

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

Análise De Solda Heterogênea  
Suporte da Linha de Vapor (VS)

Aluno: Carlos E. F. Kwietniewski

Matrícula: 0418/86-5

**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**BIBLIOTECA**

Prof. Orientador: Prof. Telmo R. Strohaecker

## INDICE:

1. Introdução .....	1
2. Definição do Problema .....	1
3. Considerações gerais e revisão bibliográfica .....	3
3.1 Propriedades dos materiais utilizados .....	3
3.2 Condições de soldagem .....	8
3.3 A soldagem envolvendo aços dissimilares .....	9
3.4 Falhas - Possíveis causas .....	14
3.4.1 Mecanismo de falha .....	16
4. Experiências realizadas .....	17
5. Conclusões das experiências .....	34
6. Mecanismo de falha - Conceitos aplicados ao caso .....	36
7. Conclusões finais .....	38
8. Recomendações .....	38
9. Anexos - Ensaio de fratura .....	39

**SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS****1. INTRODUÇÃO:**

Metais puros ou ligas que diferem metalurgicamente ou têm diferentes propriedades intrínsecas são considerados dissimilares. Soldagem dissimilar (por fusão) envolve a fusão e a mistura (ligação) de dois ou mais metais, usualmente com o emprego de um metal de adição. Existem dois tipos básicos de soldas dissimilares:

- União de dois metais base diferentes (isto é, A e B com C).
- União de dois metais base de mesma composição (isto é, A e A com B). Um ilimitado número de propriedades finais ou ligas podem ser obtidas, dependendo dos metais selecionados, do processo de solda utilizado e dos procedimentos de soldagem.

Nos processos de soldagem por fusão, os metais base e o metal de adição, contribuem para as propriedades finais da solda. Na soldagem dissimilar, o metal de adição selecionado deverá ligar metalurgicamente dois metais envolvidos. Contudo o consumível não somente deverá ser capaz de aceitar certa diluição dos elementos contidos no metal base, mas também dar certas características para a junta soldada.

Não só a diluição deve ser considerada. Deve-se também considerar os pontos de fusão, condutividade térmica, expansão térmica e pré e pós aquecimento, dependendo da liga considerada.

O engenheiro de solda deve selecionar os consumíveis que, combinados com o metal base, proporcionarão as propriedades previamente estabelecidas para uma determinada utilização. Propriedades que devem atender os requisitos desejados à junta, como resistência mecânica, dutilidade e resistência à corrosão.

**2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA:**

Durante a época da montagem (entre 1981/82), há cerca de onze anos, uma série de soldas foram realizadas entre a tubulação de VS (vapor de super alta) e o suporte de apoio, preso ao pipe-hack.

Nas referidas soldas, foi utilizado o eletrodo AWS E-309 Mo, formando uma solda dissimilar, visto que a tubulação de VS é de P22 (aço baixa liga).

Na soldagem destas juntas não foram realizados pré e pós aquecimento (alívio de tensões).

A linha em questão trabalha à temperatura de 525C e pressão de 125Kgf/cm<sup>2</sup>.

Inspecionando esta junta o SEIEQ constatou que houve falha na solda, na região de interface do cordão (ZAC).

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

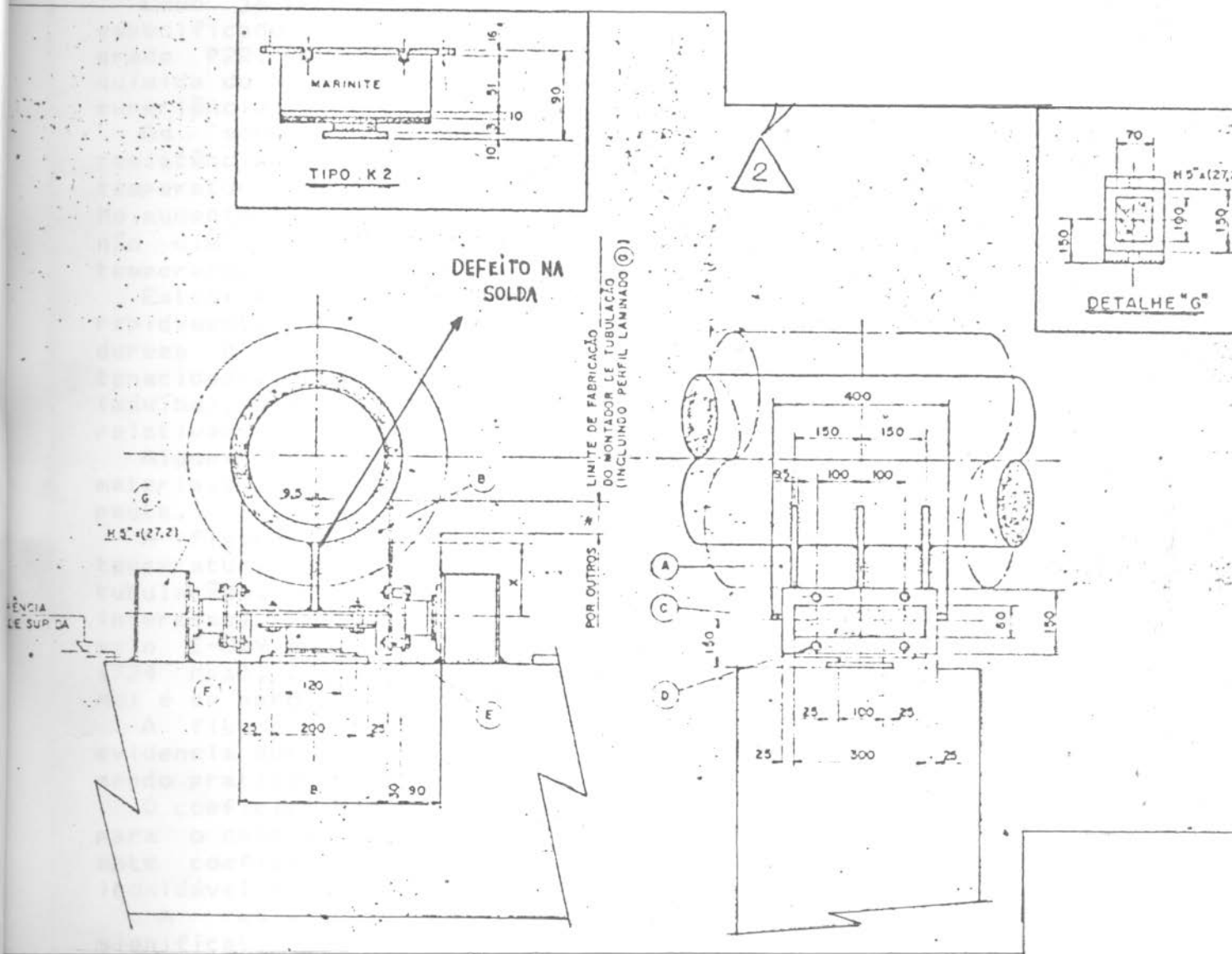


Figura 1 - Desenho de um suporte utilizado na linha de vapor de alta pressão (VS).

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

## 3. CONSIDERAÇÕES GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

## 3.1- PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS:

Como já mencionado, o aço utilizado na tubulação é o do tipo especificado pela ASME, section II, como P-número 5, group 1, grade P22, usualmente denominado 2 1/4 Cr - 1 Mo. A composição química do P22, juntamente com a dos outros metais utilizados nas experiências, podem ser vistas na tabela I.

Os aços cromo-molibdênio são caracterizados por sua resistência à oxidação; alta resistência mecânica a elevada temperatura e outras propriedades, conforme seu conteúdo de Cr e Mo aumentam. Entretanto, acima de 2,25% de Cr, a taxa de corrosão não diminui significativamente, quando exposto a vapor de alta temperatura.

Estes aços são temperáveis ao ar e, quando resfriados rapidamente desde sua temperatura crítica, ocorre aumento de dureza e resistência, com conseqüente redução de ductilidade e tenacidade. Como o conteúdo de carbono é especificado em 0,15% (máximo), estes aços não alcançam elevada dureza e a ductilidade é relativamente alta.

Algumas propriedades a diferentes temperaturas, do dois materiais envolvidos são de interesse, com relação ao problema em pauta.

A figura 2 mostra a resistência à tração como função da temperatura, para alguns materiais comumente utilizados em tubulações. Nota-se que a 1000F, ou 532C (temperatura de interesse), a resistência à tração do metal de solda depositado pelo E-309 Mo (similar ao 25 Cr - 12 Ni) é cerca de 105000 psi (724 Mpa), enquanto que a do E-9016 B3 (similar ao 2 1/4 Cr - 1 Mo) é de aproximadamente 55000 psi (379 Mpa).

A figura 3 ilustra o alongamento em função da temperatura e evidencia que o 25 Cr - 12 Ni possui cerca de 35% a 1000F (532C), sendo praticamente idêntico ao P22, nesta temperatura.

O coeficiente médio de expansão térmica é bastante importante, para o caso em consideração. A figura 4 mostra que para o P22, este coeficiente (a 1000F) é de  $7,8E-06/F$ , enquanto que para o inoxidável o mesmo é cerca de  $9,4E-06/F$ .

A resistência dos aços à oxidação pode ser aumentada significativamente através da adição de cromo e este fato está ilustrado na figura 5, notando-se que para o P22 a mesma é desprezível na temperatura de 1000F (532C).

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

## COMPOSIÇÃO QUÍMICA

MATERIAL	P-22	E-9016 B3	E-309 Mo	E-NiCrFe3	AISI 304	P-11
Carbono	0,15 máx.	0,05-0,12	0,12 máx.	0,05 máx.	0,08 máx.	0,15 máx.
Manganês	0,30-0,60	0,90 máx.	0,50-2,50	4,00-6,00	2,00 máx.	0,30-0,60
Fósforo	0,03 máx.	0,03 máx.	0,04 máx.	0,02 máx.	0,04 máx.	0,03 máx.
Enxofre	0,03 máx.	0,04 máx.	0,03 máx.	0,01 máx.	0,03 máx.	0,03 máx.
Silício	0,50 máx.	0,06 máx.	0,90 máx.	0,50 máx.	0,75 máx.	0,50-1,00
Cromo	1,90-2,60	2,00-2,50	22,0-25,0	18,0-22,0	18,0-20,0	1,00-1,50
Molibdênio	0,87-1,13	0,90-1,20	2,00-3,00	2,00 máx.	---	0,44-0,65
Níquel	---	---	12,0-14,0	resto	8,00-11,0	---
Cobre	---	---	0,75 máx.	0,20 máx.	---	---
Ferro	resto	resto	resto	2,00-4,00	resto	resto

TABELA 1 - Composição química dos materiais utilizados para a realização das experiências.  
A composição química mencionada para o E-NiCrFe 3 refere-se à liga INCONEL 182.

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

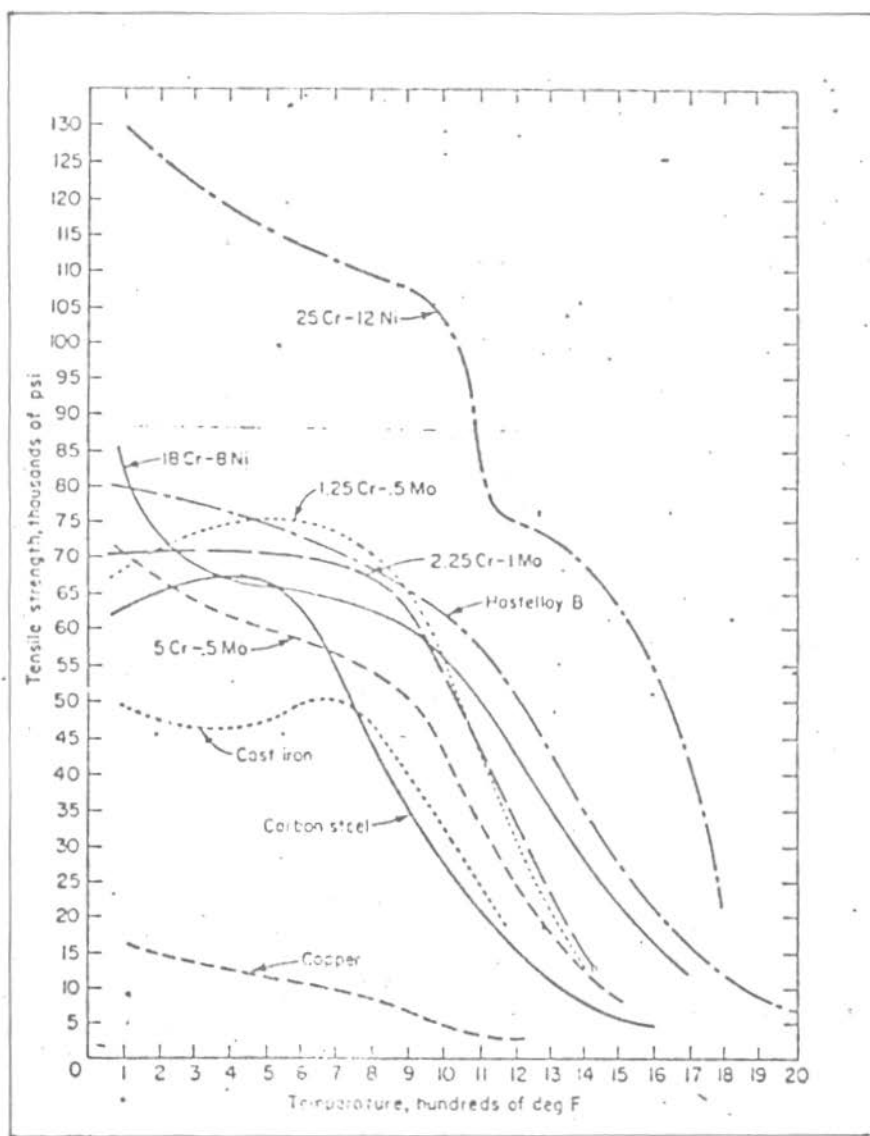


FIGURA 2 - Resistência à tração como função da temperatura.

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

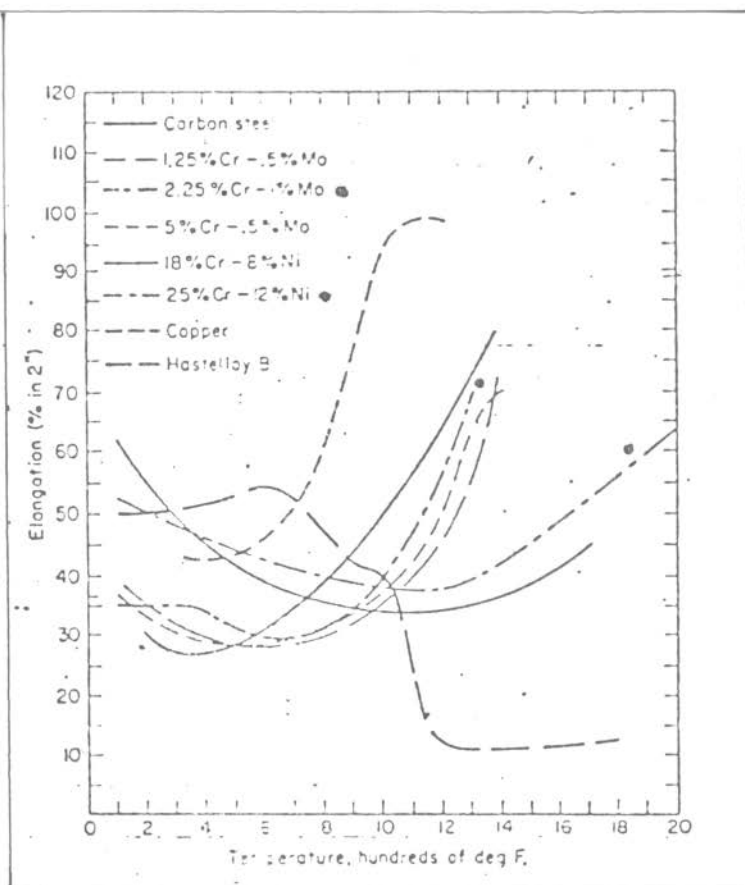


FIGURA 3 - Alongamento como função da temperatura.



## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

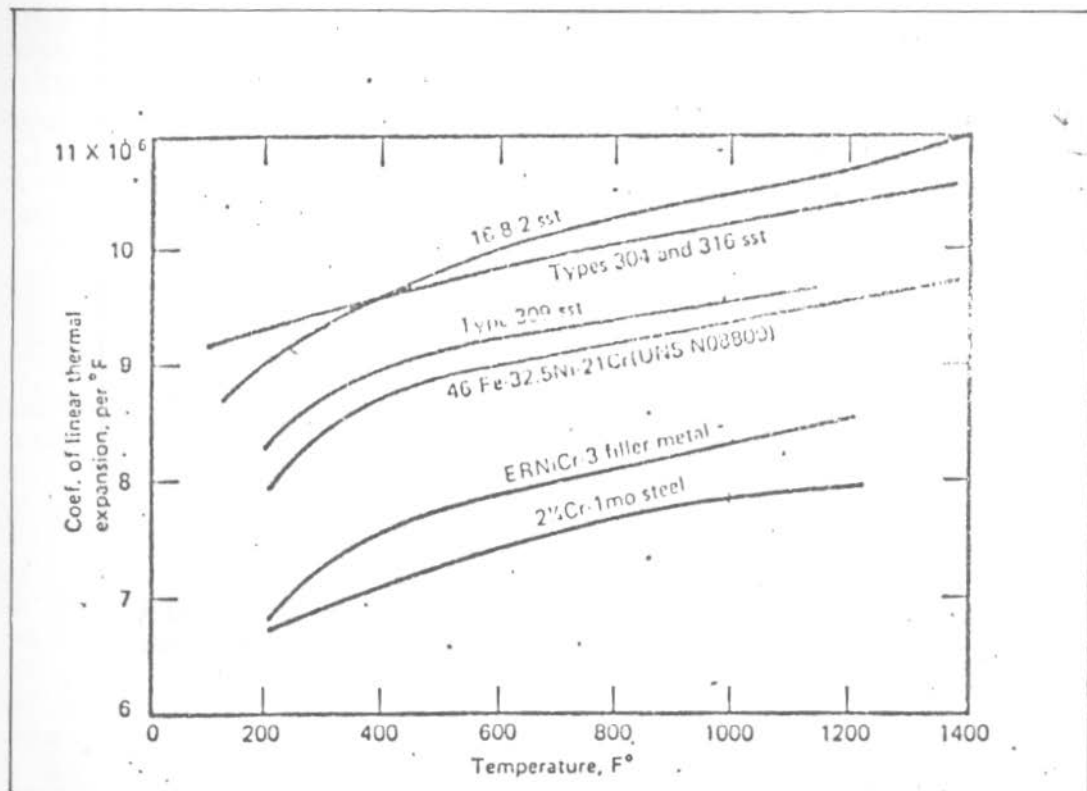


FIGURA 4 - Coeficiente médio de expansão térmica em função da temperatura.

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

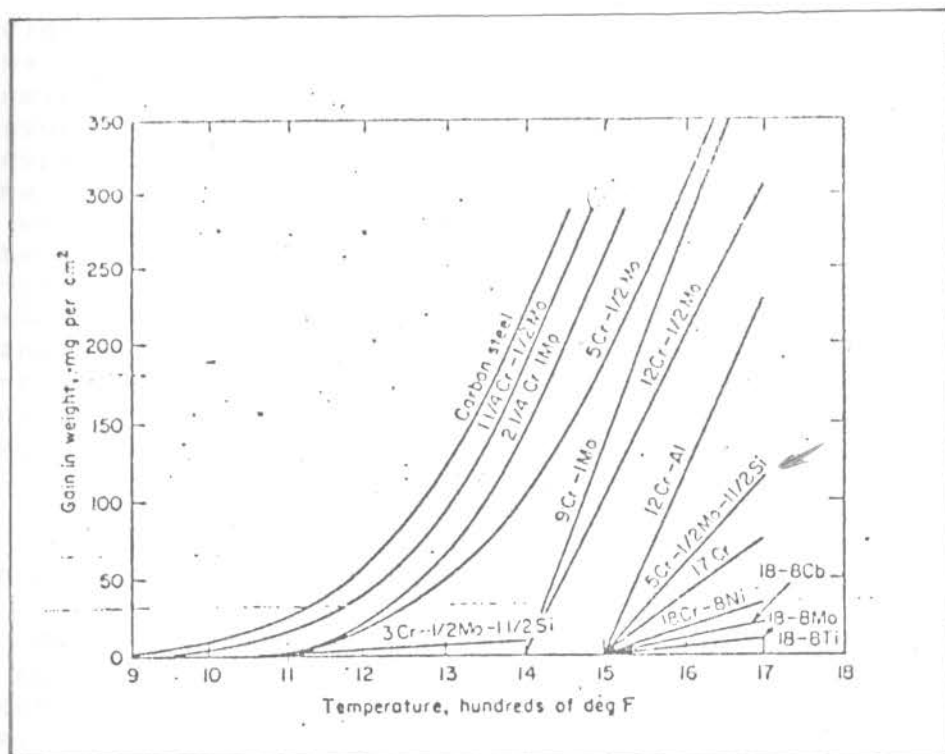


FIGURA 5 - Resistência à oxidação em função da temperatura e elementos de liga.

### 3.2 CONDIÇÕES DE SOLDAGEM:

A soldagem do P22 deve ser realizada considerando-se a possibilidade de tanto o metal de solda quanto a ZAC, desenvolverem trincas induzidas pelo H<sub>2</sub>. Este defeito ocorre dependendo do nível de H<sub>2</sub> no metal de solda depositado, nível de tensões desenvolvidas e do tipo de microestrutura.

Portanto deve ser utilizado pré-aquecimento e consumível adequado, ou seja, de baixo H<sub>2</sub> e seco, com composição química similar ao metal base. A seguir realiza-se um pós-aquecimento, no intuito de melhorar a tenacidade da junta e diminuir o nível de tensão residual desenvolvido. Recomenda-se, portanto, pré-aquecimento entre 200-300°C e temperatura de alívio de tensões de 670°C, com 1h para cada 25,4mm de espessura e um mínimo de 30 minutos.

Quando o processo utilizado é o eletrodo revestido, este deve ser do tipo 2 1/4 Cr - 1 Mo, ou AWS 90XX B3. É de suma importância a correta secagem do consumível ao tempo/temperatura recomendado pelo fabricante, mas na falta de maiores informações, 300°C durante 2h deve ser suficiente; com utilização no menor espaço de tempo possível.

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

Alguns códigos (como ASA, code for pressure piping) especificam uma temperatura mínima de pré-aquecimento de 175C e tratamento térmico pós soldagem de 711 a 739C, com 1h para cada 25,4mm de espessura e no mínimo 2h. É interessante observar que o código da ASA especifica a dureza no metal de solda, sendo de 241 HB (máximo) para o P22.

Entretanto existem razões para se acreditar que, quando há severa fadiga térmica ou mecânica, é necessário limitar a dureza em 200HB. Nota-se que uma dureza no metal de solda de 240HB após alívio de tensões, pode corresponder a uma resistência à tração de 793Mpa. Quando o metal base adjacente tem dureza de somente 180-200HB, corresponde a uma resistência à tração de 552Mpa, um entalhe metalúrgico de magnitude suficientemente grande pode ser criado, com possibilidade de produzir uma falha sob severa fadiga.

## 3.3- A SOLDAGEM ENVOLVENDO AÇOS DISSIMILARES:

Consumíveis de aços inoxidáveis austeníticos do tipo 309 (ou 310) tem sido empregados para reparos (pequena dimensão) sobre aços Cr-Mo, sem tratamento térmico pós soldagem. Utiliza-se o conceito de que, como estes inoxidáveis possuem alta ductilidade e menor limite de escoamento do que o Cr-Mo, eles "aliviam" a maior parte das tensões geradas durante a soldagem, através de sua deformação.

Entretanto, observando-se as figuras 1,2 e 3, nota-se que o alongamento dos materiais em questão é praticamente idêntico na temperatura de interesse (532C), aumentando esta diferença a favor do inoxidável somente em baixas temperaturas. Salienta-se também que o inoxidável possui maior resistência à tração, além do que exatamente em torno de 532C ambos os aços sofrem grande decréscimo desta propriedade. Há também de ser considerado o fato do coeficiente médio de expansão dos dois materiais serem bastante diferentes, podendo resultar em tensões internas na interface da solda, durante serviço em temperatura cíclica.

Quando existe grande diferença de composição química entre os metais envolvidos, devem ser considerados dois importantes efeitos metalúrgicos: Diluição e difusão na junta, devido ao tratamento térmico ou serviço em temperaturas que excedam 422C.

Diluição é definida como a proporção do metal base que participa do metal de solda. No caso, o "metal base" é o P22 e o "metal de adição" é o E-309 Mo.

Em soldagem é importante a avaliação da estrutura e o conseqüente conhecimento das propriedades de um depósito de solda de aços inoxidáveis ou ligas Fe-Cr, Fe-Ni ou Fe-Cr-Ni. Tal conhecimento influi na escolha do processo adequado para a execução da soldagem, bem como na previsão e prevenção dos problemas que podem ocorrer, determinando também em conseqüências, os tratamentos térmicos necessários, anteriores ou posteriores à soldagem.

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

O diagrama de Schaeffler é o principal instrumento para a avaliação do depósito de solda. Ele permite conhecer com antecedência a composição química da estrutura de uma solda de liga Cr-Ni. Permite também escolher os eletrodos apropriados para cada soldagem, mesmo heterogênea; de aço liga, aço cromo, aço inox ferrítico, austenítico, etc... Chega-se a comparar a importância do diagrama de Schaeffler, para os aços inoxidáveis, à importância do diagrama Fe-C, para os aços carbono.

Para se trabalhar com o diagrama de Schaeffler é necessário se determinar o níquel e o cromo equivalente da junta soldada. O níquel equivalente é definido como a soma do teor de níquel e dos elementos Gamágenos (elementos que agem como o níquel), multiplicados pelo fator que expressa sua influência relativamente ao níquel. Assim, Schaeffler definiu o teor de níquel equivalente como:

$$\text{Nieq.} = \% \text{ Ni} + 30 * \% \text{ C} + 0,5 * \% \text{ Mn}$$

O cromo equivalente é definido igualmente como a soma ponderada dos elementos Alfágenos (elementos que agem como o cromo). Schaeffler o definiu como:

$$\text{Creq.} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1,5 * \% \text{ Si} + 0,5 * \% \text{ Nb}$$

Observando-se o diagrama de Schaeffler, constata-se a existência de campos que mostram as regiões de problemas característicos. As composições químicas das soldagens que caírem dentro desses campos podem apresentar outros problemas também, mas o (s) principal (is) é (são) o (s) indicado (s). Assim, ao executar a soldagem, deve-se levar em conta, primeiramente, a prevenção contra o problema indicado.

O campo 1 abrange a região dos aços inoxidáveis ferríticos ao cromo, com baixo teor de carbono, geralmente. O problema é o crescimento irreversível dos grãos, quando o aço está aquecido a temperaturas maiores que 1150C.

Esse crescimento irreversível dos grãos é mais acentuado na ZAC, resultando em fragilização que, normalmente, não resiste sequer aos esforços de contração da junta soldada.

Por essa razão procura-se evitar a todo custo a soldagem destes aços. Na fase de projeto, o que se faz é especificar outro tipo que, ainda mais caro, satisfaça com segurança e sem riscos. Entretanto o uso mais generalizado destes aços é onde a soldagem não traz problemas sérios, como em revestimentos de chapas ("clad"). Esse último uso é o mais comum na indústria petrolífera e petroquímica. Necessitando de solda, a fragilidade do revestimento é em parte compensada pela utilidade da chapa base, de aço-C.

O campo 2 abrange as estruturas martensíticas e parte das estruturas mistas martensítica-austenítica e martensítica-ferri-

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

tica. São normalmente os aços temperados ou temperados e revenidos, com teores mais altos de carbono (ex.: 0,3%), que são sujeitos aos problemas desse campo. A fissuração à frio (abaixo de 400C) é o que ocorre nesses aços, devido a ocorrência simultânea dos três fatores: martensita, tensões e H<sub>2</sub>.

A fissuração normalmente se dá na ZAC da junta soldada, mas pode também ocorrer no cordão de solda.

O campo 3 engloba todas as composições de ligas que tem possibilidade de originarem, após longo tempo de permanência em temperaturas da faixa de 500-900C, uma fase chamada de fase sigma, basicamente Fe-Cr, que tem como principal característica uma grande fragilidade à temperatura ambiente. A fase sigma, sendo formada basicamente por ferro e cromo, tem mais facilidade de se formar a partir da ferrita. Entretanto as ligas austeníticas também formam fase sigma. Sendo a proporção na fase sigma de aproximadamente 1 átomo de Fe para cada átomo de cromo, era de se esperar que só ligas de alta porcentagem de cromo fossem susceptíveis. Entretanto devido a possibilidade de difusão, aliada ao fato de haver regiões microsegregadas de composições químicas diversas, há possibilidade de ocorrência de fase sigma em ligas com até 20% de cromo, austeníticas ou ferríticas.

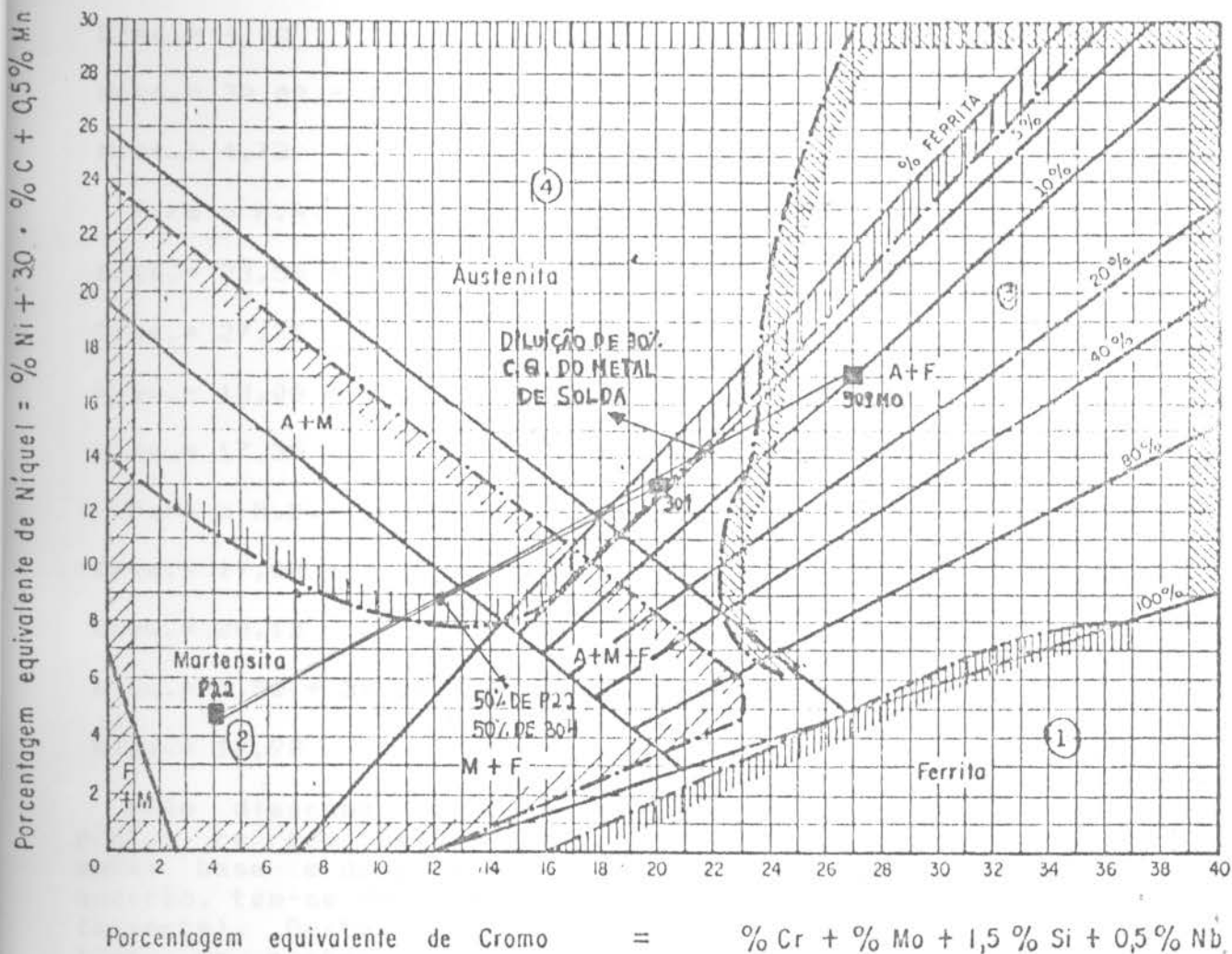
O campo 4 engloba basicamente as composições austeníticas. O problema que pode ocorrer nas soldagens de ligas cuja composição esteja neste campo é a fissuração à quente. Ocorre em temperaturas acima de 1250C. A explicação do fenômeno é que nessas ligas há possibilidade de formação de fases segregadas, pré-fusíveis ou de menor resistência mecânica. Este fato, aliado as tensões de contração oriundas de uma soldagem, é suficiente para trincar a solda em temperaturas ainda elevadas. Ocorre basicamente no cordão fundido, embora possa também ocorrer na ZAC.

Ao centro do diagrama existe uma região que não pertence a nenhum dos quatro campos. As composições químicas que pertencem a essa região, estão livres dos quatro defeitos citados. O objetivo então é tentar fazer com que a composição química da zona fundida caia dentro dessa região, embora esse procedimento não resolva a situação para a ZAC, cuja composição química é a do metal base. Os parâmetros a controlar para alcançar esse objetivo são, basicamente, a escolha do metal de adição (eletrodo, fluxo, etc...) e o controle da diluição (participação do metal base, possível pela seleção apropriada dos parâmetros do processo de soldagem utilizado).

Ainda que esse objetivo não seja atingido, o diagrama de Schaeffler nos dá uma indicação do problema principal a encontrar na soldagem, possibilitando-nos a prevenção (ou correção) necessária.

A fim de se tentar ter uma idéia da composição química do metal de solda depositado, calculou-se o Cr e o Ni equivalentes, da junta em questão, tomando-se os valores médios das concentrações dos elementos químicos.

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS



Faixa 1

CRESCIMENTO DE GRÃO  
ACIMA DE 1150°C

Faixa 2

PERIGO DE TRINCAS  
ABAIXO DE 400°C

Faixa 3

FASE SIGMA ENTRE  
500°C e 900°C

Faixa 4

PERIGO DE TRINCAS  
ACIMA DE 1200°C

FIGURA 6 - Diagrama de Schaeffler com faixas de demarcação das propriedades do depósito de solda.

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

Para o M.B. (P22):

$$C_{req.} = 2,25 + 1,00 + 1,50 * 0,50$$

$$C_{req.} = 4,00$$

$$Ni_{eq.} = 30,00 * 0,15 + 0,50 * 0,45$$

$$Ni_{eq.} = 4,73$$

Para o M.A. (E-309 Mo):

$$C_{req.} = 23,50 + 2,50 + 1,50 * 0,90$$

$$C_{req.} = 27,35$$

$$Ni_{eq.} = 13,00 + 30,00 * 0,12 + 0,50 * 1,50$$

$$Ni_{eq.} = 17,35$$

Para o M.B. (suporte de Inox 304):

$$C_{req.} = 19,00 + 1,50 * 0,75$$

$$C_{req.} = 20,13$$

$$Ni_{eq.} = 9,50 + 30,00 * 0,08 + 0,50 * 0,20$$

$$Ni_{eq.} = 12,90$$

Pelo diagrama, pode-se traçar uma linha reta que liga os pontos representativos dos valores de Cr e Ni equivalentes, do metal base e do metal de adição. Entretanto, para a junta em questão, tem-se dois metais base. O P22 (tubulação) e o Inox 304 (suporte). Desta forma, primeiramente, traça-se uma linha que liga os pontos representativos dos valores de Cr e Ni equivalentes dos dois metais base, e em seguida outra que ligue os valores de Cr e Ni equivalentes do metal de adição e o ponto médio da linha anterior, já que considera-se igual participação dos dois metais base, na composição final da zona fundida. Assim, a composição do metal de solda estará em algum ponto desta linha reta, dependendo do grau de diluição, que por sua vez depende dos parâmetros de soldagem, do processo e do passe de solda executado. Considerando-se a diluição no primeiro passe de 30%, que é a diluição normal para a soldagem a arco com eletrodo revestido, percebe-se que a estrutura formada é austenítica, com uma pequena quantidade de ferrita (5%), que é bastante importante para evitar trinca à quente. Desta forma, foge-se do problema de fissuração à frio, muito embora deva ocorrer têmpera em uma pequena região da ZAC.

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

Para o segundo passe o metal base não será mais o anterior (P22 + Inox 304), mas uma mistura entre ele e o metal da zona fundida do primeiro passe, prevalecendo este em proporção.

A tendência é, pois, a diluição se reduzir até praticamente se anular no últimos passes.

Os cuidados a tomar, principalmente com relação aos primeiros passes, serão com respeito à sensitização (e conseqüentemente a corrosão intergranular) e fissuração à quente, problemas característicos da soldagem de aços austeníticos.

Conforme anteriormente mencionado, o diagrama de Schaeffler é comparado ao diagrama Fe-C; para os aços inoxidáveis. Entretanto é bom conhecer a sua utilidade prática. Apesar de suas limitações, o mesmo apresenta grande efeito, sendo praticamente impossível falar-se em soldagens de aços inoxidáveis omitindo-se referência ao diagrama. Como utilidade prática o diagrama original já foi bastante modificado e suas versões mais modernas são bastante úteis.

Difusão em juntas com metais dissimilares descreve a migração de átomos através da interface. Em juntas envolvendo os aços em questão, este efeito é mais pronunciado para os átomos de carbono, sendo um fenômeno dependente do tempo e da temperatura, onde o carbono migra em direção do aço que contém elementos mais potentes na formação de carbonetos, ou possui maior quantidade dos mesmos.

A temperaturas menores do que 422C, a migração de carbono não é considerada significativa a ponto de provocar defeitos na junta. Entretanto, com o aumento da temperatura, a taxa de difusão aumenta, podendo causar fragilização na interface, quando a temperatura exceder 450C num período de 5 a 10 anos. Nota-se que este efeito pode ser provocado em somente 1 ano à temperatura de 505C.

Numerosos casos de falhas, geralmente em serviços acima de 422C, são descritos na literatura, relativos a aços baixa liga para tubulação, soldados com consumível de aço inoxidável. Existem, entretanto, muitas aplicações onde metais dissimilares necessitam ser utilizados e, quando consumíveis do tipo E-309 e E-310 resultaram em falhas, o "Inconel" foi empregado com sucesso.

### 3.4- FALHAS - POSSÍVEIS CAUSAS:

- 1) Durante o processo de soldagem
  - a) Trincas à quente (fissuração à quente):

Se manifestam em alta temperatura, geralmente acima de 1250C. Muitas vezes se formam fases segregadas, pré-fusíveis ou de menor resistência mecânica; fatos já mencionados na análise do diagrama de Schaeffler. Aliado a isso, existem diferenças nos pontos de fusão e nos coeficientes de dilatação térmica dos materiais envolvidos, podendo causar uma concentração de tensões, durante o



## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

aquecimento e resfriamento, suficiente para superar o limite de resistência, tanto da solda como da ZAC, levando a junta soldada à falha.

### b) Trincas à frio (fissuração à frio):

A concentração de tensões devido ao resfriamento e aquecimento, aliada a um alto nível de H<sub>2</sub> no metal de solda e uma microestrutura susceptível, formada no resfriamento, pode originar uma fissura na ZAC, ou no metal de solda, podendo ocasionar em falha da junta.

### 2) Durante trabalho cíclico:

#### a) Considerando a existência de uma pré-trinca ou fissura:

Como resultado da operação de soldagem, uma trinca (fissura) propaga-se por fadiga térmica e ou mecânica, visto que o conjunto soldado trabalha num ritmo cíclico.

#### b) Sem a existência de uma pré-trinca ou fissura:

Os fatores que contribuem para o surgimento de uma falha, que normalmente se apresenta na forma de trincas que se propagam paralelas à linha de fusão, são os seguintes:

#### 1. Tensões dos ciclos térmicos:

#### 2. Baixa resistência à oxidação da liga ferrítica

#### 3. Migração de carbono

#### 4. Deterioração metalúrgica causada por serviço a alta temperatura

O desenvolvimento da microestrutura complexa, da junta soldada segue a seguinte ordem:

- Durante a soldagem o cromo e o níquel do metal solda difundem para o P22, aumentando a temperabilidade de uma região adjacente à linha de fusão, formando, durante o resfriamento, uma estrutura martensítica.

- Durante a operação da junta, haverá difusão de carbono para o metal de solda, visto que este possui uma maior solubilidade no metal de solda do que no aço ferrítico.

Haverá formação de carbonetos de cromo nesta região, durante o resfriamento da temperatura de soldagem e, mais tarde, durante serviço. Os carbonetos crescerão por difusão de cromo da matriz, imediatamente adjacente ao contorno de grão. Formar-se-a dois

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

tipos de carbonetos. Os localizados nos contornos de grão, serão chamados de carbonetos primários, sendo maiores e de mais fácil crescimento, já que ocupam posições de mais baixa energia, enquanto que os outros (secundários) se posicionam na matriz.

## 3.4.1- MECANISMO DE FALHA:

As trincas geralmente seguem pelo contorno de grão, que contém os precipitados, e são paralelas à linha de fusão. Tais trincas, frequentemente contém óxidos, usualmente na forma de "oxide finger".

As partículas com alta concentração de cromo que se formam nos contornos de grão, paralelas à linha de fusão, esgotam o cromo da matriz adjacente. Como o cromo é que dá ao P22 a resistência à oxidação, tais regiões adjacentes serão mais susceptíveis à oxidação do que regiões vizinhas.

A redução da resistência à oxidação leva a formação de um entalhe de óxido no P22. O entalhe formado leva a nucleação e propagação de uma trinca.

Junto com a redução de cromo da matriz, a qual a um decréscimo da resistência à oxidação, a concentração de carbono também é reduzida pela difusão para o metal de solda e pela formação de carbonetos precipitados.

A redução de carbono é acompanhada pelo decréscimo de resistência mecânica, portanto tais regiões possuem menor resistência mecânica do que regiões vizinhas, favorecendo, desta forma, a concentração de tensões e falha nestas regiões.

Apesar destas considerações, sabe-se que é necessário uma tensão crítica para nuclear uma trinca, no entalhe de óxido. A tensão crítica total, gerada durante trabalho cíclico, compreende o somatório das tensões oriundas das diferenças dos coeficientes de dilatação térmica dos materiais envolvidos, que criam componentes tangenciais, longitudinais e radiais de tensão; das tensões acumuladas pelo carregamento externo (tensões de flexão e vibração); e das tensões geradas pelo aumento de volume que ocorre devido a formação de óxidos (usualmente magnetita), nas regiões sensibilizadas.

Já com a trinca formada, a sua propagação se dá pelas tensões geradas constantemente devido ao trabalho cíclico e por, muitas vezes, a associação com vazios de fluência, formados adjacentes aos precipitados, levando a junta soldada a falhar.

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

## 4. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS:

Como não foi possível obter-se um corpo de prova a partir da junta propriamente dita, foram realizadas experiências com corpos de prova, preparados em oficina (SECAL), afim de simular o defeito observado (campo). Entretanto deve-se notar que as experiências realizadas somente simularão uma parte de todo o universo do problema. Somente a elaboração de um corpo de prova similar e o submetimento do mesmo às condições reais de operação, conseguiria-se uma real reprodução das condições metalúrgicas envolvidas no defeito.

Visto que o defeito em campo foi observado em uma pequena região da ZAC, e não efetivamente na solda, foram realizados perfis de microdureza no intuito de se analisar esta região:

Descrição do método de medida de microdureza:

- Em todos os casos foi tomado como ponto zero (primeiro ponto) o valor de microdureza no metal de solda e, a partir deste, os demais valores ao longo da ZAC.

- Mediu-se a microdureza de vinte pontos, ao longo da ZAC, até o metal base, distanciados por 0,2mm.

Deve-se ter em mente que a microdureza é tomada em regiões muito pequenas (a nível de microconstituente), portanto oscilações nos valores medidos devem ser considerados.

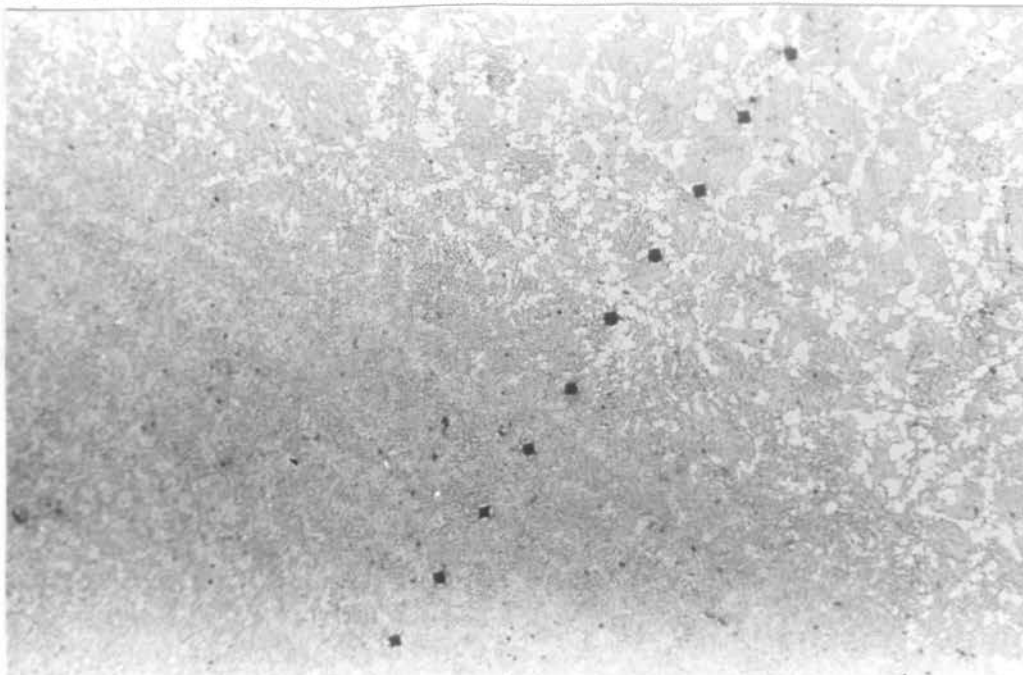


FIGURA 7 - Aspecto do perfil de microdureza (50 X, Nital 2%).

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

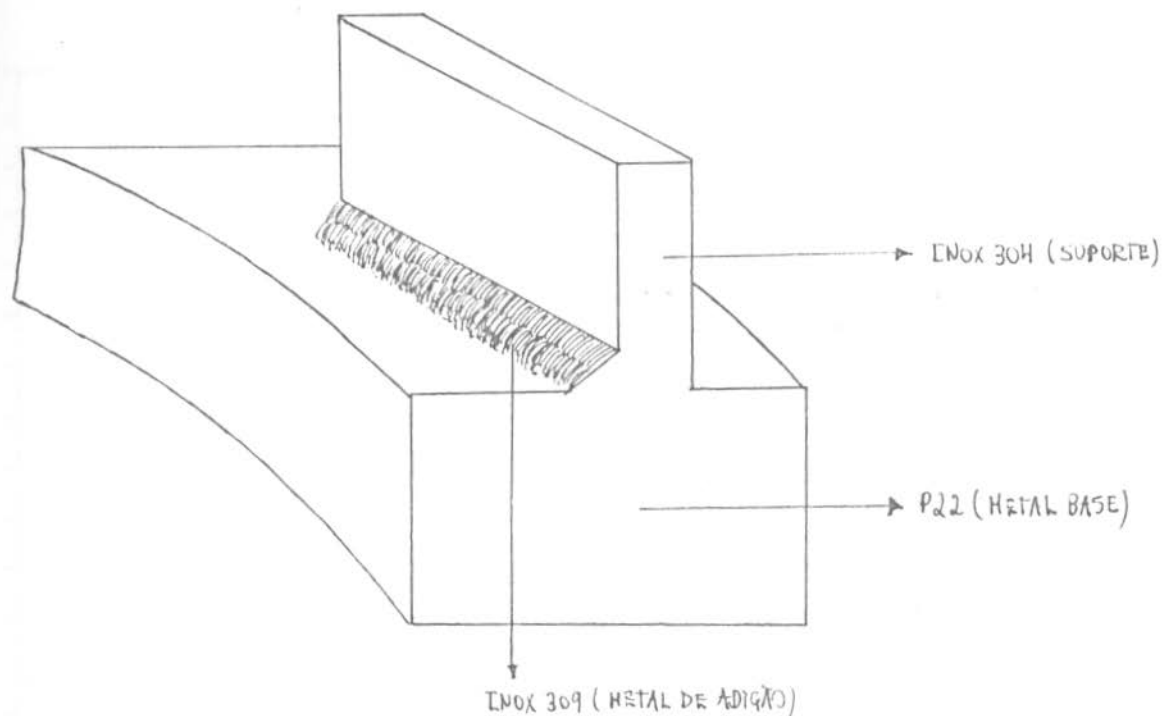


FIGURA 8 - Desenho da junta experimental.

Os corpos de prova foram elaborados a partir de soldas em ângulo (junta em T), afim de reproduzir a solda em campo, como mostra o desenho acima.

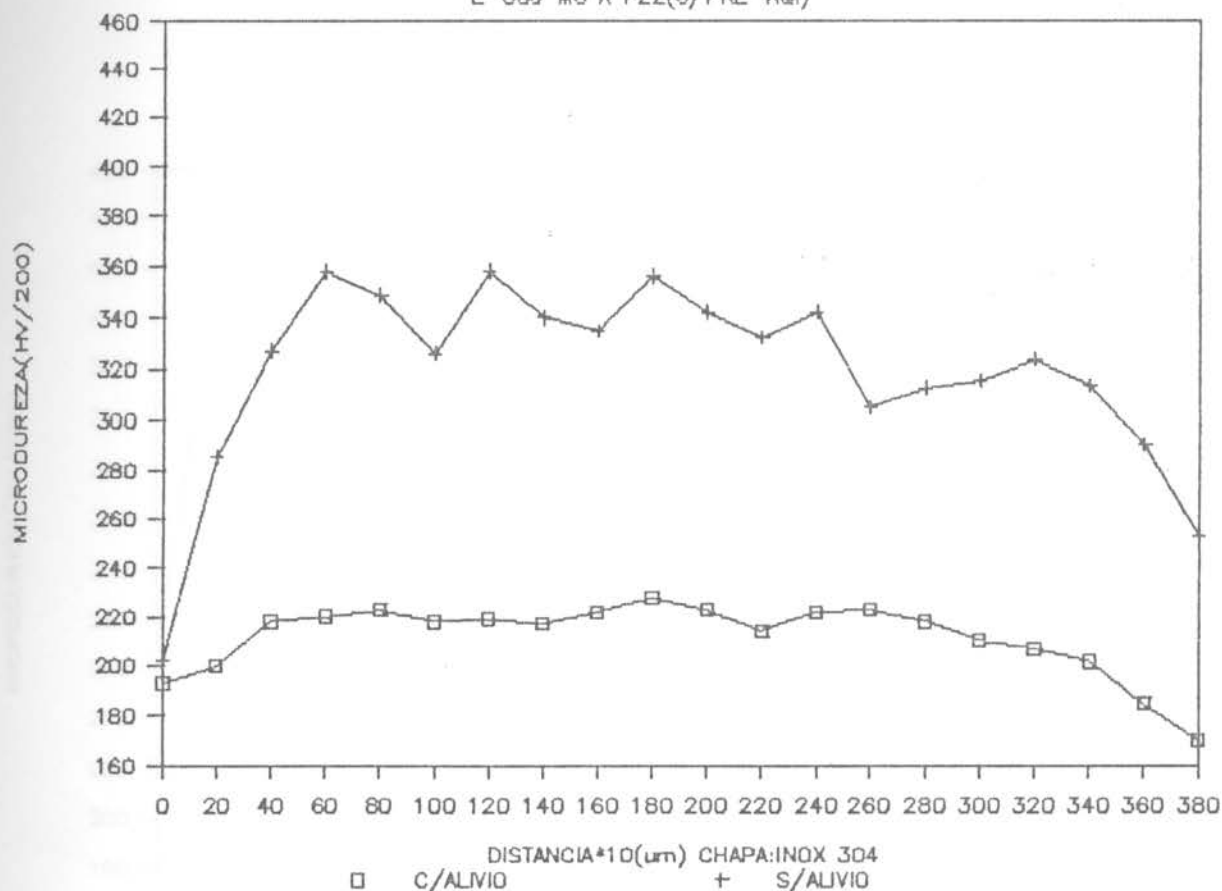
## EXPERIÊNCIAS:

A primeira experiência descreve a junta propriamente dita, ou seja, a junta que originou o problema em campo. As demais experiências foram realizadas no intuito de se obter mais dados, para uma provável troca de metal de adição.

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-309 Mo X P22(C/PRE-AQ.)



i) Solda dissimilar:

Metal de adição: E-309 Mo

Chapa: Inóx 304

a) Com pré-aquecimento: T = 200C

a-1) Com alívio de tensões (forno)

T = 720C

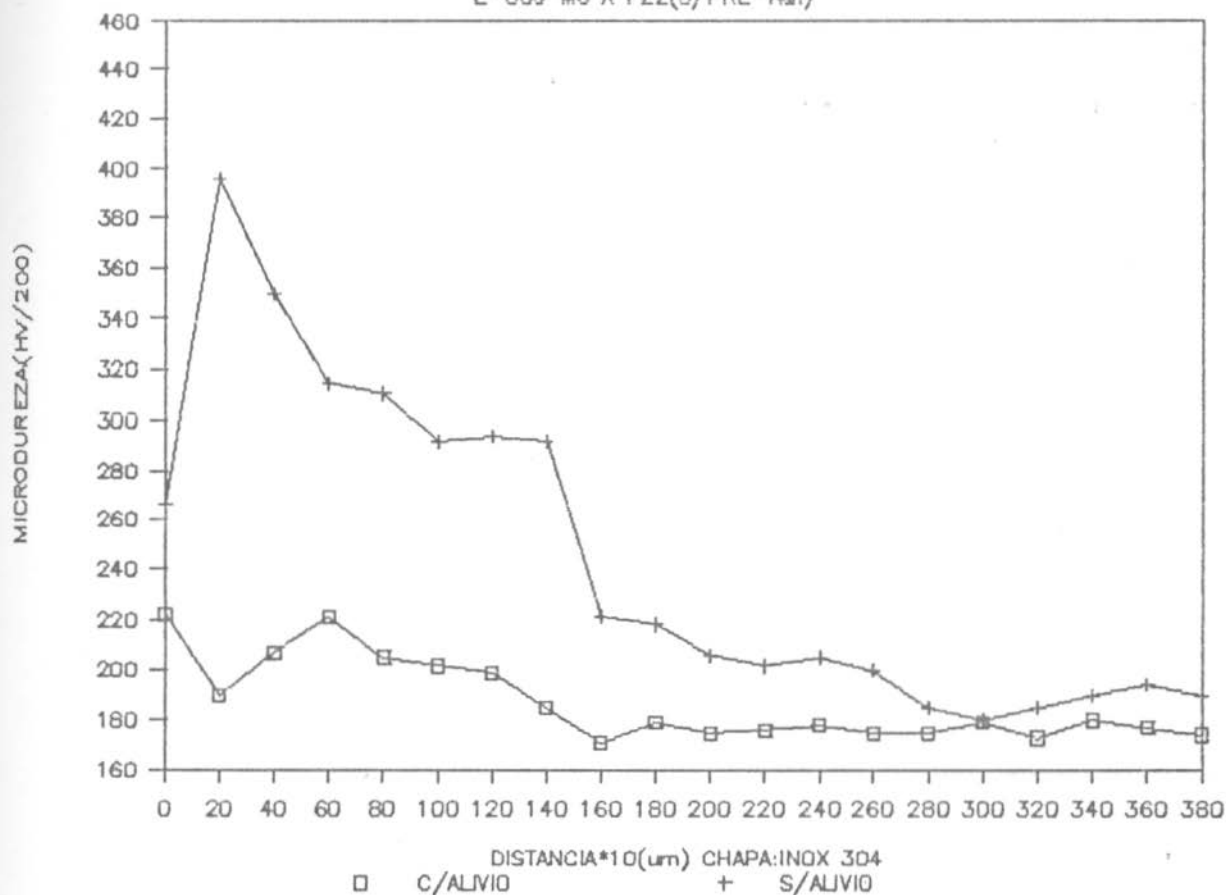
t = 1 hora

a-2) Sem alívio de tensões

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-309 Mo X P22(S/PRE-AQ.)



b) Sem pré-aquecimento

b-1) Com alívio de tensões (forno)

T = 720C

t = 1 hora

b-2) Sem alívio de tensões

SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

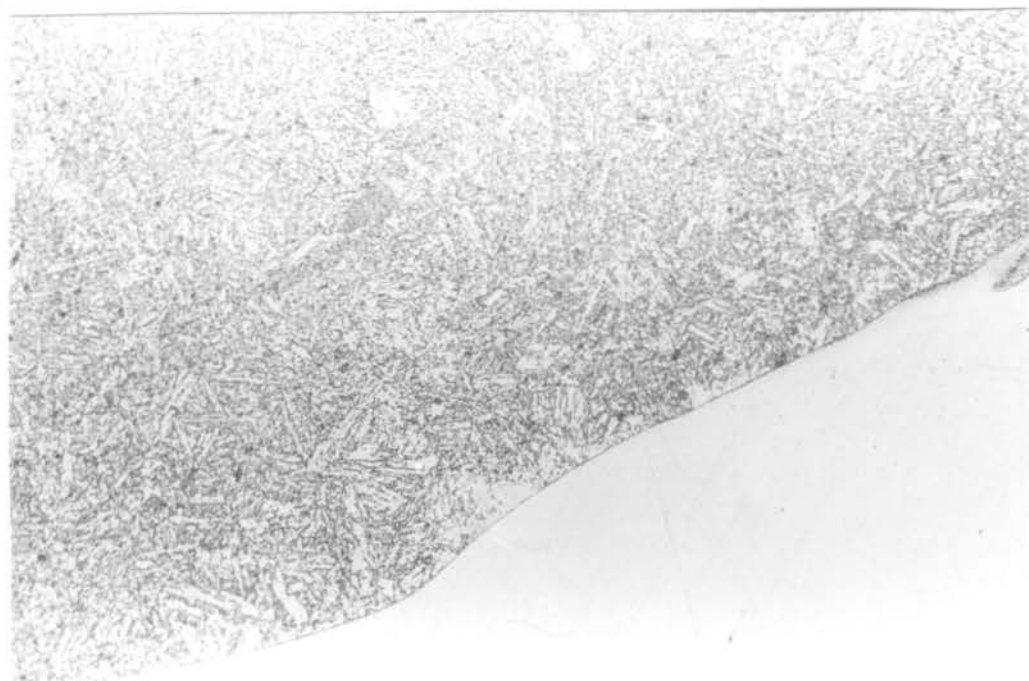


FIGURA 9 - Interface P-22 X E-309 Mo, mostrando a região temperada (100X, Nital 2%).

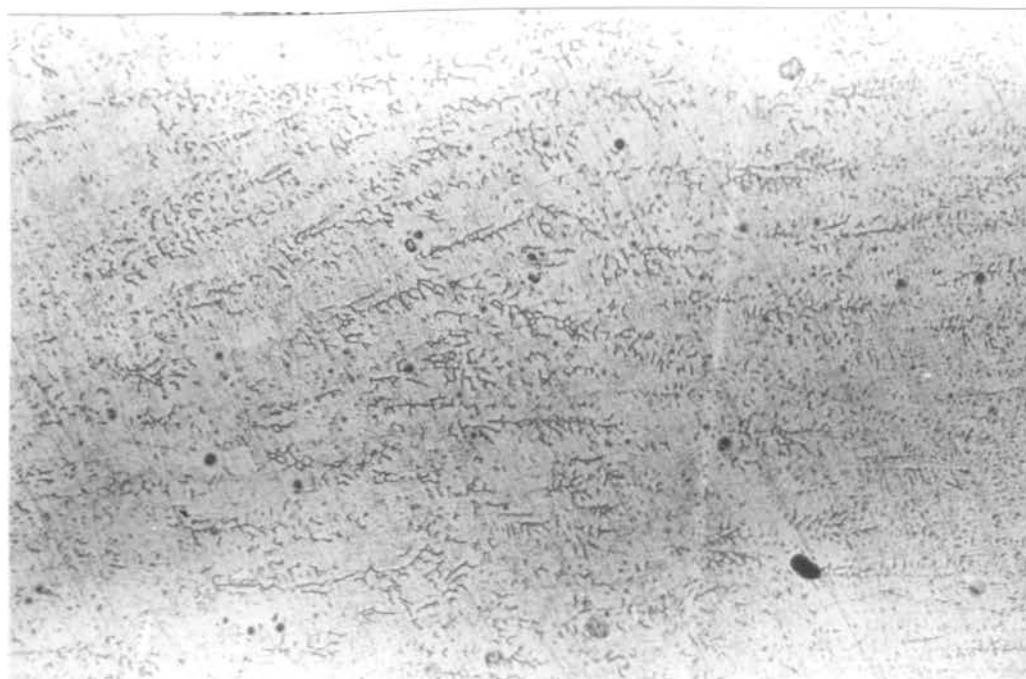
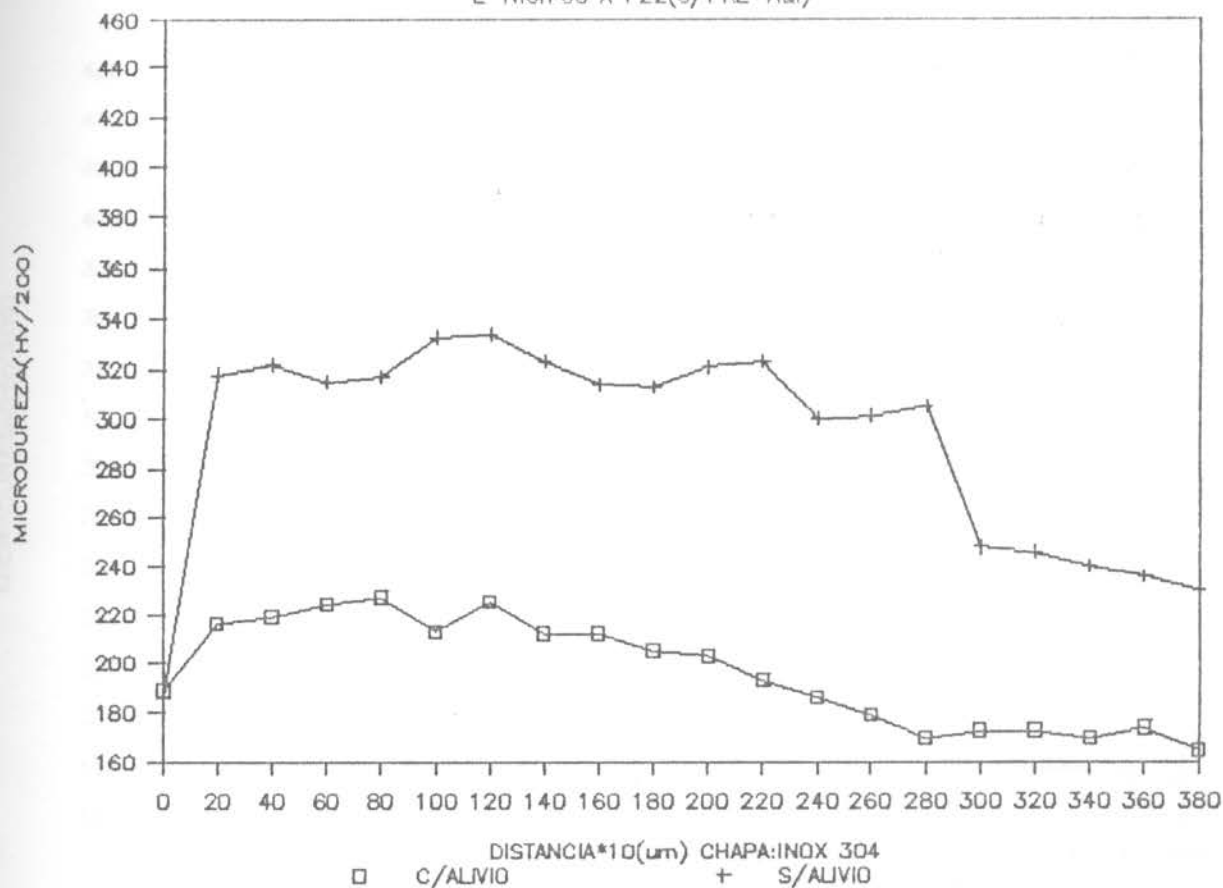


FIGURA 10 - Aspecto micrográfico do metal de adição E-309 Mo (100 X, HDI fumegante)

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-NiCrFe3 X P22(C/PRE-AQ.)



2) Solda dissimilar:

Metal de adição: E-NiCrFe3 (Inconel 182)

Chapa: Inox 304

a) Com pré-aquecimento: T= 200C

a-1) Com alívio de tensões

T = 720C

t = 1 hora

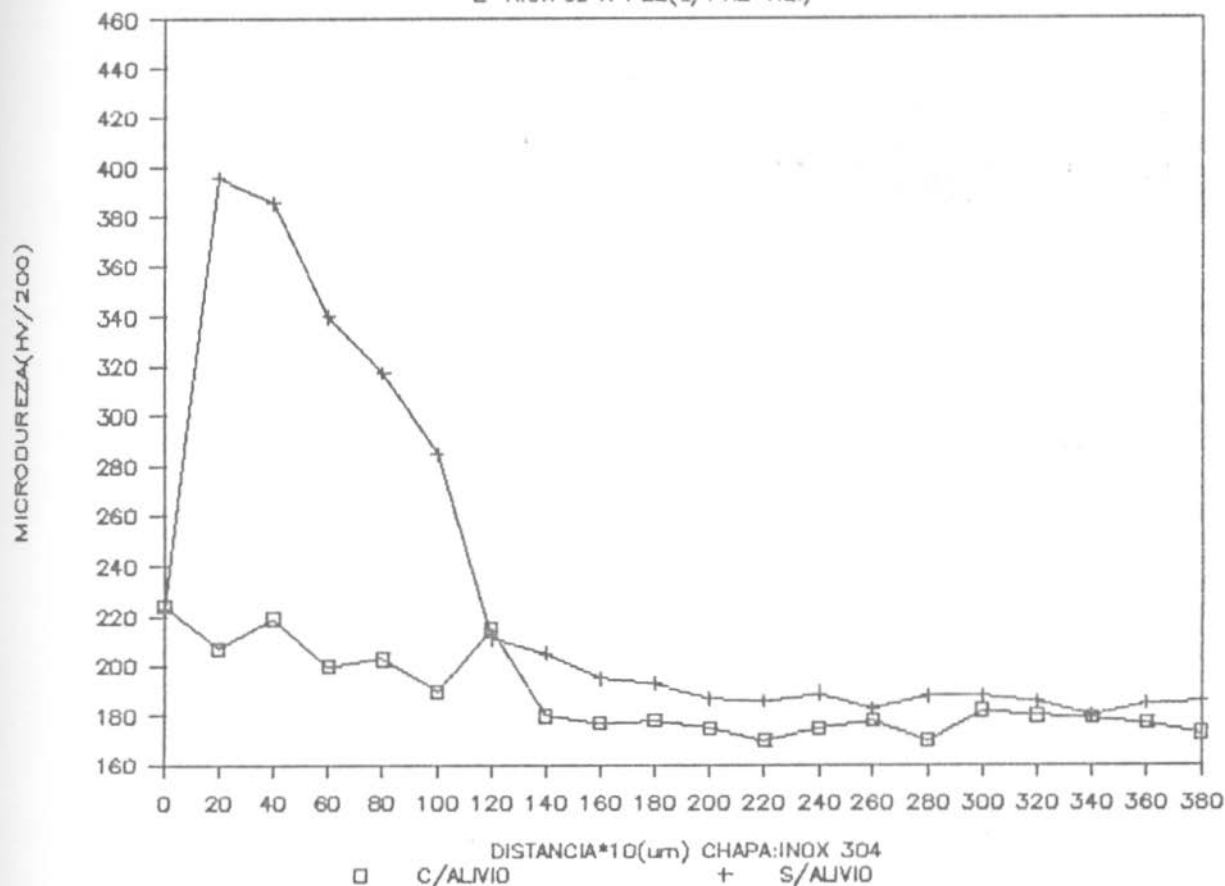
a-2) Sem alívio de tensões



## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-NiCrFe3 X P22(S/PRE-AQ.)



b) Sem pré-aquecimento

b-1) Com alívio de tensões

T = 720C

t = 1 hora

b-2) Sem alívio de tensões

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

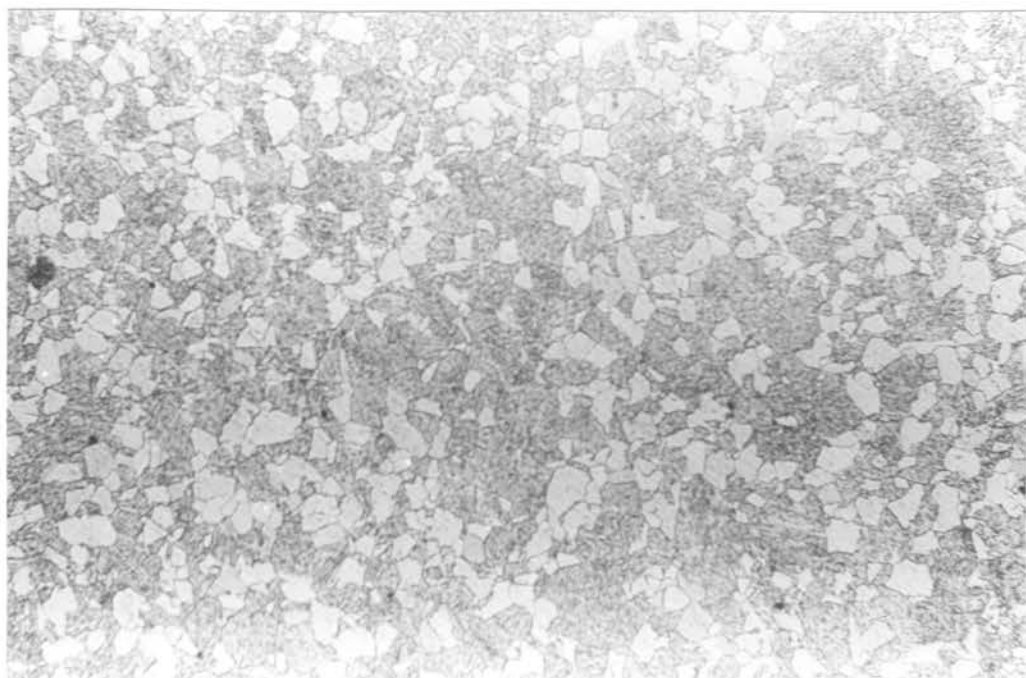


FIGURA 11 - Aspecto micrográfico do metal base P-22 (100 X, Nital 2%).

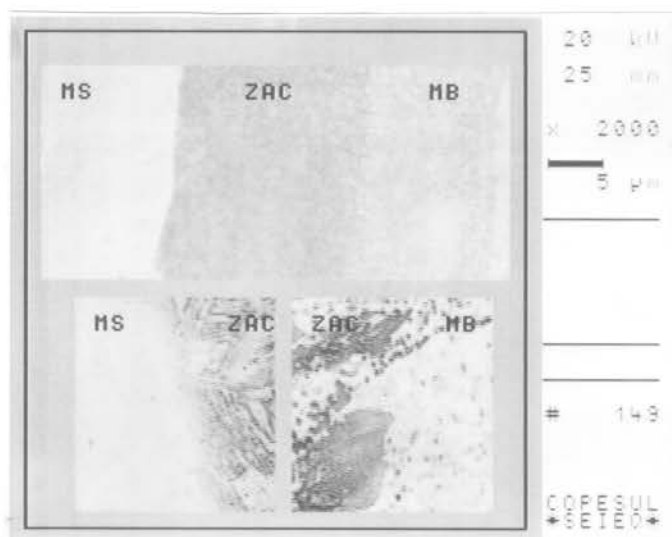
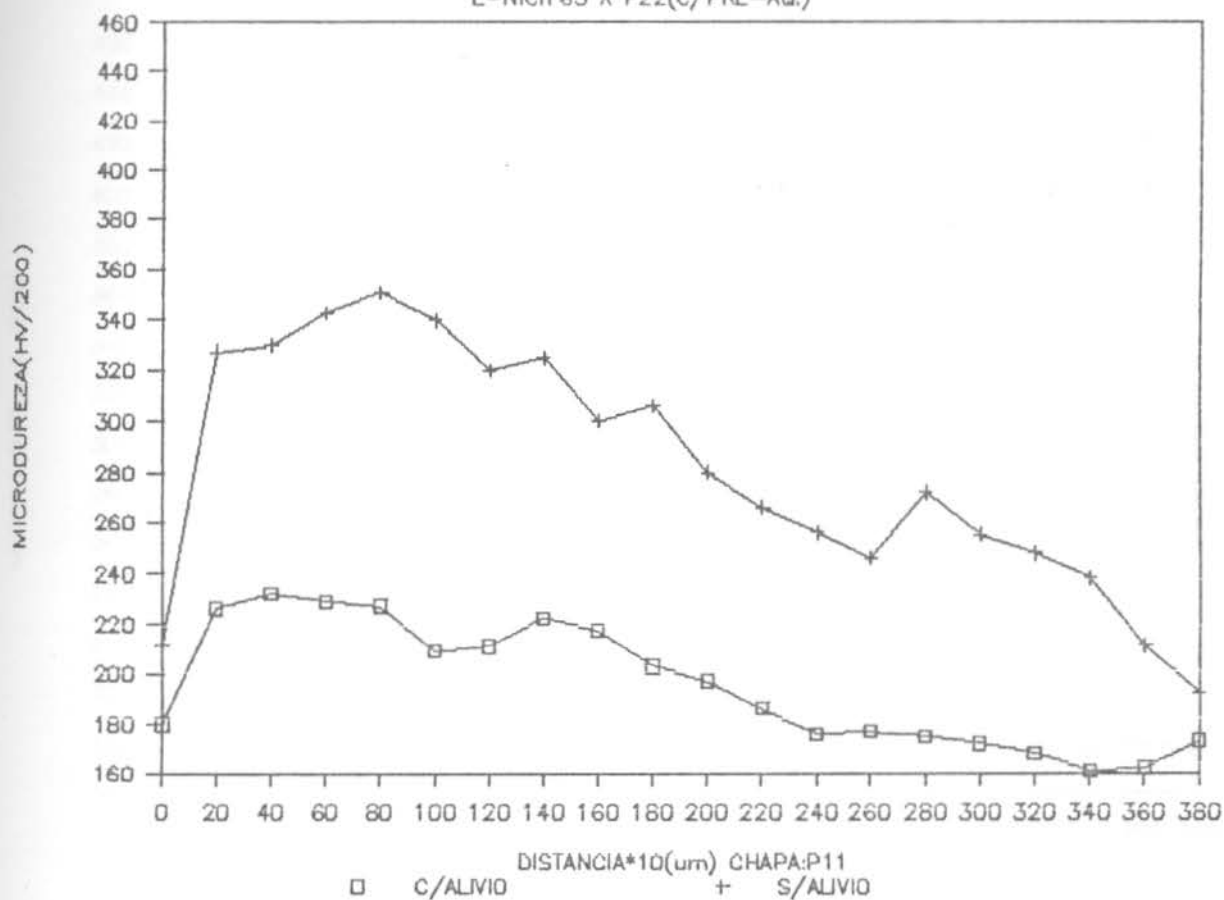


FIGURA 12 - Foto obtida com microscópio eletrônico de varredura, mostrando as três regiões distintas da soldagem.

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-NiCrFe3 X P22(C/PRE-AQ.)



3) Solda dissimilar:

Metal de adição: E-NiCrFe3 (Inconel 182)

Chapa: P11

a) Com Pré-aquecimento: T = 200C

a-1) Com alívio de tensões (forno)

T = 720C

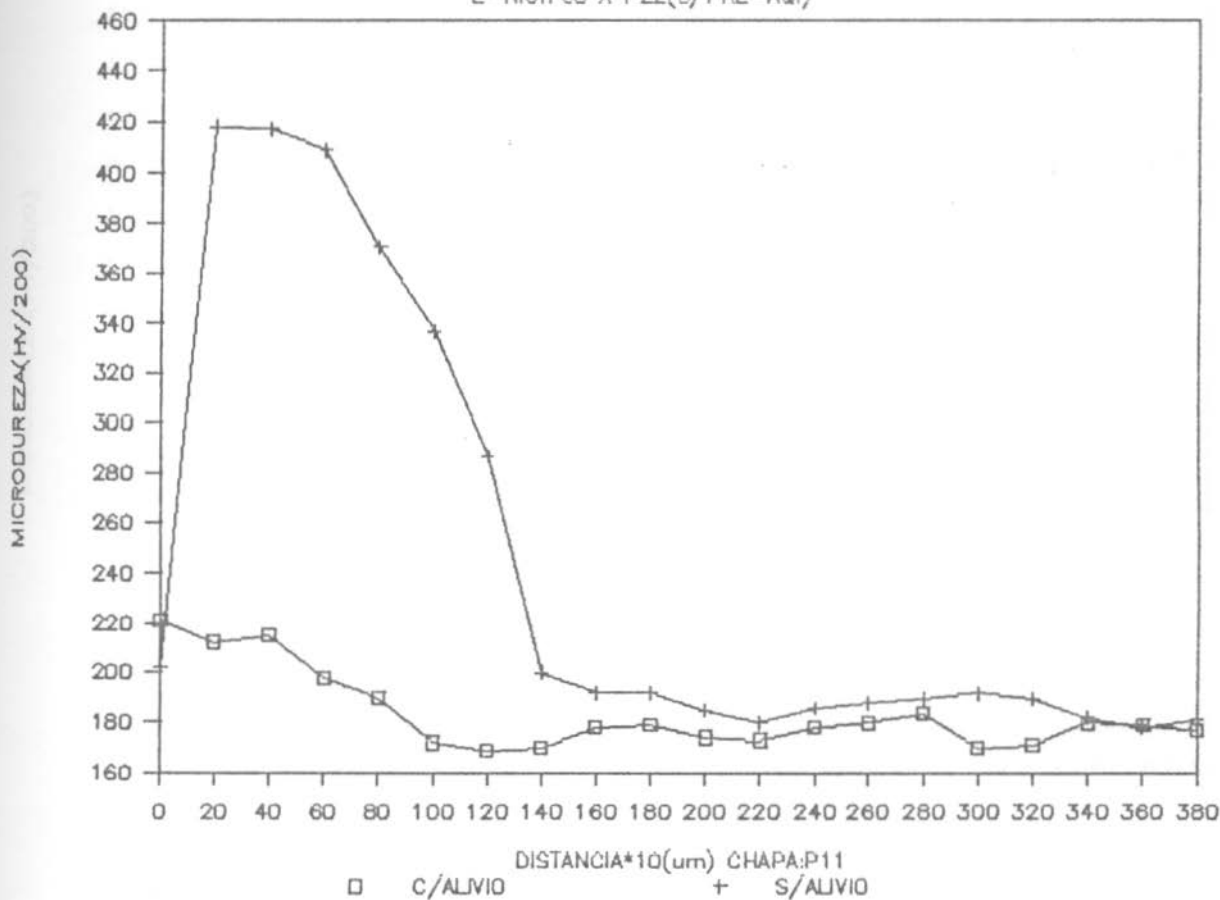
t = 1 hora

a-2) Sem alívio de tensões

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-NiCrFe3 X P22(S/PRE-AQ.)



b) Sem pré-aquecimento

b-1) Com alívio de tensões

T = 720C

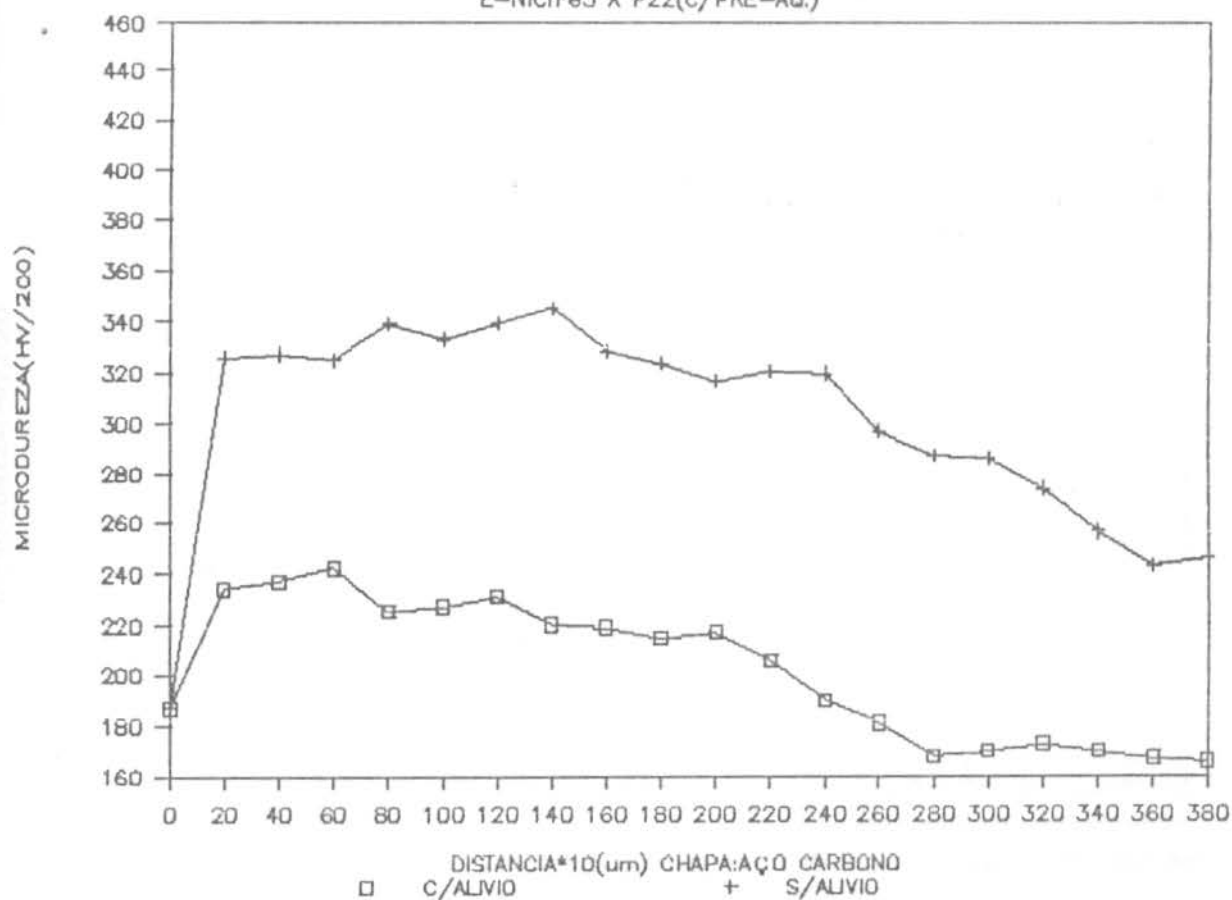
t = 1 hora

b-2) Sem alívio de tensões

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-NiCrFe3 X P22(C/PRE-AQ.)



4) Solda dissimilar:

Metal de adição: E-NiCrFe3 (inconel 182)

Chapa: Aço carbono

a) Com pré-aquecimento: T = 200C

a-1) Com alívio de tensões (forno)

T = 720C

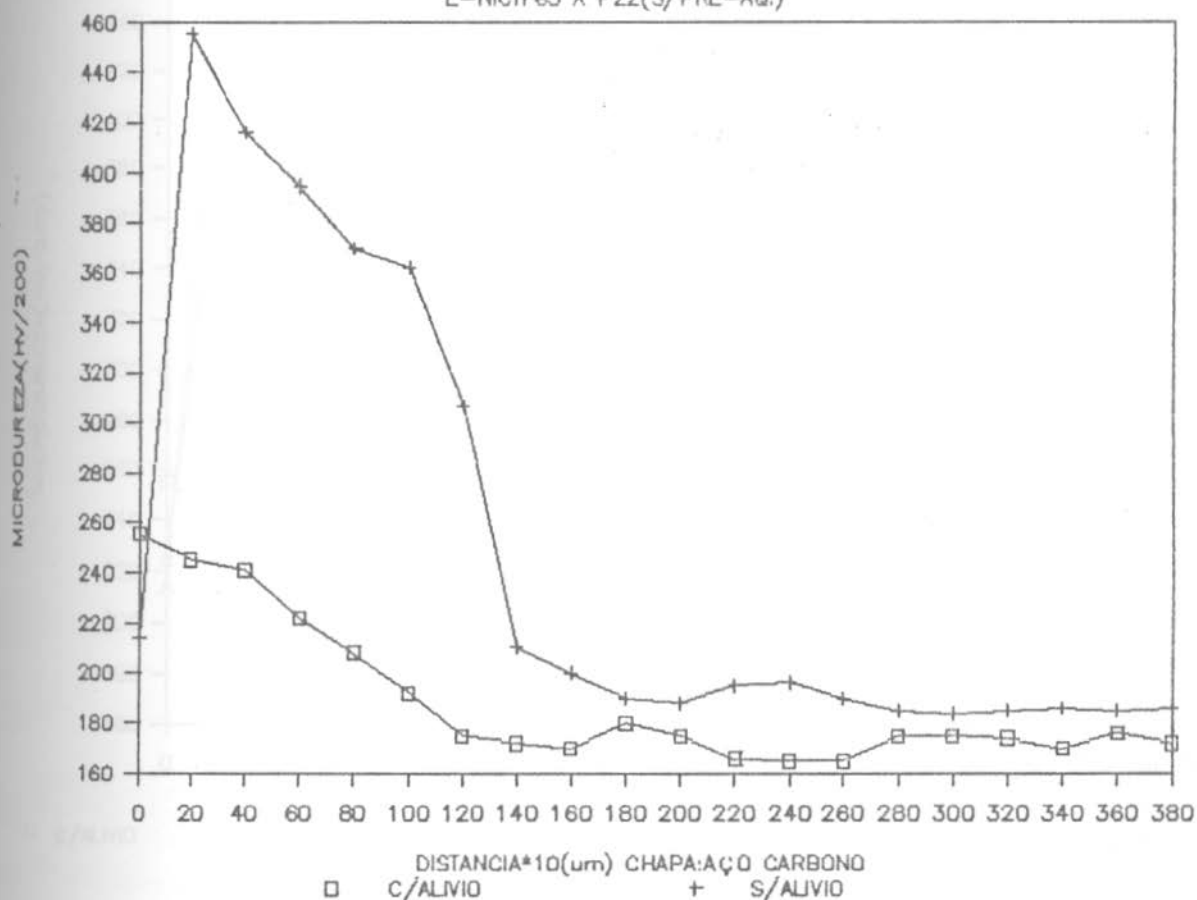
t = 1 hora

a-2) Sem alívio de tensões

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-NiCrFe3 X P22(S/PRE-AQ.)



b) Sem pré-aquecimento

b-1) Com alívio de tensões

T = 720C

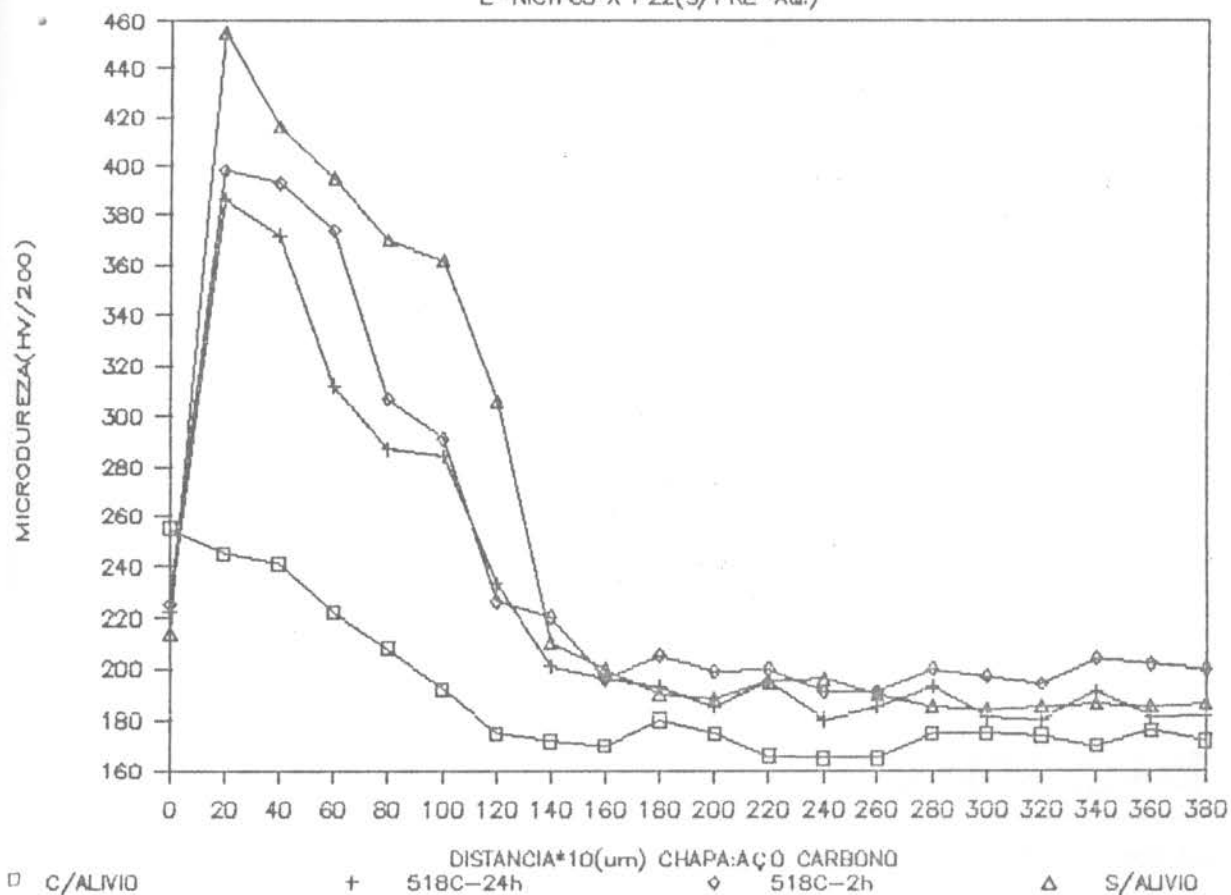
t = 1 hora

b-2) Sem alívio de tensões

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-NiCrFe3 X P22(S/PRE-AQ.)



5) Soldou-se uma chapa de aço carbono no P22, usando-se com metal de adição o eletrodo E-NiCrFe3 (Inconel 182), sem pré-aquecimento.

Foram preparados dois corpos de prova, a partir desta junta. Os mesmos foram posicionados em um forno de tratamento térmico, na temperatura de 518°C, visando-se observar o comportamento da solda nesta temperatura, que é a temperatura de trabalho desta (medido com pirômetro digital).

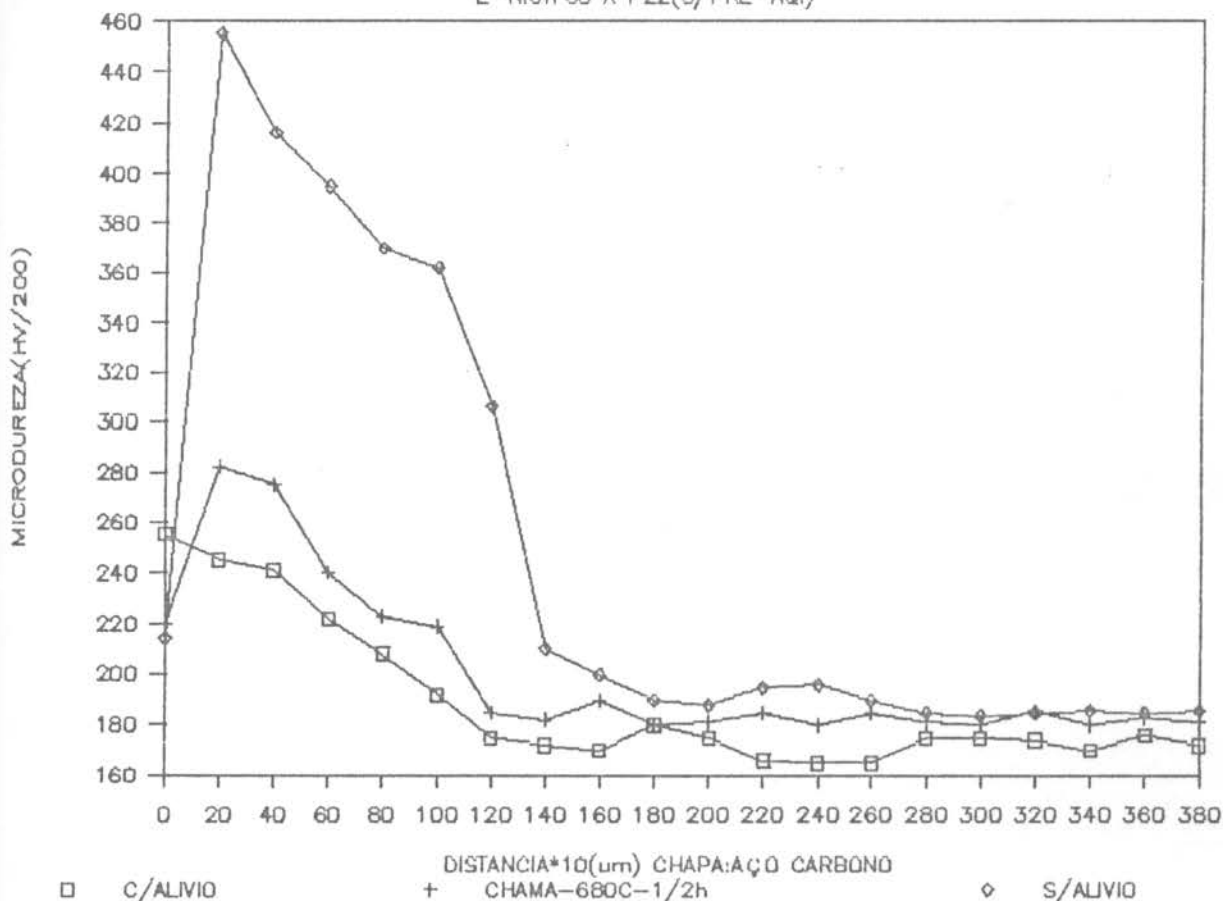
Primeiramente foi disposto no forno, um corpo de prova, na temperatura de 518°C, durante 2 horas. Em seguida posicionou-se o outro, na mesma temperatura, durante 24 horas.

Objetivava-se observar, com esta experiência, de quanto seria a queda da dureza, ao longo da ZAC, durante o tempo de permanência no forno. Desta forma, se houvesse uma queda significativa da dureza, então, em condições de operação, a junta se "auto-aliviaria", dispensando tratamento térmico.

A fim de comparação, o gráfico desta experiência também mostra os resultados obtidos na experiência de número 4.

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-NiCrFe3 X P22(S/PRE-AQ.)



□ C/ALVIO

+ CHAMA-680C-1/2h

◇ S/ALVIO

Visto que a temperatura de trabalho da solda ( $T = 518^{\circ}\text{C}$ ) não foi suficiente para promover uma queda significativa da dureza, e visto que um tratamento térmico convencional em campo específico (resistência elétrica) é inviável em uma eventual parada geral do processo para manutenção, resolveu-se realizar experiências com chama. O alívio de tensões com chama foi realizado com um maçarico ("chuveiro") e um pirômetro digital, para controle de temperatura.

6) Solda dissimilar:

Metal de adição: E-NiCrFe3 (Inconel 182)

Chapa: carbono

Sem pré-aquecimento



## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

Após a soldagem, foi preparado um corpo de prova desta junta. O mesmo foi submetido a um alívio de tensões com chama, na temperatura de 680C, durante 30 minutos. Novamente os resultados obtidos na experiência de número 4 foram mostrados, para efeito de comparação.

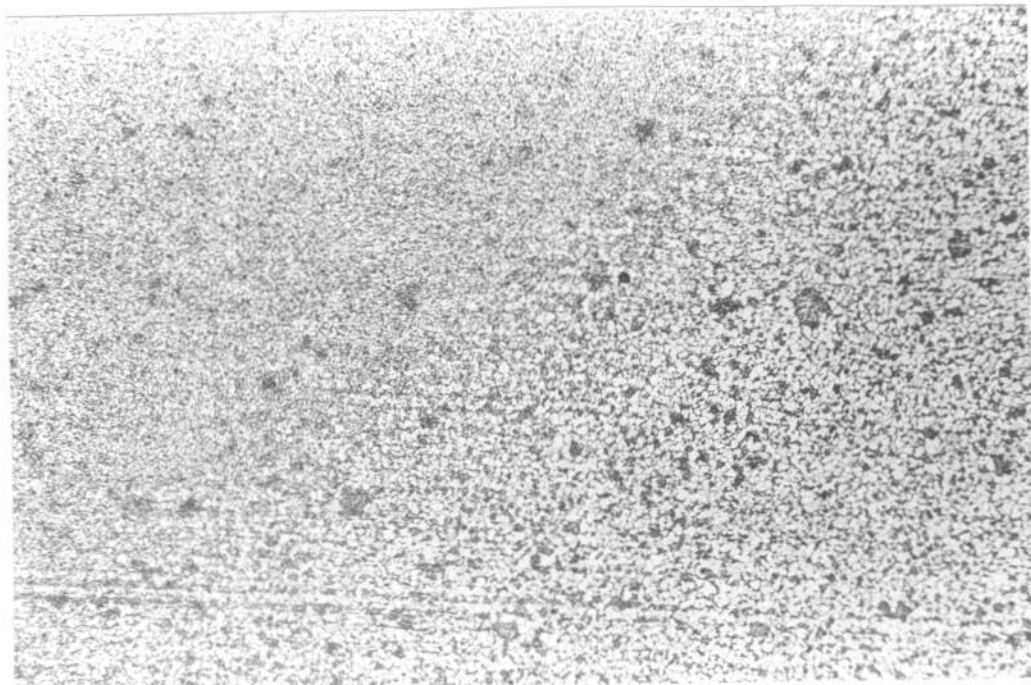
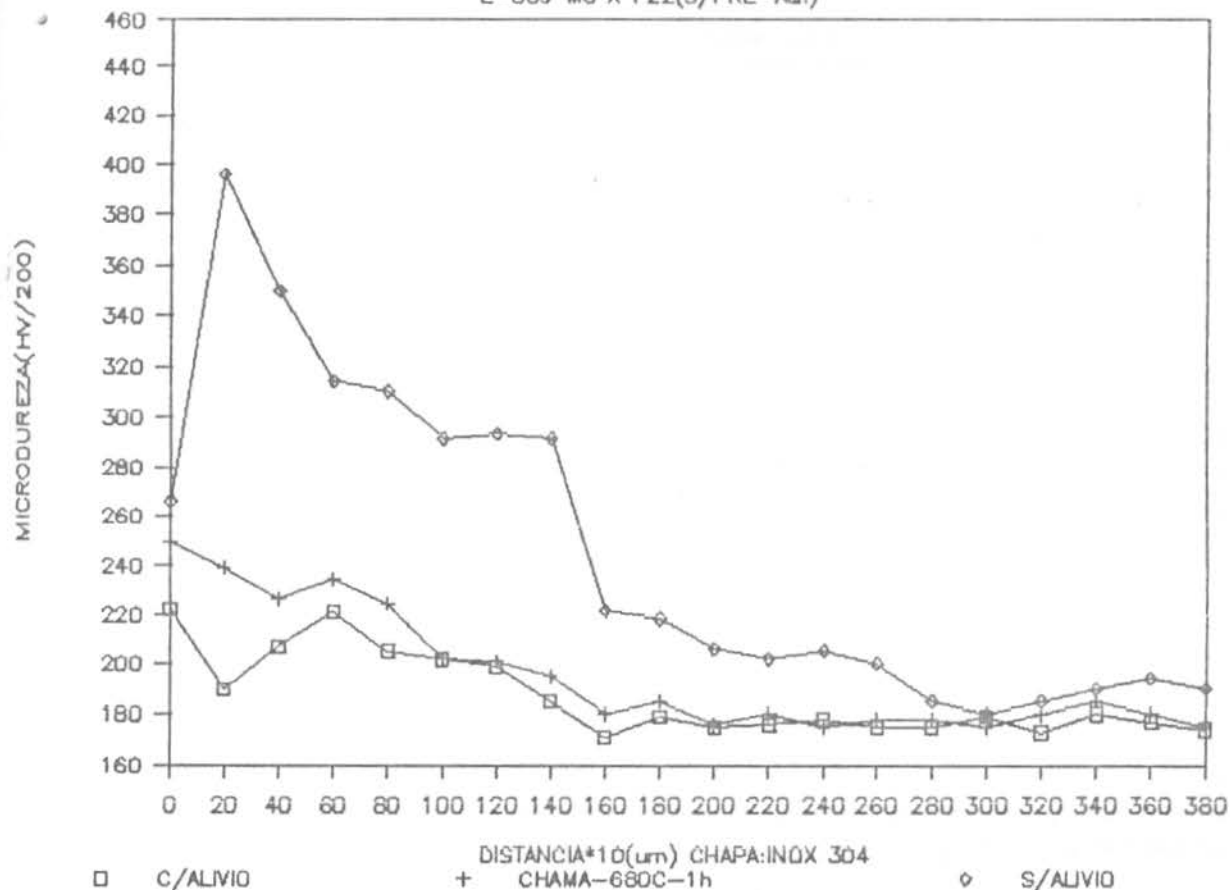


FIGURA 13 - Interface da ZAC e metal base  
(50 X, Nital 2%).

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-309 Mo X P22(S/PRE-AQ.)



## 7) Solda dissimilar:

Metal de adição: E-309 Mo

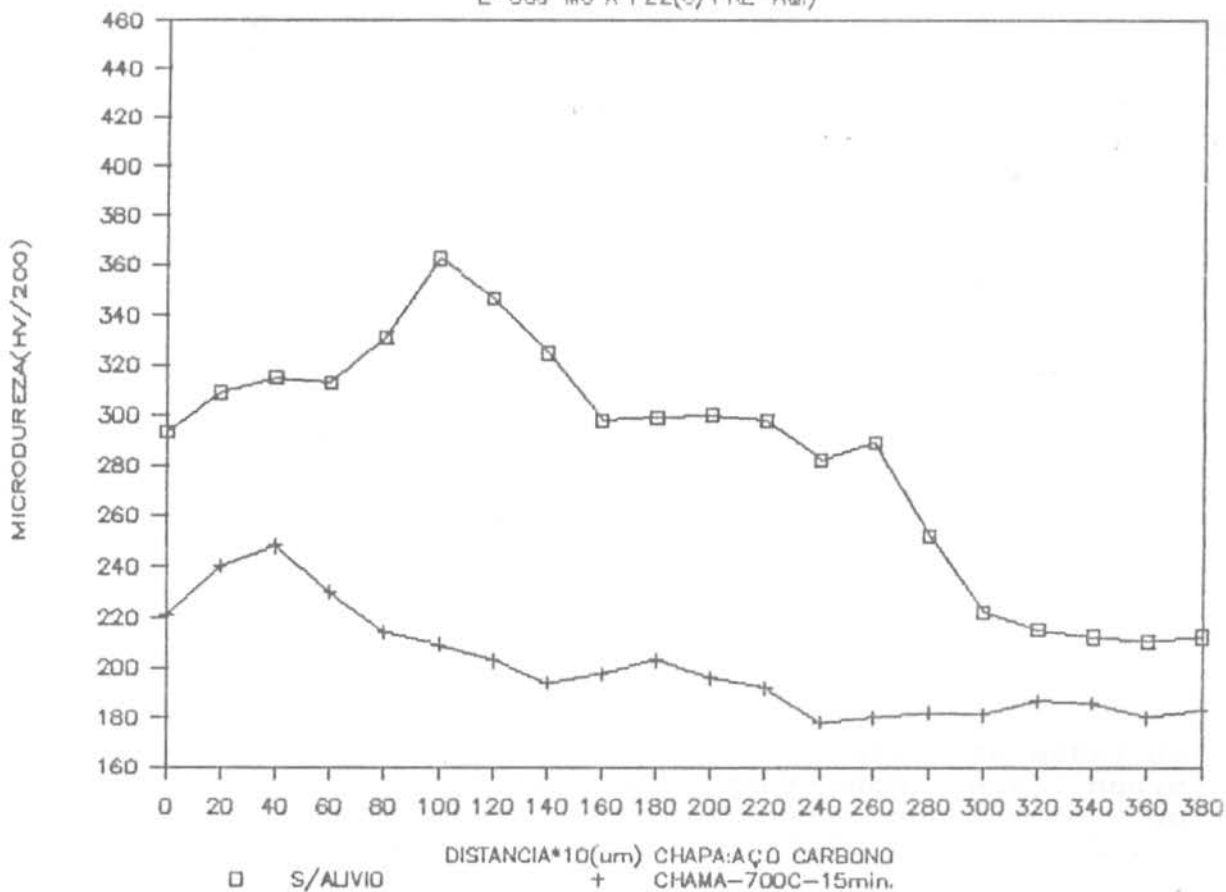
Chapa: Inox 304

Sem pré-aquecimento

Após a soldagem, foi preparado um corpo de prova, sendo o mesmo submetido a um alívio de tensões com chama, na temperatura de 680°C, durante 1 hora. Os resultados obtidos na experiência de número 4 foram utilizados, neste gráfico, para efeitos de comparação.

## PERFIL DE MICRODUREZA

E-309 Mo X P22(C/PRE-AQ.)



8) Solda similar:

Metal de adição: E-9016 B3

Chapa: aço carbono

a) Com pré-aquecimento: T = 200C

a-1) Alívio de tensões com chama:

T = 700C

t = 15 minutos

a-2) Sem alívio de tensões

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

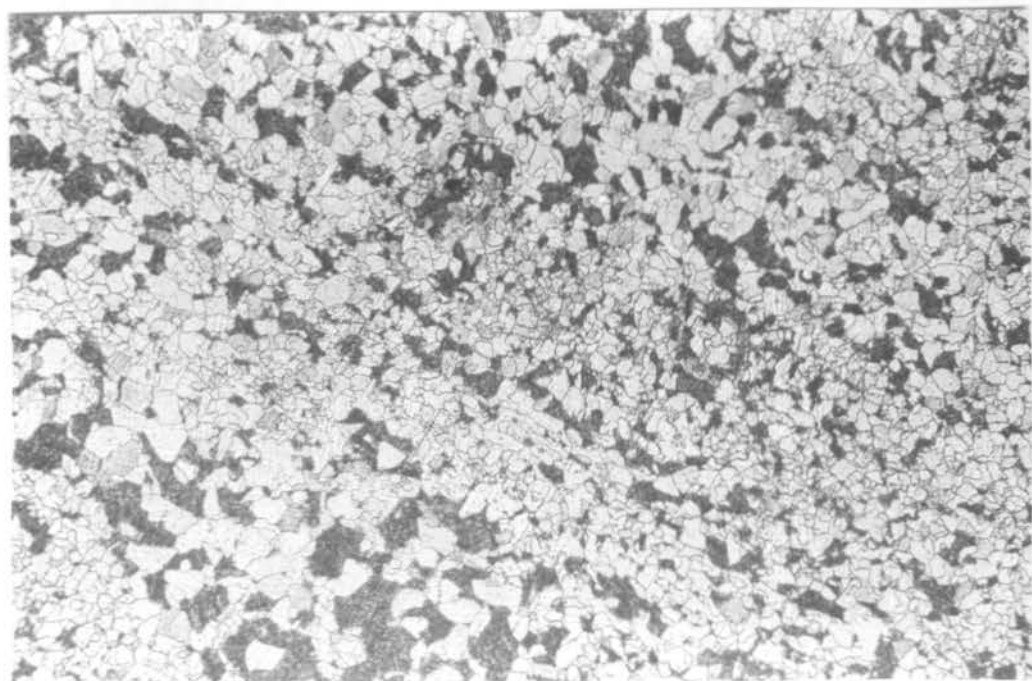


FIGURA 14 - Aspecto micrográfico do metal de solda E-9016 B3, mostrando que houve recozimento da estrutura por erro no controle de temperatura (100 X, Nital 2%).

## 5. CONCLUSÕES DAS EXPERIÊNCIAS:

Através dos gráficos apresentados relativos as experiências 1, 2, 3 e 4, pode-se afirmar que o tratamento térmico (realizado em forno) é bastante eficiente no que diz respeito a dureza, ou seja, houve uma queda significativa da mesma, ao longo da ZAC. Os gráficos também mostram que o pré-aquecimento promove um menor nível de dureza e uma redução mais uniforme da mesma, o que por sua vez gera uma maior zona afetada pelo calor.

Em todas as experiências realizadas, notou-se que o tamanho da ZAC se fixou em média de 3,8mm, para os corpos de prova previamente aquecidos; 1,6mm para o consumível E-309 e 1,4mm para o E-NiCrFe3, nos corpos de prova, sem pré-aquecimento.

Pela análise da experiência de número 5, conclui-se que a temperatura de 518C não foi suficiente para promover uma queda

## SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

significativa da dureza. Isto se deve ao fato que, nesta temperatura, a energia fornecida ao sistema (junta soldada) é insuficiente para atribuir aos átomos mobilidade para a ocorrência de difusão e conseqüente alívio do sistema.

Nas experiências 6, 7 e 8, nota-se que combinando tempo e temperatura, consegue-se uma redução significativa da dureza, ao longo da ZAC, com o tratamento térmico com chama. Entretanto deve-se considerar a grande dificuldade imposta por esse tratamento, ou seja, o controle de temperatura é crítico. Contudo, em condições de laboratório, conseguiu-se realizar este controle com bastante precisão.

Na experiência de número 8, observa-se o menor nível de dureza de todas as experiências realizadas. Isto se deve ao fato que, nesta junta, a concentração de tensões é menor, já que a solda é similar, sendo seus respectivos coeficientes de dilatação térmica compatíveis.

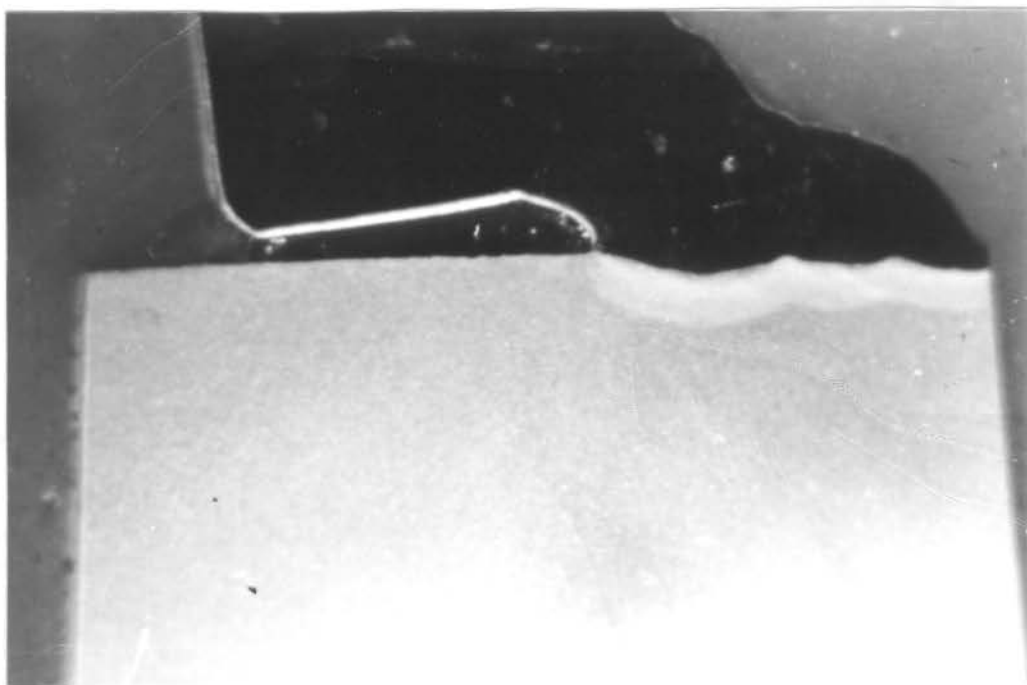


FIGURA 15 - Fotografia mostrando a influência do pré-aquecimento no tamanho da ZAC. Sem pré-aquecimento, tamanho 1,6mm (10X).

## SOLDA HETEROGÊNEA — SUPORTE DA LINHA DE VS

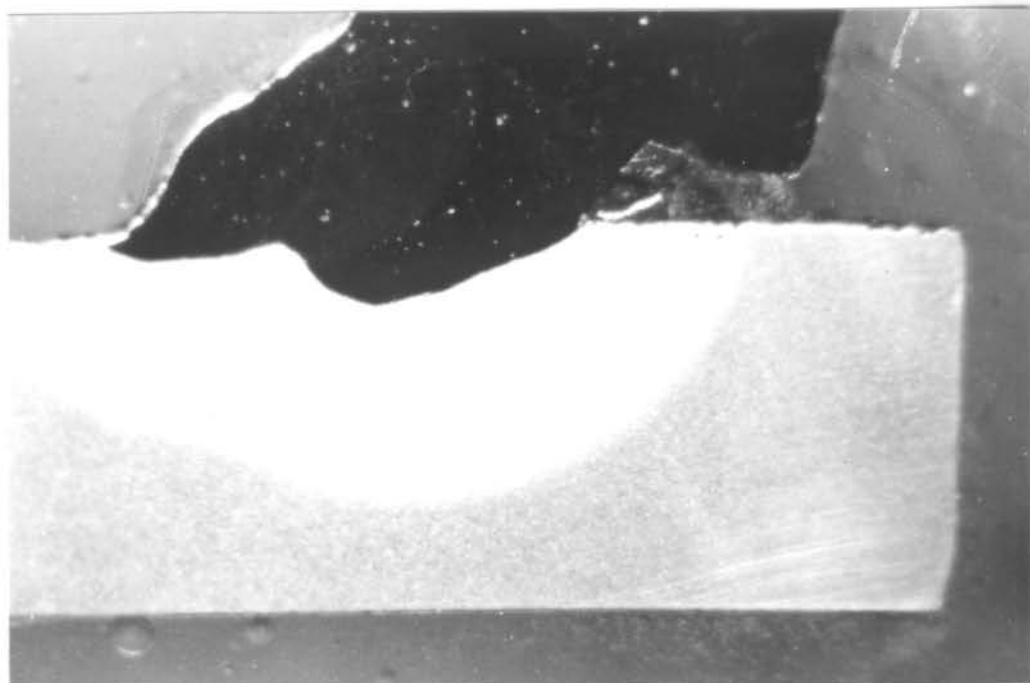


FIGURA 16 - Mesma junta da fotografia anterior, porém com pré-aquecimento, tamanho da ZAC de 3,6mm (10X).

#### 6. MECANISMO DE FALHA - CONCEITOS APLICADOS AO CASO EM PAUTA:

Como já mencionado, as experiências realizadas não descrevem todos os efeitos metalúrgicos que se manifestarão, durante a operação da junta soldada. Na análise das diversas experiências, apenas pode-se perceber que houve têmpera numa pequena região da ZAC, e observa-se também os diversos meios de se reduzir a dureza a níveis aceitáveis. Contudo, sabe-se que o problema é muito mais complexo, visto que, em condições operacionais, muitos outros fatores devem ser considerados.

Na teoria apresentada para explicar o mecanismo de falha, fala-se em difusão de Cr e Ni para uma pequena região da ZAC, aumentando a temperabilidade desta. Com isso, durante o resfriamento, formar-se-a martensita, condizendo com o que foi mencionado pela análise do diagrama de Schaeffler. Pela mesma teoria, sabe-se que esta região de difusão fixa-se na faixa de 5-10 micrometro, embora ocorra têmpera, acusando menores valores de microdureza, em uma maior faixa, ao longo da ZAC.

A teoria também menciona a ocorrência de difusão de carbono

**SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS**

para o metal de solda, durante o resfriamento, da temperatura de soldagem. Percebe-se a existência de um gradiente de dureza, ao longo do metal de solda, a partir da linha de fusão, contudo deve-se lembrar que a estrutura do metal de solda é austenítica, não podendo ser endurecida. Desta forma, este gradiente de dureza pode ser originado pela concentração de tensões do processo de soldagem.

Com a difusão de carbono para o metal de solda, aumentando a concentração do mesmo na pequena região de difusão de Cr e Ni, carbonetos se formarão, fixando-se nos contornos de grão e em menor escala na matriz do P22.

Devido à impossibilidade de se obter um corpo de prova específico, que descrevesse todos os efeitos metalúrgicos envolvidos, procurou-se no arquivo de relatórios da COPESUL, casos similares, concluindo-se que a temperatura de operação da linha de VS (vapor de super-alta) é suficiente para a ocorrência de precipitação de carbonetos e conseqüente fragilização do material.

Com a redução da concentração de carbono da matriz, para a formação de carbonetos, haverá uma queda da resistência mecânica e à oxidação de certas regiões da matriz, imediatamente adjacente aos contornos de grão.

Nestas regiões de baixa resistência à oxidação, formar-se-á um entalhe de óxido e este leva à nucleação e propagação de uma trinca, sendo os demais passos de propagação, já apresentados, serem perfeitamente aplicáveis à falha da junta questão.

**SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS****7. CONCLUSÕES FINAIS:**

Pela teoria apresentada, a solda dissimilar (E-309 Mo X P22) poderá apresentar problemas, quando em operação. Pelas conclusões das experiências, percebe-se que o tratamento térmico com chama é bastante eficiente, promovendo uma significativa redução da dureza, ao longo da ZAC do P22. Contudo, como já mencionado, a prática deste tratamento é bastante difícil, tornando-se, a nível de reparos em campo, inviável.

Já que se desconhece a efetiva influência da região temperada da ZAC na performance da junta soldada, decidiu-se não efetivar o tratamento térmico de alívio de tensões. Desta forma, torna-se imprudente realizar-se uma solda homogênea, visto que o alívio de tensões seria indispensável.

**8. RECOMENDAÇÕES:**

Recomenda-se realizar inspeção visual e LP (líquido penetrante) em todas as juntas. Assim, aquelas que apresentarem defeitos, seriam removidas e refeitas usando-se como metal de adição o E-NiCrFe3 (Inconel 182), com pré-aquecimento na temperatura de 200C, dispensando-se pós aquecimento.



## ENSAIOS DE FRATURA:

### 1. Ensaio de Charpy:

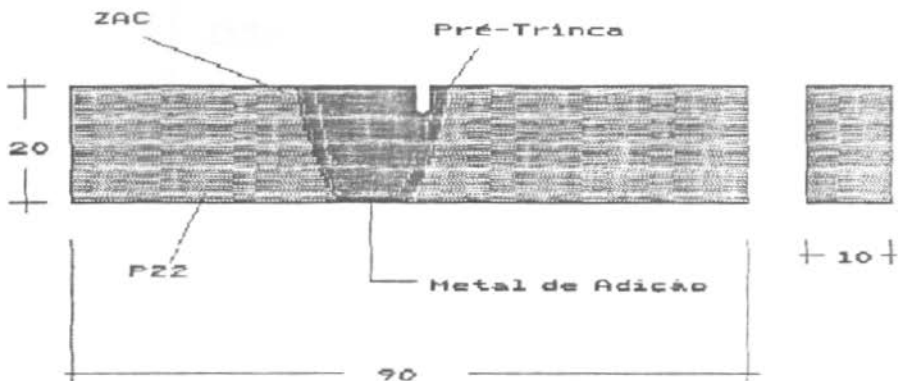
Realizou-se ensaios de impacto (Charpy) em corpos de prova previamente preparados. Os ensaios foram realizados nas juntas soldadas com os metais de adição Inconel, com e sem pré-aquecimento e Inox 309, nas mesmas condições.

Devido a grande ductilidade das juntas soldadas, não houve ruptura do material e sim ocorreu deformação plástica, comprometendo o ensaio. A energia medida no ensaio não representa a energia necessária para a ruptura e sim a energia de deformação.

### 2. Ensaio de CTOD (abertura da ponta da trinca):

Este ensaio busca a obtenção do valor crítico de abertura de trinca ( $P_c$ ), utilizado pela técnica CTOD da mecânica da fratura.

Os ensaios foram realizados junto a linha de fusão, região crítica neste tipo de união. Seguiu-se a norma ASTM E - 1290, como mostra o desenho a seguir.



$$c = K^2 \cdot (1 - \nu^2) / 2 \cdot E + \quad \text{Parte Elástica}$$

$$+ 0.44 \cdot (w - a) \cdot VG / ((0.44 - a) + a + Z) \quad \text{Parte Plástica}$$

$K$  = Fator de intensidade de tensões  $K = Y \cdot P / (B \cdot W)^{0.5}$

$Y$  = Fator de Forma

$P$  = Carga Máxima

$VG$  = Abertura da boca do entalhe

$B$  = Largura do corpo de prova

$W$  = Altura do corpo de prova

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

$\sqrt{E}$  = Tensão de escoamento

$a$  = Tamanho da pré-trinca

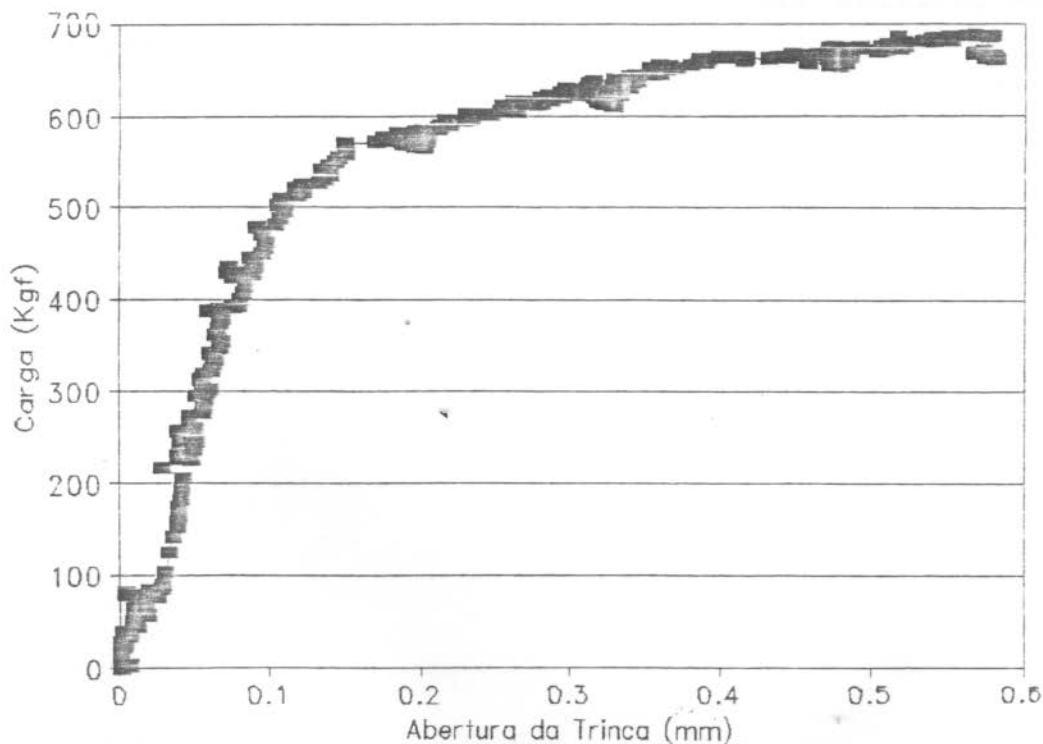
$Z$  = Altura do Knife-Edge

Os resultados dos testes estão apresentados na tabela que segue.

## Resultados

Material	Abertura de trinca (mm)
Inconel 300 °C	- 0.2481
309 200 °C	- 0.3783
Inconel	- 0.2387
309	- 0.22

O gráfico a seguir mostra a relação existente entre a tensão aplicada e a abertura de trinca, gerada durante o ensaio de CTOD.



## Conclusões:

1. Para as condições do ensaio, o aço SAE 309 apresentou um melhor performance.
2. O pré-aquecimento realizado mostrou-se vantajoso para este metal de adição.
3. O pré-aquecimento para o Inconel não apresentou sensível melhora.

## Portanto:

Quanto maior for o valor do CTOD crítico, melhor é a tenacidade do material.

SOLDA HETEROGÊNEA - SUPORTE DA LINHA DE VS

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:

- 1.- Aços e Ferros Fundidos - Vicente Chiaverini
- 2.- Soldagem dos aços inoxidáveis - Eng. E.R.Bussinger (Petrobrás)
- 3.- Parecer: "Defeito detectado na solda dissimilar entre Weldolets e Tubulação" - Eng. Ivan Guerra Machado
- 4.- Metallurgical characteristics of dissimilar weld failures in fossil fired boilers - C.C.Li
- 5.- Accelerated testing of Three Austenitic-Ferritic superheater-tube transition welds under simulated "two-shift" conditions - M.D.C.Mules, M.J.Tinkler, H.J.Westwood