

### 3 Material e Procedimento Experimental

#### 3.1

##### Material

O material adotado neste trabalho foi um aço estrutural de alta resistência mecânica e baixa liga, classificado pela IACS (*International Association of Classification Societies*) [21] como aço R4 e de larga utilização na fabricação de elos e acessórios para sistemas de ancoragem de plataformas do tipo *offshore*. Os elos são conformados a quente e soldados por caldeamento. A composição química do referido aço é apresentada, na tabela 3.1.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
% em Peso	0,212	1,12	0,266	0,019	0,010	1,07	0,697	0,224

Tabela 3.1 – Composição química característica do aço estrutural grau R4.

#### 3.2

##### Posição de retirada e geometria dos corpos de prova.

Corpos de prova para ensaios mecânicos e de tenacidade foram retirados das seções retas opostas à região de caldeamento dos elos, ou seja, do material de base conforme ilustrado na figura 3.1.

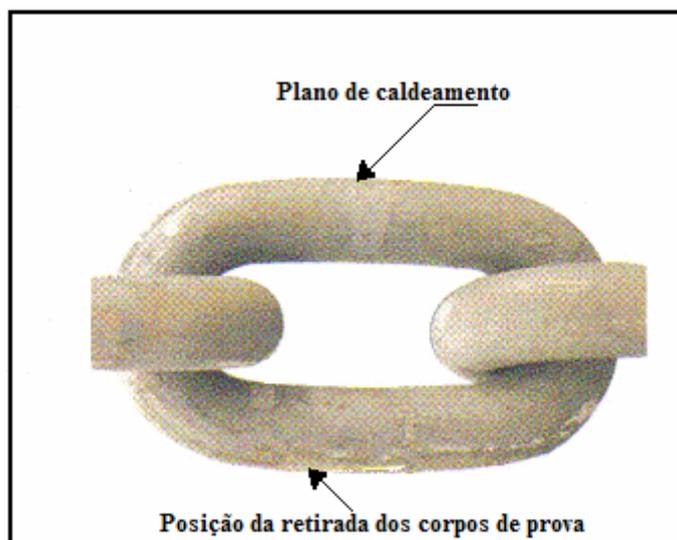


Figura 3.1 – Posição de retirada dos corpos de prova para o ensaio de tração e CTOD.

### 3.2.1 Corpo de prova para o ensaio de tração

Corpos de prova tipo cilíndricos foram retirados, com seu eixo, seguindo a orientação longitudinal das barras, sentido de laminação das mesmas, como apresentado na figura 3.2.

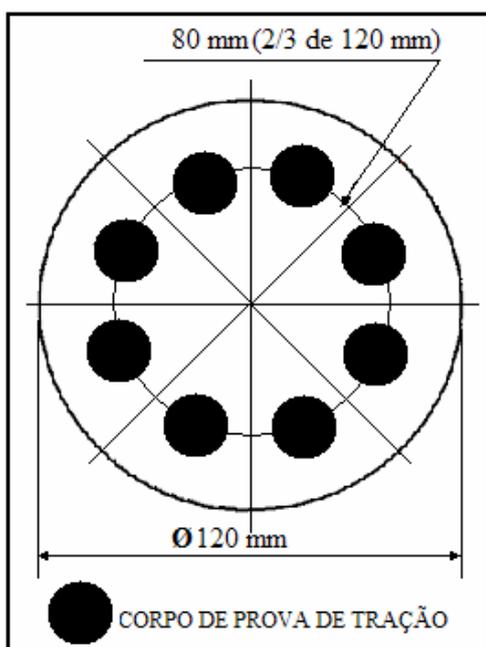


Figura 3.2 – Posição de retirada dos corpos de prova para o ensaio de tração.

Os corpos de prova foram retirados segundo um diâmetro equivalente a  $2/3$  do diâmetro dos elos, segundo as especificações das sociedades classificadoras IACS [21]. A figura 3 apresenta as dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração seguindo a norma ASTM E 8M – 04 [22].

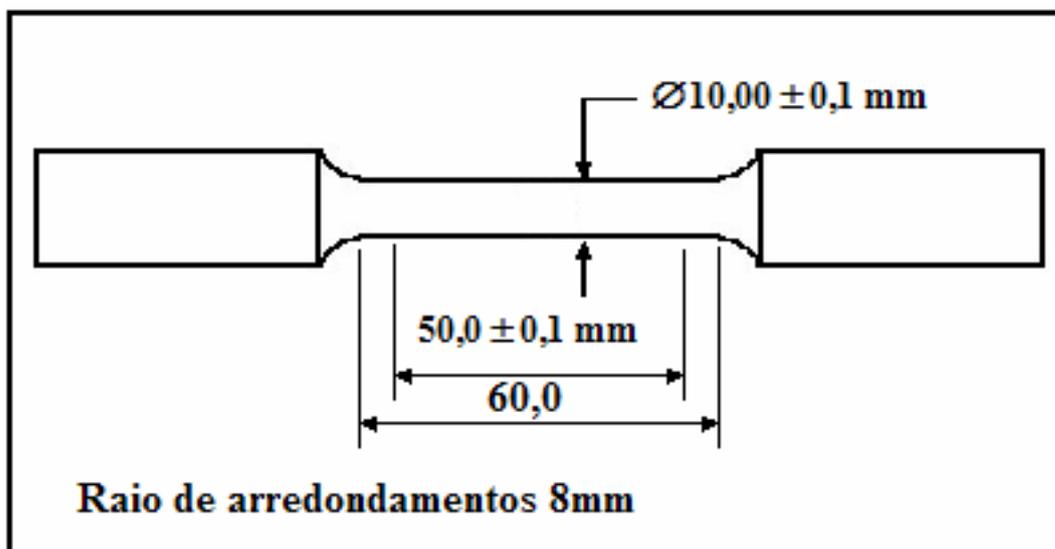


Figura 3.3 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração. [22]

### 3.2.2

#### Corpo de prova para o ensaio de CTOD

Corpos de prova tipo CT foram retirados das barras seguindo a orientação L-R. A direção de carregamento, do corpo de prova, coincidiu com a direção de laminação das barras [L], a direção de propagação das trincas coincidiu com a direção radial das barras [R], enquanto que o sentido de propagação da trinca foi de dentro para fora da barra para minimizar os efeitos de segregação, conforme ilustrado na figura 3.4.

A usinagem dos corpos de prova foi realizada em conformidade com a norma ASTM E 1820-05a [23], adotando-se a largura ( $W$ ), espessura ( $B$ ) e profundidade do entalhe mecânico ( $M$ ) equivalentes a 32 mm, 8 mm e 7 mm, respectivamente. A figura 3.5 apresenta a geometria adotada na preparação dos corpos de prova do tipo CT.

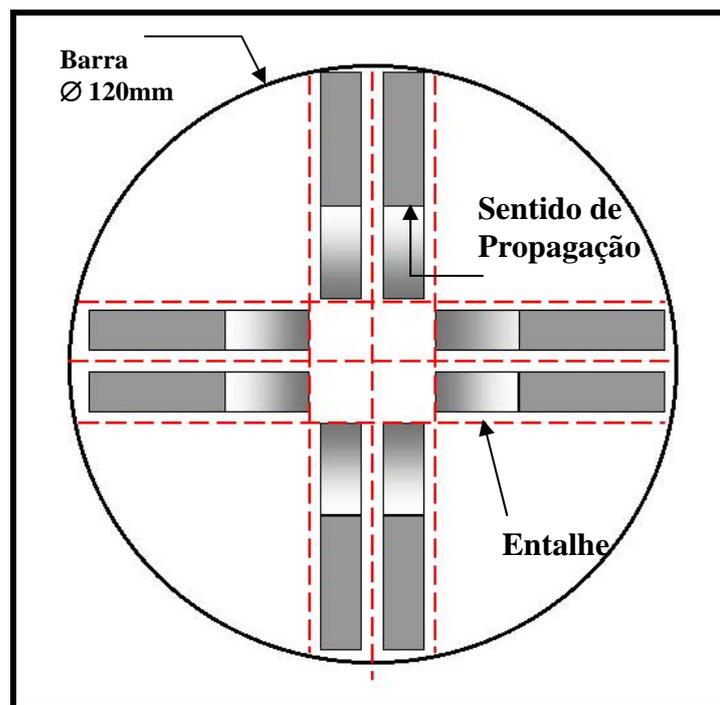


Figura 3.4 - Posição de retirada dos corpos de prova do tipo CT.

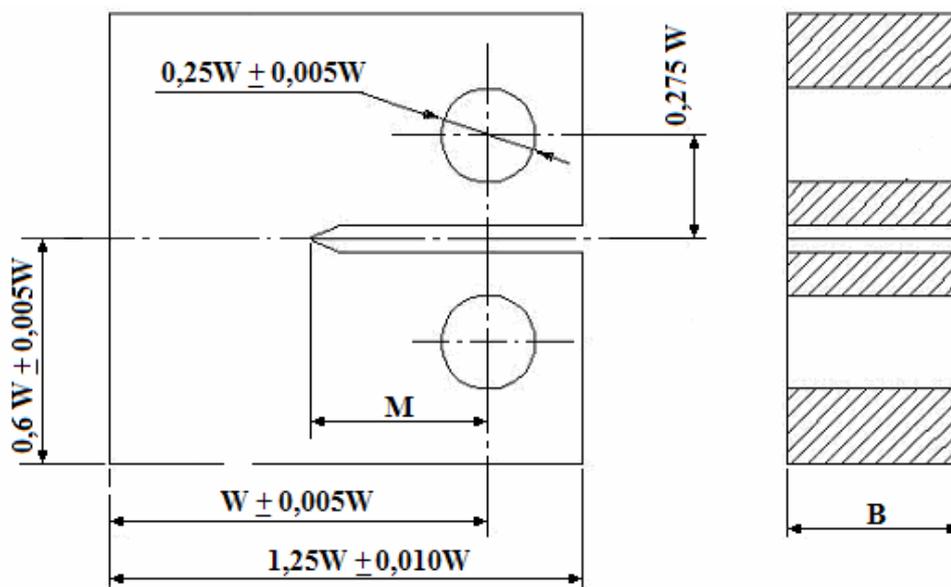


Figura 3.5 - Geometria do corpo de prova do tipo CT.

### 3.3

#### Tratamentos térmicos

Após a usinagem, os corpos de prova de tração e de CTOD foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos de têmpera e revenido, com o objetivo de promover variações nas microestruturas que influenciassem na tenacidade do material.

Em uma primeira etapa, para variações na temperatura de austenitização, partiu-se de 860°C com incrementos de 20°C até se atingir a temperatura de 940°C. Adotou-se uma temperatura de revenido de 680°C. A tabela 3.2 resume as condições de têmpera e revenido selecionadas para esta fase do trabalho. Todos os resfriamentos foram realizados em água.

Condição	Têmpera		Revenido	
	T	t	T	t
	°C	(min)	°C	(min)
01	860	60	680	60
02	880	60	680	60
03	900	60	680	60
04	920	60	680	60
05	940	60	680	60

Tabela3. 2 – Parâmetros de tratamentos térmicos adotados na primeira etapa.

Na segunda etapa, foi fixada a temperatura de austenitização em 900°C em função do maior valor de CTOD apresentado (vide tabela 4.15). Para a temperatura de revenido, partiu-se de 650°C, com incrementos de 10°C até se atingir a temperatura de 700°C. A Tabela 3.3 resume as condições de têmpera e

revenido selecionadas para esta fase do trabalho. Todos os resfriamentos foram realizados em água.

Condição	Têmpera		Revenido	
	T	t	T	t
	°C	(min)	°C	(min)
06	900	60	650	60
07	900	60	660	60
08	900	60	670	60
09	900	60	680	60
10	900	60	690	60
11	900	60	700	60

Tabela 3.3 - Parâmetros de tratamentos térmicos adotados na segunda etapa.

### 3.4

#### Ensaio de tração

Após os tratamentos térmicos, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, para ser avaliada sua influência nas variações das propriedades mecânicas do aço estrutural R4. Ensaíram-se três corpos de prova em cada condição, num total de quinze ensaios, numa máquina servo-hidráulica da marca MTS, com célula de carga de 60.000 kN, velocidade de deslocamento de 6,00 mm/min e temperatura de 22°C de acordo com a norma ASTM E 8M- 04 [22]. Os ensaios foram realizados de maneira a se determinar o limite de escoamento, o limite de resistência mecânica, a deformação na fratura e a redução de área do material.

### 3.5

#### Ensaio de resistência à fratura

##### 3.5.1

##### Pré-trincamento

Após os tratamentos térmicos, os corpos de prova do tipo CT sofreram lixamento e polimento em uma das superfícies laterais, a fim de facilitar o acompanhamento visual da nucleação e propagação de uma pré-trinca de fadiga com o uso de uma lupa. O pré-trincamento dos corpos de prova tem como objetivo induzir um estado de tensões mais severo do que aquele causado somente pelo entalhe mecânico.

Os corpos de prova foram trincados até uma razão  $a_0/W$  equivalente a 0,45, onde  $a_0$  e  $W$  significam o comprimento do defeito (entalhe mecânico mais pré-trinca de fadiga) no início do ensaio e a largura do corpo de prova, respectivamente. Desta maneira, estipulou-se um comprimento da pré-trinca de fadiga igual a 7,4 mm. A figura 3.6 apresenta a marcação do comprimento da pré-trinca de fadiga, no corpo de prova.

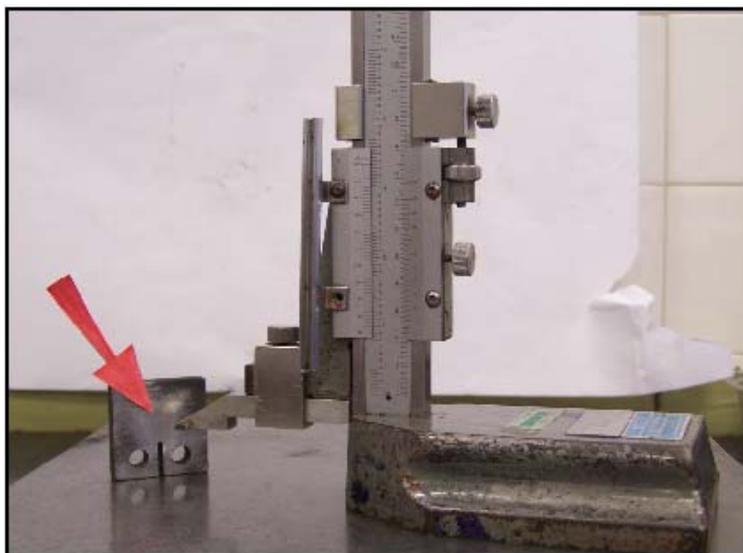


Figura 3.6.- Marcação do comprimento da pré-trinca de fadiga.

A força máxima de fadiga foi determinada pela equação abaixo conforme norma ASTM E 1290-02 [08] :

$$P_{\text{máx}} = (0,4 B b_o^2 LE) / (2W + a_0)$$

onde, B,  $b_o$  representam a espessura e o ligamento ( $W - a_0$ ) do corpo de prova, respectivamente, enquanto que LE significa o limite de escoamento do material. Como o limite de escoamento dos corpos de prova foi função da condição de tratamento térmico adotada (vide Tabela 3.2 e 3.3), a força máxima de fadiga calculada pela equação anterior não foi idêntica para todos os corpos de prova. A tabela 3.4 apresenta os valores de  $P_{\text{máx}}$  para cada grupo de corpos de prova.

Condição	$P_{\text{máx}}$ (kN)
01	10,4
02	11,6
04	11,9
05	9,9
06	10,4
07	9,8
08	10,2
09	10,3
10	9,9
11	9,8

Tabela 3.4 – Valores das forças máximas de fadiga.

O pré-trincamento dos corpos de prova foi realizado na temperatura ambiente, utilizando-se uma máquina servo-hidráulica marca MTS modelo 810, figura 3.7, com célula de carga de 100 kN e operando na frequência de 20Hz.



Figura 3.7- Máquina servo-hidráulica MTS.

O carregamento dos corpos de prova foi no modo I, e foi adotada uma razão entre a força máxima e mínima equivalente a 0,1. A figura 3.8 apresenta o corpo de prova, montado no dispositivo construído para realização do pré-trincamento.



Figura 3.8- Pré-trincamento do corpo de prova.

### 3.5.2

#### Ensaio de CTOD

O equipamento de ensaio CTOD foi o mesmo utilizado para o pré-trincamento dos corpos de prova. Os ensaios foram realizados segundo a norma ASTM E 1290-02 [08], na temperatura ambiente e um dispositivo do tipo extensômetro de fratura foi fixado na extremidade do entalhe mecânico do corpo de prova, como mostra a Figura 3.9. O carregamento dos corpos de prova foi do tipo I utilizando-se uma velocidade constante de deslocamento das garras da máquina de 0,5 mm/min. Os ensaios ocorreram até o início da estabilização da carga, caracterizando um CTOD do tipo carga máxima. Ao final de cada ensaio foram plotados gráficos carga versus abertura do extensômetro de fratura, Figura 3.10. Em cada condição microestrutural foram ensaiados três corpos de prova, num total de trinta e três ensaios.



Figura 3.9- Extensômetro de fratura.

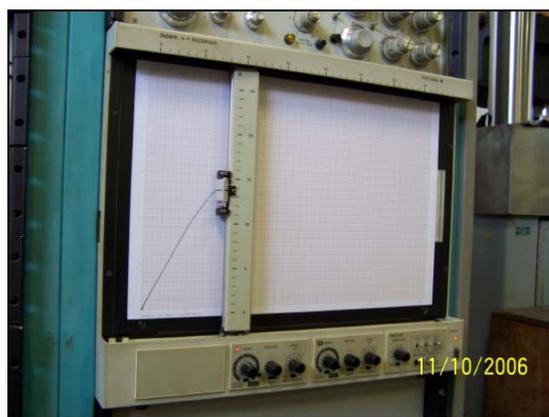


Figura 3.10 – Gráfico Vg x P

### 3.5.3

#### Medição das trincas após o ensaios de CTOD

Após os ensaios de CTOD, as pré-trincas de fadiga e a região de propagação estável de trinca foram coloridas por oxidação, com o objetivo de facilitar sua visualização. Assim, os corpos de prova foram deixados por uma hora dentro de um forno elétrico na temperatura de 300°C. Ao final da etapa de oxidação, esses corpos de prova foram imersos em nitrogênio líquido por uma hora e fraturados em seguida, para permitir a medição das trincas ao longo da espessura da amostra.

As medições do comprimento real da pré-trinca de fadiga,  $a$ , e da sua extensão estável durante o carregamento do corpo de prova no ensaio de CTOD,  $\Delta a$ , foram realizadas em diferentes posições conforme norma ASTM E 1290-02 [08] , a figura 3.11 apresenta as posições de medidas. A equação abaixo é utilizada para o cálculo do valor de  $a$ .

$$a = (a_{19} + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8) / 8$$

$$a_{19} = (a_1 + a_9) / 2$$

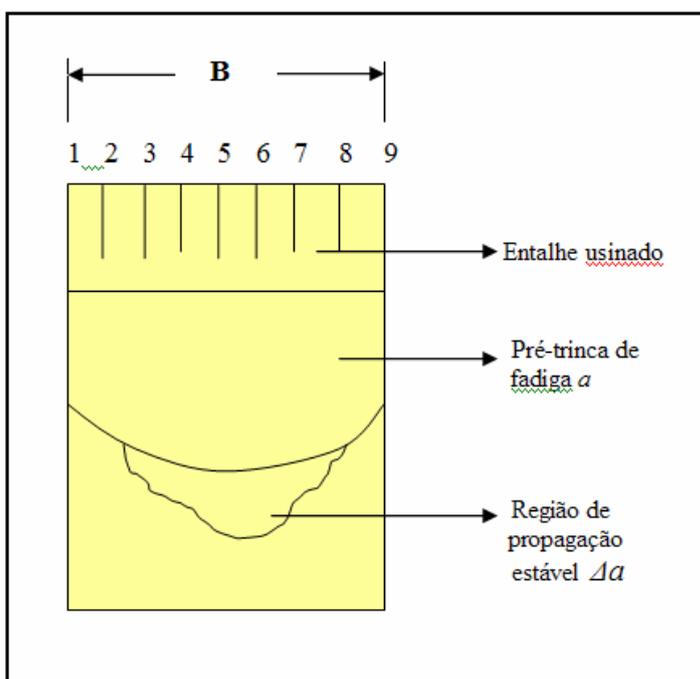


Figura 3.11.- Medição da trinca de fadiga e de sua extensão estável.

Para a medição dos valores da pré-trinca de fadiga e do comprimento da propagação estável da trinca, utilizou-se uma fotografia ampliada da região, capturada por uma máquina fotográfica digital apropriada para registro de ensaios visuais. A figura 3.12 apresenta a foto de um dos corpos de prova.



Figura 3.12- Foto do corpo de prova faturado.

### 3.6

#### Caracterização microestrutural

Amostras do aço estrutural R4, após os diferentes tratamentos térmicos, foram retiradas dos corpos de prova de tração e preparadas metalograficamente. Para esta análise, as amostras foram embutidas, lixadas por via úmida na seqüência 220, 320, 400, 600 e 1200, polidas com pasta de diamante e atacadas quimicamente com o reagente Nital 2%. Após preparação e ataque, analisou-se as amostra por microscopia ótica (MO) em microscópio Zeiss.

### 3.7

#### Fractografia

Com o objetivo de se determinar o micromecanismo de propagação de trinca atuante durante o carregamento dos corpos de prova nos ensaios de CTOD, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura, MEV. A análise da região de fratura ocorreu em microscópio marca Zeiss modelo DSM 960.

### 3.8

#### Microdureza

Amostras do aço estrutural R4, após os diferentes tratamentos térmicos, foram retiradas dos corpos de prova de tração para determinação de microdureza Vickers do material, foram ensaiadas num microdurômetro marca Shimadzu-2000 figura 3.13, aplicou-se uma carga de 100 gramas durante 30 segundos. Cada amostra foi medida aleatoriamente em cinco pontos conforme norma ASTM E 384- 05a [24].



Figura 3.13- Microdurômetro Shimadzu-2000.