

Nota-se que os dados experimentais referentes a este nível de tensão, tanto para os CPs sem solda quanto para os com solda, se “misturam”, com dispersão elevada. No entanto para os níveis de tensão mais altos ($0,70.S_u$ e $0,80.S_u$) vê-se que os pontos apresentam-se “separados”, sendo que os resultados com solda têm vida N menor que os resultados sem solda.

Na figura 7.b têm-se os resultados para os 33 espécimes do SAE 1030 testados, através de um gráfico S-N. Os espécimes usados para levantar a resistência à fadiga sem micro-pontos de solda estão representados por círculos azuis. Já os resultados para os espécimes com micro-pontos de solda estão representados por losangos vermelhos.

Têm-se no gráfico S-N que as duas retas que melhor ajustam estes dois grupos de dados estão bem próximas. Nota-se que os resultados experimentais para os três níveis de tensão utilizados ($0,60.S_u$, $0,65.S_u$ e $0,70.S_u$) apresentam-se “misturados” e bastante dispersos.

4 - CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar e determinar a influência da soldagem de micro-pontos, por descarga capacitiva, na resistência à fadiga de corpos de prova, aços de baixo teor de carbono. A partir dos resultados obtidos com espécimes ensaiados sob flexão rotativa, pôde-se concluir que os micro-pontos de solda não influenciaram de maneira significativa na iniciação de trincas de fadiga nos materiais estudados.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM / E 468-90 - "Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test for Metallic Materials", 1990.

ASTM / E 739-91 - "Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N)", 1991.

FREIRE, J. L. F. , Arêas, C. A. C. , "Fatigue Strength of Spot Welded Strain Gage Specimens", Rio de Janeiro, 1995.

IMIG, L. A. , "Effect of Strain-Gage Attachment by Spotwelding and Bonding on Fatigue behavior of Ti-6Al-4V, René 41 and Inconel X", National Aeronautics and Space Administration - Technical Note, Nasa TN D-5973, 1970.

LIPSON, C. & SHETH, N. J. , "Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments", Mac-Graw-Hill Book Company, 1973.

MACHADO, R. R. , *Influência de Micro-Pontos de Solda na Resistência à Fadiga de Aços de Baixo Carbono*, Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, 1997;

METALS HANDBOOK - "Properties and Selection: Irons and Steels", vol. 1, 9th edition, ASM International, 1978.

6 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio e colaboração dos funcionários da Oficina do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB, em especial aos técnicos Arthur Alves Rocha e Edson Luca de Almeida.

- para o aço SAE 1020 a hipótese das vidas médias serem iguais é aceita para os níveis de tensão de $0,80 S_u$ e $0,70 S_u$, $t_{amostra} > t_{crítico}$. Entretanto, para o nível de tensão de $0,80 S_u$, a hipótese das vidas serem diferentes é aceita, o que indicaria a existência da influência do processo de soldagem.
- para o SAE 1030 a comparação dos resultados indica que, para os três níveis de tensão, a hipótese das médias serem iguais é admitida, indicando que não há influência do micro-ponto de solda na resistência a fadiga do material.

3.3 - Análise da Curva S-N

Na figura 7 são apresentadas as curvas S-N para os aços SAE 1020 e 1030, com e sem micro-pontos de solda.

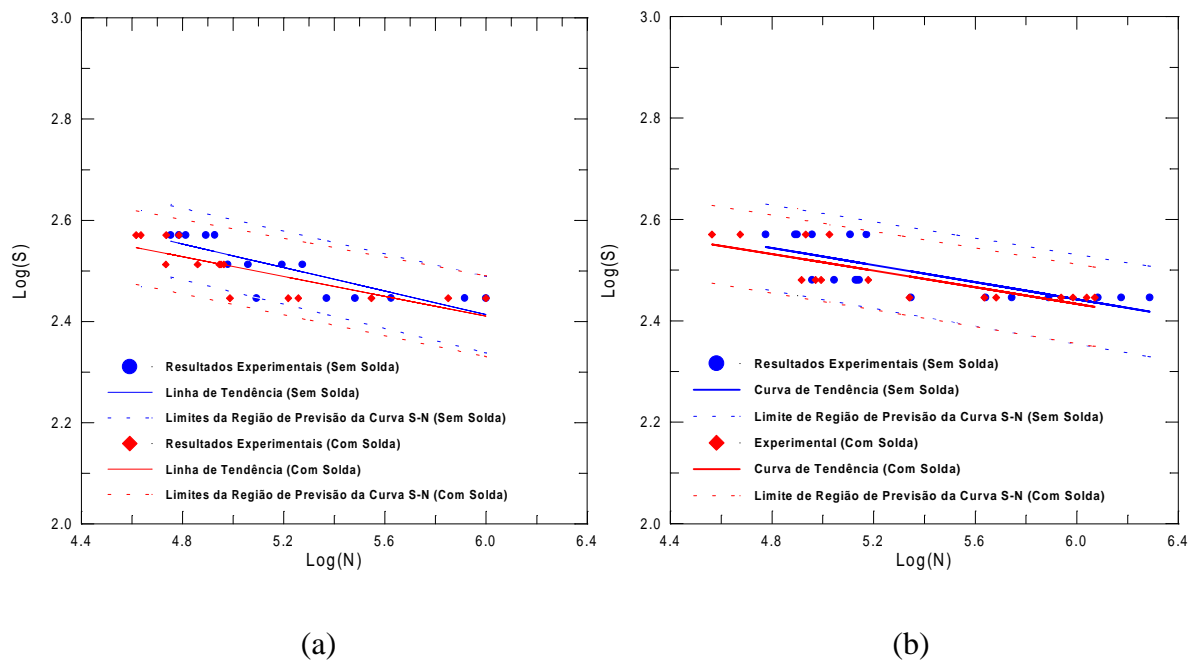


Figura 7 - Curva S-N para materiais ensaiados - (a) SAE 1020 (b) SAE 1030

Considerando que a curva S-N pode ser descrita por uma lei de potências do tipo, os parâmetros a e b poderão ser obtidos através da linearização de tal função.

$$S = A \cdot N^b \quad (1)$$

Assim, linearizando (1) resultará na equação linear (2).

$$\text{Log}(S) = \text{Log}(A) + b \cdot \text{Log}(N) \quad (2)$$

onde : $\text{Log}(S)$ é logaritmo da tensão aplicada, $\text{Log}(A)$ é a constante da reta, $\text{Log}(N)$ é o logaritmo do número de ciclos até a ruptura, e b é a inclinação da reta, ou expoente da equação (1).

Desta forma, a aplicação da técnica de mínimo quadrados aos resultados experimentais permitirá a determinação das curvas de tendência e das curvas de dispersão. Tais curvas são apresentadas na figura 7.

A figura 7.a mostra os resultados encontrados para os 30 espécimes do SAE 1020 através de um gráfico do tipo S-N. Dois conjuntos de dados são realçados. Os espécimes usados para levantar a resistência à fadiga com o número de ciclos para os espécimes sem micro-pontos de solda estão representados por círculos. Os resultados para os espécimes com micro-pontos de solda estão apresentados por losangos. Pode-se notar através do gráfico que as duas retas que melhor ajustam estes dois grupos de dados concorrem, para o nível de tensão menor ($0,60.S_u$).

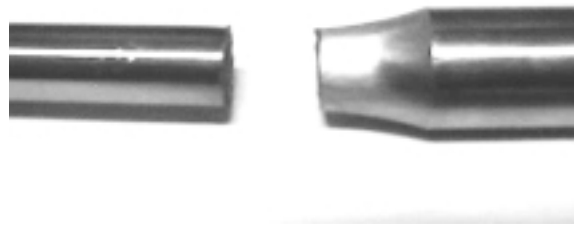


Figura 6 - Corpo de prova de SAE 1030 com falha na região do "ombro"

Os ensaios de fadiga para os dois aços foram realizados em três níveis de carregamento, tanto para os espécimes com micro-ponto de solda quanto para os sem. Os resultados foram examinados fazendo-se uma análise qualitativa dos corpos de prova do SAE 1030, e análises utilizando teste t e comparações das curvas S-N, para CPs com e sem pontos de solda, plotadas a partir dos resultados obtidos.

3.1 - Análise Qualitativa das Falhas nos Corpos de Prova SAE 1030

A análise qualitativa dos espécimes do SAE 1030 foi feita classificando-se os mesmos através da comparação dos resultados de falha que ocorreram na região próxima ao ponto de solda com aqueles que, mesmo estando com um micro-ponto de solda em um "ombro", falhou no "ombro" o qual estava sem o ponto de solda. Por esta análise, pôde-se observar que a introdução do micro-ponto de solda em um "ombro" do corpo de prova influenciou na localização da falha, sendo que, dos 21 CPs ensaiados com micro-ponto de solda em um dos "ombros", apenas 5 falharam naquele que não havia o ponto de solda, ou seja, 76% dos CPs ensaiados "com solda" romperam na solda. No entanto, esta influência não foi significativa, como comprovado pelos resultados do teste t , e analisando-se a curva S-N.

3.2 - Análise Estatística dos Resultados

Uma forma bastante eficiente de avaliar a influência da presença dos micro-pontos de solda sobre a resistência a fadiga dos materiais pode ser realizada utilizando-se testes de hipóteses para verificar se as vidas médias dos corpos de prova soldados e não soldados é a mesma. Neste trabalho utilizou-se o teste t com duas amostras presumindo variâncias diferentes [Lipson e Sheth, 1973]. Através dos resultados obtidos destes testes, considerando os 6 níveis de tensão utilizados, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos através do teste de média

Material	Nível de Tensão	Média (Log(N))		Desvio Padrão (Log(N))		Graus de Liberdade	$t_{amostra}$	$t_{crítico}$
		S/ Solda	C/ Solda	S/ Solda	C/ Solda			
SAE 1020	0,80 S_u	4,83	4,69	0,073	0,081	6	2,71	1,94
	0,70 S_u	5,13	4,89	0,132	0,097	5	2,98	2,01
	0,60 S_u	5,58	5,48	0,342	0,393	10	0,489	1,81
SAE 1030	0,70 S_u	4,97	4,79	0,148	0,216	5	1,36	2,01
	0,65 S_u	5,08	5,01	0,797	0,114	5	1,00	2,01
	0,60 S_u	5,88	5,81	0,330	0,269	12	0,422	2,01

Considerando os resultados apresentados na tabela 4, verifica-se :

2º) Preparar o aparelho para soldagem capacitiva por pontos de acordo com a seguinte seqüência:

- a) Ligar o aparelho;
- b) Selecionar a energia a ser utilizada;
- c) Selecionar o tempo de descarregamento da carga pela máquina;

3º) Posicionar o corpo de prova entre as pontas soldadoras da máquina e pressionar o pedal com o pé para que haja contato entre o CP e as pontas;

4º) Aplicar a descarga sobre o corpo de prova.

Devido ao fato da máquina de soldagem disponível destinar-se a soldas de chapas, a quantidade de energia e o tempo selecionados no processo de soldagem foram de 30 J e 0,1 s, resultando numa descarga de 300 W, ou seja, um valor muito superior ao necessário para a soldagem dos extensômetros. Na figura 4 são apresentadas micrografias dos corpos de prova fabricados de aço SAE 1030 com e sem o ponto de solda.

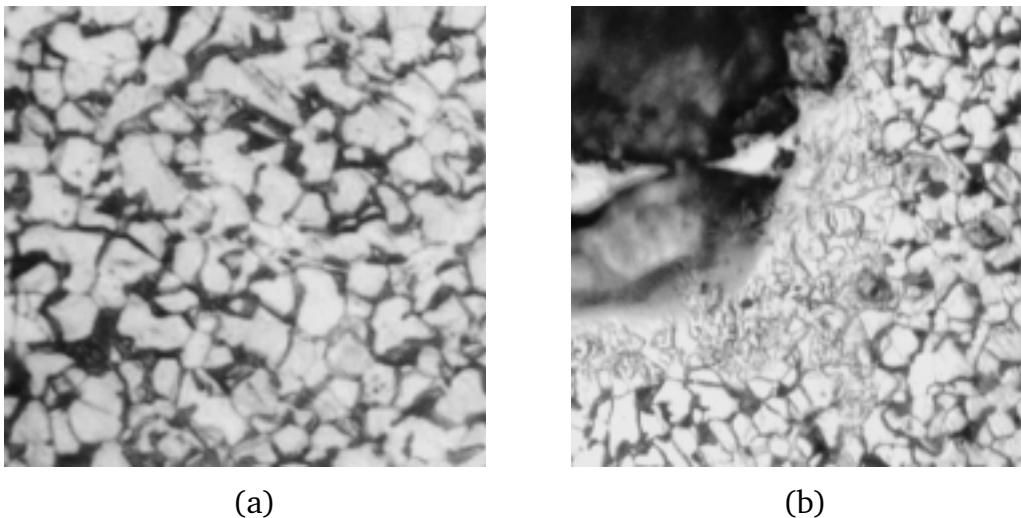


Figura 4 - Micrografia dos corpos de prova fabricados em SAE 1030 - 300 x (Ataque nital 3%) (a) material virgem (b) material soldado

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos ensaios para o SAE 1020 constatou-se que as seções onde as trincas se iniciaram e propagaram até a fratura, localizaram-se na extremidade da seção menor dos corpos de prova, conforme ilustrado na figura 5. Isto ocorreu para os 30 CPs ensaiados, com e sem pontos de solda.



Figura 5. Corpo de prova de SAE 1020 com falha na extremidade da seção menor.

Para os ensaios com o SAE 1030 constatou-se que, em todos os 33 espécimes testados, as trincas se iniciaram e propagaram até a fratura na região dos “ombros” dos CPs, conforme ilustrado na figura 6. Dos 21 espécimes ensaiados com micro-pontos de solda 5 não tiveram a iniciação da trinca no “ombro” onde estava a solda, ou seja, falharam no “ombro” sem ponto de solda.

apresentados nas figuras 1 e 2.



Figura 1 - Croqui dos corpos de prova utilizados para ensaios do SAE 1030 - Dimensões mm

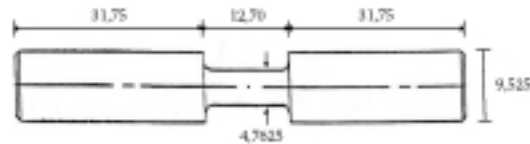


Figura 2 - Croqui dos corpos de prova utilizados para ensaios do SAE 1020 - Dimensões mm

Os ensaios foram realizados sob condições idênticas de carregamento em CPs sem e com micro-pontos de solda aplicados em uma das regiões de mudança de seção dos CPs, conforme ilustrado na figura 3.



Figura 3 - Corpo de prova com micro-ponto de solda no raio de variação da seção.

Para o levantamento da curva S-N procurou-se inicialmente utilizar três diferentes níveis de tensão : $0,80.S_u$, $0,70.S_u$ e $0,60.S_u$ [Lipson e Shets, 1973]. Entretanto, para os ensaios realizados na máquina de fadiga "UBM", aço 1030, por não se conseguir impor velocidade em níveis de tensão maiores que $0,70.S_u$, para o específico material, foram utilizados os seguintes níveis de tensão : $0,60.S_u$, $0,65.S_u$ e $0,70.S_u$.

Conforme recomenda a norma ASTM E - 739/91 [1991], o número mínimo necessário de espécimes para se montar uma curva padrão S-N depende do tipo de ensaio que será realizado. Neste estudo trabalhou-se no intervalo de 12 a 24 CPs para cada material, que segundo a Norma, corresponde ao tipo de teste para se obter "dados admissíveis para projeto" ou "dados para análise de confiabilidade". O número total mínimo de CPs torna-se, então, 12×1 (material) $\times 1$ (tipo de ensaio) $\times 2$ (tipos de CPs) = 24. Assim, foram ensaiados sob flexão rotativa 27 CPs com superfícies como usinadas, sem micro-pontos de solda. Destes, 15 CPs foram do material SAE 1020 e 12 CPs do material SAE 1030. Para os ensaios com micro-pontos de solda foram utilizados 36 CPs, sendo 15 CPs do SAE 1020 e 21 CPs do SAE 1030. O que totaliza 63 corpos de prova distintos.

2.1 - Introdução dos micro-pontos de solda no CP

A introdução de micro-pontos de solda nos CPs padronizados simulando a união dos extensômetros soldáveis seguiu-se o seguinte procedimento:

- 1º) Limpar a superfície do espécime;

quebravam na região da solda, mas na região de mudança de seção.

A metodologia adotada nesse trabalho permite alcançar uma resposta qualitativa rápida com relação ao efeito dos micro-pontos de soldagem. Isto será possível porque serão introduzidos micro-pontos de solda em uma das regiões de mudança de seção dos espécimes. Assim, se a fratura do CP inicia em um micro-ponto de solda, pode-se dizer que a resistência desta seção é menor que a das outras, e também, pode-se determinar sua vida N à fadiga. Se as trincas iniciarem indiscriminadamente nos pontos de solda ou em outras seções, pode-se dizer que ambas têm resistência equivalentes. Se por outro lado, as trincas iniciarem em seções que não contenham pontos de solda, pode-se afirmar que seu efeito é irrelevante para a resistência à fadiga do material. Deve-se notar que a metodologia usada procura dar uma resposta fenomenológica, onde o efeito do ponto de solda é medido pela perturbação que ele causa na resistência à fadiga. Esta perturbação é resultante dos efeitos mencionados anteriormente, isto é, da combinação de uma redistribuição de tensões no micro-ponto (concentração de tensões) com mudanças nas características da resposta à fadiga do aço carbono. Em fadiga, este efeito é normalmente traduzido pelo fator de concentração de tensão efetivo para a fadiga, cujo símbolo é K_f . O fator K_f é definido pela razão entre a resistência à fadiga, para vidas idênticas, entre os espécimes sem e com concentração de tensões, e já leva em consideração a sensibilidade do material à presença de um entalhe.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho, os procedimentos seguidos para suas caracterizações e o tipo de ensaio realizado.

Os materiais utilizados durante este trabalho foram os aços SAE 1030 e SAE 1020, sendo que o primeiro foi escolhido por ter propriedades mecânicas análogas ao aço ASTM A-36, que é utilizado em elementos estruturais, tais como, navios, plataformas marítimas de exploração de petróleo. As propriedades mecânicas e químicas desses aços são apresentadas, respectivamente nas tabela 2 e 3

Tabela 2 - Valores normalizados e obtidos em ensaios de tração das propriedades mecânicas dos aços SAE 1030 e SAE 1020.

Material	Resistência à Tração S_u (MPa)	Limite de escoamento S_e (MPa)	Dureza Brinell HB
SAE 1030 (normalizado)	551,6	344,7	179
SAE 1030 (ensaiado)	465,1	430,7	164
SAE 1020 (normalizado)	448,2	330,9	143

Tabela 3 - Valores normalizados da análise química dos aços SAE 1030 e SAE 1020 [Metals Handbook, 1978]

Componentes	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
SAE 1030	0,27 - 0,34	0,60 - 0,90	0,04 máx.	0,05 máx.
SAE 1020	0,17 - 0,23	0,30 - 0,60	0,04 máx.	0,05 máx.

Os ensaios de fadiga sob flexão rotativa foram realizados em uma máquina "UBM" VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig, utilizando o SAE 1030, e uma máquina "BUDD" Modelo RFB-200, utilizando o SAE 1020. Os corpos de prova utilizados nestes ensaios são

alterações na região soldada, como por exemplo : aparecimento de macro tensões, mudanças nas suas propriedades mecânicas, e introdução de um concentrador de tensões.

A partir do exposto acima, pode-se gerar um questionamento sobre a possibilidade de trincas de fadiga serem iniciadas nos micro-pontos de soldas quando os extensômetros soldáveis forem montados, por tempos longos, em componentes que trabalham com tensões variáveis.

A resposta a este questionamento tem sido procurada através da medição e comparação direta entre as resistências à fadiga de corpos de prova padrões e de corpos de prova que contêm micro-pontos de solda [Imig, 1970, Freire e Arêas, 1995].

Imig [1970] utilizou-se de placas finas de aço inoxidável, soldadas a corpos de prova de tração-tração para verificar a influência dos micro-pontos de solda na resistência à fadiga dos corpos de prova (CPs) fabricados nos materiais : Ti-6Al-4V, René 41, Inconel X. Os testes foram feitos à temperatura ambiente e a alta temperatura (800°). Como resultados destas análises verificou-se :

- A liga Ti-6Al-4V teve sua resistência à fadiga reduzida pelo ponto de solda para menos de 1/8 do valor sem o ponto,
- A liga de René 41 teve sua resistência à fadiga reduzida para menos de 2/3 do valor sem o ponto, e
- A liga de Inconel X teve sua resistência à fadiga reduzida para menos de 1/3 do valor sem o ponto.

Em Freire e Arêas [1995], corpos de prova de flexão plana com geometria especial foram testados sob várias condições. Os resultados destes ensaios, embora não conclusivos, por serem realizados com um número pequeno de CPs, mostraram que os micro-pontos de solda não influenciaram de maneira significativa a vida à fadiga dos espécimes testados. Resultados ilustrativos destes ensaios são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Resultados do ensaio à fadiga em flexão plana (aço BS4360).

Condição	Vida N (ciclos)					Média	Coef. de Variação
Sem solda	19987	29975	39708	23680	32780	33718	27%
Soldagem "seca"	13191	35277	65812	15073	35187	47122	63%
Soldagem "molhada"	20150	30832	48180	23466	24097	38265	39%

Estes ensaios apresentaram dois problemas na sua metodologia. O primeiro é que apenas uma seção do corpo de prova era crítica. Assim, apenas a diferença entre as vidas dos corpos de prova que continham ou não continham micro-pontos de solda serviram como fatores de comparação entre as suas resistências. Para atingir-se resultados conclusivos, um número razoável de espécimes, maior que o utilizado, seria necessário para se alcançar um resultado estatisticamente consistente. O segundo problema estava no controle do ensaio, que era feito através de extensômetros de resistência elétrica instalados na seção crítica. Isto fez com que trincas iniciadas nas seções críticas (ou nos próprios EREs) acarretassem desvios de zero significativos em tração dos EREs e impedissem a continuação dos ensaios.

Machado [1997], procurando solucionar os problemas acima descritos estudou o efeito dos micro pontos de solda, empregando espécimes que possuísem grandes superfícies ou volumes submetidos às mesmas tensões. Nesse estudo foram utilizados espécimes do tipo flexão rotativa, ensaiados sob controle de carga. A região escolhida por Machado [1997] para introduzir os micro-pontos de solda nos espécimes localizou-se na metade do comprimento dos mesmos, ou seja, bem distante da região de mudança de seção dos mesmos.

Através de ensaios de flexão rotativa foram estimadas as curvas S-N de corpos de prova com e sem micro-pontos de solda. Os resultados destes ensaios, embora também não conclusivos, mostraram que os micro-pontos de solda não influenciaram de maneira significativa a vida à fadiga dos espécimes testados, pois invariavelmente os espécimes não

INFLUÊNCIA DE MICRO-PONTOS DE SOLDA NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE AÇOS DE BAIXO CARBONO

Marco Aurélio Zangrado Tonelli, Eng.

Ricardo Mendonça de Siqueira, Eng.

Jorge Luiz de Almeida Ferreira, Dr.

Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília - UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF, Brasil

Resumo

Extensômetros soldáveis de resistência elétrica (ESs) são transdutores de deformação muito utilizados em análises de tensões de elementos estruturais. Os ESs são instalados nos componentes estruturais metálicos a partir de micro-pontos de soldas, gerados por equipamentos de soldagem capacitiva. A inclusão destes micro-pontos pode causar alterações na região soldada, como por exemplo : aparecimento de macro tensões, mudanças nas suas propriedades mecânicas, e introdução de um concentrador de tensões. Este trabalho teve como objetivo avaliar e determinar a influência da soldagem de micro-pontos, por descarga capacitiva, na resistência à fadiga de corpos de prova confeccionados com aços de baixo teor de carbono. Neste sentido foram ensaiados um total de 63 corpos de prova fabricados em aço SAE 1020 e 1030, com e sem solda. Análises qualitativas e quantitativas foram realizadas para avaliar o comportamento da vida de fadiga destes corpos de prova. A partir dos resultados obtidos com espécimes ensaiados sob flexão rotativa, pôde-se concluir que os micro-pontos de solda não influenciaram de maneira significativa na iniciação de trincas de fadiga nos materiais estudados.

Palavras-Chave : Fadiga, Comportamento de Material, Soldagem Capacitiva

1 - INTRODUÇÃO

Os extensômetros soldáveis (ESs) têm sido usados por um longo tempo. Eles representam uma boa opção na seleção de meios para medição de deformações pelas facilidades que oferecem na sua instalação, proteção e uso, quando são necessárias aplicações em estruturas em operação no campo, tais como pontes metálicas, navios, e plataformas marítimas de perfuração e exploração de petróleo. Os ESs são instalados nos componentes estruturais metálicos a partir de micro-pontos de soldas, gerados por instrumentos soldadores que trabalham através de descargas capacitivas. A inclusão destes micro-pontos pode causar