

5

Análise dos Resultados dos Ensaios Experimentais

Nesse capítulo serão analisados os resultados experimentais agrupando-os para análise, e com os resultados obtidos em termos de modo de ruína busca-se detalhar o comportamento estrutural da configuração aparafusada com parafusos alternados. Realiza-se um estudo analítico e numérico calibrado com os resultados experimentais.

A maioria dos ensaios foi executada com parafusos A325. Em alguns casos utilizou-se parafusos A490, devido a grande concentração de tensão nos primeiros furos, ou seja, no centro da ligação. A motivação para essa troca foi o ensaio E33_A_PL_I_145_6_60, onde a ruína foi controlada pela ruptura ao corte de um parafuso A325, com 12,7mm de diâmetro, associada a uma ruptura da placa ao seu redor configurando esmagamento e tração. As chapas utilizadas nos ensaios tinham uma espessura igual a 3 mm. As chapas internas de aço carbono de 8 mm de espessura foram adotadas em ensaios com chapas de aço inoxidável, conforme apresentado no capítulo anterior, para garantir que as chapas de ensaio ou externas de aço inoxidável controlassem o modo de ruína da ligação.

Os resultados dos ensaios experimentais foram agrupados para melhor compreender e analisar a influência desses parâmetros no comportamento dos elementos com furos defasados sob tração.

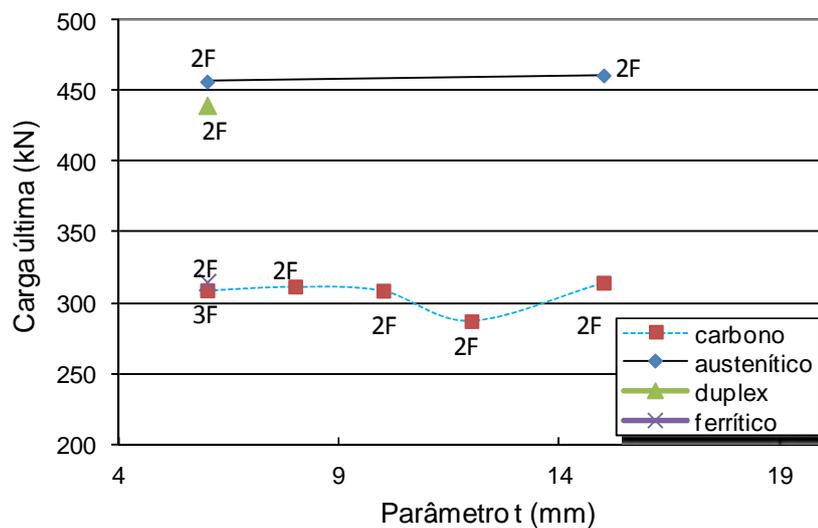
5.1 Análise da variação da espessura da placa interna

Para o entendimento do comportamento da configuração aparafusada com uma variação da espessura da placa interna, usada para a aplicação do carregamento axial, foram utilizadas cinco espessuras de placas internas: 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm e 15 mm, respectivamente.

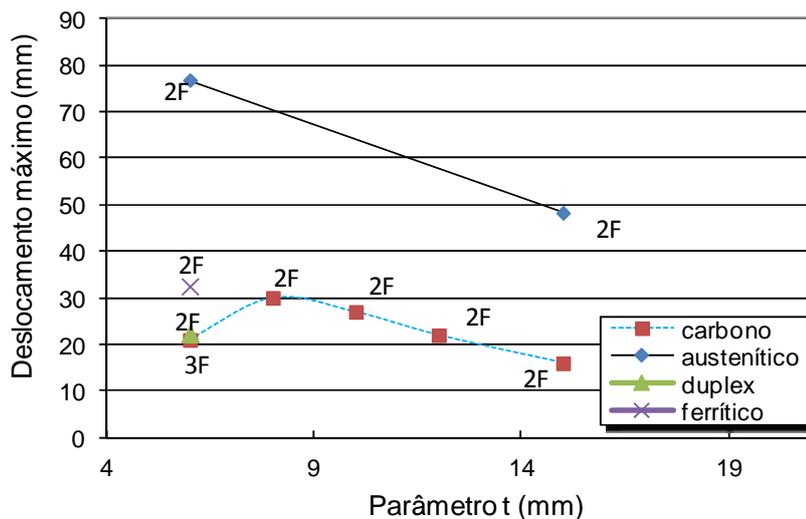
Para que a análise fosse restrita à variação da espessura da placa interna, foram agrupados ensaios com o mesmo valor do parâmetro $s = 30$ mm e largura das chapas com 145 mm, como mostrado no item 5.1.1 .

5.1.1 Ensaios de configurações aparafusadas – P_N_145_30 (11, 12, 14, 15, 26, 31, 47 e 55)

Nesse item efetiva-se a comparação de ensaios experimentais constituídos de chapas com laminação na direção paralela à aplicação da carga, com ligação do tipo A ou normal, com chapa com largura de 145 mm, e distância s entre furos na direção paralela a aplicação da carga de 30 mm variando a espessura da chapa interna de aplicação de carga (de 6 mm a 15 mm) e o tipo de aço (carbono, austenítico, duplex e ferrítico). Os resultados obtidos são mostrados na Figura 5.1, onde 2F e 3F corresponde respectivamente o rompimento na seção líquida de 2 furos e 3 furos.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.1 – Resultado da comparação dos ensaios – P_N_145_30 (11, 12, 14, 15, 26, 31, 47 e 55).

O deslocamento máximo nos ensaios com aço carbono apresentou uma variação linear decrescente com o aumento da espessura da placa. Esse comportamento pode estar vinculado a maior concentração de cargas nos furos do centro da ligação. Para a placa de 6 mm de espessura esse comportamento foi diferente devido a mudança da seção de ruptura.

O aumento da espessura da placa interna para os ensaios em aço inoxidável austenítico apresentou uma diminuição do deslocamento máximo concentrando cargas no centro da ligação. A utilização de placa com maior espessura somada a ductilidade desse aço, distribui melhor a carga, mostrando um pequeno aumento de carga última.

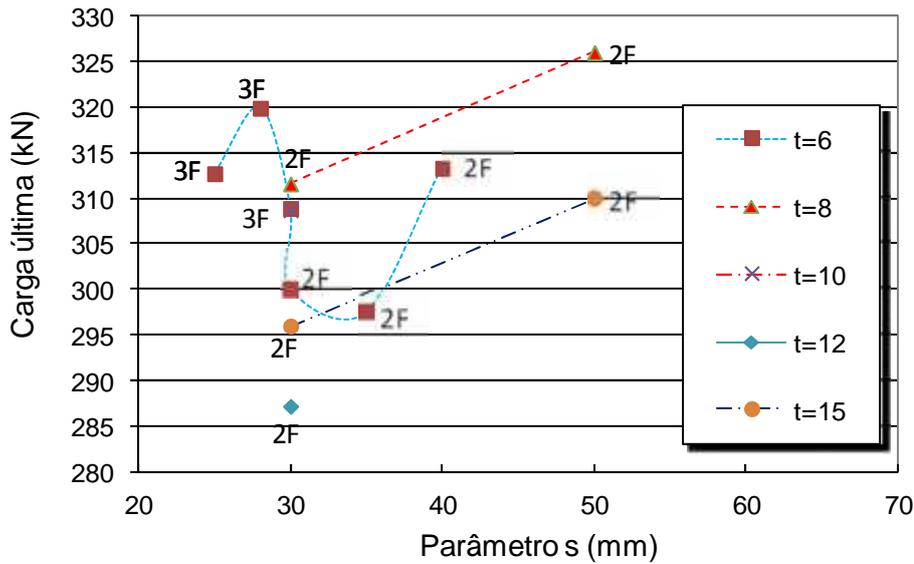
A ligação em aço carbono, menos dúctil, apresentou um decréscimo na carga última e no deslocamento máximo com o aumento da espessura da placa interna, mostrado na placa interna com espessura de 12 mm.

O ensaio com o aço inoxidável ferrítico apresentou, para uma mesma espessura da placa interna (6 mm), a mesma carga última do ensaio do aço carbono, porém, com uma ruptura na seção líquida passando por dois furos.

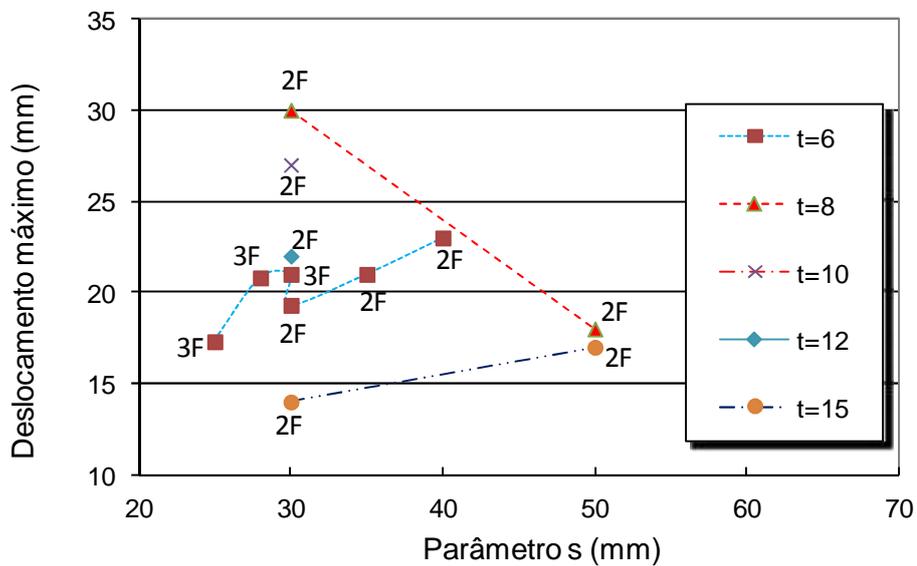
Esse efeito pode estar ligado a mudança do modo de ruína que concentra mais a carga na seção passando por dois furos, e da maior ductilidade do aço inoxidável ferrítico em relação ao aço carbono, que não consegue mobilizar a seção passando por três parafusos.

5.1.2 Ensaios de ligações aparafusadas – C_PL_N_145 (1 a 4, 6, 7, 11, 12, 14 e 16 a 18)

Nessa análise foi realizada uma comparação de ensaios experimentais de configurações aparafusadas, do tipo A ou normal como apresentada na Figura 3.23, constituída de chapas em aço carbono, com laminação paralela à direção da aplicação da carga, largura de 145 mm, com uma variação da distância s entre furos (de 25 mm a 50 mm) e da espessura da chapa interna de aplicação de carga (de 6 mm a 15 mm), conforme os gráficos da Figura 5.2.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.2 – Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_N_145 (1 a 4, 6, 7, 11, 12, 14 e 16 a 18).

Nos gráficos das Figura 5.1 e Figura 5.2 observa-se que a chapa interna de 15 mm de espessura apresentou o menor deslocamento máximo e uma das menores cargas últimas de ruptura. Esse fato pode estar associado a uma maior concentração de tensão nos furos presentes no centro da ligação, conforme Figura 5.3, resultado da espessura da chapa interna ser muito maior, da ordem de 2,5 vezes, que o somatório das espessuras das chapas externas.

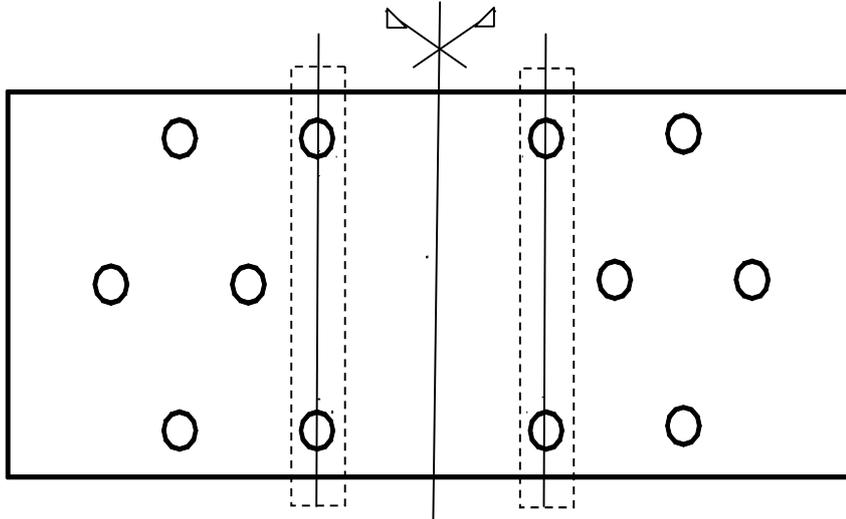


Figura 5.3 – Esboço esquemático de uma das geometrias das chapas estudadas.

Os ensaios realizados com chapa interna de aplicação de carga com 6 mm de espessura apresentaram cargas últimas e deslocamentos máximos compatíveis com os demais ensaios. Esse efeito pode estar relacionado a uma melhor distribuição de tensão na ligação. Deve-se observar que uma espessura de 6 mm representa o somatório das espessuras das duas chapas externas (3 mm cada uma).

No gráfico da Figura 5.2 (a) observa-se a mudança de ruptura de 3 para 2 furos, indicada nos gráficos como 3F e 2F, respectivamente, com a placa interna de 6 mm de espessura. Inicialmente, a carga última decresce com a ruptura passando por 2 furos, comportamento associado pela mudança do modo de ruína, mas em seguida, incorporando rigidez a ligação, com o do aumento da distância s entre furos, essa carga última aumenta.

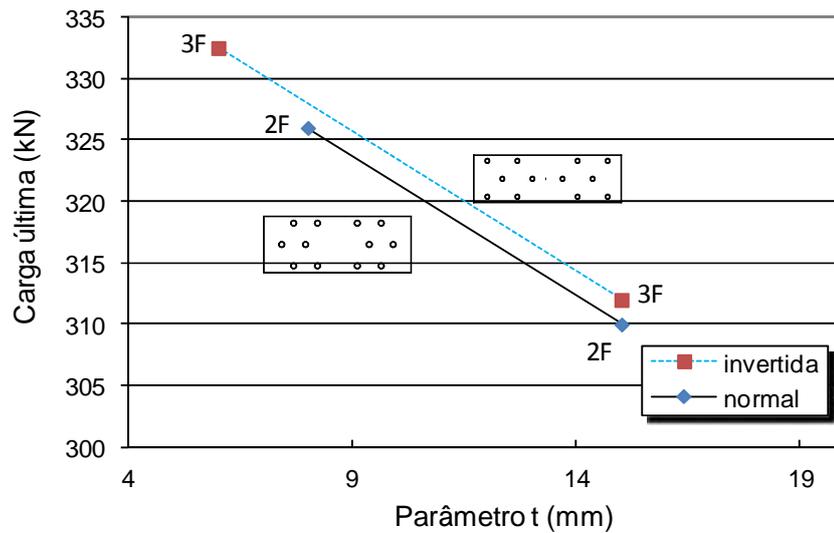
No gráfico da Figura 5.2 (b) observa-se um comportamento decrescente no deslocamento máximo no ensaio de placa interna com 8 mm de espessura com o aumento do parâmetro s . Observa-se ainda um deslocamento máximo crescente na ligação com placa interna de 15 mm. Esses efeitos podem estar relacionados com a rigidez das ligações por meio da combinação da espessura da placa interna com um maior parâmetro s , e também com uma possível acomodação das chapas.

5.1.3 Ensaios de configurações aparafusadas – C_PL_145_50 (8, 9, 17 e 18)

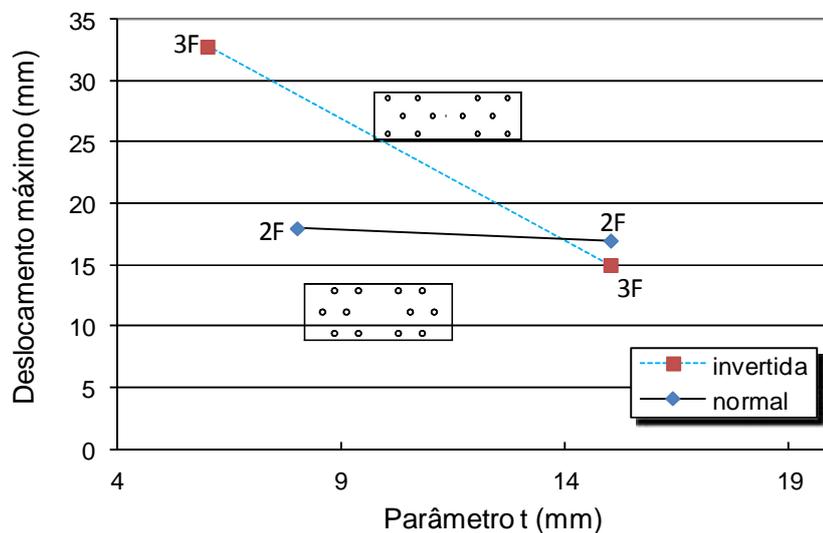
Nessa análise foi realizada a comparação de ensaios experimentais constituídos de chapas em aço carbono, com laminação na direção paralela à aplicação da carga, com largura de 145 mm e distância s entre furos de 50 mm

com variação da espessura da chapa interna de aplicação de carga (de 6 mm a 15 mm), para ligações do tipo A ou normal e para ligações do tipo B ou invertida. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.4.

O aumento da espessura da placa interna aumenta a concentração de tensões nos furos do centro da ligação, Figura 5.3, promovendo uma menor mobilização dos parafusos. Esse comportamento é comprovado pela diminuição da carga última e deslocamento máximo com o aumento da espessura da placa interna (parâmetro t), conforme apresentado nos gráficos da Figura 5.4.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.4 – Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_145_50 (8, 9, 17 e 18).

A ligação tipo B ou invertida, conforme Figura 3.23 (f2), apresentou uma maior variação decrescente do deslocamento máximo com o aumento da

espessura da placa interna (parâmetro t) do que a ligação tipo A ou normal, conforme Figura 3.23 (f1). Esse comportamento da ligação do tipo B ou invertida pode estar associado a sua geometria, mobilizando mais a seção passando por três furos da ligação com o aumento da espessura da placa, ou seja, concentrando mais carga no centro da ligação com aumento da espessura da placa interna.

5.1.4 Formulação analítica

A concentração de tensões nas últimas seções da ligação aparafusada é verificada experimentalmente, e comprovada analiticamente quando analisada a diferença de comportamento entre configurações com a placa interna de 15 mm e 6 mm são comparadas.

O gráfico da Figura 5.5 foi construído utilizando-se as equações polinomiais de sexto grau obtidas das curvas força *versus* deformação específica dos ensaios experimentais. Plotando a diferença das deformações nas respectivas cargas nas seções do centro da ligação (c15-c6) e na seção da linha dos parafusos (p15-p6), observa-se que o comportamento é de constância das deformações específica até a carga de 200kN. Após esta carga nota-se uma maior deformação na ligação com placa interna com espessura de 15mm, ou seja, uma maior concentração de tensões na seção do centro e na seção de parafusos da ligação.

Na carga de 300 kN, a ligação com placa interna de 15 mm, apresenta uma deformação específica superior a 6000 μ na última linha de parafusos, aliviando a seção do centro da ligação e confirmando a maior concentração de tensão na linha de parafusos, conforme pode ser visualizado na Figura 5.5.

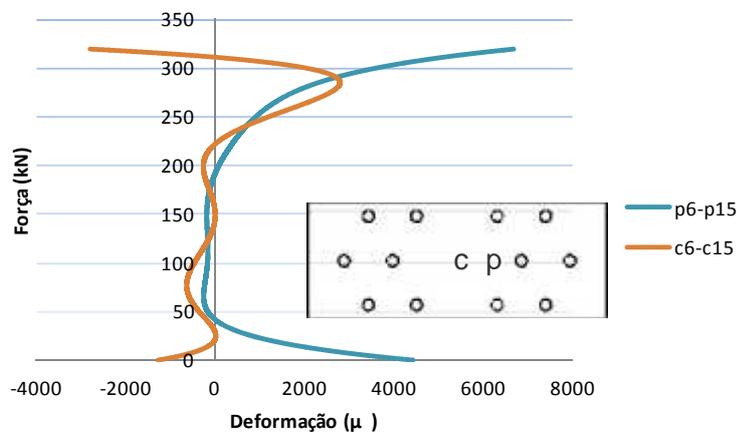


Figura 5.5 – Variação nas deformações específica na seção de placa passando por dois furos com variação da chapa interna.

Utilizando-se uma formulação analítica, realizada com as equações de compatibilidade e de equilíbrio, mostradas no capítulo dois, verificou-se o comportamento mecânico da configuração aparafusada na fase elástica.

O resultado mostra uma concentração de tensão na seção interna de parafusos da ligação aparafusada com chapa interna de espessura de 15 mm, na ordem de 2,4 vezes mais do que a tensão obtida com a ligação com chapa interna de espessura de 6 mm, conforme Figura 5.6. Comparando-se esses resultados com os resultados experimentais encontra-se um erro máximo de 5%, conforme Tabela 5.1.

A variação apresentada na ordenada do gráfico da Figura 5.6 representa as tensões encontradas, divididas pela tensão encontrada com a placa de espessura de 6 mm.

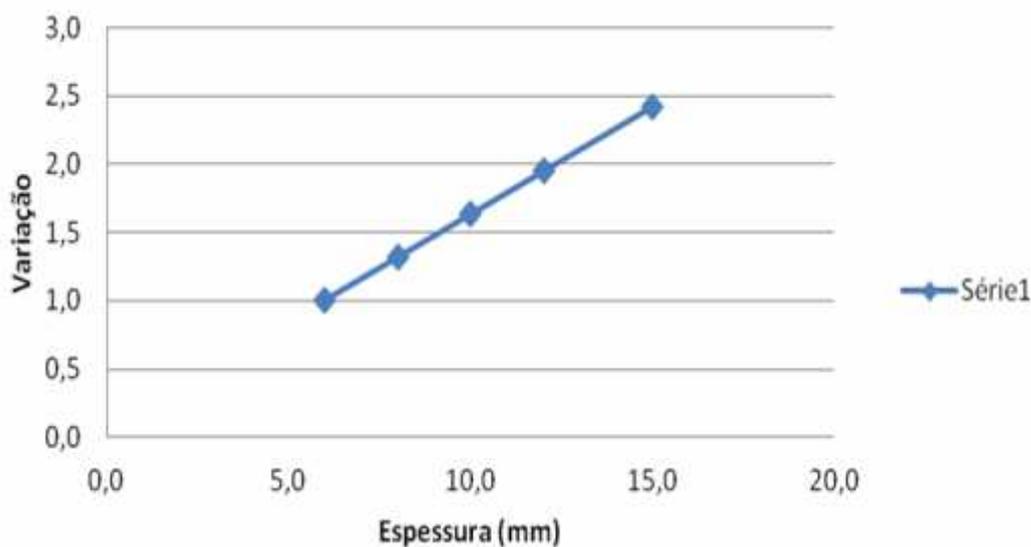
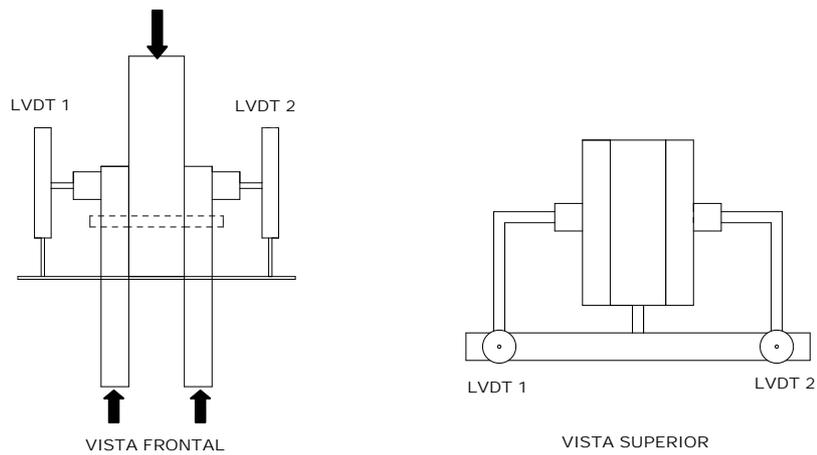


Figura 5.6 – Estudo analítico da transferência de carga.

Para se obter esse resultado foram construídas as curvas força *versus* deslocamento experimental para nove ensaios com parafusos submetidos ao cisalhamento, com parafuso de meia polegada com aço tipo A 325, sendo três ensaios com a rosca passando pelos dois planos de corte, três ensaios com rosca em um plano de corte e sem rosca no outro plano de corte, e três ensaios sem rosca nos dois planos de corte.

Foram utilizados dois transdutores de deslocamentos posicionados em regiões onde se levou em conta o deslocamento somente do parafuso, conforme a Figura 5.7. Esse sistema de aplicação de carga foi desenvolvido usinado e endurecido para execução desses ensaios.



(a) Desenho esquemático do ensaio



(b) Foto do ensaio

Figura 5.7 – Ensaio experimental – cisalhamento do parafuso

Na Figura 5.8 é mostrado o parafuso após a ruína sem rosca nos dois planos de corte, enquanto na Figura 5.9 mostra-se o parafuso após a ruína com rosca nos dois planos de corte.



Figura 5.8 – Parafuso após a ruína sem rosca nos dois planos de corte.



Figura 5.9 – Parafuso após a ruína com rosca nos dois planos de corte.

Os ensaios experimentais produziram curvas carga *versus* deslocamento representadas na Figura 5.10, onde foram utilizadas as médias dos deslocamentos adquiridos pela leitura dos dois transdutores de deslocamento.

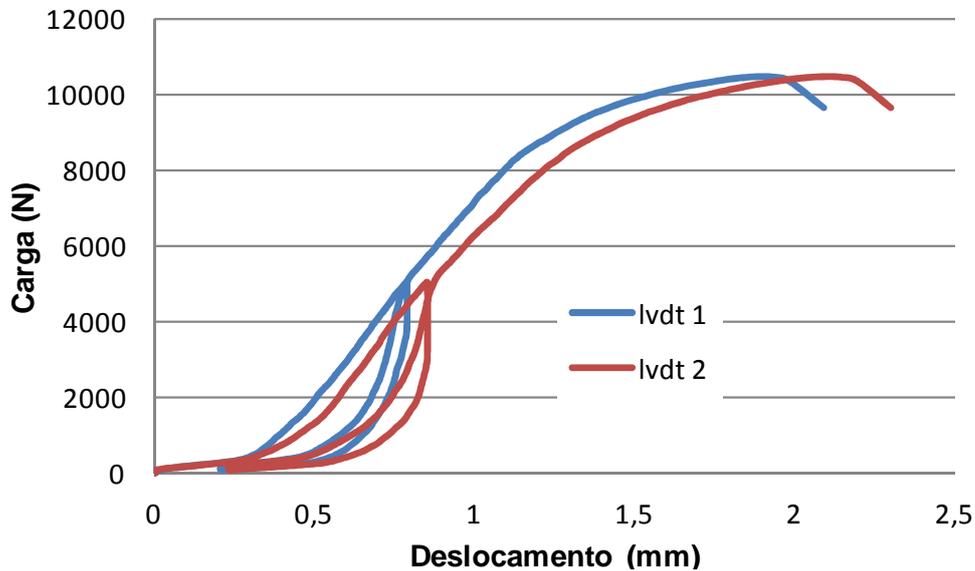


Figura 5.10 – Curvas carga *versus* deslocamento – parafusos ao corte.

Uma aproximação das curvas analíticas com base nas experimentais, gerou os coeficientes da equação (2.18) que rege o comportamento mecânico do parafuso ao cisalhamento, mostrando ser uma boa aproximação para a mesma, como mostra o gráfico da Figura 5.11.

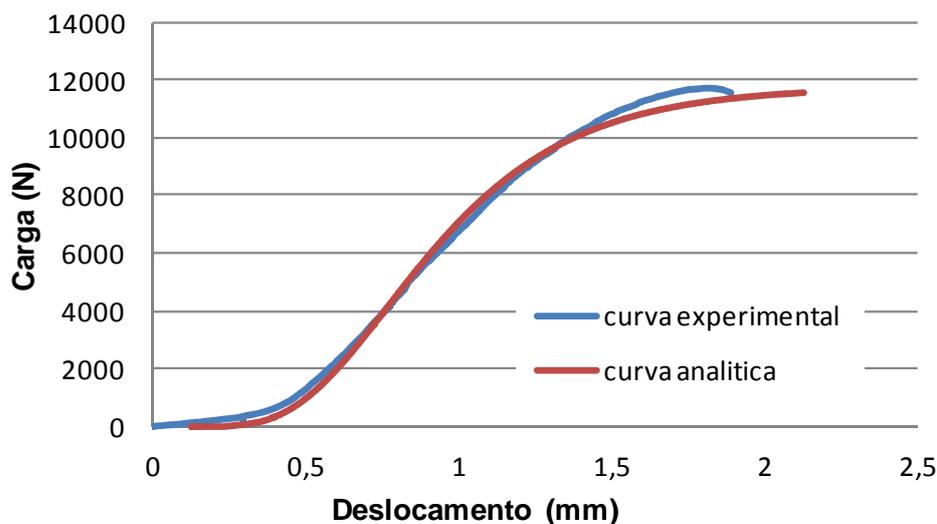


Figura 5.11 – Gráfico de comparação dos resultados: experimental e analítico.

Na Figura 5.12 é mostrado o comportamento mecânico do ensaio de cisalhamento para os três tipos de parafusos analisados.

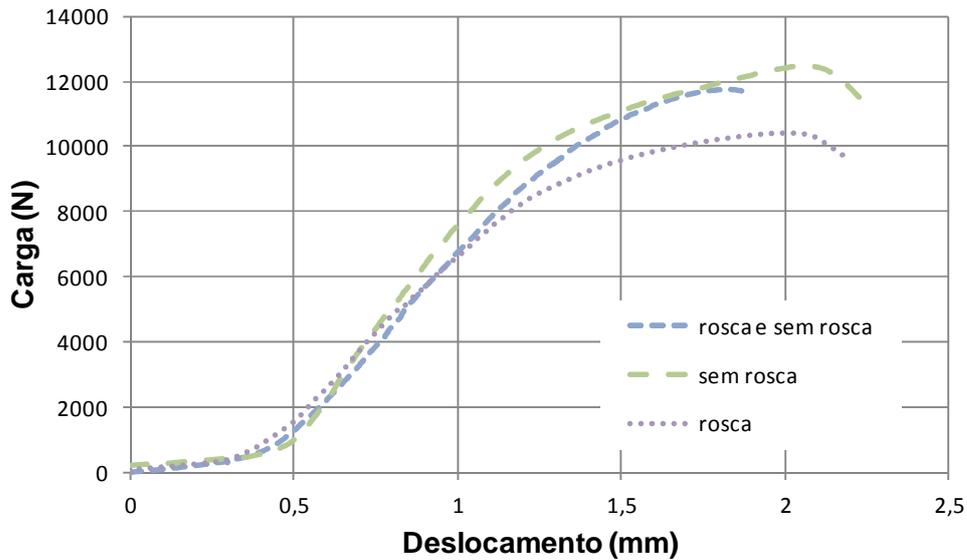


Figura 5.12 – Curvas carga *versus* deslocamento – dois planos de corte.

5.1.5 Análise Numérica

O comportamento mecânico da estrutura aparafusada também foi aferido por meio de uma análise numérica realizada com base no Programa ANSYS. Dessa forma avaliou-se a variação de deformação específica entre as seções da ligação aparafusada quando se varia a espessura da placa interna de 6 mm a 15 mm.

Na análise numérica utilizou-se o elemento de mola COMBIN39 representando as chapas com sua respectiva rigidez, associado a um elemento rígido BEAM3, para os parafusos, conforme apresentado na Figura 5.13. Um deslocamento incremental foi aplicado simulando-se a aplicação de carga na placa central. Os parafusos foram impedidos de se deslocarem na vertical com de apoios verticais em cada seção do parafuso. Dois apoios horizontais nas chapas externas também simularam a continuidade dessas chapas, Figura 5.13.



Figura 5.13 – Esquema dos apoios aplicados na simulação da ligação aparafusada.

O resultado dessa análise numérica mostrado na Figura 5.14, apresenta a mesma tendência de comportamento encontrado experimentalmente, ou seja, uma maior concentração de tensões na seção central de parafusos da ligação aparafusada com chapa interna de espessura de 15 mm. Observa-se ainda, na ligação com chapa interna de espessura de 6 mm e 15 mm uma variação da deformação específica de 0,34% e 2,26%, respectivamente, entre seções (Figura 5.14). Uma comparação desses resultados com os dados experimentais foi realizada obtendo-se um erro máximo aceitável de 5%, conforme Tabela 5.1.

Nesta mesma análise verificou-se o equilíbrio das tensões na configuração aparafusada utilizando-se a placa interna com espessura de 6 mm e chapas externas com espessura de 3 mm, também observou-se que o aumento da variação da deformação específica entre as seções é gradativa e linear quando se aumenta a espessura da placa interna de 8 mm até 15 mm. Em todas as análises foram utilizadas chapas externas de 3 mm, conforme apresentado no gráfico da Figura 5.15, onde a reta crescente com o aumento da espessura da placa interna mostra a deformação específica da placa externa e a reta decrescente com o aumento da espessura da placa interna a deformação da placa interna.

O equilíbrio de deformações específica na ligação com placas internas de espessura de 6 mm e externas com espessura de 3 mm, mostra a melhor distribuição de tensões nos parafusos, que levam à ruptura na seção líquida passando por três furos.

O desequilíbrio de tensões apresentado nas ligações onde a placa interna variou de 8 mm a 15 mm, provoca a ruptura na seção líquida passando por dois furos, contrariando os resultados das normas, onde é previsto para essa configuração a ruptura passando por uma seção de três furos. As cargas limites não apresentam grande variação como visto na Figura 5.2.

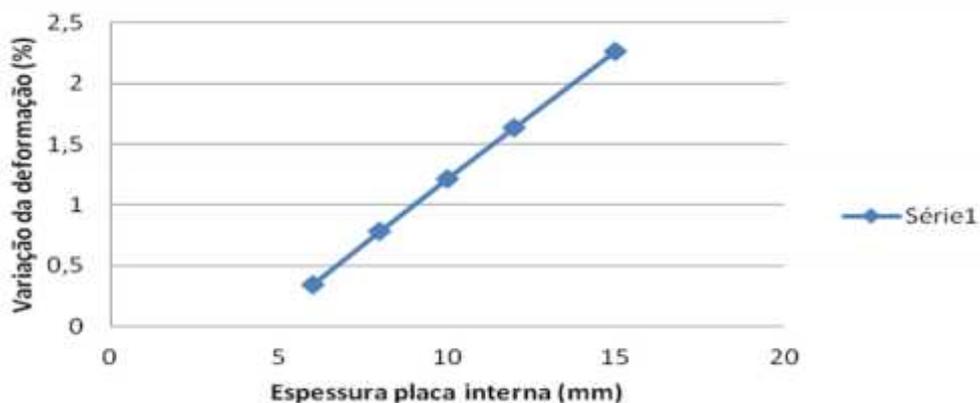


Figura 5.14 – Resultado da análise numérica das deformações específicas.

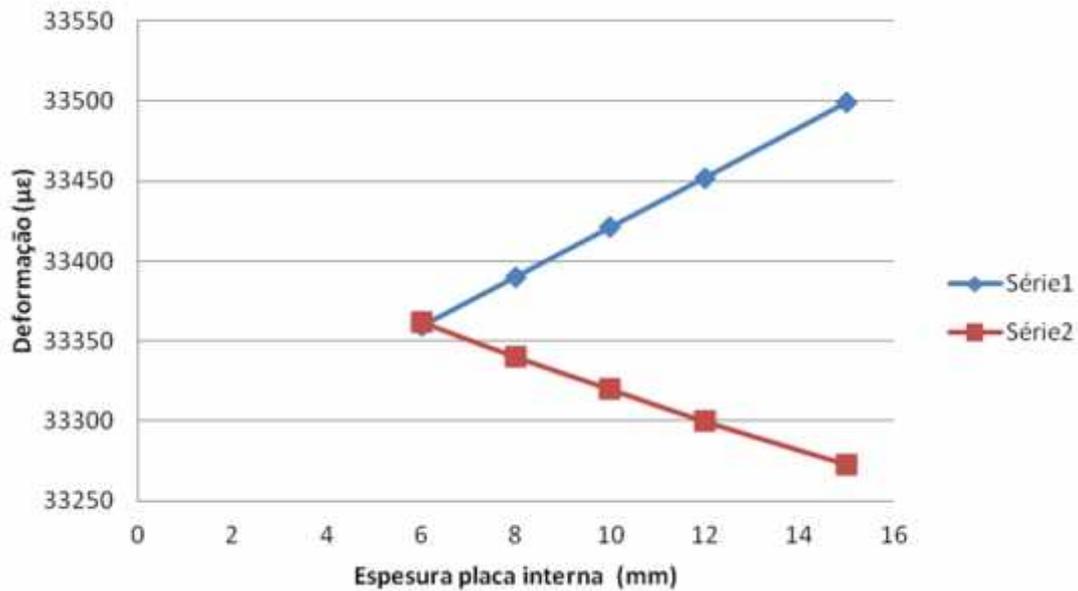


Figura 5.15 – Resultado da análise numérica em função da variação de espessuras.

Ainda com o auxílio do programa ANSYS por meio de uma análise não linear, foram obtidas as curvas carga *versus* deformação, conforme Figura 5.16, mostrando o comportamento numérico das ligações com a variação da placa interna com espessuras de 6 mm a 15 mm.

Utilizando-se o mesmo modelo da Figura 5.13 verificou-se a maior rigidez apresentada pela configuração com placa interna de 15 mm em relação a ligação com placa interna de 6 mm, onde, essa última apresenta a soma das espessuras das chapas externas, igual a da espessura da placa interna.

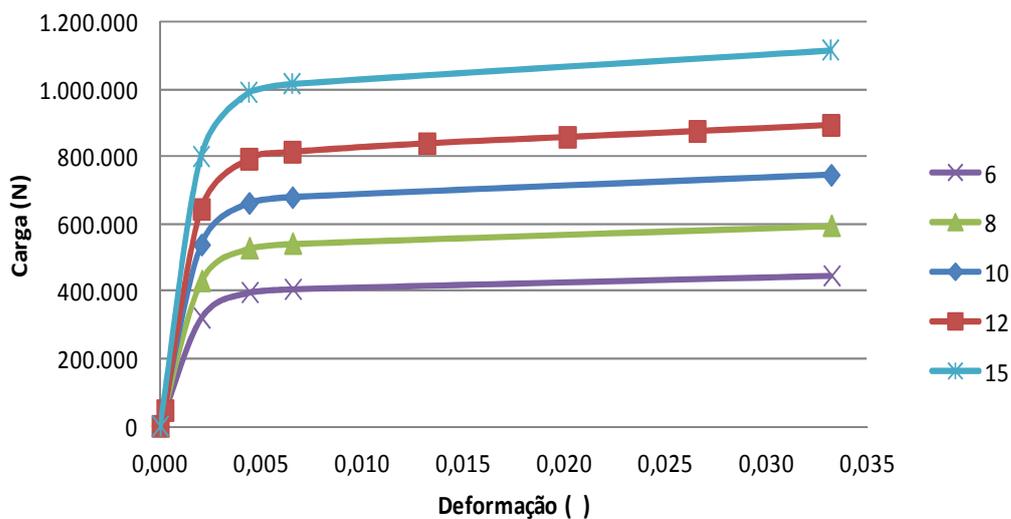


Figura 5.16 – Curvas numéricas – carga *versus* deformação específica.

Uma análise comparativa foi realizada com base nos ensaios experimentais, onde o ensaio E11_C_PL_N_145_8_30, com a placa interna de 8 mm foi usado como base na comparação, por ser o limite para a ruptura na seção de seção líquida passando por dois furos.

Essa análise comparativa mostrou-se satisfatória na verificação da sua validade em comparação com os resultados experimentais mostrando uma variação máxima de 5%, conforme pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Variação percentual da deformação específica do Ensaio 11

Ensaio	Exp.	Numérica	Analítica	Num./Exp.	An./Exp.
E4_C_PL_N_145_6_30	0,725	0,751	0,761	1,03	1,05
E11_C_PL_N_145_8_30*	1	1	1	1	1
E12_C_PL_N_145_10_30	0,850	0,799	0,806	0,94	0,95
E14_C_PL_N_145_12_30	0,700	0,667	0,675	0,95	0,96
E15_C_PL_N_145_15_30	0,550	0,533	0,542	0,97	0,99
* Ensaio comparativo					

Outra análise dos resultados experimentais foi realizada onde se comparam deformações específica e deslocamentos dos ensaios, conforme Tabela 5.2. Essa análise mostra que as leituras dos dois parâmetros, deslocamento e deformação específica foram compatíveis com os resultados experimentais. Novamente, tomou-se como base o resultado do ensaio de E11_C_PL_N_145_8_30.

Tabela 5.2 – Análise das deformações específicas e deslocamentos

Ensaio	Def. exp.- (μ)	Desl. exp.- (mm)	E*/ E11	E*/ E11
E4_C_PL_N_145_6_30	14500	21	0,72	0,70
E11_C_PL_N_145_8_30*	20000	30	1	1
E12_C_PL_N_145_10_30	17000	26	0,85	0,87
E14_C_PL_N_145_12_30	14000	22	0,70	0,73
E15_C_PL_N_145_15_30	11000	16	0,55	0,53
* Ensaio comparativo				

Verificou-se que quando se aumenta a espessura da placa interna de 8 mm até 15 mm, o deslocamento e a deformação específica experimental diminuem linearmente.

No ensaio E4_C_PL_N_145_6_30 com placa interna de 6 mm, onde ocorreu a ruptura na seção líquida passando por três furos, o deslocamento e a deformação específica diminuem quando comparados com os resultados do ensaio E11_C_PL_N_145_8_30, com placa interna de 8 mm.

Foi utilizado nessa análise um ensaio com ligação normal com placa interna de 15 mm, como mostrado na configuração mostrada na Figura 5.17. Comparando-se os resultados experimentais com os resultados obtidos pela análise numérica verificou-se uma boa aceitabilidade desses resultados, como pode ser visto no gráfico apresentado na Figura 5.18, onde os dois resultados foram impressos. Nesse gráfico foi analisada a deformação específica apresentada nas três seções entre linhas de parafusos da ligação aparafusada, sendo a seção "a", localizada mais central e a "c" mais afastada do centro.

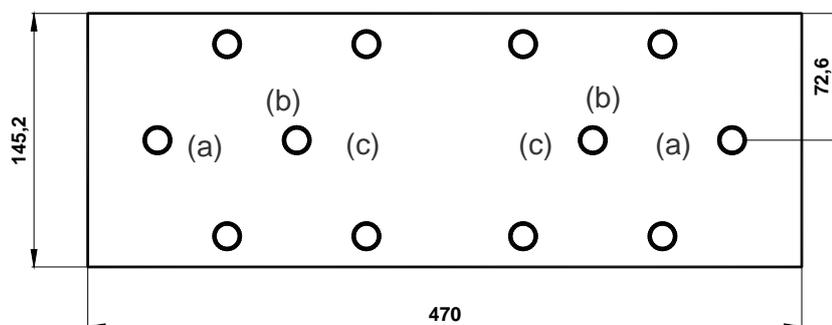
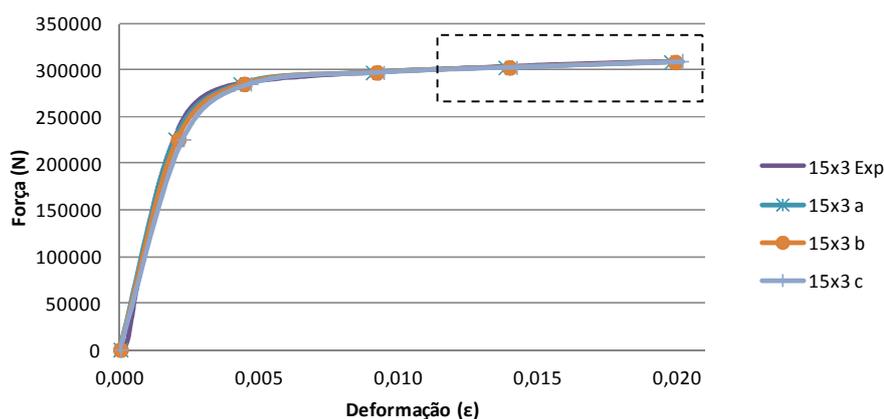


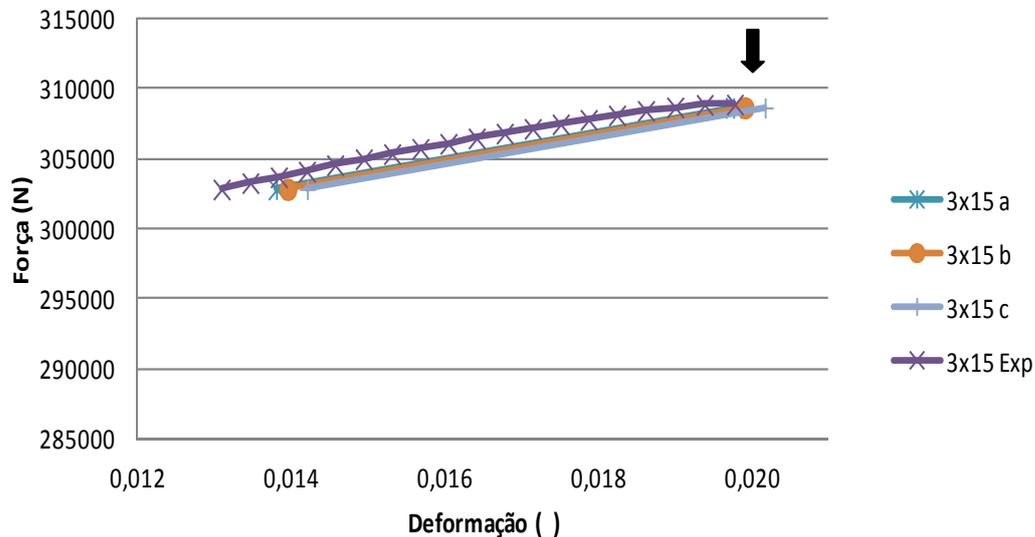
Figura 5.17 – Localização da seções em análise no ANSYS.



(a) Curva total

Figura 5.18 – Gráfico força versus deformação específica – placa interna 15 mm e chapa externa 3 mm.

Analisando-se o gráfico da Figura 5.18, com mais detalhes com a ampliação mostrada na Figura 5.19, verifica-se no posicionamento da seta que a seção mais central (c) atinge a ruptura antes das demais.

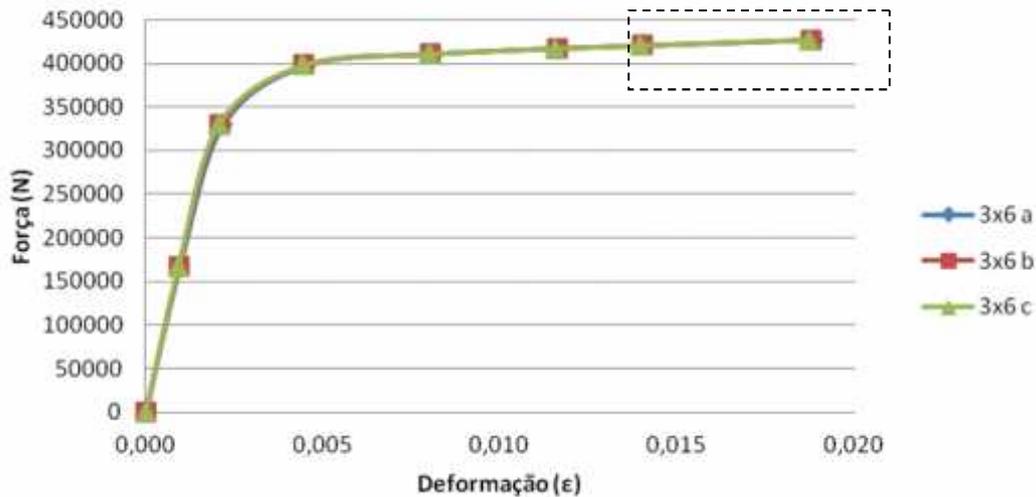


(b) Detalhe da região tracejada na Figura 5.18

Figura 5.19 – Gráfico detalhado – comparativo com curva experimental.

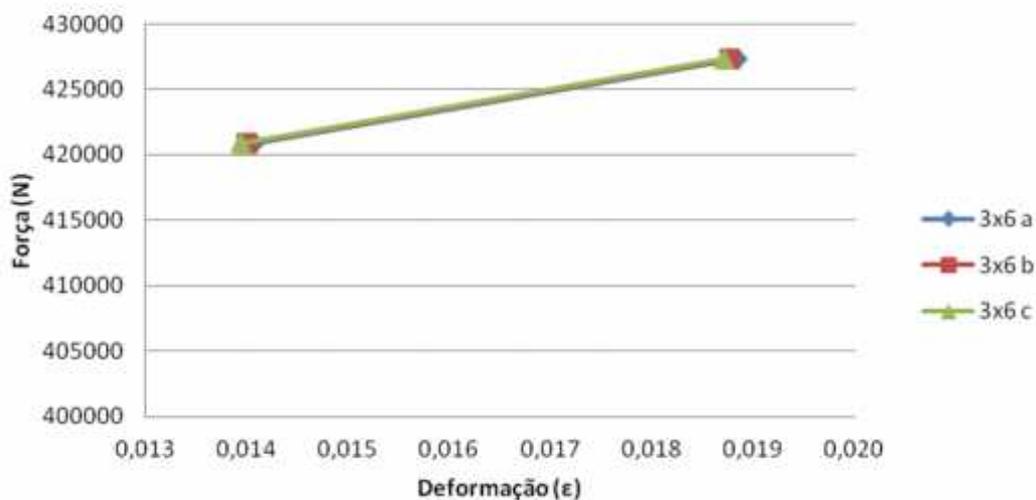
A influência do aumento da espessura da placa interna no comportamento da ligação apresentou-se com uma maior variação da deformação específica nas seções entre parafusos, ocasionando a ruptura antecipada na seção líquida passando pelos furos do centro da ligação. Esse comportamento propaga-se na fase plástica da ligação provocando a ruptura antecipada dessa seção.

No caso da chapa interna de menor espessura, esse comportamento repete-se, porém com menor variação da deformação específica, ou seja, distribuindo melhor as cargas pelas seções dos parafusos, com mostra a Figura 5.20 e com detalhes na Figura 5.21.



(a) Curva total

Figura 5.20- Gráfico força *versus* deformação – placa interna 6 mm e chapa externa 3 mm.



(b) Detalhe da região tracejada

Figura 5.21- Gráfico detalhado – placa interna de 6 mm e chapa externa de 3 mm.

A configuração aparafusada utilizando-se a chapa interna de 15 mm apresentou deformações específicas superiores ao dobro das deformações específicas da configuração com a chapa interna de 6 mm, na seção central da chapa. Esse comportamento também pode ser constatado nos gráficos força *versus* deformação específica experimentais, como mostrado na Figura 5.22.

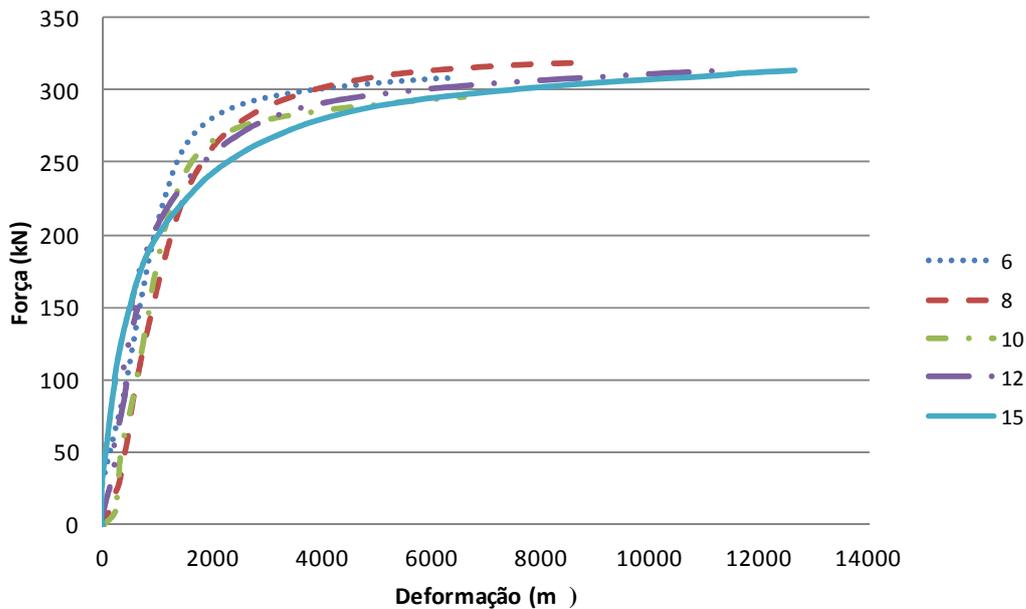


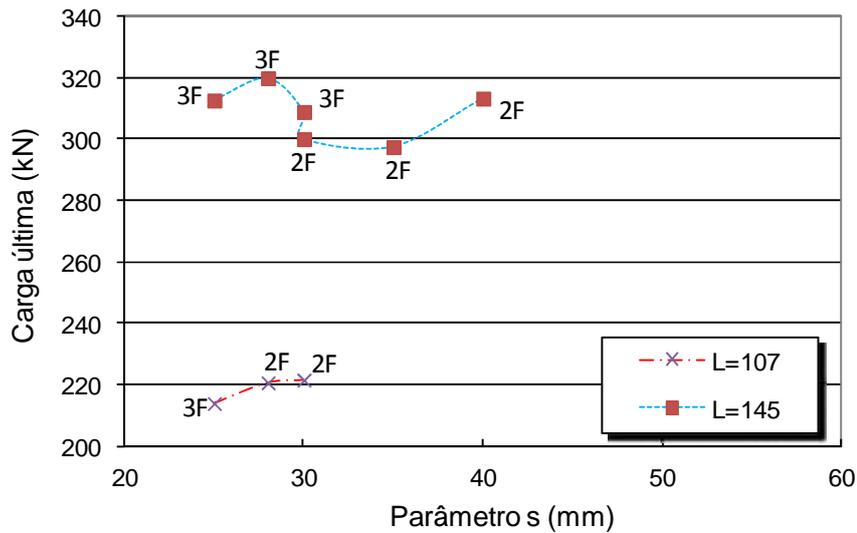
Figura 5.22 – Gráfico força *versus* deformação específica – Ensaios experimentais variando a espessura da placa interna.

5.2 Influência do parâmetro s

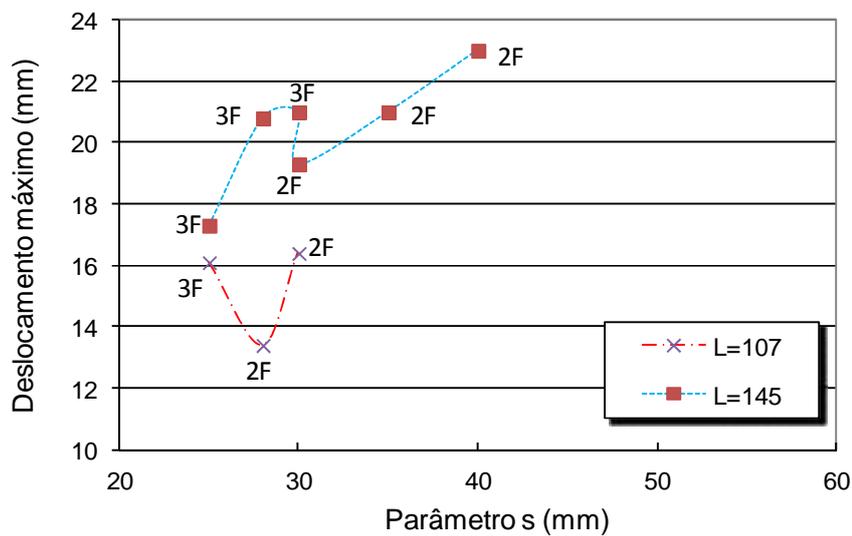
Para o entendimento do comportamento da configuração aparafusada com variação do parâmetro s , distância entre furos na direção da aplicação da carga, foram analisados cinco ensaios com placa interna de 6 mm e largura de 145 mm, valores do parâmetro s de 25 mm, 28 mm, 30 mm, 35 mm e 40 mm; dois ensaios com placa interna de 6 mm e largura de 107 mm e valores do parâmetro s de 30 mm e 50 mm. Para que a análise fosse centrada na variação do parâmetro " s " foi utilizado o mesmo valor de largura das chapas externas com espessura iguais a 3 mm.

5.2.1 Ensaios configurações aparafusadas – C_PL_N_6 (1 a 4, 6, 7 e 19 a 21)

Os ensaios experimentais com configurações aparafusadas, do tipo A, conforme Figura 3.23, constituídos de chapas em aço carbono, com laminação na direção paralela à aplicação da carga, chapa interna com espessura de 6 mm, variação da distância s entre furos (de 25 mm a 40 mm) e largura da chapa na direção perpendicular à aplicação da carga (de 107 mm e de 145 mm), foram comparados na Figura 5.23.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.23 – Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_N_6 (1 a 4, 6, 7 e 19 a 21).

Nesses ensaios utilizou-se a placa interna com espessura de 6 mm, conforme Figura 3.21 (b), que representa de forma equilibrada, o somatório das espessuras das chapas de ensaio. Foram também utilizadas duas larguras de chapas, conforme Figura 3.21 (c), de 107 mm e de 145 mm, respectivamente.

Essa comparação mostra dois ensaios com os mesmos parâmetros apresentando dois tipos de ruptura, em 2 e 3 furos. O valor do parâmetro $s = 30$

mm indica que esse é o possível limite para mudança da seção de ruptura da placa.

A mudança da seção de ruptura de 3 para 2 furos pode ser observada considerando-se o parâmetro s com valor médio igual a 26.5 mm e 30 mm, para chapas com largura de 107 mm e 145 mm, respectivamente. Teoricamente os valores obtidos seriam de 32 mm e 40 mm, para as chapas de 107 mm e 145 mm, respectivamente. Dessa forma observa-se a necessidade de uma maior investigação para aproximação entre o valor teórico e o experimental obtidos. O deslocamento último é maior na placa de largura de 145 mm. Esse efeito pode estar relacionado a maior área de aço a ser mobilizada nessa placa.

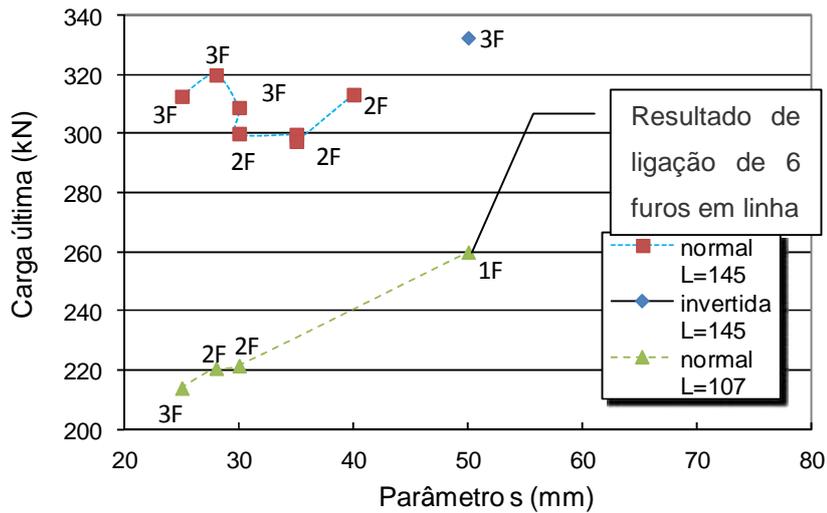
Observa-se que quando se aumenta o parâmetro s , o deslocamento e a deformação específica da ligação aumentam. Esse comportamento muda quando ocorre a mudança da seção de ruína, conforme observado na Figura 5.23.

5.2.2 Ensaio de configurações aparafusadas – C_PL_6 (1 a 8 e 19 a 22)

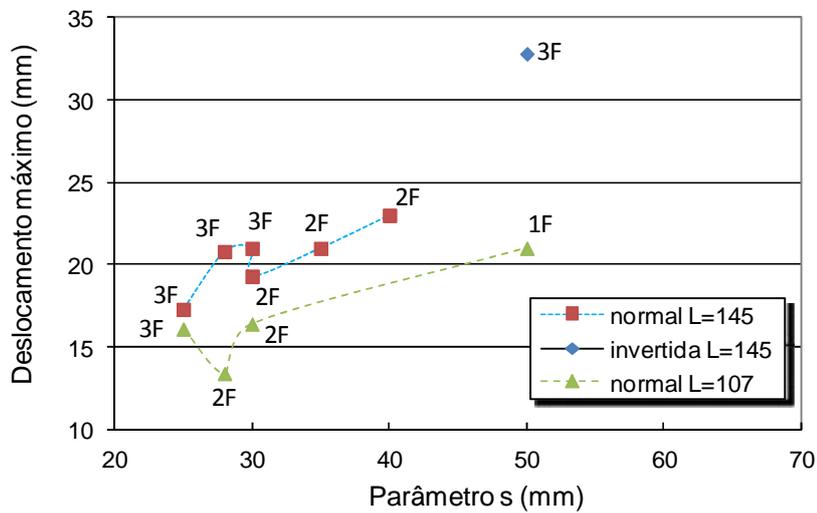
Os ensaios experimentais de configurações aparafusadas constituídas de chapas em aço carbono, com laminação na direção paralela à aplicação da carga, e chapa interna com espessura de 6 mm, variação da distância s entre furos (de 25 mm a 50 mm), largura da chapa na direção perpendicular à aplicação da carga (de 107 mm e de 145 mm), e tipo de ligações (normais e invertidas), foram comparados na Figura 5.24.

O ensaio utilizando-se chapa de largura de 107 mm, com ligação normal e com parâmetro $s = 50$ mm, foi fabricado a partir de uma chapa com uma linha de seis parafusos na direção paralela a aplicação da carga. Esse ensaio apresentou a maior carga última e o deslocamento máximo devido a seção de ruptura ser a maior que a dos outros ensaios.

Com o aumento do parâmetro s a carga última e o deslocamento máximo aumentam, podendo-se concluir que a configuração estudada fica mais resistente com o aumento dessa distância entre furos na direção paralela à aplicação da carga.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.24 – Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_6 (1 a 8 e 19 a 22).

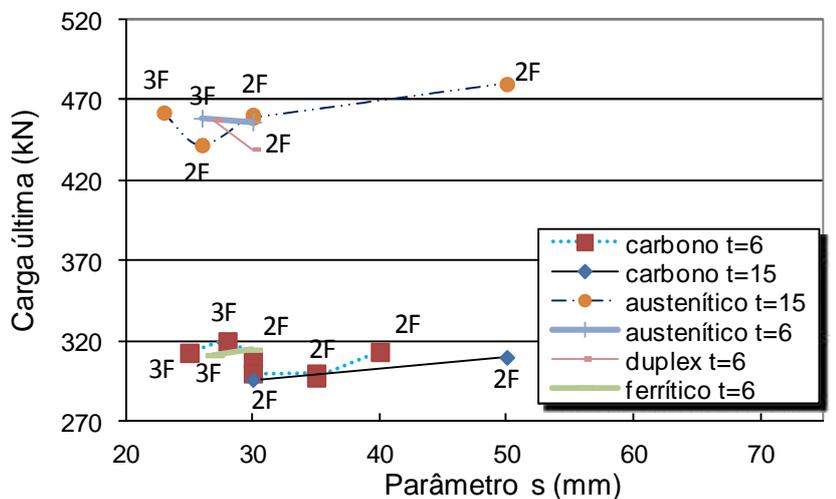
Nos ensaios com a placa de 107 mm de largura nota-se um crescimento na carga última e uma redução no deslocamento máximo no limite da mudança da seção de ruptura. Esse efeito pode estar ligado à razão s/p mais próxima da unidade dessa placa, onde s é a distância entre furos na direção da aplicação da carga e p a distância entre furos na direção perpendicular a carga.

Nesses ensaios a placa interna que teve a espessura igual a 6 mm, representa o somatório das espessuras das chapas de ensaio. A mudança da seção de ruptura de 3 para 2 furos na chapa com largura de 107 mm ocorre para um valor do parâmetro $s = 26,5$ mm, diferentemente do previsto de 32 mm por Cochrane (1922) e na placa de largura de 145 mm para um valor do parâmetro s

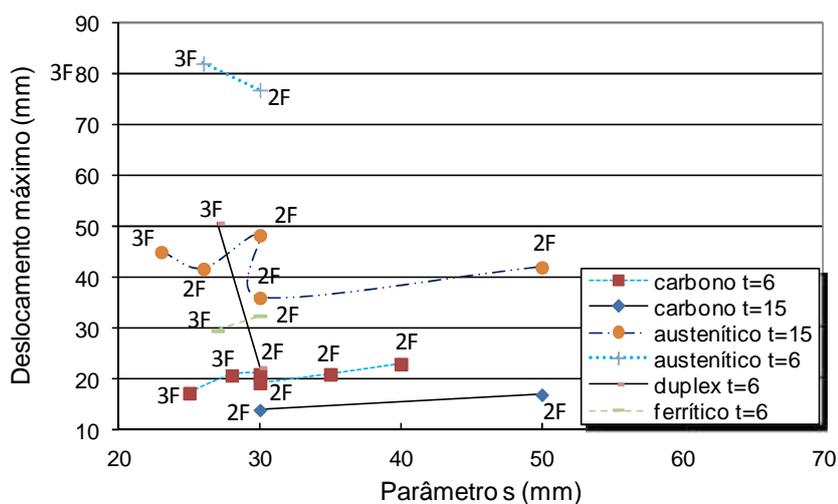
= 30 mm, diferente do previsto por Cochrane (1922) de 40 mm. O deslocamento último foi maior na placa de largura de 145 mm do que na placa de largura de 107 mm. Esse efeito pode estar associado à maior razão p/s a ser mobilizada na placa de 145 mm de largura.

5.2.3 Ensaios de configurações aparafusadas – PL_N_145 (1 a 7, 16, 18, 24 a 30, 46 e 47)

Os ensaios experimentais de configurações aparafusadas, do tipo A ou normal, como mostrado na Figura 3.23 (f1), com laminação na direção paralela à aplicação da carga e com largura da chapa de ensaios de 145 mm foram comparados, Figura 5.25.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.25 – Resultado da comparação dos ensaios – PL_N_145 (1 a 7, 16, 18, 24 a 30, 46 e 47).

Nesses ensaios houve variação da distância s entre furos (de 25 mm a 50 mm), espessura da chapa interna de aplicação de carga (de 6 mm a 15 mm) e materiais das chapas: aços carbono, austenítico, duplex e ferrítico.

Na Figura 5.25 observa-se que a mudança da seção de ruptura ocorreu no intervalo de 20 mm a 30 mm, diferentemente do resultado da expressão de Cochrane (1922) que informa 40 mm para esse limite.

Pode-se também determinar que admitindo-se as cargas últimas os ensaios podem ser divididos em dois grupos. Os ensaios dos aços inoxidáveis austenítico e duplex, e os ensaios de aço inoxidável ferrítico e aço carbono.

Nos ensaios com placa de aço inoxidável austenítico, com placa interna de espessura de 15 mm, apresentam dois resultados de ensaios realizados com espaçamento entre furos de 30 mm, onde um apresentou menor deslocamento máximo que o outro. Essa diferença pode ser justificada pela acomodação dos parafusos e pela execução e montagem do ensaio. Esse ensaio de menor deslocamento máximo foi mostrado para ilustrar as dificuldades encontradas na pesquisa experimental.

Os deslocamentos máximos e as cargas últimas mostram uma variação de valores na mudança da seção de ruptura, mostrando a mudança de comportamento devido a mudança do modo de ruína da ligação.

Os gráficos mostram um aumento da carga última e do deslocamento máximo com o aumento do parâmetro s após a mudança da seção de ruptura, da ordem média de 10 kN a cada 10 mm de aumento do parâmetro s , para esse tipo de ligação.

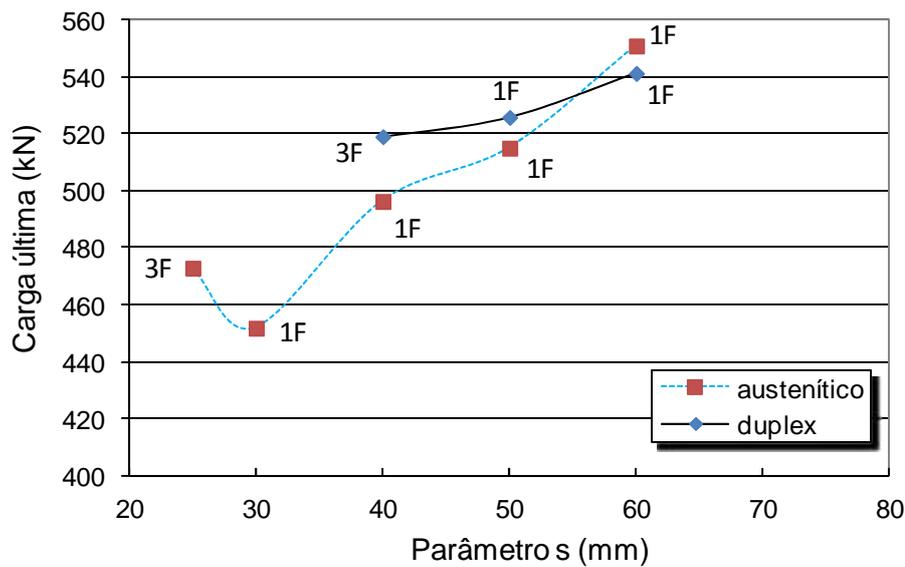
Os ensaios com aço carbono e aço inoxidável austenítico, com a placa interna de 15 mm apresentaram deslocamentos máximos e cargas últimas menores que os ensaios com placa interna de 6 mm. Esse efeito pode estar associado à maior concentração de tensão provocada pela placa interna de 15 mm.

O ensaio com aço inoxidável ferrítico apresentou uma carga última similar a do aço carbono, porém, por ser mais dúctil, apresentou maior deslocamento máximo que o aço carbono.

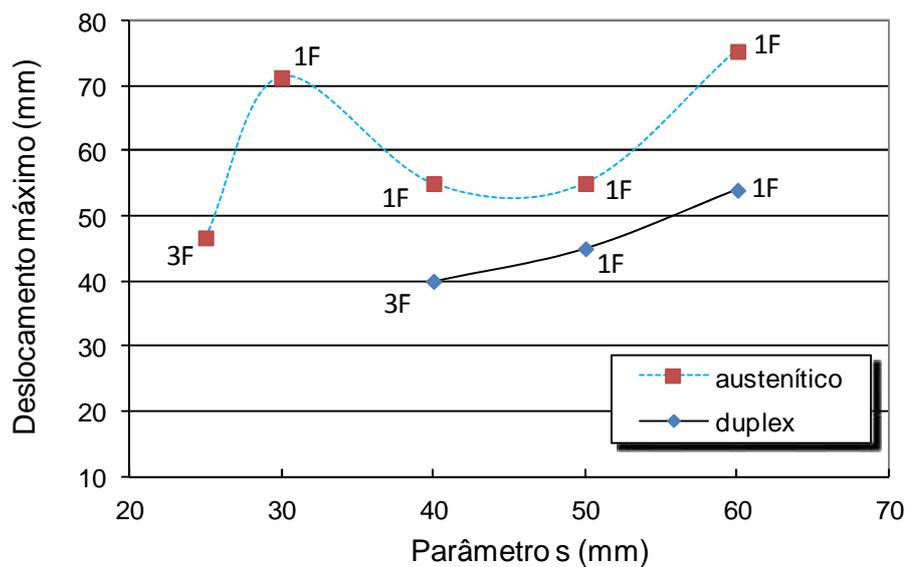
Os aços inoxidáveis austenítico, duplex e ferrítico são mais dúcteis que o aço carbono e apresentam valores da razão s/p , no limite de ruptura de 3 para 2 furos, menores que o aço carbono. O valor superior da razão s/p do aço carbono pode estar associado a menor ductilidade desse aço.

5.2.4 Ensaio de configurações aparafusadas – PP_I_145_6 (39 a 43, 50, 52 e 53)

Nesta análise, cujos os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 5.26, são comparados os ensaios experimentais de configurações aparafusadas, do tipo B ou invertido, constituídos de chapas com laminação na direção perpendicular à aplicação da carga, com chapa interna com largura de 145 mm e espessura de 6 mm com variação da distância s entre furos (de 23 mm a 60 mm) e do tipo de aço (austenítico e duplex).



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.26 – Resultado da comparação dos ensaios – PP_I_145_6 (39 a 43, 50, 52 e 53).

Esses ensaios apresentaram cargas últimas crescentes com o aumento do parâmetro s , resultados esses associados à ductilidade e ao maior espaçamento entre furos, mobilizando maior quantidade de aço e distribuindo melhor as tensões na placa.

Na mudança da seção de ruptura nos ensaios com aço inoxidável austenítico ocorre uma diminuição da carga última devido a melhor distribuição de cargas na ruptura da seção passando por três furos e uma maior rigidez da chapa com laminação perpendicular à direção da aplicação da carga, conforme curvas tensão *versus* deformação específica apresentadas no capítulo 3.

No limite da mudança da seção de ruptura os ensaios com aço inoxidável austenítico mostram um aumento no deslocamento máximo. Esse efeito pode ter relação com a influência da ductilidade desse tipo de aço e o aumento do espaçamento entre furos.

Os deslocamentos máximos (de 45 mm a 75 mm) do aço inoxidável austenítico foram maiores que os do aço inoxidável duplex (de 40 mm a 54 mm). A maior ductilidade do aço inoxidável austenítico pode ser a razão para esse efeito.

Nos ensaios com aço inoxidável duplex, na mudança da seção de ruptura, ocorre um aumento da carga última e do deslocamento máximo. Esse efeito pode estar interligado mais uma vez à influência da ductilidade desse tipo de aço, o aumento do espaçamento entre furos e a mudança do modo de ruína da ligação.

5.2.5 Análise Numérica

Na análise numérica obteve-se, um comportamento estrutural, similar ao apresentado pelos ensaios experimentais, como pode ser comprovado na Figura 5.27, onde o aumento do parâmetro s de 30 mm para 70 mm, induz a um pequeno aumento na deformação específica das seções centrais das chapas externas da configuração aparafusada com $s = 70$ mm. Nessa figura as letras a, b e c foram usadas para referenciar as três seções de chapas e suas respectivas deformações específicas, conforme mostrado na Figura 5.27.

Os resultados da Figura 5.27 indicaram uma deformação específica diferenciada para cada espaçamento da ligação, ou seja, para cada seção s encontrou-se uma deformação específica crescente, com ruptura antecipada na seção central da ligação.

A configuração aparafusada com o valor do parâmetro $s = 70\text{mm}$ apresentou uma menor rigidez inicial, como mostrado na Figura 5.27, devido à maior concentração de tensão na seção c, ou seja, na linha central passando por dois furos induzida pelo aumento do parâmetro s .

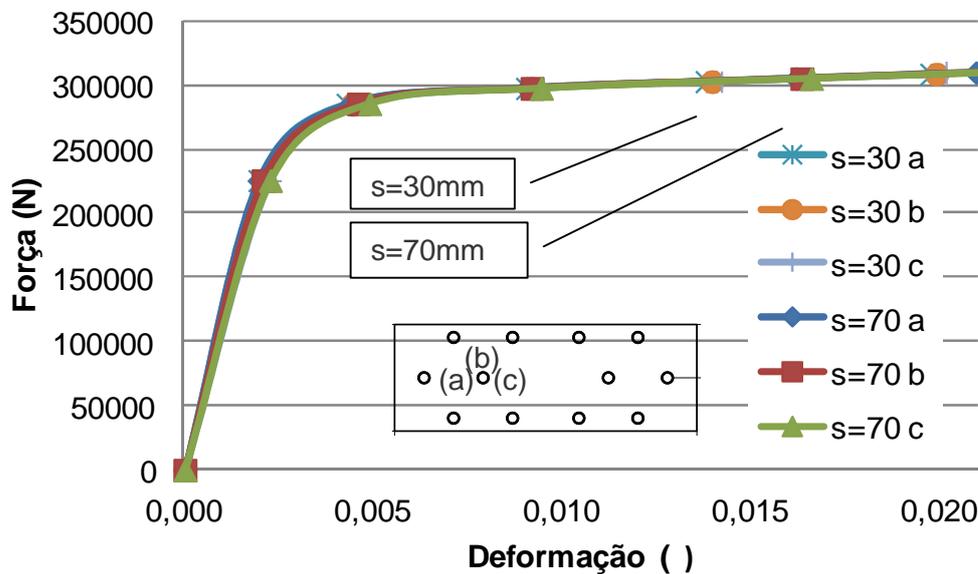


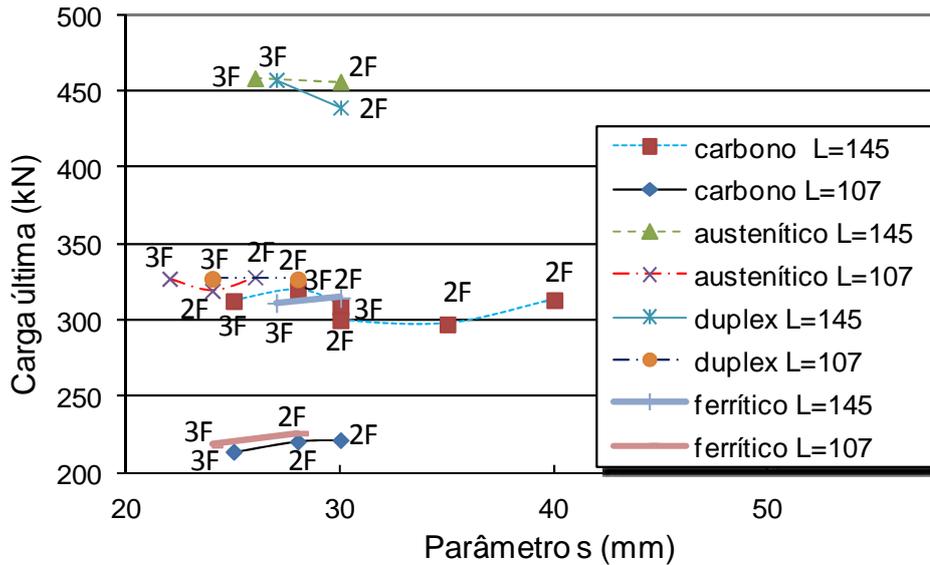
Figura 5.27 – Variação do parâmetro s .

5.3 Influência da largura da chapa

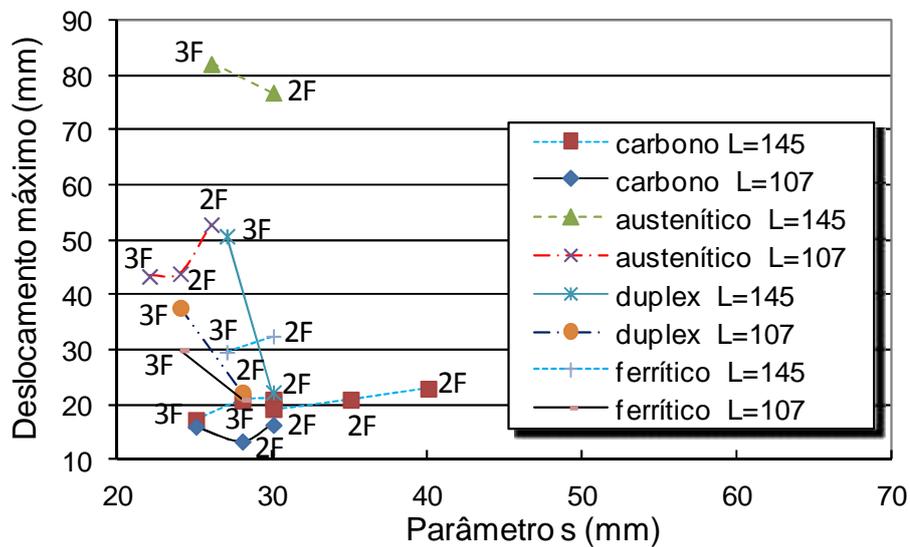
Nesta tese foram executados ensaios de chapas com larguras de 107 mm e 145 mm. Para se entender o comportamento mecânico dessas chapas esses ensaios foram agrupados para cada tipo de aço.

5.3.1 Ensaios de configurações aparafusadas – PL_N_6 (1 a 4, 6, 7, 19 a 21, 29, 30, 34 a 36, 46 a 49, 54, 55, 58 e 59)

Os resultados obtidos nesta análise são apresentados no gráfico da Figura 5.28, onde foram comparados os ensaios experimentais de configurações aparafusadas, do tipo A ou normal, com laminação na direção paralela à aplicação da carga, com chapa interna com espessura de 6 mm com variação da distância s entre furos (de 23 mm a 40 mm), largura da chapa na direção perpendicular à aplicação da carga (de 107 mm e 145 mm) e tipos de aço: carbono, austenítico, duplex e ferrítico.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.28- Resultado da comparação dos ensaios – PL_N_6 (1 a 4, 6, 7, 19 a 21, 29, 30, 34 a 36, 46 a 49, 54, 55, 58 e 59).

Os ensaios com as chapas de aço carbono e aço inoxidável ferrítico com largura igual a 145 mm apresentaram maiores cargas últimas no limite da mudança da seção de ruptura. Esse comportamento pode estar ligado a uma menor ductilidade desse aço e a uma maior razão s/p. Todos os ensaios apresentaram menor deslocamento máximo na mudança da seção de ruptura. A seção líquida pode ser a razão para esse comportamento. Os gráficos também mostram um aumento da carga última e do deslocamento máximo com o aumento do parâmetro s.

A característica dúctil do aço inoxidável mostra uma melhor distribuição de cargas nas ligações utilizando-se placa com largura de 107 mm ou 145 mm.

Os ensaios com chapa de largura de 145 mm apresentaram menor razão s/p quando comparados com os ensaios com a placa com largura de 107 mm. Isso pode ter promovido uma maior concentração de tensão na região da placa com dois furos no centro da ligação, fato comprovado por meio de menores valores de carga última e deslocamento máximo.

A razão s/p entre essas duas larguras de chapas, no limite de mudança da seção de ruptura, mostrou ser um importante fator no comportamento estrutural da ligação.

5.4 Influência da variação do tipo do aço

Nesse trabalho foram confeccionados e executados ensaios experimentais utilizando-se aços carbono e inoxidáveis do tipo austenítico S304, duplex 2205 e ferrítico 430. Alguns desses ensaios foram agrupados e condensados, conforme a sequência apresentada nos próximos itens.

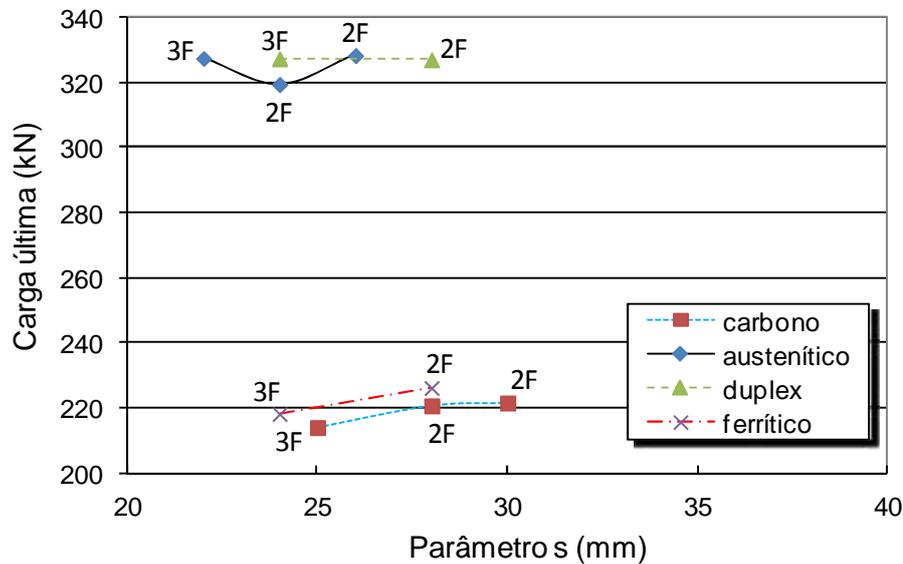
5.4.1 Ensaios de configurações aparafusadas – PL_N_107_6 (19 a 21, 34 a 36, 48, 49, 58 e 59)

Os gráficos da Figura 5.29 comparam ensaios constituídos de chapas com a laminação na direção paralela à aplicação da carga, com ligação tipo A ou normal, com chapa interna com espessura de 6 mm e largura da chapa de 107 mm, com variação da distância s entre furos (de 23 mm a 30 mm) e tipo de aço: carbono, ferrítico, duplex e austenítico.

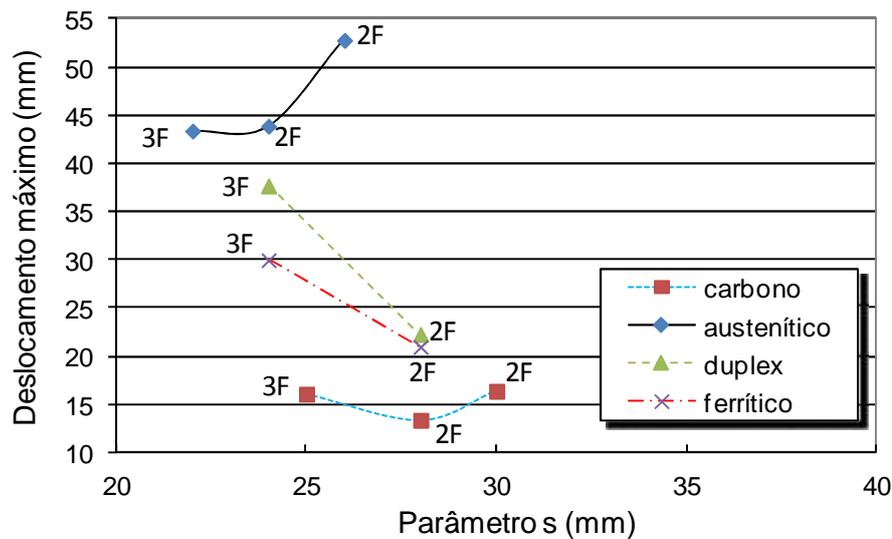
Os resultados do comportamento global das configurações aparafusadas apresentaram as mesmas diferenças na carga última, em torno de 45%, entre as cargas últimas do aço carbono e o aço inoxidável ferrítico em relação às cargas últimas dos aços inoxidáveis duplex e austenítico, conforme mostrado no gráfico da Figura 5.29.

No limite da mudança da seção de ruptura pode-se observar uma variação crescente dos deslocamentos máximos, relativa à ductilidade dos aços, ou seja: carbono, ferrítico, duplex e austenítico com valores médios retirados do gráfico da Figura 5.29, na ordem de 15 mm, 25 mm, 30 mm e 47 mm, respectivamente. Esses valores foram 20% menores quando comparados com a

chapa interna de 145 mm. Nesses valores deve-se levar em consideração o possível escorregamento e a acomodação dos parafusos.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.29 – Resultado da comparação dos ensaios – PL_N_107_6 (19 a 21, 34 a 36, 48, 49, 58 e 59).

Com a utilização de vários tipos de aço aferiu-se o valor do parâmetro s , limite para mudança da seção de ruptura, o qual se manteve relativamente próximo (de 23 m a 28 mm) nesse tipo de laminação, ligação e dimensão de chapa.

Os ensaios apresentaram maior (carbono e ferrítico) ou menor (austenítico e duplex) valor de carga última no limite de ruptura na seção líquida

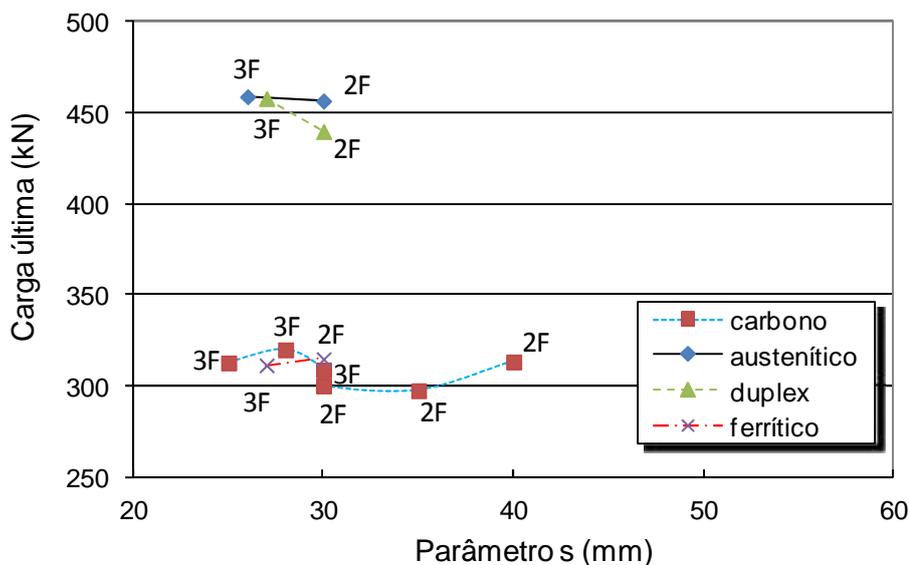
passando por três furos para dois furos nesse tipo de geometria de configuração aparafusada. Esse efeito possivelmente pode estar associado ao nível de ductilidade do aço e à mudança da seção de ruína da ligação.

Os ensaios apresentaram menor (duplex, ferrítico e carbono), ou similar, (austenítico) deslocamento máximo no limite de ruptura passando por três furos para dois furos nesse tipo de geometria da configuração aparafusada. Esse efeito pode estar ligado a melhor distribuição de carga nas chapas com o aumento da ductilidade do aço

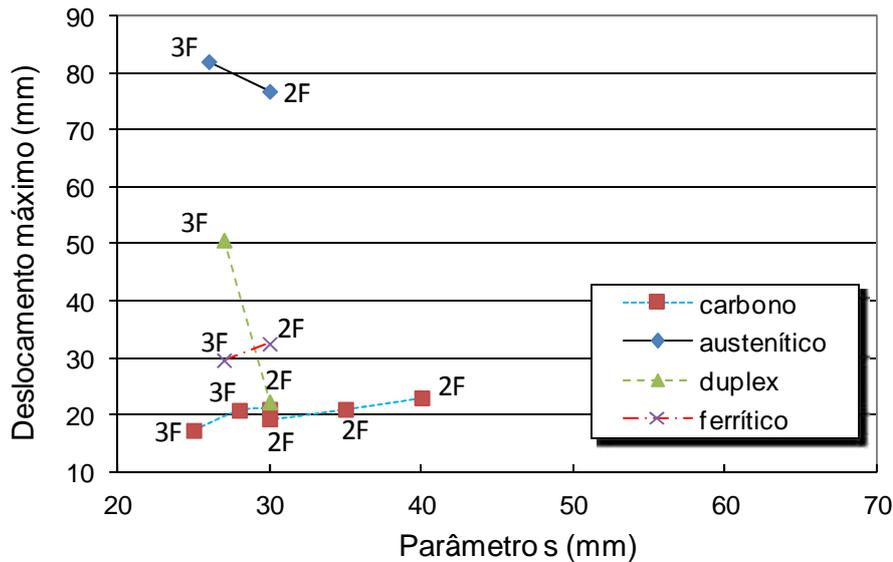
5.4.2 Ensaios de configurações aparafusadas – PL_N_145_6 (1 a 4, 6, 7, 29, 30, 46, 47, 54 e 55)

Os gráficos da Figura 5.30 comparam os resultados dos ensaios constituídos de chapas com laminação na direção paralela a aplicação da carga, com ligação tipo A ou normal, com chapa interna com espessura de 6 mm e largura da chapa de 145 mm, com variação da distância s entre furos (de 25 mm a 40 mm) e do tipo de aço: carbono, ferrítico, duplex e austenítico.

O comportamento estrutural com a utilização de vários tipos de aço, mais uma vez foi verificado, no que diz respeito ao valor do parâmetro s limite para mudança da seção de ruptura, que também se manteve relativamente próxima de (26 mm a 30 mm) nesse tipo de laminação, ligação e dimensão de chapa.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.30 – Resultado da comparação dos ensaios – PL_N_145_6 (1 a 4, 6, 7, 29, 30, 46, 47, 54 e 55).

A diminuição da carga última, em torno de 45%, apresentada nos aços carbono e inoxidável ferrítico em relação aos aços inoxidáveis duplex e austenítico é resultado da maior ductilidade desses últimos, avaliada e comprovada em seu comportamento mecânico.

No limite da mudança da seção de ruptura pode-se observar os deslocamentos máximos, que apresentaram valores médios crescentes relativos a ductilidade dos mesmos aços, ou seja: carbono, ferrítico, duplex e austenítico na ordem de 20 mm, 30 mm, 35 mm e 80 mm, respectivamente, como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 5.30. Nesses valores devem ser levados em conta os possíveis escorregamentos e a acomodação dos parafusos.

O ensaio com o aço inoxidável ferrítico apresentou carga última e deslocamento máximo crescente no limite de ruptura passando de três furos para dois furos. Esse efeito pode estar ligado a um somatório de efeitos, onde devem ser levados em conta a acomodação das chapas e o escorregamento da garra da máquina de tração.

Os ensaios com aço inoxidável duplex e austenítico apresentaram menor carga última e deslocamento máximo no limite de ruptura passando de três furos para dois furos. Esse efeito pode ter relação com a seção de menor área de ruptura na seção líquida passando por dois furos, logo apresentando menor

resistência, uma melhor distribuição de carga na ruptura passando por três furos e com seu nível de ductilidade.

5.5 Análise da geometria da furação das chapas

Esta análise baseia-se na mudança do tipo de configuração dos parafusos na ligação, como mostrado na Figura 5.31.

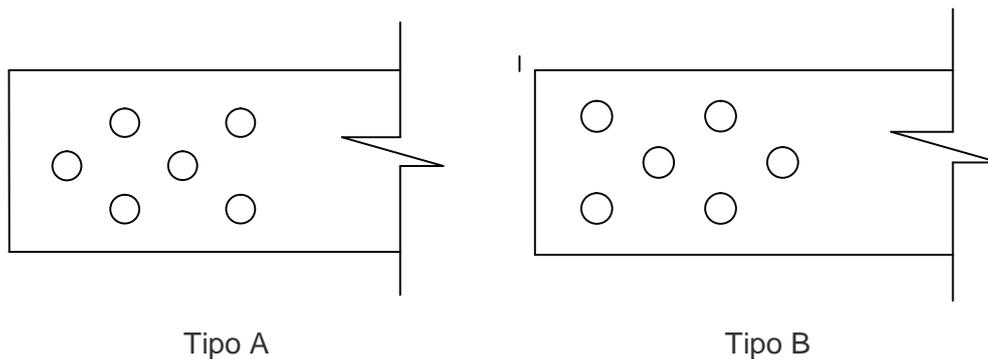


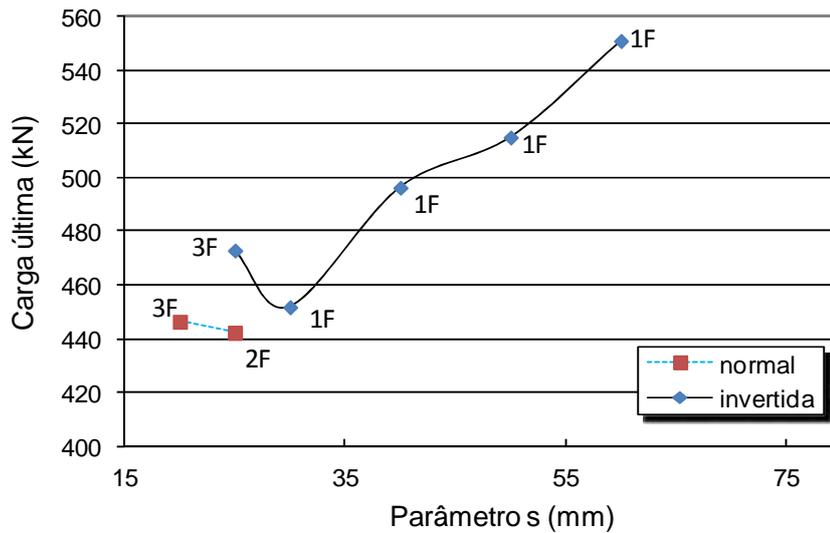
Figura 5.31 – Diferentes tipos de configuração de furação das chapas.

Para o entendimento do comportamento global da configuração aparafusada tipo A e B alguns ensaios foram agrupados, conforme apresentados nos próximos itens.

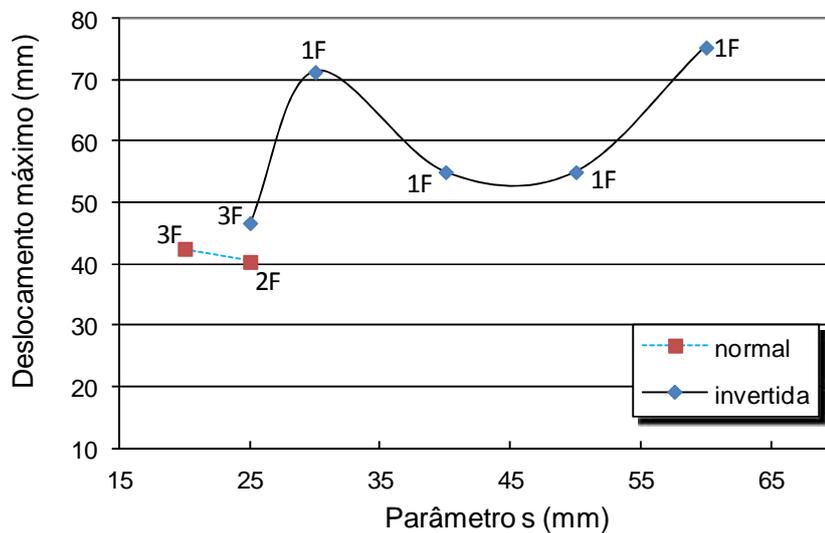
5.5.1 Ensaios de configurações aparafusadas – A_PP_145_6 (37, 38 e 40 a 44)

Os gráficos da Figura 5.32 mostram, respectivamente, a carga última e o deslocamento máximo dos ensaios experimentais constituídos de chapas em aço inoxidável austenítico, com laminação na direção perpendicular à direção da aplicação da carga, com chapa interna com espessura de 6 mm e largura da chapa de 145 mm, variação da distância s entre furos (de 20 mm a 60 mm) e tipo de ligação tipo A ou normal, e do tipo B ou invertida, conforme mostra a Figura 5.31.

Os ensaios com as chapas laminadas na direção perpendicular à aplicação carga apresentaram, como nas chapas laminadas na direção paralela a aplicação da carga, uma variação decrescente da carga última no limite da mudança da seção de ruptura. Esse comportamento pode ter relação, como nas análises anteriores, com a mudança da seção de falha.



(a) – Carga última



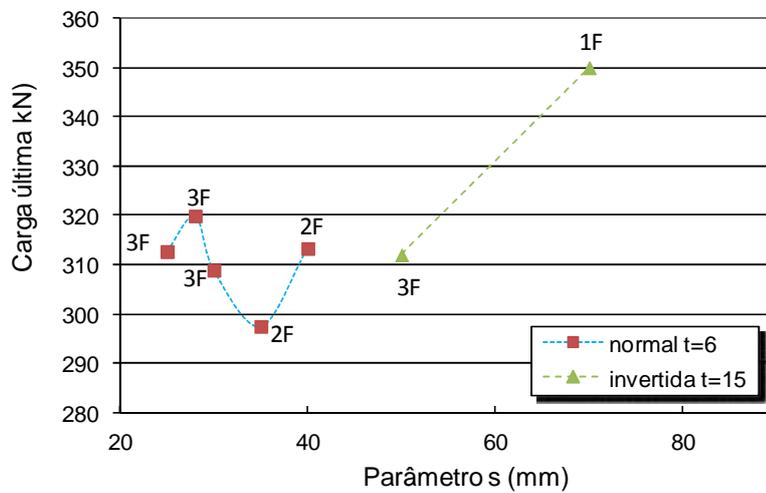
(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.32 – Resultado da comparação dos ensaios – A_PP_145_6 (37, 38 e 40 a 44).

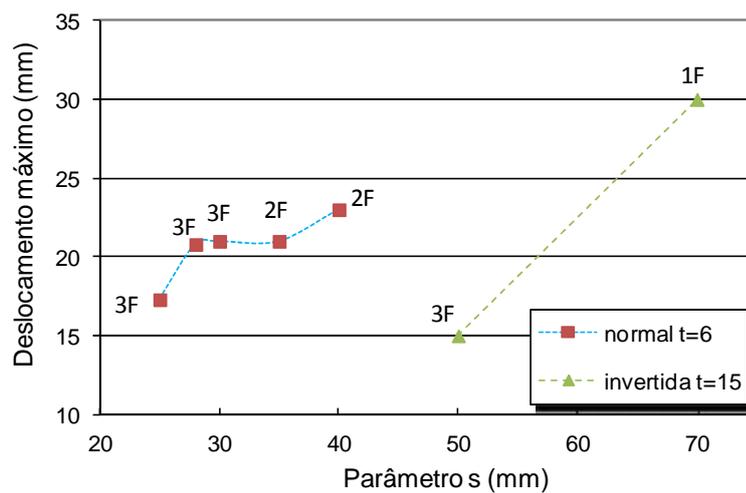
Esses ensaios com a laminação perpendicular à direção da carga axial, com a ligação tipo A ou normal, apresentaram menores deslocamento máximo e carga última do que a ligação tipo B ou invertida na região dos furos, no limite de mudança da seção de ruptura. Esse comportamento mostra que a configuração invertida apresentou maior resistência pela maior seção líquida a ser mobilizada na ruptura, porém, a configuração normal distribui melhor as cargas devido a sua geometria.

5.5.2 Ensaio de configurações aparafusadas – C_PL_145 (1 a 3, 6, 7, 9 e 10)

Nesse item efetua-se à comparação de ensaios com chapas em aço carbono, com laminação na direção paralela a aplicação da carga e largura da chapa de 145 mm, variação da distância s entre furos (de 23 mm a 70 mm), tipo de ligação normal e invertida, e com chapa interna com espessura (de 6 mm e 15 mm), Figura 5.33. A ligação tipo B ou invertida apresentou carga última e deslocamento máximo maior na ruptura da seção passando por um furo do que na ruptura da seção passando por dois furos da ligação tipo A ou normal. Esse comportamento pode estar relacionado à maior seção líquida e ao maior valor do parâmetro s na configuração invertida no limite de ruptura de três para um furo.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.33- Resultado da comparação dos ensaios – C_PL_145 (1a3, 6, 7, 9 e 10).

5.5.3 Estudo analítico

Para um melhor entendimento do comportamento das configurações tipo A e B foi realizado um estudo analítico, utilizando-se as equações de compatibilidade apresentadas no Capítulo 2 dessa tese.

Comparando-se os resultados experimentais da seção no centro e na linha passando por dois parafusos das ligações tipo A e B, com o parâmetro $s = 50$ mm, com o mesmo nível de carga (250 kN), ou seja, ainda no regime elástico nas seções onde foram posicionados os extensômetros, a deformação específica experimental é aumentada em 58%, tanto para a ligação tipo A como para a ligação tipo B. Esse resultado experimental é também encontrado analiticamente utilizando-se as equações (2.13) de equilíbrio e (2.16) de compatibilidade, como mostrado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Comparação das deformações – Ligação tipo A e B

Ensaio	Diferença na deformação específica analítica (%)	Diferença na deformação específica experimental (%)	Deformação experimental quando aplicada a carga limite elástica de 250 kN (μ)	
			Centro	Linha dos parafusos
E1_CARB_S50_a	57,79	58,3	1200	700
E3_CARB_S50	57,79	58,3	6000	3500

Na configuração tipo B, invertida, as deformações específica tendem a se igualar na seção central e na seção passando por dois parafusos, quando o valor de s é aumentado, porém, um efeito contrário é observado na configuração tipo A, conforme o gráfico da Figura 5.34.

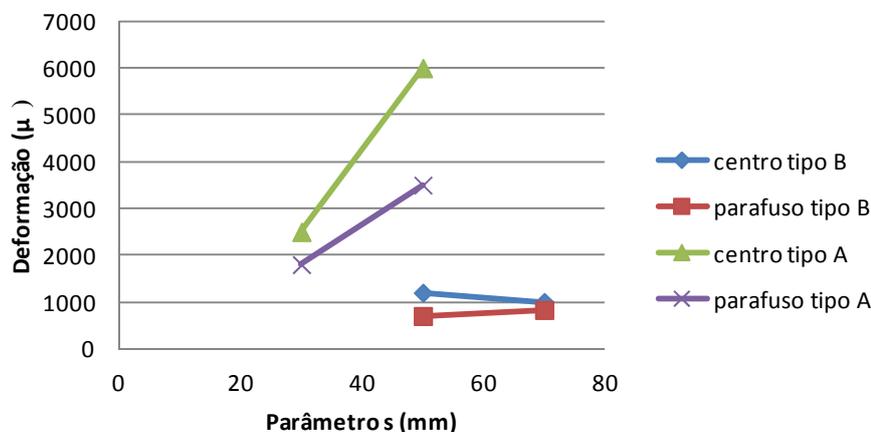


Figura 5.34 – Análise do deformação específica na ligação tipo A e B.

5.6 Influência da direção de laminação

Esta análise baseia-se aferição do comportamento estrutural com a mudança da direção de laminação das chapas, como mostrado na Figura 3.22.

Para o entendimento do comportamento mecânico da estrutura aparafusada, com laminação paralela e perpendicular à direção da aplicação de carga, foram agrupados alguns ensaios.

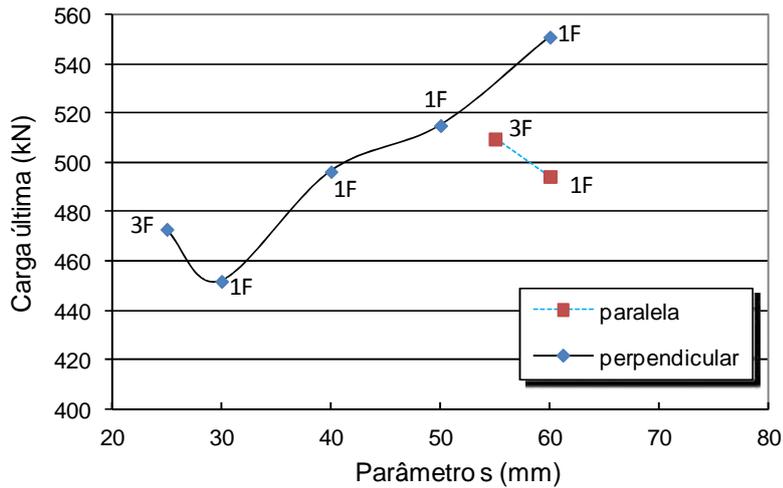
5.6.1 Ensaios de configurações aparafusadas – A_I_145_6 (31, 32 e 39 a 43)

Verificando-se a influência da variação da distância s entre furos (de 25 mm a 60 mm) e de chapas com laminação na direção perpendicular e paralela a da aplicação da carga, foram agrupados os ensaios experimentais de chapas em aço inoxidável austenítico, com ligação tipo B ou invertida, com chapa interna com espessura de 6 mm e largura da chapa de 145 mm, cujos resultados são apresentados nos gráficos da Figura 5.35.

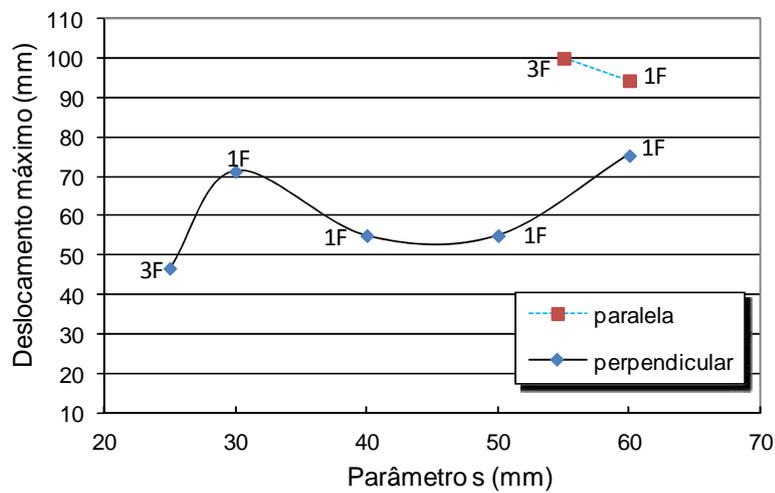
Nesses ensaios a carga última diminui no limite da mudança da seção de ruptura de três para um furo. Esse comportamento pode estar vinculado a distribuição melhor da carga na ruptura passando por três furos na mudança da seção de ruína da ligação.

Nesta análise observa-se que na ligação com chapa com laminação perpendicular à direção da aplicação de carga ocorre um aumento do deslocamento máximo com o aumento do parâmetro s . Esse efeito pode estar relacionado ao aumento da rigidez da ligação com o aumento da distância entre furos na direção de aplicação da carga e do tipo de laminação.

O limite de ruptura na configuração invertida, com chapa com laminação paralela à aplicação de carga, ocorre com o dobro do valor do parâmetro s , 10% a mais de carga última e 60% a mais de deslocamento máximo da configuração invertida com laminação perpendicular à direção da carga axial comprovando a diferença entre os dois tipos de laminação na configuração invertida.



(a) – Carga última



(b) – Deslocamento máximo

Figura 5.35 – Resultado da comparação dos ensaios – A_I_145_6 (31, 32 e 39 a 43).

A ruptura inesperada na seção líquida passando por um furo nos dois tipos de laminação ocorreu devido a concentração de tensões nessa seção do centro da ligação com o aumento do parâmetro s .

5.7 Determinação de um fator de correção para chapas aparafusadas em aço inoxidável

Com base nos resultados experimentais será determinado um fator de redução a ser aplicado na fórmula teórica para cálculo da resistência máxima da placa aparafusada em aço inoxidável, com base no estado limite último de ruptura da seção líquida. Para tal foram construídos gráficos com os resultados

experimentais das ligações em aço inoxidável *versus* tensões modificados por coeficientes iguais a 0,8, 0,9 e 1,0.

A tensão teórica é obtida pela multiplicação da tensão limite de ruptura do aço pela área de ruptura apresentada no ensaio experimental. O resultado é então dividido pela seção bruta da ligação. A tensão experimental é obtida dividindo-se a carga experimental pela seção bruta da ligação.

Nesses gráficos foram usadas as tensões calculadas teoricamente e multiplicadas por fatores iguais a 0,8, 0,9 e 1,0, e comparadas com as tensões encontradas nos ensaios experimentais, para então se determinar o fator ideal para cada tipo de aço inoxidável.

O fator ideal para cada tipo de aço inoxidável foi determinado pela análise dos gráficos, onde foram levadas em consideração as distâncias entre as retas lineares para cada fator em relação ao fator ótimo, onde x seria igual a y .

Os gráficos são apresentados da Figura 5.36 a Figura 5.38 referentes, respectivamente, aos aços inoxidáveis austenítico, duplex e ferrítico.

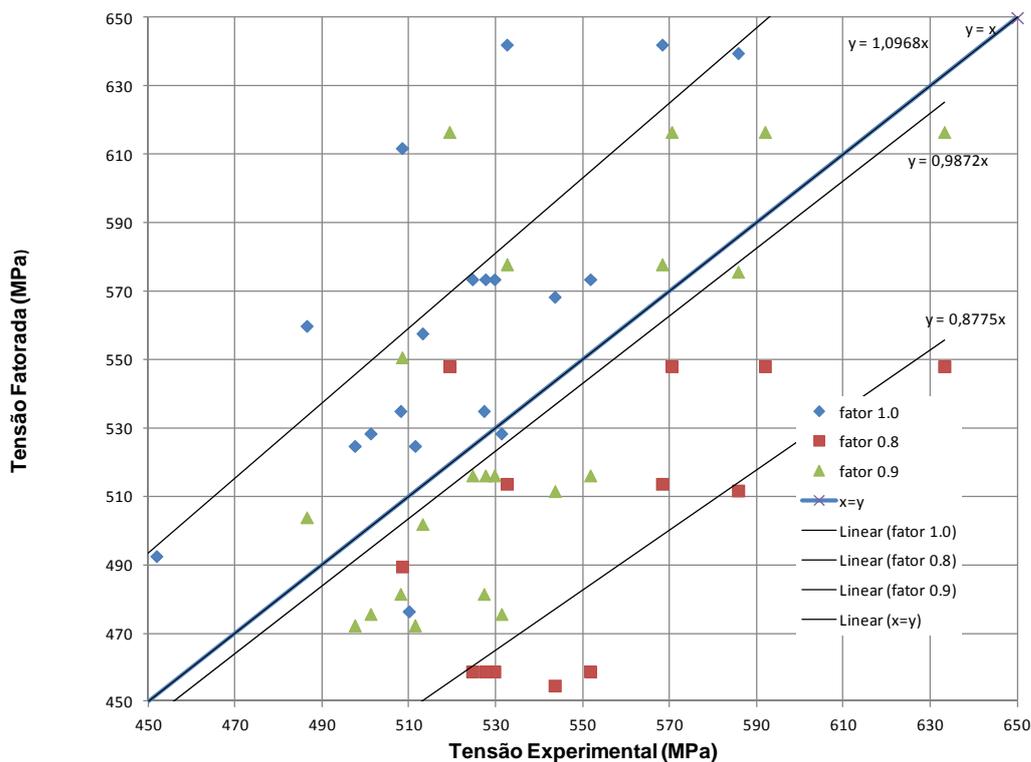


Figura 5.36 – Aço inoxidável austenítico.

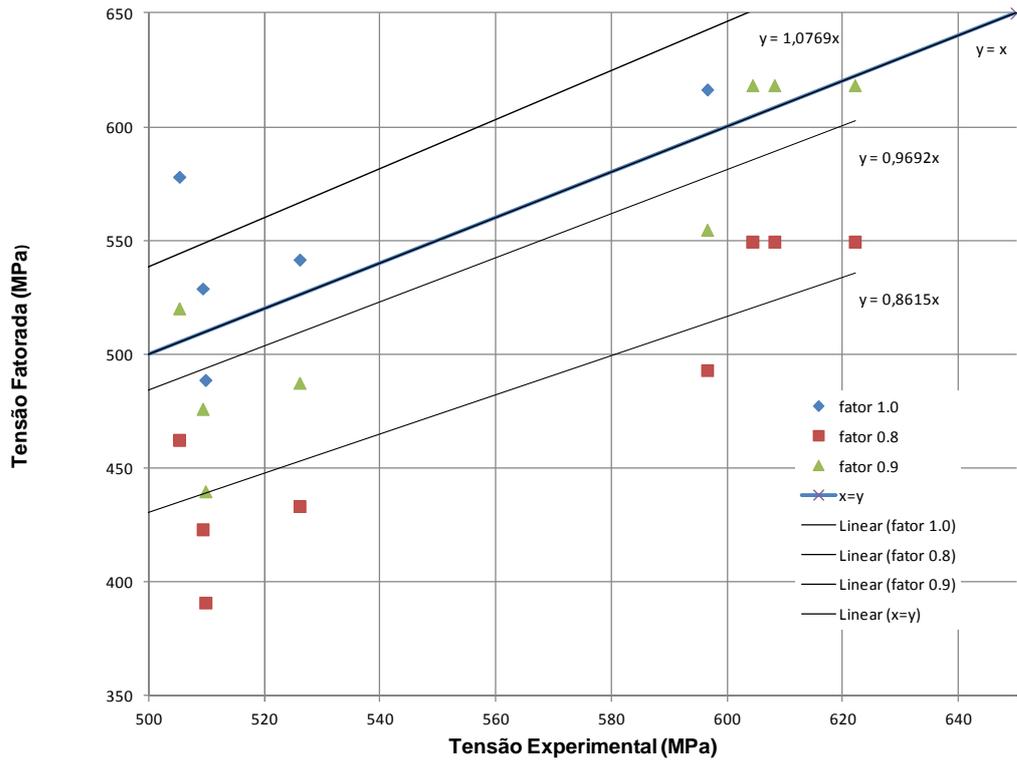


Figura 5.37 – Aço inoxidável duplex.

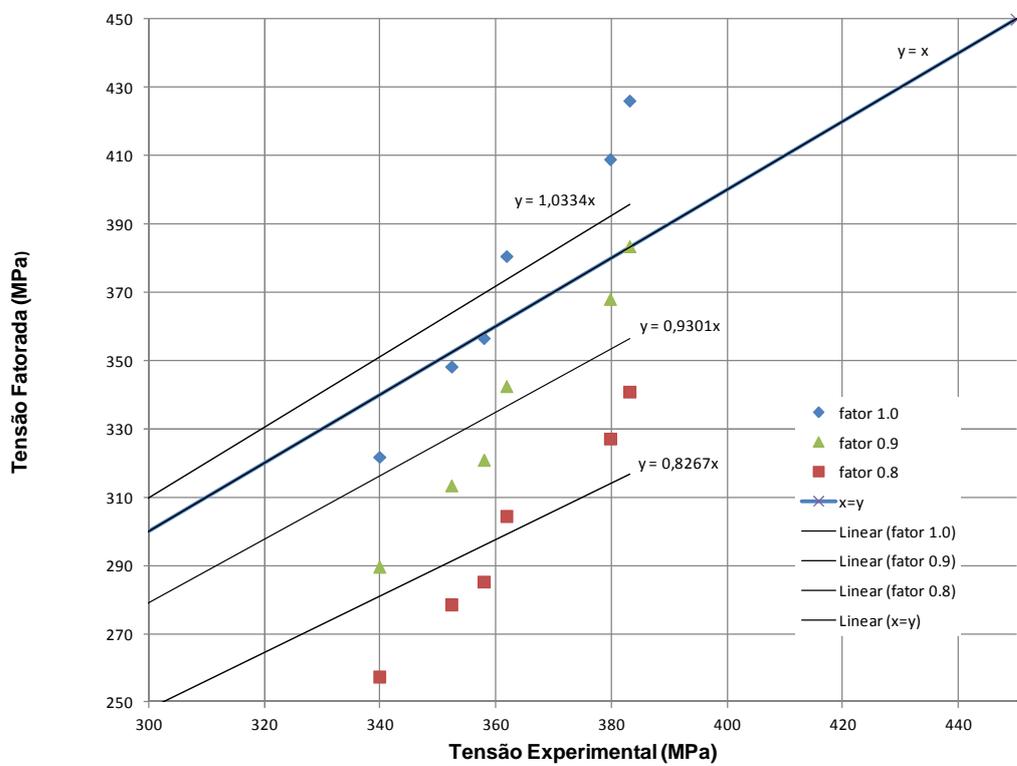


Figura 5.38 – Aço inoxidável ferrítico.

Os resultados da análise desses gráficos é apresentado na Tabela 5.4. No item 2.8.1 dessa tese foi realizada uma análise com os resultados experimentais referente ao aço carbono. Considerando-se que o índice de segurança beta é mantido, é encontrado um desvio padrão conservativo de 5%. Aplicando-se esse mesmo desvio padrão aos aços inoxidáveis se mantém o mesmo fator de segurança adotado no aço carbono.

Tabela 5.4 – Fatores experimentais e corrigidos para os aços em estudo

Tipo de aço	Fator experimental	Fator corrigido (índice)
Carbono	0,95	0,90
Austenítico	0,91	0,86
Duplex	0,93	0,88
Ferrítico	0,97	0,92

Nessa primeira análise usando-se como referência os resultados dos ensaios experimentais e estatisticamente, considerando-se a probabilidade de ruína encontram-se novos fatores para os aços inoxidáveis.

Esse fato revela que deve-se ampliar as pesquisas no sentido de se definir novo fator de correção para os aços inoxidáveis.

Deve ser lembrar que a norma, conservadoramente, define para os aços inoxidáveis, uma limitação adicional de carga de projeto, quando do escoamento considerando-se a seção bruta.