#### 4 Apresentação e discussão dos resultados

#### 4.1 Resultados da primeira etapa

São apresentados a seguir os resultados obtidos na primeira fase do trabalho, onde foram variadas as temperaturas de austenitização e a de revenido foi fixada em 680°C.

#### 4.1.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas apresentadas na tabela 4.1 representam o resultado obtido nos ensaios de tração do aço estrutural grau R4. Os valores apresentados correspondem a corpos de prova temperados à partir da condição 01 (temperatura de austenitização 860 °C) até a condição 05 (temperatura de austenitização 940 °C) sendo todos revenidos à 680 °C. A tabela apresenta os valores do limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), deformação na fratura (ɛ) e redução de área (RA).

A deformação na fratura foi calculada tendo como referência de medida um comprimento de cinco vezes o diâmetro do corpo de prova (50,0 mm) conforme a norma ASTM E 8M – 04 [22]. A tabela 4.1 apresenta os valores obtidos nos ensaios, para cada condição, com suas respectivas médias e desvios padrões.

Condição	СР	LE (MPa)	LR (MPa)	£ (%)	RA (%)
	1	765,0	882,0	18,90	72,16
01	2	787,0	901,0	18,70	72,34
	3	775,0	891,0	18,80	72,26
	média	775,7±11,0	891,3±9,5	18,80±0,10	72,25±0,09
	1	777,0	914,0	19,40	72,94
02	2	803,0	918,0	19,10	72,96
	3	757,0	884,0	19,60	71,91
	média	779,0±23,1	905,3±18,6	19,37±0,25	72,60±0,60
	1	860,0	984,0	19,56	72,23
03	2	869,0	982,0	19,35	72,93
	3	877,0	979,0	19,23	73,86
	média	868,7±8,5	981,7±2,5	19,38±0,17	73,01±0,82
	1	890,0	1012,0	20,20	73,44
04	2	882,0	1016,0	20,20	73,46
	3	870,0	1020,0	20,20	73,46
	média	880,7±10,1	1016,0±4,0	20,20±0,00	73,45±0,01
	1	896,0	1034,0	20,70	73,90
05	2	880,0	1025,0	20,60	73,68
	3	886,0	1030,0	20,64	73,80
	média	887,3±8,1	1029,7±8,5	20,65±0,05	73,79±0,11

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração, primeira etapa.

Segundo as recomendações de fabricação dos elos para ancoragem de sistemas offshore [21,25], as propriedades mecânicas dos aços Grau R4, devem apresentar valores mínimos para o limite de escoamento (580 MPa), limite de resistência (860 MPa), deformação na fratura (12%) e redução de área (50%). Os valores apresentados na tabela 4.1 atendem plenamente as exigências para todas as condições de tratamentos térmicos.

Ainda segundo as especificações para fabricação de elos para amarras de sistemas offshore [21,25] a razão (R) entre o limite de escoamento e o limite de resistência deve ter um valor máximo de 0,92. A tabela 4.2 apresenta os valores para as cinco condições de tratamentos térmicos realizadas. Analisando os valores apresentados na tabela verifica-se que em todos os casos o valor máximo da razão "R" foi atendido.

58

Condição	(LE/LR) R
01	0,87
02	0,86
03	0,88
04	0,87
05	0,86

Tabela 4.2 – Valores de R de acordo com o tratamento térmico, primeira etapa.

Ao analisar a tabela 4.1, verifica-se um aumento progressivo, a partir da condição 01 até a condição 05, nos valores médios dos limites de escoamento (10%) e de resistência (15%). Tais propriedades aumentaram com o aumento da temperatura de austenitização. Uma possível causa é o aumento da temperabilidade do aço, que aumenta com o tamanho do grão da austenita, que será tanto maior quanto for a temperatura de austenitização.

Durante o resfriamento, o tamanho dos grãos da austenita influencia diretamente na formação da ferrita e da bainita [19]. Estes componentes microestruturais nucleiam nos contornos dos grãos da austenita, portanto, o aumento do grão da austenita diminui o número de sítios de nucleação, favorecendo a formação de martensita, resultando em um aumento das propriedades mecânicas.

#### 4.1.2 Ensaio CTOD

A seguir são apresentados os gráficos que representam o comportamento da força "P" versus deslocamento do extensômetro "Vg" obtidos nos ensaios de CTOD realizados segundo as normas ASTM [08].

Os gráficos abaixo correspondem as amostras das condições 01 a 05. As figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 representam os corpos de prova para cada condição.



Figura 4.1-Gráfico PxVg condição 01 CP1

Figura 4.2-Gráfico PxVg condição 02 CP1



Figura 4.3-Gráfico PxVg condição 03 CP1

Figura 4.4-Gráfico PxVg condição 04 CP1



Figura 4.5-Gráfico PxVg condição 05 CP1

Para determinação dos valores do CTOD, adotou-se a equação (2.16) constante na norma ASTM [08], enquanto que o fator de intensidade de tensão (K) foi calculado de acordo com a equação 4.1 [08]. A função intensidade de tensão (Y) foi fornecida pela norma ASTM [08]. Para os valores do coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade foi utilizado 0,29 e 210 GPa, respectivamente. O valor do limite de escoamento adotado no cálculo do CTOD foi aquele relativo ao valor médio de cada condição microestrutural. O parâmetro z foi admitido como sendo zero uma vez que o extensômetro de fratura foi localizado no final do entalhe mecânico.

$$\delta = \frac{K^2 (1 - \nu^2)}{2E LE} + \frac{0.44(W - a)V_p}{0.44W + 0.56a + Z}$$
(2.16)

$$K = \frac{PY}{B\sqrt{W}} \tag{4.1}$$

onde:

K = fator de intensidade de tensões;

P = força máxima em cada ensaio;

B = espessura do corpo de prova; (8 mm)

W = largura do corpo de prova; (32 mm)

a = comprimento real da pré-trinca de fadiga;

Y [f(a/W)] = função da intensidade de tensão, retirado da norma;[08]

v = coeficiente de Poisson; (0,29) [01]

 $E = m \acute{o} du lo de elasticidade; (210 GPa) [01]$ 

LE = limite de escoamento (média dos valores para cada condição de tratamento térmico);

 $V_P$  = componente plástico do deslocamento  $V_g$ ;

z = Distância da face do corpo de prova ao apoio do extensômetro de fratura; (0,00 mm)

A primeira parcela apresentada da equação 2.16 representa a parte elástica do CTOD ( $\delta_e$ ). Esta parcela é função da carga máxima obtida no ensaio (P), da geometria do corpo de prova (B e W), das dimensões do defeito (*a*) e das propriedades mecânicas do material (E, LE e v). As Tabelas 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, apresentam os valores de  $\delta_e$ , obtidos para as varias condições de tratamentos térmicos.

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	$K (MPa (m)^{1/2})$	$\delta_e(mm)$
1	15,8	0,494	9,483	22,318	147,887	0,063
2	14,6	0,456	8,482	20,356	120,648	0,041
3	15,5	0,484	9,202	19,130	123,004	0,043

Tabela 4.3 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 01

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	$K (MPa (m)^{1/2})$	$\delta_e(mm)$
1	15,0	0,469	8,805	23,299	143,350	0,058
2	15,3	0,478	9,040	23,299	147,174	0,059
3	15,6	0,488	9,313	19,007	123,690	0,045

Tabela 4.4 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 02

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	$K (MPa (m)^{1/2})$	$\delta_e(mm)$
1	15,3	0,478	9,040	19,988	126,261	0,041
2	14,7	0,459	8,555	18,149	108,492	0,030
3	16,0	0,500	9,659	23,544	158,909	0,063

Tabela 4.5 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 03

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	K (MPa $(m)^{1/2}$ )	$\delta_e(mm)$
1	15,5	0,484	9,202	17,658	113,543	0,032
2	14,9	0,466	8,729	18,394	112,194	0,031
3	15,0	0,496	8,805	17,168	105,626	0,028

Tabela 4.6 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 04

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	K (MPa $(m)^{1/2}$ )	$\delta_e(mm)$
1	15,9	0,497	9,571	15,941	106,614	0,028
2	14,5	0,453	8,410	17,781	104,491	0,027
3	15,5	0,484	9,202	14,715	94,619	0,022

Tabela 4.7 - Valores da parte elástica do CTOD para a condição 05

A segunda parcela apresentada da equação 2.16 representa a parte plástica do CTOD ( $\delta_p$ ). Esta parcela é função do ligamento do corpo de prova (W- *a*), e do deslocamento do extensômetro "Vg". As Tabelas 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, apresentam os valores de  $\delta_p$ , obtidos para as varias condições de tratamentos térmicos.

СР	<i>a</i> (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p}$ (mm)
1	15,8	16,2	1,27	0,395
2	14,6	17,4	1,35	0,464
3	15,5	16,5	1,36	0,433

Tabela 4.8 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 01

СР	a (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p}$ (mm)
1	15,0	17,0	1,34	0,445
2	15,3	16,7	1,35	0,437
3	15,6	16,4	1,52	0,481

Tabela 4.9 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 02

СР	<i>a</i> (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p}$ (mm)
1	15,3	16,7	1,50	0,487
2	14,7	17,3	1,53	0,522
3	16,0	16.0	1,47	0,449

Tabela 4.10 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 03

СР	a (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p} (mm)$
1	15,5	16,5	1,68	0,523
2	14,9	17,1	1,44	0,483
3	15,0	17,0	1,52	0,506

Tabela 4.11 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 04

СР	<i>a</i> (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_p (mm)$
1	15,9	16,1	1,66	0,511
2	14,5	17,5	1,44	0,500
3	15,5	16,5	1,58	0,504

Tabela 4.12 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 05

As Tabelas 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, apresentam os valores de CTOD de carga máxima e da propagação estável da trinca ( $\Delta a$ ), obtidos nos ensaios, para as várias condições de tratamentos térmicos da primeira etapa. São apresentados também os valores médios seguidos dos seus respectivos desvios padrões.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
1	0,063	0,395	0,458	0,7
2	0,041	0,464	0,505	1,1
3	0,043	0,433	0,476	1,0
média	0,049±0,012	0,431±0,035	0,480±0,024	0,9±0,2

Tabela 4.13 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 01.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_{p}$ (mm)	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
1	0,058	0,445	0,503	1,7
2	0,059	0,437	0,496	2,3
3	0,045	0,481	0,526	1,6
média	0,054±0,008	0,454±0,023	0,508±0,016	1,9±0,4

Tabela 4.14 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 02.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
1	0,041	0,487	0,528	2,0
2	0,030	0,522	0,552	1,7
3	0,063	0,449	0,512	1,8
média	0,045±0,017	0,486±0,037	0,531±0,020	1,8±0,2

Tabela 4.15 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 03.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
1	0,032	0,523	0,555	1,8
2	0,031	0,483	0,514	1,4
3	0,028	0,506	0,534	1,9
média	0,030±0,002	0,504±0,020	0,534±0,021	1,7±0,3

Tabela 4.16 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 04.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	$\delta(mm)$	$\Delta a (\mathrm{mm})$
1	0,028	0,511	0,539	1,1
2	0,027	0,500	0,527	1,3
3	0,022	0,504	0,526	1,2
média	0,026±0,003	0,505±0,006	0,531±0,007	1,2±0,1

Tabela 4.17 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 05.

A Tabela, 4.18, apresenta um resumo dos valores de CTOD e da propagação estável da trinca ( $\Delta a$ ), obtidos para as varias condições de tratamentos térmicos usados nesta etapa. São apresentados os valores médios seguidos dos respectivos desvios padrões.

Condição	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
01	0,480±0,024	0,9±0,2
02	0,508±0,016	1,9±0,4
03	0,531±0,020	1,8±0,2
04	0,534±0,021	1,7±0,3
05	0,531±0,007	1,2±0,1

Tabela 4.18 – Resumo dos valores médios de CTOD e  $\Delta a$  para as condições 01 à 05.

## 4.1.3 Caracterização microestrutural

A presença dos elementos de liga retardam a formação da ferrita e perlita, deslocando a formação da bainita para temperaturas menores, o molibdênio separa a formação da bainita com a martensita, possibilitando a obtenção de bainita no resfriamento contínuo. A presença de bainita promove nestes aços uma melhor combinação de resistência mecânica e ductilidade[01].

Pode-se observar, com o aumento da temperatura de austenitização, que a estrutura apresenta um aumento dos grãos da austenita prévia, bem como um aumento da heterogeneidade da distribuição dos tamanhos dos grãos. Nota-se a formação de uma estrutura de ripas que vão aumentando a sua espessura com o aumento da temperatura de austenitização.

As figuras apresentadas a seguir são similares às figuras 2.14 e 2.15 que apresenta aços contendo bainita.[20]

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 01 (temperatura de austenitização 860°C e revenido 680°C).



Figura 4.6 - Amostra condição 01 Microscopia Ótica aumento 100x



Figura 4.7 - Amostra condição 01 Microscopia Ótica aumento 200x



Figura 4. 8 - Amostra condição 01 Microscopia Ótica aumento 500x

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 02 (temperatura de austenitização 880°C e revenido 680°C).



Figura 4.9 - Amostra condição 02 Microscopia Ótica aumento 100x



Figura 4.10 - Amostra condição 02 Microscopia Ótica aumento 200x



Figura 4. 11 - Amostra condição 02 Microscopia Ótica aumento 500x

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 03 (temperatura de austenitização 900°C e revenido 680°C).



Figura 4.12- Amostra condição 03 Microscopia Ótica aumento 100x



Figura 4.13- Amostra condição 03 Microscopia Ótica aumento 200x



Figura 4.14- Amostra condição 03 Microscopia Ótica aumento 500x

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 04 (temperatura de austenitização 920°C e revenido 680°C).



Figura 4. 15- Amostra condição 04 Microscopia Ótica aumento 100x



Figura 4.16- Amostra condição 04 Microscopia Ótica aumento 200x



Figura 4.17- Amostra condição 04 Microscopia Ótica aumento 500x

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 05 (temperatura de austenitização 940°C e revenido 680°C).



Figura 4.18- Amostra condição 05 Microscopia Ótica aumento 100x



Figura 4.19- Amostra condição 05 Microscopia Ótica aumento 200x



Figura 4.20- Amostra condição 05 Microscopia Ótica aumento 500x

#### 4.1.4 Microdureza

As tabelas 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 correspondem a valores de microdureza Vickers obtidos nos corpos de prova temperados a partir da condição 01 até a condição 05. As tabelas apresentam os valores obtidos nos ensaios, com suas respectivas médias e desvios padrões. Os valores foram aumentando com o aumento da temperatura de austenitização.

Medidas	Microdureza HV
1	245
2	221
3	213
4	221
5	221
Valor Médio	224± 12

Tabela 4.19 - Microdureza, temperatura de austenitização 860°C e revenido 680°C.

Medidas	Microdureza HV
1	221
2	264
3	245
4	237
5	228
Valor Médio	239 ± 17

Tabela 4.20 - Microdureza, temperatura de austenitização 880°C e revenido 680°C.

Medidas	Microdureza HV
1	245
2	245
3	245
4	237
5	237
Valor Mèdio	$242 \pm 4$



Medidas	Microdureza HV
1	245
2	245
3	245
4	245
5	264
Valor Médio	249 ± 8

Tabela 4.22 - Microdureza, temperatura de austenitização 920°C e revenido 680°C.

Medidas	Microdureza HV
1	264
2	264
3	245
4	253
5	264
Valor Médio	$258 \pm 9$

Tabela 4.23 - Microdureza, temperatura de austenitização 940°C e revenido 680°C.

A Tabela, 4.24, apresenta um resumo dos valores de microdureza Vickers, obtidos para as varias condições de tratamentos térmicos usados nesta etapa. São apresentados os valores médios seguidos dos respectivos desvios padrões.

Condição	Microdureza HV
01	224± 12
02	239±17
03	242± 4
04	$249 \pm 8$
05	258± 9

Tabela 4.24 - Resumo dos valores de Microdureza nas condições 01 à 05

## 4.1.5 Dependência da Microdureza com o Limite de Resistência.

Os resultados da microdureza obtidos nesta etapa, são apresentados no gráfico abaixo. O gráfico apresenta a variação da microdureza em função do Limite de Resistência, para as diferentes temperaturas de austenitização com temperatura de revenido de 680 °C.



Figura 4.21 - Curva de Microdureza versus Limite de Resistência.

## 4.1.6 Dependência da Microdureza com a Temperatura de Austenitização.

O gráfico abaixo apresenta a variação da microdureza em função da Temperatura de Austenitização, com temperatura de revenido de 680 °C.



Figura 4.22 - Curva de Microdureza versus Temperatura de Austenitização.

## 4.1.7 Dependência do Limite de Escoamento com a Temperatura de Austenitização.

O gráfico abaixo apresenta a variação do Limite de Escoamento em função da Temperatura de Austenitização, com temperatura de revenido de 680 °C.



Figura 4.23 - Curva do Limite de Escoamento versus Temperatura de Austenitização.

## 4.1.8 Dependência do Limite de Resistência com a Temperatura de Austenitização.

O gráfico abaixo apresenta a variação do Limite de Resistência em função da Temperatura de Austenitização, com temperatura de revenido de 680 °C.



Figura 4.24 - Curva do Limite de Resistência versus Temperatura de Austenitização.

## 4.1.9 Dependência do CTOD com o Limite de Escoamento.

Os resultados do CTOD obtidos nesta etapa, são apresentados no gráfico abaixo. O gráfico apresenta a variação do CTOD em função do Limite de Escoamento, para as diferentes temperaturas de austenitização com temperatura de revenido de 680 °C.



Figura 4.25 - Curva de CTOD de carga máxima versus Limite de Escoamento.

As curvas apresentadas representam os valores médios (azul), máximos (amarela) e mínimos (magenta) do CTOD correspondente aos limites de escoamento para cada uma das temperaturas em questão.

## 4.1.10 Dependência do CTOD com o Limite de Resistência.

Os resultados do CTOD obtidos nesta etapa, são apresentados no gráfico abaixo. O gráfico apresenta a variação do CTOD em função do Limite de Resistência, para as diferentes temperaturas de austenitização com temperatura de revenido de 680 °C.



Figura 4.26 - Curva de CTOD de carga máxima versus Limite de Resistência.

As curvas apresentadas representam os valores médios (azul), máximos (amarela) e mínimos (magenta) do CTOD correspondente aos limites de resistência para cada uma das temperaturas em questão.

# Dependência do CTOD de carga máxima com as temperaturas de austenitização

Os resultados do CTOD de carga máxima são apresentados no gráfico abaixo. O gráfico apresenta as curvas do CTOD para as diferentes temperaturas de austenitização com temperatura de revenido de 680 °C.



Figura 4.27 - Curva de CTOD de carga máxima versus temperatura de austenitização.

As curvas apresentadas representam os valores médios (azul), máximos (amarela) e mínimos (magenta) do CTOD correspondente a cada uma das temperaturas em questão.

A resistência à fratura do material aumentou com o aumento da temperatura de austenitização. No entanto, se manteve praticamente constante, a partir de 900°C. Tal efeito provavelmente está associado à presença de elementos formadores de carbonetos, como o cromo e o molibdênio, que pode ter sido acentuado com o aumento da temperatura de austenitização.

O aumento da presença de carbonetos dispersos no material aumenta a resistência, sem muita perda de ductilidade. Os carbonetos apresentam tantos obstáculos, que obrigam as trincas de clivagem a se desviarem de um ponto para outro, resultando numa diminuição da energia de propagação da trinca.

Conforme citado anteriormente, a presença dos elementos de liga retardam a formação da ferrita e perlita, possibilitando a obtenção de bainita e martensita no resfriamento contínuo, o que promove nestes aços uma melhor combinação de resistência mecânica e ductilidade.

O gráfico da figura 4.27 apresenta a temperatura de austenitização de 900°C como aquela que conferiu ao material a maior resistência à fratura. O efeito de aumento da resistência tornou-se desprezível para temperaturas maiores.

## 4.2 Resultados da segunda etapa

São apresentados a seguir os resultados obtidos na segunda fase do trabalho, onde foram variadas as temperaturas de revenido e a de austenitização foi fixada em 900°C.

## 4.2.1 Propriedades mecânicas

Os valores apresentados, na tabela 4.25, correspondem a corpos de prova revenidos à partir da condição 06 (temperatura de revenido 650 °C) até a condição 11 (temperatura de revenido 700 °C) sendo todos temperados com temperaturas de austenitização de 900 °C. A tabela apresenta os valores do limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), deformação na fratura ( $\epsilon = \Delta L/L_0$ ) e redução de área (RA).

A tabela apresenta os valores obtidos nos ensaios, para cada condição, com suas respectivas médias e desvios padrões.

Condição	СР	LE (MPa)	LR (MPa)	£ (%)	RA (%)
	1	940,0	1068,0	18,90	71,40
06	2	928,0	1050,0	18,70	72,45
	3	934,0	1058,0	18,80	71,95
	média	934,0±6,0	1058,7±9,0	18,80±0,10	71,93±0,53
	1	900,0	1032,0	19,00	72,20
07	2	926,0	1037,0	18,90	72,64
	3	876,0	1030,0	19,20	71,86
	média	900,7±25,0	1033,0±3,6	19,03±0,15	72,23±0,39
	1	872,0	1024,0	18,80	72,10
08	2	890,0	1030,0	19,20	72,30
	3	918,0	1037,0	19,40	72,50
	média	893,3±23,2	1030,6±6,5	19,13±0,31	72,30±0,20
	1	860,0	984,0	19,56	72,23
09	2	869,0	982,0	19,35	72,93
	3	877,0	979,0	19,23	73,86
	média	868,7±8,5	981,0±2,5	19,38±0,17	73,01±0,82
	1	840.0	929.0	19.90	72.80
10	2	834,0	913,0	19,70	73,45
	3	837,0	920,0	19,80	73,10
	média	837,0±3,0	920,7±8,0	19,80±0,10	73,12±0,33
	1	759,0	896,0	20,20	72,86
11	2	780,0	900,0	20,50	73,20
	3	803,0	902,0	20,90	73,64
	média	780,7±22,0	899,3±3,1	20,53±0,35	73,23±0,39

Tabela 4.25 – Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração, segunda etapa.

Conforme citado anteriormente, são recomendações de fabricação dos elos para ancoragem de sistemas *offshore* [21,25] que as propriedades mecânicas dos aços Grau R4, devem apresentar valores mínimos para o limite de escoamento (580 MPa), limite de resistência (860 MPa), deformação na fatura (12%)e redução de área (50%). Os valores apresentados na tabela 4.25 atendem plenamente as exigências para todas as condições de tratamentos térmicos.

Ainda segundo as especificações para fabricação de elos para amarra de sistemas *offshore* [21,25] a razão (R) entre o limite de escoamento e o limite de resistência deve ter um valor máximo de 0,92. A tabela 4.26 apresenta os valores para as seis condições de tratamentos térmicos realizadas, analisando os valores apresentados na tabela verifica-se em todos os casos o valor máximo da razão "R" foi atendido.

Condição	(LE/LR) R
06	0,88
07	0,87
08	0,87
09	0,89
10	0,91
11	0,87

Tabela 4.26 – Valores de R de acordo com o tratamento térmico, segunda etapa.

Ao analisar a tabela 4.25, verifica-se uma redução progressiva a partir da condição 06 até a condição 11, nos valores médios dos limites de escoamento (20%) e de resistência (19%). Apresentando assim um comportamento clássico em função do revenido[01], indicando claramente a atuação de um mecanismo de recuperação. Um aumento progressivo, embora em percentuais menores, foi verificado na deformação na fratura (9%) e na redução de área (2%).

Os resultados demonstram que, para uma variação da temperatura de revenido de 650°C a 700°C, o material teve uma redução máxima de 20% nos limites de escoamento e de resistência, sem perda apreciável da ductilidade, o que garante as excelentes propriedades deste aço.

#### 4.2.2 **Ensaio CTOD**

A seguir são apresentados os gráficos que representam o comportamento da força "P" versus deslocamento do extensômetro "Vg" obtidos nos ensaios de CTOD realizados segundo as normas ASTM [08].

Os gráficos abaixo correspondem as amostras das condições 06 a 11. As figuras 424, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 representam os corpos de prova para cada condição.





Figura 4.28-Gráfico PxVg condição 06 CP1 Figura 4.29-Gráfico PxVg condição 07 CP1

CONDIÇÃO 03 CP 1

200

180

160

140

120

100

80

60

40

20

0

0

(1 div. = 122,625 N)

FORCAP



Figura 4.30-Gráfico PxVg condição 08 CP1 Figura 4.31-Gráfico PxVg condição 09 CP1

200

(1 div. = 0,012mm)

ABERTURA DO EXTENSÔMETRO Vg

100

400

300



Figura 4.32-Gráfico PxVg condição 10 CP1 Figura 4.33-Gráfico PxVg condição 11 CP1

As Tabelas 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 apresentam os valores de  $\delta_e$  parte elástica do CTOD obtidos para as varias condições de tratamentos térmicos usadas nesta etapa.

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	K (MPa $(m)^{1/2}$ )	$\delta_e(mm)$
01	16,4	0,513	10,060	20,969	147,404	0,051
02	14,8	0,463	8,654	24,658	149,109	0,053
03	15,0	0,469	8,805	25,762	158,504	0,059

Tabela 4.27 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 06.

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	K (MPa $(m)^{1/2}$ )	$\delta_e(mm)$
01	14,7	0,459	8,555	25,751	153,941	0,058
02	15,0	0,469	8,805	24,770	152,403	0,055
03	14,9	0,466	8,729	24,893	151,836	0,058

Tabela 4.28 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 07.

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	K (MPa $(m)^{1/2}$ )	$\delta_e(mm)$
01	15,2	0,475	8,960	24,157	151,248	0,058
02	15,6	0,488	9,313	23,667	154,014	0,059
03	15,9	0,497	9,571	22,073	147,620	0,052

Tabela 4.29 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 08.

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	K (MPa $(m)^{1/2}$ )	$\delta_e(mm)$
01	15,3	0,478	9,040	19,988	126,261	0,041
02	14,7	0,459	8,555	18,149	108,492	0,030
03	16,0	0,500	9,659	23,544	158,909	0,063

Tabela 4.30 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 09.

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	K (MPa $(m)^{1/2}$ )	$\delta_e(mm)$
01	15,4	0,481	9,120	22,318	142,226	0,053
02	15,7	0,491	9,398	21,950	144,146	0,055
03	15,7	0,491	9,398	21,950	144,146	0,055

Tabela 4.31 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 10.

СР	<i>a</i> (mm)	a/W	Y=f(a/W)	P (kN)	K (MPa $(m)^{1/2}$ )	$\delta_e(mm)$
01	15,5	0,484	9,202	20,233	130,101	0,049
02	15,2	0,475	8,960	20,478	128,215	0,047
03	15,2	0,475	8,960	20,233	126,679	0,044

Tabela 4.32 – Valores da parte elástica do CTOD para a condição 11.

As Tabelas 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 e 4.38, apresentam os valores de  $\delta_p$ , parte plástica do CTOD obtidos para as várias condições de tratamentos térmicos usadas nesta etapa.

СР	<i>a</i> (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p}$ (mm)
01	16,4	15,6	0,96	0,283
02	14,8	17,2	0,78	0,264
03	15,0	17,0	0,66	0,219

Tabela 4.33 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 06.

СР	a (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p}$ (mm)
01	14,7	17,3	0,80	0,273
02	15,0	17,0	0,93	0,309
03	14,9	17,1	0,96	0,322

Tabela 4.34 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 07.

СР	<i>a</i> (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p}$ (mm)
01	15,2	16,8	1,09	0,357
02	15,6	16,4	1,11	0,351
03	15,9	16.1	1,23	0,379

Tabela 4.35 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 08.

СР	<i>a</i> (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p}$ (mm)
01	15,3	16,7	1,50	0,487
02	14,7	17,3	1,53	0,522
03	16,0	16.0	1,47	0,449

Tabela 4.36 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 09.

СР	a (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_{p}$ (mm)
01	15,4	16,6	1,47	0,472
02	15,7	16,3	1,44	0,452
03	15,7	16,3	1,44	0,452

Tabela 4.37 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 10.

СР	<i>a</i> (mm)	(W-a) (mm)	Vp (mm)	$\delta_p (mm)$
01	15,5	16,5	1,44	0,459
02	15,2	16,8	1,39	0,455
03	15,2	16,8	1,43	0,467

Tabela 4.38 – Valores da parte plástica do CTOD para a condição 11.

As Tabelas, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42, 4.43 e 4.44, apresentam os valores de CTOD e da propagação estável da trinca ( $\Delta a$ ), obtidos para as varias condições de tratamentos térmicos usados nesta etapa. São apresentados também os valores médios seguidos dos respectivos desvios padrões.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
01	0,051	0,283	0,334	1,5
02	0,053	0,264	0,317	2,2
03	0,059	0,219	0,278	2,2
média	0,054±0,004	0,255±0,033	0,310±0,029	2,0±0,4

Tabela 4.39 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 06.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
01	0,058	0,273	0,331	2,1
02	0,055	0,309	0,365	2,2
03	0,058	0,322	0,380	2,4
média	0,057±0,002	0,301±0,025	0,359±0,025	2,2±0,2

Tabela 4.40 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 07.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
01	0,058	0,357	0,415	2,0
02	0,059	0,351	0,410	1,7
03	0,052	0,379	0,432	1,9
média	0,056±0,004	0,362±0,015	0,419±0,012	1,9±0,2

Tabela 4.41 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 08.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
01	0,041	0,487	0,528	2,0
02	0,030	0,522	0,552	1,7
03	0,063	0,449	0,512	1,8
média	0,045±0,017	0,486±0,037	0,531±0,020	1,8±0,2

Tabela 4.42 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 09.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
16	0,053	0,472	0,525	1,9
17	0,055	0,452	0,507	2,2
18	0,055	0,452	0,507	2,0
média	0,054±0,001	0,459±0,012	0,513±0,010	2,0±0,2

Tabela 4.43 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 10.

СР	$\delta_e(mm)$	$\delta_p (mm)$	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
19	0,049	0,459	0,508	1,7
20	0,047	0,455	0,502	1,6
21	0,044	0,467	0,511	1,6
média	0,047±0,003	0,460±0,006	0,507±0,005	1,6±0,1

Tabela 4.44 – Valores de CTOD e  $\Delta a$  para a condição 11.

A Tabela, 4.45, apresenta um resumo dos valores de CTOD e da propagação estável da trinca ( $\Delta a$ ), obtidos para as varias condições de tratamentos térmicos usados nesta etapa. São apresentados os valores médios seguidos dos respectivos desvios padrões.

Condição	δ(mm)	$\Delta a (\mathrm{mm})$
06	0,310±0,029	2,0±0,4
07	0,359±0,025	2,2±0,2
08	0,419±0,012	1,9±0,2
09	0,531±0,020	1,8±0,2
10	0,513±0,010	2,0±0,2
11	0,507±0,005	1,6±0,1

Tabela 4.45 – Resumo dos valores médios de CTOD e  $\Delta a$  para as condições 06 à 11.

## 4.2.3 Caracterização microestrutural

A seguir apresentamos o aspecto micrografico do aço estrutural R4 na condição 06 (temperatura de austenitização 900°C e revenido 650°C).



Figura 4.34 - Amostra condição 06 Microscopia Ótica aumento 600x



Figura 4.35 - Amostra condição 06 Microscopia Ótica aumento 1000x

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 07 (temperatura de austenitização 900°C e revenido 660°C).



Figura 4.36 - Amostra condição 07 Microscopia Ótica aumento 600x



Figura 4.37 - Amostra condição 07 Microscopia Ótica aumento 1000x

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 08 (temperatura de austenitização 900°C e revenido 670°C).



Figura 4.38- Amostra condição 08 Microscopia Ótica aumento 600x



Figura 4.39- Amostra condição 08 Microscopia Ótica aumento 1000x

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 09 (temperatura de austenitização 900°C e revenido 680°C).



Figura 4. 40- Amostra condição 09 Microscopia Ótica aumento 600x



Figura 4.41- Amostra condição 09 Microscopia Ótica aumento 1000x

A seguir apresentamos o aspecto micrografico do aço estrutural R4 na condição 10 (temperatura de austenitização 900°C e revenido 690°C).



Figura 4.42- Amostra condição 10 Microscopia Ótica aumento 600x



Figura 4.43- Amostra condição 10 Microscopia Ótica aumento 1000x

A seguir apresentamos o aspecto micrográfico do aço estrutural R4 na condição 11 (temperatura de austenitização 900°C e revenido 700°C).



Figura 4.44- Amostra condição 11 Microscopia Ótica aumento 600x



Figura 4.45- Amostra condição 11 Microscopia Ótica aumento 1000

## 4.2.4

#### Microdureza

As tabelas 4.46, 4.47, 4.48, 4.49, 4.50 e 4.51 correspondem a valores de microdureza Vickers obtidos nos corpos de prova temperados a partir da condição 06 até a condição 11. As tabelas apresentam os valores obtidos nos ensaios, com suas respectivas médias e desvios padrões. Os valores foram diminuindo com o aumento da temperatura de revenido.

Medidas	Microdureza HV
1	294
2	292
3	304
4	287
5	274
Valor Médio	290±11

Tabela 4.46 - Microdureza, temperatura de austenitização 900°C e revenido 650°C.

Medidas	Microdureza HV
1	292
2	254
3	264
4	254
5	297
Valor Médio	272± 8

Tabela 4.47 - Microdureza, temperatura de austenitização 900°C e revenido 660°C.

Medidas	Microdureza HV
1	270
2	254
3	256
4	264
5	272
Valor Médio	263± 8

Tabela 4.48 - Microdureza, temperatura de austenitização 900°C e revenido 670°C.

Medidas	Microdureza HV
1	245
2	245
3	245
4	237
5	237
Valor Médio	$242 \pm 4$

Tabela 4.49 - Microdureza, temperatura de austenitização 900°C e revenido 680°C.

Medidas	Microdureza HV
1	235
2	232
3	185
4	235
5	228
Valor Médio	233±21

Tabela 4.50 - Microdureza, temperatura de austenitização 900°C e revenido 690°C.

Medidas	Microdureza HV
1	235
2	185
3	176
4	180
5	167
Valor Médio	$189 \pm 27$

Tabela 4.51 - Microdureza, temperatura de austenitização 900°C e revenido 700°C.

A Tabela, 4.52, apresenta um resumo dos valores de microdureza Vickers, obtidos para as varias condições de tratamentos térmicos usados nesta etapa. São apresentados os valores médios seguidos dos respectivos desvios padrões.

Condição	Microdureza HV
06	290±11
07	272± 8
08	263± 8
09	$242 \pm 4$
10	233±21
11	$189 \pm 27$

Tabela 4.52 – Resumo dos valores de Microdureza nas condições 06 à 11.

#### 4.2.5

## Dependência da Microdureza com o Limite de Resistência.

Os resultados da microdureza obtidos nesta etapa, são apresentados no gráfico abaixo. O gráfico apresenta a variação da microdureza em função do Limite de Resistência, para as diferentes temperaturas de revenido com temperatura de austenitização fixada em 900°C.



Figura 4.46 - Curva de Microdureza versus Limite de Resistência.

## 4.2.6 Dependência da Microdureza com a Temperatura de Revenido.

O gráfico abaixo apresenta a variação da microdureza em função da Temperatura de Revenido, com temperatura de austenitização fixada em 900 °C.



Figura 4.47 - Curva de Microdureza versus Temperatura de Revenido.

## 4.2.7 Dependência do Limite de Escoamento com a Temperatura de Revenido.

O gráfico abaixo apresenta a variação do Limite de Escoamento em função da Temperatura de Revenido, com temperatura de austenitização fixada em 900 °C.



Figura 4.48 - Curva do Limite de Escoamento versus Temperatura de Revenido.

## 4.2.8 Dependência do Limite de Resistência com a Temperatura de Revenido.

O gráfico abaixo apresenta a variação do Limite de Resistência em função da Temperatura de Revenido, com temperatura de austenitização fixada em 900 °C.



Figura 4.49 - Curva do Limite de Resistência versus Temperatura de Revenido.

## 4.2.9 Dependência do CTOD com o Limite de Escoamento.

Os resultados do CTOD obtidos nesta etapa, são apresentados no gráfico abaixo. O gráfico apresenta a variação do CTOD em função do Limite de Escoamento, para as diferentes temperaturas de revenido com temperatura de austenitização fixada em 900°C.



Figura 4.50 - Curva de CTOD de carga máxima versus Limite de Escoamento.

O gráfico acima apresenta as relações entre o CTOD de carga máxima e os limites de escoamento para cada temperatura de revenido correspondentes, apresentamos as curvas de valores médios (azul), máximos (amarelo) e mínimos (magenta).

## 4.2.10 Dependência do CTOD com o Limite de Resistência.

Os resultados do CTOD obtidos nesta etapa, são apresentados no gráfico abaixo. O gráfico apresenta a variação do CTOD em função do Limite de Resistência, para as diferentes temperaturas de revenido com temperatura de austenitização fixada em 900°C.



Figura 4.51 - Curva de CTOD de carga máxima versus Limite de Resistência.

O gráfico acima apresenta as relações entre o CTOD de carga máxima e os limites de resistência para cada temperatura de revenido correspondentes, apresentamos as curvas de valores médios (azul), máximos (amarelo) e mínimos (magenta).

## 4.2.11 Dependência do CTOD de carga máxima com as Temperaturas de Revenido.

Os resultados do CTOD de carga máxima, obtidos nesta etapa, são apresentados no gráfico abaixo. O gráfico apresenta as curvas do CTOD para as diferentes temperaturas de revenido com temperatura de austenitização fixada em 900°C.



Figura 4.52 - Curva de CTOD de carga máxima versus temperatura de revenido.

O gráfico acima apresenta as relações entre o CTOD de carga máxima e as temperaturas de revenido correspondentes, apresentamos as curvas de valores médios (azul), máximos (amarelo) e mínimos (magenta) de CTOD correspondente a cada uma das temperaturas em questão. A temperatura de revenido é responsável, principalmente, pela modificação da martensita, que, por ser muito dura, carece de tenacidade. A martensita pode adquirir uma boa tenacidade associada a uma resistência relativamente alta, se receber um tratamento térmico apropriado. No revenido, a martensita frágil é substituída por uma fina dispersão de partículas rígidas de cementita na tenaz matriz ferrítica, estas partículas de cementita atuam bloqueando o movimento de discordâncias, que impedem escorregamento, aumentando a resistência. [14]

A resistência à fratura do material aumentou com o aumento da temperatura de revenido. No entanto, teve uma pequena redução para temperaturas acima de 680°C.

Estudos realizados com aços demonstraram casos em que a tenacidade diminuiu com o aumento da temperatura de revenido. Esta mudança da tenacidade não é aparente, quando examinamos dados de dureza e limite de resistência que, geralmente, diminuem com o aumento da temperatura de revenido.[26]

Provavelmente, uma das razões do efeito de redução da tenacidade no revenido, para temperaturas superiores a 680°C, está relacionado às alterações causadas por "endurecimento secundário". Os aços, contendo cromo e molibdênio, estão sujeito a endurecimento secundário, causados pela precipitação de carbonetos de liga e, eventualmente, transformação em martensita da austenita retida.[27]

Ligas contendo cromo e níquel são sujeitas à fragilidade em maior escala que ligas contendo só cromo ou só níquel. Estes elementos formam carbonetos, que substituem os átomos de ferro da cementita. O revenido, a altas temperaturas, não somente provoca a separação da cementita, mas também afeta a participação dos elementos de liga entre ferrita e cementita. [20]

Outra possível razão da redução da tenacidade pode estar associada a um outro fenômeno conhecido como "fragilidade da martensita revenida". Este fenômeno pode estar associado à segregação dos átomos impuros nos contornos de grãos da austenita antes da têmpera. [28]

A fragilização da martensita pode também estar associada à precipitação de filmes de cementita ao longo das placas de martensita, que se situam ao longo dos grãos originais da austenita. Estas placas, nos contornos dos grãos, agem facilmente com caminho das trincas.[26]

O gráfico da figura 4.52, apresenta a temperatura de revenido de 680°C, como aquela que conferiu ao material a maior resistência à fratura.

## 4.2.12 Fractografia

As figuras 4.53, 4.54, 4.55, 4.56, 4.57, 4.58 e 4.59 apresentam as característica das superfícies de fratura dos corpos de prova de CTOD para as várias condições de tratamentos térmicos adotadas neste trabalho.



Figura 4.53 – Vista geral da superfície de fratura condição 02 aumento 35x



Figura 4.54 – Vista geral da superfície de fratura condição 07 aumento 35x



Figura 4.55 – Vista geral da superfície de fratura condição 11 aumento 70x



Figura 4.56 – Superfície de propagação estável da trinca condição 2 aumento 2700x



Figura 4.57 – Superfície de propagação estável da trinca condição 3 aumento 1000x



Figura 4.58 – Superfície de propagação estável da trinca condição 7 aumento 1000x



Figura 4.59 – Superfície de propagação estável da trinca condição 11 aumento 1000x

Observando as superfícies de propagação estável da trinca nas figuras 4.53, 4.54, 4.55, 4.56, 4.57, 4.58 e 4.59, verificou-se um micromecanismo de fratura alveolar com grande quantidade de partículas com diâmetro médio de 4  $\mu$ m, esse mecanismo se refere ao processo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades que se iniciaram ao redor de inclusões ou partículas de segunda fase.

No processo de deformação plástica a tensões originadas na extremidade da trinca fazem crescer as microcavidades causando o rompimentos das paredes e ligamentos que as separam, resultando uma superfície de fratura com depressões semi-esféricas ou semi- elípticas.

A grande quantidade de cavidades que apresenta as superfícies fraturadas caracterizam uma fratura dúctil.[01]

As variações microestruturais decorrentes das várias condições de tratamentos térmicos, modificaram os valores de resistência á fratura do material, no entanto não foram suficientes marcantes para modificar a ductilidade. Todos os corpos de provas apresentaram superfícies de fraturas similares, com a formação de microcavidades profundas envolvendo grandes deformações, fato que é comum de ser observado em aços estruturais, que normalmente apresentam uma cavidade grande, originada por uma inclusão, rodeada de várias cavidades menores.