

## 6

**Método da Resistência Contínua – MRC**

O aço inoxidável, um aço de alta resistência, deve ser pesquisado para torná-lo mais competitivo, tendo como uma das ferramentas nesse sentido, a melhoria das normas de projeto estrutural.

Esse capítulo avalia e investiga as principais características de comportamento estrutural dos aços inoxidáveis por meio de suas curvas de tensão *versus* deformação específica, em particular, o encruamento por deformação e suas implicações no projeto estrutural. O aço carbono, diferentemente do aço inoxidável, tem uma resposta elástica com um limite definido por um patamar de escoamento e um grau moderado de endurecimento por encruamento. A atual geração de padrões internacionais de projeto em aço inoxidável, EUROCODE 3 parte 1-4 (1993) e AISC *Design 30* (2012), têm sido desenvolvidas em grande parte seguindo as diretrizes de projeto do aço carbono, que são baseados no comportamento idealizado elástico e perfeitamente plástico, e por consequência negligenciando-se a resistência benéfica produzida por efeitos do endurecimento por encruamento.

O Método da Resistência Contínua (MRC), (Gardner, 2002), é uma abordagem de projeto recentemente desenvolvida, que proporciona consistência com o comportamento observado do aço inoxidável e permite a incorporação benéfica do encruamento desse aço. O MRC usa e fundamenta o conceito de projeto do material na fase plástica.

Antecedentes do MRC e descrições detalhadas de seu desenvolvimento ao longo da última década foram publicados em Gardner (2002), Nethercot *et al.* (2008) e Gardner e Theofanous (2008). Avanços recentes do MRC, incluindo a sua extensão ao dimensionamento de estruturas em aço carbono, também podem ser encontradas em Gardner (2008) e Gardner *et al.* (2011).

O presente capítulo apresenta uma investigação do comportamento estrutural para chapas com furos, abrangendo avaliações de suas respectivas deformações específicas limites nas configurações estudadas nesta tese, fundamentadas no Método da Resistência Contínua.

Muitos dos principais conceitos que suportam as atuais normas de cálculo de estruturas metálicas foram desenvolvidos com base no comportamento bilinear do material, ou seja, elástico e perfeitamente-plástico.

Atualmente a resistência estrutural é calculada com base no estado limite último, com atribuição de tensões limites das peças estruturais. A resistência das peças estruturais é, uma função direta da rigidez dos elementos estruturais, nesse caso, das chapas e dos parafusos utilizados na ligação aparafusada.

Embora não explicitamente incluída na determinação da resistência, o encruamento é um componente essencial do sistema para a determinação da seção resistente. O Método da Resistência Contínua (MRC) representa um procedimento alternativo para avaliação da seção resistente, baseada numa relação direta entre rigidez na estrição, nesse caso de tração, e de um aproveitamento racional do encruamento.

Os materiais que exibem um alto grau de não linearidade e endurecimento, tais como alumínio, aço inoxidável e alguns aços de alta resistência, encaixam-se apropriadamente no estudo com o MRC, e, geralmente, se beneficiam de uma maior resistência com a utilização desse método. O método proporciona uma melhor previsão de carga de projeto. Uma vantagem adicional da abordagem proposta é que a capacidade de deformação da peça estrutural é explicitamente determinada, permitindo assim uma avaliação mais realista utilizando-se a ductilidade do material e a sua real influência no aumento da resistência.

Nesse capítulo será mostrada a avaliação do comportamento estrutural da configuração aparafusada com base no Método da Resistência Contínua.

## 6.1

### Comportamento mecânico do material

As medidas básicas de referência da deformação específica de uma peça tracionada são determinadas pelas tensões limite de ruptura e escoamento. Em muitos tipos de aço carbono a tensão limite de escoamento é facilmente determinada pelo patamar de escoamento bem definido que a curva tensão *versus* deformação específica apresenta. Porém, no aço inoxidável, esse patamar não existe, prevalecendo a concepção da reta paralela ao trecho elástico passando por uma deformação específica de referência, muitas vezes tomada como sendo igual a 0,2% (ou em até 0,1%), como sendo a tensão limite de escoamento, conforme Figura 6.1.

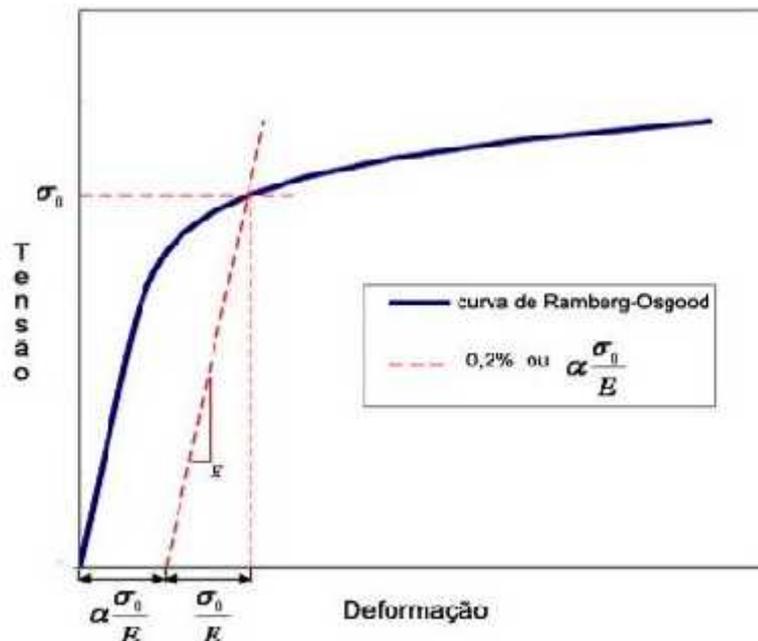


Figura 6.1 – Curva tensão *versus* deformação – Ramberg-Osgood (1943).

As versões iniciais do MRC utilizaram o modelo de material Ramberg – Osgood, {Gardner (2002), Nethercot *et al.* (2008) e Gardner, Theofanous (2008)} o que resultava em expressões de resistência relativamente complexas. Verificou-se que uma precisão semelhante poderia de fato ser alcançada com modelos de materiais mais simples. Esse procedimento fez que as expressões de projeto se tornassem mais adequadas para engenheiros estruturais, fomentando sua futura inclusão em normas de projeto. Com base nessas diretrizes o MRC passou a utilizar um modelo de um material elástico com endurecimento linear.

A origem do modelo de material adotado começa com uma deformação específica igual a 0,2%. A tensão limite de escoamento é definida por  $(f_y, \epsilon_y)$ , onde  $f_y$  é tomado como a reta paralela a 0,2% de alongamento e  $\epsilon_y$  é a deformação no escoamento, ou seja,  $\epsilon_y = f_y/E$ , em que  $E$  é a inclinação da região elástica, ou seja, módulo de elasticidade. O encruamento é determinado pela inclinação da reta que passa pelo ponto  $(f_y, \epsilon_y)$  e um ponto máximo especificado  $(f_{m\acute{a}x}, \epsilon_{m\acute{a}x})$  com  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  tomado como 0,2% considerando-se como base, o comportamento mecânico do aço carbono e o dimensionamento pelo EUROCODE 3 Parte-1-1 (1993), onde  $\epsilon_u$  é a deformação específica última à tração, e  $f_{m\acute{a}x}$  é adotado como a tensão limite de ruptura de tração  $f_u$ . A partir desses parâmetros pode-se determinar a inclinação da reta na fase plástica do modelo de material, como mostrado pela equação (6.1). A deformação

específica final do material  $\epsilon_u$  na tração é determinada no Anexo C do EUROCODE 3 Parte-1-4 (1993) e é dada pela equação (6.2). Um diagrama esquemático do modelo de material utilizado é mostrado na Figura 6.2.

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\epsilon_u - \epsilon_y} \quad (6.1)$$

$$\epsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad (6.2)$$

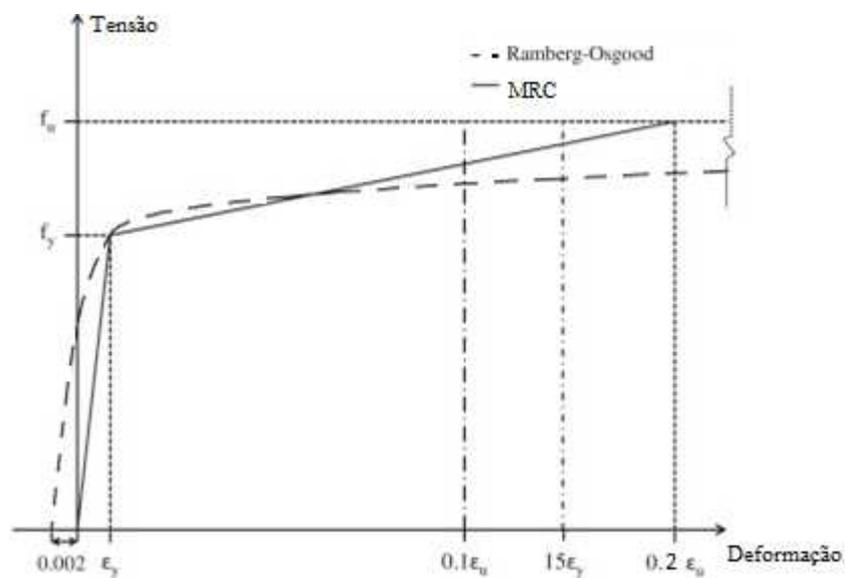


Figura 6.2 – MRC – modelo de material elástico com encruamento linear.

Nesse estudo, a tensão limite na fase elástica e na fase plástica por encruamento são descritas pelas equações (6.3) e (6.4), respectivamente. Essas equações foram utilizadas para definir a tensão limite em função da deformação específica limite e são empregadas nesse trabalho para avaliação do comportamento estrutural da configuração aparafusada com um modelo bilinear:

$$\sigma_{lim,el} = E\epsilon_{lim} \text{ para } \epsilon_{lim} < \epsilon_0 \quad (6.3)$$

$$\sigma_{lim,pl} = f_y + E_{sh}(\epsilon_{lim} - \epsilon_0) \text{ para } \epsilon_{lim} > \epsilon_0 \quad (6.4)$$

Onde  $\sigma_0 = f_y/E$  e  $E_{sh}$  é a inclinação da fase plástica por encruamento, considerada linear do modelo do material, conforme equação (6.1). O valor de  $E_{sh}$  pode ser usado como aproximadamente igual a  $E/100$ , como recomendado no EUROCODE 3 Parte 1-5 (1993), porém, nesta tese o valor da inclinação real do modelo do material retirado experimentalmente foi utilizado.

Considerando-se esse raciocínio foram sobrepostas as curvas tensão *versus* deformação específica construídas a partir de:

- 1) resultados experimentais das configurações aparafusadas, para garantir a segurança com os resultados teóricos (fator beta);
- 2) comportamento mecânico do corpo de prova que foi submetido a tração uniaxial;
- 3) curva analítica obtida, com a utilização das equações (6.5) para a fase elástica, e (6.6) para a fase plástica, onde as definições dos seus componentes são encontradas nas equações de (6.7) a (6.10);
- 4) curva bilinear construída por meio de retas com inclinações passando na interseção dos resultados das curvas do comportamento mecânico do material com as limitações da norma.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2\%}} \right)^n \quad \text{para } \sigma \leq \sigma_{0,2\%} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0,2\%}}{E_{0,2\%}} + \varepsilon_u \left( \frac{\sigma - \sigma_{0,2\%}}{\sigma_u - \sigma_{0,2\%}} \right)^m + \varepsilon_{0,2\%} \quad \text{para } \sigma_{0,2\%} < \sigma \leq \sigma_u \quad (6.6)$$

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{1,0\%} - \varepsilon_{0,2\%} - \frac{\sigma_{1,0\%} - \sigma_y}{E_{0,2\%}} \quad (6.7)$$

$$E_{0,2\%} = \frac{\sigma_y * E}{\sigma_y + 0,002 * n * E} \quad (6.8)$$

$$\varepsilon_{0,2\%} = 0,002 + \frac{\sigma_y}{E} \quad (6.9)$$

$$\varepsilon_{1\%} = 0,01 + \frac{\sigma_{1\%}}{E} \quad (6.10)$$

Os valores de  $n$  e  $m$  da curva analítica são determinados a partir da superposição da curva analítica com a curva experimental, visando-se determinar a maior concordância possível.

As equações (6.5) a (6.10) descrevem o comportamento mecânico do aço inoxidável descrito por Ramberg-Osgood (1943), aprimorado pelas expressões de tensão *versus* deformação específica encontradas por Mirambell e Real (2000) e Rasmunssen (2003).

Esse modelo analítico do comportamento mecânico do aço inoxidável tem a capacidade de descrever a curva tensão *versus* deformação específica com precisão até a tensão limite de ruptura e, portanto, é adequado para a análise de componentes estruturais submetidas a deformações específicas significativas antes de atingir a sua capacidade máxima, como é o caso das chapas com furos submetidas a tração, foco do presente estudo.

## 6.2

### Aço carbono

Nessa primeira análise adotou-se o aço carbono para identificar a deformação específica limite. Para tal foram utilizadas as cargas limites definidas pelo EUROCODE 3 parte 1-8 (1993), onde a força ( $F_r$ ) para a ruptura na seção líquida é dada pela equação (6.11) e a força ( $F_e$ ) para que ocorra o escoamento da seção bruta pela equação (6.12). As tensões limites, utilizadas e mostradas nos gráficos, foram encontradas dividindo-se as cargas limites pelas áreas brutas das seções transversais –  $A_g$  de cada peça estrutural:

$$F_r = 0,9A_n f_u \quad (6.11)$$

$$F_e = A_g f_y \quad (6.12)$$

O gráfico tensão *versus* deformação específica experimental, mostrado na Figura 6.3, é referente ao ensaio E3\_C\_PL\_N\_145\_6\_30, usado como representativo dos demais ensaios, onde também é mostrada a curva do

comportamento mecânico do aço carbono. Com esse procedimento foi possível desenhar as tensões limites e onde a tensão limite de ruptura da seção da seção líquida iguala-se ao valor obtido na curva experimental, determinando-se com isto, a deformação específica última limite. Utilizando-se essa análise foi construída a Tabela 6.1 com os resultados das deformações específicas últimas limites encontradas para vários ensaios e foi tomado como resultado final a média desses resultados.

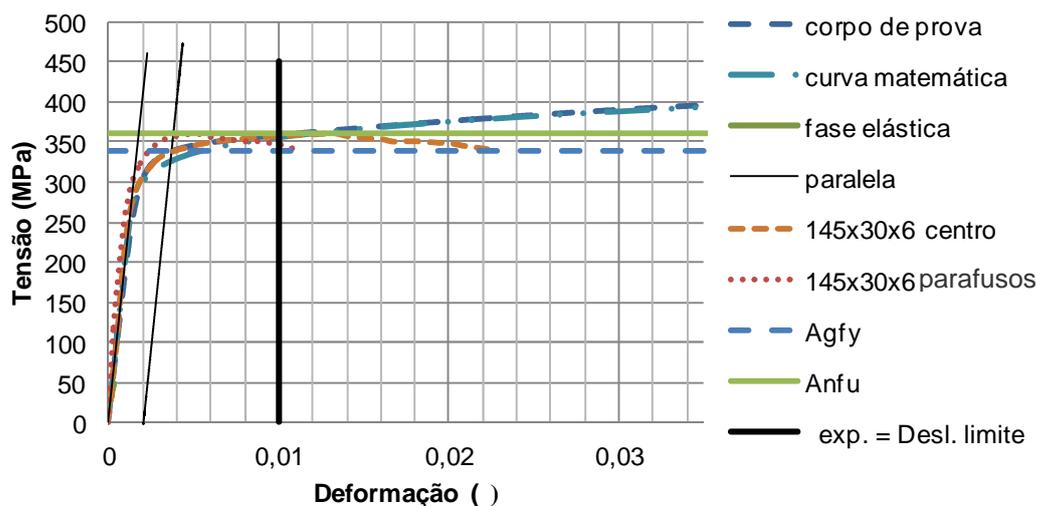


Figura 6.3 – Análise da deformação específica limite – E3\_C\_PL\_N\_145\_6\_30.

Tabela 6.1 – Deformação específica limite dos ensaios de aço carbono

ENSAIO	Deformação limite – $\lim$ ( )
E18_C_PL_N_145_15_50	0,007
E3_C_PL_N_145_6_30	0,012
E1_C_PL_N_145_6_25	0,003
E19_C_PL_N_107_6_25	0,010
E21_C_PL_N_107_6_30	0,014
E4_C_PL_N_145_6_30	0,006
E14_C_PL_N_145_12_30	0,010
E13_C_PL_N_145_10_30	0,016
Média	0,010

Com esse valor médio das deformações específica últimas limites encontrou-se a tensão limite de ruptura do ensaio da configuração aparafusada constituída de aço carbono, ou seja, igual a 360MPa na seção bruta. Esta tensão pode ser interpretada como a correspondente à tensão limite de ruptura limite, incorporando o aumento de resistência por encruamento.

Para se determinar essa tensão limite se utiliza na equação (6.13) com valor de  $n = 15$ .

Baseado no modelo de material do aço carbono e introduzindo-se o limite de deformação específica retirado do item 3.2.2 do EUROCODE 3 Parte-1-1 (1993), onde  $\epsilon_{m\acute{a}x}$  é a deformação específica máxima, que não será superior a  $15 \epsilon_y$  para aços com a razão  $f_u/f_y$  superior a 1,1 e não podendo ter alongamento relativo final inferior a 15%.

De outro modo, pode se escrever a deformação específica máxima, por meio dos dados experimentais por  $0,1 \epsilon_u$ , utilizando-se a deformação específica última com referência, correspondendo a  $15 \epsilon_y$ .

Logo a deformação específica limite será determinada pelo menor valor entre 15 vezes a deformação específica de escoamento ou 10% da deformação última para o aço estudados nesta tese. Deve-se ressaltar que o aço carbono usado nesse trabalho não apresenta patamar de escoamento devido à sua fabricação por laminação a frio:

$$\sigma_{lim} = f_y + E_{sh}(n * \epsilon_y - \epsilon_y) \quad (6.13)$$

Com essas informações pode-se determinar a resistência da peça no gráfico bilinear do MRC, que leva em consideração o aumento de resistência por encruamento. Na Figura 6.4 foram desenhadas as curvas experimentais e o valor das deformações específicas limites para o aço carbono para melhor entender a formulação do método. Para sua validação, na região tracejada do gráfico mostrado na Figura 6.4, encontra-se a mesma tensão limite determinada pelo MRC, ou seja, 360 MPa, correspondendo a um valor de deformação específica de 0,01 sendo igual a tensão limite do aço carbono calculada pela carga limite referente ao estado limite último de ruptura a tração na seção líquida. Respeitando-se nesse gráfico esse limite, obtém-se uma deformação específica última do MRC igual a  $0,2 \epsilon_u$  para as chapas com furos estudadas nesta tese.

Com a deformação específica limite de 0,010 do aço carbono encontrada nos ensaios experimentais pode-se também determinar um deslocamento limite de 5,8 mm, para os ensaios com esse tipo de ligação. Esse limite também pode, a princípio, ser usado na análise dos ensaios dos aços inoxidáveis de mesma configuração, pois representa uma máxima deformação específica admitida para evitar problemas de deformação excessiva.

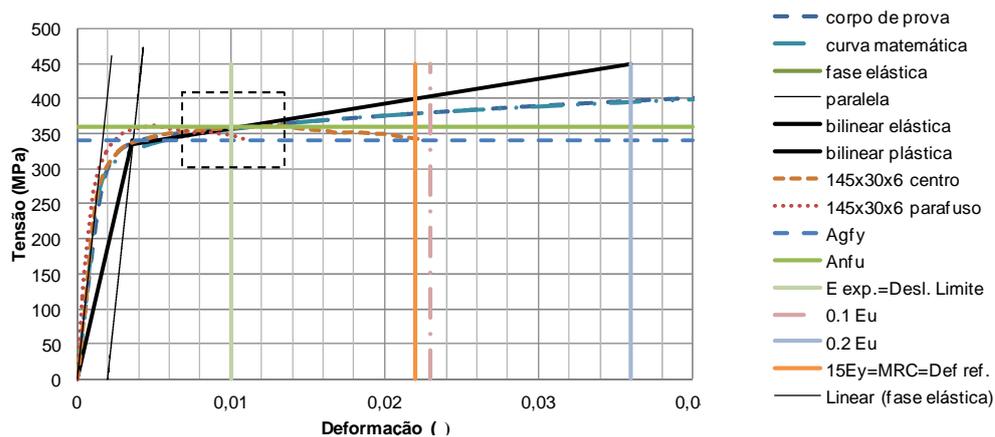


Figura 6.4 – Modelo da curva bilinear e deformações específica limites – aço carbono.

Na Tabela 6.2 são apresentadas as deformações específicas limites para o aço carbono, por meio das análises descritas a seguir. Os valores de referência foram obtidos experimentalmente.

1 – Aplicando-se o coeficiente 0,9 na equação do estado limite último de ruptura na seção líquida encontra-se a deformação específica correspondente na seção bruta no gráfico da Figura 6.4.

2 – Utilizando-se o limite do Eurocode de  $15 \epsilon_y$ .

3 – Considerando-se o mesmo limite informado pelo EUROCODE 3, porém, em função da deformação específica última tem-se  $0,1 \epsilon_u$ .

4 – O MRC define a deformação específica limite como sendo o menor valor entre  $15 \epsilon_y$ ;  $0,1 \epsilon_u$ .

5 – Considerando-se o deslocamento experimental apresentado pela configuração aparafusada em aço carbono de 5,8 mm na deformação específica limite de 0.010 .

6 – A deformação específica limite última ( $0,2 \epsilon_u$ ) encontra-se graficamente ao se desenhar uma reta passando pela deformação limite do estado limite último de ruptura na seção líquida, e a deformação específica limite do estado limite último de escoamento na seção bruta e as respectivas tensões. Esse procedimento, desenvolvido por Gardner (2002), tem o intuito de representar a resistência do aço na fase plástica considerando o aumento de resistência devido ao endurecimento por encruamento.

7 – Considerando-se os dois estados limites últimos, ruptura na seção líquida e escoamento da seção bruta, que regem o comportamento da configuração aparafusada, calculado por meio da equação (6.14), para

determinar uma deformação específica de referência ( $\epsilon_{ref}$ ), correspondendo à deformação específica limite onde ocorre o escoamento da seção bruta.

$$\epsilon_{ref} = \frac{A_n \epsilon_{lim}}{A_g} \quad (6.14)$$

Tabela 6.2 – Deformações específicas limites para o aço carbono

Análise	Equação	Valor de referência	Deformação limite ( )
1	$0,9A_n f_u$	Curva Experimental	0,010
2	$15 \epsilon_y$	$\epsilon_y = 0,0015$	0,022
3	$0,1 \epsilon_u$	$\epsilon_u = 0,23$	0,023
4	$MRC < 15 \epsilon_y; 0,1 \epsilon_u$	MRC	0,022
5	Curva Experimental	Desl. Limite = 5,8 mm	0,010
6	$0,2 \epsilon_u$	$\epsilon_u = 0,23$	0,036
7	$A_n \lim / A_g$	$\lim = 0,036$	0,022

Na Tabela 6.3 são apresentados os valores para a tensão limite correspondentes a cada deformação específica limite presentes na Tabela 6.2. Também é mostrado o fator a ser usado no cálculo da equação de estado limite último de ruptura da seção de seção líquida que limita a resistência do aço carbono.

Tabela 6.3 – Fatores para o aço carbono

Análise	Tensão limite (MPa)	Deformação limite ( )	Coefficiente redutor
1	360	carbono = 0,010	0,80
2	405	$0,1 \epsilon_u = 0,023$	0,90
3	390	$15 \epsilon_y = 0,022$	0,89
4	390	MRC = 0,022	0,89
5	360	desl. limite = 0,010	0,80
6	450	$0,2 \epsilon_u = 0,036$	1,00
7	390	$\epsilon_{ref} = 0,022$	0,89

O resultado do MRC se mostra válido e conservador ao apontar o fator 0,89 para definir o estado limite último para a ruptura na seção líquida da ligação aparafusada, inferior ao valor de 0,90 determinado pelo EUROCODE 3 e 0,94 encontrado nos ensaios experimentais. A tensão limite (390 MPa) encontrada pelo MRC é 14,7% maior que a tensão limite de escoamento (340 MPa), pois leva em consideração a capacidade de encruamento apresentada pelo aço carbono.

Análiticamente, com a utilização do fator 0,89, a carga de ruptura na seção de menor seção líquida é menor 11% do que a carga de escoamento na seção bruta para o tipo de configuração aparafusada estudada no presente

trabalho. Com a utilização do fator de 0,90 a ruptura da seção líquida continuará determinando a ruína da ligação com carga inferior a 9,5%. Com o fator 0,94 encontrado experimentalmente obtém-se uma carga inferior a 5%.

Os mesmos limites do aço carbono podem ser usados para se obter as tensões limites para os aços inoxidáveis austenítico, duplex e ferrítico, apontando para novos fatores a serem utilizados no estado limite último de ruptura da seção líquida.

### 6.3

#### Aços inoxidáveis

Da mesma forma com a utilização de curvas tensão *versus* deformação específica dos aços inoxidáveis, e com os valores dos parâmetros que configuram o comportamento mecânico desses aços serão obtidas as curvas bi lineares que expressam o aumento de resistência com o encruamento. Para os três tipos de aços inoxidáveis, as deformações específicas limites serão encontradas, por meio das mesmas equações limites utilizadas no aço carbono. Esse procedimento possibilita determinar as tensões limites a tração correspondentes para os aços inoxidáveis.

##### 6.3.1 Aço inoxidável austenítico

Utilizando-se os dados experimentais e os resultados apresentados na Tabela 6.4 foi possível construir o gráfico mostrado na

Figura 6.5. Nesse gráfico é possível identificar as tensões limites levando-se em consideração o aumento de resistência por encruamento. A tensões limites são apresentadas na Tabela 6.5 assim como o coeficiente obtido da razão entre a tensão limite de ruptura e a tensão limite, que deverá ser adotado para cálculo no modo de ruína por ruptura da seção líquida

Tabela 6.4 – Deformações específicas limites – aço inoxidável austenítico

Análise	Equação	Valor de referência	Deformação limite ( )
1	$0,9A_n f_u$	Curva Experimental aço carbono	0,010
2	$15 \sigma_y$	$\sigma_y=0,0018$	0,027
3	$0,1 \sigma_u$	$\sigma_u=0,42$	0,042
4	$MRC < 15 \sigma_y$ ou $0,1 \sigma_u$	$\sigma_y=0,0018, \sigma_u=0,42$	0,027
5	Curva Experimental	Desl. Limite =5,8 mm	0,039
6	$0,2 \sigma_u$	$\sigma_u=0,42$	0,084
7	$A_n \lim / A_g$	$\lim=0,084$	0,050

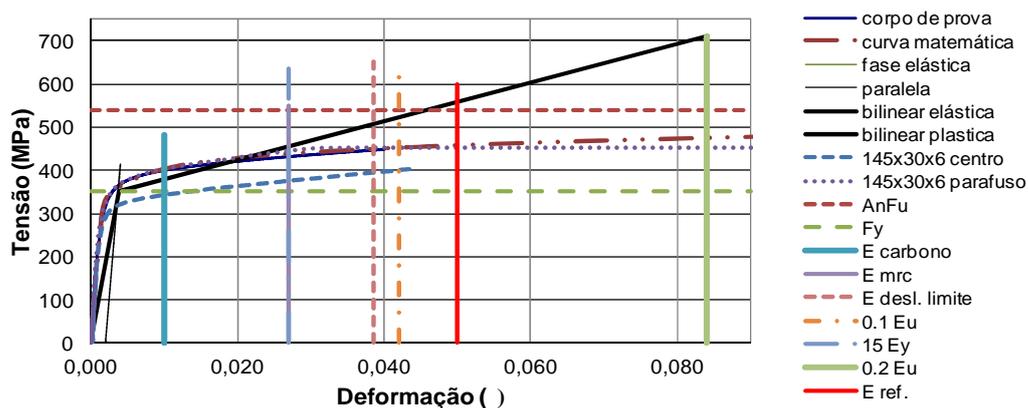


Figura 6.5 – Análise das deformações limite do aço inoxidável austenítico

Tabela 6.5 – Coeficientes redutores para o aço inoxidável austenítico

Análise	Tensão limite (MPa)	Deformação limite ( )	Coeficiente redutor
1	390	carbono = 0,010	0,55
2	465	15 y = 0,027	0,66
3	520	0,1 u = 0,042	0,73
4	465	MRC = 0,027	0,66
5	510	desl.limite = 0,039	0,72
6	710	0,2 u = 0,084	1,00
7	550	ref = 0,050	0,77

No aço inoxidável austenítico, para o ensaio E30\_A\_P\_N\_145\_6\_30, a deformação específica de referência calculada foi 0,050, encontrando-se a tensão de referência de 550 MPa para o escoamento da seção bruta, que é superior a tensão limite pelo MRC de 465 MPa. Logo a tensão de 465 MPa será tomada como maior tensão limite a ser considerada para o fator de redução 0,66, inferior a 0,86 encontrado nos ensaios experimentais, onde apresentaram grande deformação específica na ruptura final, e que governará para evitar o escoamento da seção bruta e definir a tensão limite no modo de ruína dessa configuração aparafusada. De modo a ser mais conservador ainda pode ser utilizado o coeficiente 0,55, que corresponde a deformação limite do aço carbono.

### 6.3.2 Aço inoxidável duplex

Utilizando-se os dados experimentais e os resultados apresentados na Tabela 6.6 foi possível construir o gráfico mostrado na

Figura 6.6. Nesse gráfico é possível identificar as tensões limites levando-se em consideração o aumento de resistência por encruamento. A tensões limites são apresentadas na Tabela 6.7, assim como o coeficiente obtido

da razão entre a tensão limite de ruptura e a tensão limite, que deverá ser adotado para cálculo no modo de ruína por ruptura da seção líquida.

Tabela 6.6 – Deformações limites para o aço inoxidável duplex

Análise	Equação	Valor de referência	Deformação limite ( )
1	$0,9A_n f_u$	Curva Exp. aço carbono	0,010
2	$15 \sigma_y$	$\sigma_y=0,0025$	0,037
3	$0,1 \sigma_u$	$\sigma_u=0,30$	0,030
4	$MRC < 15 \sigma_y$ ou $0,1 \sigma_u$	$\sigma_y=0,0018$ , $\sigma_u=0,42$	0,030
5	Curva Experimental	Desl. Limite =5,8 mm	0,023
6	$0,2 \sigma_u$	$\sigma_u=0,30$	0,060
7	$A_n \lim / A_g$	$\lim=0,060$	0,036

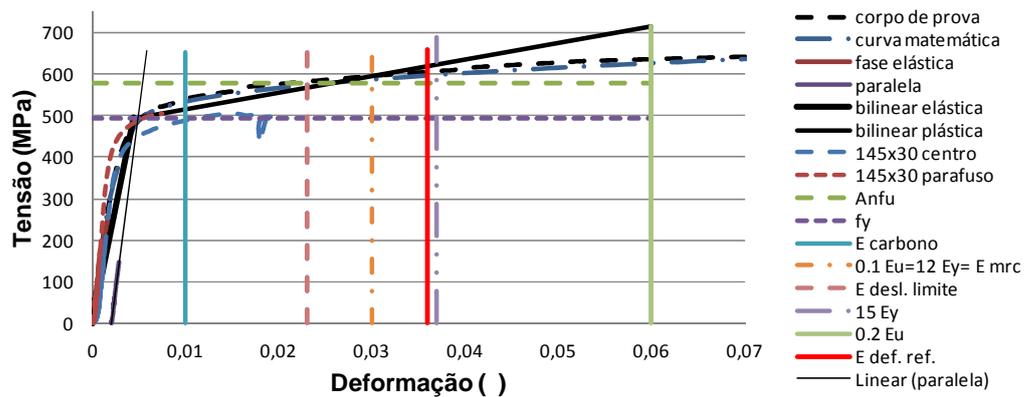


Figura 6.6 – Análise das deformações limite do aço inoxidável duplex

Tabela 6.7 – Coeficientes redutores para o aço inoxidável duplex

Análise	Tensão limite (MPa)	Deformação limite ( )	Coefficiente redutor
1	520	carbono = 0,010	0,73
2	590	$12 \sigma_y = 0,030$	0,82
3	590	$0,1 \sigma_u = 0,030$	0,82
4	590	MRC = 0,030	0,82
5	570	desl.limite = 0,023	0,80
6	716	$0,2 \sigma_u = 0,084$	1,00
7	610	ref = 0,036	0,85

O resultado apresentado pelo MRC novamente se mostra válido ao apontar o fator 0,82, inferior ao encontrado nos ensaios experimentais, 0,88, mostrado no gráfico da Figura 5.37, e que poderá ser indicado para definir o estado limite último para a ruptura na seção líquida da ligação aparafusada. Esse fator definido pelo MRC também é inferior ao fator 0,85, retirado da deformação específica de referência, para evitar o escoamento da seção bruta. Pode também ser utilizado, conservadoramente, o coeficiente 0,73 correspondendo ao deslocamento limite do aço carbono. Nos ensaios com o aço inoxidável duplex foi usado  $12 \sigma_y$ , pois  $15 \sigma_y$  ultrapassa o limite de  $0,1 \sigma_u$ .

### 6.3.3 Aço inoxidável ferrítico

Utilizando-se os dados experimentais dos ensaios com o inoxidável ferrítico e os resultados apresentados na Tabela 6.8 foi possível construir o gráfico mostrado na

Figura 6.7. Nesse gráfico é possível identificar as tensões limites levando-se em consideração o aumento de resistência por encruamento. As tensões limites são apresentadas na Tabela 6.9, assim como o coeficiente obtido da razão entre a tensão limite de ruptura e a tensão limite, que deverá ser adotado para cálculo no modo de ruína por ruptura da seção líquida.

Tabela 6.8 – Deformações limites para o aço inoxidável ferrítico

Análise	Equação	Valor de referência	Def. limite ( )
1	$0,9A_n f_u$	Curva Experimental aço carbono	0,010
2	$15 \sigma_y$	$\sigma_y = 0,0017$	0,025
3	$0,1 \sigma_u$	$\sigma_u = 0,28$	0,028
4	MRC <math>15 \sigma_y</math> ou <math&gt;0,1 \sigma_u&lt;="" math&gt;<="" td=""> <td><math>\sigma_y = 0,0017, \sigma_u = 0,28</math></td> <td>0,025</td> </math&gt;0,1>	$\sigma_y = 0,0017, \sigma_u = 0,28$	0,025
5	Curva Experimental	Desl. Limite = 5,8 mm	0,014
6	$0,2 \sigma_u$	$\sigma_u = 0,28$	0,056
7	$A_n \lim / A_g$	$\lim = 0,056$	0,033

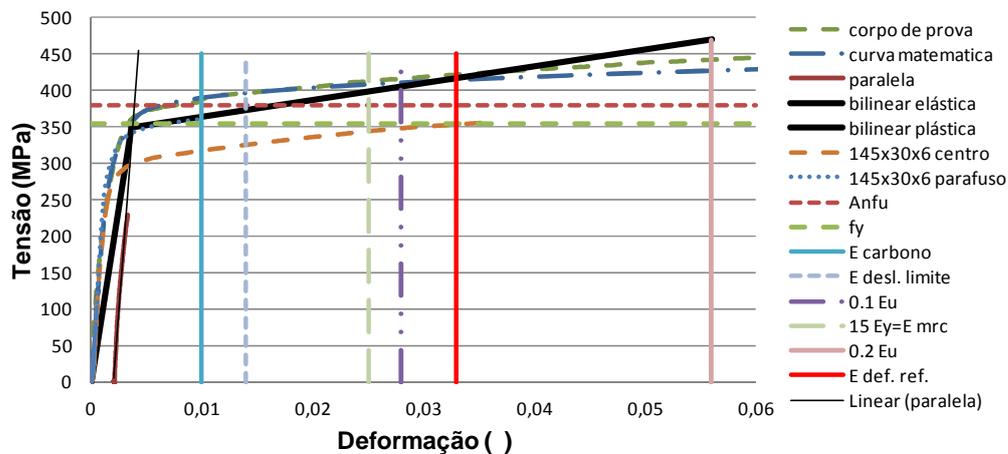


Figura 6.7 – Análise das deformações limite do aço inoxidável ferrítico

Tabela 6.9 – Coeficientes redutores para o aço inoxidável ferrítico

Análise	Tensão limite (MPa)	Deformação limite ( )	Coeficiente redutor
1	365	$\sigma_{carbomo} = 0,010$	0,78
2	395	$15 \sigma_y = 0,025$	0,84
3	405	$0,1 \sigma_u = 0,028$	0,86
4	395	MRC = 0,025	0,84
5	370	desl. limite = 0,014	0,79
6	470	$0,2 \sigma_u = 0,056$	1,00
7	430	$\sigma_{ref} = 0,033$	0,91

O resultado apresentado pelo MRC se mostra válido ao apontar o fator 0,84, inferior ao encontrado nos ensaios experimentais de 0,92, por meio do gráfico da Figura 5.38, e que poderá ser indicado para definir o estado limite último para a ruptura na seção líquida da ligação aparafusada. Para garantir o não escoamento da seção bruta deve-se adotar o fator de 0.81 encontrado com a deformação específica de referência. Sendo mais conservador usar os coeficientes 0,78 ou 0,79 correspondendo, respectivamente, à deformação específica limite e ao deslocamento limite do aço carbono.

Na Tabela 6.10 é apresentado um resumo dos principais coeficientes, encontrados por meio da análise experimental para os três tipos de aços inoxidáveis.

Tabela 6.10 – Fatores de ajuste, ruptura da seção líquida nos aços inoxidáveis

Tipo de aço	Fatores					
	Atual ( $k_r$ )	Experimental corrigido (fator )	Deform. limite carbono	MRC	Desloc. limite carbono	Escoam. seção bruta
Austenítico	1	0,91	0,55	0,66	0,72	0,77
Duplex	1	0,93	0,73	0,82	0,80	0,85
Ferrítico	1	0,96	0,78	0,84	0,79	0,91

#### 6.3.4 Aumento da resistência com MRC

Com as deformações específicas limites do MRC, as tensões limite são encontradas utilizando-se a equação (6.13), e essas são comparadas com as tensões de escoamento utilizadas atualmente para o cálculo estrutural das estruturas. O resultado encontrado, utilizando-se o aspecto benéfico do endurecimento por encruamento do aço, é apresentado na Tabela 6.11. O resumo desse cálculo está no Anexo B.

Tabela 6.11 – Tensão limite de escoamento X tensão limite (MRC)

Tipo de Aço	Deformação limite MRC ( )	Tensão limite (MPa)	Tensão limite de escoamento (MPa)	Diferença das tensões (%)
Carbono – USI 300	0,010	360	340	5,8
Austenítico – S304	0,027	465	350	32,8
Duplex – 2205	0,030	590	494	19,4

Tipo de Aço	Deformação limite MRC ( )	Tensão limite (MPa)	Tensão limite de escoamento (MPa)	Diferença das tensões (%)
Carbono – USI 300	0,010	360	340	5,8
Ferrítico – 430	0,025	395	352	12,2

O MRC, como afirmado anteriormente, reconhece que a resistência estrutural de seções é um processo contínuo, função da sua capacidade de deformação, e controlado pela sua rigidez e, que nesse caso corresponde a tração de configurações aparafusadas em aço inoxidável. Ainda, há propensão à deformação específica local dos elementos constituintes, tendo sido observado também essa deformação específica limite na execução dos ensaios, como mostrado em fotos durante os ensaios no Capítulo 3, não tendo sido detectado deformações específicas locais como esmagamento ou encurtamento da largura na seção líquida dos furos.

Para uma melhor avaliação dos fatores encontrados para os aços inoxidáveis avaliados nesse trabalho foi construída a Tabela 6.12, onde foram encontradas a média e o desvio padrão, com a razão entre a carga última experimental ( $P_e$ ) e a carga calculada teoricamente fatorada pelo fatores encontrados por meio das análises ( $P_x$ ), onde x representa o número da análise realizada anteriormente.

- e1 – carga experimental fatorada pelo fator encontrado nos ensaios;
- 1 – deformação específica limite da configuração aparafusada em aço carbono no rompimento da seção líquida;
- 4 – Método da Resistência Continua;
- 5 – deslocamento apresentado na deformação limite da configuração aparafusada em aço carbono no rompimento da seção líquida;
- 7 – limite referente ao escoamento da seção bruta.

Também são analisados os fatores 0,9 utilizados no aço carbono, 1,0 valor encontrado para o fator  $k_r$  utilizado para o cálculo da resistência do aço inoxidável, e  $P_{esc}$  a carga de escoamento da seção bruta do ensaio.

Tabela 6.12 – Carga última experimental/carga calculada e fatorada

Ensaio	$P_e/P_{e1}$	$P_e/P_1$	$P_e/P_4$	$P_e/P_5$	$P_e/P_7$	$P_e/P_{0,9}$	$P_e/P_{1,0}$	$P_e/P_{esc}$
E23_A_PL_N_145_15_23*	1,04	1,73	1,44	1,32	1,53	1,25	1,12	1,43
E24_A_PL_N_145_15_23	1,11	1,83	1,52	1,40	1,62	1,32	1,19	1,52

Ensaio	$P_e/P_{e1}$	$P_e/P_1$	$P_e/P_4$	$P_e/P_5$	$P_e/P_7$	$P_e/P_{0,9}$	$P_e/P_{1,0}$	$P_e/P_{esc}$
E25_A_PL_N_145_15_26	1,04	1,73	1,44	1,32	1,53	1,25	1,12	1,45
E26_A_PL_N_145_15_30	1,02	1,68	1,40	1,28	1,49	1,21	1,09	1,51
E27_A_PL_N_145_15_30*	1,01	1,67	1,40	1,28	1,49	1,21	1,09	1,51
E28_A_PL_N_145_15_50*	1,06	1,75	1,46	1,34	1,55	1,26	1,14	1,58
E29_A_PL_N_145_6_26	1,08	1,79	1,49	1,37	1,59	1,29	1,17	1,51
E30_A_PL_N_145_6_30	1,01	1,66	1,39	1,27	1,48	1,20	1,08	1,50
E31_A_PL_I_145_6_55	1,01	1,67	1,39	1,27	1,48	1,20	1,08	1,67
E32_A_PL_I_145_6_60	0,97	1,61	1,34	1,23	1,43	1,16	1,05	1,62
E33_A_PL_I_145_6_60	0,91	1,51	1,26	1,15	1,34	1,09	0,98	1,52
E34_A_PL_N_107_6_22	1,18	1,95	1,62	1,49	1,73	1,41	1,27	1,46
E35_A_PL_N_107_6_24	1,04	1,73	1,44	1,32	1,53	1,25	1,12	1,42
E36_A_PL_N_107_6_26	1,07	1,77	1,48	1,36	1,57	1,28	1,15	1,08
E37_A_PP_N_145_6_20	1,02	1,70	1,41	1,30	1,50	1,24	1,12	1,47
E38_A_PP_N_145_6_25	0,93	1,53	1,28	1,17	1,36	1,12	1,01	1,45
E39_A_PP_I_145_8_25	1,07	1,76	1,47	1,35	1,56	1,29	1,16	1,55
E40_A_PP_I_145_6_30	0,84	1,40	1,16	1,07	1,24	1,03	0,92	1,48
E41_A_PP_I_145_8_40	0,93	1,53	1,28	1,17	1,36	1,13	1,01	1,63
E42_A_PP_I_145_8_50	0,96	1,59	1,33	1,22	1,41	1,17	1,05	1,69
E43_A_PP_I_145_8_60	1,03	1,70	1,42	1,30	1,51	1,25	1,13	1,81
E44_A_PP_N_107_6_18	1,02	1,69	1,41	1,29	1,50	1,24	1,12	1,29
E45_A_PP_N_107_6_23	0,97	1,60	1,33	1,22	1,42	1,18	1,06	1,39
E46_D_PL_N_145_8_27	1,05	1,33	1,19	1,21	1,21	1,15	1,04	1,06
E47_D_PL_N_145_8_30	0,94	1,20	1,07	1,09	1,09	1,04	0,93	1,02
E48_D_PL_N_107_6_24	1,12	1,43	1,27	1,30	1,30	1,24	1,11	1,03
E49_D_PL_N_107_8_28	1,04	1,32	1,17	1,20	1,20	1,14	1,03	1,03
E50_D_PP_I_145_8_40	1,04	1,33	1,18	1,21	1,21	1,13	1,01	1,11
E51_D_PP_I_145_6_50	0,95	1,21	1,08	1,11	1,11	1,07	0,97	1,13
E52_D_PP_I_145_8_50	0,95	1,21	1,07	1,10	1,10	1,07	0,96	1,12
E53_D_PP_I_145_8_60	0,97	1,24	1,10	1,13	1,13	1,05	0,95	1,16
E54_F_PL_N_145_6_27	1,05	1,29	1,20	1,27	1,24	1,15	1,03	1,02
E55_F_PL_N_145_6_30	0,99	1,22	1,13	1,21	1,18	1,09	0,98	1,03
E56_F_PL_I_145_6_50	0,97	1,19	1,11	1,18	1,15	1,06	0,96	1,08

Ensaio	$P_e/P_{e1}$	$P_e/P_1$	$P_e/P_4$	$P_e/P_5$	$P_e/P_7$	$P_e/P_{0,9}$	$P_e/P_{1,0}$	$P_e/P_{esc}$
E57_F_PL_I_145_6_55	0,94	1,15	1,07	1,14	1,11	1,03	0,92	1,09
E58_F_PL_N_107_6_24	1,10	1,36	1,26	1,34	1,31	1,21	1,09	0,97
E59_F_PL_N_107_6_28	1,06	1,30	1,21	1,28	1,25	1,16	1,04	1,00
Média	1,01	1,52	1,30	1,25	1,37	1,18	1,06	1,33
Desvio Padrão	0,07	0,23	0,15	0,10	0,18	0,09	0,08	0,25

Para os resultados com os fatores 0,9 e 1,0 foi utilizada a tensão limite de ruptura reduzida ( $f_{ured}$ ) calculada conforme o EUROCODE 3. Para os outros resultados foi utilizada a tensão limite de ruptura ( $f_u$ ) de cada aço inoxidável.

Os resultados com a utilização dos fatores experimentais, como esperado, apresentaram o melhor ajuste com os resultados experimentais.

Os resultados com os fatores de norma 0,9 e 1,0 também apresentaram bom ajuste com os resultados do estado limite último, com a ruptura da seção de seção líquida dos experimentos.

Os três resultados acima não efetivaram um bom limite em consideração a grande deformação específica apresentada nos ensaios, e apenas limitaram os seus resultados em função desse comportamento por meio do  $f_{ured}$ .

O resultado da análise 1 que considera a deformação específica limite do aço carbono apresentou o pior resultado com grande dispersão.

As normas definem também um segundo estado de limite último como sendo o escoamento da seção bruta calculada e apresentada através do  $P_{esc}$ . Considerando-se ainda o escoamento da seção da área bruta foi encontrada uma deformação específica de referência, que levou em consideração a razão entre a seção bruta e seção líquida o ensaio, e o resultado é mostrado na análise 7. Essas duas análises serviram para balizar o comportamento das configurações aparafusadas, apresentadas nesta tese.

Os resultados da análise 5, onde foi usado o deslocamento limite, encontrado nos ensaios com o aço carbono, apresentou um significado físico com maior proximidade dos resultados experimentais e pequena dispersão. Esse resultado depende de valor do deslocamento encontrado experimentalmente.

Analiticamente o MRC, análise 4 parece promissor na previsão da carga última para utilização em projeto, apresentando um melhor resultado e baixa dispersão, inferior ao limite do escoamento da seção bruta pelo método da deformação de referência ( $P_7$ ), e pela equação definida pelas normas ( $P_{esc}$ ). Esse resultado foi ainda confirmado como dos ensaios, apresentadas no

Capítulo 3, onde os ensaios não apresentam deformações específicas significativas.

O presente capítulo apresentou o MRC e seu ajuste para estruturas aparafusadas sob tração e os resultados obtidos com esse método.