

CARACTERIZAÇÃO DA VIDA EM FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS ENDURECIDAS

Tiago Samuel Renck

Orientador: Prof. Sandro Griza

Área de concentração: Projeto e fabricação

Resumo

O setor automobilístico tem sofrido muitas mudanças nos últimos anos. Os principais motivos destas alterações são a existência de novas regras que ditam critérios cada vez mais rígidos de produção e um mercado mais competitivo. A exemplo disso, temos as leis que regulam a segurança dos passageiros e as que limitam rigidamente a produção de poluentes, dentre outras. Estes fatores levaram a indústria a pesquisar novos materiais mais resistentes e mais leves, que, por consequência, possibilitam a utilização de motores mais econômicos e menos poluentes.

O principal objetivo deste trabalho é caracterizar a resistência à fadiga de juntas soldadas endurecidas através da construção das curvas de Wöhler (diagramas SxN). Para isso foram testadas amostras construídas a partir de chapas de 1 mm do material IF estabilizado com titânio (*Interstitial free Ti stabilised*), soldadas por processo MAG em dois tipos, topo e sobreposta, sofrendo posteriormente endurecimento por nitretação gasosa. Desse grupo, metade das amostras foram submetidas ao processo de galvanização. Desta forma, quatro grupos de amostras foram comparados: soldas de topo endurecidas, soldas de topo endurecidas e galvanizadas, soldas sobrepostas endurecidas e soldas sobrepostas endurecidas e galvanizadas. Desses grupos que serão testados, verificaremos qual terá melhor resistência à fadiga.

Abstract

Fatigue Characterization of Hardened Welded Joints

Now a days the automotive industry has been passing through many changes. These changes are aimed to fit in the new rules of production and the competitive market. As an example of these there are the safety, for the passengers, and the emission rules that regulate the pollution. The industry is researching and developing new kind of materials because of those

reasons. Lightweight and high resistance materials that could make possible the use of smaller and economic engines are some points of research.

This work is aimed to characterize the fatigue properties of welded joints through the Wöhler curves. Specimens made from a 1mm thick Interstitial Free steel sheet will be tested. The samples are welded in two geometries, butt and overlapped by a robot using the MAG process and hardened by gas nitriding after welding. Half part of this group was taken to a galvanizing process. To analyze and understand the relation between the treatments and fatigue properties four groups will be tested: butt hardened, butt hardened and galvanized, overlapped hardened and overlapped hardened and galvanized.

PALAVRAS CHAVES: fadiga, juntas soldadas, livre de interstícios, aço automotivo, nitretação gasosa.

INDICE	Página
1 - INTRODUÇÃO	3
2 – OBJETIVOS	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 – MATERIAL UTILIZADO	4
3.1.1 PROCESSO DE ENDURECIMENTO POR SOLUÇÃO SÓLIDA	5
3.1.2 PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO	5
3.2 – FADIGA	6
3.2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS	6
3.2.2 ASPECTOS TÉCNICOS	6
3.3 – CURVAS DE WÖHLER	7
4 – ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	8
5 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	9
5.1 – METALOGRAFIA	9
5.2 – ENSAIOS DE MICRODUREZA	10
5.3 – TESTES DE TRAÇÃO	10
5.4 – ENSAIOS DE FADIGA	11
6 – RESULTADOS	12
6.1 – ENSAIOS DE TRAÇÃO	12
6.2 – ENSAIOS DE FADIGA	12
6.3 – CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ENSAIOS DE MICRODUREZA	14
6.3.1 – <i>MATERIAL ENDURECIDO</i>	14
Caracterização microestrutural	14
Ensaio de microdureza	15
6.3.2 – <i>MATERIAL ENDURECIDO E GALVANIZADO</i>	15
Caracterização microestrutural	15
Ensaio de microdureza	17
6.3.3 – <i>ANÁLISE METALOGRÁFICA DO INÍCIO DA TRINCA</i>	18
6.4 – EFEITO DA GALVANIZAÇÃO NOS ENSAIOS DE FADIGA	19
6.5 – COMPARAÇÃO COM O MATERIAL SOMENTE SOLDADO	22
6.6 – EFEITO DO PROCESSO DE ENDURECIMENTO NA FADIGA	23
7 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	23

8 – CONCLUSÃO.....	24
9 – SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	24
10 – AGRADECIMENTOS	25
11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente o mercado automotivo mundial tem exigido cada vez melhores resultados em se tratando de desempenho, consumo, segurança entre outros fatores.

As leis de emissões, cada vez mais rígidas, têm levado a indústria a uma busca incessante por motores mais eficientes e econômicos. Conseqüentemente, uma diminuição de peso dos componentes permitirá o emprego de motores menores, pois o “peso morto” será menor.

As leis de emissões não se limitam ao automóvel, mas também são válidas para a produção do mesmo. Fica assim obrigatória a redução de consumo de energia das fabricas e a busca por materiais de fácil produção, no caso dos aços, dando-se preferência aos de trabalho a frio.

A segurança dos passageiros é o ponto mais importante. Para isso é necessário que os habitáculos, ou gaiolas sejam fabricados de materiais de alta resistência, capazes de absorver impacto protegendo a vida dos passageiros.

A diminuição de peso de um automóvel pode ser feita trocando materiais como ligas metálicas por polímeros, fibras sintéticas ou naturais; ligas ferrosas por alumínio ou magnésio (metais de baixo peso específico), entre outros exemplos. Nos casos em que a melhor opção é o uso dos aços, decide-se pela utilização dos que mais correspondem aos pontos citados anteriormente. Atualmente, existem no mercado muitas opções de aços que reúnem alta resistência com boas propriedades de processamento, como: trabalháveis a frio, boas características de soldabilidade, homogeneidade de propriedades mecânicas (isotropia), etc.

2 – OBJETIVOS

A necessidade de aços de maior resistência mecânica e boas propriedades de processamento tem levado as indústrias produtoras de aço a trabalhar em conjunto com as montadoras em pesquisas cada vez mais específicas.

Neste trabalho serão estudadas as propriedades de fadiga, através das curvas de Wöhler, de juntas soldadas por processo MAG feitas a partir de chapas de 1 mm de espessura de aço baixa liga endurecido após a soldagem. O material utilizado é o livre de interstícios - IF (do inglês *interstitial free*) de alta resistência estabilizado com titânio (IFHSS) sofrendo um processo de endurecimento por precipitação através de nitretação gasosa. Serão comparadas duas geometrias de soldagem, de topo e sobreposta além de parte da amostragem sofrer um processo de galvanização a fogo. Ao todo serão analisados quatro grupos, sendo eles:

- Juntas de topo endurecidas (N)
- juntas sobrepostas endurecidas (N)
- juntas de topo endurecidas e galvanizadas (N+Zn)
- juntas sobrepostas endurecidas e galvanizadas (N+Zn)

Os nomes entre parênteses serão utilizados como abreviatura dos processos aplicados para facilitar o entendimento dos gráficos e legendas.

O componente onde as tecnologias deste trabalho serão utilizadas invariavelmente necessita de proteção contra corrosão. Será analisada, portanto, a influência do revestimento em particular. Por este motivo serão realizados ensaios nas juntas já endurecidas antes e depois do recobrimento.

Como comparação serão considerados, também, os resultados das curvas de Wöhler das juntas em estado original, logo após a soldagem. Estas curvas já estavam prontas no início deste trabalho [Marques e Tourrocôo, 2001]. Será analisada também a influência da camada de zinco na zona sobreposta das juntas.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – MATERIAL UTILIZADO

Uma nova geração de aços de baixa liga e alta, ultra-alta e altíssima resistência, variando de 400 MPa a aproximadamente 1500 MPa vem sendo utilizada em grande escala na indústria automobilística. Estes aços têm se tornado comuns desde a década de 80 graças à tecnologia dos fornos com desgaseificação a vácuo. Estes sistemas possibilitam a produção de aços com baixos teores de carbono e nitrogênio, grande precisão nos teores dos elementos de liga e altos graus de pureza [Pinto et al., 1992].

Boas propriedades de estampagem profunda, trabalháveis a frio, e ausência de elementos de liga garantindo boa soldabilidade são fatores que fazem dessa classe uma das melhores opções para componentes de carroceria e lataria pelos baixos custos de produção.

Aços como os bifásicos - DP (do inglês *dual phase*), TRIP (do inglês *transformation induction plasticity*), IF, IF de alta resistência (IFHSS) são alguns exemplos dos aços utilizados atualmente [Brito et al., 1995].

Os aços IF foram escolhidos para este trabalho por apresentarem excelentes propriedades de conformação e estampagem e podem ser submetidos a várias linhas de tratamentos térmicos, pois não sofrem os efeitos de um patamar de escoamento. Além das propriedades acima citadas, os IF estabilizados com titânio possibilitam o aumento da resistência devido a endurecimento por precipitação. A presença de Titânio, assim como Nióbio e Vanádio como elementos

microligantes, possibilita a formação de precipitados de nitretos aumentando a resistência. Como o processo de endurecimento a ser estudado nesse trabalho é a nitretação gasosa, os aços IF representam uma boa opção. Em corpos de prova lisos (sem solda) este material atingiu valores de tensão de escoamento $\sigma_e=350$ MPa, tensão máxima $\sigma_{max}=430$ MPa e alongamento de 28% após o endurecimento. O material original apresenta valores de $\sigma_e=116$ MPa, $\sigma_{max}=275$ MPa e alongamento de 56,5% [Marques e Tourrocôo, 2001].

3.1.1 PROCESSO DE ENDURECIMENTO POR SOLUÇÃO SÓLIDA

A introdução de átomos de soluto em solução sólida numa rede de átomos solventes, invariavelmente produz uma liga com resistência superior que metal puro. Existem dois tipos de solução sólida. Quando os átomos de soluto e solvente são aproximadamente similares em tamanho, os átomos de soluto vão ocupar parte da rede cristalina do átomo solvente, sendo chamada então de solução sólida substitucional. Quando os átomos de soluto são muito menores que os átomos de solvente eles ocupam as posições intersticiais na rede cristalina do solvente. Carbono, nitrogênio, oxigênio e boro são os elementos que formam as soluções sólidas intersticiais [Dieter, 1976].

3.1.2 PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO

A proteção contra corrosão em componentes automotivos é realizada por vários métodos, dentre os quais encontra-se a galvanização. No caso estudado, o processo aplicado foi a galvanização a fogo adicionando uma camada de zinco na superfície do material.

É um processo de deposição superficial onde o componente passa por um banho de zinco fundido a temperaturas superiores a 420 °C (ponto de fusão do Zn) durante um determinado tempo permitindo que uma camada de zinco se ligue com o aço e, inclusive, formando uma camada de difusão intermetálica de ferro zinco.

Muitas vezes as camadas aderidas apresentam microtrincas que podem atingir o metal de base ou progredir quando aplicado carregamento [Mader, 1991]. Em alguns casos são aplicadas camadas intermediárias de baixa dureza, como níquel, com o objetivo de parar o crescimento das trincas.

3.2 – FADIGA

3.2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

O primeiro relato conhecido sobre pesquisas em fadiga de metais foi realizado pelo alemão W.A.J. Albert em 1837 investigando falhas em correntes transportadoras de mineração. Em 1870 Wöhler desenvolveu ensaios para determinar vida em fadiga de eixos ferroviários. Por serem ferramenta principal deste trabalho, os ensaios de Wöhler serão descritos detalhadamente.

Após a virada do século, com o advento da aeronáutica, as falhas por fadiga tornaram-se mais críticas. Um novo passo foi dado na pesquisa surgindo a mecânica da fratura com o inglês Griffith investigando trincas em vidro. Já em 1959 Paul Paris, baseado no trabalho de Griffith, apresentou a primeira ferramenta para o estudo do crescimento de trincas relacionando-as com a intensidade de tensão.

O nome “fadiga” foi utilizado pela primeira vez em 1839 pelo francês Jean Victor Poncelet para descrever estruturas ou componentes de metal “cansadas” pelo uso contínuo. O termo germânico que descreve o fenômeno é “betriebsfestigkeit”, o que significa força ou tensão operacional. Esse nome talvez seja mais apropriado, uma vez que metais não se recuperam após certo tempo de repouso, como fazem os humanos [MSC, 2000].

3.2.2 ASPECTOS TÉCNICOS

A fadiga é o modo de falha responsável pela maioria dos casos de colapso em componentes. É caracterizada por ocorrer em componentes submetidos a esforços cíclicos com tensões que podem ser inferiores a tensão de escoamento do material.

A presença de esforços positivos, de tração, mesmo inferiores às tensões de escoamento, associados a presença de concentração de tensões induzem uma deformação plástica localizada facilitando o surgimento da falha. Estes concentradores de tensões podem ser fatores geométricos, descontinuidades microestruturais, corrosão, etc [Shigley e Mischke, 1989].

A fadiga é um processo que ocorre em etapas, sendo elas: nucleação, propagação e ruptura final. A nucleação da trinca é a parte mais importante e demorada do processo, levando 90% do tempo. Esses defeitos não são detectáveis por processos como líquidos penetrantes ou partículas magnéticas tornando difícil qualquer tipo de prevenção ou tentativa de parada do processo. Ocorre devido a deslizamento dos planos cristalinos de algum grão superficial que esteja a 45° com o sentido da tensão aplicada. Estes deslizamentos criam intrusões e extrusões (figura 1) na superfície da peça de onde a trinca irá propagar, ainda a 45°, até atingir um tamanho aproximado de 3 a 5 grãos. A partir daí a trinca passa a propagar ortogonalmente à carga externa

aplicada. A trinca propaga até um tamanho crítico ocorrendo assim a ruptura catastrófica do componente [Dieter, 1976].

No estudo de elementos soldados os fatores mais importantes são as amplitudes e frequências das tensões aplicadas, tensão média e residuais, propriedades do material, tamanho e local das descontinuidades e alterações microestruturais e os fatores geométricos [Lawrence et al., 1992].

A formação de precipitados intermetálicos possui forte influência na fadiga, dependendo assim de fatores como morfologia e coeficiente de dilatação térmica. Ambos os casos podem gerar concentração de tensões. Por efeitos morfológicos, ao apresentarem cantos vivos e agirem como entalhe ou por deformarem termicamente em razões diferentes do metal de base gerando tensões. O processo de endurecimento por nitretação gasosa pode formar precipitados nocivos (agulhas) ou benéficos (tensões residuais compressivas). Neste caso será analisada a formação de nitretos e sua influência no desempenho do material.

O estudo da fadiga em aços IF não é amplo e o aumento na utilização deste material justifica estudos mais detalhados. Estudos sobre fadiga em materiais IF limitam-se a condições originais de material e alguns casos no estado galvanizado [Milan et al., 2001].

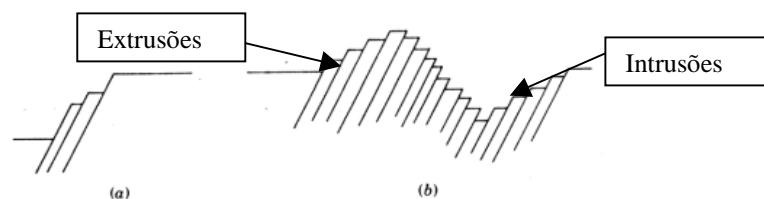


Figura 1 – Formação das intrusões e extrusões.

3.3 – CURVAS DE WÖHLER

Em meados do século XIX August Wöhler observou que os eixos de alguns vagões da empresa onde trabalhava estavam entrando em colapso. Curiosamente todos os componentes estavam bem dimensionados e não sofreram variações de propriedades durante a sua utilização. Por volta de 1870 Wöhler relatou resultados de seu famoso teste em eixos ferroviários. O teste consistia em um eixo em rotação com carga de flexão. O teste se repetia para vários diferentes níveis de carregamento dando origem assim as curvas SxN (solicitação x nº de ciclos) ou curvas de Wöhler, como são conhecidas hoje. Estas curvas só começaram a ser representadas por equações a partir de 1910 [MSC, 2000]. Em resumo Wöhler constatou que a medida que a carga aplicada em um componente vai diminuindo o número de ciclos para ruptura aumenta. Materiais como os aços (estrutura cristalina CCC) apresentam um limite de fadiga, nível de carregamento abaixo do qual não ocorre mais ruptura. O mesmo não acontece para materiais como ligas de

coBRE ou alumínio pelo fato de apresentarem estrutura cristalina cúbica de faces centrada ou hexagonal compacta.

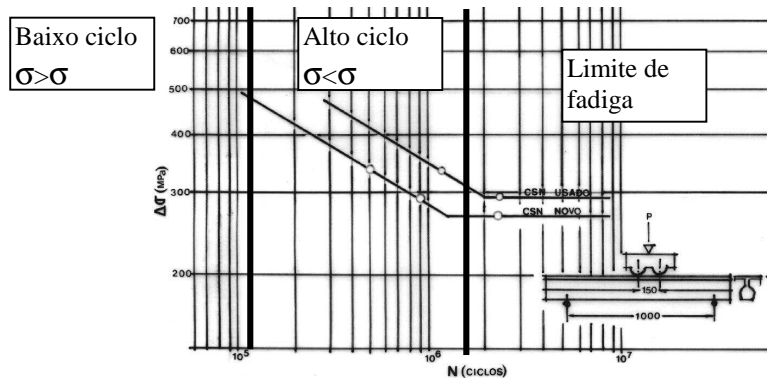


Figura 2 – Curvas de Wöhler para trilhos ferroviários. Observam-se as três partes em que a mesma se divide.

4 – ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Como em grande maioria os componentes estruturais apresentam junções soldadas é de grande importância estudar as alterações de comportamento (físico e químico) impostas pelo processo. Por apresentar um processo de endurecimento posterior à soldagem os estudos devem ser realizados com os corpos de prova em seu estado semi-acabado. Neste caso os fatores envolvidos, como composição química do material, parâmetros de soldagem, parâmetros do processo de endurecimento encontram-se definidos por tratar-se da continuação de um trabalho de pesquisa, portanto calcado em resultados de propriedade da empresa Daimler Chrysler [Marques e Tourrucô, 2001].

Os corpos de prova foram elaborados a partir de chapas de aço IF de 1 mm de espessura utilizando soldagem MAG robotizada nas geometrias de topo (figura 3) e sobreposta (figura 5). Posteriormente foi realizado o processo de endurecimento por nitretação gasosa em 2/3 das peças. Do grupo de amostras endurecidas a metade foi levada para o processo de recobrimento por galvanização.

O processo MAG foi escolhido pela sua grande utilização em linhas de montagem, facilidade de automação e controle do processo garantindo uma boa regularidade no processo.

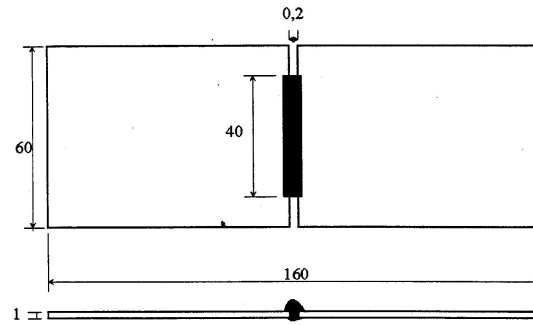


Figura 3 – Corpo de prova soldado de topo, unidades em mm.

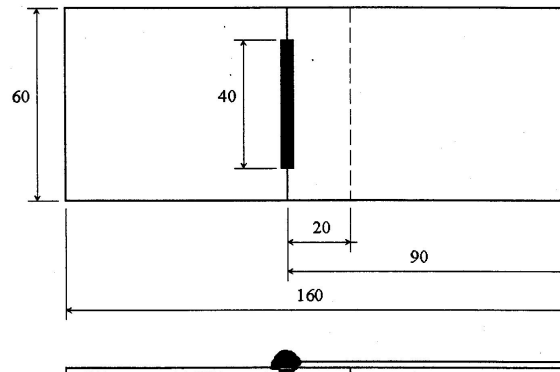


Figura 4 – Corpo de prova soldado sobreposto, unidades em mm.

Tabela 1 – Condições e quantidades dos corpos de prova utilizadas nos ensaios.

	Endurecido	Endurecido e Galvanizado
Juntas de Topo	3 – Ensaio de tração 23 – Ensaio de Fadiga	3 – Ensaio de tração 15 – Ensaio de Fadiga
Juntas Sobrepostas	3 – Ensaio de tração 20 – Ensaio de Fadiga	3 – Ensaio de tração 16 – Ensaio de Fadiga

5 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizadas análises metalográficas, ensaios de microdureza, testes de tração e ensaios de fadiga para caracterização completa das juntas e possibilitar uma boa comparação entre os resultados.

5.1 – METALOGRAFIA

A análise da microestrutura das amostras é de suma importância uma vez que todas as amostras sofreram processo de soldagem posteriormente passando por tratamentos diferenciados. O objetivo destas análises é caracterizar e comparar os grupos e, também, estabelecer relações com os resultados dos ensaios.

O procedimento de preparo das amostras seguiu a seqüência padrão para preparo de amostras metalográficas:

- corte das regiões de interesse;

- embutimento em resina termorrígida (baquilite);
- lixamento nas lixas 320, 600, 800, 1200 e 2400;
- polimento em panos com pasta de diamante de 6 μ m, 3 μ m e finalmente 1 μ m.

O ataque químico utilizado foi o reagente Nital 2%. Que consiste em 2% de ácido nítrico diluído em álcool. O tempo de ataque varia entre 2 e 15 segundos dependendo das condições microestruturais.

A documentação fotográfica foi realizada em um sistema digital que associa um microscópio ótico Zeiss e uma câmera CCD com leitura no computador.

5.2 – ENSAIOS DE MICRODUREZA

Os ensaios de microdureza foram realizados em forma de perfil com o objetivo de observar as variações impostas pelo processo de soldagem e também as diferenças antes e depois dos tratamentos térmicos envolvidos.

O equipamento utilizado foi um microdurômetro em escala Vickers utilizando carga de 0,2 kgf e passo de 0,2 mm entre as indentações. O ensaio foi realizado iniciando em um dos lados da junta, no metal de base e seguindo através da zona afetada pelo calor, metal de solda respectivamente até atingir o metal de base novamente. Os resultados serão expressos em formato de gráfico com origem na linha central da solda oriundos de um único teste em cada corpo de prova.

5.3 – TESTES DE TRAÇÃO

Antes da realização dos ensaios de fadiga é importante caracterizar as juntas quanto à resistência mecânica em tração. Como explica a definição de fadiga de alto ciclo, é uma falha que ocorre sob esforços inferiores a tensão de escoamento do material em questão, o que corresponde à segunda parte do diagrama de Wöhler. Os ensaios foram realizados com um número mínimo de três corpos de prova de cada grupo. Como não foi observada grande variação nos valores de força de escoamento e força máxima não foi necessária amostragem maior. Para ensaio de tração foi utilizada uma máquina universal de tração ZWICK Z100 com capacidade de 10 toneladas. Uma vez que a velocidade de ensaio influi fortemente nos resultados os testes foram realizados com 4,5x10⁻³mm/s. Esta velocidade foi escolhida para possibilitar comparação com dados de literatura. Os dispositivos de agarre foram centralizados para um perfeito

alinhamento nas soldas de topo e deslocados em 1 mm em relação ao outro para ajustar o desalinhamento das soldas sobrepostas.

5.4 – ENSAIOS DE FADIGA

Para a construção das curvas de Wöhler (diagramas SxN) foi utilizada uma máquina de ensaios servo hidráulica INSTRON 8802 com capacidade de 10 toneladas (figura 5).

As curvas foram construídas utilizando um mínimo de três patamares de carregamento com no mínimo três corpos de prova válidos para cada patamar.

Os parâmetros utilizados foram: Solicitação cíclica repetida, onda senoidal, valor de $R=0,1$ ($F_{\min}/F_{\max}=0,1$) no propósito de simular uma situação real onde o esforço é aplicado e relaxado. A frequência de 90 Hz deve-se ao limite de fadiga estabelecido ser de cinco milhões de ciclos (5×10^6 ciclos) o que pode resultar em quinze horas de ensaio. Por fatores econômicos optou-se por uma frequência que tornasse o ensaio o mais breve possível. Como foi salientado anteriormente nenhum patamar de carregamento foi maior que 90% da força de escoamento obtida nos ensaios de tração.

O critério utilizado para definir o fim do teste foi a ruptura total da junta. Nos casos dos testes com carregamentos menores, em torno do limite de fadiga, as amostras foram analisadas rigorosamente em lupa de baixo aumento para detecção de possíveis trincas. Na detecção de alguma trinca visível o ensaio é considerado como rompido a 5×10^6 ciclos. O critério para definir o limite de fadiga é que no mínimo três amostras atinjam, íntegras, o valor limite de ciclos.



Figura 5 – Máquina de ensaios de fadiga com corpo de prova montado.

6 – RESULTADOS

Os resultados estão expressos de maneira a agrupar os resultados dos ensaios de tração precedendo os ensaios de fadiga seguindo uma ordem cronológica. Separadamente foram realizados a caracterização microestrutural e os resultados de microdureza.

6.1 – ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os valores dos ensaios de tração estão expressos em unidades de força (Newton) e deslocamento absoluto (milímetros), uma vez que todos os ensaios, inclusive os de fadiga, estão expressos nestas unidades e não em termos de tensão e deformação relativa (%).

Nas curvas Força x Deslocamento expressas abaixo observa se um comportamento semelhante para três dos quatro grupos. Apenas o grupo das juntas sobrepostas N+Zn que apresenta um valor de escoamento superior e um “degrau” após o mesmo.

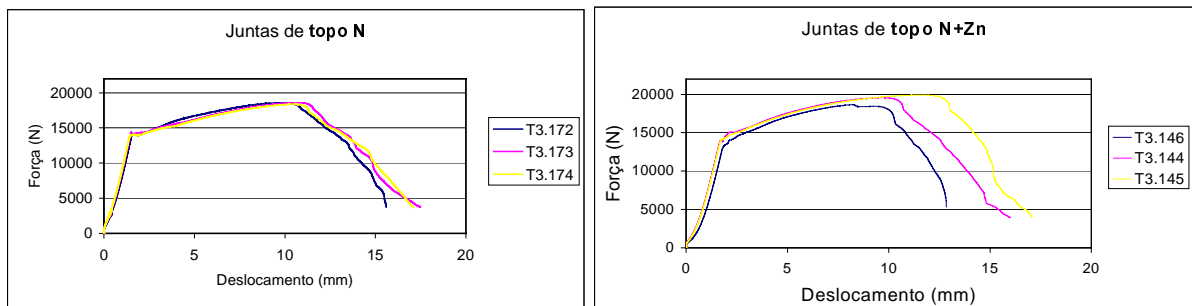


Figura 6 – Curvas obtidas nos ensaios de tração das juntas de topo.

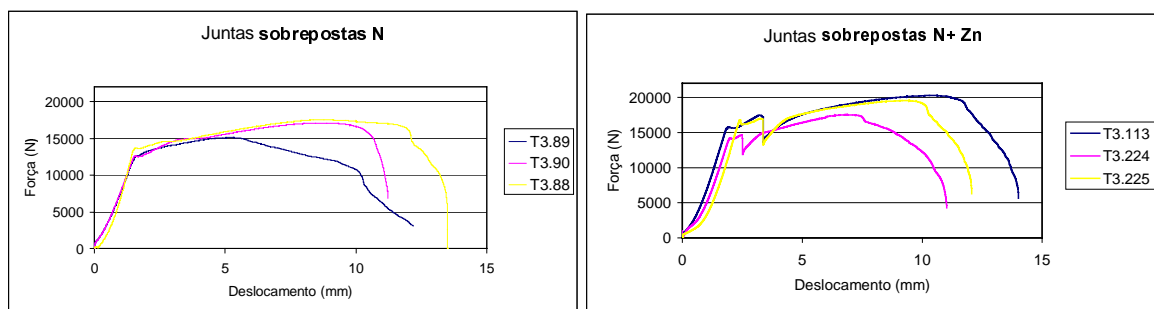


Figura 7 – Curvas obtidas nos ensaios de tração das juntas sobrepostas.

6.2 – ENSAIOS DE FADIGA

As curvas de fadiga estão expressas em dois diagramas para uma boa comparação entre os resultados das geometrias semelhantes, figuras 8 e 9.

O primeiro diagrama mostra os resultados para as juntas de topo. Observa-se um limite de fadiga de 2 kN para o grupo N e 4 kN para o grupo N+Zn.

O segundo diagrama mostra os valores para as juntas sobrepostas com valores de limite de fadiga de 2,5 kN para o grupo N e 8,0 kN para o grupo N+Zn.

O grupo das juntas sobrepostas N+Zn apresenta uma grande variação nos resultados e também um limite de fadiga muito superior aos demais.

Estes resultados serão discutidos posteriormente e comparados com os resultados do ensaio de tração.

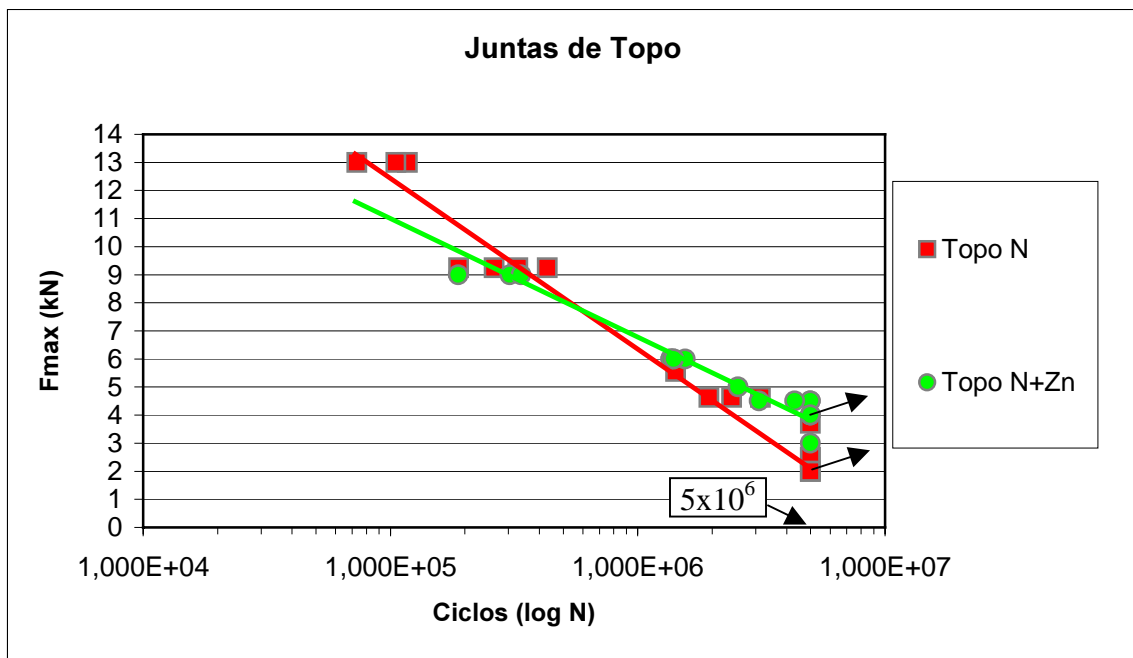


Figura 8 – Curvas de Wöhler para as juntas de topo.

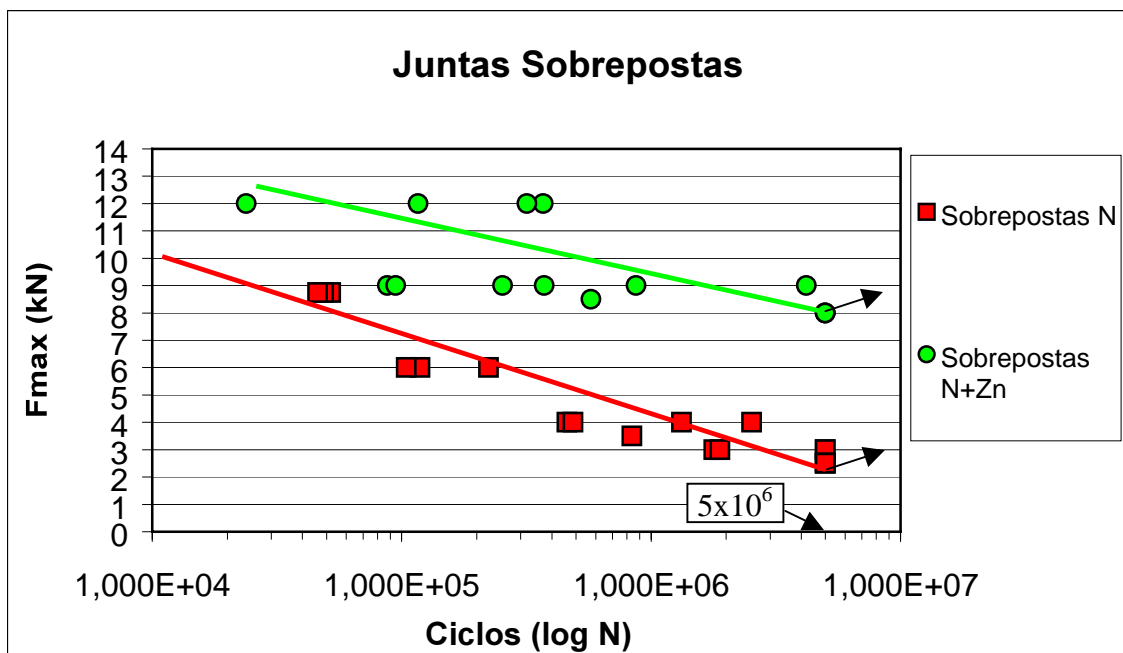


Figura 9 – Curvas de Wöhler para as juntas sobrepostas.

6.3 – CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E ENSAIOS DE MICRODUREZA

6.3.1 – MATERIAL ENDURECIDO

Caracterização microestrutural

A análise metalográfica do material endurecido apresentou condições semelhantes entre as duas geometrias de soldagem. Como o esperado para processos de endurecimento através da superfície observou-se uma alteração nas condições superficiais e no núcleo. A microestrutura observada apresentou uma maior concentração de precipitados na região superficial e ferrítica no núcleo.

As condições das duas geometrias onde podem ser observadas zonas bem distintas (figura 10). Metal de base (MB) apresentando microestrutura ferrítica, zona afetada pelo calor (ZAC) apresentando grãos crescidos e alongados e metal de solda (MS) apresentando microestrutura formada por ferrita acicular.

Observa-se em detalhe a microestrutura ferrítica da zona central da amostra e a região superficial apresentando grande concentração de precipitados basicamente de dois tipos (figura 11). Os precipitados mais alongados (agulhas), de tamanho aproximado $20\mu\text{m}$, são nocivos no que diz respeito à vida em fadiga. Seu formato de agulha age como forte concentrador de tensões. Os precipitados menores são desejados por aumentarem resistência mecânica e também resistência a fadiga.

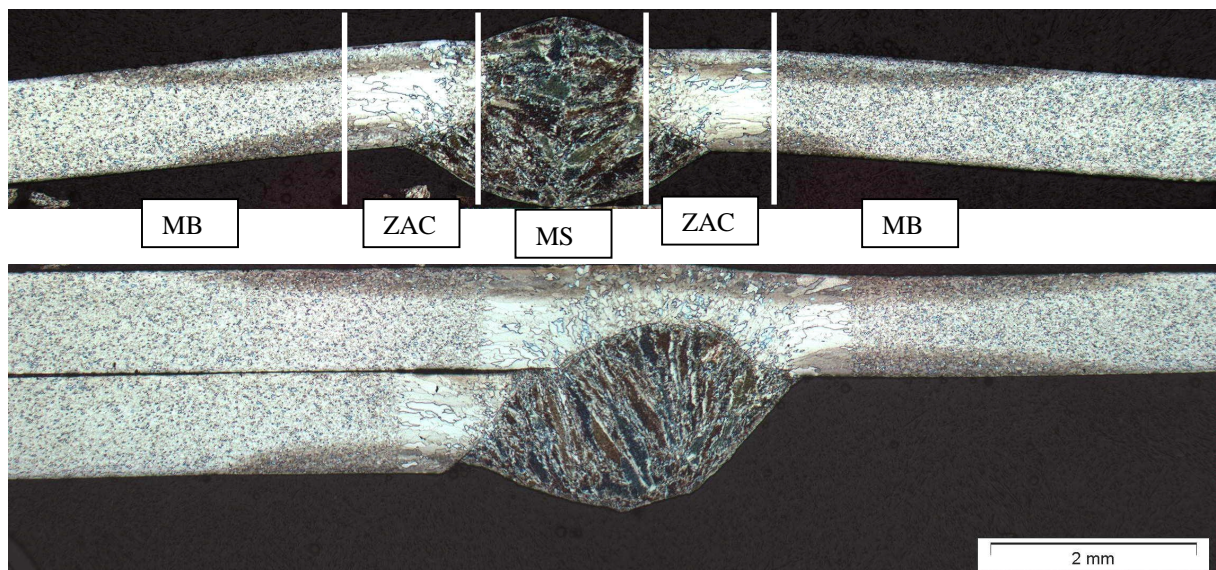


Figura 10 – Macrografia das juntas de topo e sobreposta após o processo de endurecimento. É possível observar as três zonas distintas, metal de base, zona afetada pelo calor e metal de solda. As regiões escurecidas nas bordas são áreas de maior concentração de precipitados.

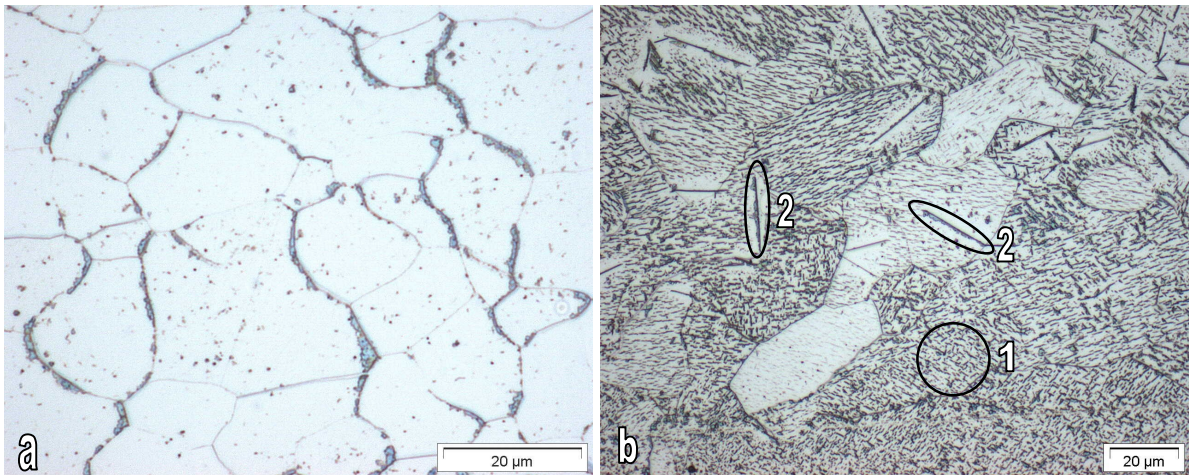


Figura 11 - Micrografia (a) da microestrutura ferrítica do núcleo da amostra. Em (b) observa-se uma região superficial. É possível observar a presença dos precipitados pequenos (1) e os tipo agulhas (2)

Ensaio de microdureza

Observa-se, no gráfico a seguir, o comportamento típico para regiões soldadas. Um decréscimo nos valores de dureza devido ao aumento do tamanho de grão seguido de um aumento na dureza do metal de solda.

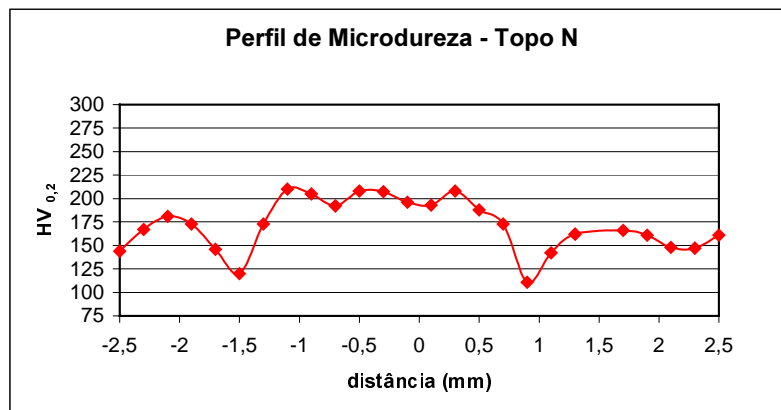


Figura 13 – Perfil de microdureza realizado na junta de topo endurecida

6.3.2 – MATERIAL ENDURECIDO E GALVANIZADO

Caracterização microestrutural

Neste caso, novamente condições semelhantes entre as duas geometrias de soldagem foram observadas. Além da alteração microestrutural imposta pela soldagem e endurecimento, observa-se agora, a presença da camada depositada de zinco na superfície da amostra.

Como o processo de galvanização é realizado após o endurecimento, a microestrutura apresenta as mesmas características iniciais com uma maior concentração de precipitados na região superficial e ferrita no núcleo. Porém não foi possível observar perfeitamente as condições superficiais devido ao recobrimento (figura 14). O mesmo prejudica o ataque químico agindo como ânodo de sacrifício não permitindo o ataque da região imediatamente ao lado. Portanto a região perto da superfície não apresentou boas condições de ataque químico para observação em microscópio (figura 16).

Visto que o processo de galvanização atinge temperaturas elevadas, por volta de 450°C , e o processo de nitretação acontece por volta de 500°C , pode ou não haver influência nas condições microestruturais. Assim a deficiência no ataque químico pode ser prejudicial e talvez ocultar algum resultado.

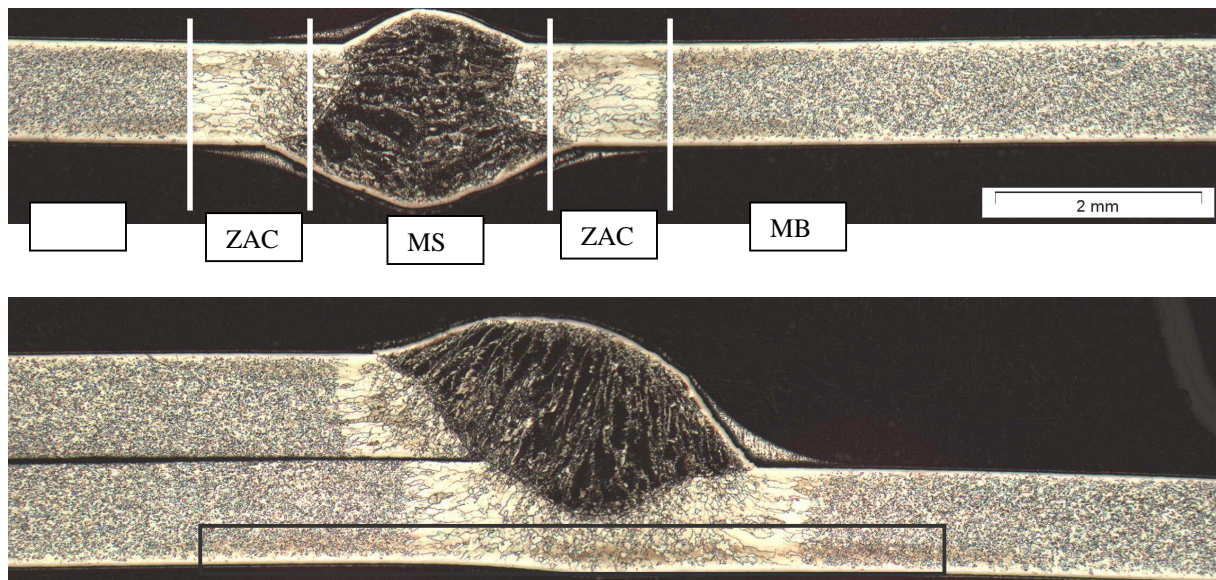


Figura 14 – Macrografia das juntas de topo e sobreposta após os processos de endurecimento e galvanização. É possível observar as três zonas distintas, MB, ZAC e MS. É possível observar, ainda, um aumento na concentração de precipitados na superfície e uma camada clara onde o ataque não é tão forte. Devido ao forte ataque químico a camada de zinco apresenta-se escurecida.

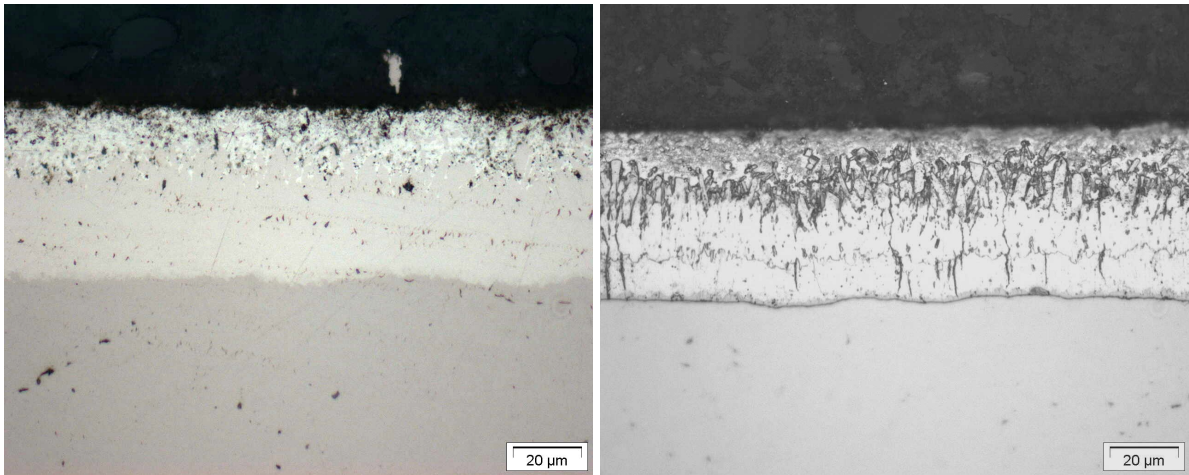


Figura 15 – Micrografias da camada de recobrimento. Observa-se à esquerda (sem ataque) a matriz de aço, zona de difusão e uma camada superficial de zinco. À direita (com ataque) observa-se detalhadamente a formação da camada.

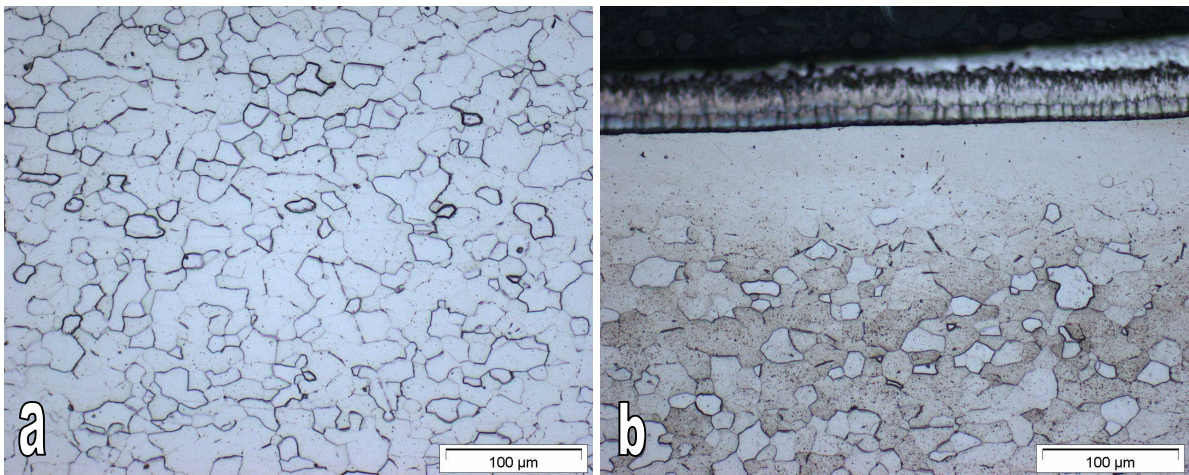


Figura 16 - Micrografia (a) da microestrutura ferrítica do núcleo da amostra, em (b) na região superficial. Não é possível observar tão claramente presença dos dois tipos de precipitados devido a deficiência do ataque químico.

Ensaios de microdureza

Os resultados de microdureza estão expressos no gráfico a seguir. As mesmas características da amostra somente endurecida são observadas. O decréscimo nos valores de dureza devido ao aumento do tamanho de grão seguido de um aumento na dureza do metal de solda. Observa-se que em média não houve alterações entre ambas as condições.

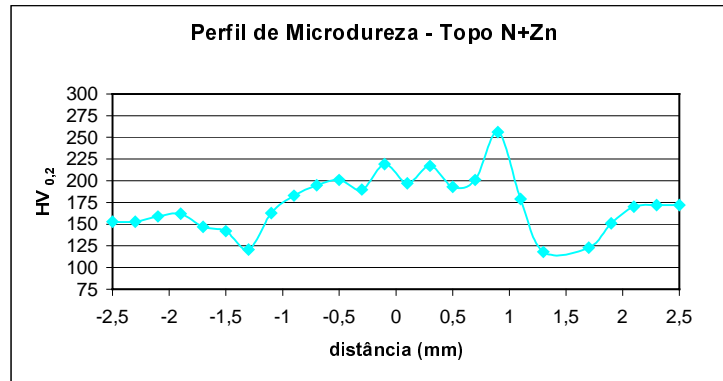


Figura 17 - Perfil de microdureza realizado na junta de topo endurecida e galvanizada.

6.3.3 – ANÁLISE METALOGRÁFICA DO INÍCIO DA TRINCA

Todas as fraturas se deram da mesma forma com pontos de início da propagação semelhantes. As trincas apresentaram ponto de nucleação na região de mordedura. Foi separada uma amostra ensaiada do grupo das juntas de topo endurecidas para estudo da região de início da trinca.

Um corpo de prova de uma junta de topo somente endurecida foi preparado de forma que o plano a ser analisado fosse o mesmo da peça, com a trinca perpendicular. Observou-se uma grande concentração de precipitados agulha na região (figuras 18 e 19). Não é possível observar se a trinca nucleou devido a um precipitado, mas aparentemente o principal fator de nucleação é o fator geométrico.

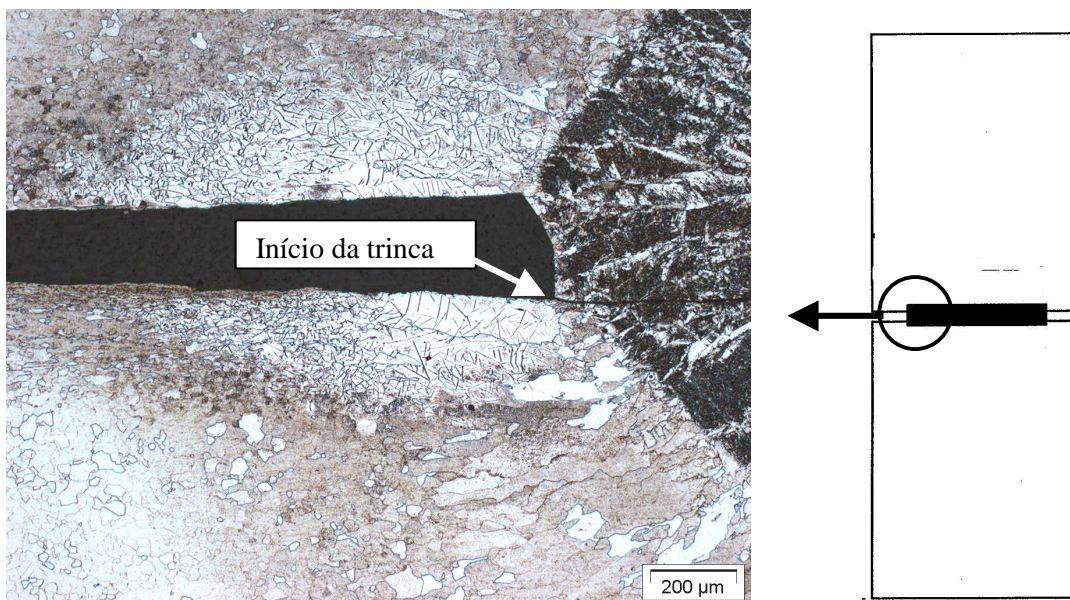


Figura 18 – Micrografia do local de nucleação da trinca, à direita o desenho indica exatamente o local analisado. Observa-se que a trinca inicia justamente na região do canto formado entre o metal de solda e aresta da placa de aço.

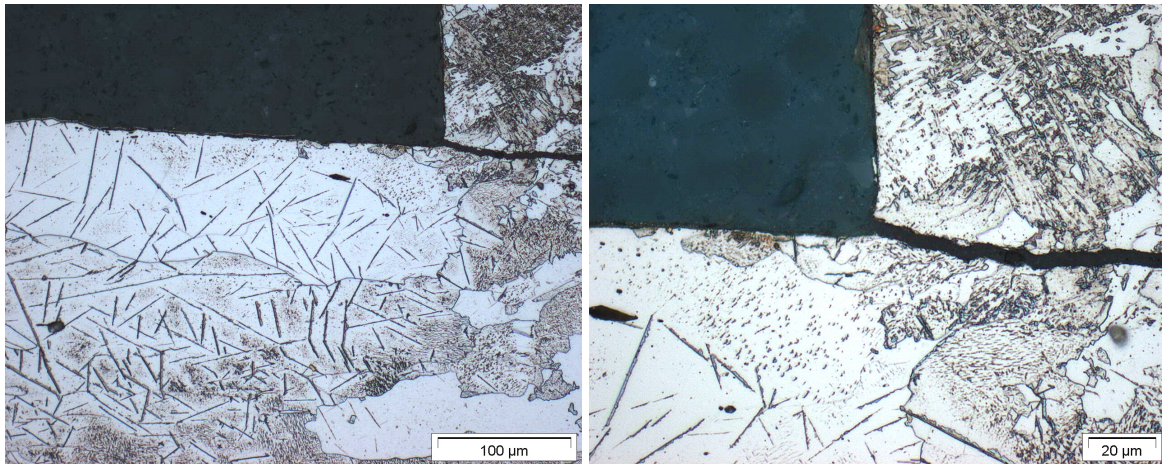


Figura 19 – Em detalhe observa-se a presença dos precipitados agulha na região. A trinca, em geral nucleou na interface entre o metal de solda e o metal de base.

6.4 – EFEITO DA GALVANIZAÇÃO NOS ENSAIOS DE FADIGA

Após a análise das características mecânicas e metalúrgicas do grupo de juntas galvanizadas dois fatores chamaram a atenção:

- Juntas de **topo N+Zn (4,0 kN)** apresentando um limite de fadiga duas vezes superior ao grupo **topo N (2,0 kN)**.
- Juntas **sobrepostas N+Zn** apresentando um resultado particular nos ensaios de tração, grande variação positiva nos resultados dos ensaios de fadiga com limite de fadiga de **8,0 kN**.

O ocorrido entre as juntas de **topo N** e as **topo N+Zn** pode estar relacionado com as características microestruturais observadas. Há a possibilidade de que durante o tratamento térmico do processo de galvanização haja uma modificação nas propriedades do material.

Os resultados dos ensaios de tração das juntas **sobrepostas N+Zn** apresentaram uma curiosidade no comportamento da amostra. Foi possível observar que após o escoamento do material houve um decréscimo repentino da força (degrau) então voltando ao comportamento normal atingindo a tensão máxima e então deformando até a ruptura. Analisando o andamento do ensaio foi possível notar que a junta apresentou comportamento normal, porém a região sobreposta permanece unida devido a presença da camada de zinco. O zinco age como uma solda por brazagem evitando a deformação da parte sobreposta (fresta) e, por conseqüência, evitando o cisalhamento na região interna (figura 20). Este efeito aconteceu durante os testes, porém há um limite em que o mesmo não consegue deformar a ponto de acompanhar a deformação do aço. Neste momento ocorre a ruptura da camada de zinco e observa-se o degrau na curva Força x Deslocamento.

Durante os ensaios de fadiga foi possível observar o mesmo comportamento. As juntas apresentavam este descolamento a partir de um certo tempo de teste. Este fato explica a grande variação nos resultados de fadiga.

É de grande importância salientar que este resultado é tido como novidade. O projeto inicial não previa este tipo de fenômeno uma vez que não foram projetadas condições para se obter um resultado controlado.

É de conhecimento geral que numa junta brazada ou solda branca vários fatores influenciam no desempenho mecânico. O principal fator, com respeito a resistência mecânica, é a espessura da camada depositada. A junta deve apresentar um espaço, entre ambas as partes, suficiente para que o metal de adição penetre por capilaridade [Thompson, 1985]. Uma junta de aço unida por solda prata pode apresentar resistência mecânica tão grande quanto o material de base (395 MPa), mesmo sendo soldada com uma liga de prata de resistência mecânica de aproximadamente 145 MPa. É possível observar a influência da espessura do filme de metal adicionado na resistência mecânica do conjunto (figura 21).

Para verificar a influência deste fenômeno uma nova análise foi inserida neste trabalho. Após testadas as juntas foram separadas com o intuito de analisar a situação da superfície sobreposta. A figura 22 mostra um dos corpos de prova onde pode ser observada a presença de zinco na superfície. Para realização desta análise foi utilizado um programa de análise de imagem por contraste. É importante que se saiba que esta análise não pode ser utilizada como fonte segura, apenas como aproximação. A curva de Wöhler para as juntas sobrepostas N+Zn será apresentada novamente (figura 23) com a indicação percentual, da fresta que foi preenchida (brazada) pelo Zinco. Não foram analisadas todas as juntas, pois em alguns casos a separação danificou a superfície.

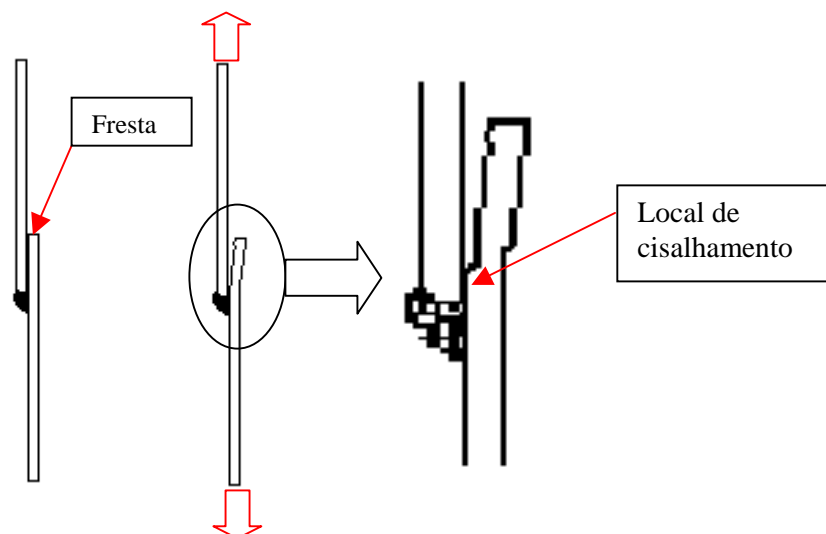


Figura 20 – Ilustração do que acontece na junta sobreposta quando atua a carga.

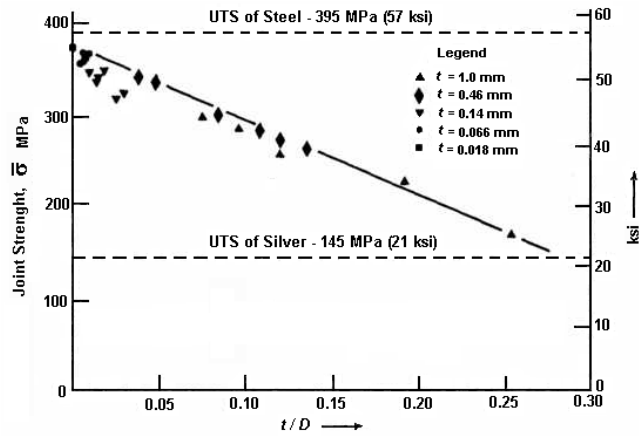


Figura 21 – Curva relacionando resistência mecânica da junta com espessura de filme de prata [Thompson, 1985].

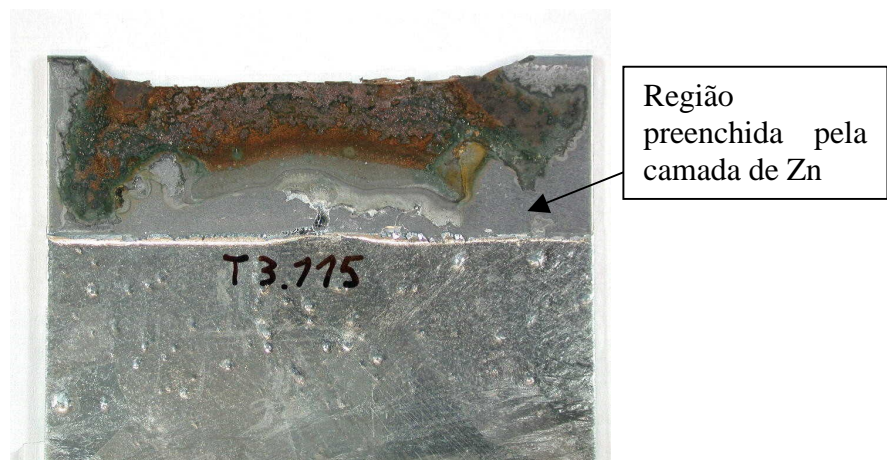


Figura 22 – Corte do corpo de prova ensaiado para análise da superfície preenchida pelo zinco.

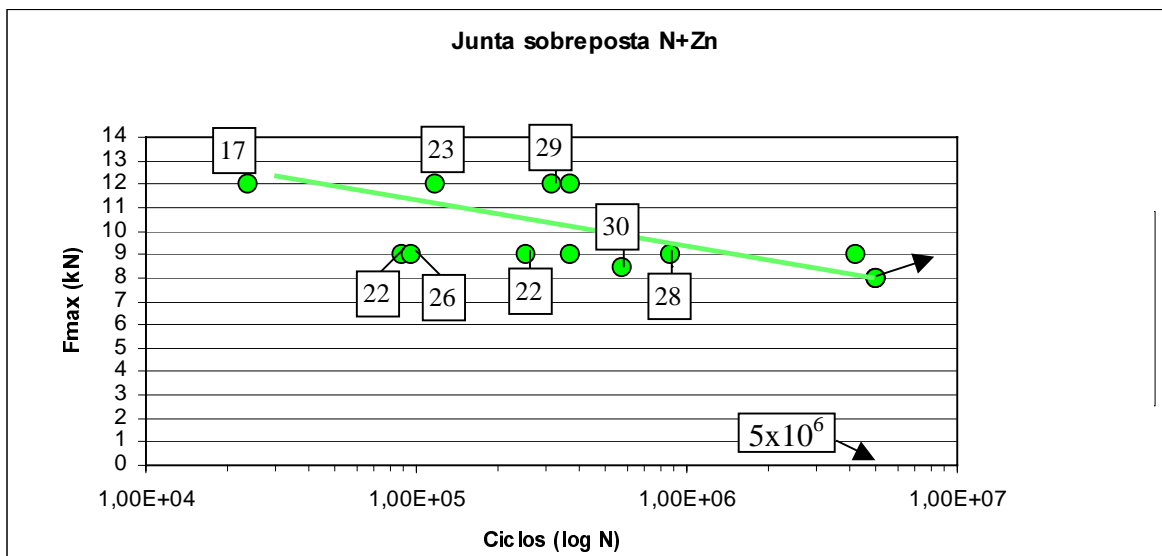


Figura 23 – Porcentagem de área preenchida por zinco na zona sobreposta.

6.5 – COMPARAÇÃO COM O MATERIAL SOMENTE SOLDADO

Como primeira parte deste trabalho foram realizadas varias análises. Entre elas as definições dos parâmetros de nitretação, galvanização, processo de soldagem e inclusive o ensaio das juntas soldadas em seu estado original. Após o processo de soldagem, como explicado anteriormente, algumas amostras foram retiradas para ensaio sem nenhum tratamento posterior. Serão apresentados as curvas de Wöhler e os valores do ensaio de tração.

Os ensaios de tração apresentaram um nível de escoamento semelhante para ambas geometrias, por volta de 6,5 kN. A força máxima obtida em ensaio para as juntas de topo foi de 14,5 kN e para as juntas sobrepostas foi de 13,3 kN [Marques e Turrucô, 2001]. Valores estes bem abaixo dos obtidos nos ensaios dos materiais já nitretados.

Com exceção das juntas sobrepostas N+Zn, a comparação dos resultados mostra que o material original apresenta uma melhor resistência à fadiga quando se trata de baixos níveis de sollicitação, o que não acontece nas regiões de altas cargas. Em outras palavras, o processo de endurecimento aumentou a resistência à fadiga para altos níveis de carregamento, porém o limite de fadiga foi prejudicado. Pode ser visto que a tendência é que haja um cruzamento entre as curvas (figuras 24 e 25). O decréscimo considerável nos limites de fadiga das curvas endurecidas pode estar relacionado com a presença de precipitados agulha na região de nucleação da trinca.

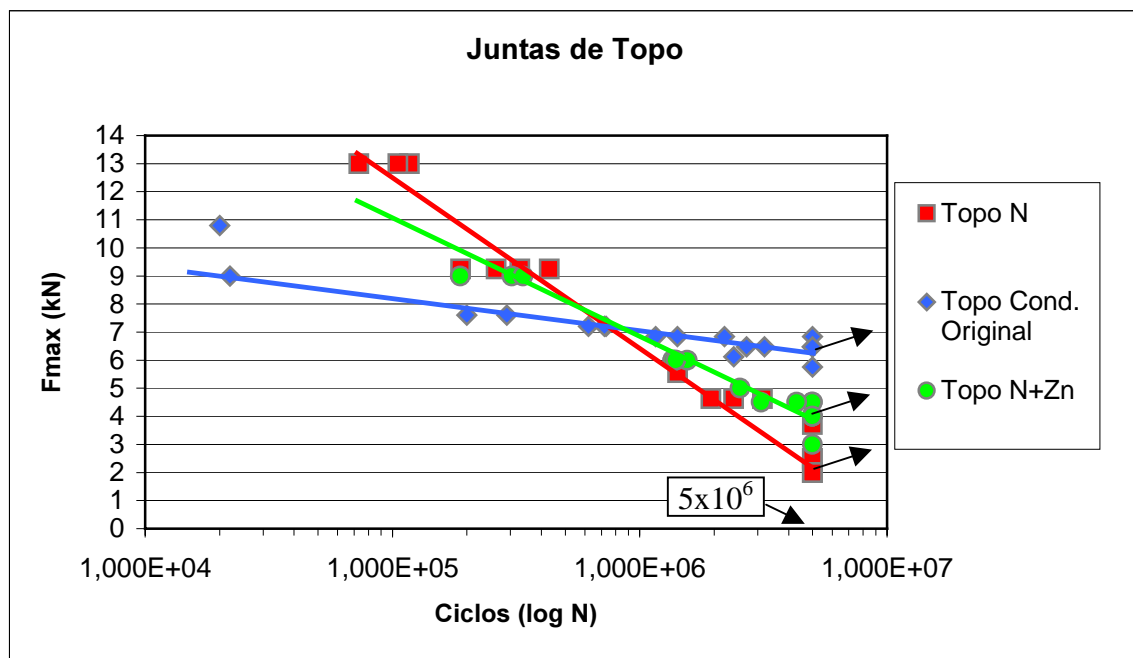


Figura 24 – Curvas de Wöhler das juntas de topo nas três condições de material. Claramente observa-se o decréscimo nos valores de limite de fadiga nas juntas endurecidas.

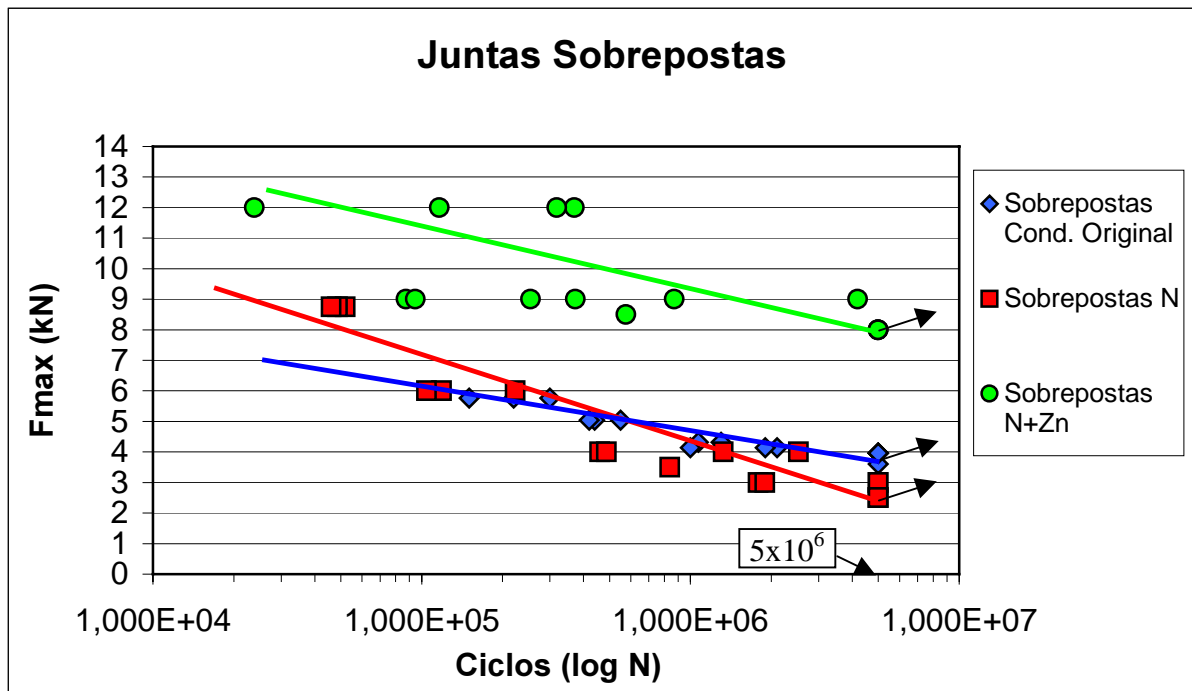


Figura 25 – Curvas de Wöhler das juntas sobrepostas nas três condições de material. Novamente o decréscimo nos valores de limite de fadiga das juntas somente endurecida e o alto valor atingido pelas juntas N+Zn.

6.6 – EFEITO DO PROCESSO DE ENDURECIMENTO NA FADIGA

A comparação dos resultados de fadiga dos materiais original e endurecido apresenta algumas novas hipóteses para este trabalho. Houve um aumento na resistência a fadiga para altas cargas seguido de um decréscimo nos valores de limite de fadiga.

É de fácil compreensão que a resistência à fadiga aumente com o aumento da resistência mecânica do material. Isso acarreta em uma maior resistência à nucleação. Porém não se verifica o mesmo ao analisar a região de baixas sollicitações.

Essa tendência é de grande importância para análises futuras, pois o tratamento a ser aplicado nos componentes deve apresentar bons resultados em todos os aspectos.

7 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Depois de realizados todos os ensaios de fadiga fica possível estabelecer comparações entre a performance dos grupos correlacionando com os demais dados obtidos dos ensaios de dureza a análises microestruturais.

O endurecimento por nitretação gasosa apresentou boas propriedades mecânicas e bons resultados nos testes de fadiga para aplicação de cargas elevadas. O mesmo não foi observado

para baixos níveis de solitação. Os valores de limite de fadiga apresentaram um decréscimo quando comparado com o material original.

O processo de galvanização propiciou uma melhora nos valores de limite de fadiga, em relação às juntas somente nitretadas, nas duas geometrias de soldagem. Embora a galvanização ocorra a uma temperatura inferior ao processo de nitretação alguma alteração microestrutural pode ter ocorrido durante o tempo de permanência no banho de zinco.

Alguns fatores importantes poderão ser analisados observando a superfície de fratura. Informações que talvez possam explicar a mudança de comportamento após o processo de nitretação. Fatores como a influência dos precipitados tipo agulha na nucleação da fratura. Influência do hidrogênio, pois o tratamento de nitretação expõe as peças a uma atmosfera rica em NH_3 .

A melhor performance apresentada pelas juntas sobrepostas endurecidas e galvanizadas (N+Zn) deve-se à associação dos processos aplicados e o efeito da camada de zinco unindo as partes sobrepostas.

8 – CONCLUSÃO

Os processos aplicados nas juntas apresentaram bons resultados de resistência mecânica, porém o problema do decréscimo nos valores de limite de fadiga é um fator importante e deve ser estudo com maior ênfase.

A utilização deste processo em um componente automotivo fica prejudicada devido aos resultados negativos apresentados nas curvas de Wöhler. Não é suficiente que um processo apresente bons resultados apenas para certos níveis de solitação mas é preciso um bom desempenho em todos os aspectos.

O processo de galvanização não mostrou nenhuma influência negativa, mas sim apresentou-se benéfico com um aumento considerável nos valores de limite de fadiga. A associação dos processos de nitretação e galvanização apresentou boas características mecânicas e de fadiga nas juntas sobrepostas. Estes resultados são reconhecidamente positivos e até certo ponto inesperados visto que não faziam parte do projeto original. Uma vez que as condições ideais possam se reproduzidas e controladas esta associação de processos pode trazer grandes vantagens.

9 – SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Um maior estudo na influência da camada de zinco agindo como brazagem ou solda branda pode trazer muitas vantagens na utilização em produção contínua.

10 – AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são dirigidos a Eng. Micaela Tourrucoo e o Prof Dr. Telmo R. Strohaecker, principais responsáveis pela realização deste trabalho no Centro de Pesquisas da empresa Daimler Chrysler na cidade de Ulm, Alemanha. Ao professor e colega Sandro Griza pela orientação. Também vão os agradecimentos a todos os colegas do grupo FT4/WM, Stefanie, Alexandra, Andreas, Detlef, Phillip e os demais que me auxiliaram na realização de todas as tarefas.

11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brito, R.C., Sabioni, N.C., Moraes, J.J., Marcelo, C.J., 1995, **Aços planos de alta resistência mecânica – alternativa para redução de peso de carrocerias de automóveis**, Metalurgia e Materiais
- Dieter, George E., 1976. **Mechanical Metallurgy**, McGraw-Hill.
- Lawrence, F.V., Dimitrakis, S.D. and Munse, W.H., University of Illinois, 1992, **Metals Handbook Vol.6**, ASM International.
- Mader, R., 1991, **Zinc coating of interstitial free sheet**, International Symposium of IF Steel Sheet, Ottawa, Canada.
- Marques, B.C., Tourucôo, M., 2001, **Mechanical properties and microstructural characterization of a high strength if-steel welded joint** Daimler Chrysler internal report.
- Milan, M.T., Spinelli, D., Bose Filho, W.W., 2001, **Fatigue and monotonic properties of an IF sheet steel**, International Journal of Fatigue 23 (2001) 129-133
- MSC Software, 2000, on line, www.mssoftware.com
- Pinto, M.C., Klein, L.T., Castro, L.C., Alves, A.C., 1992 **Desenvolvimento de aços interstitial free pela usiminas** Metalurgia e Materiais vol.48 n° 406.
- Shigley, Joseph E., Mischke, Charles R., 1989. **Mechanical and Engineering Design**, McGraw-Hill.
- Strohaecker, T.R., 2001, **Mecânica da Fratura**, Escola de Engenharia – LAMEF.
- Thompson, A.W., 1985, **Hydrogen-assisted fracture at notches**, Materials Science and Technology, vol 11 n°9, 711 – 718