

YVENS DOS SANTOS SEBASTIANY

**Análise da influência dos termopares soldados junto à superfície
dos corpos de prova nos testes de fadiga**

Yvens dos Santos Sebastiany

**Análise da influência dos termopares soldados junto à superfície
dos corpos de prova nos testes de fadiga**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof^o Dr. José Elias Tomazini
Coorientador: Prof^o Dr. Marcelo Sampaio

Guaratinguetá - SP
2019

S443a	Sebastiany, Yvens dos Santos Análise da influência dos termopares soldados junto à superfície dos corpos de prova nos testes de fadiga / Yvens dos Santos Sebastiany – Guaratinguetá, 2019 41 f : il. Bibliografia: f. 41 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins 1. Fadiga. 2. Aço de alta resistência. 3. Aço - Tratamento térmico. I. Título. CDU 620.178.3
-------	---

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

YVENS DOS SANTOS SEBASTIANY

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

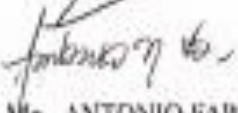
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr.  Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
UNESP-FEG


Prof. Me. ANTONIO FARIA
UNESP-FEG

Agosto, 2019

DADOS CURRICULARES

YVENS DOS SANTOS SEBASTIANY

NASCIMENTO: 19/09/1991 - Taubaté / SP

FILIAÇÃO: João Luiz Sebastiany
Alcira Brandão de Faria Santos Sebastiany

Dedico este trabalho aos meus pais, João Luiz e Alcira, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim, e à minha esposa Tainá, que me incentivou e me ajudou a superar as dificuldades, principalmente nesses últimos anos. Sem o amor e suporte deles, eu não estaria aqui hoje.

AGRADECIMENTOS

Reservo este espaço para um agradecimento especial ao meu orientador, José Elias Tomazini, por todos os ensinamentos em sala de aula, conselhos, paciência, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado em pesquisas, e por me dar suporte neste trabalho de graduação mesmo às vésperas do encerramento de sua grandiosa carreira acadêmica.

Agradeço também ao Professor Dr. Mark E. Barkey, da Universidade do Alabama, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado em minha reta final de intercâmbio e também por permitir que os resultados obtidos fossem aproveitados neste Trabalho de Graduação

*“A persistência é o caminho do êxito”
(Charles Chaplin)*

RESUMO

O aço P91 é um aço de alta resistência que está sendo amplamente utilizado em usinas convencionais e de energia nuclear, ideal para altas temperaturas. Possui alta ductilidade e pode suportar temperaturas de até 600°C. Também apresenta uma melhor resistência à oxidação do que o seu antecessor, o aço P22, podendo ter uma vida em fadiga mais longa em uso. É um excelente material para peças sujeitas à pressão e tubulações, como estações de vapor e caldeiras. Neste estudo, corpos de prova do aço P91 foram usinados a partir de tubos, e submetidos a testes de fadiga sob controle de carga para construir um padrão de vida em fadiga para o aço. Os corpos de prova foram então testados sob diferentes níveis de carregamento com e sem a utilização de termopares soldados junto à superfície para se determinar a influência destes termopares na vida em fadiga. Os resultados mostraram que a vida em fadiga é sim afetada pelo processo de solda de termopares, resultando em uma vida em fadiga menor. Para discussão e entendimento dos resultados, são abordados os conceitos do efeito concentrador de tensões e da Zona Termicamente Afetada (ZTA).

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga. Aço P91. Termopares.

ABSTRACT

P91 steel is a high strength steel that is being widely used in conventional and nuclear power plants, ideal for high temperatures. It has high ductility and can withstand temperatures up to 600°C. It also has a better resistance to oxidation than its predecessor, the P22 steel, and may have a longer fatigue life in use. It is an excellent material for pressurized parts and piping, such as steam stations and boilers. In this study, P91 steel specimens were machined from tubes and subjected to fatigue tests under load control to build a fatigue life standard for steel. The specimens were then tested under different loading levels with and without the use of welded thermocouples near the surface to determine the influence of these thermocouples on fatigue life. The results showed that fatigue life is affected by the thermocouple welding process, resulting in a shorter fatigue life. For discussion and understanding of the results, the concepts of the stress concentrating effect and the Thermally Affected Zone (TAZ) are addressed.

KEYWORDS: Fatigue. P91 steel. Thermocouples.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Valores das componentes alternada, média e o intervalo de variação de tensões para tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes.	15
Figura 2: Apresentação das três regiões de desenvolvimento de uma trinca.	17
Figura 3: Diagrama S-N ou Curva de Wöhler (resistência à fadiga versus vida esperada).....	18
Figura 4: Tipos de termopar e respectivas gamas de temperatura.....	19
Figura 5: Localização e orientação dos tipos de fratura em uma junta soldada.	20
Figura 6: Mudanças microestruturais ao longo da ZTA de juntas soldadas de aços com baixo Carbono.	20
Figura 7: Corpo de Prova Padrão para o Aço P91.	22
Figura 8: Termopares tipo K empregados no presente estudo.....	23
Figura 9: Termopares soldados à superfície do corpo de prova.	23
Figura 10: Soldador de termopares.....	24
Figura 11: Estação de Trabalho.	24
Figura 12: Máquina para testes de fadiga.	25
Figura 13: Tensão vs. Número de Ciclos até fratura para os corpos de prova testados.....	28
Figura 14: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-01 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-01; c) Ponto de fratura.	29
Figura 15: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-02 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-02 c) Ponto de fratura.	30
Figura 16: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-03 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-03; c) Ponto de fratura.	31
Figura 17: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-04 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-04; c) Ponto de fratura.	32
Figura 18: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-05 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-05; c) Ponto de fratura.	33

Figura 19: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-06 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-06; c) Ponto de fratura.	34
Figura 20: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-11 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-11; c) Ponto de fratura	35
Figura 21: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-12 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-12; c) Ponto de fratura.	36
Figura 22: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. A) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-13 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-13; c) Ponto de fratura	37
Figura 23: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-14 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-14; c) Ponto de fratura.	38
Figura 24: Relação entre limite de fadiga e resistência à tração para corpos de prova de aço.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferentes Níveis de Carregamento aplicados nos Corpos de Prova.....	26
Tabela 2: Vida em Fadiga (Nf), obtida para os corpos de Prova Testados	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	CONCEITUAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	FADIGA.....	14
2.1.1	Fatiga por fadiga	16
2.1.2	Vida em fadiga e limite de fadiga	17
2.2	TERMOPARES	18
2.3	CONCENTRADOR DE TENSÕES.....	19
2.4	ZONA TERMICAMENTE AFETADA.....	19
3	METODOLOGIA.....	22
3.1	CORPOS DE PROVA	22
3.2	TERMOPARES DO TIPO K.....	22
3.3	PROCESSO DE SOLDAGEM DE TERMOPARES	24
3.4	TESTE DE FADIGA	24
4	RESULTADOS.....	27
4.1	IMAGENS MICROSCÓPICAS	29
5	CONCLUSÃO.....	40
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

O aço P91 (9%Cr e 1%Mo) é um aço de alta resistência que está sendo amplamente utilizado em usinas convencionais e de energia nuclear, ideal para altas temperaturas. Possui alta ductilidade e pode suportar temperaturas de até 600°C. Também apresenta uma melhor resistência à oxidação do que o seu antecessor, o aço P22, podendo ter uma vida em fadiga mais longa em uso. É um excelente material para peças sujeitas à pressão e tubulações, como estações de vapor e caldeiras (Sebastiany, et al., 2015). Neste estudo, corpos de prova do aço P91 foram usinados (a partir de tubos, todos do mesmo lote), e submetidos a testes de fadiga sob controle de carga para construir um padrão de vida em fadiga para o aço. O objetivo era determinar a vida em fadiga do material sob diferentes níveis de aquecimento, desde a temperatura ambiente, até temperaturas mais extremas. Para controle da temperatura durante os testes de fadiga, foram utilizados termopares tipo K (fita) soldados junto a superfícies dos corpos de prova, na região do pescoço. No entanto, o processo de solda poderia gerar defeitos na superfície, originando pontos concentradores de tensão, foi identificada a necessidade de se testar os corpos de prova sob os mesmos níveis de carregamento, à temperatura ambiente, com e sem a utilização de termopares soldados junto à superfície, para comprovar a influência dos termopares soldados na possível redução da vida em fadiga dos corpos de prova. Os resultados mostraram que o processo de solda dos termopares para controle da temperatura tem sim influência na vida em fadiga dos corpos de prova, reduzindo a quantidade de ciclos até a ruptura deles. Para entender melhor o porquê desta redução da vida em fadiga, serão abordados os conceitos do efeito concentrador de tensões devido à presença de entalhes nos corpos de prova, e o conceito da Zona Termicamente Afetada (ZTA), que pode alterar a microestrutura do material na região da solda, com comprometimento das propriedades mecânicas.

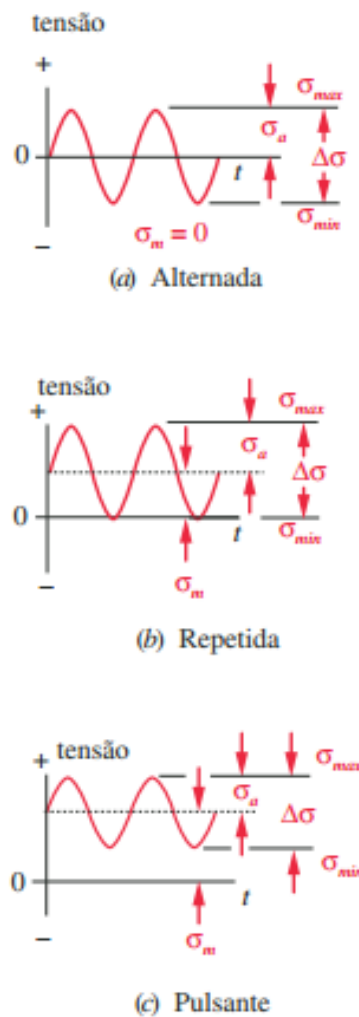
2 CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

2.1 FADIGA

Quando um material é submetido a uma carga que varia com o tempo, ele está sujeito ao fenômeno de fadiga, que faz com que um material venha a se romper com uma tensão consideravelmente menor à tensão de escoamento (σ_e) ou a tensão de ruptura (σ_r) consideradas para um carregamento estático. O comportamento de uma carga alternada, repetida ou pulsante varia muito de uma aplicação para outra. A forma da onda da carga em função do tempo não apresenta efeito significativo na falha por fadiga na ausência de corrosão. Assim, geralmente descreve-se a função, como uma forma de onda senoidal. Os fatores mais importantes a serem considerados são a amplitude e o valor médio da onda de tensão-tempo (ou deformação-tempo) e o número total de ciclos de tensão/deformação (Norton, 2013).

A Figura 1 ilustra as funções típicas de tensão-tempo, apresentadas como ondas senoidais.

Figura 1: Valores das componentes alternada, média e o intervalo de variação de tensões para tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes.



Fonte: Norton (2013).

Como pode-se observar na Figura 1, no caso de tensão alternada, o valor médio é igual a zero. Para o caso de tensões repetidas, existe um valor máximo de tensão que se repete, sendo o valor mínimo igual a zero. Já no caso de tensões pulsantes, que é o caso mais geral, todas as componentes são diferentes de zero. Todos os tipos de onda citados podem ser ilustrados com base em dois parâmetros, as componentes média e alternada (Norton, 2013).

A amplitude de variação da tensão σ_a , ou componente alternada, é obtida da seguinte relação:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.1a)$$

Já a tensão média σ_m , consiste no valor médio entre as tensões máxima e mínima.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2.1b)$$

Ainda com base nas tensões máxima e mínima, pode-se definir duas relações.

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.1c)$$

R é definida como a razão de tensão, enquanto A é a razão de amplitude.

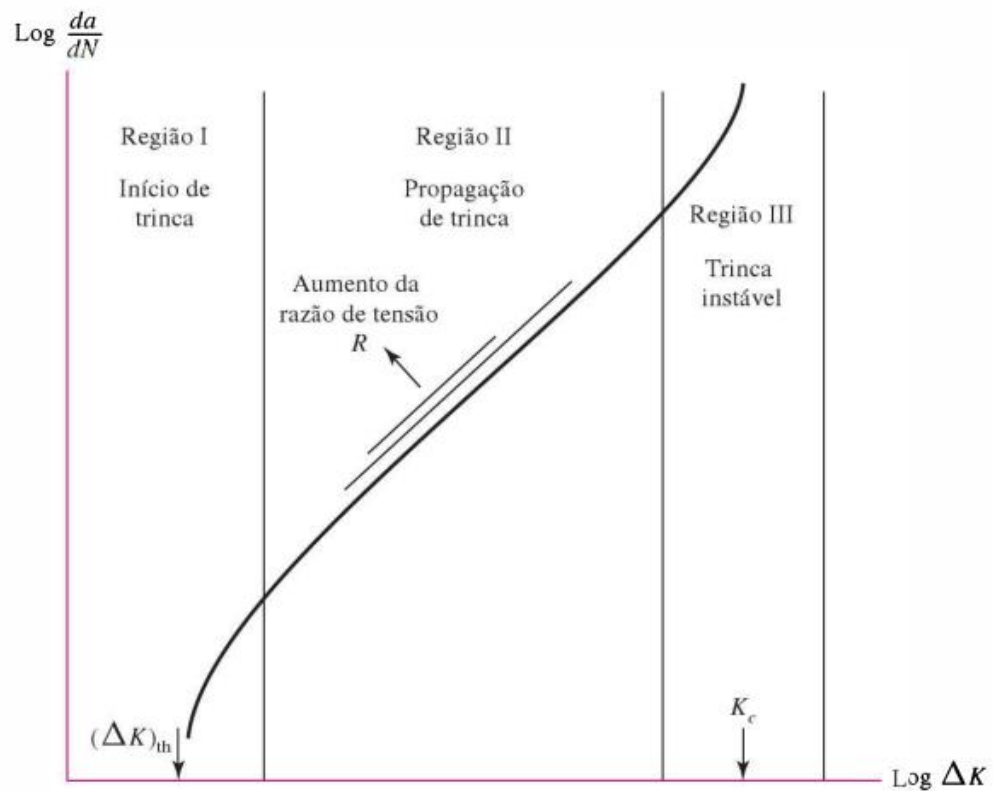
Quando a tensão é alternada, $R = -1$ e $A = \infty$. Para os casos em que a tensão é repetida, $R = 0$ e $A = 1$. Quando as tensões máxima e mínima têm o mesmo sinal (tensão pulsante) tanto R quanto A são positivos e $0 \leq R \leq 1$ (Norton, 2013).

2.1.1 Fratura por fadiga

Diferentemente das falhas sob um carregamento estático, nas quais pode-se observar uma deformação muito grande, as falhas por fadiga não dão aviso, sendo muito mais complexas. Uma falha por fadiga se assemelha a uma fratura frágil, uma vez que as superfícies da fratura são planas e perpendiculares ao eixo de tensão, com a ausência de estricção (Shigley, 2011).

As fraturas por fadiga apresentam três estágios de desenvolvimento. O estágio I consiste na iniciação de uma ou mais microtrincas, resultantes da deformação plástica cíclica, e que não podem ser identificadas a olho nu. O estágio II corresponde à transformação das microtrincas em macrotrincas. Já no estágio III, ocorre uma fratura rápida e repentina, uma vez que o material remanescente não consegue suportar as cargas de tensão final (Shigley, 2011). A Figura 2 mostra os três estágios de desenvolvimento da fratura por fadiga.

Figura 2: Apresentação das três regiões de desenvolvimento de uma trinca.



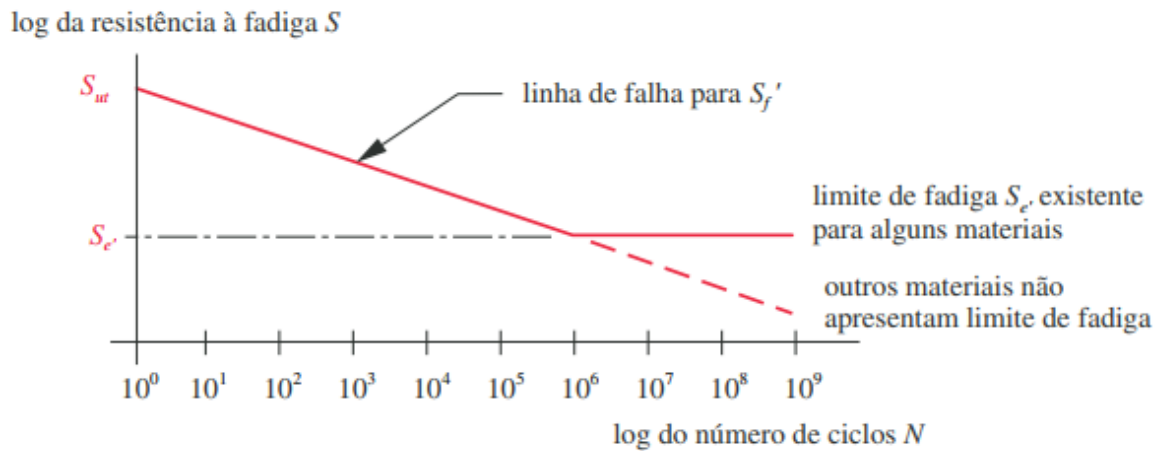
Fonte: Shigley (2011).

Na Figura 2, pode-se observar as três regiões de desenvolvimento da trinca, bem com o aumento da razão de Tensão, R , da região I para a região III.

2.1.2 Vida em fadiga e limite de fadiga

A vida em fadiga de um material pode ser representada pela curva S-N, também conhecida como curva de Wöhler, na qual S representa a Resistência à fadiga, e N indica o número de ciclos que o material pode suportar a um dado valor de tensão (Norton, 2013). A Figura 3 ilustra a curva S-N para um aço.

Figura 3: Diagrama S-N ou Curva de Wöhler (resistência à fadiga versus vida esperada).



Fonte: Norton (2013).

Por definição, o limite de fadiga S_e' para um dado material, consiste no nível de tensão abaixo do qual não ocorrem mais falhas por fadiga, podendo-se continuar os ciclos de tensão ilimitadamente, representando vida em fadiga infinita (Norton, 2013).

Pode-se definir um limite de fadiga aproximado para os aços:

$$S_e' = 0,5 S_{ut} \quad S_{ut} < 200 \text{ ksi} \quad (2.1d)$$

2.2 TERMOPARES

Termopares são sensores de temperatura simples e de baixo custo. Trata-se do método mais conhecido de medição por cobrir uma ampla faixa de temperatura. Os termopares consistem em dois metais diferentes colocados em contato elétrico. Haverá uma diferença de potencial entre eles devido à diferença de temperatura, que pode ser medida por um voltímetro. Existem diferentes tipos de termopares, cada um deles cobrindo uma faixa diferente de medição. Para se definir o melhor tipo de termopar, deve se levar em conta a faixa de temperatura que se deseja medir, e a exatidão das leituras deste termopar nesta faixa em questão. (Elétrica, 2019). A Figura 4 mostra os tipos de termopares e as diferentes faixas de temperatura em que os mesmos podem ser utilizados.

Figura 4: Tipos de termopar e respectivas gamas de temperatura.

NOME	CONSTITUIÇÃO	GAMA DE TEMPERATURA
B	Platina / 30% Ródio-Platina	0 - 1800C
C	Tung-5% Rénio/Tung-26% Rénio	0 - 2320C
E	Cromel / Constantan	-270 - 1000C
G	Tugnésio / Tung - 26% Rénio	0 - 2300C
J	<u>Ferro</u> / constantan	-210 - 750C
K	Cromel / Alumel	-270 - 1370C
N	Nicrosil / Nisil	-270 - 1300C
R	Platina / 13% Ródio-Platina	-50 - 1750C
S	Platina / 10% Ródio-Platina	-50 - 1750C
T	Cobre / Constantan	-270 - 400C

Fonte: Elétrica (2019).

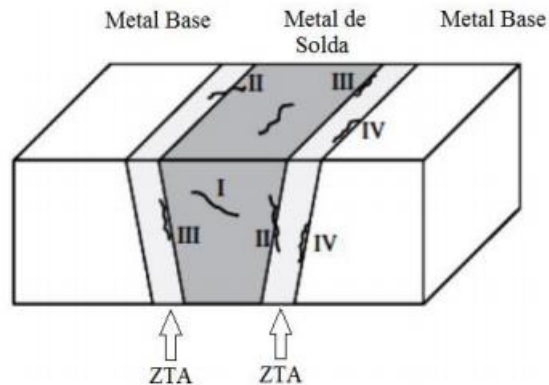
2.3 CONCENTRADOR DE TENSÕES

A vida em fadiga de um aço pode ser significativamente afetada pela presença de um entalhe ou outro elemento causador de concentração de tensão. As falhas por fadiga têm início em uma trinca, esta podendo estar presente no material desde a sua manufatura ou podendo ser gerada ao longo do tempo como resultados dos esforços cíclicos a que é submetido ao redor dos concentradores de tensão (NORTON, 2013). Norton define o entalhe como qualquer contorno geométrico que eleve a tensão localmente em um ponto.

2.4 ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

Durante um processo de solda, pode haver alterações das propriedades metalúrgicas de um aço no entorno da região soldada. Isto pode afetar a vida em fadiga, levando o aço a falhar precocemente. Esta região da metal base, próxima da solda, é conhecida por Zona Termicamente Afetada (ZTA). A Figura 5 mostra o comportamento de um aço na região de solda.

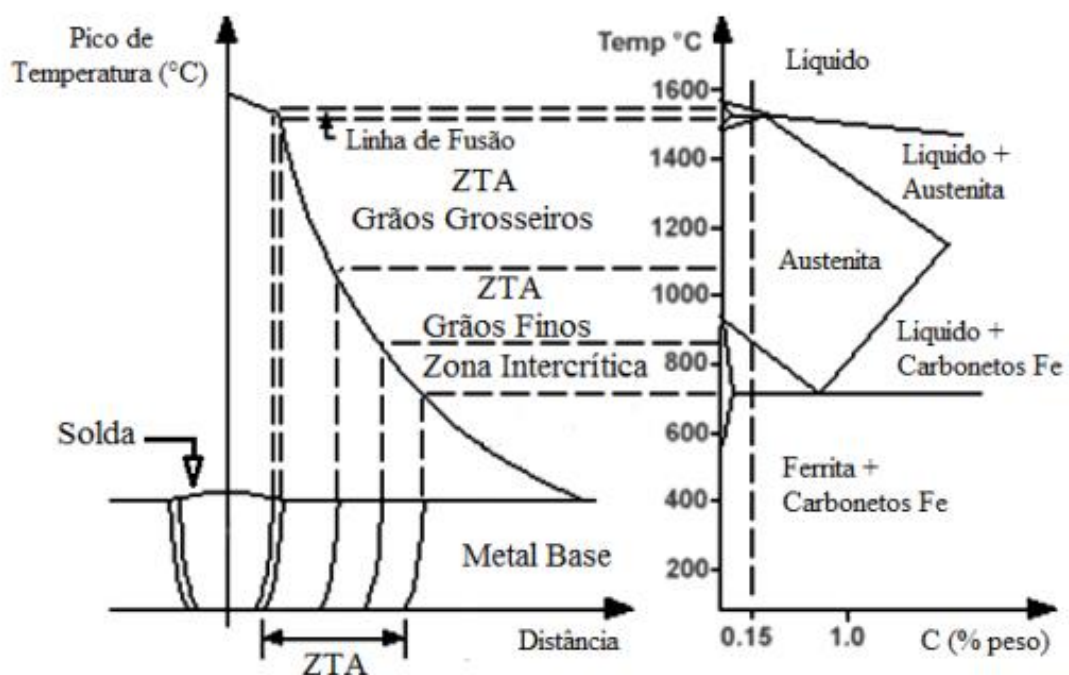
Figura 5: Localização e orientação dos tipos de fratura em uma junta soldada.



Fonte: Larsson (2012).

A Zona Termicamente Afetada é dividida em três sub-regiões, chamadas de ZTA de Grãos Grosseiros (ZTA-GG), ZTA de Grãos Finos (ZTA-GF) e Zona Intercrítica (ZTA-IC). A Figura 6 mostra as mudanças microestruturais que podem ocorrer em uma junta soldada (Larsson, 2012).

Figura 6: Mudanças microestruturais ao longo da ZTA de juntas soldadas de aços com baixo Carbono.



Fonte: Larsson (2012).

Conforme visto na Figura 6, as diferentes zonas da ZTA apresentam transformações microestruturais diferentes no estado sólido. A ZTA Intercrítica, mais afastada da solda, é a região mais sensível em soldas de aços Cr-Mo (caso do aço P91), sendo a região com maior probabilidade de fratura (Chuvas, 2015).

3 METODOLOGIA

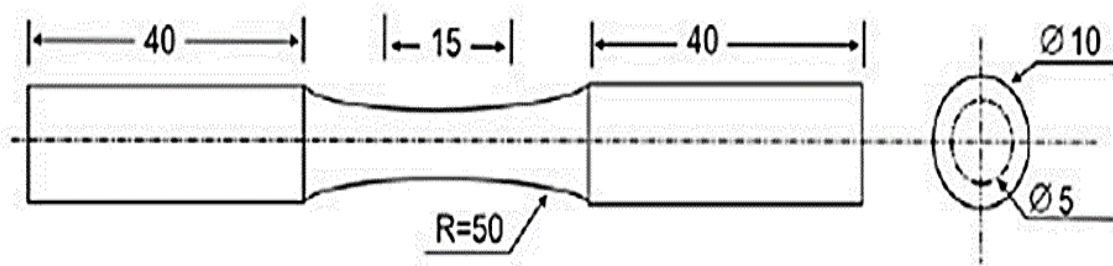
No presente estudo, os espécimes do aço liga P91 tiveram sua vida em fadiga testadas em diferentes circunstâncias. Primeiro, foram colocados na máquina de teste à temperatura ambiente, sem termopares. Em seguida, foram testados à temperatura ambiente usando termopares soldados à superfície na região do “pescoço”. A vida em fadiga sob estas diferentes circunstâncias foi confrontada para atestar a influência da solda junto à superfície na vida em fadiga do material. Devido ao curto tempo de pesquisa, e também para se evitar o desperdício de recursos, foram utilizados apenas 2 corpos de prova para cada condição (temperatura ambiente, com e sem termopares soldados junto à superfície).

3.1 CORPOS DE PROVA

Os espécimes P91 utilizados neste estudo foram usinados a partir de tubos, todos de um mesmo lote, com um diâmetro externo de 10 mm e um diâmetro de 5 mm na seção de medição, conforme padrão para ensaios de fadiga. As seções de aperto estão igualmente espaçadas.

A Figura 7 mostra um dos corpos de prova empregados.

Figura 7: Corpo de Prova Padrão para o Aço P91 (dimensões em milímetros).

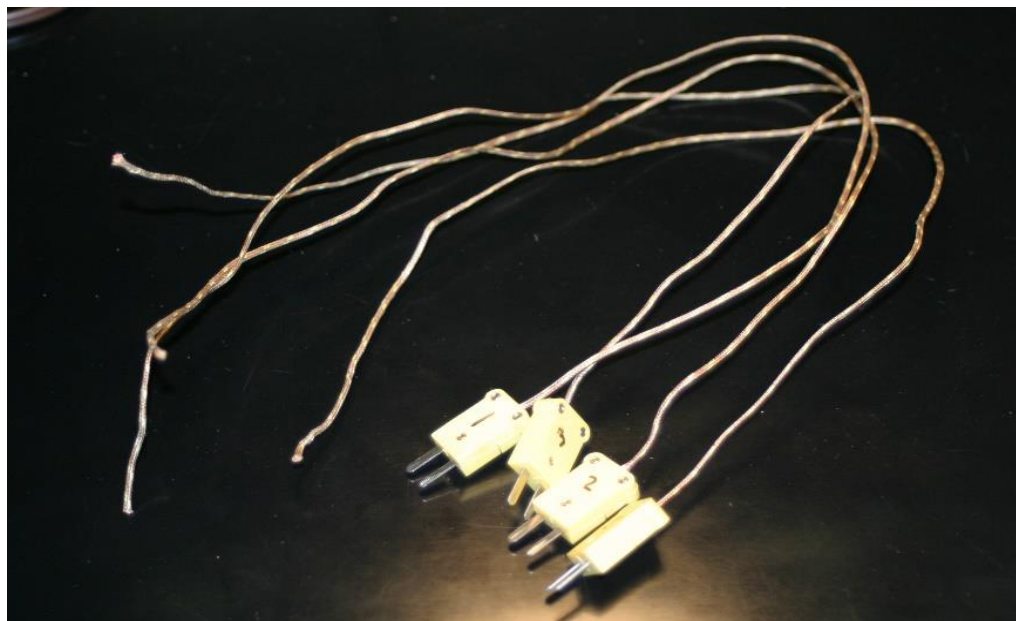


Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 TERMOPARES

Neste estudo, para medição e controle de temperatura, foram empregados os termopares do tipo K, com isolamento em fibra de vidro, sendo capazes de medir temperaturas de -200 a 1200°C. A Figura 8 mostra os termopares do tipo K 24 Ga.

Figura 8: Termopares tipo K empregados no presente estudo.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os termopares do tipo fita são enrolados e soldados com os fios perpendiculares à direção axial do corpo de prova, paralelos um ao outro, com uma separação de 1 mm entre cada fio, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9: Termopares soldados à superfície do corpo de prova.

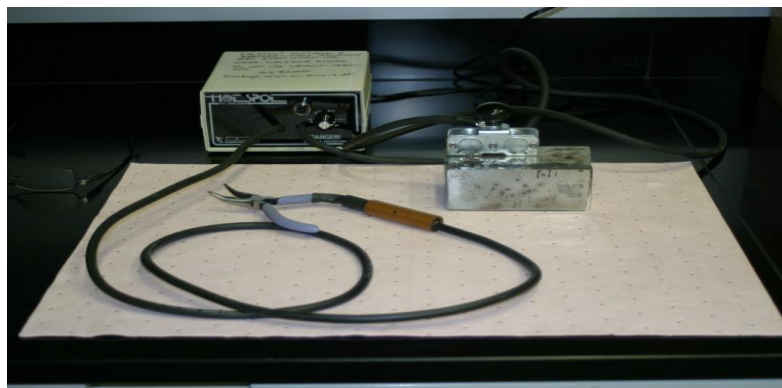


Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 PROCESSO DE SOLDA DOS TERMOPARES

Para a realização da solda dos fios termopares, foi utilizado um soldador de termopares, com a corrente ajustada em 15 A. O equipamento libera uma descarga, aquecendo a extensão do termopar, que acaba fundindo e fazendo com que ela seja soldada ao corpo de prova. A Figura 10 mostra o equipamento.

Figura 10: Soldador de termopares.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.4 TESTE DE FADIGA

A estação de trabalho empregada neste estudo é apresentada na Figura 11. O sistema integrado consiste em uma máquina de ensaios de fadiga e um controlador de temperatura, registrando a temperatura medida pelos termopares em tempo real.

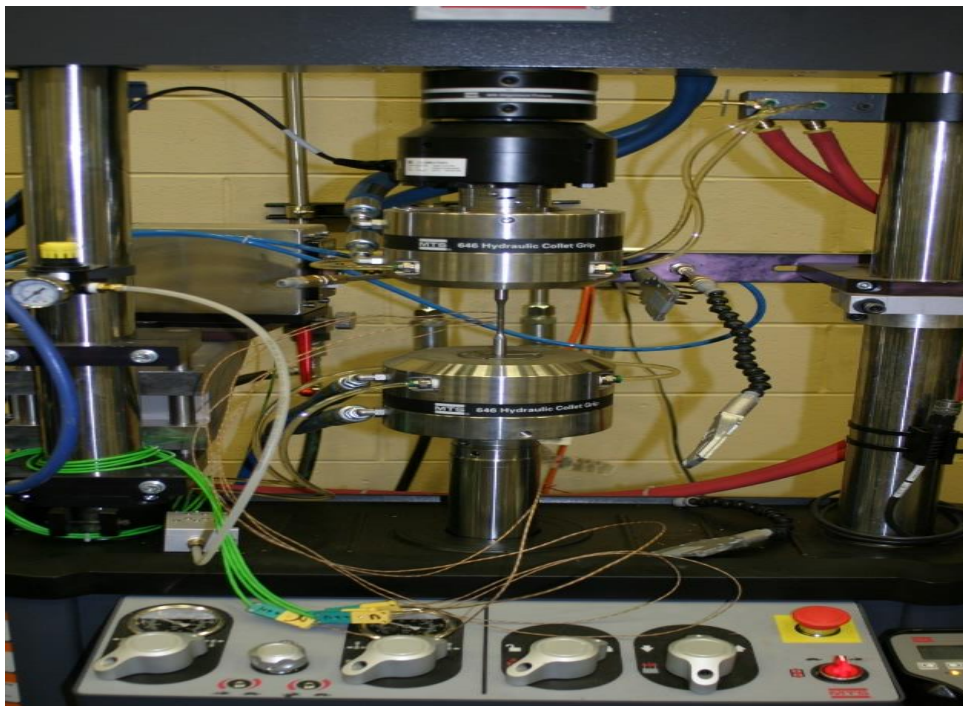
Figura 11: Estação de Trabalho



Fonte: Produção do próprio autor.

A máquina para ensaios de fadiga permite realizar testes de fadiga com carregamento controlado sob uma força de atuação de até 100 kN e é apresentada na Figura 12.

Figura 12: Máquina para testes de fadiga.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após a preparação, os corpos de prova do aço P91 foram testados sob diferentes níveis de carregamento calculados sobre a **Tensão de ruptura à temperatura ambiente (σ_{rt})**, conforme exposto na Tabela 1. O valor para a σ_{rt} empregado neste estudo foi definido pelo Prof. Dr. Mark. E. Barkey em estudos anteriores com o aço P91.

Tabela 1: Diferentes Níveis de Carregamento aplicados nos Corpos de Prova.

Estudo de carregamento para testes de fadiga						
Tensão (MPa)		F (N)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (R=0.1)	σ_m (Mpa)	σ_a (Mpa)
σ_{rt}	660,52	13387,57	660,52	66,05	363,28	297,23
90%	594,47	12048,81	594,47	59,45	326,96	267,51
80%	528,41	10710,06	528,41	52,84	290,63	237,79
70%	462,36	9371,30	462,36	46,24	254,30	208,06
60%	396,31	8032,54	396,31	39,63	217,97	178,34
50%	330,26	6693,79	330,26	33,03	181,64	148,62
40%	264,21	5355,03	264,21	26,42	145,31	118,89
30%	198,16	4016,27	198,16	19,82	108,99	89,17
20%	132,10	2677,51	132,10	13,21	72,66	59,45
10%	66,05	1338,76	66,05	6,61	36,33	29,72

Fonte: Produção do próprio autor.

4 RESULTADOS

Para cada condição de carregamento, 2 corpos de prova foram testados com termopares soldados junto à superfície, e outros 2 corpos de prova foram testados sem a utilização de termopares. Foram obtidas as seguintes quantidades de ciclos até ruptura, conforme apresentado na Tabela 2. Inicialmente foi previsto reduzir o carregamento de 90 a 50% da σ_{rt} , mas o carregamento foi reduzido apenas até 70% da σ_{rt} , para o qual já foi obtida vida em fadiga infinita para as duas condições. Para os carregamentos inferiores a 70%, foi assumido que os corpos de prova também apresentariam vida em fadiga infinita.

Tabela 2: Vida em Fadiga (Nf), obtida para os corpos de prova testados.

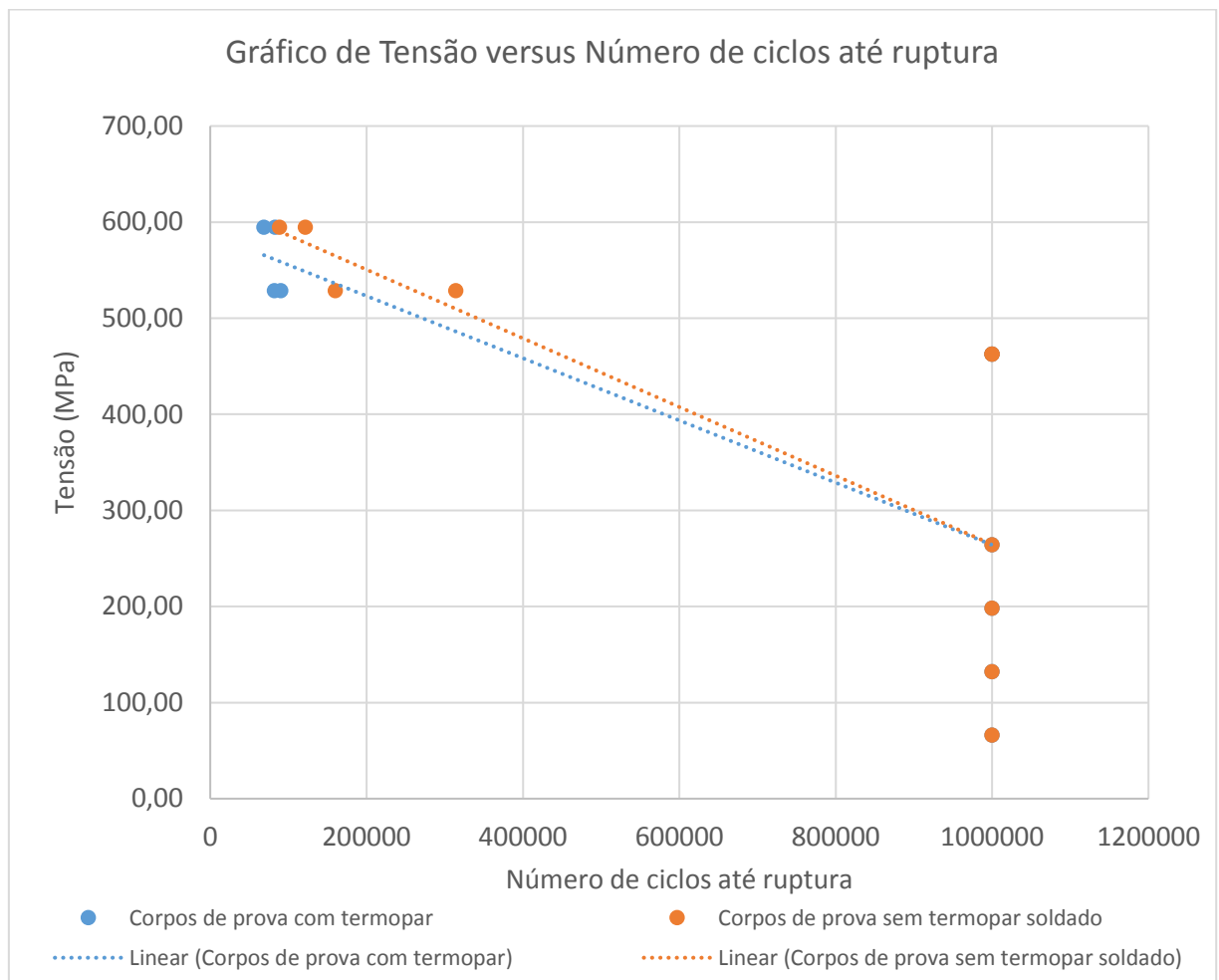
Temperatura ambiente							
P91 COM termopares soldados				P91 SEM termopares soldados			
Corpo de prova	Carregamento	F (kN)	Nº de Ciclos	Corpo de prova	Carregamento	F (N)	Nº de Ciclos
P91-025-01	90%	12.05	83103	P91-025-11	90%	12.05	121755
P91-025-02	90%	12.05	68727	P91-025-12	90%	12.05	88476
P91-025-03	80%	10.71	82303	P91-025-13	80%	10.71	314301
P91-025-04	80%	10.71	90411	P91-025-14	80%	10.71	159997
P91-025-05	70%	9.371	100000	P91-025-15	70%	9.371	100000
P91-025-06	70%	9.371	100000	P91-025-16	70%	9.371	100000
P91-025-07	60%	8.033	100000	P91-025-17	60%	8.033	100000
P91-025-08	60%	8.033	100000	P91-025-18	60%	8.033	100000
P91-025-09	50%	6.694	100000	P91-025-19	50%	6.694	100000
P91-025-10	50%	6.694	100000	P91-025-20	50%	6.694	100000

Fonte: Produção do próprio autor.

Com base nos resultados obtidos e apresentados na Tabela 2, foi possível observar que a solda dos termopares junto à superfície dos corpos de prova resultou em uma vida em fadiga menor em comparação aos espécimes que foram testados livres de termopares soldados, sob

as mesmas condições gerais de carregamento. Os corpos de prova submetidos a um carregamento de 90% apresentaram uma vida em fadiga maior, e estes valores se tornaram ainda mais consideráveis (2 a 3 vezes maior) para os corpos de prova submetidos a um carregamento de 80% da Tensão de Ruptura à Temperatura Ambiente (σ_{rt}). Isso se explica devido ao aquecimento pontual do corpo de prova na região de solda, o que altera a microestrutura do material na zona termicamente afetada, resultando em um material com propriedades diferentes, inferiores, além de se poder gerar defeitos na região de solda, como o surgimento de entalhes, resultando em pontos concentradores de tensão. A Figura 13 apresenta o gráfico de Tensão versus número de ciclos até ruptura para os corpos de prova testados sob as duas condições de carregamento.

Figura 13: Tensão versus número de ciclos até fratura para os corpos de prova testados.



Fonte: Produção do próprio autor.

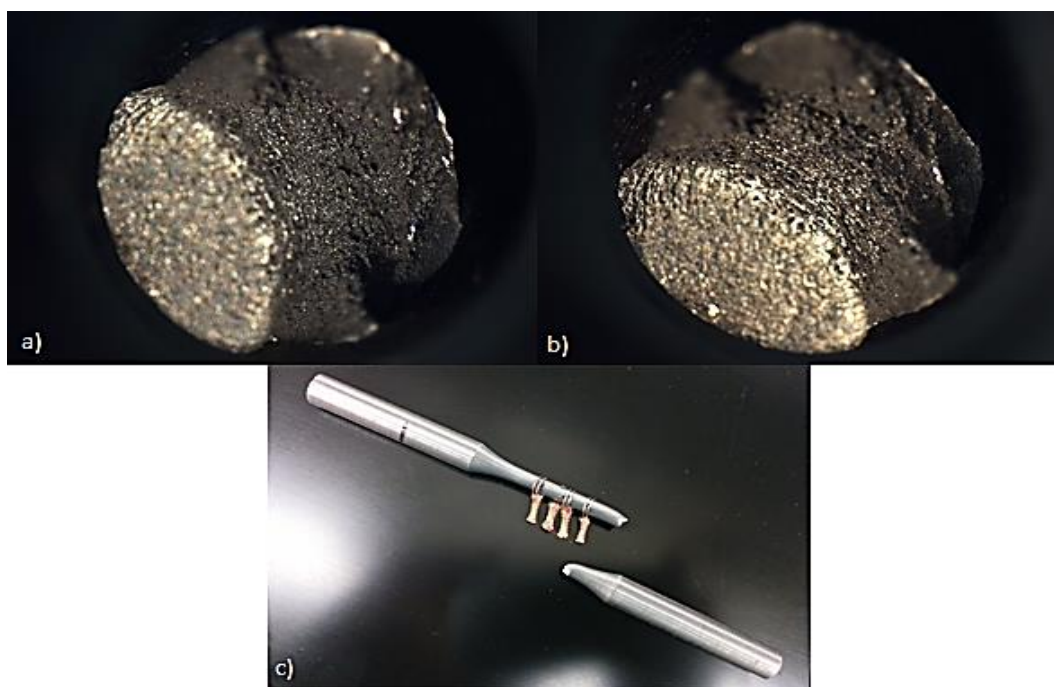
Com base nas 2 linhas de tendência do gráfico da Figura 13, pode-se observar a influência direta do processo de solda de termopares na redução da vida em fadiga dos corpos

de prova testados sob esta condição, em comparação com os corpos de prova submetidos à mesma condição de carregamento, mas livres de termopares soldados junto à superfície.

4.1 IMAGENS MICROSCÓPICAS

Com o intuito de verificar de que forma as trincas se iniciaram, foram tiradas fotografias ampliadas (aproximadamente 30 vezes maior) de ambos os lados dos corpos de prova testados, após a ruptura. A Figura 14 mostra o corpo de prova P91-025-01, testado sob um carregamento de 90% (12.05 kN), e que foi submetido a 83103 ciclos antes da falha.

Figura 14: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-01 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-01; c) Ponto de fratura.

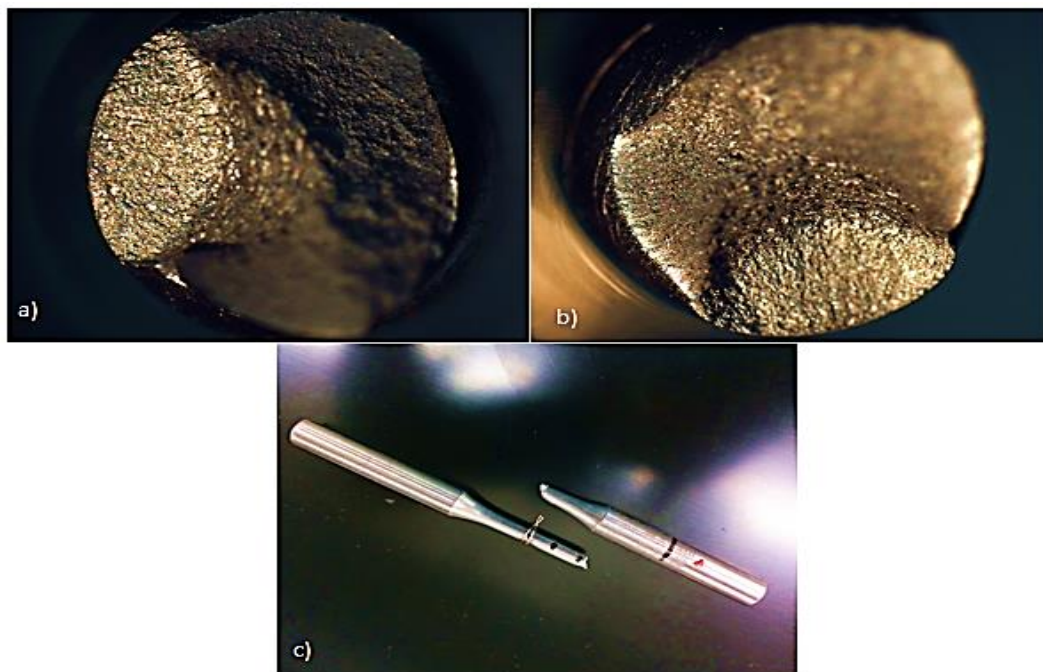


Fonte: Produção do próprio autor.

A partir das imagens microscópicas, foi possível observar que a trinca pode ter se iniciado no canto superior esquerdo da seção. A última figura mostra que neste caso, os termopares não tiveram influência na ruptura, uma vez que esta se dá longe da região de solda.

A Figura 15 apresenta o corpo de prova P91-025-02, que foi testado também sob um carregamento de 90%, apresentando 68727 ciclos antes da falha.

Figura 15: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-02 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-02 c) Ponto de fratura.

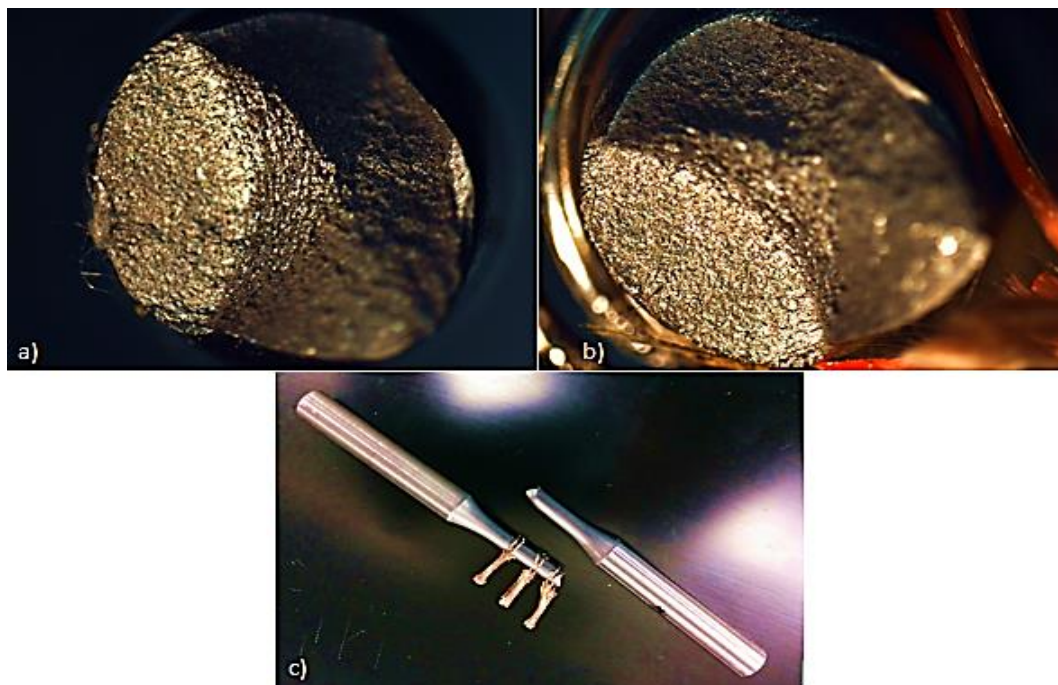


Fonte: Produção do próprio autor.

A partir da imagem ampliada, pode-se verificar que a falha ocorre de modo semelhante ao primeiro espécime, porém, com uma menor vida em fadiga. A terceira imagem mostra que a ruptura se deu mais próxima ao ponto de solda, mas a trinca ainda não teve início em um destes pontos.

A Figura 16 apresenta o espécime P91-025-03, testado sob um carregamento de 80% (10,71 kN), com uma vida em fadiga de 82303 ciclos antes de apresentar falha.

Figura 16: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-03 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-03; c) Ponto de fratura.

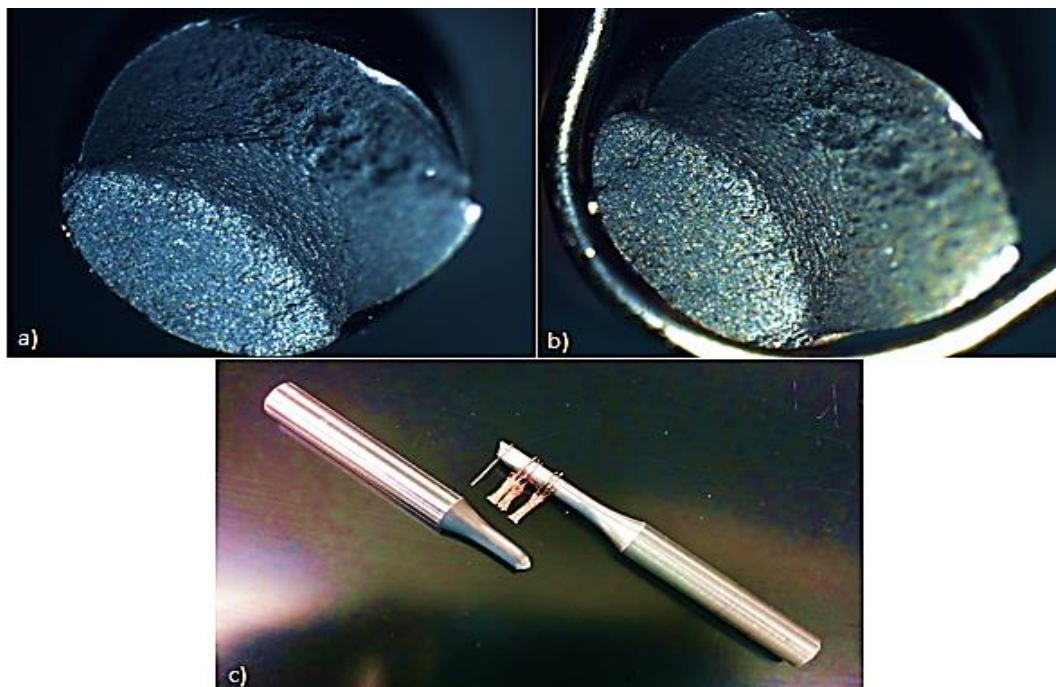


Fonte: Produção do próprio autor.

Com base na Figura 16, verifica-se que o tipo de fratura é ainda similar aos dois primeiros corpos de prova testados, mas desta vez a ruptura ocorreu exatamente em um dos pontos de solda do termopar.

A Figura 17 mostra o espécime P91-025-04, o segundo testado sob um carregamento de 80%, apresentando 90411 ciclos antes de ruptura.

Figura 17: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-04 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-04; c) Ponto de fratura.

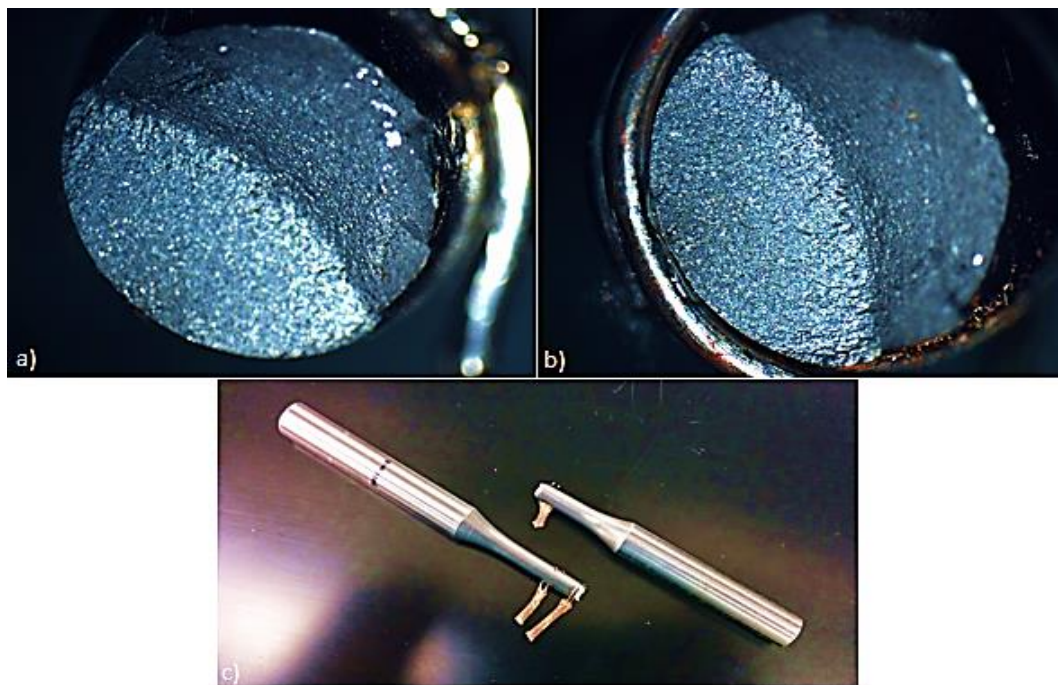


Fonte: Produção do próprio autor.

Com base nas imagens, pode-se observar que o quarto espécime apresentou o mesmo modo de falha do terceiro corpo de prova testado, rompendo-se novamente em um dos pontos de solda, comprovando a necessidade do presente estudo.

A Figura 18 mostra o espécime P91-025-05, o primeiro testado sob um carregamento de 70% (9.371 kN).

Figura 18: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-05 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-05; c) Ponto de fratura.

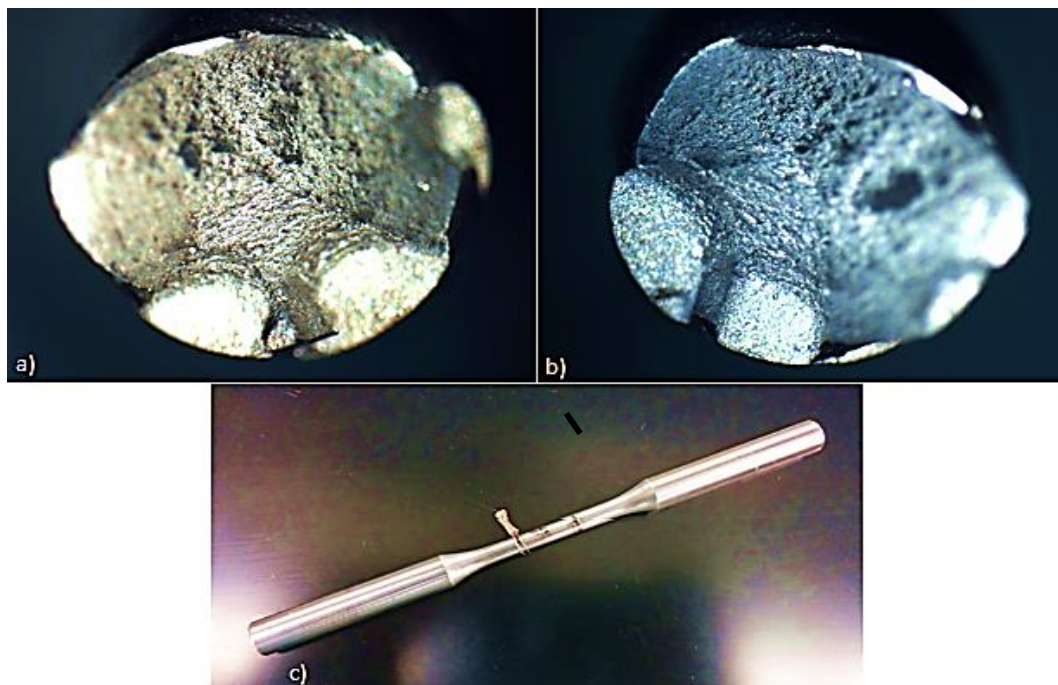


Fonte: Produção do próprio autor.

O espécime apresentou uma vida em fadiga muito maior, como era esperado, com mais de um milhão de ciclos. Entretanto, o teste foi mantido por mais tempo, e o espécime veio a apresentar falha em um dos pontos de solda, mais uma vez.

A Figura 19 mostra o corpo de prova P91-025-06, o segundo testado com termopares soldados sob um carregamento de 70% (9.371 kN).

Figura 19: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-06 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-06; c) Ponto de fratura.

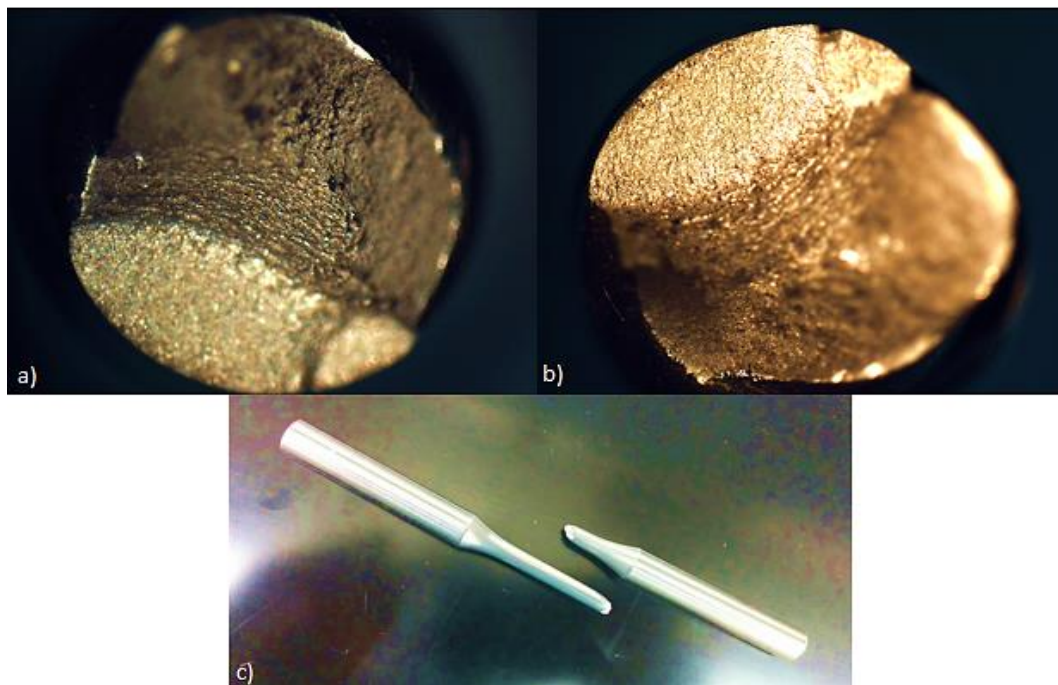


Fonte: Produção do próprio autor.

Novamente, o corpo de prova apresentou vida em fadiga infinita e não houve ruptura antes de um milhão de ciclos. A partir deste ponto, assumiu-se que espécimes sob um carregamento de 70%, ou menos, iriam apresentar vida em fadiga infinita. Desta forma, foi considerado que os corpos de prova P91-025-07 a P91-025-10 também apresentariam vida em fadiga infinita. Tiveram início os testes com corpos de prova sem termopares soldados junto à superfície, de forma a verificar se estes apresentariam maior vida em fadiga, como era esperado.

A Figura 20 apresenta o espécime P91-025-11, testado sob um carregamento de 90% (12.05 kN), suportando um ciclo de 121755 ciclos.

Figura 20: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-11 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-11; c) Ponto de fratura

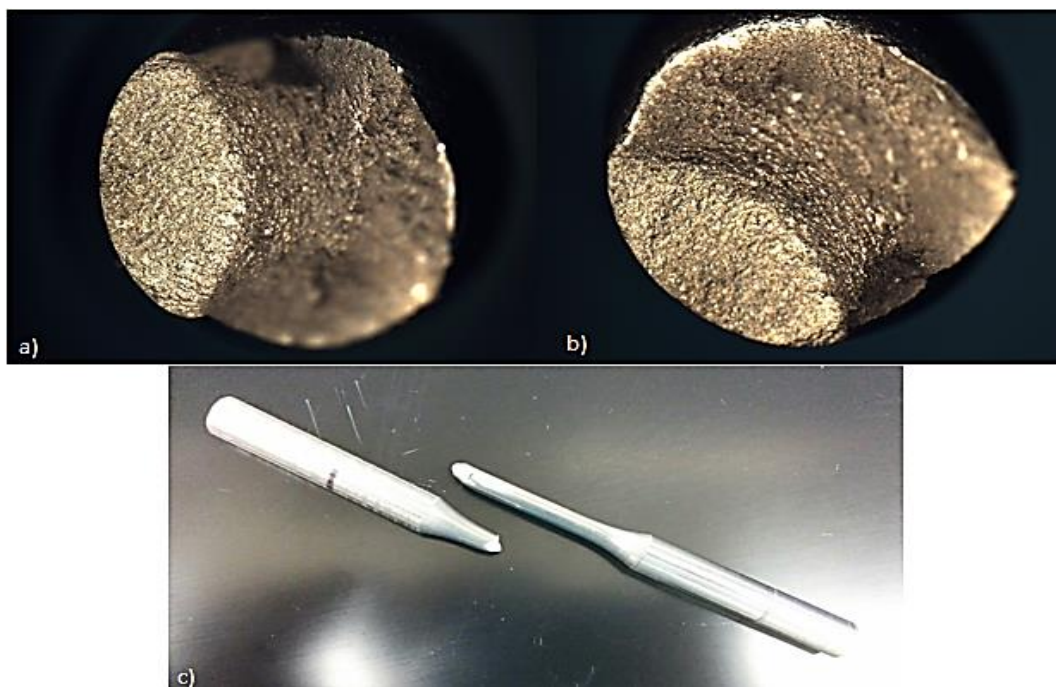


Fonte: Produção do próprio autor.

O espécime apresentou o mesmo padrão de fratura, porém foi capaz de suportar um maior número de ciclos antes da falha, em comparação aos dois espécimes com termopares soldados junto à superfície, e sob o mesmo carregamento.

A Figura 21 apresenta o espécime P91-025-12, o segundo corpo de prova testado sob um carregamento de 90% sem termopares soldados junto à superfície, apresentado 88476 ciclos antes da ruptura.

Figura 21: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-12 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-12; c) Ponto de fratura.

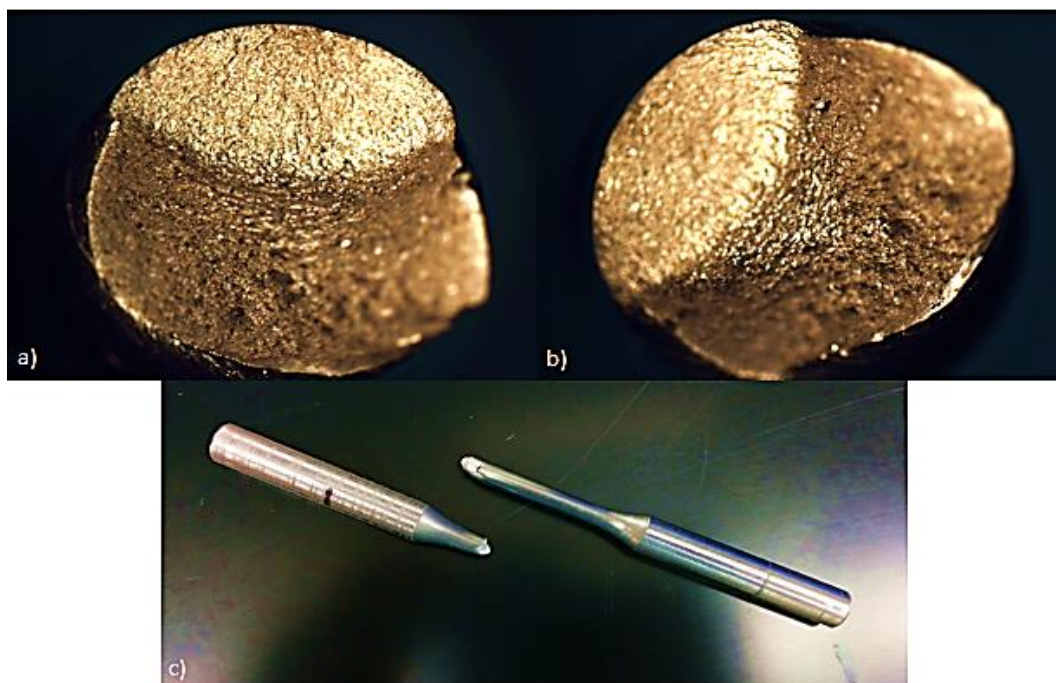


Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados para o presente corpo de prova foram muito semelhantes ao anterior, em termos de vida em fadiga, porém este veio a quebrar em uma região diferente do pescoço.

A Figura 22 mostra o espécime P91-025-13, testado sob um carregamento de 80% (10.71 kN), e que suportou 314301 ciclos antes da falha.

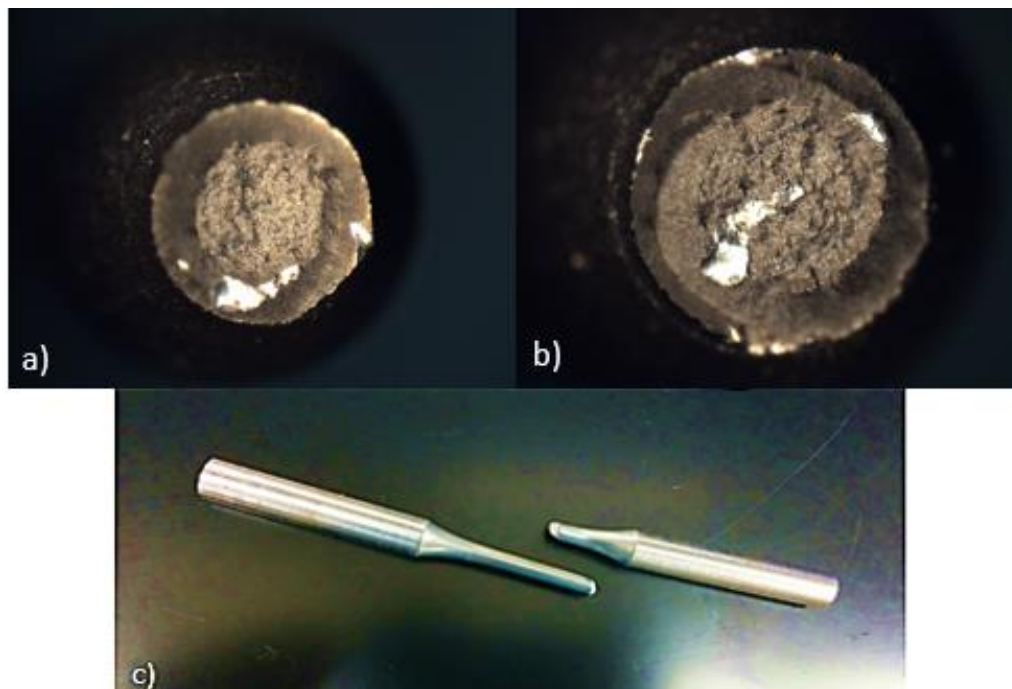
Figura 22: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. A) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-13 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-13; c) Ponto de fratura



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 23 mostra o espécime P91, também testado sob um carregamento de 80%, sem a presença de termopares soldados junto à superfície, e que apresentou uma vida em fadiga de 159997 ciclos.

Figura 23: Imagens dos corpos de prova após a ruptura. a) Seção de ruptura do corpo de prova P91-025-14 tirada do microscópio; b) Segunda metade fraturada do corpo de prova P91-025-14; c) Ponto de fratura.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os espécimes P91-025-15 e P91-025-16 apresentaram vida em fadiga infinita, com mais de um milhão de ciclos. Foi assumido que os outros espécimes com carregamento abaixo de 70% (9.371 kN), também apresentariam vida infinita.

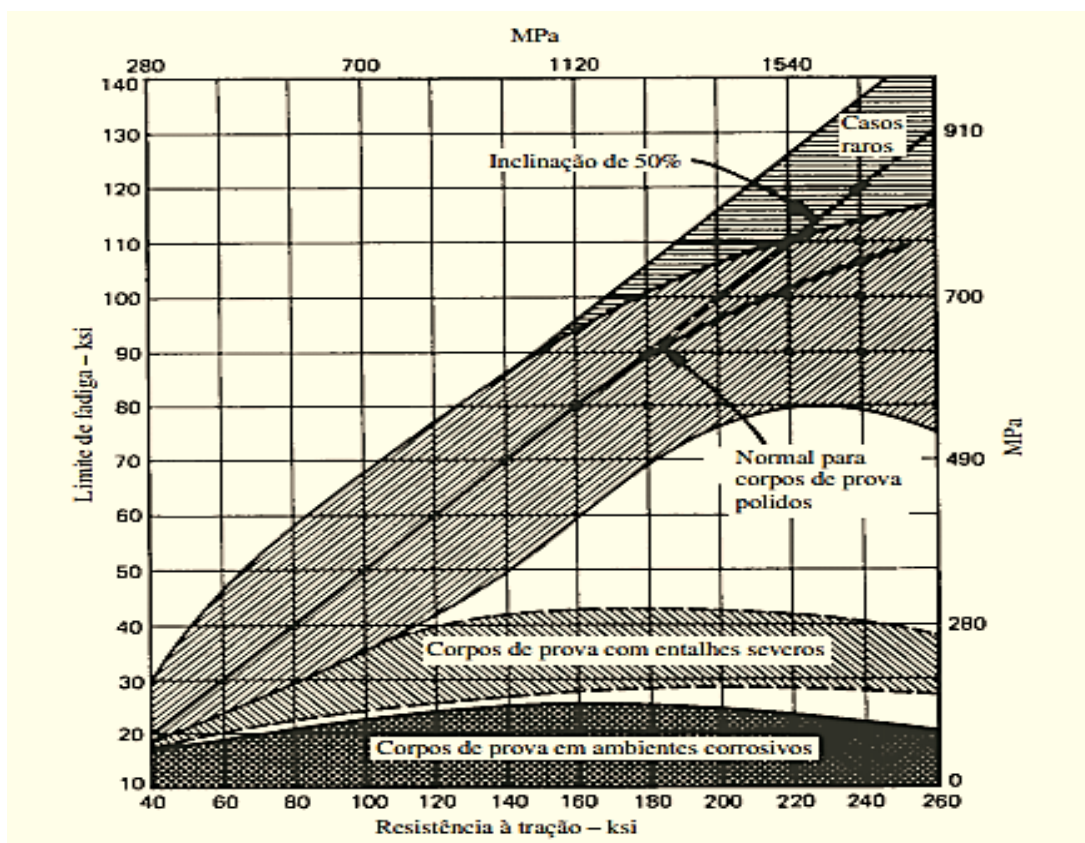
Um ponto de preocupação a partir destes resultados, justificando a necessidade deste estudo, está não apenas no fato de que os espécimes com termopares soldados junto à superfície apresentaram menor vida em fadiga para carregamentos de 90% e 80%, mas também por alguns espécimes virem a falhar justamente em um dos pontos de solda destes termopares.

O ocorrido pode ser explicado pelo conceito de Zona Termicamente Afetada (ZTA). Na região da solda, tem-se uma alteração de microestrutura do material, com redução das propriedades mecânicas, entre elas a ductilidade e a resistência à fadiga. Uma vez formada a ZTA, pode-se ter como consequência a mudança no valor de dureza, mudança no tamanho de grão, mudança na resistência mecânica do material, e possivelmente mudança de fases.

A solda pode também ocasionar a criação de um entalhe no corpo de prova, levando à redução da vida em fadiga devido ao efeito concentrador de tensões. Na região do entalhe, há uma redução da seção transversal, resultando em maiores tensões do que as que ocorrem em

uma peça não entalhada com as mesmas dimensões globais (NORTON, 2013). A Figura 24 apresenta a relação entre limite de fadiga e resistência à tração para corpos de prova de aço.

Figura 24: Relação entre limite de fadiga e resistência à tração para corpos de prova de aço.



Fonte: Norton (2013).

Com base na Figura 24, pode-se observar que a presença de entalhes afeta significativamente o limite de fadiga dos aços.

Pôde-se verificar que a solda de termopares afetou de forma significativa a vida em fadiga dos corpos de prova testados, e levou à rupturas prematuras exatamente na região de solda, seja pela mudança em microestrutura, a presença de um entalhe concentrador de tensões, ou a combinação dos dois fenômenos.

5 CONCLUSÃO

A partir deste estudo, foi possível atestar que a presença de termopares do tipo K soldados junto à superfície dos corpos de prova reduz a vida em fadiga dos espécimes, interferindo nos resultados em laboratório, que apresentam uma vida em fadiga menor em relação ao que realmente ocorre para o aço P-91. Para todos os corpos de prova testados sob um carregamento de 90% e 80%, os espécimes com termopares tiveram uma vida em fadiga menor comparados aos corpos de prova livres da presença de termopares. Desta forma, é importante ter muito cuidado e atenção durante a solda dos termopares nestes corpos de prova, e considerar a influência destes itens nos resultados extraídos. Conforme visto, estes resultados podem ocorrer devido à presença de dois fenômenos: efeito concentrador de tensões e mudança de microestrutura localizada do corpo de prova devido à solda, ou a combinação destes dois fenômenos.

REFERÊNCIAS

CHUVAS, Tatiane Campos. **Influência do tratamento térmico no comportamento mecânico e nas tensões residuais de juntas soldadas de aços Cr-Mo.** 2015. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

ELÉTRICA, Mundo. O que é um termopar. **Mundo Elétrica.** [Online]. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-um-termopar>>. Acesso em: 05 ago. 2019.

LARSSON, Jonas. Evaluation of current methods for creep analysis and impression creep testing of power plant steels. **Master of Science Thesis in Material Science and Engineering - KTH** - Royal Institute of Technology. 2012. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:605630/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2019.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas:** uma abordagem integrada. Porto Alegre : Bookman, 2013.

SEBASTIANY, Yvens dos Santos e Barkey, Mark E. **Isothermal fatigue characterization of P91 steel under load control.** 2015. 19 f. Relatório (Apresentação de resultados de pesquisa). Department of Aerospace Engineering and Mechanics, University of Alabama. Tuscaloosa, 2015.

SHIGLEY, J. E. **Mechanical engineering design.** New York: McGraw-Hill, 2007.