenvolvidos os silicatos inorgânicos de auto-cura baseados em alguns destes mesmos silicatos alcalinos e, adicionalmente, etil silicato. Estes silicatos orgânicos, durante a cura, reagem com a atmosfera para formar álcool, o qual volatiliza. O filme resultante é inorgânico e essencialmente o mesmo dos silicatos alcalinos [34].

A maior vantagem do uso dos revestimentos ricos em zinco é que eles protegem galvanicamente. O pigmento de zinco na tinta de revestimento, preferencialmente sacrifica a si próprio na reação de corrosão eletroquímica para então proteger o aço subjacente (o qual é catódico para o zinco na série eletromotriz).

Um dos mais importantes usos dos revestimentos inorgânicos a base de zinco tem sido seu uso como tinta de pré-construção. Esses materiais têm uma pequena diferença na

formulação em relação aos revestimentos similares de alta espessura (em torno de 75 μm), mas são formulados com os mesmos materiais básicos.

O propósito destas tintas é propiciar uma superfície livre de corrosão nos aços durante os estágios de pré-fabricação e montagem ou construção. Devido à sua grande resistência à abrasão, permitem que as chapas ou perfis protegidos sejam manuseadas continuamente através dos diversos estágios de fabricação, mesmo com equipamentos pesados, mantendo as características de proteção. Servem, ainda, como base para outras tintas de acabamento devido à sua grande capacidade de ancoragem e ainda permitem, em função de sua cor cinza-claro, boa visibilidade para as marcações utilizadas durante os estágios de fabricação.

Esses revestimentos são facilmente soldados e cortados, tanto manualmente como com equipamentos automáticos [32].

A espessura de aplicação dessas tintas é normalmente em torno de 25 μm , porém alguns fabricantes recomendam espessuras de até 75 μm [32].

II.6.1 - EFEITOS NA SOLDAGEM

Juntas e conexões em estruturas de aço normalmente estão sujeitas à soldagem. Assim, existe uma grande quantidade de discussão sobre os prós e contras com relação à soldagem de aços revestidos, principalmente com zinco inorgânico, um dos revestimentos mais utilizados.. Os problemas estruturais e fisiológicos da soldagem de aços galvanizados (proteção rica em zinco) são bem conhecidos, sabendo-se que pode ocorrer alguma redução de resistência nas soldas devido a existência de trincas de

penetração intergranular de zinco e que os fumos da soldagem contém alguma concentração de zinco [35,36].

Diversos laboratórios e instituições em todo o mundo têm realizado testes para determinar os efeitos dos revestimentos inorgânicos à base de zinco sobre as soldas e soldadores [32,35]. Esses testes têm mostrado que os aços com revestimentos inorgânicos de zinco podem ser soldados sem qualquer redução da resistência nas soldas, tanto para os revestimentos de pré-construção (em torno de 25 μm de espessura), quanto para os revestimentos de alta espessura (em torno de 75 μm). As soldas são equivalentes nos testes de resistência mecânica às conseguidas em aços sem revestimento. A restrição encontrada é que para espessuras de revestimento maiores, a velocidade de soldagem deve ser diminuída para propiciar o tempo de escape necessário para o zinco volatilizado e evitar porosidade na solda. [32]

Os testes ainda mostram, em geral, que a concentração de zinco nos fumos gerados na soldagem de aços não revestidos em relação aos aços revestidos com zinco inorgânico, aumenta de um valor nominal de 0,09 mg/m^3 para 2,1 mg/m^3 , respectivamente, sendo o limite máximo admissível pelas organizações de saúde em torno de 5 mg/m^3 . Nota-se, ainda, que a concentração de zinco nos fumos produzidos é três vezes maior quando soldando aço galvanizado em relação a aços revestidos com tinta inorgânica a base de zinco [32].

Gregory [22] realizando ensaios em soldas de aço Stelcoloy S, (0,15% C) sem revestimento, revestido com tinta à base de zinco e com chapas de aço galvanizado, concluiu que os resultados dos testes de tração, dobramento e impacto Charpy são equivalentes. Concluiu ainda que a resistência à fadiga de soldas de filete em juntas cruciformes pode ser diminuída quando



executadas com eletrodos revestidos básicos, devido à presença de trincas de penetração de zinco.

Pattee e Monroe [35] trabalhando com aço carbono A-36 e aço alta resistência HY-80, revestidos com quatro tipos diferentes de tintas inorgânicas a base de zinco, com espessuras variadas, concluíram que as propriedades mecânicas das soldas desses aços com esses tipos de revestimentos são similares às dos mesmos aços isentos de revestimento. Concluíram ainda que as concentrações de zinco e ferro na atmosfera de soldagem não excederam os limites admissíveis pelas instituições de saúde.

Porém, a maior parte desses testes realizados foi voltada para o estudo dos aços galvanizados (revestimento inorgânico rico em zinco) [22,35,36]. Os testes realizados utilizando revestimento com tintas, sempre se restringiram à espessuras de , no máximo, 75 μm .

As normas em vigor no país para fabricação , montagem e soldagem de estruturas de aço [1,2,3], não permitem a soldagem sobre superfícies pintadas, independente da espessura do revestimento. Além disso, as espessuras das tintas de revestimento, principalmente em ambientes marítimos, chegam a atingir até 130 μm , valor bastante superior aos verificados nos experimentos anteriores.

Não foi encontrada na literatura nenhuma referência ao estudo de trincas a frio em função do revestimento superficial dos aços.

III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os materiais e equipamentos utilizados na execução dos corpos de prova para o teste de auto-restrição, bem como a metodologia de soldagem e pintura das amostras. São descritas, ainda, as dificuldades e limitações encontradas durante o desenvolvimento experimental do trabalho em questão.

III.1 - MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho foram utilizadas, como material base, chapas de aço Soldável de Alta Resistência SAR-50-B na espessura de 25,00 mm [11]. Esse aço foi escolhido por ser um dos mais empregados na construção de estruturas marítimas tais como plataformas de petróleo, ancoradouros e outras.

A composição química e as propriedades mecânicas das chapas de aço são apresentadas nas tabelas III.1 e III.2, respectivamente. Estes dados foram fornecidos pelo fabricante, através de Certificado de Inspeção.

Tabela III.1 - Composição Química das chapas de aço SAR-50-B

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)							
C	Si	Mn	P	S	Al	V	C Eq.
0,16	0,29	1,26	0,020	0,012	0,043	0,038	0,37

Tabela III.2 - Propriedades mecânicas das chapas de aço SAR-50-B

P R O P R I E D A D E S M E C Â N I C A S		
LIMITE DE ESCOAMENTO	LIMITE DE RESISTÊNCIA	ALONGAMENTO
MPa	MPa	(200 mm) %
386	535	25,0

Para a soldagem, tanto dos cordões teste como das restrições, foram utilizados eletrodos revestidos básicos AWS-E-7018-G, com diâmetro de 4 mm, cuja composição química fornecida pelo fabricante é apresentada na Tabela III.3. A escolha desses eletrodos se deve ao fato de serem estes os mais utilizados na soldagem de aços estruturais de alta resistência e baixa liga, para a faixa de resistência mecânica (70 Ksi ou 483 MPa) devido, principalmente, à sua elevada tenacidade e baixo teor de hidrogênio.

Tabela III.3 - Composição Química dos Eletrodos AWS-E-7018-G

DIÂMETRO (mm)	C O M P O S I Ç Ã O Q U Í M I C A (%)		
	C	Si	Mn
4,00	0,06	0,5	1,45

As tintas utilizadas para o revestimento das chapas de aço foram Zinco Etil Silicato e Epoxi Óxido de Ferro as quais são, individual ou conjuntamente, os tipos mais utilizados para proteção de aços estruturais para aplicação em ambiente marítimo. As principais características dessas tintas são apresentadas na

Tabela III.4 - Características das tintas de revestimento

TIPO	ESPECIFICAÇÃO	SÓLIDOS POR PESO	OXIDOS P/VOLUME ASTM - D - 2697	MASSA ESPEC. MISTURA (g/cm ³)	PONTO DE FULGOR ASTM - D - 1310
ZINCO ETIL SILICATO	Complexo básico de Silicato de Zinco de 2 compo- nentes: líquido + pó de Zinco.	75% ± 2	54% ± 2	2,2 ± 0,05	COMPONENTE "A" 20 °C COMPONENTE "B" -
EPOXI ÓXIDO DE FERRO	Tinta de fundo Epoxi óxido de Ferro de 2 compo- nentes curada com poliamida	55% ± 3	32% ± 2	1,23 ± 0,03	COMPONENTE "A" 30 °C COMPONENTE "B" 25 °C

III.2 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

III.2.1 - CORTE E USINAGEM

Os corpos de Prova para o teste TEKKEK (CPT's) foram extraídos de uma única chapa, através de corte oxi-acetilênico na direção de laminação, conforme esquematizado na Figura III.1, sendo deixado 10 mm de sobremetal para remoção na usinagem, eliminando-se assim a camada de material endurecido pelo corte a chama.

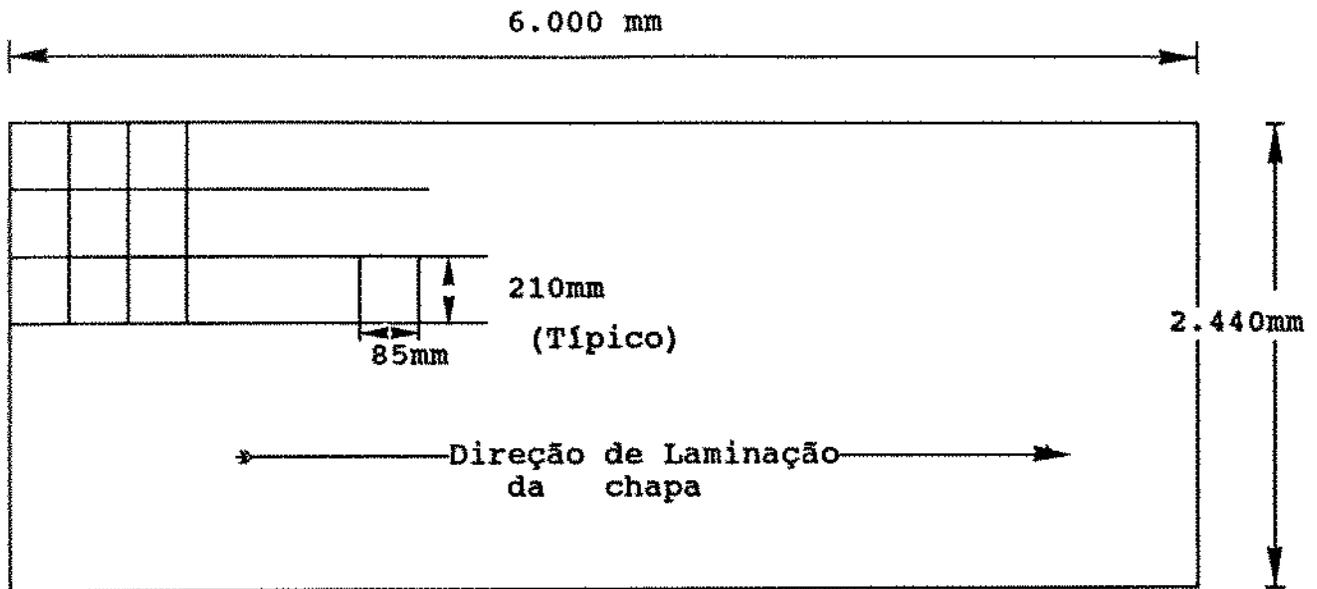


Figura III.1 - Esquema de retirada de chapas para corpos de prova

As peças cortadas foram então usinadas, utilizando-se uma plainadora e uma fresadora, nas dimensões indicadas na Figura III.2. Foi feito um rebaixo com 2,2 mm de profundidade na região central de uma das partes do corpo de prova através de fresamento, para facilitar a montagem dos componentes para soldagem. Esse rebaixo simplificou bastante a garantia da tolerância de $2,0 \pm 0,2$ mm exigida pela norma JIS-Z-3158-66 [4]. A usinagem dos chanfros dos corpos de prova está prescrita nesta mesma norma, por garantir melhor precisão e repetibilidade das condições dos chanfros na execução dos testes, sendo também especificado grau de desbaste no acabamento.

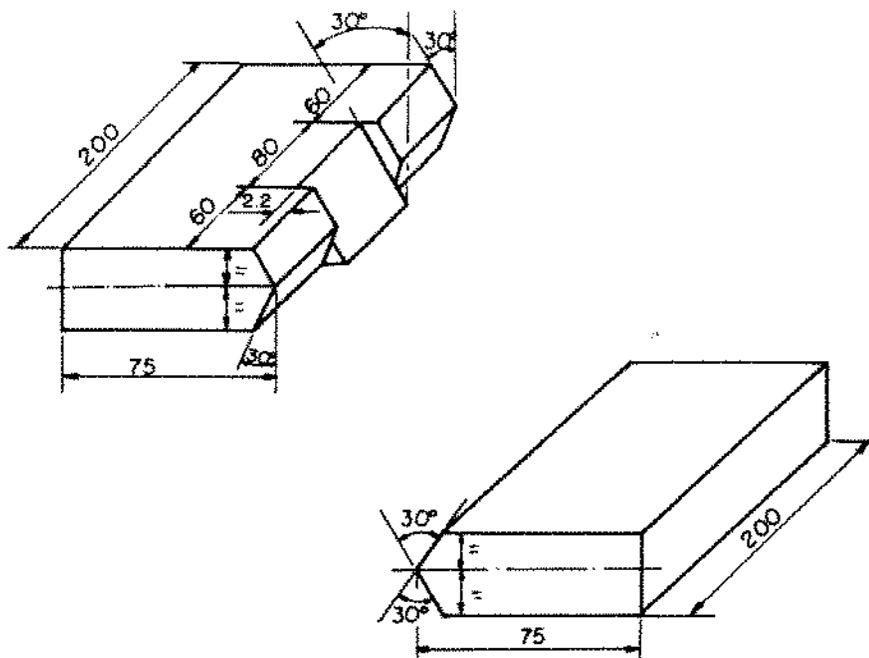


Figura III.2 - Dimensões dos corpos de prova (CPT's) usinados

III.2.2 - PREPARAÇÃO SUPERFICIAL

Para a execução dos revestimentos anti-corrosivos sobre os corpos de prova Tekken (CPT's) foram utilizadas as normas da Petrobrás em vigor [38,39], as quais são normalmente aplicadas na fabricação de estruturas marítimas no país, por não existirem normas brasileiras específicas.

Os tipos de revestimento utilizados foram:

- TIPO 1 - Corpos de prova sem revestimento, apenas jateados
- TIPO 2 - Revestimento com tinta de Zinco Etil Silicato seguido de revestimento com tinta Epoxi Óxido de Ferro (Z+E).
- TIPO 3 - Revestimento Único com tinta Epoxi Óxido de Ferro (E).

Para cada tipo foram revestidos corpos de prova com 3 faixas de espessuras distintas, conforme indicado na Tabela III.5.

Tabela III.5- Espessuras utilizadas nos revestimentos dos CPT's

TIPO DE REVESTIMENTO	FAIXAS DE ESPESSURAS FINAIS (μm)		
TIPO 1 - SEM	-	-	-
TIPO 2 - Z+E	50 \pm 15	80 \pm 15	110 \pm 15
TIPO 3 - E	20 \pm 10	40 \pm 10	60 \pm 10

O procedimento de execução dos revestimentos foi o seguinte:

-Todos os CPT's revestidos, sofreram jateamento abrasivo ao metal quase branco [38] utilizando-se micro esferas de vidro com granulometria de 105-210 μm . Em seguida, as superfícies foram sopradas com ar comprimido limpo e sêco, obtendo-se assim uma superfície isenta de óxidos, óleo, gorduras e outros contaminantes. O jateamento abrasivo foi executado em um jateador de gabinete NORTORF - Modelo SV-600.

Imediatamente após o jateamento, foi aplicada uma demão de tinta de Zinco Etil Silicato por meio de trincha. As espessuras desta demão variaram em função das diversas faixas previstas, como especificado na Tabela III.5. O controle da espessura foi feito, logo após a aplicação da tinta, através de um medidor de espessura de película úmida marca ELETROPHYSIC com escala de 25 a 800 μm . A secagem da tinta foi ao ar livre. Esta tinta só foi aplicada para o Tipo 2 de revestimento.

Quarenta e oito horas após a aplicação da tinta de Zinco Etil Silicato, no caso do revestimento Tipo 2, ou

imediatamente após o jateamento, para o revestimento Tipo 3, foi aplicada uma demão de tinta Epoxi Óxido de Ferro por meio de rolo ou trincha, na espessura prevista para cada condição, conforme especificado na Tabela III.5. O controle da espessura também foi realizado através do medidor de espessura de película úmida, logo após a aplicação das tintas. A secagem foi ao ar livre. O período de 48 horas é o prazo mínimo especificado pelo fabricante das tintas para repintura, num ambiente de secagem com temperatura entre 16 e 30 °C, como foi o caso em nossos experimentos.

Os corpos de prova que não foram revestidos (Tipo 1), receberam jateamento imediatamente antes do início da soldagem.

O controle das espessuras dos revestimentos realizado através do medidor de espessura de película úmida foi feito tomando-se a medida em tres pontos distintos ao longo do chanfro. Após 12 horas da aplicação das tintas foi realizado o controle final da espessura, utilizando-se um medidor de espessura de película seca automático marca ELETROPHYSIC com escala de 0 a 1.000 μm , sendo registrados os valores médios de 10 pontos medidos ao longo dos chanfros. O prazo de 12 horas é o prazo mínimo previsto pelo fabricante das tintas para o manuseio das peças pintadas, nas condições ambientais verificadas durante o revestimento. As peças que não se enquadraram nas faixas de espessura previstas foram rejateadas e repintadas.

Durante todo o período de jateamento e aplicação de tintas, foram aferidas a temperatura e a umidade relativa do ar através de um termo-higrômetro instalado no local de execução dos trabalhos, sendo vedada a realização de jateamento e/ou pintura com umidade relativa do ar acima de 85%, a qual comprometeria a integridade do sistema de proteção pela rápida contaminação por

oxidação. Este valor de 85% de U.R. é o limite superior especificado pelas normas utilizadas [38,39]. O termo-higrômetro usado foi um modelo de parede marca SUNDO, com capacidade de aferição de 0 a 50 °C e 0 a 100 % de Umidade Relativa do Ar.

A Figura III.3 mostra um conjunto para teste Tekken (CPT) após o jateamento, antes de receber a pintura de revestimento.

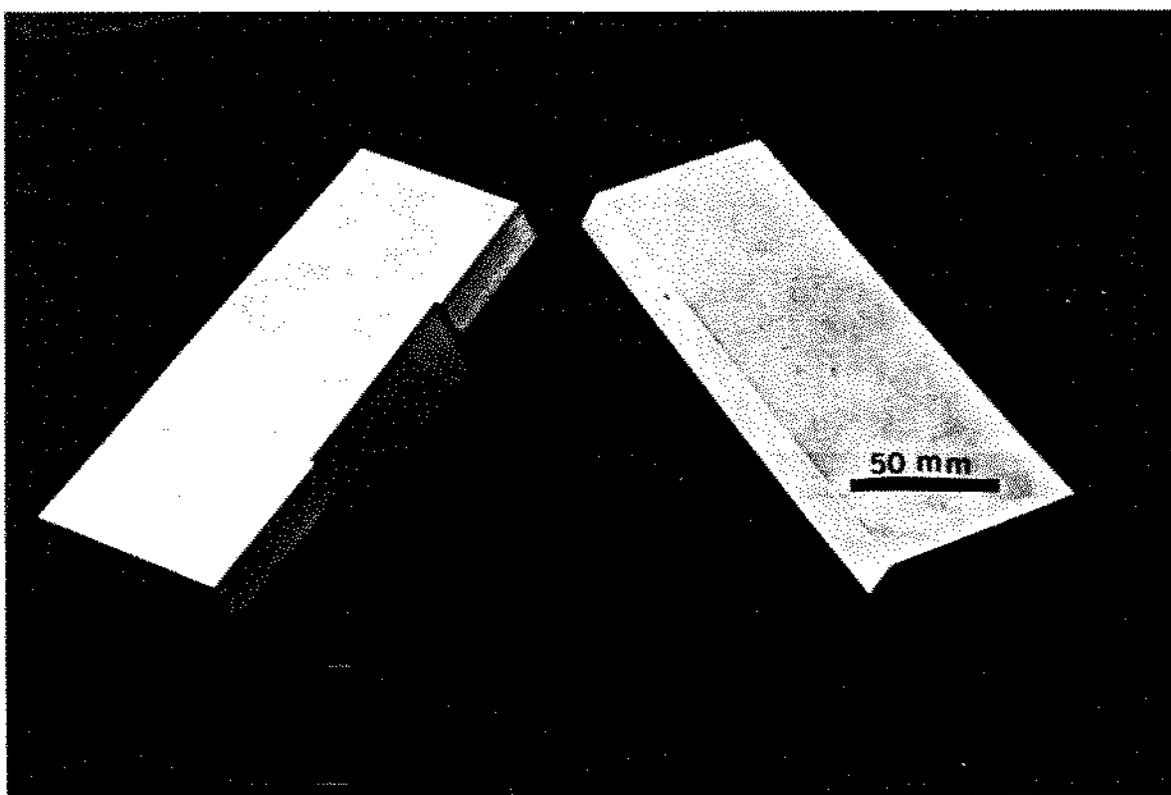


Figura III.3 - Corpo de prova Tekken (CPT) jateado

III.3- SOLDAGEM

III.3.1 - MONTAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A montagem e soldagem dos corpos de prova Tekken (CPT's) foi realizada conforme o seguinte procedimento, o qual inclui a soldagem das restrições:

- A - Posicionamento das partes na mesa de soldagem.
- B - Verificação da abertura do chanfro na área do cordão teste, através de gabarito de cobre com 2,2 mm de diâmetro.
- C - Fixação das partes através de grampos.
- D - Execução da soldagem do 1° passe das soldas de restrição, lado anterior do corpo de prova.
- E - Execução da soldagem do 1° passe das soldas de restrição do lado posterior do C.P., após virar e refixar o conjunto.
- F - Execução da soldagem do 2° e último passe das soldas de restrição do lado anterior, após virar e refixar o conjunto.
- G - Execução da soldagem do 2° e último passe das soldas de restrição do lado posterior, após virar e refixar o conjunto.
- H - Verificação da abertura do chanfro em "Y" oblíquo através de gabarito de cobre tipo "Passa-não-Passa" com extremidades de 2,2 e 1,8 mm de diâmetro.

A fixação do conjunto durante a execução da soldagem das restrições, assim como a alternância de lados foram medidas tomadas para evitar o possível empenamento do conjunto montado.

Um esquema desse procedimento é mostrado, de forma esquemática, na Figura III.4.

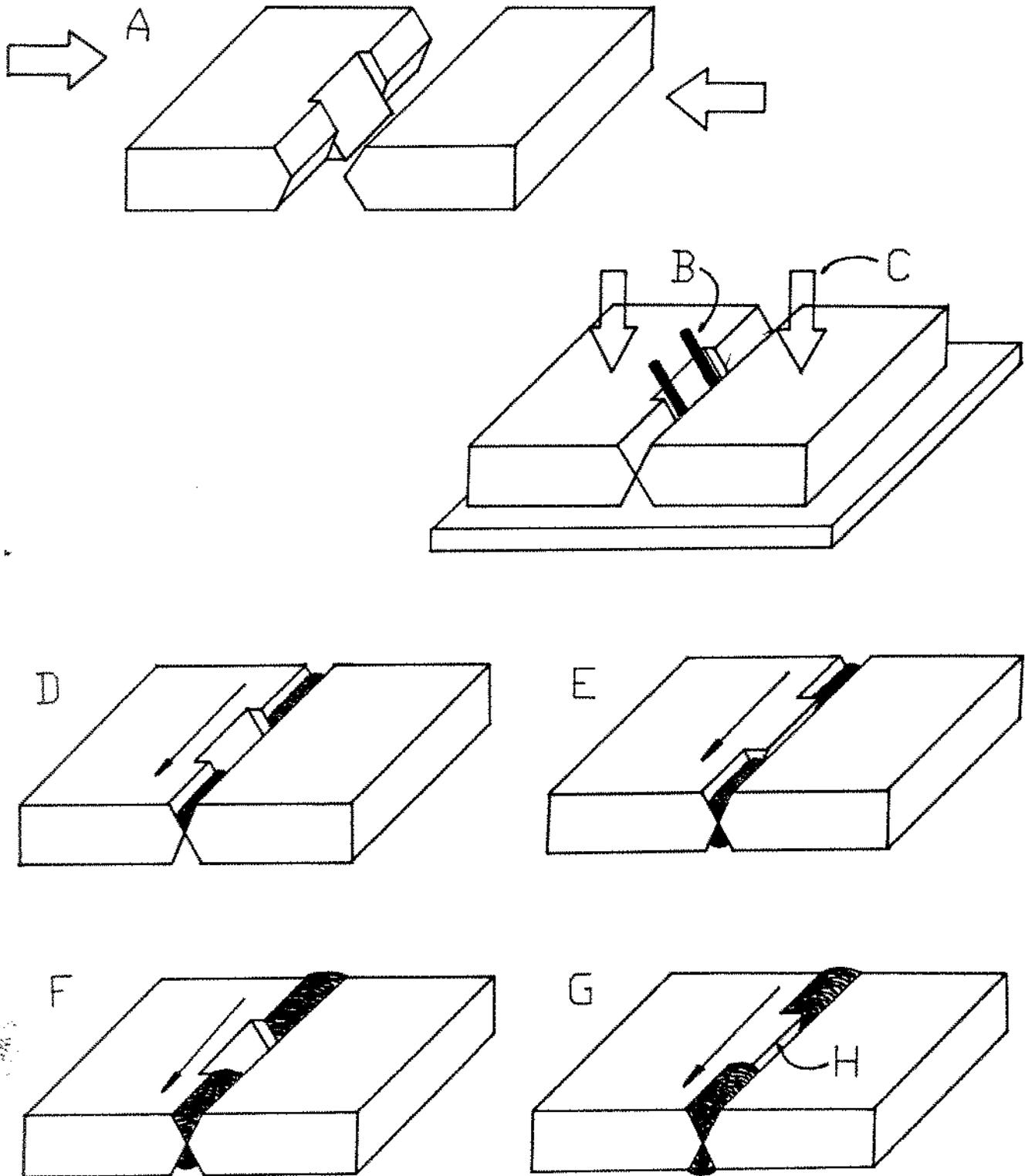


Figura III.4 - Procedimento utilizado na montagem dos CPT's

III.3.2 - CARACTERÍSTICAS E PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem utilizado na execução das soldas de restrição e dos cordões teste foi o Processo a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SAER). A fonte empregada na soldagem foi uma retificadora ESAB - LHE-250. Para possibilitar o controle dos níveis de corrente e tensão, foi utilizado um "shunt" (derivação com voltímetro e amperímetro interligados) acoplado à fonte retificadora. Os parâmetros de soldagem foram determinados, dentro da faixa especificada pelo fabricante dos eletrodos, através de soldagem preliminar de corpos de prova com a maior espessura de revestimento prevista (110 ± 15 mm) e corpos de prova sem revestimento nas mesmas condições. Os parâmetros determinados nestes ensaios preliminares, os quais foram então usados como condições de soldagem de todos os corpos de prova, estão apresentados na Tabela III.6.

Tabela III.6 - Condições de soldagem dos corpos de prova

CORRENTE (Ampéres)	150
TENSÃO (Volts)	22-25
VELOCIDADE DE SOLDAGEM (MM/MIN)	118
INSUMO DE CALOR (Kj/mm)	1,90

A soldagem foi realizada utilizando-se corrente contínua, polaridade inversa. A posição de soldagem foi a posição plana. O parâmetro "velocidade de soldagem" foi levantado através de um valor médio cronometrado na execução das respectivas soldas, tendo sido estas realizadas por um único soldador. O ritmo de

soldagem definido nos ensaios preliminares foi seguido como padrão na realização das soldas.

Os eletrodos AWS-E-7018-G de diâmetro 4 mm, utilizados na soldagem tanto dos cordões teste como das restrições, foram ressecados durante 1:20 Hs a 450 °C em estufa e retirados imediatamente antes do início da soldagem, garantindo assim um teor de hidrogênio difusível menor do que 5 ml/ 100 g , que é considerado como um teor muito baixo [20,26].

Os únicos parâmetros variáveis na realização da soldagem foram o tipo e espessura do revestimento dos corpos de prova. Para cada condição foram soldados 3 cordões teste. Os cordões teste foram soldados em grupos de 5 unidades para facilitar a repetibilidade em relação à velocidade de soldagem, sendo confeccionados no total 21 cordões para 7 condições diferentes de revestimento. A Figura III.5 ilustra os corpos de prova utilizados nos ensaios, com as respectivas soldas de restrição.

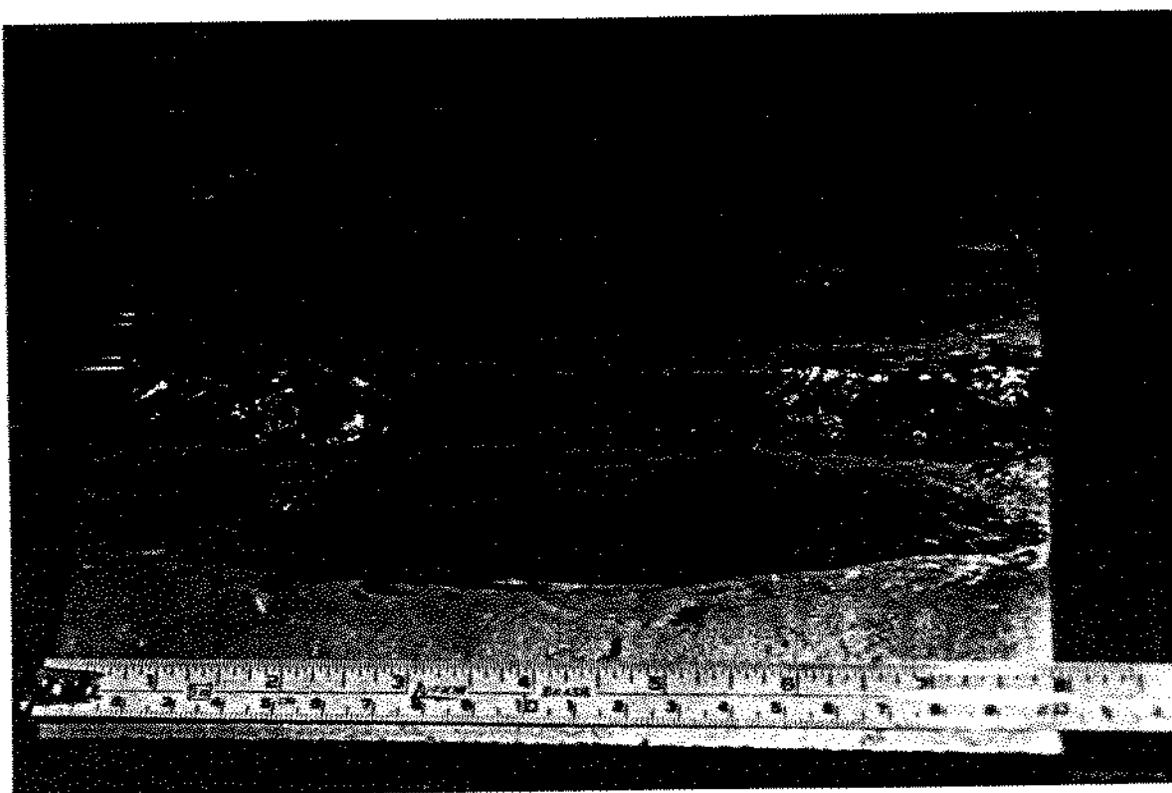


Figura III.5 - Corpo de Prova utilizado nos ensaios Tekken (CPT).

III.4 - ANÁLISE DOS CORDÕES DE SOLDA

III.4.1 - ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DAS TRINCAS SUPERFICIAIS

Quarenta e oito horas após a realização da soldagem dos cordões teste, os mesmos foram limpos, retirando-se a escória com picador de solda e escova de aço manual. O prazo de quarenta e oito horas é o limite superior de ocorrência das trincas a frio [19,20].

Para análise e medição das trincas superficiais foi utilizado um estereoscópio com aumento de até 50 vezes. O estereoscópio usado possuía iluminação auxiliar, tendo adaptada também uma base com mesa móvel micrometrada, possibilitando assim a realização das medidas dos comprimentos das trincas. Os cordões teste foram preparados para análise através de limpeza com removedor e jato de ar comprimido. Inicialmente foi realizada inspeção e análise visual seguida de inspeção e análise por líquido penetrante, porém, a irregularidade superficial do cordão mascarou a visualização das trincas e por esse motivo o método de análise por líquido penetrante foi considerado impróprio e conseqüentemente foi abandonado. A análise visual com o estereoscópio mostrou-se extremamente eficaz, possibilitando a perfeita distinção das trincas superficiais. O método empregado para medição das trincas foi o especificado no Capítulo II, item II.4.4.

III.4.2 - ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DAS TRINCAS DE SEÇÃO

Após analisadas as trincas superficiais, foram extraídas 5 seções transversais de cada cordão teste dos CPT's,

totalizando 105 corpos de prova (CP's) para análise e quantificação das trincas de secção ou trincas transversais.

III.4.2.1 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

III.4.2.1.1 - CORTE

Os cortes, para retirada dos cordões teste na medida de 25 x 30 x 80 mm, foram realizados em uma serra mecânica e os cortes para retirada das 5 secções de 25 x 30 x 10 mm (CP's) foram realizados em uma serra de disco tipo "cut-off". A Figura III.6 ilustra, esquematicamente, o seccionamento das amostras.

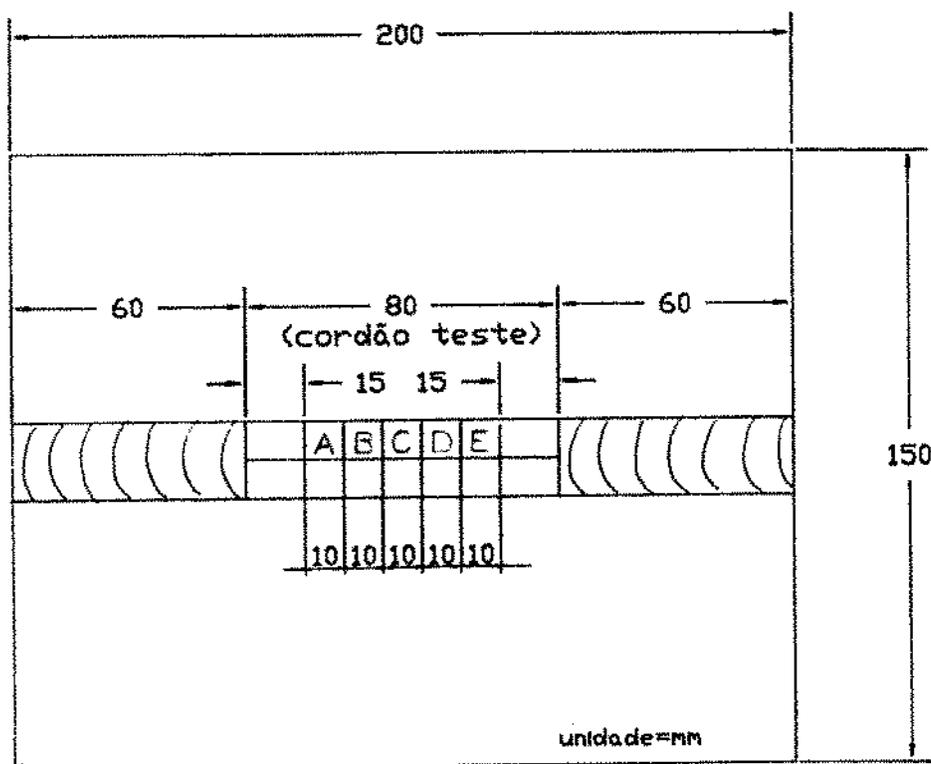


Figura III.6 - Esquema de retirada das seções transversais dos cordões teste.

III.4.2.1.2 - METALOGRAFIA

Após o corte, cada corpo de prova com dimensão de 25 x 30 x 10 mm (CP) foi polido metalograficamente, sendo utilizadas lixas 120, 220, 320, 400, 600 e 1.200, nesta ordem. Em seguida foi utilizada pasta de diamante nas granulometrias de 6 μ m e finalmente de 1 μ m. O ataque metalográfico após o polimento foi realizado com reagente de Nital 2%, durante 17 segundos.

III.4.2.2 - ANÁLISES

III.4.2.2.1 - MICROSCOPIA ÓTICA

Todos os CP's foram analisados em um banco metalográfico CARL ZEISS, modelo Neophot-32, tipo invertido (luz refletida) com lâmpadas Xe-15 a 22V / 150 W ou Alógena-5 a 12 V / 100W com capacidade de ampliação de 10 a 2.000 X.. As trincas de secção foram então quantificadas e medidas conforme especificado na norma JIS-3158-Z66 e descrito no Capítulo II, item II.4.4. Foram analisadas também as microestruturas do metal de solda (MS) e da zona afetada pelo calor (ZAC) e a localização das trincas quanto ao início e direção de propagação.

III.5.2.2.2 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA

Sete amostras trincadas (CP's) representativas de cada condição de revestimento foram cortadas nas dimensões de 10 x 30 mm com 5 mm de espessura. As superfícies foram repolidas com pasta de diamante nas granulometrias de 6, 1 e 0,25 μ m e então

realizado novo ataque metalográfico com Nital 2 % durante 8 segundos.

Em seguida foi realizada microanálise para verificação dos níveis de concentração de chumbo (Pb) e zinco (Zn), os quais compõem os pigmentos das tintas aplicadas no revestimento. Para tanto utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura marca CAMBRIDGE, modelo STEREOSCAN - S-4-10 com sistema de microanálise por energia dispersiva marca LINK - 890. Foram feitas imagens normais por elétrons secundários e imagens de raios x. O diâmetro médio do feixe incidente foi de 2 μ m.

Foram verificadas, principalmente, as regiões imediatamente adjacentes às trincas. Todas as inclusões presentes nessas regiões foram analisadas através do sistema de microanálise (Microsonda), procurando-se investigar a possível presença de Zinco ou Chumbo.

III.4.2.2.3 - ANÁLISE QUÍMICA

A fim de se proceder a uma análise qualitativa da presença de Zinco (Zn) e Chumbo (Pb) nos CP's, foi utilizada a técnica de espectrometria fluorescente de raios x. Cada amostra para essa análise era composta de 5 seções dos cordões teste, extraídas dos CP's através de corte em serra de disco tipo "cut-off" (apenas seções do metal de solda). Foram analisadas 21 amostras no total, sendo 3 de cada condição de revestimento.

O equipamento empregado para essa análise qualitativa foi um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X a vácuo marca PHILIPS - Modelo PW-1410, utilizando cristal LIF-200. As condições de excitação foram 45 KV e 40 MA. O detetor usado foi um contador

de fluxos (Fluxocounter).

A análise quantitativa do Chumbo foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica. O equipamento utilizado foi um Espectrofotômetro de Absorção Atômica marca VARIAN - Modelo AA-1475 de feixe duplo, com lâmpada de 5 mA. A chama foi composta de Acetileno-Ar e a estequiometria oxidante.

A análise quantitativa do Zinco foi realizada pela mesma técnica anterior, utilizando-se um espectrofotômetro marca PERKIN-ELMER - Modelo 5.100. As amostras líquidas para ambas as análises de Zinco e Chumbo foram originadas das seções de cordões teste extraídas dos CP's, atacadas com ácido nítrico. Foram analisadas 7 amostras para cada elemento, sendo cada uma dessas amostras referente a um mesmo sistema de revestimento.

Foi realizada, ainda, análise química quantitativa para verificação da presença de Oxigênio (O) e Nitrogênio (N) nos cordões de solda. Para tanto foi utilizado um Analisador Automático Simultâneo marca LEYBOLD-HERAEUS - GMHB - modelo NOA-2003, com escala de 0-4.000 ppm (N) e 0-2.000 ppm (O), resolução de 0,1 ppm por canal. O gás de carregamento usado foi Hélio 99,99% com pressão de 2-4 bar e ciclo de análise de 60 segundos.

As amostras para a análise simultânea foram preparadas a partir das seções dos cordões teste extraídas dos CP's. Os tamanhos das amostras foram padronizados em quadrados de 5 x 5 mm com peso entre 0,4 e 0,7 gramas.

IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados durante o desenvolvimento do presente trabalho. Sempre que oportuno, os resultados são expostos também de forma gráfica, de maneira a facilitar a visualização e análise.

Durante todo o decorrer deste capítulo, em qualquer momento ou fato discutido, devem estar presentes as seguintes considerações:

- Todos os corpos de prova (CPT's) foram soldados pelo mesmo processo;
- O metal base e o metal de solda foram os mesmos para todos os CPT's;
- As condições de soldagem foram mantidas constantes para a execução da soldagem de todos os CPT's;
- A quantidade de hidrogênio absorvido foi a mesma para todos os CPT's, em função dos procedimentos utilizados;
- A única variável para os CPT's foi o tipo de revestimento superficial.

A Tabela IV.1 apresenta, de forma simplificada, todos os cordões obtidos nos experimentos, por tipo de revestimento aplicado. São apresentadas, também, as siglas utilizadas para descrever os tipos de revestimento e suas respectivas espessuras. Estas siglas serão utilizadas diversas vezes, doravante, nas tabelas e nos textos.

Tabela IV.1 - Quadro resumo dos cordões teste obtidos nos experimentos e das siglas dos revestimentos

TIPO DE REVESTIMENTO	SEM REVESTIMENTO	TINTA EPÓXI ÓXIDO DE FERRO												TINTA DE ZINCO ETIL SILICATO + ZARCÃO EPOXI ÓX.Fe.							
		20±10			40±10			60±10						50±15			80±15		110±15		
SIGLA USADA	SR	E-20			E-40			E-60						ZE-50			ZE-80		ZE-110		
No.DO CORDÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

IV.1 - TRINCAS SUPERFICIAIS

Conforme especificado no capítulo III, item 4.2 e mostrado na Tabela IV.1, foram obtidos 21 cordões teste, sendo 3 cordões para cada condição de revestimento utilizada.

Não foram observadas trincas superficiais em nenhum dos cordões teste, quer na inspeção visual, quer na inspeção com auxílio do estereoscópio. Ensaios preliminares mostraram que para mais altas velocidades de soldagem (em torno de 140 mm/min), mantidas a voltagem e a amperagem e conseqüentemente com diminuição do insumo de calor, ocorreram trincas superficiais de grande extensão, principalmente nos cordões de solda executados sobre superfícies revestidas. Quanto maiores as espessuras dos revestimentos, maiores as trincas superficiais. Essas trincas compreendiam toda a altura do cordão, ou seja, quando observadas em seção transversal eram trincas totais, iniciando na raiz e se propagando até a superfície do cordão. Otimizadas as condições de soldagem, as trincas superficiais foram eliminadas nos corpos de prova experimentais.

A não ocorrência de trincas superficiais em nenhum

dos cordões teste executados deve-se, provavelmente, à otimização das condições de soldagem, condições estas que permitiram a volatilização da tinta e eliminação dos gases formados.

IV.2 - TRINCAS DE SEÇÃO

Como resultado dos cortes efetuados nos cordões teste, descritos no Capítulo III, item 4.2.1.1, foram obtidos 105 corpos de prova para análise das trincas de seção.

A análise e medição das trincas de seção, executadas como especificado no Capítulo II, item 4.4, forneceu os resultados que são apresentados, de forma individual para cada corpo de prova (CP), na Tabela IV.2. Essa tabela também mostra os valores da Média (\bar{x}) e Desvio Padrão (\hat{S}) dos tamanhos das trincas de seção para cada tipo de revestimento, calculados pelas equações VIII e IX abaixo [40]:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (\text{VIII}) \quad \hat{S} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot n}{n - 1}} \quad (\text{IX})$$

onde: x_i = valor da i-ésima medida

n = número de medidas

Como pode ser notado na Tabela IV.2, os maiores valores médios dos tamanhos das trincas de seção foram observados nos cordões revestidos com Zinco Etil + Epoxi com espessura de 80 μm (ZE-80) e nos cordões sem revestimento (SR), respectivamente. O menor valor médio observado foi nos cordões revestidos com Zinco Etil + Epoxi com espessura de 110 μm (ZE-110).

Tabela IV.2 - Tamanho das trincas de seção (% da altura do cordão)
para os diversos tipos de revestimento superficial dos CP's

AMOSTRA		TIPO DE REVESTIMENTO						
		SR	E-20	E-40	E-60	ZE-50	ZE-80	ZE-110
C O R D Ã O 1	A	43	35	32	0	8	48	5
	B	31	38	20	4	0	18	0
	C	34	30	25	31	0	32	0
	D	20	35	25	11	29	39	27
	E	34	44	26	24	15	48	27
C O R D Ã O 2	A	40	22	28	4	0	0	0
	B	43	44	31	4	0	38	2
	C	27	43	26	7	0	13	0,4
	D	23	27	26	0	0	19	0,4
	E	39	0	50	0	31	47	2,3
C O R D Ã O 3	A	40	27	0	40	31	28	0
	B	27	15	0	4	30	8	7
	C	27	43	0	29	25	33	27
	D	32	21	0,6	39	15	52	48
	E	0	0	10	33	0	56	7
\bar{X}		30,6	28,2	20,0	15,3	12,3	32,0	10,2
\hat{S}		11,1	14,6	14,8	15,0	13,4	17,2	14,8

Os valores de desvio padrão (\hat{S}) são, praticamente, os mesmos para todos os sistemas de revestimento, com exceção do sistema SR que tem o menor desvio (11,1) e do sistema ZE-80 com o maior desvio em relação ao valor médio (17,2). Estes dois sistemas apresentam, também, os maiores valores médios de tamanho de trincas. Isto é justificável pois, para soldagem dos CPT's

revestidos, uma maior amperagem em conjunto com uma menor velocidade de soldagem facilitam a volatilização das tintas e expulsão dos gases produzido da poça de solda gerando, por conseguinte, uma solda de execução mais fácil e de melhor qualidade final. No caso dos CPT's sem revestimento, são necessárias uma menor amperagem e maior velocidade de soldagem para que se consiga uma solda de boa qualidade [36].

Assim, foi selecionada para os experimentos do presente trabalho uma condição de soldagem intermediária onde se obteve, para ambas as condições de revestimento dos CPT's, soldas de boa qualidade, com baixo nível de respingos, com boa penetração e homogeneidade do cordão.

Na análise da Tabela IV.2, pode-se perceber uma tendência decrescente do valor médio dos tamanhos das trincas de seção (\bar{x}) com o aumento da espessura do revestimento dos CPT's, independente do tipo de revestimento. Essa tendência é, possivelmente, devida ao insumo de calor utilizado, o qual favoreceu os CPT's com revestimento de maior espessura, volatilizando a tinta e evitando desta forma a presença de gases prejudiciais à solda.

O sistema ZE-80 é a única exceção daquela tabela, não seguindo aquela tendência e tendo apresentado o maior valor médio de tamanho das trincas. Não foi possível explicar o motivo dessa exceção para o caso do sistema ZE-80. O teste Tekken foi repetido para essa condição de revestimento e a média de tamanho das trincas se manteve.

Constatada a tendência decrescente das médias \bar{x} (médias dos tamanhos das trincas de seção) com o aumento da espessura dos revestimentos dos CPT's e verificada a exceção no sistema ZE-80, foi desenvolvido um tratamento estatístico dos

resultados obtidos, utilizando-se análise de variância para experimentos de um fator [40]. A fim de simplificar o desenvolvimento, foi montada uma tabela com os resultados obtidos para os tamanhos das trincas (tabela de experimento de um fator), em cada cordão teste (repetições "b"), para cada sistema de revestimento (tratamentos "a").

Tabela de experimento de um fator

Tipo de Revestimento	Tamanho(%) p/cordão			τ_j	τ_j^2
	1	2	3		
ZE-110	12	1	18	31	961
ZE-80	38	24	36	98	9.604
ZE-50	10	6	20	36	1.296
E -60	14	4	30	48	2.304
E -40	26	32	2	60	3.600
E -20	36	28	22	86	7.396
S R	32	34	26	92	8.464
$\sum x_{jk}^2 = 12.557$				451	33.625

Onde $\tau_j = \sum x_{jk}$.

Formulada a hipótese H_0 de não haver diferença entre os tratamentos, ou seja, de a influência do tratamento superficial no aço estudado não ser significativa para efeito de formação de trincas a frio, foram executados os cálculos das variações total (V), entre tratamentos (Vb) e interior aos tratamentos (Vw):

$$V = \sum_{j,k} x_{jk}^2 - \frac{\tau_j^2}{ab} \quad \therefore V = 12.557 - \frac{(451)^2}{7 \times 3} = 2.871$$

$$V_b = \frac{1}{b} \sum_j \tau_j^2 - \frac{\tau^2}{ab} \quad \therefore V_b = \frac{1}{3} (33.625) - \frac{(451)^2}{7 \times 3} = 1.522$$

$$V_w = V - V_b \quad \therefore V_w = 2.871 - 1.522 = 1.349$$

A partir desses resultados, foi construída a tabela de análise de variância e determinado o valor de "F".

Tabela de Análise de Variância

VARIAÇÃO	GRAU DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	F
Entre Tratamentos V _b = 1.522	a - 1 = 6	$\hat{S}_b^2 = \frac{1522}{6} = 254$	$\frac{\hat{S}_b^2}{\hat{S}_w^2} = 2,64$
Interior aos Tratamentos V _w = 1.349	a.(b-1) = 14	$\hat{S}_w^2 = \frac{1349}{14} = 96$	
Total V = 2.871	ab - 1 = 20		

Utilizando-se, então, uma Tabela de "Distribuição F" ao nível de significância de 0,05, encontramos o valor $F_{0,95} = 2,85$ para 6, 14 graus de liberdade. Como $F_{0,95} > F$, a hipótese H_0 não pode ser rejeitada, ao nível de significância de 0,05.

Portanto, os desvios observados em relação às médias dos valores obtidos nos experimentos, não devem ser justificados pelas diferentes condições de revestimento superficial dos corpos de prova.

Ainda, na análise da Tabela IV.2, pode ser verificado

que diversos CP's não trincaram. Assim, no intuito de quantificar as trincas observadas em cada condição de revestimento, foi construída a Tabela IV.3. Por esta tabela, pode-se verificar serem também os sistemas com maior valor médio de tamanho de trinca (ZE 80 e SR) os que apresentaram maior porcentagem de CP's trincados.

Tabela IV.3 -Quantidade de trincas de seção por sistema de revestimento

Tipo de Re-vestimento	SR			E-20			E-40			E-60			ZE-50			ZE-80			ZE-110		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
No. Cordão	5	5	4	5	4	4	5	5	2	4	3	5	3	1	4	5	4	5	3	4	4
Qtd.Trincas	5	5	4	5	4	4	5	5	2	4	3	5	3	1	4	5	4	5	3	4	4
Total	14			13			12			12			8			14			11		
% Trincada	93%			87%			80%			80%			53%			93%			73%		

A tendência observada na Tabela IV.2 quanto ao valor médio do tamanho das trincas de seção foi, praticamente, mantida em relação à quantidade de trincas apresentada na Tabela IV.3. Esta tendência poderia ser explicada, também, pelo insumo de calor, como discutido anteriormente para as médias da Tabela IV.2.

Uma forma de se cruzar as informações obtidas nas tabelas IV.2 e IV.3 é apresentada na Tabela IV.4. Essa tabela mostra, para cada sistema de revestimento, a incidência de trincas por faixa de tamanho percentual, sendo apontados, ainda, as quantidades totais de trincas para cada uma das faixas de tamanho, independente do sistema de revestimento.

Tabela IV.4 - Incidência de trincas de seção por faixa de tamanho percentual para cada sistema de revestimento

TIPO DE REVESTIMENTO		SR	E-20	E-40	E-60	ZE-50	ZE-80	ZE-110	TOTAL P/ FAIXA %
COMPRIMENTO DAS TRINCAS (FAIXA PERCENTUAL)	0 - 10	-	-	2	5	1	1	7	16
	10 -20	-	1	-	1	2	3	3	10
	20 -30	5	4	7	2	2	1	-	21
	30 -40	5	4	2	3	3	4	-	21
	40 -50	4	4	-	1	-	3	1	13
	50 -70	-	-	1	-	-	2	-	3
	70-100	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL DE TRINCAS		14	13	12	12	8	14	11	84

Pela Tabela IV.4, pode-se verificar que a maior incidência de trincas foi observada nas faixas de tamanho entre 20 e 30 % e entre 30 e 40 % do tamanho total da seção transversal do cordão de solda, ambas com 21 CP's trincados. A menor incidência foi observada na faixa entre 50 e 70 % do tamanho da seção (apenas 3 CP's trincados), não tendo sido verificadas trincas nas faixas acima de 70 % em nenhum dos CP's, independentemente do tipo de revestimento.

Estes resultados são apresentados, de forma gráfica, pela Figura IV.1 comparando as trincas ocorridas nos CP's para cada condição de revestimento, em cada faixa de tamanho percentual. As faixas percentuais de tamanho das trincas estão indicadas na Figura IV.1 pelo valor central da faixa, ou seja, o valor 15, por exemplo, indica a faixa de tamanho entre 10 e 20 % da altura total da seção soldada. Verifica-se, na análise da Figura IV.1, que a maior

contribuição para as trincas na faixa de tamanho entre 20 e 30 % vem dos CP's revestidos pelo sistema Epoxi, E-40, com 7 trincas e dos CP's sem revestimento, SR, com 5 trincas. Os CP's sem revestimento também contribuem com o maior número de trincas na faixa de tamanho entre 30 e 40 % (5 trincas) e na faixa entre 40 e 50 % (4 trincas).

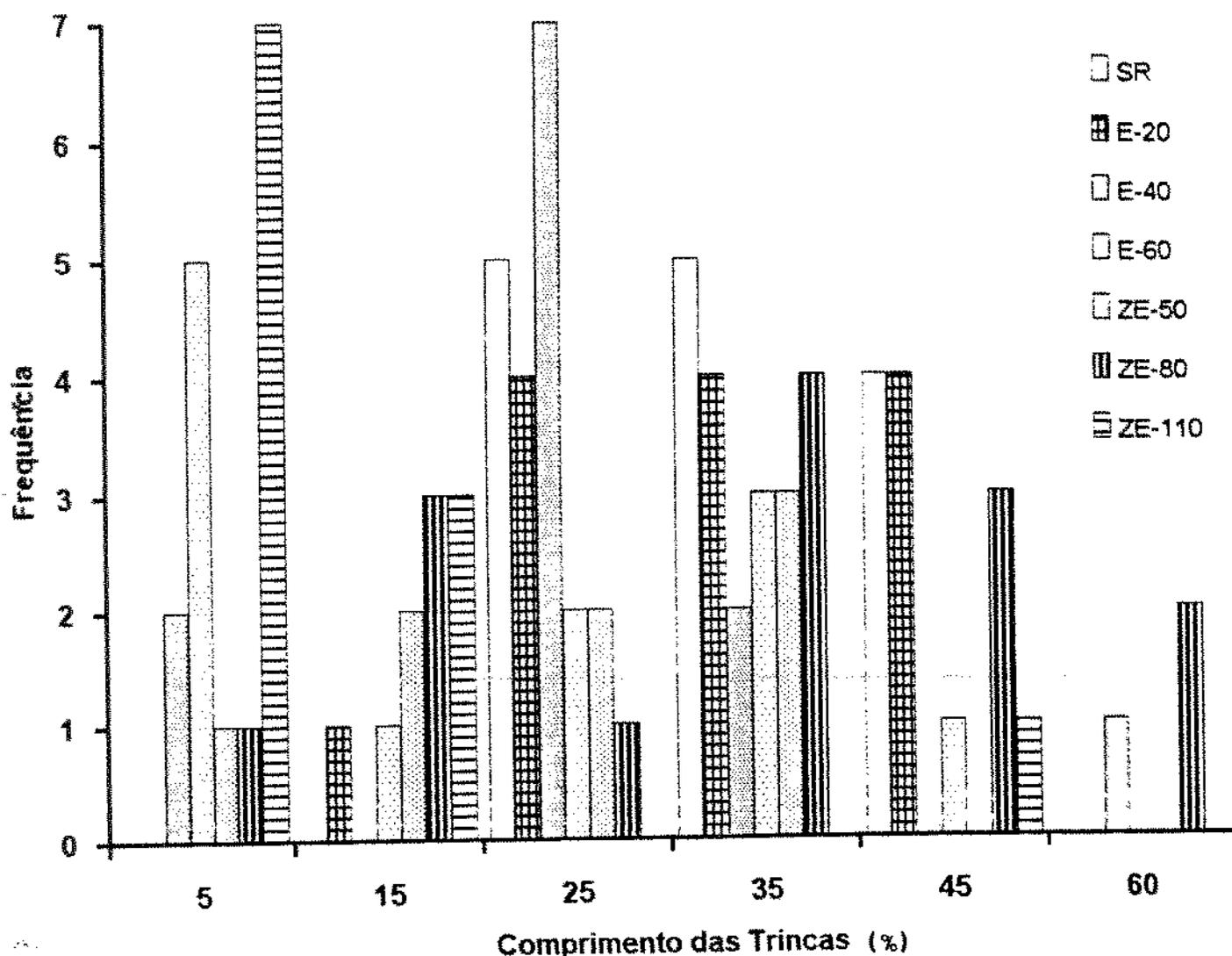


Figura IV.1 - Incidência das trincas por faixa de tamanho (%).
 Comparação entre todos os sistemas

Nota-se ainda, pela análise da Figura IV.1, que a maior incidência de trincas pequenas (na faixa de 0 a 10 %) ocorreu

no sistema ZE-110, justamente o de maior espessura de revestimento.

As trincas de seção foram também analisadas quanto à sua localização no cordão de solda. Os resultados estão sumarizados na Tabela IV.5, onde pode ser verificada a maior incidência de trincas de transição, isto é, trincas que iniciaram na Zona Afetada pelo Calor e se propagaram parcialmente nessa região e parcialmente no Metal de Solda (ZAC/MS), onde se localizaram 34 trincas, independentemente do revestimento. Uma quantidade de trincas pouco menor (30) se localizou completamente na Zona Afetada pelo Calor (ZAC). As trincas localizadas no Metal de Solda (MS) e completamente na Linha de Fusão (LF) ocorreram em igual quantidade (10 trincas em cada região, para um total de 84 trincas observadas). Em geral, as trincas iniciaram exatamente na linha de fusão, tomando quase imediatamente uma outra direção.

Tabela IV.5 - Localização das trincas de seção

TIPO DE REVESTIMENTO	LOCALIZAÇÃO DAS TRINCAS			
	METAL DE SOLDA (MS)	ZONA AFE-TADA PELO CALOR (ZAC)	ZONA AFE-TADA E MS (ZAC/MS)	LINHA DE FUSÃO (LF)
SR	-	7	7	-
E - 20	1	5	7	-
E - 40	-	2	8	2
E - 60	3	2	5	2
Sub-Total E	4	9	20	4
ZE - 50	-	5	2	1
ZE - 80	6	5	3	0
ZE - 110	-	4	2	5
Sub-Total ZE	6	14	7	6
Total Geral	10	30	34	10

As trincas de seção localizaram-se, principalmente, na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) ou iniciando na Zona Afetada pelo Calor e se propagando para o Metal de Solda (ZAC/MS), somando 64 trincas nestas regiões para um total geral de 84 trincas, como mostrado na Tabela IV.5 . A minoria das trincas localizou-se na Linha de fusão (LF) ou completamente no Metal de Solda (MS). Isto vem confirmar ser a Zona Afetada pelo Calor a região preferencial de propagação das trincas a frio em função, principalmente, da microestrutura favorável [6,24]. Otimizadas as condições de soldagem e o tipo de eletrodo a ser utilizado, reduz-se o risco de ocorrência de trincas a frio no Metal de Solda.

Em resumo, pode-se interferir de forma direta na microestrutura formada no metal de solda solidificado, através da adição de elementos de liga e outros componentes via eletrodo e também pela escolha de condições de soldagem adequadas. Quanto à Zona Afetada pelo Calor , não há como interferir diretamente na microestrutura ali formada, a qual será função do metal base, do insumo de calor e da taxa de resfriamento.

Nas Figuras IV.2 -a , IV.2 -b, IV.2 -c e IV.2 -d são mostradas, respectivamente, macrografias representativas de trincas localizadas no Metal de Solda (MS), na Zona Afetada pelo Calor (ZAC), iniciando na Zona Afetada e se propagando na Zona Afetada e daí para o Metal de Solda (ZAC/MS) e na Linha de Fusão (LF).

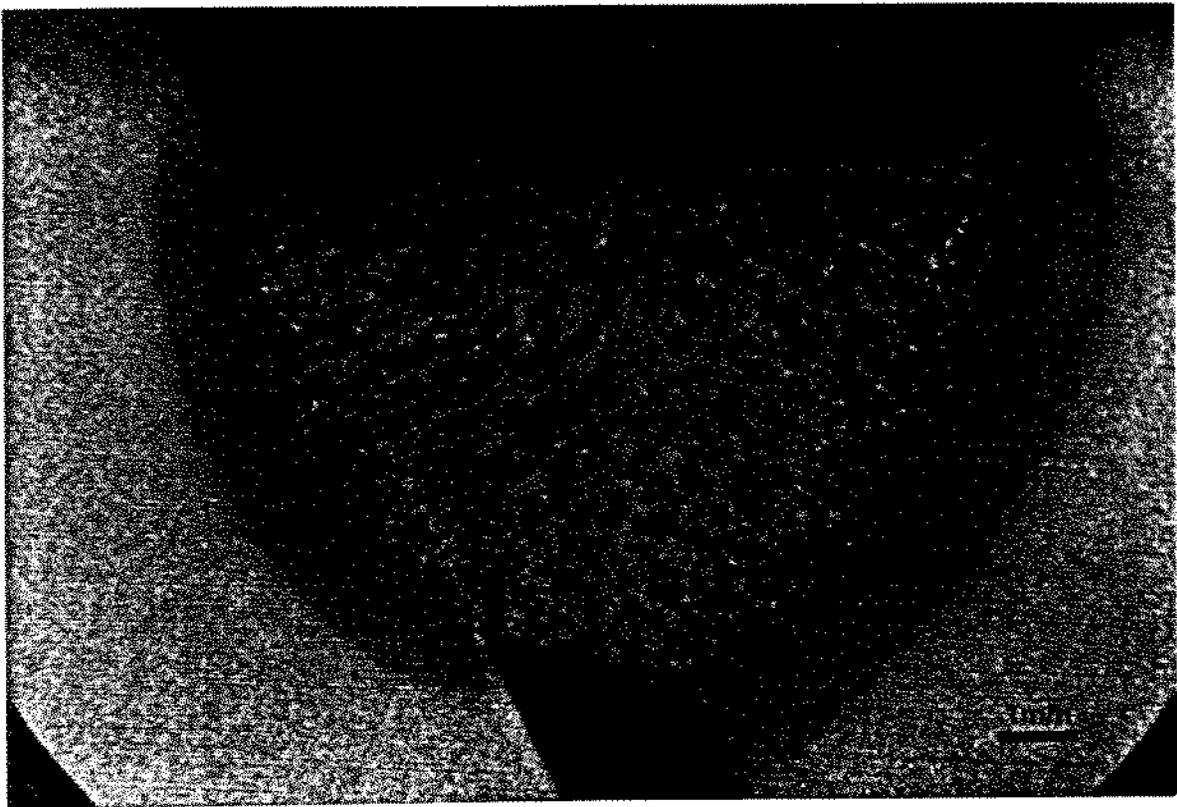


Figura IV.2 -a - Trinca de seção no Metal de Solda (MS).

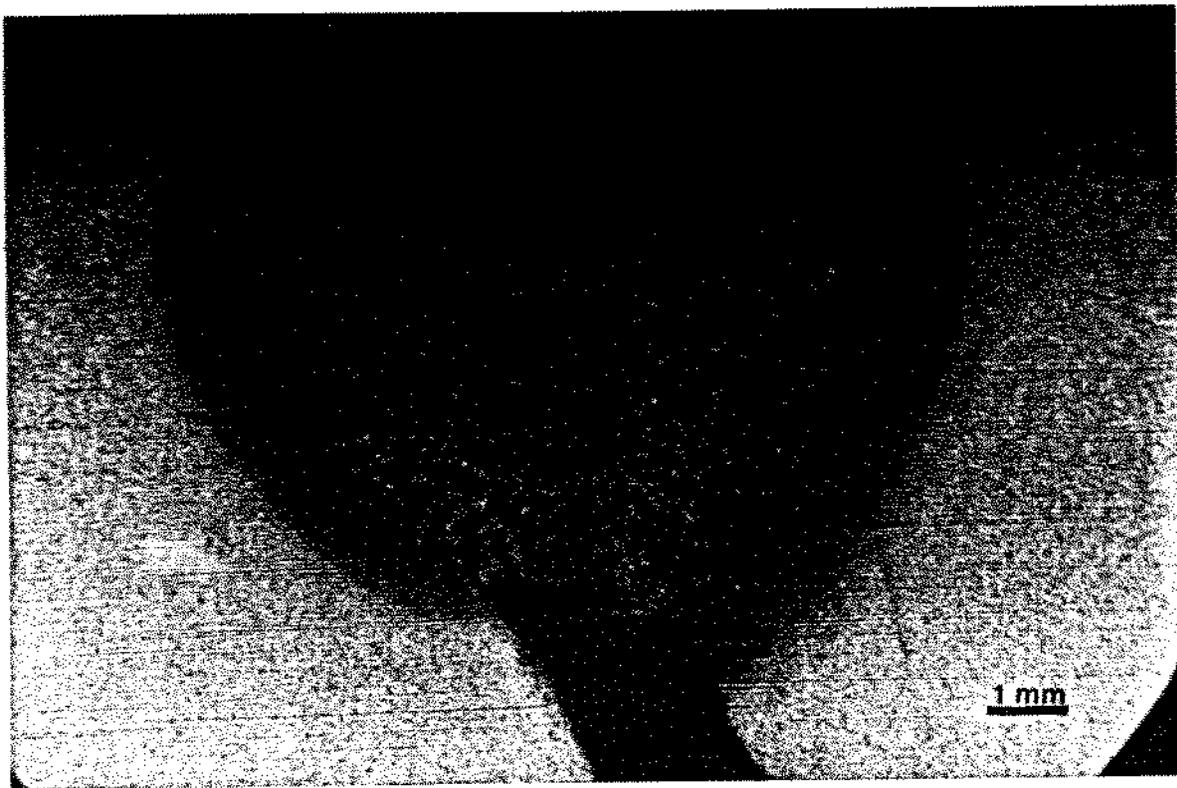


Figura IV.2-b - Trinca de seção na Zona Afetada Pelo Calor (ZAC)

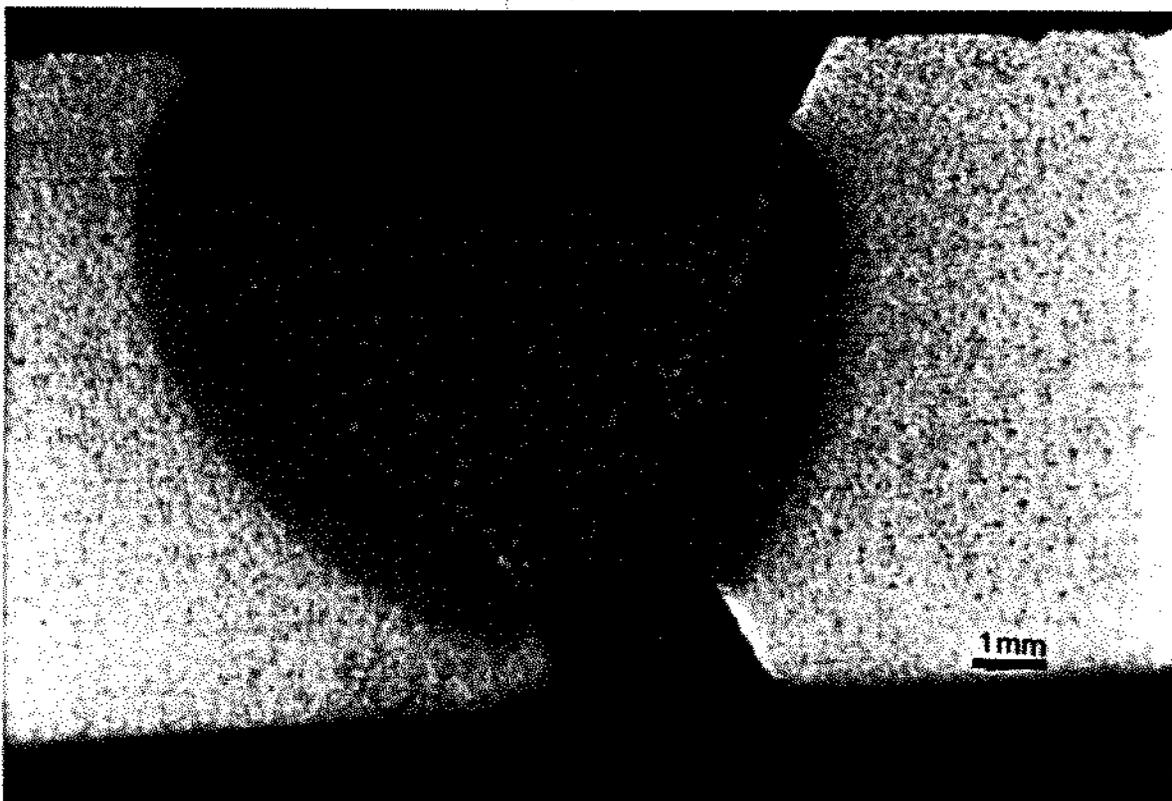


Figura IV.2 -c -Trinca de Seção na ZAC e no Metal de Solda (ZAC/MS)

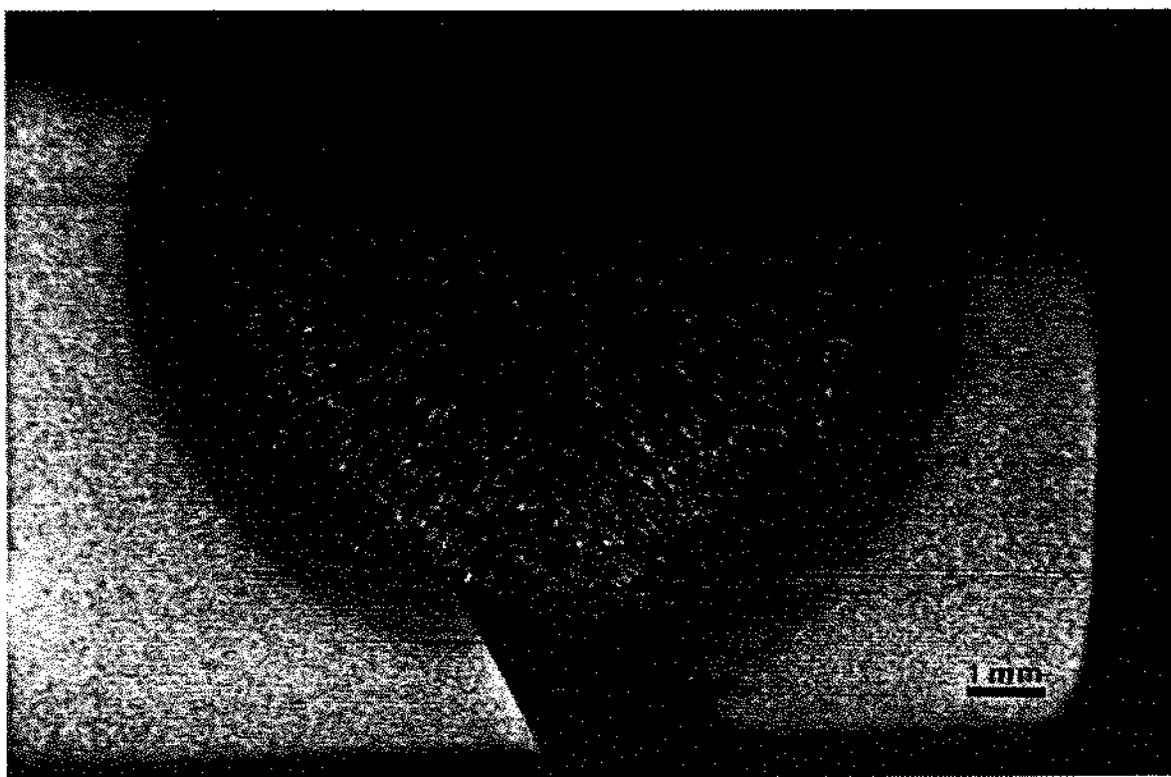


Figura IV.2 -d -Trinca de Seção na Linha de Fusão (LF).

Um resumo das localizações das trincas de seção ocorridas nos CP's é apresentado na Figura IV.3. São mostradas as quantidades de trincas em cada região, por sistema de revestimento e os respectivos totais.

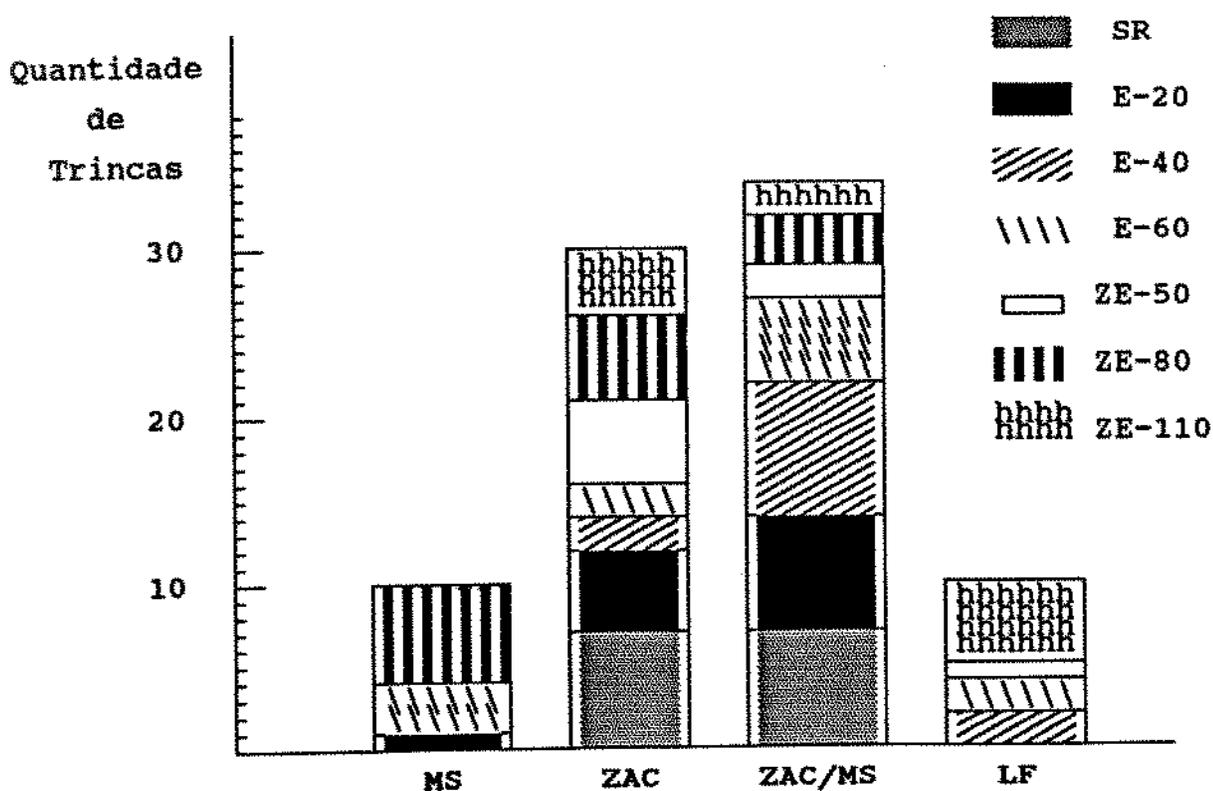


Figura IV.3 - Distribuição das Trincas de Seção por Região

IV.3 - MICROESTRUTURA

IV.3.1 - MICROSCOPIA ÓTICA

A verificação por microscopia ótica de todos os CP's demonstrou não haver variação significativa nas microestruturas formadas, tanto na Zona Afetada pelo Calor quanto no Metal de Solda, independentemente dos tipos de revestimentos executados.

A Figura IV.4 apresenta uma ilustração representativa das microestruturas formadas nas diversas regiões da zona soldada

dos CP's, regiões essas que são caracterizadas a seguir:

-Figura IV.4 - (a) - METAL BASE - Constituído de Ferrita Poligonal e Perlita. Apresenta pequenas inclusões de Sulfeto de Manganês

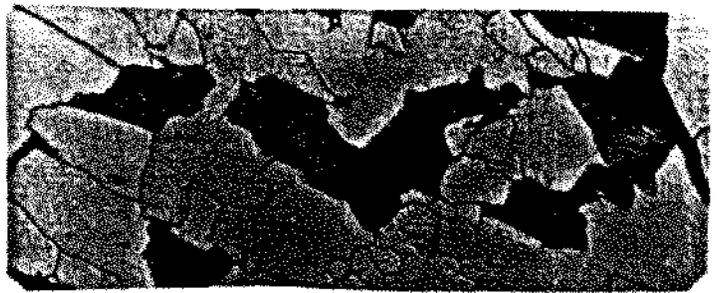
-Figura IV.4 - (b) - ZONA AFETADA PELO CALOR DE GRÃOS REFINADOS - Constituída de Ferrita e Martensita de Grão Fino. Apresenta, ainda, partículas irregulares de Carbetos (Cementita).

-Figura IV.4 - (c) ZONA AFETADA PELO CALOR DE GRÃOS GROSSEIROS - Constituída de Martensita de grão grosso. Apresenta algumas áreas de Bainita nos contornos de grão, provavelmente Bainita Inferior.

-Figura IV.4 - (d) - LINHA DE FUSÃO - Esta região de transição é constituída, basicamente, de Martensita e Ferrita Acicular.

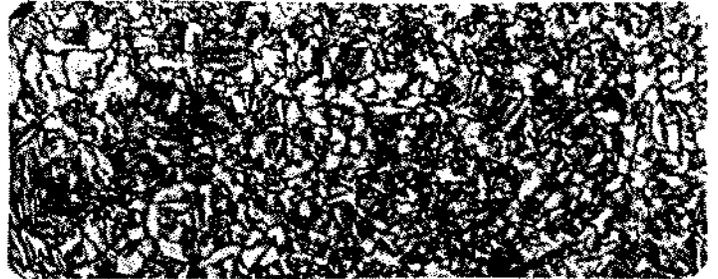
-Figura IV.4 - (e) METAL DE SOLDA - Constituído, predominantemente, de Ferrita Acicular, apresentando algumas regiões de Ferrita de Contorno de Grão e Ferrita de Crescimento Lateral.

A menor ocorrência de trincas no Metal de Solda (Tabela IV.5) deve-se, principalmente, à microestrutura ali formada, ou seja, à predominância da Ferrita Acicular. A Ferrita Acicular é a microestrutura mais desejada pois propicia excelente combinação de resistência e tenacidade [19,41,42]. Essa característica deve-se, em grande parte, ao seu pequeno tamanho de grão e contornos de pequeno ângulo, fatores que dificultam a propagação de trincas [19,41].



a

10 μ m



b

10 μ m



c

10 μ m



d

10 μ m



e

10 μ m

Figura IV. 4 - Microestruturas típicas da região soldada independente do sistema de revestimento

A grande incidência de trincas observada na Zona Afetada pelo Calor deve-se, principalmente, à fragilidade da microestrutura ali formada. Como apresentado no Capítulo IV, esta região é constituída, essencialmente, de Martensita de grão grosso. A fragilidade da Martensita se deve à alta tensão local provocada pela transformação Austenita -Martensita [6]. Os maiores tamanhos de grão também são prejudiciais à tenacidade, pois os contornos são regiões propícias à propagação de trincas [42].

A ocorrência de trincas não se restringiu a nenhum padrão determinado de comportamento em relação à macro ou à microestrutura. Ocorreram trincas que se propagaram pelos contornos de grãos colunares do metal de solda (intergranulares), assim como outras trincas se propagaram através dos grãos colunares do metal de solda (transgranulares). As figuras IV.5 -(a) e IV.5 -(b) mostram a macro e a microestrutura de uma trinca no Metal de Solda que se propagou de forma intergranular. As Figuras IV.6 -(a) e IV.6 -(b) mostram, da mesma forma uma trinca no Metal de Solda que se propagou de forma transgranular.

Pode-se observar pela Figura IV.5 -(b) que os grãos colunares favorecem a propagação intergranular das trincas, em função da grande extensão de contornos de grãos livres e por serem os contornos de grãos colunares regiões de segregação. Quando se propagando transgranularmente pelo Metal de Solda, as trincas parecem ter seguido a direção de inclusões ou microporos alinhados, como pode ser observado na Figura IV.6 -(b).

As Figuras IV.7 - (a) e IV.7 -(b) ilustram, respectivamente, a macro e a micrografia de uma trinca localizada na Zona Afetada pelo Calor, que se propagou de forma intergranular e transgranular.

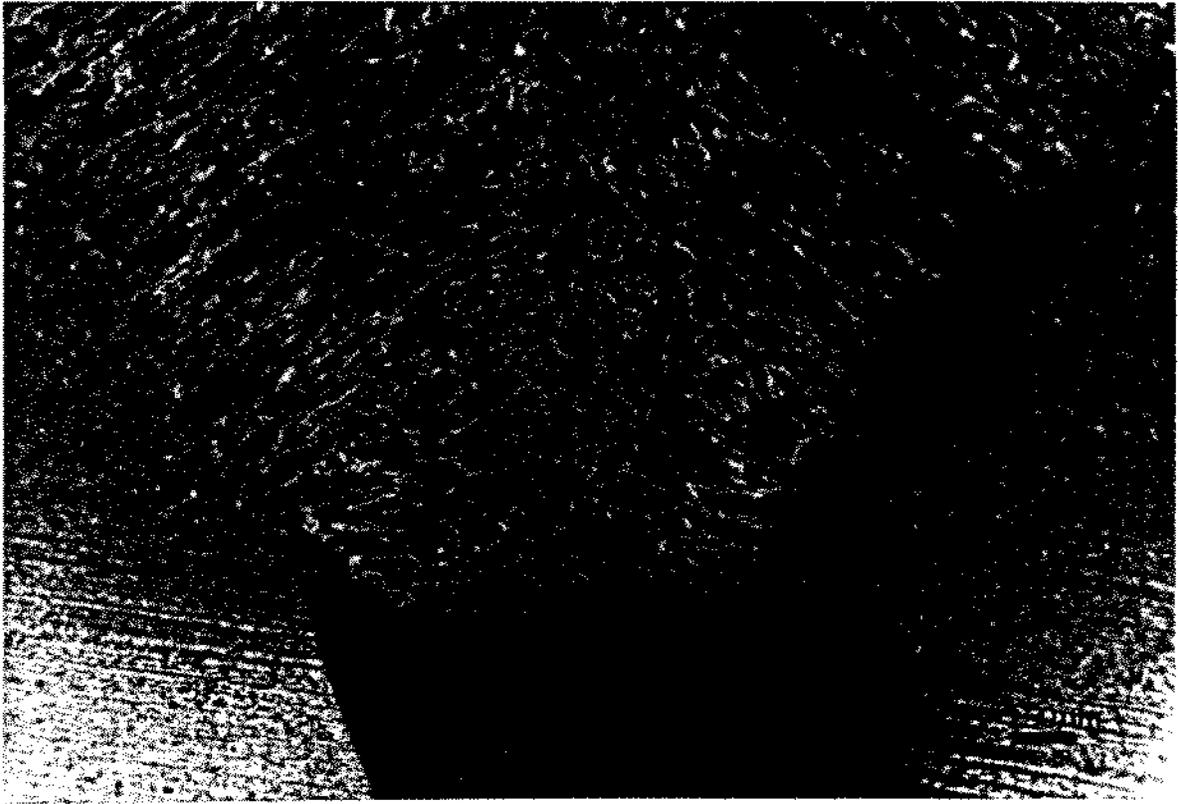


Figura IV.5 -(a) - Macrografia de uma Trinca Intergranular no Metal de Solda (MS).

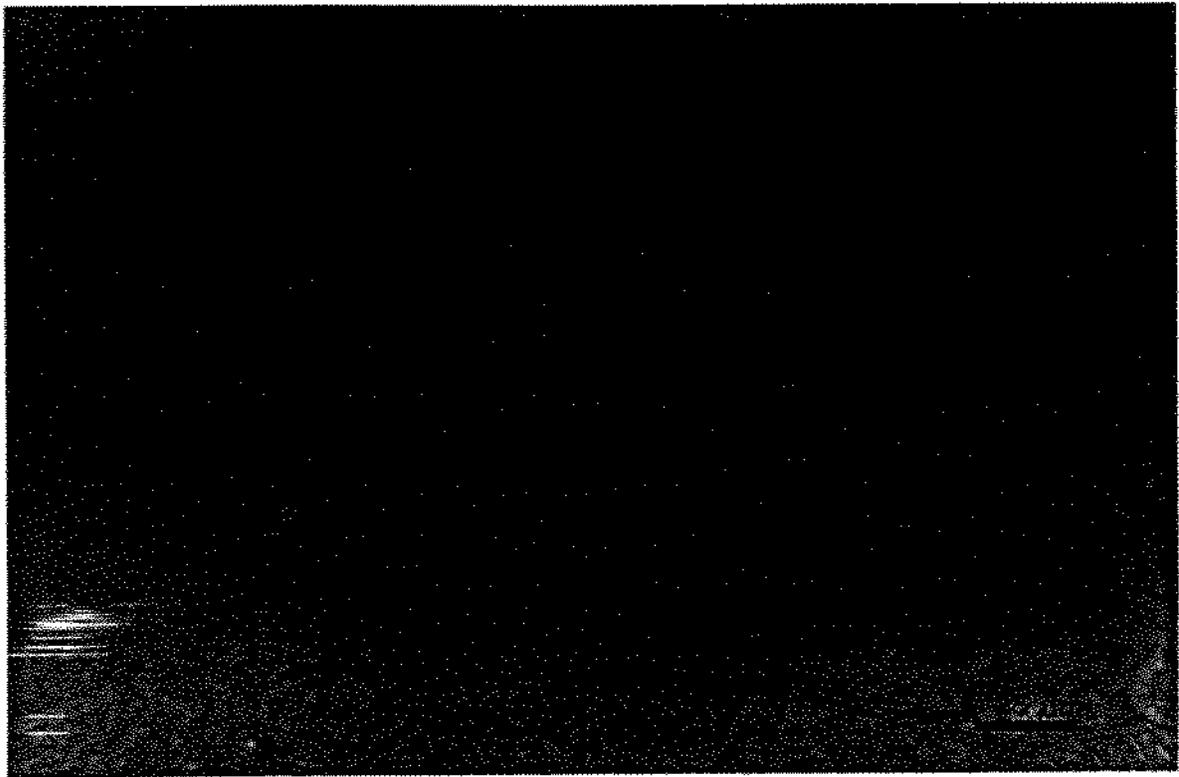


Figura IV.5 - (b) - Micrografia de uma Trinca Intergranular no Metal de Solda (MS).

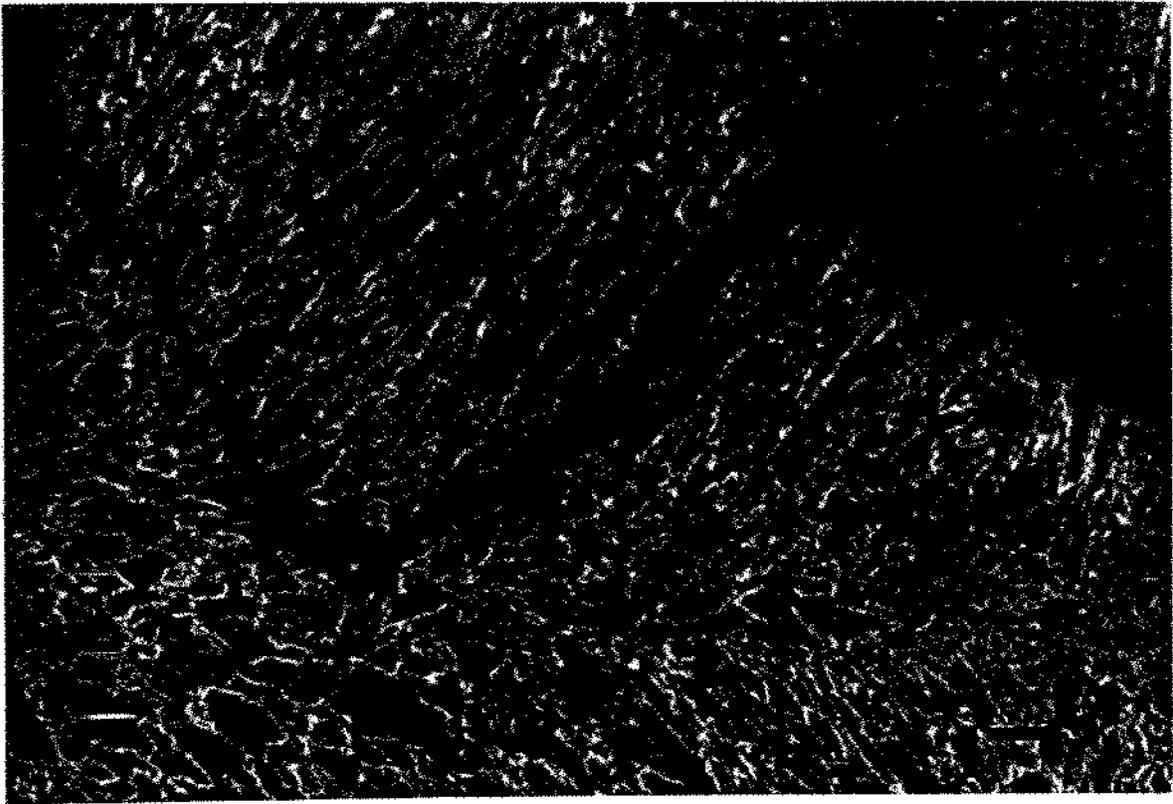


Figura IV.6 -(a) - Macrografia de uma Trinca Transgranular no Metal de Solda (MS).

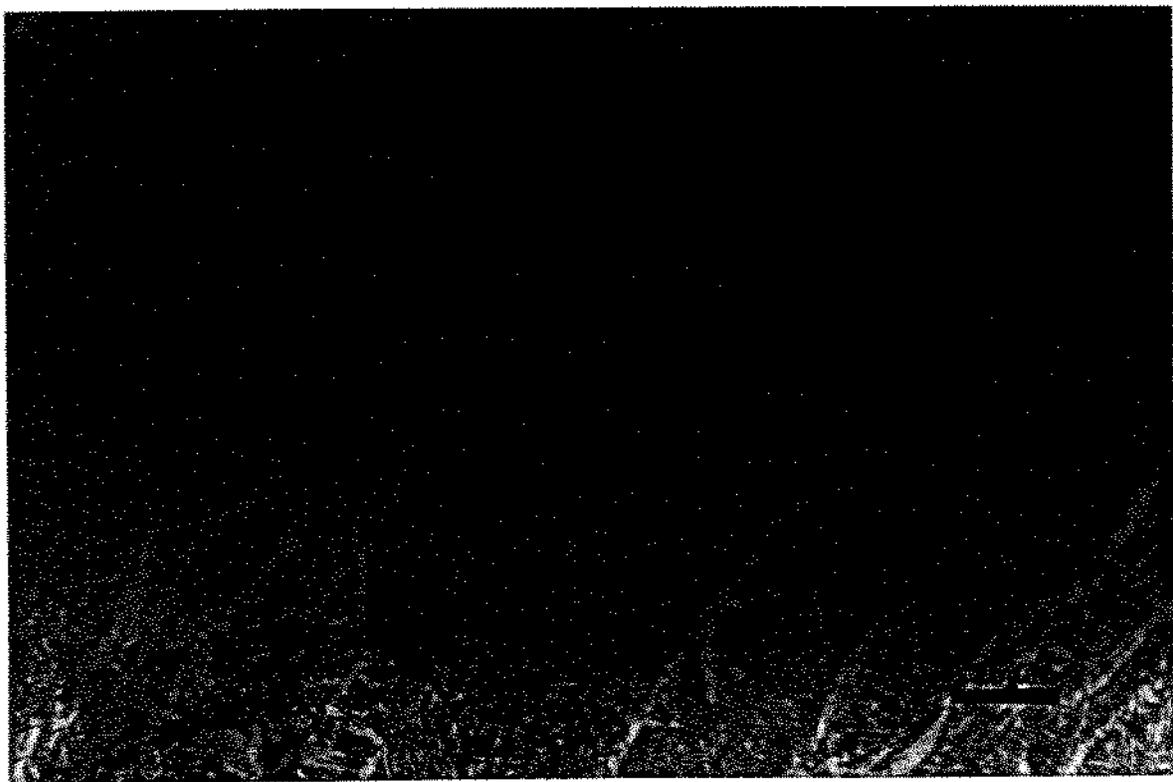


Figura IV.6 -(b) - Micrografia de uma Trinca Transgranular no Metal de Solda (MS).

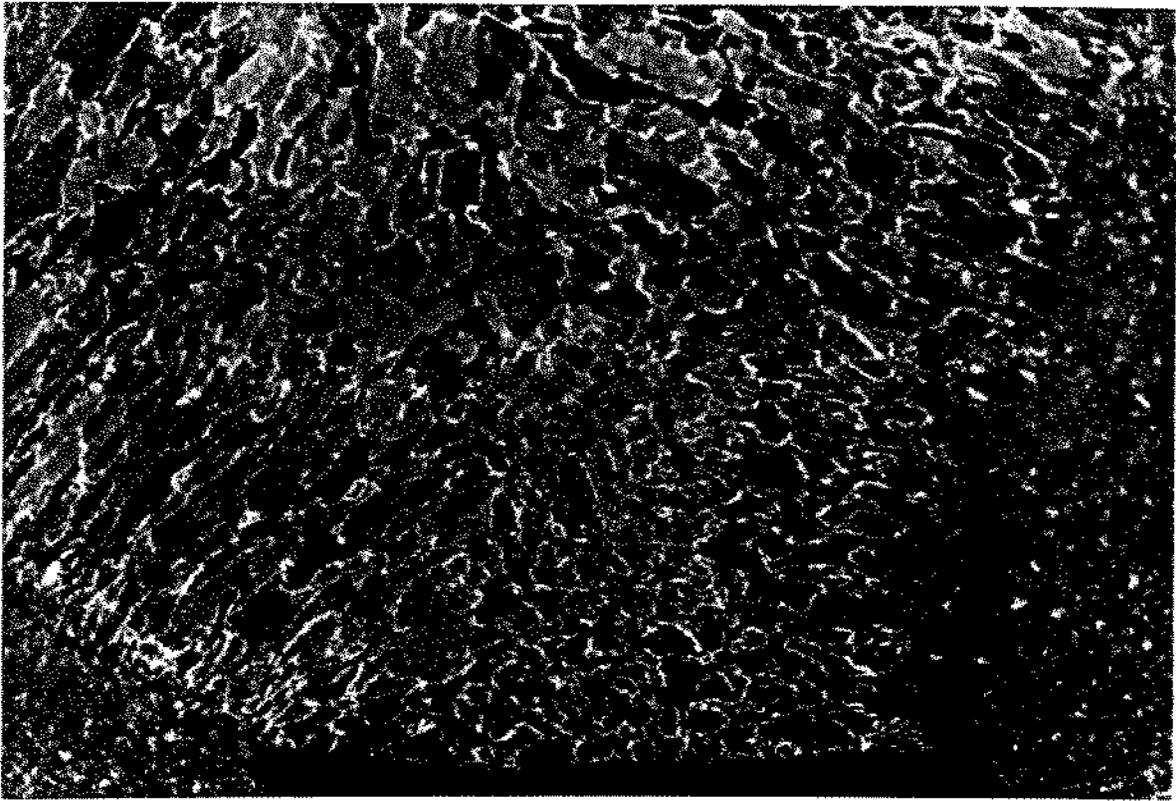


Figura IV.7 -(a) - Macrografia de uma Trinca na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) - Intergranular e Transgranular.

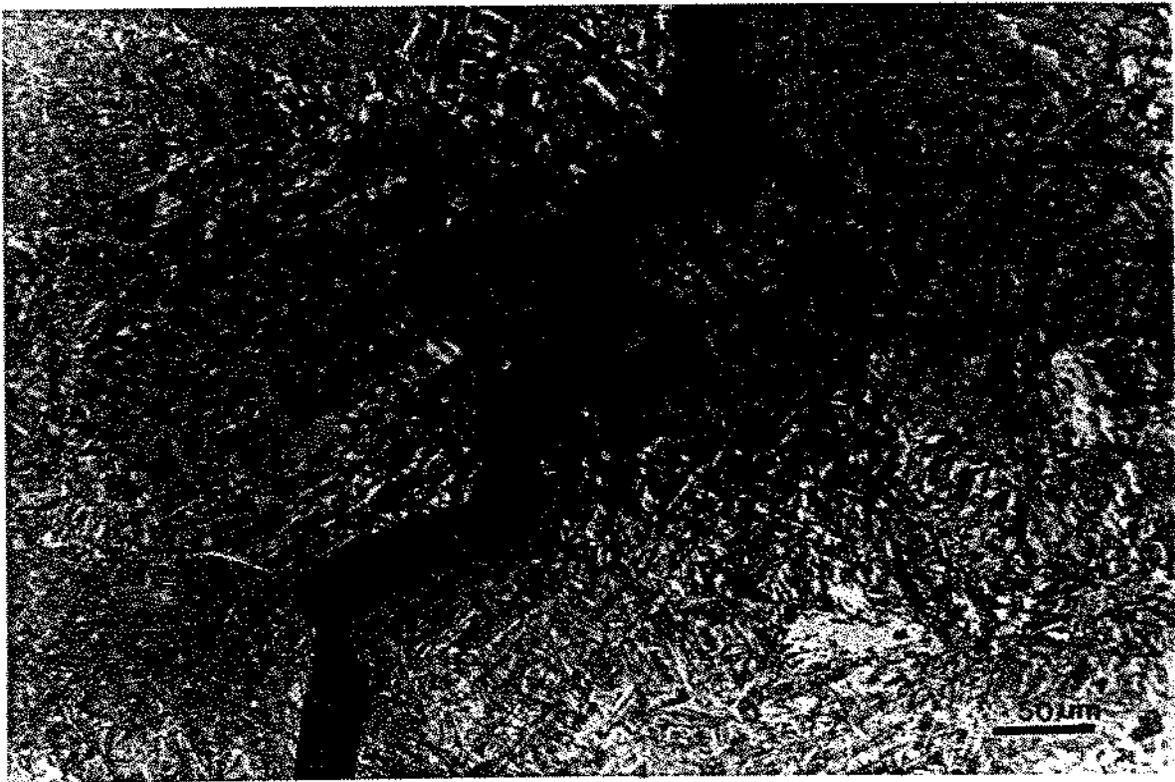


Figura IV.7 -(b) - Micrografia de uma Trinca Na Zona Afetada pelo Calor (ZAC) - Intergranular e Transgranular.

A propagação das trincas na Zona Afetada pelo Calor, ocorrendo de forma intergranular e transgranular, como ilustrado pela Figura IV. 7, evidencia que as trincas seguiram em direções de maior estado de tensões, ora o contorno de grão em função das segregações e discordâncias, ora o interior do grão em função da microestrutura favorável.

IV.3.2 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA

Na análise qualitativa dos 7 corpos de prova trincados, representativos de cada condição de revestimento, através da Microsonda, não foi verificada a presença de Zinco (Zn) ou Chumbo (Pb), concluindo-se que esses elementos foram completamente eliminados da poça de solda ou apresentaram uma concentração muito baixa. As inclusões existentes nas regiões imediatamente adjacentes às trincas foram analisadas e verificou-se serem constituídas, basicamente, de Ferro (Fe) e Manganês (Mn) na forma de sulfetos. Algumas poucas inclusões continham Alumínio (Al) e Silício (Si).

A Figura IV.8 ilustra alguns tipos de inclusões analisadas. Nesta mesma figura pode-se observar uma trinca proveniente da Zona Afetada pelo Calor que se propagou de forma transgranular pelo Metal de Solda, seguindo a direção de inclusões alinhadas.



Figura IV.8 - Inclusões na Região da Trinca.

IV.4 - ANÁLISE QUÍMICA

Como não foi detectada a presença de Zinco ou Chumbo através da utilização da Microsonda, foi então realizada uma análise qualitativa utilizando-se a técnica de espectrometria fluorescente de raios x, para verificação da existência desses elementos nos CP's.

Como resultado, não foi verificada a presença de Chumbo em nenhum dos CP's. Com relação ao Zinco, todos os CP's revestidos pelo sistema Zinco+Epoxi indicaram a presença desse elemento.

O resultado das análises quantitativas realizadas para verificação das concentrações de Zinco, Chumbo, Oxigênio e Nitrogenio estão sumarizadas na Tabela IV.6.

Tabela IV.6 - Resultados da Análise Química Quantitativa.

ELEMENTO	T I P O D E R E V E S T I M E N T O						
	SR	E-20	E-40	E-60	ZE-50	ZE-80	ZE-110
Pb (% em peso)	0,0046	0,0047	0,0047	0,0048	0,0047	0,0049	0,0047
O (ppm)	401	395	401	415	397	427	417
N (ppm)	104	109	113	114	111	119	114
Zn (ppm)	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	210	200	300

Sabe-se que inclusões têm importante envolvimento nas transformações de fase do Metal de Solda [43,44,45,46]. Inclusões ricas em oxigênio, particularmente, tem papel importante na formação da ferrita acicular [45].

Pode ser verificado através da análise da Tabela IV.6 que os níveis de concentração de Chumbo são desprezíveis para todos os sistemas de revestimento. A presença de Chumbo poderia ocorrer combinada na forma de óxidos, ou isolada, visto que o chumbo não forma liga com o Ferro ou demais elementos normalmente presentes nos aços. Em qualquer dessas duas situações, a presença de Chumbo em maiores concentrações influenciaria nas propriedades do Metal de Solda como inclusão exógena, ou seja, inclusão não formada por produtos de desoxidação, aprisionada no metal de solda [44].

Os níveis de concentração de Zinco são desprezíveis para os sistemas Epoxi e Sem Revestimento e variam de baixo a médio nível de concentração nos sistemas Zinco+Epoxi. Em função dos

resultados obtidos para os tamanhos e quantidades de trincas e dos níveis de concentração observados, a influência do Zinco nas propriedades da junta soldada pode ser desprezada.

Os níveis de concentração de Nitrogênio são bem baixos para todos os sistemas de revestimento. O Nitrogênio é um elemento estabilizador da austenita. Quando combinado com o Alumínio, Vanádio e Cromo forma nitretos, elevando a dureza dos aços [12]. O conteúdo de Nitrogênio no Metal de Solda pode ser afetado pela constituição e espessura do revestimento dos eletrodos ou pelo próprio ar na atmosfera da solda, que é a maior fonte de Nitrogênio [6,44]. Pelos resultados obtidos na análise quantitativa, apresentados na Tabela IV.6, a influência do Nitrogênio também é desprezível na susceptibilidade á formação de trincas a frio no aço estudado, independente do sistema de revestimento.

Os níveis de concentração de Oxigênio, apresentados na Tabela IV.6 são intermediários, não havendo variação significativa entre os vários sistemas de revestimento. As concentrações de Oxigênio verificadas explicam, provavelmente, a predominância microestrutural da ferrita acicular no Metal de Solda pois, nessas faixas de concentração, as inclusões de óxidos intragranulares atuam como sítios de nucleação da ferrita acicular [44,45]. Não há, porém, diferença na influência do Oxigênio sobre a microestrutura formada no Metal de Solda para as diversas condições de revestimento utilizadas.

V - CONCLUSÕES

A análise experimental realizada nos cordões teste confeccionados para o desenvolvimento do presente trabalho, nos permite as seguintes conclusões:

1 - O teste de auto restrição TEKKEN demonstrou ser um ensaio barato, simples e eficiente para avaliar a influência da condição de revestimento superficial do metal base na formação de trincas a frio.

2 - As trincas a frio iniciam preferencialmente na Linha de Fusão, na raiz da solda, propagando-se em seguida para outra região de forma intergranular e transgranular.

3 - Para as condições de soldagem e tipo de eletrodo utilizados no presente trabalho, a maioria absoluta das trincas se localizou na Zona Afetada pelo Calor. As trincas no Metal de Solda foram minimizadas.

4 - A utilização do eletrodo E-7018-G proporcionou depósitos constituídos, principalmente, de ferrita acicular, independente do tipo de revestimento superficial.

5 - Os diversos tipos de revestimento superficial utilizados nos experimentos, não tiveram influência significativa na formação de trincas a frio no aço SAR -50- B com espessura de 25mm, nas condições de soldagem desenvolvidas.

VI - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados e conclusões do presente trabalho nos abrem a perspectiva de continuidade nessa linha de pesquisa.

Os resultados obtidos mostraram que, otimizadas as condições de soldagem, os revestimentos utilizados não tiveram influência significativa na formação ou propagação de trincas a frio. As condições de soldagem, porém, foram fixas para todos os sistemas de revestimento e foram otimizadas numa condição intermediária para os diversos sistemas. Sugerimos, portanto, a realização de um estudo comparativo similar com otimização das condições de soldagem para cada sistema de revestimento, individualmente.

VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Norma Petrobrás - N - 133-e- 1990
- [2] - American Petroleum Institute - Norma API-Standard D-114 - 1983
- [3] - American Welding Society - Norma AWS - D -1.1 - 1988
- [4] - Japanese Standards Association - Norma JIS - Z-3158 -1966/78
- [5]- American Welding Society - Welding Handbook - 7th Ed. -Vol.4
"Metals and their weldability" - 1983
- [6]- Kou, S. - Welding Metallurgy - John Wiley & Sons - 1987
- [7] - Easterling, K. - Introdution to the Physical Metallurgy of Welding - Lulea - Butterworths - 1983
- [8] - American Society of Metals - Metals Handbook -"Arc Welding of Hardenable Carbon and Alloy Steels" - Ed. Ohio - 1983
- [9] - Trevisan, R.E. - "Proposta de uma Nova Técnica para Minimizar a Porosidade em Soldas de Alumínio"- Tese de Livre Docência - Unicamp - 1990
- [10]- Easterling, K. - "Solidification Features of Weld Metal" -in Metallography and Interpretation of Weld Microstructures- International Metallographic Society - ASM Int. - 1987
- [11] - Gourd, L. M. - Principles of Welding Technology - 2nd Ed. - London - Edward Arnold - 1988
- [12] - Silva, A.L.C. & Mei, P.R. - Aços e Ligas Especiais - Ed. Eletrometal - 1988
- [13] - Okuda, N. et alli -"Hydrogen-Induced Cracking Susceptibility in High-Strength Weld Metal - Welding Journal - 66 (5): May-1987 - pp - 141s-166s
- [14] - Nippon Steel Corporation - " Wel-Ten - High-Strenght Steels for Industrial Machinerics" - 1979

- [15] - Lancaster, J.F. - Metallurgy of Welding - 4th Ed. - London
Allen & Umwin, 1987
- [16] - McEvily, A.J. & Le May, I.- "Hydrogen Assisted Cracking"
Materials Characterization - 26 - 1991 - pp- 253-268
- [17] - Savage, W.F. et alli - "Hidrogen Induced Cracking of HY-130
Steel Weldments" - Welding Journal -57 (4) - April -1.978
-pp 118s - 126s
- [18] - Gedeon, S.A. et alli - "Assessing Hydrogen -Assisted
Cracking Fracture Modes in High-Strength Steel Weldments"
Welding Journal -Jun -1.990 - pp- 213s-220s
- [19] - Alcântara, N.G.- " Influência do Ciclo Térmico nas Trincas a
Frio Causadas pelo Hidrogênio" -Metalurgia ABM - 39 (34):-
Out-1983 - pp-545-550
- [20] - Godoy, A.F. & Trevisan, R.E. - "Estudo de Trincas a Frio
em Aços de Alta Resistência e Baixa Liga SAR-80-BT"
Soldagem e Materiais - 2 (1) - 1990 - pp- 37-41
- [21] - Gregory, E. N. - "Cracking Behaviour of Shielded Metal Arc
Welds in Galvanized Steel" - Welding Journal - 48(8) -
1969 - pp-369s-376s
- [22] - Gregory, E.N. - "The Mechanical Properties of Welds in Zinc
Zinc Coated Steel". - Welding Journal - October - 1971 -
pp- 445s - 450s
- [23] - Nippes, E.F . & Xiong, D.J. - " Investigation of Hydrogen
Assisted Cracking in FCA Welds on HY-80 Steel" - Welding
Journal - 67 (8):Jun-1988 - pp- 131s-137s
- [24] - Kim, B.C. et alli - "Microstructure and Local Brittle Zone
Phenomena in High-Strength Low-Alloy Steel Welds"
Metallurgical Transactions - 22A - Jun-1991 - pp-139-149
- [25] - American Society of Metals - Metals Handbook- 8th Ed. Ohio
Atlas of Microstructures of Industrial Alloys - 1983

- [26] - Martins, S.H. & Alcântara, N.G. - "Influência do Nível de Tensão sobre as Trincas Induzidas pelo Hidrogênio em Metais de Solda" - Soldagem & Materiais- 1(2) - Abr/Jun-1.989 - pp- 38-44
- [27] - Espinosa, J.W.M. & Alcântara, N.G. -"Estudo Quantitativo da Rigoriedade do Ensaio de Restrição Controlada na Soldagem de Aços de Alta Resistência" - Soldagem & Materiais - 4 (2) - Abr./Jun. - 1992 - pp.- 34-39
- [28] - Berger, D. M. - "Fundamentals and Prevention of Metallic Corrosion"- in ...Corrosion and Corrosion Protection Handbook - 2nd Ed.- Philip A. Schweitzer -1988
- [29] - Uhlig, Herbert H. - "Corrosion and Corrosion Control"- 2nd Ed.- John Wiley & Sons Inc.- 1971
- [30] - Schweitzer, P.A. - "Atmospheric Corrosion" in...Corrosion Corrosion Protection Handbook - 2nd Ed. -Ed. by Philip A.Schweitzer - 1988.
- [31] - Drazic, D.M. et alli - "The Correlation Between Accelerated Laboratory Corrosion Tests and Atmospheric Corrosion Stations Test on Steels" - Corrosion Science - 29 (10) 1989 - pp - 1.197-1.204
- [32] - Munger, Charles G. - Corrosion Prevention by Protective Coatings - Cap. 6 -Ed. by NACE - 1984
- [33] - Weaver, Paul E. - Industrial Maintenance Paintings - 4th. Ed. - Ed. by NACE - 1973
- [34] - Tator, Kenneth B. - "Coatings" in...Corrosion and Corrosion Protection Handbook - 2nd.Ed - P.A.Schweitzer - 1988
- [35] - Pattee, H.E. et alli - "Effect of Protective Coatings on Weldability of Selected Steels". - Welding Journal - June-1969 - pp - 221s-230s

- [36] - Porter, F. C. - "Galvanizing and Welding Structural Steel"
Metal Construction - October-1983 - pp- 606-609
- [37] - Nunes, E.C. & Cortes, C.O.S. - "Soldabilidade dos Aços
 SAR-50 e 55" - Metalurgia - 31(207)- Fev-1975 - pp- 91-100
- [38] - Norma Petrobrás - N-9b - Limpeza de Superfícies de Aço com
 Jato Abrasivo - Out-1984
- [39] - Norma Petrobrás - N-1374d - Pintura de Plataforma Marítima
 de Exploração e Produção - Julho-1990
- [40] - Spiegel, M.R. - Probabilidade e Estatística - Capítulo 9
 McGraw-Hill - 1.978
- [41] - Dallan, C.B., Liu, S. & Olson, D.L. - "Flux Composition
 Dependence of Microstructure and Toughness of Submerged
 Arc HSLA Weldments" - Welding Journal - May-1985 -pp-140s-
 151s
- [42] - Svensson, L.E. & Grefott, B. - "Microstructure and Impact
 Toughness of C-Mn Weld Metals" - Welding Journal -Dec-1990
 pp- 454s-461s
- [43] - Mills, A.R. et alli - "Nature of Inclusions in Steel Weld
 Metals and their Influence on Formation of Acicular
 Ferrite" - Materials Science And Technology - Dec - 1987
 pp - 1051-1061
- [44] - Liu, S. - "Measurement and Identification of Weld Metal
 Inclusions" - in...Metallography and Interpretation of
 Weld Microstructures - International Metallographic
 Society International. - 1987
- [45] - Ferrante, M. & Akune, K. - "Nucleação Intragranular em Metal
 de Solda: Um Modelo de Formação de Ferrita Acicular"
Anais do 43º Congresso Anual ABM - 1988 - pp-187-201

[46] - Shinozaki, K. et alli - "Effect of Oxigen on Hydrogen
Crackingin High-Strength Weld Metal" - Metallurgical
Transactions - 21A - May-1990 - pp - 1287-1298

a n e x o s

1 OBJETIVO

Esta Norma fixa os Esquemas de Pintura a serem usados em Plataformas Marítimas de Exploração e de Produção.

2 NORMAS E/OU DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

Na aplicação desta Norma é necessário consultar:

- Portaria Interministerial nº 0856 de 17/09/85 - Ministério da Marinha e Aeronáutica.
- N-5 - Limpeza de superfícies de aço com solventes;
 - N-6 - Limpeza de superfícies de aço com ferramentas manuais;
 - N-7 - Limpeza de superfícies de aço com ferramentas mecânicas;
 - N-9 - Limpeza de superfícies de aço com jato abrasivo;
 - N-13 - Aplicação de tintas;
 - N-1021 - Preparo de superfícies galvanizadas para pintura;
 - N-1191 - Ambientes corrosivos;
 - N-1195 - Tinta epoxi de alta espessura a dois componentes;
 - N-1198 - Tinta esmalte epoxi;
 - N-1201 - Pintura interna de tanques;
 - N-1202 - Tinta epoxi óxido de ferro;
 - N-1204 - Inspeção visual de superfícies de aço para pintura;
 - N-1211 - Tinta de fundo epoxi-zarcão óxido de ferro de alta espessura;
 - N-1658 - Tinta estirenoacrilato;
 - N-1661 - Tinta de zinco etil-silicato;
 - N-1759 - Tinta para demarcação de pisos em plataformas;
 - N-1761 - Tinta de alcatrão de hulha-epoxi de dois componentes;
 - N-1789 - Uso da cor em plataformas marítimas;
 - N-1946 - Determinação de cloretos em areia para jateamento;
 - N-2231 - Tinta de etil silicato zinco e alumínio;
 - N-2288 - Tinta epoxi para superfícies não jateadas;
 - SIS-055900 - Pictorial surface preparation standards for painting steel surfaces.

Origem: CONTEC - Subcomissão nº 14 - Pintura e Revestimentos Anticorrosivos.
Substitui e cancela a N-1374c.

Linha vertical na margem da página assinala trecho desta Norma alterado da anterior para a presente revisão. A alteração pode ser: modificação, inserção ou supressão do trecho.

Toda norma é dinâmica, estando sujeita a revisões. Comentários e sugestões, para seu aprimoramento, devem ser encaminhados à Comissão de Normas Técnicas da PETROBRAS - CONTEC.

Palavras-chave: pintura - plataformas marítimas.

3 CONDIÇÕES GERAIS

3.1 Os esquemas de pintura, aqui normalizados, são estabelecidos levando-se em conta os ambientes com os quais os equipamentos estão em contato, e que são definidos na N-1191, e a temperatura de operação.

3.2 Os esquemas de pintura devem ser utilizados no convés (deck), região da jaqueta acima da Zona de Transição, módulos de serviço (estruturas metálicas e chaparias), equipamentos tais como: tubulações, tanques de armazenamento (externamente), máquinas (rotativas e operatrizes) e equipamentos elétricos e de instrumentação.

3.3 A pintura de fabricação provisória ("shop primer"), quando existente, deve ser removida imediatamente antes da aplicação dos esquemas de pintura previstos nesta Norma.

3.4 Na pintura de helipontos deve ser aplicada a "Tinta para Demarcação de Pisos em Plataformas", N-1759, de acordo com as exigências da Portaria Interministerial nº 0856, de 17/09/85.

3.5 No caso de retoque da pintura existente para as condições específicas 5.1.2 e 5.2.1, deve ser repetido o esquema original. Caso haja impossibilidade de se efetuar jateamento abrasivo, preparar a superfície segundo as normas N-7 (preferencialmente) ou N-6 (se impossível a utilização da N-7), até os graus St 2 ou St 3, respectivamente, utilizando como tinta de fundo a "Tinta Epoxi para Superfícies Não Jateadas" (N-2288).

3.6 Antes do preparo da superfície a ser pintada, fazer inspeção visual em toda a superfície, segundo a norma N-1204. Anotar os pontos que apresentarem vestígios de óleo, graxa ou gordura, o grau de corrosão em que se encontra a superfície (A, B, C ou D, de acordo com a norma SIS-055900), assim como os pontos em que a pintura, se existente, estiver danificada.

3.7 Em qualquer dos esquemas de pintura previstos nesta Norma, submeter a superfície a ser pintada a processo de limpeza com solventes, segundo a norma N-5, apenas nas regiões onde, durante a inspeção, constatarem-se vestígios de óleo, graxa ou gordura. Para as condições específicas 5.1.2, 5.2.1 e 5.3, aplicar jateamento abrasivo ao metal quase branco, grau Sa 2 1/2, em toda a superfície a pintar, conforme a N-9, de forma a obter um acabamento que corresponda no mínimo, a uma das gravuras Sa 2 1/2 da norma SIS-055900. De maneira semelhante, para as condições específicas 5.1.1 e 5.2.2, deve ser adotado o preparo de superfície Sa 3.

3.8 O intervalo de tempo para aplicação da primeira demão de qualquer tinta sobre uma outra já aplicada deve ser o requerido pela anterior para repintura. Para os esquemas de pintura em que estejam previstas tintas a base de resina epoxi, caso seja ultrapassado o tempo máximo, deve-se efetuar lixamento manual em toda a superfície e limpeza com solvente não oleoso, antes da aplicação da demão posterior.

3.9 Na aplicação das tintas e respectivo controle da qualidade de aplicação, devem ser seguidas as prescrições descritas na norma N-13.

3.10 Deve ser feito controle de continuidade da película seca com emprego do detetor de descontinuidade, após a aplicação de todo o esquema de pintura, de acordo com a N-13. Este teste, entretanto, fica dispensado para acessórios forjados ou fundidos de tubulação, elétrica e instrumentação, tais como: válvulas, flanges e visores de nível.

3.11 As cores a serem utilizadas na pintura das superfícies metálicas que operem até 1200C devem obedecer ao estabelecido na N-1789.

4 DEFINIÇÕES

Para efeito de proteção anticorrosiva a plataforma é dividida em três zonas, a saber:

- a) Zona submersa;
- b) Zona de transição;
- c) Zona atmosférica.

Destas zonas, somente as de transição e atmosférica recebem esquema de pintura ou de revestimento definidos nesta Norma.

5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

5.1 Zona de transição

5.1.1 Alternativa 1

5.1.1.1 Revestimento único

Imediatamente após o preparo da superfície, aplicar "Massa Epoxi Poliamida de Alta Espessura (Dois Componentes)" em camada contínua e uniforme, com espessura compreendida entre 1mm e 4mm.

Nota: Deve ser utilizada somente na pintura ou retoques de plataformas já instaladas.

5.1.2 Alternativa 2

5.1.2.1 Tinta de fundo

Uma demão de "Tinta Epoxi óxido de Ferro", N-1202, aplicada por meio de rolo, trincha ou pistola. A espessura mínima de película seca deve ser de 35 μ m.

5.1.2.2 Tinta de acabamento

De 2 a 12 horas após a aplicação da tinta de fundo, aplicar três demãos de "Tinta de Alcatrão de Hulha-Epoxi de Dois Componentes e de Alta Espessura", N-1761, por meio de pistola sem ar, com espessura mínima de película seca de 180 μm por demão. O intervalo entre demãos deve ser de, no mínimo 18 e, no máximo, 48 horas.

5.1.2.3 Retoques

Após o posicionamento da plataforma devem ser feitos retoques nas regiões cujo esquema de pintura foi danificado durante o lançamento, utilizando-se massa epoxi prevista na alternativa 1, após jateamento abrasivo localizado conforme o item 5.1.1.1.

5.2 Zona atmosférica

5.2.1 Temperatura de operação, da ambiente até 120°C.

5.2.1.1 Tinta de fundo

Aplicar uma demão de "Tinta de Zinco Etil-Silicato", N-1661, por meio de pistola convencional (com agitação mecânica) ou pistola sem ar (com agitação mecânica), com espessura mínima de película seca de 75 μm . O intervalo para aplicação da tinta intermediária deve ser de no mínimo 30, e no máximo, 48 horas. Caso seja ultrapassado o prazo máximo para aplicação da tinta intermediária deve ser efetuada limpeza com jato de água doce ou com pano umedecido em água doce em toda a superfície a pintar.

5.2.1.2 Tinta Intermediária

Aplicar uma demão de "Tinta Epoxi óxido de Ferro", N-1202, por meio de rolo, trincha ou pistola. A espessura mínima de película seca deve ser de 35 μm .

5.2.1.3 Tinta de acabamento

De 18 a 48 horas após a aplicação da tinta Intermediária, aplicar duas demãos de "Tinta Epoxi de Alta Espessura a Dois Componentes", N-1195, Curada com Poliamida, Tipo II, com espessura mínima de película seca de 120 μm por demão, aplicadas por meio de rolo ou pistola sem ar. O intervalo entre demãos deve ser de, no mínimo, 16 horas e, no máximo, 48 horas.

Nota: No caso de acabamento em tinta epoxi, a superfície poderá vir a apresentar empoamento, sem que isto signifique perda de suas propriedades anticorrosivas.

5.2.2 Temperatura de operação entre 120°C e 600°C.

5.2.2.1 Revestimento único

Aplicar uma demão de "Tinta Etil-Silicato de Zinco e Alumínio", N-2231, por meio de pistola convencional (com agitação mecânica) ou pistola sem ar (com agitação mecânica), com espessura mínima de película seca de 100 μm .

5.3 Pintura de pisos antiderrapantes

5.3.1 Tinta de fundo

Aplicar uma demão de "Tinta de Zinco Etil-Silicato", N-1661, por meio de pistola convencional (com agitação mecânica) ou pistola sem ar (com agitação mecânica), com espessura mínima de película seca de 75 μm . O intervalo para aplicação da tinta intermediária deve ser de no mínimo 30 e, no máximo, 48 horas.

Caso seja ultrapassado o prazo máximo para aplicação da tinta intermediária, deve ser efetuada limpeza com jato de água doce ou pano umedecido em água doce em toda a superfície a pintar.

5.3.2 Tinta intermediária

Aplicar uma demão de "Tinta Epoxi óxido de Ferro", N-1202, por meio de rolo, trincha ou pistola. A espessura mínima da película seca deve ser de 35 μm .

5.3.3 Primeira tinta de acabamento

De 18 a 48 horas após a aplicação da tinta intermediária, aplicar duas demãos de "Tinta Epoxi de Alta Espessura a Dois Componentes", N-1195, curada com poliamida (Tipo II), com espessura mínima de película seca de 120 μm por demão, aplicadas por meio de rolo ou pistola sem ar. O intervalo entre demãos deve ser de, no mínimo, 16 e, no máximo, 48 horas.

5.3.4 Aplicação da areia

Imediatamente após aplicada a segunda demão da primeira tinta de acabamento, com espessura de película úmida conferida, aplicar a areia limpa, seca e com, no máximo, 40 ppm de cloreto (Ver norma N-1946), com granulometria entre 2 e 4 mm, numa proporção de 1,2 dm³ por m².

Nota: A medição de película da segunda demão da primeira tinta de acabamento deve ser, por essa razão, por via úmida, fazendo-se a conversão para espessura seca, a partir do teor de sólidos por volume da tinta, usando-se a seguinte relação:

$$\text{espessura seca} = \text{espessura úmida} \times \text{sólidos por volume.}$$

5.3.5 Remoção do excesso de areia

Deve ser removida com ar limpo e seco, sopro leve, toda a areia que não estiver aderida à tinta após a cura ao toque. Como remoção preliminar, a areia pode ser varrida e para a limpeza final usar o sopro de ar.

5.3.6 Segunda tinta de acabamento

Duas demãos de "Tinta Esmalte Epoxi", N-1198, Tipo I, curada com poliamina, com espessura mínima de película seca de 30 μ m, aplicadas por meio de rolo, trincha ou pistola.

Nota: Para a medição de película dessa camada, devem ser deixadas áreas de aproximadamente 4 cm sem areia ("espíões"), por ocasião da aplicação da camada.

5.4 Pintura interna de tanques

Para pintura interna de tanques, utilizar o procedimento da norma N-1201.

5.5 Pintura de superfícies galvanizadas

No caso de superfícies galvanizadas, seguir o que determina a norma N-1021.



LIMPEZA DE SUPERFÍCIES DE AÇO COM JATO ABRASIVO
(procedimento)

1 OBJETIVO

1.1 Esta Norma tem por objetivo fixar o procedimento para a execução da limpeza de superfícies de aço para pintura, por meio de jato abrasivo.

2 NORMAS A CONSULTAR

2.1 Da PETROBRÁS

- (a) N-5 - Limpeza de Superfícies de Aço com Solventes;
- (b) N-6 - Limpeza de Superfícies de Aço com Ferramentas Manuais;
- (c) N-7 - Limpeza de Superfícies de Aço com Ferramentas Mecânicas;
- (d) N-1204 - Inspeção Visual de Superfícies de Aço para Pintura;
- (e) N-1946 - Areia para Jateamento - Determinação de Cloretos.

2.2 Da NACE (National Association of Corrosion Engineers)

TM-01-70 - Visual Standard for Surfaces of New Steel Air-Blast Cleaned With Sand Abrasive.

2.3 Da SIS (Sveriges Standardiseringskommission)

SIS 05 59 00-1967 - Pictorial Surface Preparation Standard for Painting Steel Surfaces.

2.4 Da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)

NBR-5734 - Peneiras para Ensaio.

2.5 Da SAE (Society of Automotive Engineers)

RP J 444a - Cast Shot and Grit Size Specifications for Peening and Cleaning.

3 DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÃO

3.1 Limpeza com Jato Abrasivo

É o método de preparo das superfícies de aço para pintura, pelo emprego de areia, granalha de aço ou outros abrasivos, impelidos por um sopro de ar comprimido, através de bicos aplicadores.

3.2 Graus de Intemperismo e de Preparação de Superfícies de Aço

Os graus de intemperismo e de preparação, referidos nesta Norma, estão reproduzidos na norma SIS 05 59 00-1967, por meio de uma série de padrões fotográficos.

3.2.1 Graus de intemperismo

Grau A - superfície de aço completamente coberta de carepa de laminação intacta e aderente, com pouca ou nenhuma corrosão;

Grau B - superfície de aço com princípio de corrosão atmosférica da qual a carepa de laminação tenha começado a desagregar;

Grau C - superfície de aço da qual a carepa de laminação tenha sido removida pela corrosão atmosférica ou possa ser retirada por meio de raspagem, e que apresente pequenos alvéolos;

Grau D - superfície de aço da qual a carepa de laminação te nha sido removida pela corrosão atmosférica e que apresenta corrosão alveolar de severa intensidade.

3.2.2 Graus de preparação de superfícies de aço

- Grau Sa 1 - Limpeza por jateamento abrasivo ligeiro - ca repas de laminação soltas, ferrugem e material estranho, devem ser removidos. A superfície deve ser limpa, imediatamente, com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou es cova limpa. A aparência final deve corresponder às gravuras com designação Sa 1. Esta limpeza não se aplica a superfícies que apresentem grau A de intemperismo original. Para as demais, os padrões de limpeza são: BSa1, CSa 1 e DSa 1 da norma SIS 05 59 00-1967.
- Grau Sa 2 - Limpeza por jateamento abrasivo comercial - quase toda a carepa de laminação, ferrugem e material estranho devem ser removidos. A superfície deve ser limpa, imediatamente, com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou es cova limpa. A superfície deve apresentar então, coloração acinzentada não uniforme e corresponder, em aparência, às gravuras com designação Sa 2. Esta limpeza não se aplica a superfícies que apresentam grau A de intemperismo original. Para as demais, os padrões de limpeza são: BSa 2, CSa 2 e DSa 2 da norma SIS 05 59 00-1967.
- Grau Sa 2 1/2 - Limpeza por jateamento abrasivo ao metal qu se branco - as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho devem ser removidos de maneira tão perfeita que seus vestígios apareçam somente como manchas tênues ou estrias. A superfície deve ser limpa, imediatamente, com aspiradores, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa.

A superfície deve apresentar então, aspecto correspondente às gravuras com designação Sa 2 1/2. Os padrões de limpeza são:

ASa 2 1/2, BSa 2 1/2, CSa 2 1/2 e DSa 2 1/2 da norma SIS 05 59 00-1967.

Grau Sa 3

- Limpeza por jateamento abrasivo ao metal branco - as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho devem ser totalmente removidos. A superfície deve ser limpa, imediatamente, com aspirador, ar comprimido limpo e seco ou escova limpa. A superfície deve apresentar então, coloração metálica uniforme, correspondente em aparência, às gravuras com designação Sa 3. Os padrões de limpeza são: ASa 3, BSa 3, CSa 3 e DSa 3 da norma SIS 05 59 00-1967.

4 CONDIÇÕES GERAIS

4.1 O procedimento de execução do jateamento abrasivo deve conter pelo menos as seguintes informações:

- (a) Indicação dos solventes e materiais utilizados na execução da limpeza prévia segundo a N-5;
- (b) Tipo de equipamento a ser utilizado no jateamento, incluindo a citação dos filtros separadores e bicos;
- (c) Tipo do abrasivo e granulometria do material abrasivo, em função dos perfis de rugosidade a serem obtidos;
- (d) Procedência do material abrasivo a ser utilizado no jateamento;
- (e) Procedimento para verificação da salinidade, no caso de utilização de areia;
- (f) Procedimentos de limpeza final após o jateamento, antes da aplicação dos sistemas de pintura;

(g) Descrição dos equipamentos de segurança dos operadores de jateamento.

4.2 As etapas a serem seguidas na execução do trabalho de limpeza pelo jato abrasivo são as seguintes:

4.2.1 Remoção de quaisquer depósitos de óleo ou graxa, de acordo com a norma N-5.

4.2.2 Caso a superfície se apresente excessivamente coberta de es camadas de ferrugem, admite-se a remoção por meio de ferramentas de impacto, conforme a N-6, ou por meio de ferramentas mecânicas, conforme a norma N-7, antes da limpeza final com jato abrasivo.

4.2.3 Remoção da carepa de laminação, ferrugem, tinta e matéria es tranha, de acordo com o grau de limpeza especificado no sistema de pintura (ver item 3.2.2), por um dos seguintes processos:

4.2.3.1 Jateamento com areia impelida por meio de ar comprimido através de bicos aplicadores. A areia deve apresentar cantos vivos, deve estar seca, peneirada, isenta de argila, mica, sal, pó, umida de ou outras contaminações. A areia deve apresentar granulometria que confira à superfície, perfil de rugosidade compatível com a espessura da película seca total das tintas a serem aplicadas.

4.2.3.2 Jateamento com granalha (partículas angulosas ou esférulas) de aço ou de abrasivo artificial, impelida por meio de ar comprimido através de bicos aplicadores. A granalha deve apresentar granulometria que confira à superfície, perfil compatível com a espessura da película seca total das tintas a serem aplicadas (vide tabela).

4.2.3.3 Jateamento com outros abrasivos que levem a um perfil de rugosidade entre 30 e 85 μm .

4.2.4 Após o jateamento a superfície deve ser limpa por meio de escova, aspirador de pó ou jato de ar seco, de forma a remover grãos de areia e poeira.

4.2.5 Antes da aplicação da primeira demão de tinta, a superfície jateada deve ser examinada quanto à presença de traços de óleo, graxa ou sujeira, que devem ser removidos de acordo com as exigências da norma N-5.

4.3 O ar comprimido utilizado na aplicação do jato abrasivo deve ser isento de água ou de óleo. O equipamento deve ser provido de filtros separadores, contendo sílica gel e carvão ativado, para retirada de água e de óleo, respectivamente.

4.4 Os trabalhos de limpeza com jato abrasivo devem ser feitos de modo a não causar danos a partes do trabalho já executado. As tintas já aplicadas nas proximidades do jateamento, devem estar secas ao toque.

4.5 Não devem ser executados trabalhos de jateamento em superfícies sujeitas a ficarem molhadas antes da pintura, ou quando as superfícies estiverem a uma temperatura mais baixa do que 3°C acima do ponto de orvalho, ou quando a umidade relativa for maior do que 85%.

4.6 A aplicação da tinta de fundo deve ser feita antes que apareça qualquer sinal visível de oxidação e na mesma jornada de trabalho que foi feito o jateamento. Devem ser observados os seguintes intervalos de tempo entre o início do jateamento abrasivo e o final da aplicação da tinta de fundo (primeira demão):

- (a) locais situados até 100 m da orla marítima: 4 horas;
- (b) locais situados a mais de 100 m da orla marítima: 6 horas.

5 INSPEÇÃO

5.1 Antes do Jateamento

5.1.1 Inspeção visual

5.1.1.1 Executar inspeção visual de acordo com a N-1204 com a finalidade:

nalidade de se averiguar a existência de óleo, graxa, gordura, tintas ou argamassa, em 100 % da área a ser jateada.

5.1.1.2 Verificar o estado inicial de oxidação da chapa (A, B, C ou D de acordo com a norma SIS 05 59 00-1967).

5.1.2 Abrasivos

5.1.2.1 Areia

- (a) granulometria - verificar para cada lote de areia posto no canteiro se a granulometria está de acordo com o perfil de rugosidade exigido pelo sistema de pintura;
- (b) salinidade - verificar o teor de cloretos para cada lote de areia posto no canteiro, de acordo com a N-1946;
- (c) impurezas - verificar visualmente se a areia está contaminada com argila, mica, pó ou umidade.

5.1.2.2 Granalhas de aço

granulometria - verificar se a granulometria da granalha de aço está de acordo com o perfil de rugosidade exigido pelo sistema de pintura.

5.2 Depois do Jateamento

5.2.1 Inspeção visual

5.2.1.1: Executar inspeção visual, de acordo com a N-1204, de toda a superfície, imediatamente antes da aplicação da tinta de fundo a fim de se verificar se o padrão final de limpeza está de acordo com o especificado no sistema de pintura. Utilizar os padrões visuais da norma SIS 05 59 00-1967. Nesta inspeção, também deve ser verificado se existem vestígios de óleo, graxa, sais, gordura ou umidade.

5.2.2 Perfil de rugosidade

5.2.2.1 Efetuar medição do perfil de rugosidade no primeiro m² da área jateada ou no primeiro metro linear no caso de tubulações; prosseguir com as medições para cada 30 m² ou 30 m lineares, respectivamente. Cada medição deve compreender 6 (seis) determinações individuais distanciadas entre si de 10 cm. Devem ser registrados os valores individuais e a média.

5.2.2.2 A altura da rugosidade deve ser determinada, mediante uso de rugosímetro com precisão de 5 µm ou com auxílio de padrão visual da norma NACE TM-01-70.

6 ACEITAÇÃO E REJEIÇÃO

6.1 Antes do Jateamento

6.1.1 Inspeção visual

6.1.1.1 A superfície quando examinada segundo 5.1.1.1 deve estar isenta de vestígios dos materiais citados neste item.

6.1.2 Abrasivos

- 6.1.2.1 (a) A areia quando examinada segundo 5.1.2.1 (a) deve ter tamanho máximo de partícula que atravesse a peneira cuja abertura seja aquela correspondente ao perfil máximo admissível. Ver Tabela do Anexo;
- (b) O teor máximo permitido de cloreto na areia quando examinada segundo 5.2.1.2 (b) é de 40 ppm (Ver N-1946);
- (c) A areia quando examinada segundo 5.1.2.1 (c) deve estar isenta de argila, mica, pó ou umidade.

6.1.2.2 Granalha de aço - A granalha quando examinada segundo 5.1.2.2 deve possuir tamanho máximo de partículas que atravesse a peneira cuja abertura seja aquela correspondente ao perfil máximo admissível.

6.2 Depois do Jateamento

6.2.1 Inspeção visual

6.2.1.1 A superfície quando examinada segundo 5.2.1.1 deve apresentar aspecto idêntico ao padrão fotográfico da norma SIS 05 59 00-1967 especificado no sistema de pintura. A superfície examinada não deve apresentar vestígio de óleo, graxa, sais ou gordura.

6.2.2 Perfil de rugosidade

O perfil de rugosidade quando examinado segundo 5.2.2 deve situar-se entre 30 e 70 μm quando o abrasivo utilizado for areia e entre 30 a 85 μm quando o abrasivo for granalha de aço.

7 SEGURANÇA

7.1 Os operadores de jato abrasivo devem estar devidamente protegidos com calças compridas de brim, jaqueta de mangas compridas de raspa ao cromo e máscara de ar comprimido para jateamento abrasivo (ar mandado).

7.2 Os balancins utilizados na operação de jateamento devem ser construídos de cantoneiras L de 25 mm x 25 mm x 9mm (1" x 1" x 3/8") tendo uma largura mínima de 60 cm, e guarda-corpo em toda volta, numa altura mínima de 80 cm. As tábuas utilizadas como piso devem ter uma espessura mínima de 25 mm. Se o comprimento do balancim for maior que 1,5 m, devem ser previstos reforços intermediários espaçados de no máximo 1,5 m.

7.3 Devem ser observadas as recomendações constantes da Parte IV do Manual de Pintura.

CONTEC - Subcomissão nº 14 - Pintura e Revestimentos Anticorrosivos.

Esta Norma substitui e cancela a N-9a.

Toda norma é dinâmica, estando sujeita a revisões. Comentários e sugestões para seu aprimoramento devem ser encaminhados à Comissão de Normas Técnicas da PETROBRÁS - CONTEC - RJ.

ANEXO

Tabela

Alturas de Perfil Obtidas em Função do Abrasivo

Abrasivo	Tamanho Máximo da Partícula Atravessa Peneira		Altura Máxima do Perfil
	Abertura, mm	Nº (1)	µm
Areia:			
muito fina	0,2	80	40
fina	0,4	40	50
média	1,0	18	65
grossa	1,7	12	70
Granalha de aço (partículas angulosas)			
Nº 25	0,7	25	85
Nº 18	1,0	18	90
Nº 16	1,2	16	100
Nº 12	1,7	12	200
Granalha de aço (esferulas) (2)			
Nº S-230 SAE	1,0	18	80
Nº S-280 SAE	1,4	14	90
Nº S-330 SAE	1,7	12	95

(1) Refere-se a peneiras conforme especificação ABNT-NBR-5734.

(2) De acordo com a RP-SAE-J-444a.