

2

Revisão Bibliográfica

Esse capítulo aborda os estudos experimentais e teóricos de sistemas de ligações estruturais que apresentam comportamentos mecânicos significativos para a análise da ligação aparafusada em estudo.

Nesta revisão bibliográfica são apresentados os resultados de trabalhos publicados, que têm a proposta de avaliar o comportamento de diferentes tipos de aço à tração e à compressão.

Para entender o comportamento mecânico da ligação aparafusada é mostrado o que determina a norma europeia EUROCODE 3 Parte 1.1 (2003) para o cálculo da ligação aparafusada, uma avaliação da equação desenvolvida por Cochrane (1922), além de uma apresentação de um modelo analítico, que analisa a compatibilidade e o equilíbrio nas transferências das cargas por meio dos parafusos (J. W. Fisher e J. L. Rumpf, 1965).

2.1**Estudo de ligações tracionadas com rebites sujeitos a cisalhamento (D’Aniello et al., 2011)**

Uma investigação experimental do comportamento de ligações em aço carbono à tração com rebites em cisalhamento foi realizada por M. D’Aniello *et al.* (2011), mostrando que quanto maior a força com a qual se fixa o rebite à quente, maior a resistência da ligação. A variação dessa força de fixação promove diferentes tipos de rupturas e grandes diferenças na distribuição de solicitações.

Nos ensaios realizados foi observado o efeito de momento fletor atuante nas ligações com pequeno número de rebites, desaparecendo esse efeito quando a ligação era estendida com maior número de rebites. Esse comportamento alerta para o tipo de ligação que deve ser usada nesta tese, para se obter resultados igualmente importantes para avaliação da ligação aparafusada. As ligações romperam com carga 20% superior à prevista pelo EUROCODE 3 – Parte 1-8 (2003) nas seções líquidas, mostrando o aspecto conservativo para esse estado limite último. O estudo aponta para um melhor controle no cálculo de ligações com rebites, considerando-se o cisalhamento

desses e a ruptura na seção líquida, preservando a simplicidade de procedimento de verificação dado pelo referido Código.

2.2

Estudo das ligações soldadas (Steven et al., 2011)

O estudo desenvolvido por Steven A. Oosterhof, Robert G. Driver (2011) tinha como objetivo estudar o comportamento da ligação soldada considerando a geometria e o arranjo da solda.

Os ensaios serviriam para validar um modelo de elementos finitos que foi usado em um estudo paramétrico com diversas geometrias e arranjos de solda. Os resultados confirmaram que as diferenças entre os resultados experimentais e teóricos são muito pequenas para que seja realizada alguma outra modificação no cálculo, concluindo que ligações com soldas longitudinais (tipo B), conforme apresentado na Figura 2.1, garantem a capacidade de resistência da ligação. Outra conclusão observada foi que a adição de uma solda transversal (tipo A), também apresentada na Figura 2.1, não aumenta a capacidade de cisalhamento das ligações soldadas de forma significativa.



Figura 2.1 – Ligações soldadas (Steven et al., 2011).

Com as análises observadas, apesar de ser uma ligação soldada, permite apontar a importância da distribuição das solicitações ao longo da ligação aparafusada na direção da aplicação da carga. Esse comportamento mostra ainda que o reforço em uma determinada seção não aumenta a resistência da ligação, fato que também será analisado nesta tese ao se comparar a resistência da ligação com parafusos em linha e a ligação de parafusos alternados.

2.3

Estudo de ligações em compressão com chapas de preenchimento (Borello et al., 2011)

O estudo do comportamento e do desempenho de ligações em compressão com chapas de preenchimento foi abordado por Borello *et al.* (2011), conforme mostrado na Figura 2.2. Foram observados grandes escorregamentos e cisalhamento prematuro de parafusos, devido à concentração de tensões, verificando-se que alguns parafusos apresentaram solicitações de cisalhamento elevados enquanto que em outros, essas solicitações eram praticamente nulas. Ainda foi possível determinar que a adição de mais chapas reduzia a resistência ao escorregamento, sendo constatado que o número de chapas era mais importante que a espessura da placa e o diâmetro do furo, para impedir o deslizamento das chapas. Observou-se ainda que a resistência do parafuso ao cisalhamento diminuiu com a redução da espessura da placa.



Figura 2.2 – Ligações em compressão (Borello *et al.* , 2011).

Essas observações também foram estudadas nesta tese ao se analisar as roscas nos parafusos utilizados em ligações com chapas grossas em comparação com ligações utilizando chapas finas, e a verificação comparativa entre os desgastes.

Em outro trabalho similar desenvolvido por Denavit *et al.* (2011), com chapas de preenchimento em compressão, verificou-se que vários mecanismos influenciaram no comportamento da ligação. Com essa consideração estudou-se

o efeito das chapas de preenchimento na resistência ao cisalhamento e ao escorregamento, abordando ainda o efeito de multichapas, ou seja, muitas chapas trabalhando na ligação e a efetividade do desenvolvimento dessa ligação estendida. Uma análise estocástica para identificar a quantidades de efeitos para o deslizamento das superfícies adicionais na resistência ao escorregamento da ligação foi realizada.

As principais conclusões desse estudo foram:

- a redução da resistência de escorregamento cresce com o aumento do número de chapas;
- com o desenvolvimento da ligação, por meio da colocação de chapas de enchimento anula alguns, mas não todos, os mecanismos prejudiciais, dependendo da análise de quantos conjuntos de parafusos adicionais sejam necessários;
- estendendo-se a ligação para acomodar mais parafusos verificou-se que os efeitos prejudiciais da colocação de mais chapas foram anulados, dependendo de como e quantos parafusos adicionais forem incorporados.

Com a neutralização de mecanismos de flexão nos parafusos e de esmagamento com desbaste no interior do furo, os efeitos prejudiciais de chapas adicionais sobre a resistência ao cisalhamento foram descritos. Observando-se esses mecanismos e os dados experimentais, pode-se determinar que:

- para chapas finas a resistência ao cisalhamento da ligação é reduzida em função da espessura das chapas de enchimento, que promovem o efeito de flexão nos parafusos devido a distância entre chapas. No entanto, o esmagamento dos parafusos dentro do furo cresce com o aumento da espessura da placa. Com a redução da espessura esse efeito alcança um mínimo, e eventualmente, desaparece;
- múltiplas chapas retardam o desgaste dentro do furo, porém, adicionam outros efeitos prejudiciais;
- chapas estendidas usadas na ligação com a função de acomodar o trabalho dos parafusos, mostraram ser soluções viáveis para diminuir os efeitos prejudiciais na resistência ao cisalhamento.

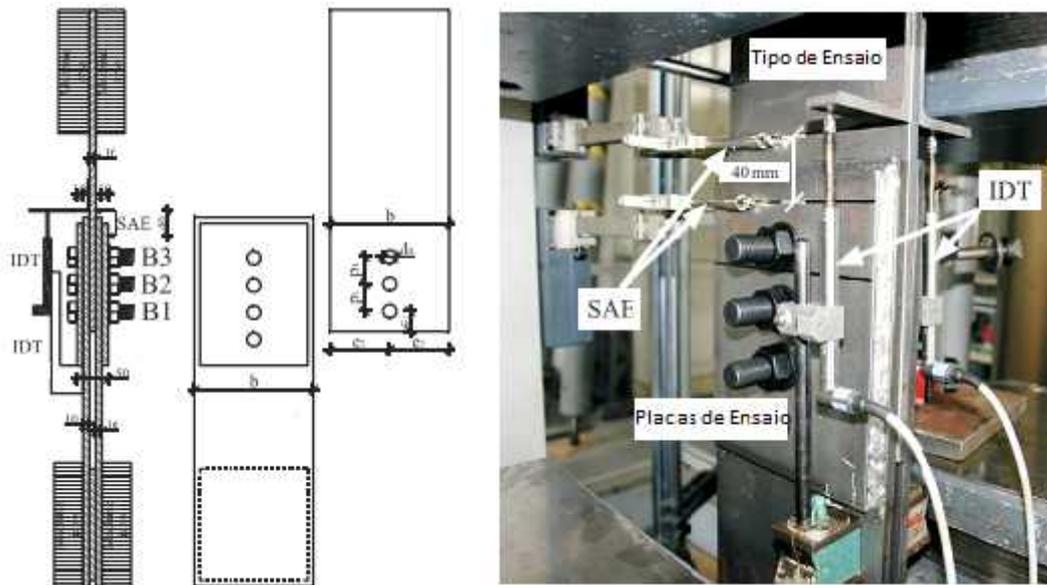
Os efeitos da influência da espessura da chapa serão estudados nesta tese, por meio da utilização de configurações diferentes dos ensaios, analisando-se a distribuição das forças, o efeito do esmagamento na chapa e no parafuso.

2.4

Estudo de ligações em duplo cisalhamento (Može e Beg, 2011)

Um outro trabalho importante de ligações aparafusadas com duplo cisalhamento nos parafusos, constituídas de aço de alta resistência foi realizado por Primož Može e Darko Beg (2011), como mostrado na Figura 2.3.

Observou-se que o processo de fabricação dos experimentos não provocou nenhum efeito sobre o seu comportamento mecânico esperado, mas o atrito teve papel importante no mecanismo de ruptura. Verificou-se que, com um alongamento de $1/6$ do diâmetro do parafuso, os parafusos atingiram a resistência máxima, mostrando que, por meio de modelos numéricos de Kim e Yura (1999) e Aalberg e Larsen (2001, 2002), a influência do aumento da força no parafuso pode conduzir a um alongamento de até $3d_0$. Foram considerados dois tipos de distribuição das forças de esmagamento com diferentes distribuições de força nos parafusos, onde se conclui que o EUROCODE 3 – Parte 1-8 (2003) apresenta resultados conservadores para as forças que produzem esmagamento na seção líquida da ligação.



(a) Esquema do ensaio

(b) Ensaio montado

Figura 2.3 – Ligação com cisalhamento duplo nos parafusos (Može e Beg, 2011).

O conhecimento da distribuição das forças de esmagamento é o fator chave na identificação do correto mecanismo de ruptura para conhecer a

resposta dúctil da ligação. Uma das possíveis soluções para a correta estimativa das forças de esmagamento entre os parafusos é apresentada por Primoz Moze e Darko Beg (2010), onde propõem uma fórmula modificada de resistência ao esmagamento, a qual atende com sucesso a diferentes tipos de ruptura. Essa equação foi deduzida da análise das razões das distâncias à borda (e_1/e_2), conforme Figura 2.3, que é implementada em função da resistência ao esmagamento. Adicionando-se coeficientes a fórmula, pode-se resolver ligações com maior número de parafusos na direção da força de esmagamento. A vantagem desse estudo é que a soma das forças de esmagamento deve apresentar a resistência máxima da ligação e os desejados modos de falha podem ser verificados.

2.5

Estudo de ligações com ruptura por esmagamento em aços inoxidáveis (Salih et al., 2011)

Um estudo da ruptura por esmagamento em ligações aparafusadas constituídas por aço inoxidável austenítico e ferrítico, com corte duplo ou simples, com chapas grossas e finas, conforme mostrado na Figura 2.4, foi elaborado por Salih *et al.* (2011) e mostra um estudo da variação dos parâmetros e_1/d_0 e e_2/d_0 , além de avaliar as percentagens equivalentes de deformações em diversos ângulos dos furos, dos parafusos e posições da chapa. As curvas tensão *versus* deformação específica do aço inoxidável apresentam comportamento mecânico diferente das curvas do aço carbono, com maior resistência ruptura, devido a grande capacidade de desenvolver deformações plásticas dos aços inoxidáveis. Com vistas a aumentar os estudos para esse tipo de material foram realizados esses ensaios em aço inoxidável.

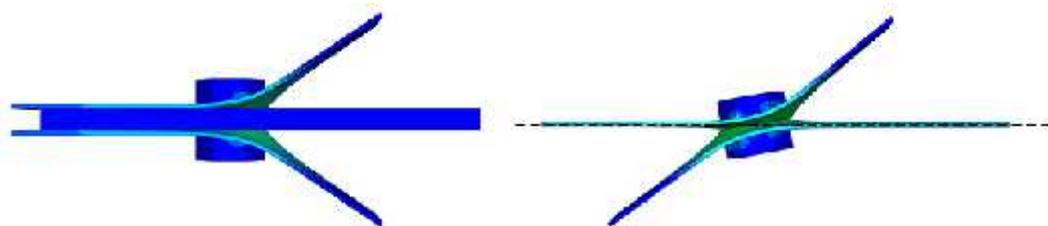


Figura 2.4 – Resultados numéricos de ligações (Salih *et al.*, 2011).

Ainda nesse estudo são apresentadas diferentes definições de ruptura concebidas para as ligações constituídas de aços inoxidáveis, e projetos de equações para se obter a resistência ao esmagamento na borda do furo que

atendam aos casos de chapas finas e grossas, considerando-se determinadas restrições e limitações da capacidade de deformação da ligação em serviço. Propostas foram realizadas baseadas em ensaios experimentais disponíveis e resultados numéricos gerados, utilizando-se o parâmetro f_u do aço inoxidável e não $f_{u,red}$, como preconiza o EUROCODE 3 – Parte 1-4 (2003), facilitando dessa forma a utilização da norma. Essa mesma concepção foi utilizada nesta tese.

O Método da Resistência Contínua representa um tratamento alternativo para avaliação da seção resistente, que é baseada em uma relação direta entre esbeltez e tensão aplicada, convergindo para um melhor aproveitamento racional do encruamento do aço na deformação. Um desenvolvimento inicial e a aplicação do Método da Resistência Contínua no projeto de estrutura metálica é descrito no Capítulo seis dessa tese.

Nesse trabalho o método da resistência contínua foi adaptado para possibilitar uma melhor classificação das seções transversais quanto a sua resistência. O nível de melhoria na resistência oferecida pelo Método de Resistência Contínua sobre os métodos convencionais de projeto para estruturas de aço foi encontrado como sendo de aproximadamente 12% para casos de resistência à compressão, e de 15% na resistência à flexão, existindo também uma redução na dispersão dos resultados. Uma vantagem adicional da abordagem proposta é que a capacidade de deformação da seção é explicitamente determinada nos cálculos, permitindo assim, que uma mais sofisticada e avançada ferramenta de avaliação da resistência e da capacidade de ductilidade seja aplicada.

Nesta tese adaptou-se, de forma geral o Método da Resistência Contínua para avaliar o comportamento de ligações com os aços inoxidáveis: austenítico, ferrítico e duplex, promovendo um melhor aproveitamento na utilização desses aços na ligação aparafusada. Esse método será melhor descrito e desenvolvido no Capítulo seis dessa tese.

2.6

Comportamento mecânico de ligação aparafusada

As ligações aparafusadas apresentam cinco formas ou modos básicos de ruína, conforme apresentado na Figura 2.5.

No caso (a) da Figura 2.5, ocorre uma ruptura da seção transversal líquida da peça, ou seja, da seção que resulta da subtração da área de furos de sua seção bruta.

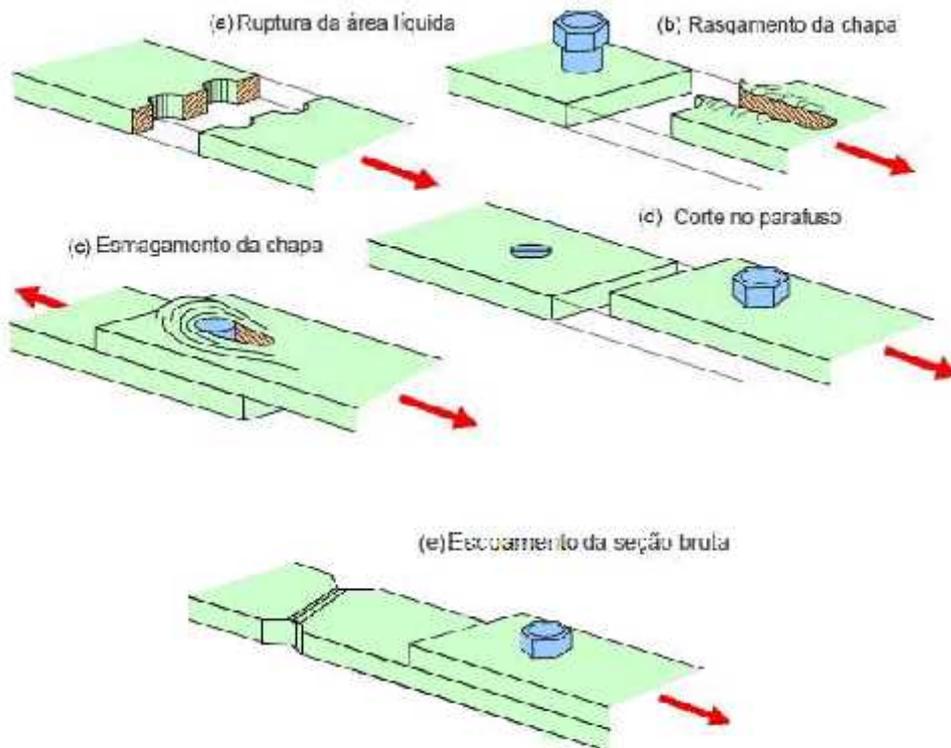


Figura 2.5 – Estados limites últimos em chapa aparafusada
(chasqueweb.ufrgs.br).

Quanto mais furos estiverem presentes na seção bruta da peça, menor será a sua seção líquida, e por conseguinte a sua resistência, o que pode levar à ruptura. No caso (b) ocorre uma ruptura por rasgamento da peça devido à presença do parafuso mais resistente, provocando tensões cisalhantes na chapa. A ruptura entre o furo e a borda só ocorre se, na chapa, a distância disponível resistente ao rasgamento for insuficiente. Mais à frente serão mostrados os parâmetros da ligação aparafusada e as suas limitações. No caso (c) ocorre uma ruptura por esmagamento da chapa, também devido à presença do parafuso. Esse esmagamento ocorre devido às altas tensões de compressão que se processam na superfície de contato do parafuso com a chapa. No caso (d) ocorre a ruptura do parafuso por cisalhamento, caracterizada quando um número insuficiente de parafusos é adotado. Finalmente no caso (e) ocorre o escoamento da seção bruta.

Esta tese trata, especificamente, dos modos de falha onde ocorre a ruptura da seção líquida, Figura 2.5 (a) em ligações aparafusadas de chapas formadas a frio. Portanto, a seguir serão apresentados os parâmetros que governam os respectivos estados limites últimos da ligação, e os respectivos

limites de geometria com as prescrições para o dimensionamento dessas ligações aparafusadas, presentes nas principais normas técnicas de estruturas de aço vigentes em diversos países.

2.7

Identificação dos parâmetros da ligação aparafusada

Na Figura 2.6 são apresentados os parâmetros geométricos t e L que representam, respectivamente, a espessura e a largura da chapa na ligação estudada.

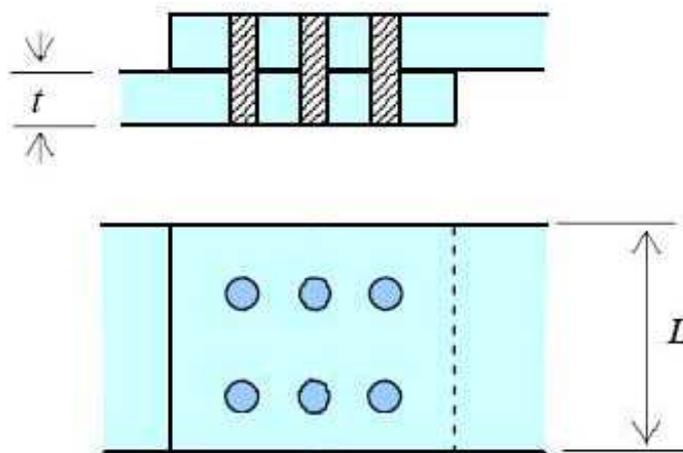


Figura 2.6 – Definição dos parâmetros L e t (www.chasqueweb.ufrgs.br).

Na Figura 2.7 são apresentados os parâmetros geométricos s e p que representam, respectivamente, as distâncias entre parafusos na direção paralela a aplicação da força e na direção perpendicular a aplicação da força, além dos parâmetros geométricos e_1 e e_2 , que representam, respectivamente, as distâncias dos furos até as bordas paralela e perpendicular, a direção da aplicação da força medidas a partir do centro do furo.

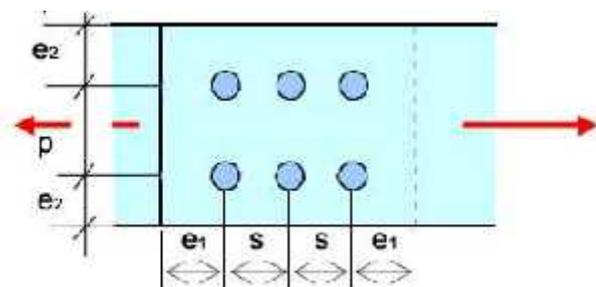


Figura 2.7 – Definição dos parâmetros e_1 , e_2 , s e p .

E na Figura 2.8 apresentam-se os espaçamentos máximos e mínimos utilizados pelo EUROCODE 3 – Parte 1-8 (2003).

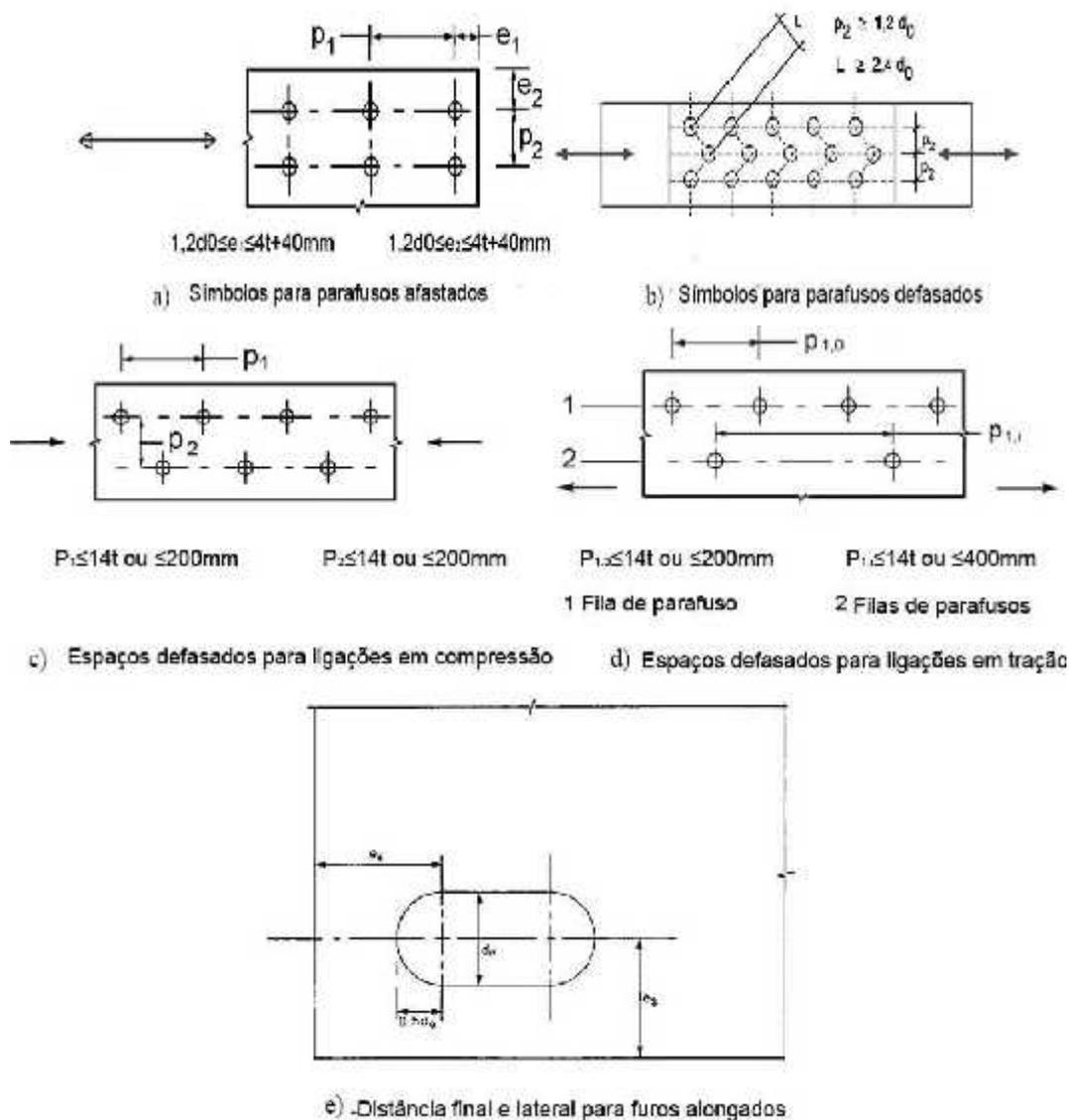


Figura 2.8 – Limitação de parâmetros geométricos – EUROCODE 3 (2003).

2.8

Dimensionamento de ligações aparafusadas segundo o EUROCODE 3 (2003)

2.8.1 Dimensionamento de Ligações em Aço Carbono

O EUROCODE 3 – Parte 1.1 (2003), para dimensionamento de ligações aparafusadas em estruturas de aço constituídas de aço carbono, apresenta similar consideração da NBR 8800 (2008), que estabelece em seu item 7.2.3 os

critérios de avaliação da resistência de projeto das ligações aparafusadas submetidas à tração.

Esses critérios abrangem basicamente dois estados limites últimos a saber: o escoamento da seção bruta e a ruptura da seção líquida da chapa da ligação aparafusada, dados, respectivamente, pelas equações (2.1) e (2.2).

Deve se ressaltar que a equação (2.3) deve sempre ser atendida:

$$N_{pl,rd} = \frac{(A \times f_y)}{\gamma_{M0}} \quad (2.1)$$

$$N_{u,rd} = \frac{(0,9 \times A_{net} \times f_u)}{\gamma_{M2}} \quad (2.2)$$

$$\frac{N_{u,rd}}{N_{t,rd}} \geq 1,0 \quad \frac{N_{pl,rd}}{N_{t,rd}} \geq 1,0 \quad (2.3)$$

onde

$N_{t,rd}$ – força normal de tração de projeto da ligação;

A – menor área bruta da seção transversal da ligação;

A_{net} – seção líquida, sendo reduzida pelo coeficiente 0,9;

f_y – tensão limite de escoamento;

f_u – tensão limite de ruptura a tração da chapa;

γ_{M0} e γ_{M2} – coeficientes de resistência.

Nesse trabalho, os coeficientes de resistência foram considerados iguais a 1,0 para o dimensionamento das ligações aparafusadas a serem utilizadas nos testes experimentais, e assim calibrar o real comportamento da ligação aparafusada em estudo.

O coeficiente 0,9 da equação (2.2) é adotado para garantir a menor probabilidade de ruína, através da utilização do coeficiente de confiabilidade () tomado no máximo entre 3 e 4 desvios padrões do resultado da diferença possível entre os valores teóricos e os experimentais.

A determinação deste coeficiente entre 3 e 4 desvios padrões é necessária para garantir uma probabilidade de falha entre 10^{-4} e 10^{-5} para a ruptura da seção líquida. O coeficiente de 0,9 foi obtido por meio de um grande número de resultados experimentais. Uma análise similar foi feita com os resultados apresentados nesta tese dos aços inoxidáveis, conforme apresentado no capítulo 5. O gráfico mostra ser o fator de 0,9 o mais conservador e próximo da igualdade da força última experimental com a força fatorada calculada.

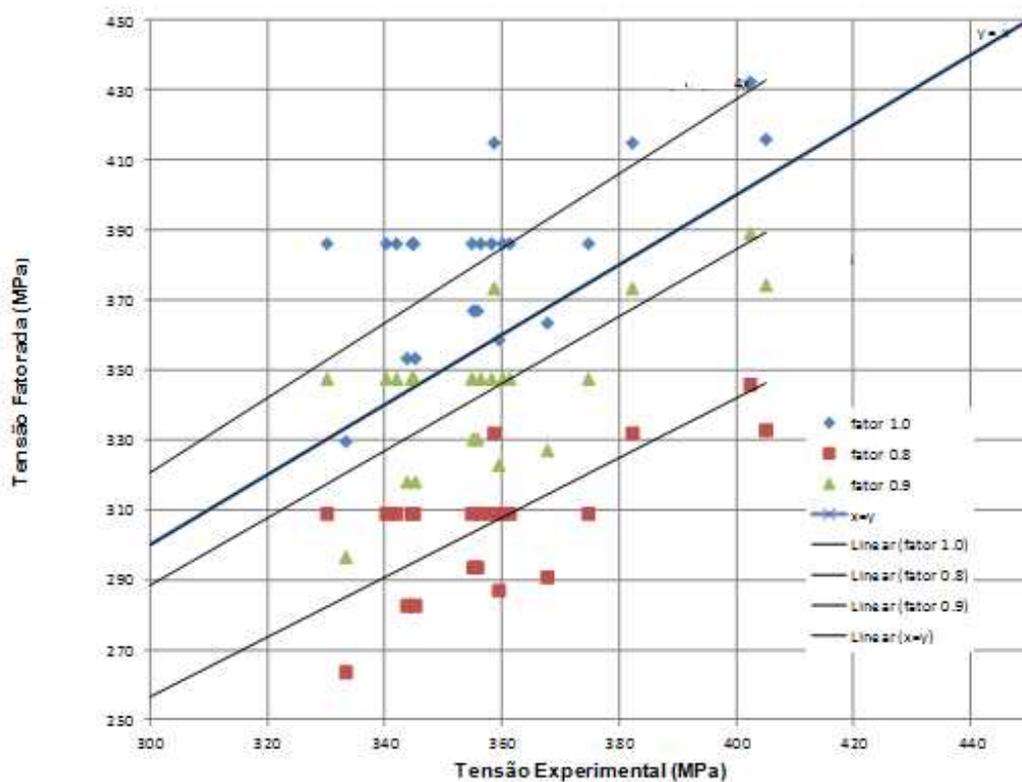


Figura 2.9 – Gráfico da análise do fator 0,9 de dedução da seção líquida (aço carbono).

A Tabela 2.1 mostra os resultados das razões entre as tensões fatoradas com a utilização dos fatores 1,0, 0,9 e 0,8, e as tensões experimentais obtidas nesta tese.

A Tabela 2.2 mostra que um fator de 0,95 pode ser usado para o cálculo da ruptura na seção líquida. O EUROCODE 3 Parte 1.1 (2003) utiliza o fator 0,9, sendo esse fator conservativo para os resultados obtidos nesta tese. O desvio padrão amostral de 5% mostra-se aceitável para os resultados experimentais.

Tabela 2.1 – Análise de fatores de redução da seção líquida para o aço carbono

ENSAIO	σ_{exp} (MPa)	$\sigma_{1,0}$ (MPa)	$\sigma_{0,9}$ (MPa)	$\sigma_{0,8}$ (MPa)	$\sigma_{exp}/\sigma_{1,0}$	$\sigma_{exp}/\sigma_{0,9}$	$\sigma_{exp}/\sigma_{0,8}$
145x30x6	343,92	382,28	344,06	305,83	0,90	1,00	1,12
145x25x6	360,4	362,77	326,49	290,21	0,99	1,10	1,24
107x30x6	344,66	347,91	313,12	278,33	0,99	1,10	1,24
107x25x6	332,63	321,47	289,32	257,17	1,03	1,15	1,29
145x30x6	358,23	382,28	344,05	305,82	0,94	1,04	1,17
145x40x6	359,51	382,28	344,05	305,82	0,94	1,04	1,18
145x35x6	339,38	382,28	344,05	305,82	0,89	0,99	1,11
145x30x8	352,26	382,28	344,05	305,82	0,92	1,02	1,15
145x30x10	354,53	382,28	344,05	305,82	0,93	1,03	1,16
145x30x12	328,66	382,28	344,05	305,82	0,86	0,96	1,07
145x30x15	364,05	382,28	344,05	305,82	0,95	1,06	1,19
145x50x15	359,57	382,28	344,05	305,82	0,94	1,05	1,18
145x30x15	340,23	382,28	344,05	305,82	0,89	0,99	1,11
145x30x10	355,74	382,28	344,05	305,82	0,93	1,03	1,16
145x30x8	374,71	382,28	344,05	305,82	0,98	1,09	1,23
145x50x15	358,62	382,28	344,05	305,82	0,94	1,04	1,17
145x70x15	401,72	382,28	344,05	305,82	1,05	1,17	1,31

Tabela 2.2 – Média de fatores de redução da seção líquida para o aço carbono

	$\sigma_{exp}/\sigma_{1,0}$	$\sigma_{exp}/\sigma_{0,9}$	$\sigma_{exp}/\sigma_{0,8}$
Média	0,95	1,05	1,18
Desvio Padrão Amostral	0,05	0,05	0,05

A seção líquida da seção transversal é usualmente obtida com a seguinte expressão:

$$A_{net} = A - n \times d \times t \quad (2.4)$$

onde

A – área da seção bruta da peça tracionada;

n – quantidade de furos contidos na linha de ruptura da seção transversal;

d – diâmetro do furo na direção perpendicular à sollicitação;

t – a espessura da parte conectada em análise.

Para configurações aparafusadas com parafusos defasados utiliza-se a fórmula desenvolvida por Cochrane (1922), e ainda presente no EUROCODE 3, Parte 1.1, item 6.2.2.2. (2005), para o cálculo da seção líquida:

$$A_{\text{net}} = A - t \left[n \times d - \sum \left(\frac{s^2}{4 \times p} \right) \right] \quad (2.5)$$

onde

s – distância entre os centros dos furos na direção de aplicação da força;

p – distância entre os centros dos furos na direção perpendicular a aplicação da força, conforme Figura 2.7.

2.8.2 Dimensionamento de Ligações em Aço Inoxidável

Para o dimensionamento de ligações aparafusadas constituídas de aço inoxidável foi utilizado o EUROCODE 3 – Parte 1.4 (2005), pois a NBR 8800 (2008) não apresenta formulações para estruturas em aço inoxidável. O código europeu estabelece, em seu item 5.3.3, que a resistência à tração deverá ser o menor valor entre a resistência plástica da seção bruta, $N_{pl,rd}$ e a resistência última da seção líquida $N_{u,rd}$, obtidas por meio das equações (2.6) e (2.7), respectivamente:

$$N_{pl,rd} = \frac{(A \times f_y)}{\gamma_{M0}} \quad (2.6)$$

$$N_{u,rd} = \frac{(k_r \times A_{\text{net}} \times f_u)}{\gamma_{M2}} \quad (2.7)$$

onde

$$k_r = \left(1 + 3r \left(\frac{d}{u} - 0,3 \right) \right) \leq 1,0 \quad (2.8)$$

Sendo que r é o número de parafusos em uma seção dividido pelo número total de parafusos da ligação e o valor de u, dado por $2e_2$, que é o dobro da distância entre o centro do furo até a borda da chapa na direção perpendicular a direção da força, porém, menor ou igual a p_2 , que é a distância entre os centros dos furos na direção perpendicular à direção da força aplicada.

Embora a resistência ao esmagamento de uma ligação aparafusada em aço inoxidável seja normalmente governada pela limitação do alongamento do furo, uma verificação em separado deve ser realizada para prevenir esse efeito no seu estado limite último, substituindo-se o f_u por $f_{u,red}$ dado pela equação:

$$f_{u,red} = 0,5f_y + 0,6f_u \quad (2.9)$$

Assim, são apresentadas as fórmulas necessárias para o cálculo da ligação aparafusada com furação alternada, seguindo as orientações do EUROCODE 3 – Parte 1.4 (2005).

2.9

Análise da razão $s^2/4p$

Um dos primeiros métodos teóricos de avaliação do efeito de parafusos alternados considerava que os efeitos da resistência na seção líquida transversal da ligação aparafusada, com parafusos em linha e na seção transversal dos parafusos alternados, eram iguais quando a máxima tensão era atingida (Cochrane, 1908).

Godfrey (1922), no mesmo ano, verificou que a regra de tensões iguais dava excessivas deduções de área de seção da peça e que testes realizados mostraram ser essa regra menos correta que a regra de áreas iguais (Edward Godfrey, 1922).

Uma proposta generalizada é apresentada para ser usada com segurança, simplificando as regras por meio do método de deduções fracionadas (Cochrane, 1922). Tendo-se em vista que uma simples fórmula ($s^2/4p$) poderia ser escrita para ambos os casos. Para se obter essa fórmula fez-se a seguinte consideração, conforme apresentado na Figura 2.10: quando o valor do parâmetro s (distância entre centro de furos na direção da aplicação da força) for zero, a dedução seria o próprio furo, conforme fórmula $(\sqrt{p^2 + s^2} - d_0)$; já quando o parâmetro s cresce, a dedução decresce muito rapidamente podendo assim, considerar-se a formula $w=d_0-cs^2$, onde Cochrane, no seu artigo de 1922, acha razoável assumir que a dedução w se comporta variando a uma proporção quadrática de " s ", onde w é o valor que deve ser retirado da área transversal, e c é o valor de uma constante.

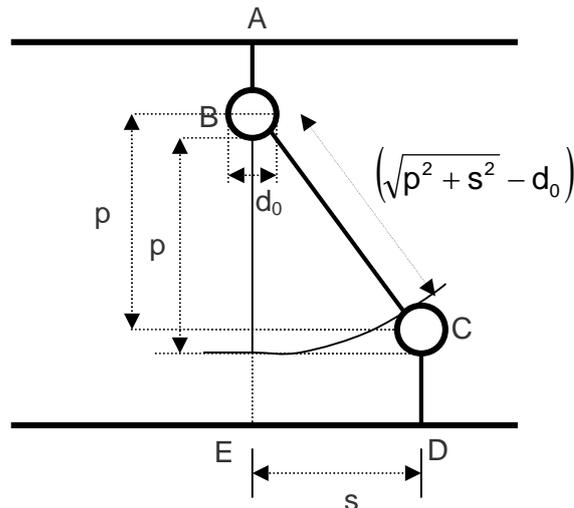


Figura 2.10 – Estudo de ligações: parafusos alternados (Cochrane, 1922).

Essa mesma fórmula é usada em diversas normas de projeto para determinar a dedução a ser realizada quando se usam furos alternados na avaliação da seção líquida.

Parece provável que essa regra tenha sido desenvolvida quando o aço usado era de resistência moderada, sendo esse o único tipo de aço estrutural que estava em uso na maioria dos países. Não está claro até que ponto os efeitos do endurecimento do aço e o valor da relação de tensão limite de escoamento para resistência à tração podem ter sido já cobertos pela fórmula, pois seu caráter é empírico. Porém, não existem testes suficientes na literatura para se conferir esse efeito.

O EUROCODE 3, Parte 1.8 (2005) para dimensionamento de ligações aparafusadas em estruturas de aço também estabelece os critérios de avaliação da menor resistência na região dos parafusos, a serem observados no cálculo de ligações aparafusadas submetidas à tração.

Nesse trabalho foram utilizados os seguintes critérios para avaliar a resistência dos parafusos: resistência ao cisalhamento por cada plano de corte, equação (2.10), e resistência ao esmagamento, equação (2.11):

$$F_{v,rd} = \frac{(\alpha_v \times f_{up} \times A)}{\gamma_{M2}} \quad (2.10)$$

$$F_{b,rd} = \frac{(k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t)}{\gamma_{M2}} \quad (2.11)$$

onde

f_{up} – tensão limite de ruptura do parafuso;

v tem seu valor definido em norma, em função do tipo de parafuso e localização do plano de ruptura.

b – menor valor entre

f_u – tensão de ruptura da chapa

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_d \\ f_{ub}/f_u \\ 1,0 \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Sendo que:

– α_d é analisado na direção da transferência da força: sendo definido para os parafusos localizados na borda igual a $e_1/3d_0$; e para os parafusos centrais igual a $p_1/3d_0-1/4$.

– k_1 é analisado na direção perpendicular à transferência da força sendo definido: para os parafusos da borda, conforme equação (2.11): $2,8e_2/d_0-1,7$ ou $2,5e_2$ para os parafusos centrais: $1,4p_2/d_0-1,7$ ou; $2,5$. Onde o menor valor é sempre adotado. Na Figura 2.8 é mostrado a localização dos parâmetros e_1 , e_2 , p_1 e d_0 .

2.10

Estudo de compatibilidade e equilíbrio da ligação aparafusada

A formulação analítica utilizada nesta tese é baseada nos estudos de Kulak *et al.* (1965) sobre o comportamento de uma ligação aparafusada. Essa formulação foi modificada para a análise da ligação aparafusada defasada, levando-se em conta a variação da quantidade de parafusos entre as seções.

A solução para determinar a força individual em cada parafuso e em cada seção da ligação é encontrada por meio de equações de equilíbrio e de compatibilidade. O requerimento de equilíbrio e compatibilidade pode ser analisado, Figura 2.11, onde a força na placa principal entre os parafusos i e $i+1$ é igual a força total menos a soma das forças dos parafusos entre a seção analisada como mostra a equação (2.13).

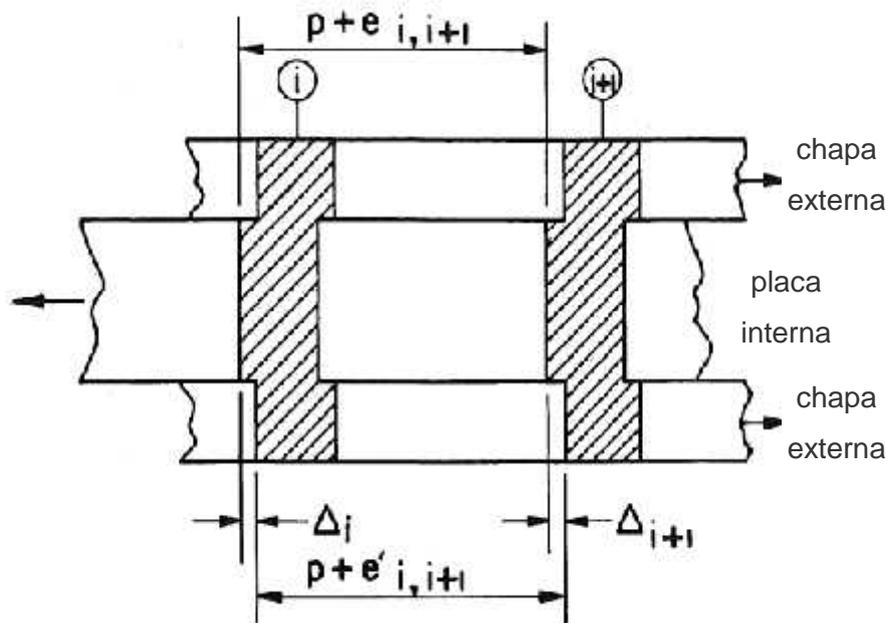


Figura 2.11 – Esquema do comportamento mecânico (Kulak, 1965).

O equilíbrio na seção líquida considerada entre dois parafusos da ligação em estudo é dada pela força aplicada na placa interna entre os parafusos i e $i+1$, sendo igual a força total menos a força resistida por cada seção de parafusos da ligação, conforme apresentada na equação (2.13).

$$P_{i,i+1} = P - \sum_{i=1}^i R_i \quad (2.13)$$

O somatório das forças aplicadas nas chapas externas entre as seções dos parafusos i e $i+1$ é dado por:

$$Q_{i,i+1} = \sum_{i=1}^i R_i \quad (2.14)$$

Ressalta-se que a distância entre as seções i e $i+1$ é o valor do parâmetro p .

A equação completa da condição de compatibilidade nessa seção entre esses mesmos dois parafusos pode ser formulada pela equação (2.15) ou simplesmente pela equação (2.16):

$$\Delta_i + p + e'_{i,i+1} = \Delta_{i+1} + p + e_{i,i+1} \quad (2.15)$$

$$\Delta_i + e'_{i,i+1} = \Delta_{i+1} + e_{i,i+1} \quad (2.16)$$

onde Δ_i e Δ_{i+1} são deformações nos parafusos; $e'_{i,i+1}$ é o alongamento na placa externa; $e_{i,i+1}$ é a alongamento na placa interna, sendo esses parâmetros são observados na Figura 2.11.

Para o modelo do comportamento mecânico do parafuso ao cisalhamento, levando-se em consideração as condições de contorno, encontra-se a equação (2.17), onde o intervalo dessa equação abrange o zero até a força última passando da fase elástica para a fase plástica determinado por Kulak (1965).

$$R = \tau_l [1 - e^{-\mu\Delta}]^{\lambda} \quad (2.17)$$

onde R é a força atuante na seção dos parafusos.

Em análises realizadas anteriormente, o valor de τ_l foi substituído por R_{ult} , força última, e os outros coeficientes são encontrados por tentativas de aproximação da curva experimental.

Para cada termo da equação de compatibilidade pode-se substituir pela correspondente equação em função da força. Para os parafusos, a deformação pode ser obtida por:

$$\Delta = -\frac{1}{\mu} \ln \left[1 - \left(\frac{R}{R_{ult}} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right] \quad (2.18)$$

Para o deslocamento das placas internas tem-se:

$$e_i = \frac{P_i}{A_g E} (p - d) + \frac{P_i}{A_n E} (d) \quad (2.19)$$

Com um similar raciocínio, para o deslocamento das chapas externas é obtida a equação:

$$e'_i = \frac{Q_i}{A_g E} (p - d) + \frac{Q_i}{A_n E} (d) \quad (2.20)$$

Ao se escrever a equação completa, na qual cada termo de deformação foi expresso em um termo de força, verifica-se o desconhecimento das forças atuantes nos segmentos i e $i+1$ da ligação aparafusada. Logo, uma dessas forças deverá ser estimada para o cálculo da segunda força. Porém, sempre no final, a equação (2.21) de equilíbrio deverá ser atendida, com o processo de tentativa e erro:

$$P_{i,i+1} = P - \sum_{i=1}^i R_i \quad (2.21)$$

Essa ferramenta analítica, juntamente com o método dos elementos finitos, serão utilizados e apresentados os seus resultados no Capítulo cinco dessa tese, para mostrar o comportamento mecânico das ligações aparafusadas.

Nesse capítulo foram apresentados trabalhos realizados, e que serviram de referência para esta tese, uma breve descrição do Método da Resistência Contínua, que será abordada no Capítulo seis, e o estudo analítico da compatibilidade e equilíbrio da ligação aparafusada desenvolvida por Kulak (1965).