

4

Resultados dos Ensaios Experimentais

Esse capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados de ensaios experimentais de ligações aparafusadas.

Para cada ensaio descrito por meio de sua nomenclatura serão apresentados fotos da configuração inicial do ensaio, na deformação específica limite (quando houver), e da ruptura do ensaio.

Os ensaios serão agrupados para cada tipo de aço. Dentro do grupo de um tipo de aço serão agrupados novamente em função da variação dos parâmetros analisados nesta tese.

Ao final de cada grupo de ensaios serão mostrados gráficos carga *versus* deformação específica e carga *versus* deslocamento, acompanhados de uma tabela com os dados adquiridos durante a realização do ensaio.

A deformação específica limite apresentada nos gráficos carga *versus* deformação específica foi calculada pelo Método da Resistência Contínua apresentada no capítulo seis dessa tese. Ao final desse capítulo será apresentada a Tabela 4.14 com o resumo de todos os resultados encontrados.

4.1 Ensaio de ligações em aço carbono (1 a 22)

Na Figura 4.1 é mostrado o desenho geométrico básico desses ensaios com valor do parâmetro $s = 30$ mm. Os extensômetros 3, 4 e 5 foram posicionados de forma simétrica na outra placa de ensaio paralela a essa.

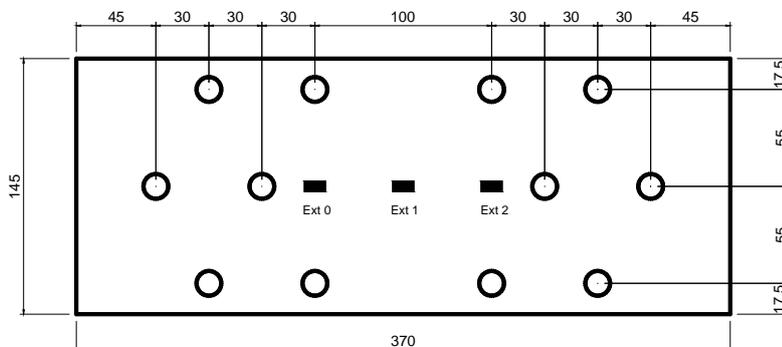


Figura 4.1 – Desenho geométrico e posicionamento dos extensômetros.

Na Figura 4.2 apresenta a foto do ensaio posicionado na máquina de tração com a localização do LVDT e a disposição, com vista frontal da máquina, do posicionamento do LVDT (National Instruments) e do Encoder (Dinateste).

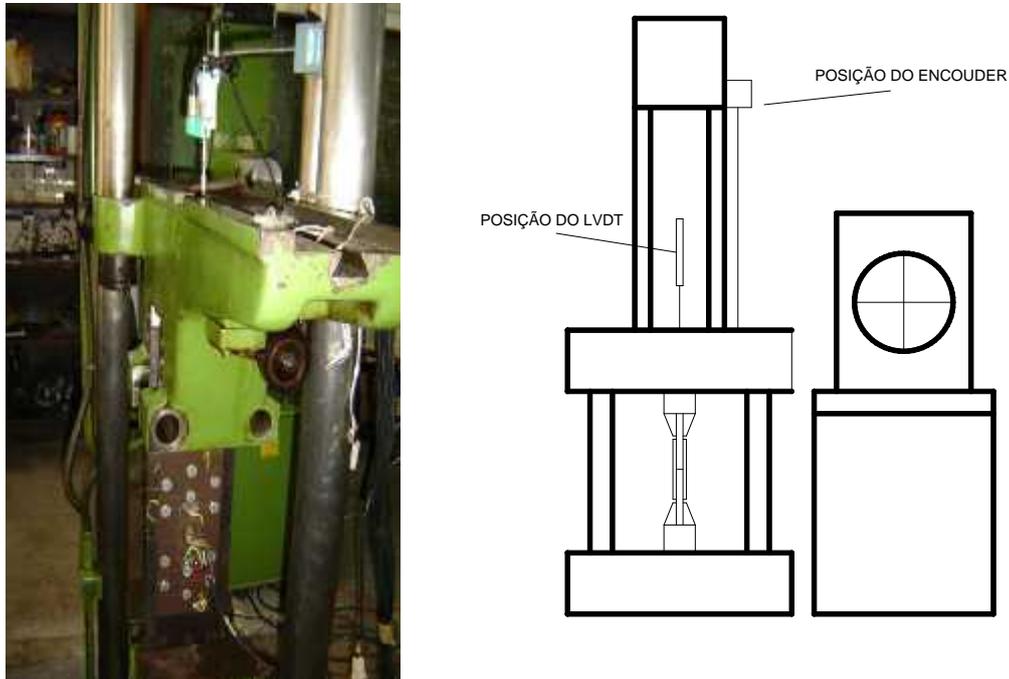


Figura 4.2 – Posicionamento do LVDT e Encoder.

4.1.1 Influência do parâmetro s (1 a 8)

Com o objetivo de se determinar o valor do parâmetro s limite na mudança do tipo de ruptura da seção líquida, foram realizados oito primeiros ensaios com valores do parâmetro s igual a 25, 28, 30, 30, 35, 35, 40 e 50 mm, respectivamente. Alguns ensaios foram repetidos em função da necessidade de confirmação de resultados.

Esses ensaios tiveram o objetivo de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada e determinar a distância limite, do parâmetro s , para a ruptura em três e dois furos na ligação aparafusada com furos alternados.

4.1.1.1 Ensaio E1_C_PL_N_145_6_25

Esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme Figura 4.3 (b), confirmando os cálculos teóricos que apresentam esse tipo de ruptura.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga com características geométricas de 6 mm de espessura e de 200 mm de largura.

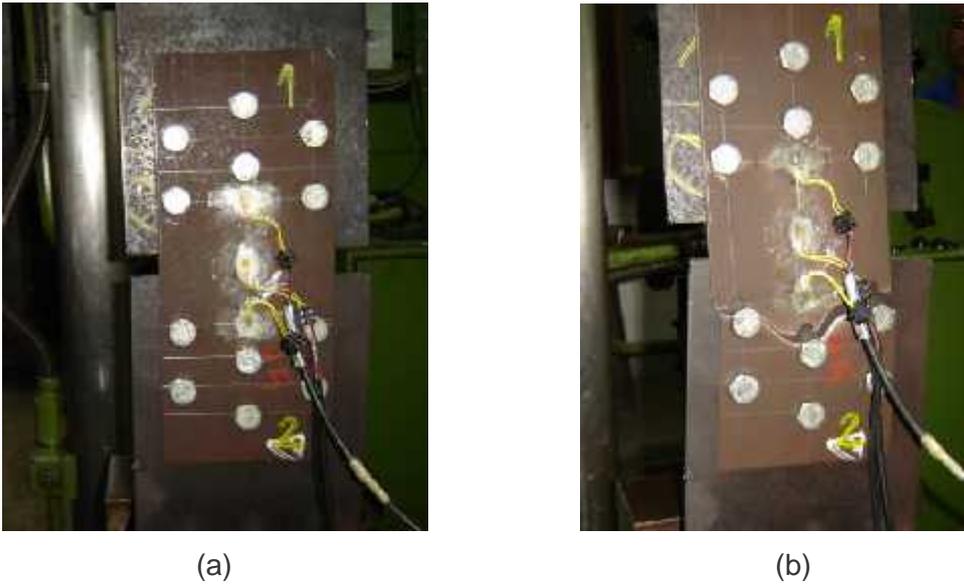


Figura 4.3 – Ensaio 1: (a) configuração inicial (b) depois da ruptura.

4.1.1.2 Ensaio E2_C_PL_N_145_6_28

Esse ensaio foi realizado para se verificar o aumento do valor do parâmetro s de 25 mm para 28 mm produziria mudança no tipo de ruptura da seção líquida de três furos para dois furos. Adotou-se ainda, uma placa de aplicação de carga duas chapas de 3 mm de espessura soldadas, conforme detalhe da Figura 4.4 (a), ficando no final com características geométricas de 6 mm de espessura e de 200 mm de largura. Apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, Figura 4.4 (c), confirmando a previsão feita pelas recomendações de norma.

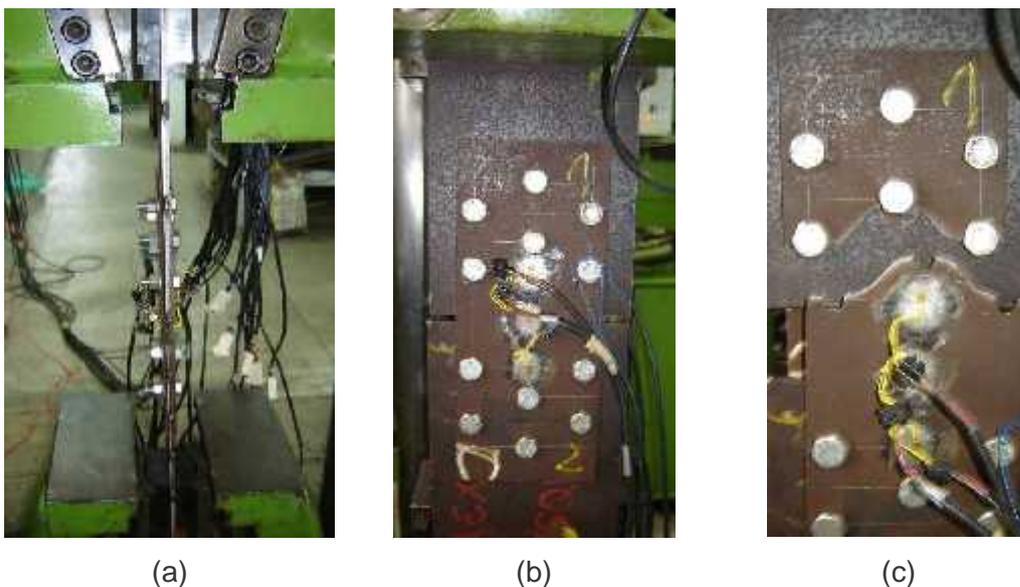


Figura 4.4 – Ensaio 2: (a) placa soldada, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.1.1.3 Ensaio E3_C_PL_N_145_6_30

O ensaio anterior com o valor do parâmetro $s = 28$ mm rompeu na seção líquida de três furos. Esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, Figura 4.5 (b), novamente confirmando os cálculos teóricos, que apresentam esse tipo de ruptura.

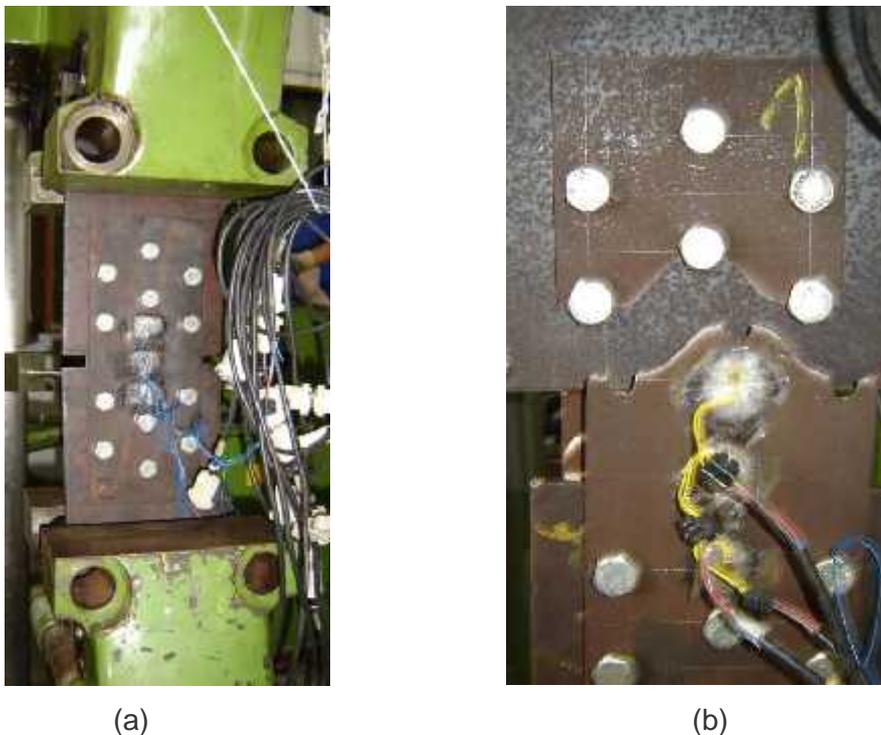


Figura 4.5 – Ensaio 3: (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.

4.1.1.4 Ensaio E4_C_PL_N_145_6_30

Essa repetição do ensaio anterior teve o objetivo de ratificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada anterior e confirmar a distância limite do parâmetro s , para a ruptura em três e dois furos na ligação aparafusada com furos alternados. O ensaio anterior com o valor do parâmetro $s = 30$ mm rompeu na seção líquida de três furos.

Esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme Figura 4.6 (b), diferente do ensaio anterior com o mesmo valor do parâmetro s de 30 mm, não confirmando a previsão de que a ruptura ocorre na seção líquida passando por três furos.

Esse valor do parâmetro s mostrou ser o limite da mudança da seção de ruptura diferente do valor teórico de 40 mm para essa configuração de ligação.

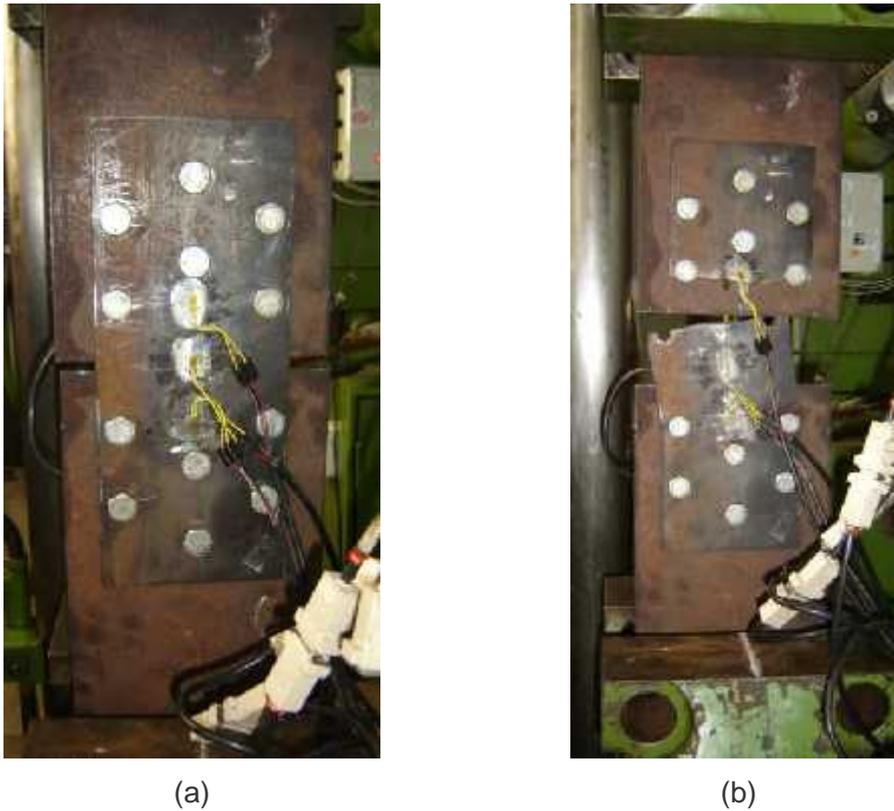


Figura 4.6 – Ensaio 4: (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.

4.1.1.5 Ensaio E5_C_PL_N_145_6_35

O dois ensaios anteriores com o valor do parâmetro $s = 30$ mm romperam na seção líquida de dois e três furos, apontando ser o valor limite. Nesse ensaio foi utilizada equivocadamente uma chapa interna com 5 mm de espessura, o que causou o ruptura a tração da mesma conforme fotos da Figura 4.7.

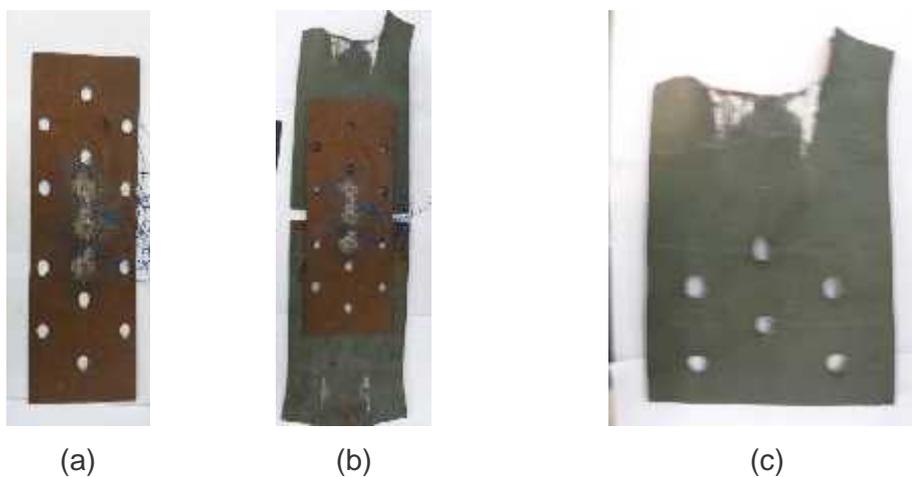


Figura 4.7 – Ensaio 5: (a) chapa de ensaio, (b) ligação, (c) ruptura da chapa interna.

4.1.1.6 Ensaio E6_C_PL_N_145_6_35

O ensaio anterior com o mesmo valor do parâmetro $s = 35$ mm e placa interna com 5 mm de espessura rompeu na placa interna.

Esse ensaio repetido agora com placa interna com espessura de 6 mm, apresentou ruptura na seção de seção líquida de dois furos, conforme Figura 4.8 (c) confirmando o valor limite do parâmetro $s = 30$ mm para essa configuração de ligação aparafusada com furos alternados.

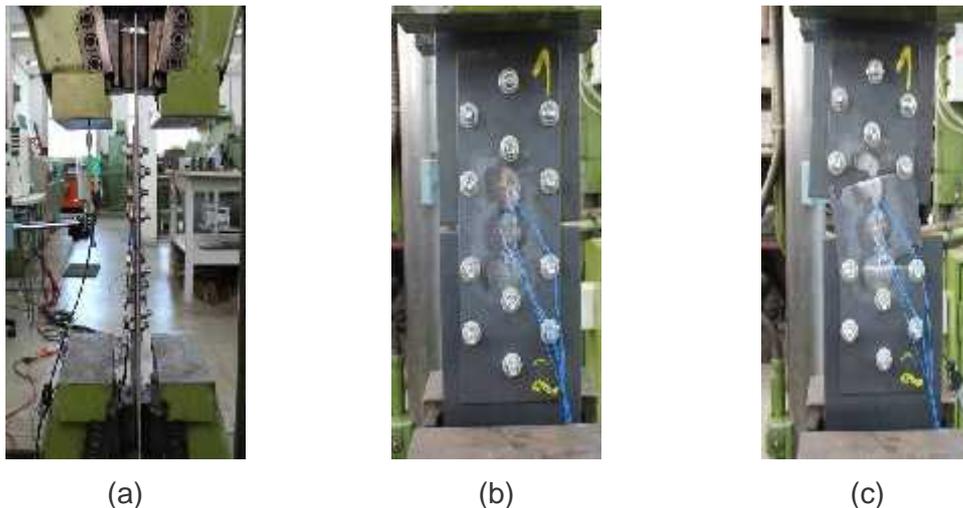


Figura 4.8 – Ensaio 6: (a) Posicionamento na máquina, (b) configuração inicial, (c) após a ruptura.

4.1.1.7 Ensaio E7_C_PL_N_145_6_40

Os dois ensaios anteriores com o valor do parâmetro $s = 30$ mm romperam na seção líquida passando por dois e três furos, apontando ser esse o valor limite.

O ensaio anterior com parâmetro $s = 35$ mm apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, confirmando o limite para o valor do parâmetro s de 30 mm.

Esse ensaio com o valor do parâmetro s de 40 mm teoricamente seria o limite para se averiguar a ruptura na seção líquida passando por dois ou três furos, porém, apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos.

Esse ensaio apresenta as mesmas características de produção e execução descritas no capítulo anterior.

Na Figura 4.9 é apresentado foto do ensaio experimental colocado nas garras da máquina de tração, e um desenho esquemático dos ensaios com o posicionamento dos instrumentos de medição do deslocamento.

Na Figura 4.9 é mostrada a configuração inicial do ensaio e fim do experimento com a ruptura na seção líquida passando por dois furos.

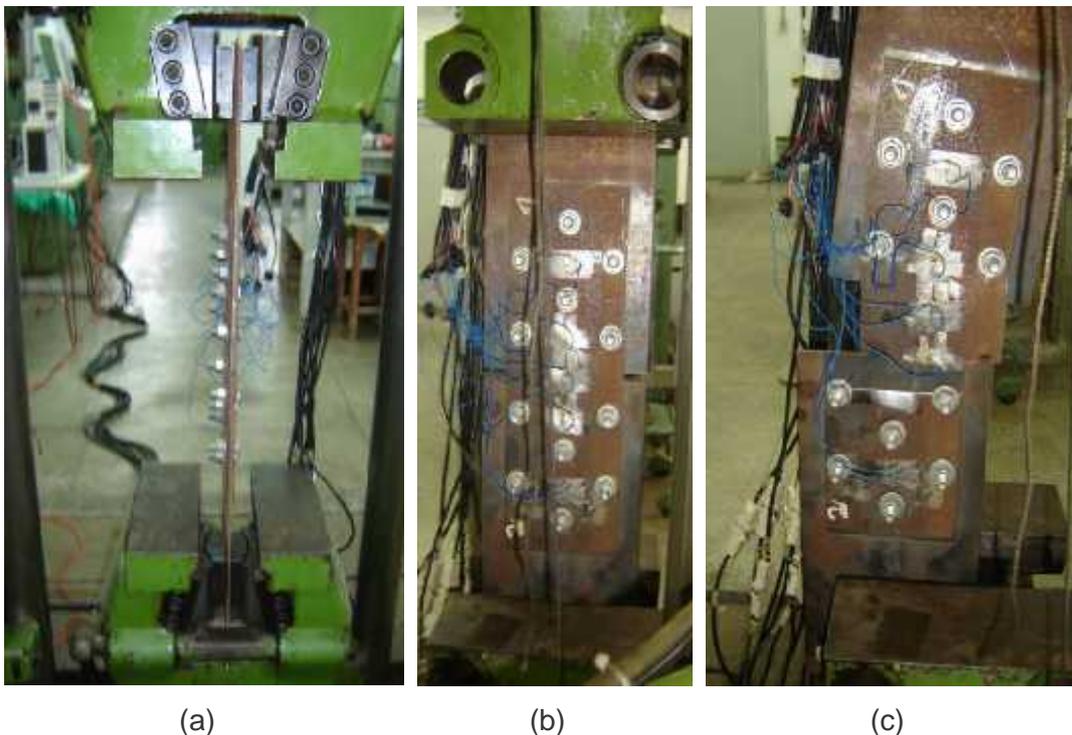


Figura 4.9 – Ensaio 7: (a) ensaio na máquina de tração, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.1.1.8 Ensaio E8_C_PL_I_145_6_50

Esse ensaio teve o objetivo de se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida, conforme sua geometria da Figura 4.10, e determinar a distância limite do parâmetro s para a mudança de ruptura da ligação aparafusada invertida com furos alternados.

Esse ensaio apresenta as mesmas características de produção e execução dos ensaios anteriores. O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme Figura 4.11

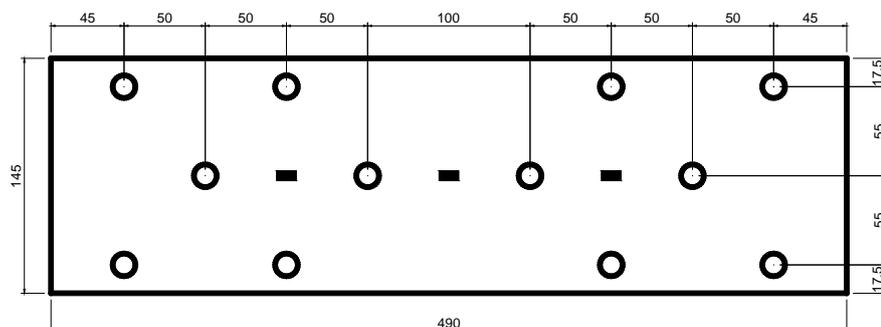


Figura 4.10 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

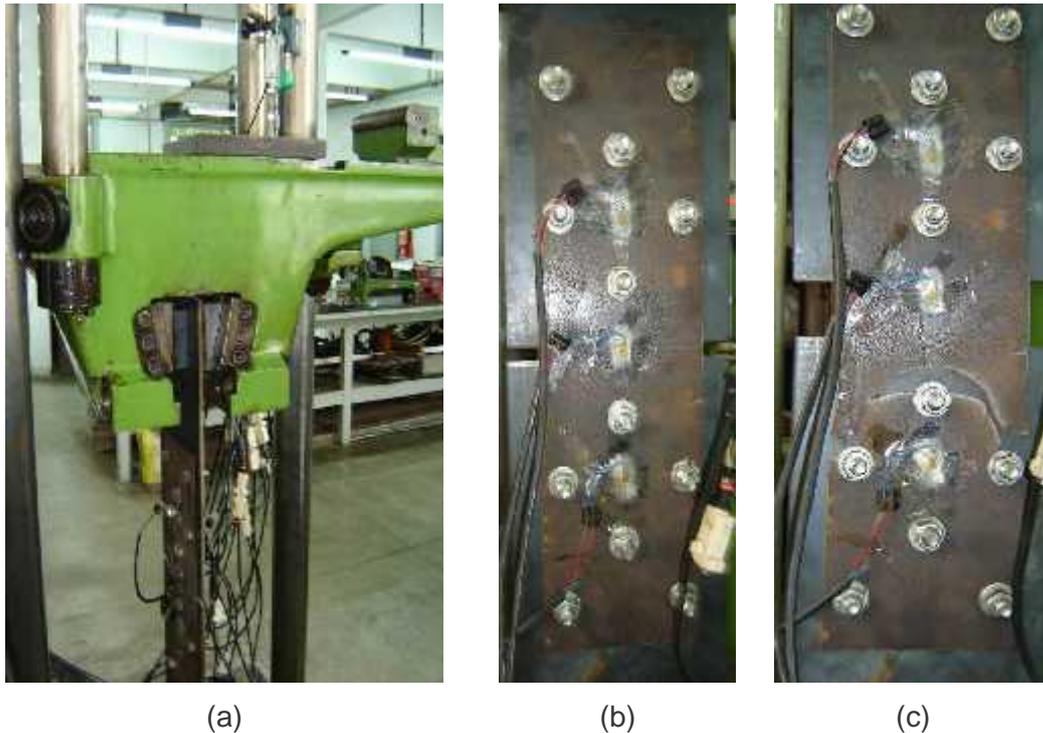


Figura 4.11 – Ensaio 8: (a) ensaio na máquina, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.1.1.9 Resultados dos ensaios 1 a 8 – Grupo I

A Figura 4.12 e a Figura 4.13 mostram o comportamento mecânico, por meio de curvas carga *versus* deslocamento e curvas carga *versus* deformação específica desse conjunto de ensaios.

Os ensaios apresentaram deslocamento inicial devido à acomodação do conjunto chapas e parafusos, e acomodação das garras da máquina de tração.

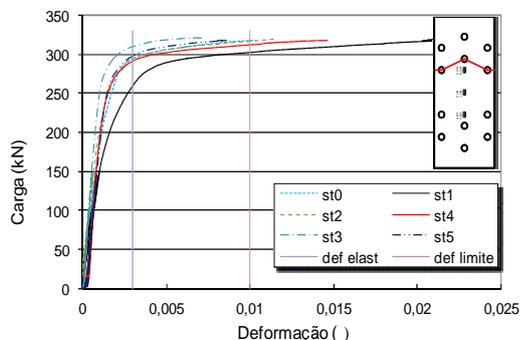
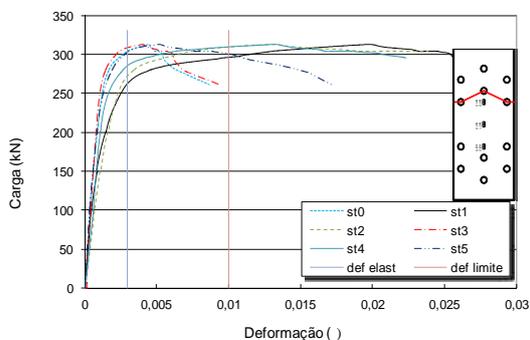
Os gráficos carga *versus* deformação específica, Figura 4.12, apresentam no limite da fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros, maior rigidez na seção entre os parafusos e menor rigidez na seção central da ligação.

Na deformação específica limite, encontrada através do Método da Resistência Contínua, que será apresentada no capítulo seis dessa tese, a ligação apresenta um equilíbrio de carga nas das seções analisadas.

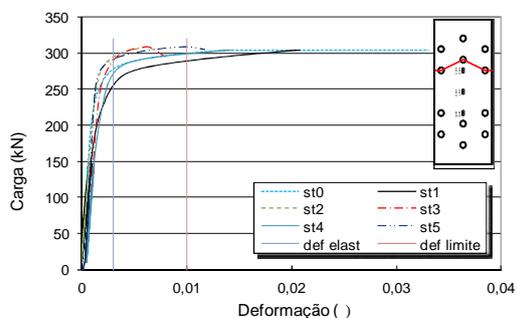
Os resultados estão presentes na Tabela 4.1. No ensaio E1_C_PL_N_145_6_25, na Figura 4.12, o extensômetro 2 apresenta um comportamento diferente devido a algum tipo de desequilíbrio inicial na ligação, porém, mais para o fim do ensaio apresenta comportamento similar aos posicionados na seção dos outros furos. Os extensômetros 0 e 3 apresentaram falha na leitura devido a um provável descolamento.

O ensaio E5 apresenta maior deslocamento final em virtude da ruptura inesperada da placa interna de 5 mm de espessura.

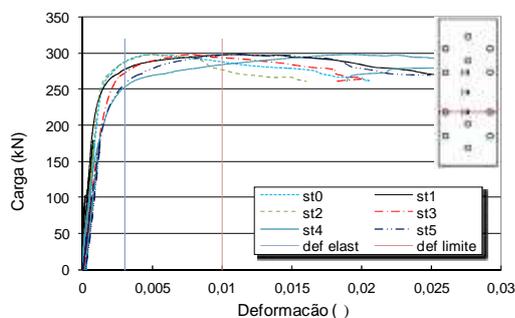
O ensaio E8 apresenta maior carga última e deslocamento em relação aos demais ensaios. Esse comportamento pode estar associado a configuração invertida da furação.



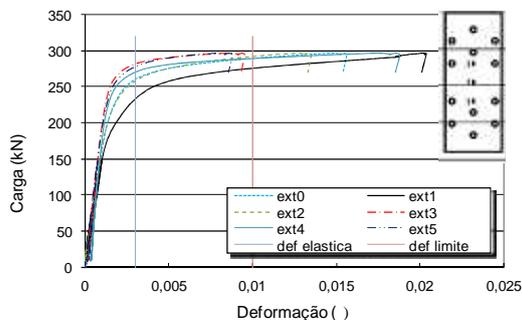
Ensaio 1 – C_PL_N_145_6_25



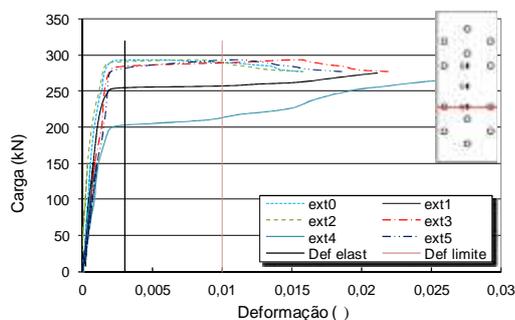
Ensaio 2 – C_PL_N_145_6_28



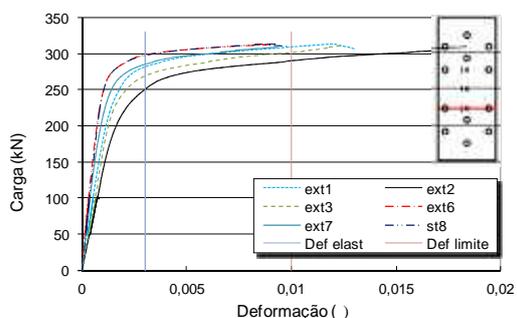
Ensaio 3 – C_PL_N_145_6_30



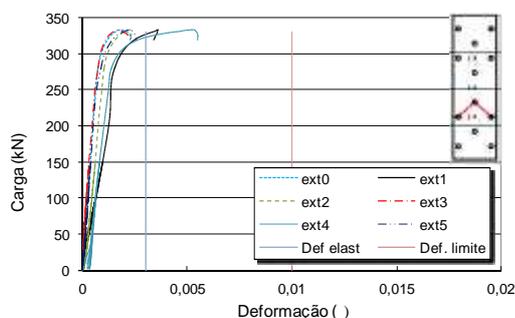
Ensaio 4 – C_PL_N_145_6_30



Ensaio 5 – C_PL_N_145_6_35



Ensaio 6 – C_PL_N_145_6_35



Ensaio 7 – C_PL_N_145_6_40

Ensaio 8 – C_PL_I_145_6_50

Figura 4.12 – Gráficos carga versus deformação específica – Grupo I.

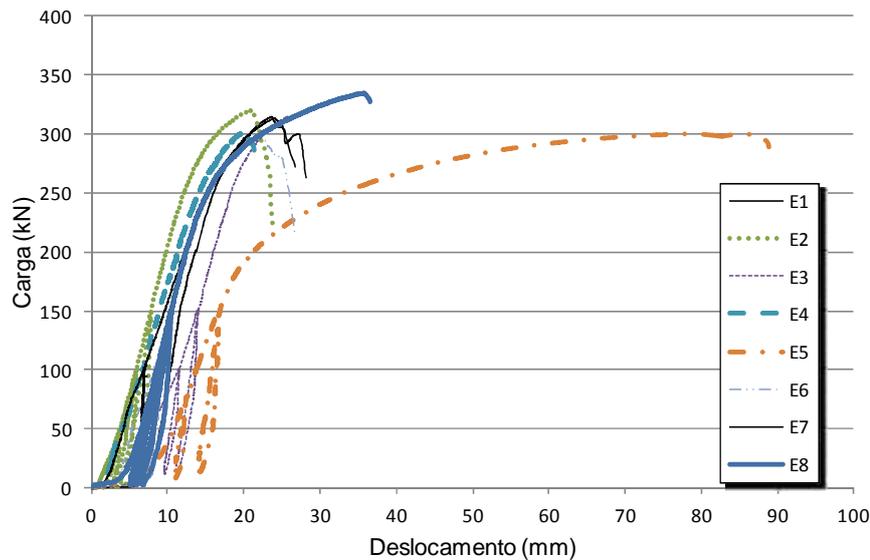


Figura 4.13 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo I.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo I

Ensaio	Carga última (kN)	Desloc. inicial (mm)	Desloc.. final (mm)	Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)	
				Par.*	Centro	Par.*	Centro
E1_C_PL_N_145_6_25	312,7	7	17,3	305	275	300	305
E2_C_PL_N_145_6_28	319,9	9	20,8	305	275	315	310
E3_C_PL_N_145_6_30	308,9	6	21,0	280	270	300	290
E4_C_PL_N_145_6_30	300,1	2	19,3	275	270	290	290
E5_C_PL_N_145_6_35	299,8	3	79,7	275	260	290	280
E6_C_PL_N_145_6_35	297,5	3	21,0	280	230	280	240
E7_C_PL_N_145_6_40	313,3	2	23,0	280	270	305	300
E8_C_PL_I_145_6_50	332,5	3	32,8	325	325	–	–

* seção entre dois parafusos

4.1.2 Influência do parâmetro t_{pi} - (espessura da placa interna da ligação) (11 a 18)

Com o objetivo de se avaliar a influência da variação da espessura da placa interna, na mudança da seção de ruptura da seção líquida, e identificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada defasada, foram

realizados oito ensaios com valores do parâmetro t igual a 6, 8, 10, 12 e 15 mm. Alguns ensaios foram repetidos em função da necessidade de redundância de resultados ou variação de parâmetros.

4.1.2.1 Ensaio E11_C_PL_N_145_8_30

Esse ensaio teve o objetivo de se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada com furos alternados com a variação da espessura da placa interna. Os ensaios anteriores com o valor do parâmetro $s = 30$ mm e da espessura da placa interna de 6 mm visou determinar o limite da mudança da seção de ruptura.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 8 mm de espessura e 200 mm de largura, conforme mostrado na Figura 4.14. Esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois e três furos, confirmando ser esse o valor limite para a mudança da seção de ruptura mesmo com aumento da espessura da placa interna para 8 mm, conforme mostrado na Figura 4.15.

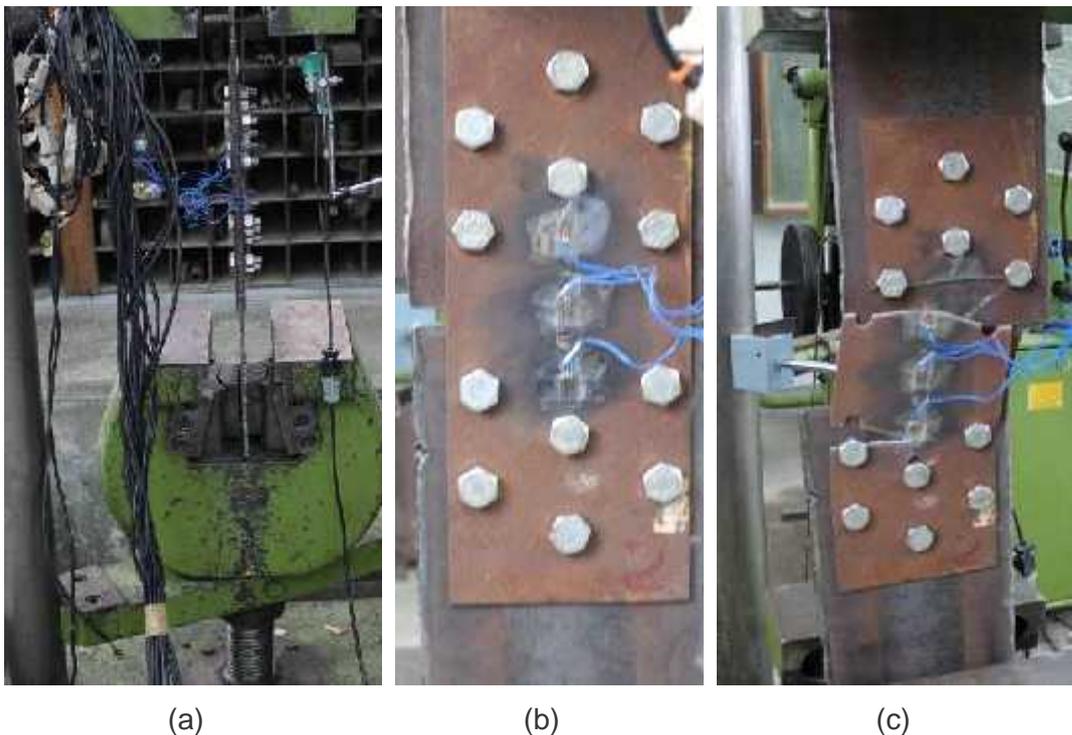


Figura 4.14 – Ensaio 11: (a) posicionamento na máquina de tração, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

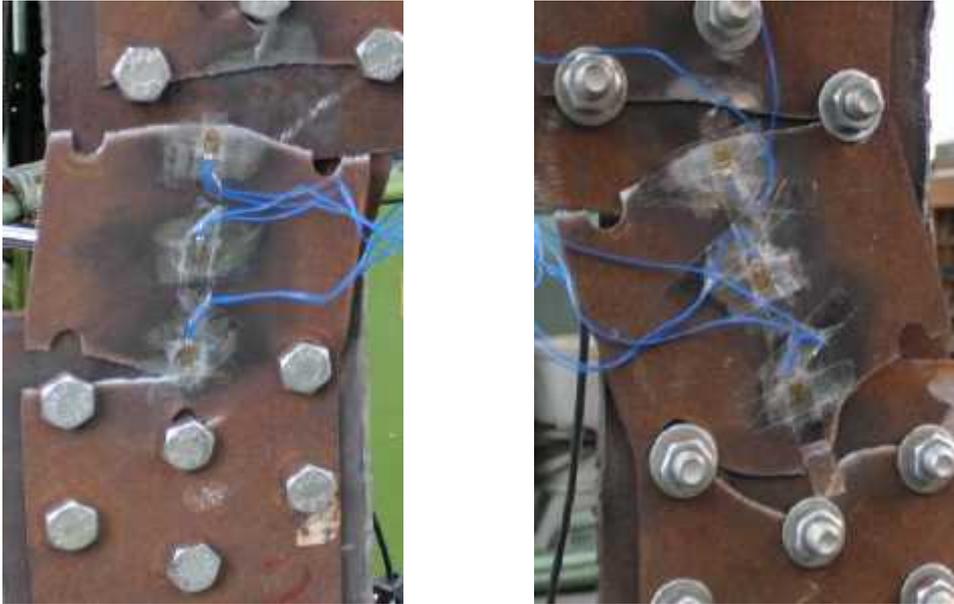


Figura 4.15 – Detalhe da ruptura na seção líquida em dois e três furos.

4.1.2.2 Ensaio E12_C_PL_N_145_10_30

Os ensaios anteriores com o valor do parâmetro da espessura da placa interna de 6 e 8 mm apresentaram ruptura na seção líquida passando por dois e três furos.

Esse ensaio adotou uma placa de aplicação de carga com características geométricas de 10 mm de espessura e 200 mm de largura. O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, como mostrado na Figura 4.16 (b).

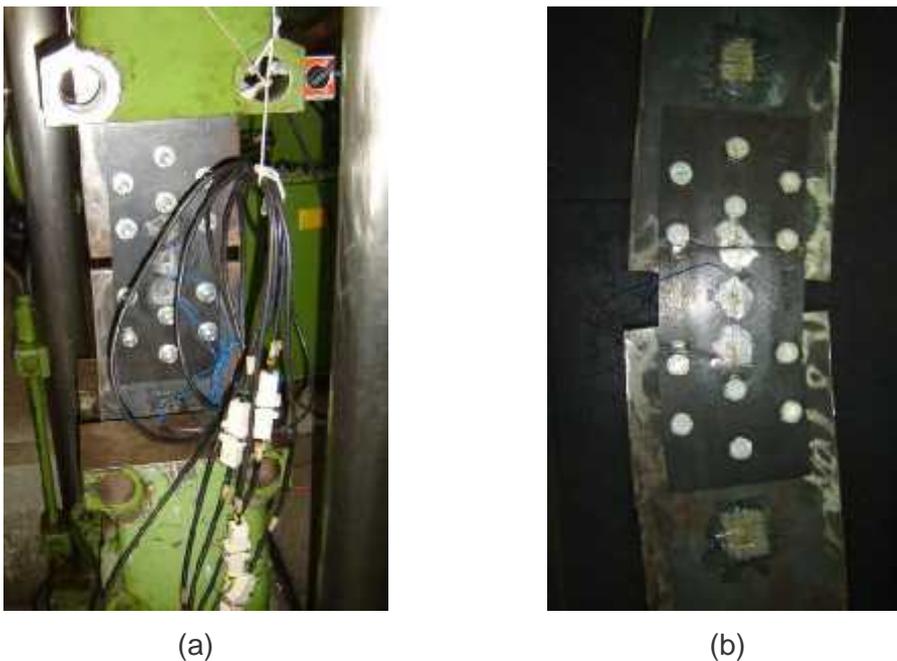


Figura 4.16 – Ensaio 12: (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.

4.1.2.3 Ensaio E13_C_PL_N_145_10_30

Esse ensaio mostrado no trabalho de Santos (2008) é apresentado de forma redundante, para se mostrar o comportamento mecânico da configuração aparafusada com parafusos alternados com a variação da espessura da placa interna.

Esse ensaio apresentou inicialmente a ruptura na seção líquida passando por dois furos e após em três furos, apresentada na Figura 4.17 (c). Esse resultado pode estar relacionado a rotação indesejada que a ligação executou ao final do ensaio. As características de produção e execução do ensaio foram similares às anteriores.

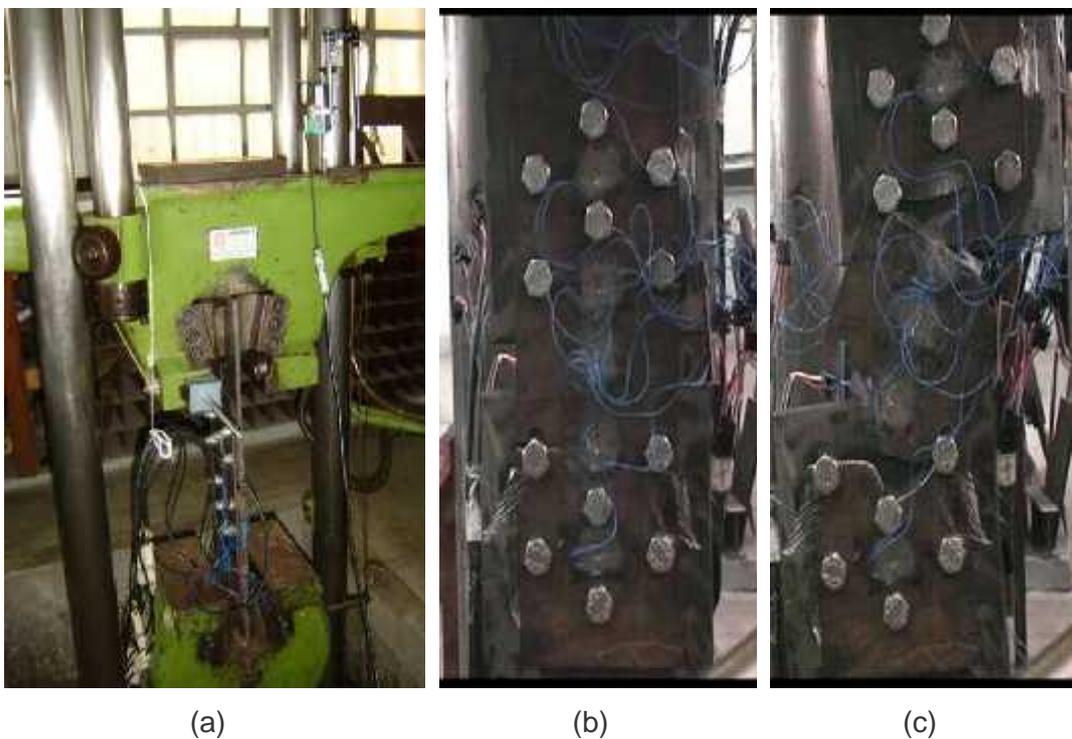


Figura 4.17 – Ensaio 13: (a) Ensaio pronto, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.1.2.4 Ensaio E14_C_PL_N_145_12_30

Esse ensaio com placa interna com espessura de 12 mm visou avaliar o comportamento mecânico da configuração aparafusada com furos alternados, com a variação da espessura da placa interna. Esse ensaio foi realizado para se confirmar o efeito da concentração de tensão provocado pelo aumento da espessura da placa interna do ensaio. As diretrizes de produção e execução do ensaio foram similares às anteriores.

O ensaio apresentou ruptura na seção da área líquida de dois furos, conforme mostrado na Figura 4.18 (c), confirmando que o aumento da placa interna promove a concentração de tensões na primeira coluna de parafusos perto do centro da ligação aparafusada.

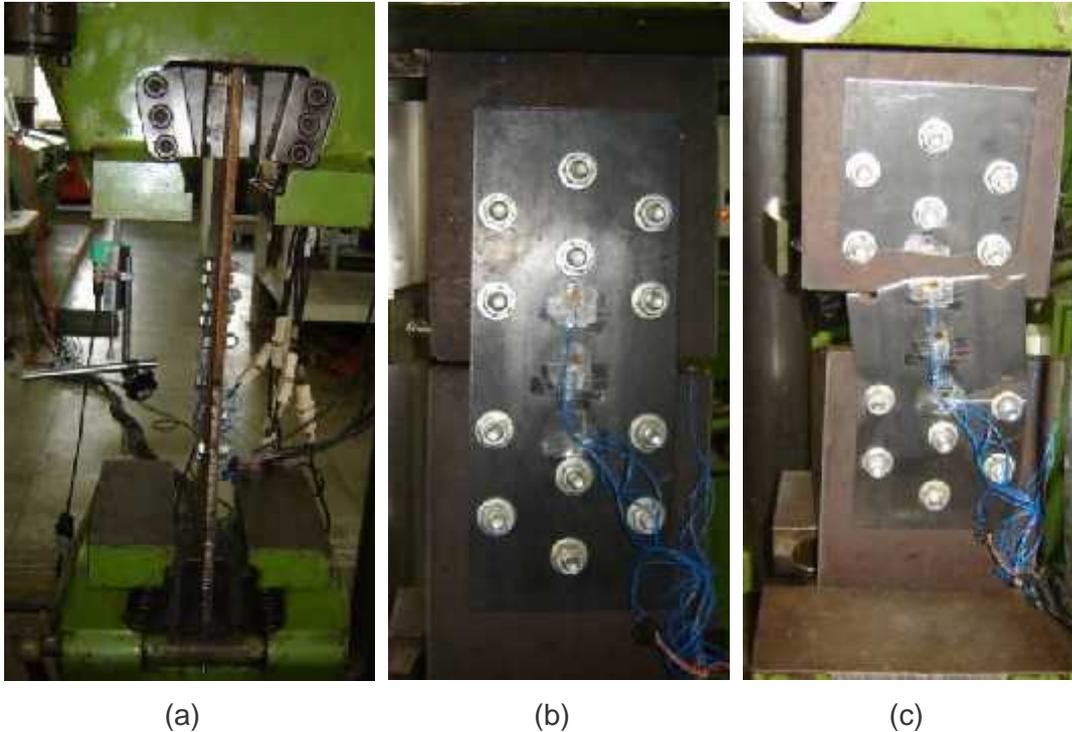


Figura 4.18 – Ensaio 14: (a) vista lateral, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.1.2.5 Ensaio E15_C_PL_N_145_15_30

Esse ensaio com placa interna, ou seja, entre as chapas de ensaio, onde foi aplicada a carga, com espessura de 15 mm visou avaliar o comportamento mecânico da configuração aparafusada com furos alternados, com a variação da espessura da placa interna.

Como todos os outros ensaios, excetuando-se o com a placa interna de 6 e de 8 mm de espessura, esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme mostra a Figura 4.19 (b), confirmando o efeito do aumento da espessura da placa interna.

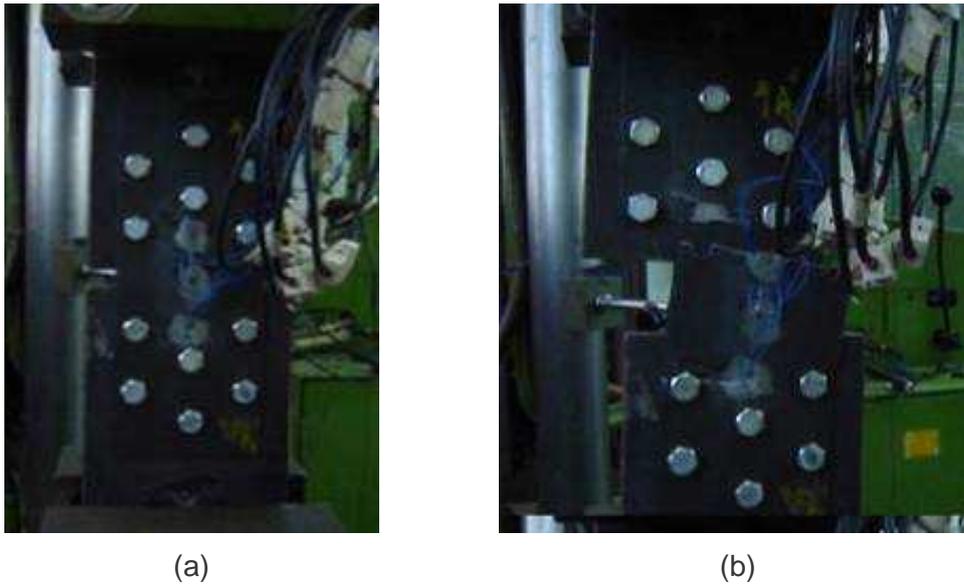


Figura 4.19 – Ensaio 15: (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.

4.1.2.6 Ensaio E16_C_PL_N_145_15_30

Esse ensaio repetido, com chapa interna de espessura de 15 mm, teve o objetivo de se comparar resultados do comportamento mecânico da configuração aparafusada com furos alternados.

O mesmo tipo de ruptura na seção da área líquida de dois furos foi encontrado, como mostrado a Figura 4.20 (c), como apresentado nos ensaios com placa interna de espessura de 10, 12, 15 mm.

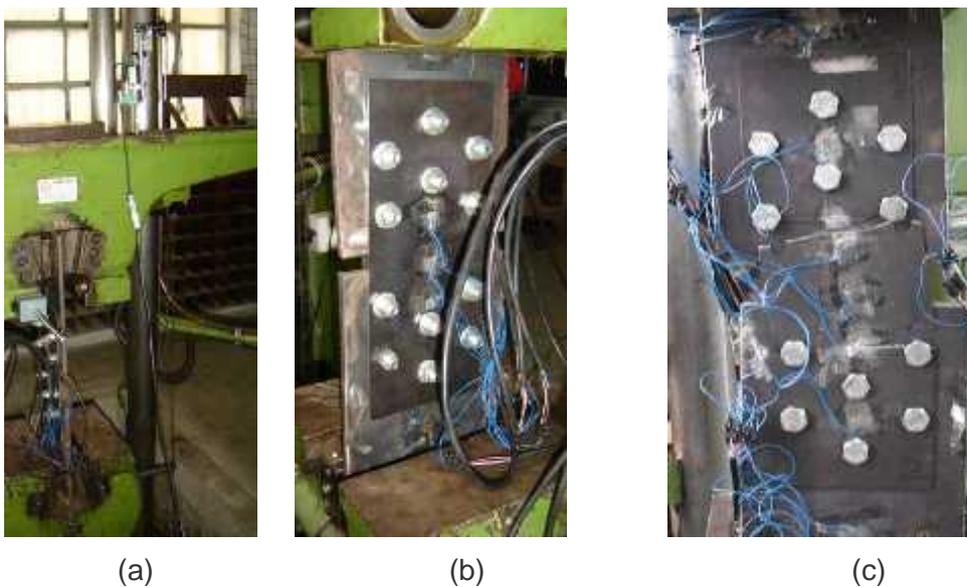


Figura 4.20 – Ensaio 16: (a) ensaio posicionado na máquina de tração e localização do LVDT, (b) configuração inicial, (c) depois da ruptura.

4.1.2.7 Ensaio E17_C_PL_N_145_8_50

Nesse ensaio observou-se o comportamento mecânico da configuração aparafusada com placa interna com espessura de 8 mm, buscando-se determinar a distância limite do parâmetro s , para a ruptura passando em três e dois furos nesta ligação aparafusada com furos alternados. O ensaio e as fotos da ligação aparafusada são mostradas na Figura 4.21.

A produção e execução desse ensaio seguiu com os mesmos parâmetros definidos anteriormente. O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos como mostrado na Figura 4.21 (c).

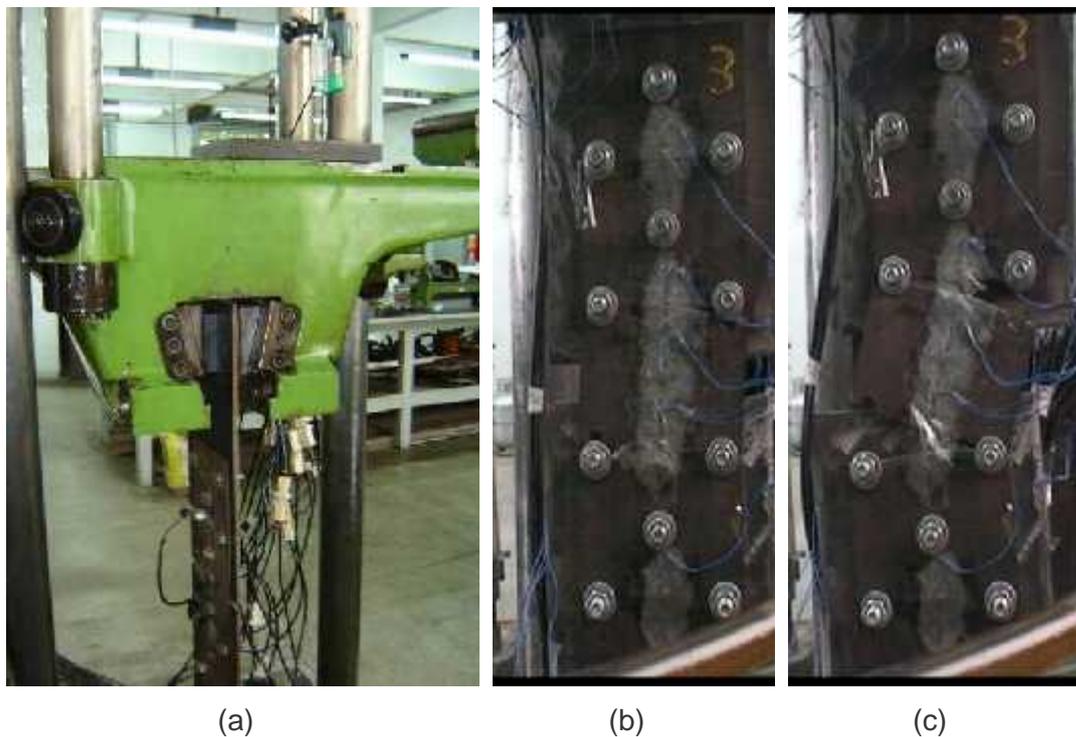


Figura 4.21 – Ensaio 17: (a) vista da máquina, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.1.2.8 Ensaio E18_C_PL_N_145_15_50

Esse ensaio com placa interna com 15 mm de espessura teve o objetivo de se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada com furos defasados. O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, como mostrado na Figura 4.22(b).

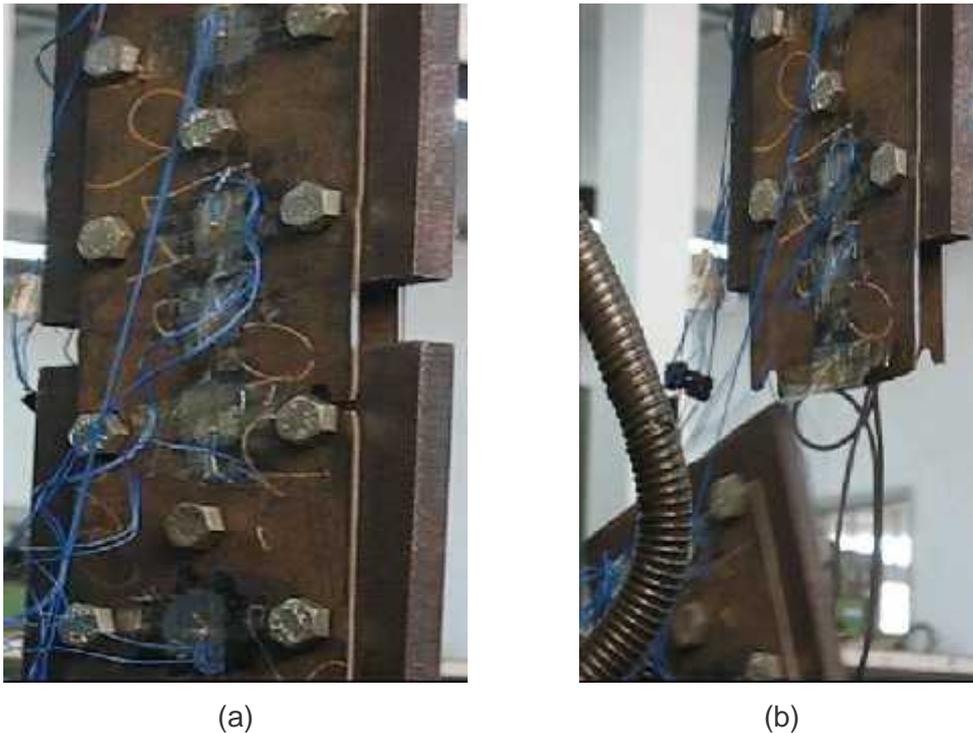


Figura 4.22 – (a) configuração inicial, (b) depois da ruptura.

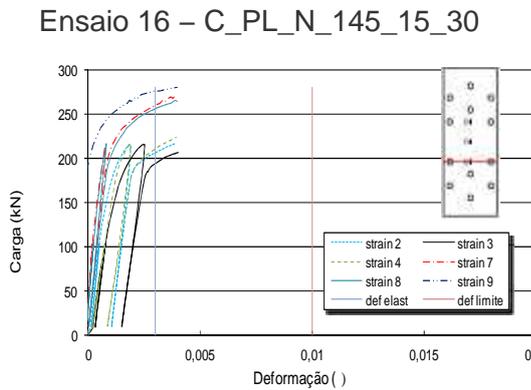
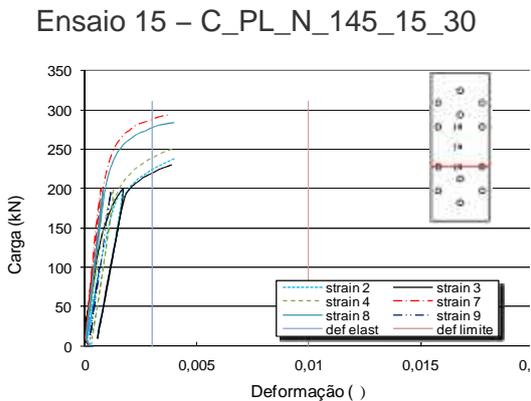
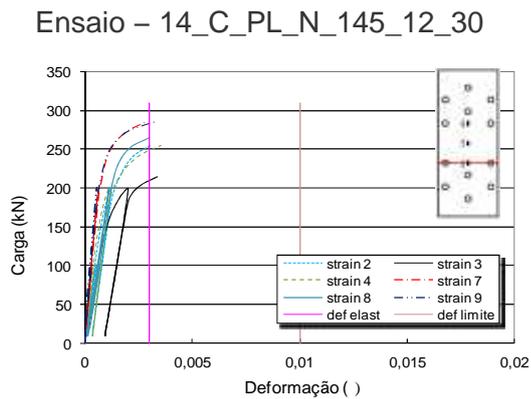
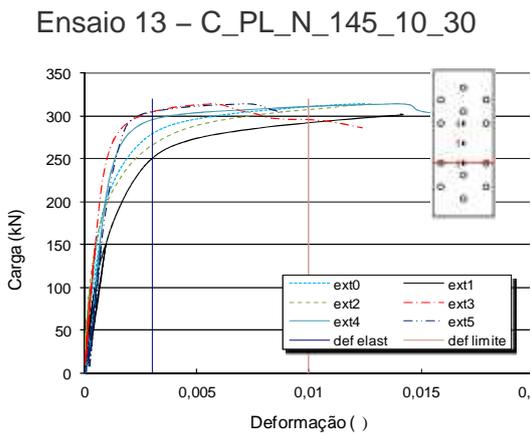
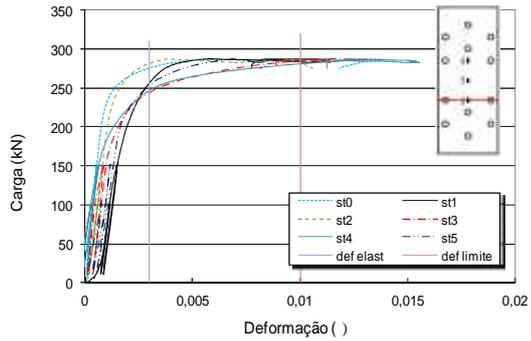
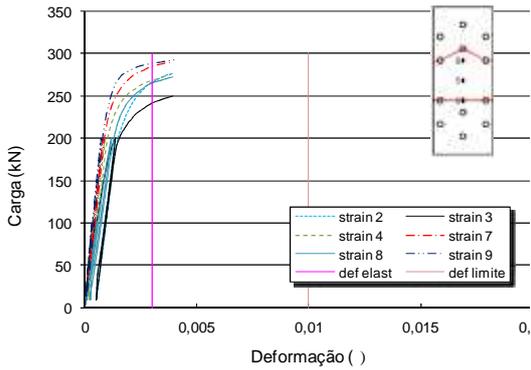
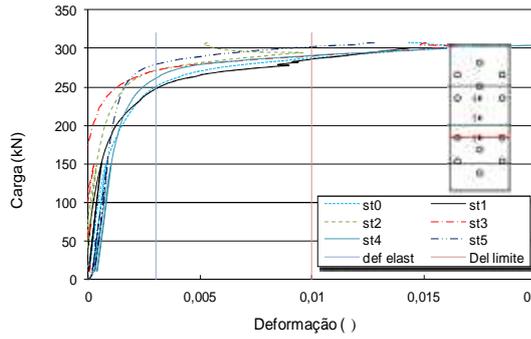
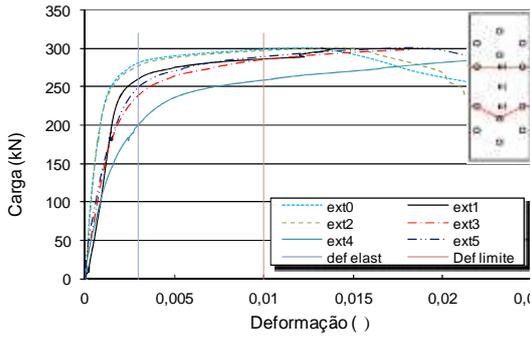
4.1.2.9 Resultados dos ensaios – Grupo II (11 a 18)

O comportamento mecânico desse conjunto de ensaios é mostrado nos gráficos apresentados na Figura 4.23 e na Figura 4.24. Os ensaios apresentaram deslocamento inicial devido à acomodação do conjunto chapas e parafusos e acomodação das garras da máquina de tração.

Os gráficos carga *versus* deformação específica, mostrado na Figura 4.23, apresentaram no limite da fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros, maior rigidez na seção entre os parafusos e menor rigidez na seção central da ligação.

Na deformação específica limite, encontrada por meio do Método da Resistência Contínua, que será apresentada no capítulo seis dessa tese, a ligação apresenta um equilíbrio de carga nas das seções analisadas. Os resultados são resumidos na Tabela 4.2.

Os ensaios 13, 16, 17 e 18 foram executados no trabalho de Santos (2008) com apenas um equipamento de aquisição de dados. Esses ensaios não tiveram leituras na deformação específica limite devido a um bloqueio na programação do LabView.



Ensaio 17 – C_PL_N_145_8_50

Ensaio 18 – C_PL_N_145_15_50

Figura 4.23 – Gráficos carga versus deformação específica – Grupo II

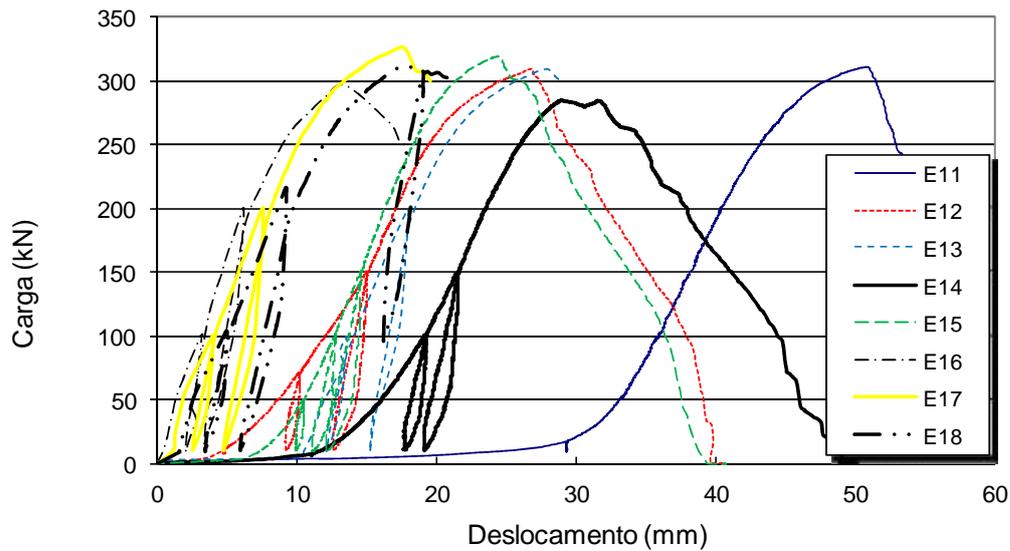


Figura 4.24 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo II

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo II

Ensaio	Carga última (kN)	Desloc. inicial (mm)	Desloc. final (mm)	Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)	
				Par.*	Centro	Par.*	Centro
E11_C_PL_N_145_8_30	311,6	20	30,0	260	240	290	270
E12C_PL_N_145_10_30	308,7	2	27,0	240	210	290	285
E13C_PL_N_145_10_30	309,5	10	18,0	280	260	–	–
E14C_PL_N_145_12_30	287,2	10	22,0	270	250	280	280
E15C_PL_N_145_15_30	314,3	6	16,0	290	270	300	300
E16C_PL_N_145_15_30	296,0	0	14,0	270	250	–	–
E17_C_PL_N_145_8_50	326,0	2	18,0	260	250	–	–
E18C_PL_N_145_15_50	310,0	2	17,0	240	225	–	–

* seção entre dois parafusos

4.1.3 Influência do parâmetro L (19 a 22)

Com o objetivo de se avaliar a influência da variação da largura da placa externa, na mudança da seção de ruptura da seção líquida, e identificar o

comportamento mecânico da configuração aparafusada defasada foram realizados quatro ensaios com valores do parâmetro $L = 107$ mm.

4.1.3.1 Ensaio E19 – C_PL_N_107_6_25

Esse ensaio experimental com largura de placa de 107 mm tem sua configuração geométrica mostrada na Figura 4.25. Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 6 mm de espessura e 150 mm de largura.

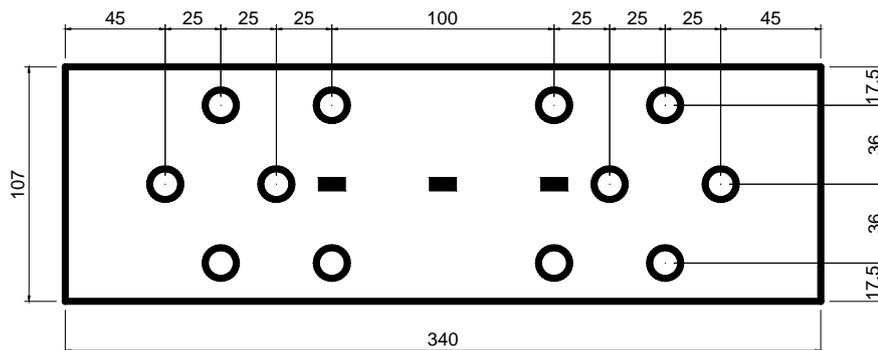


Figura 4.25 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

Esse ensaio apresentou ruptura na seção de seção líquida de três furos, mostrada na Figura 4.26 (c).

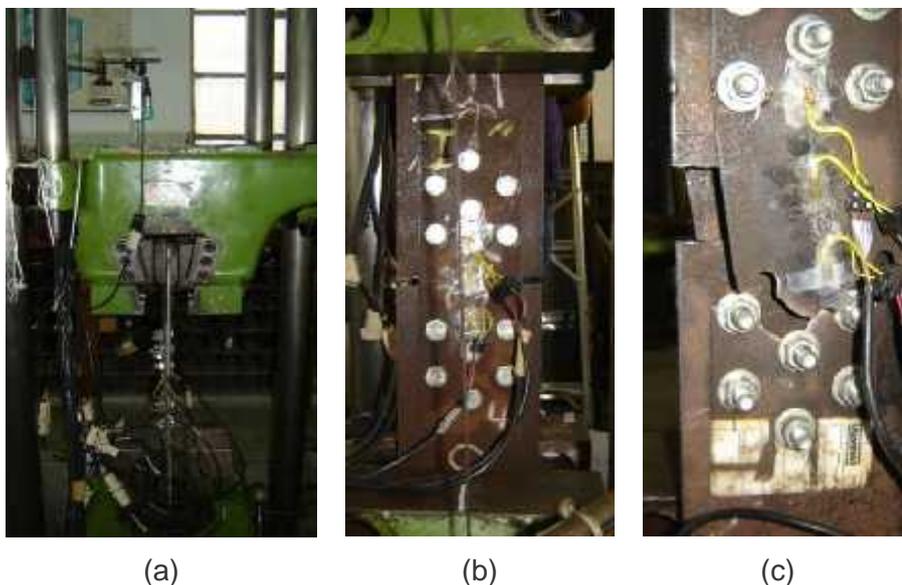


Figura 4.26 – Ensaio 19: (a) conjunto, (b) configuração inicial, (c) depois da ruptura.

4.1.3.2 Ensaio E20_C_PL_N_107_6_28

Esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme mostrado na Figura 4.27 (c), e mostrou, junto com o ensaio

anterior, o limite do parâmetro s para a mudança da seção de ruptura entre 25 mm e 28 mm para esse tipo de ligação aparafusada.

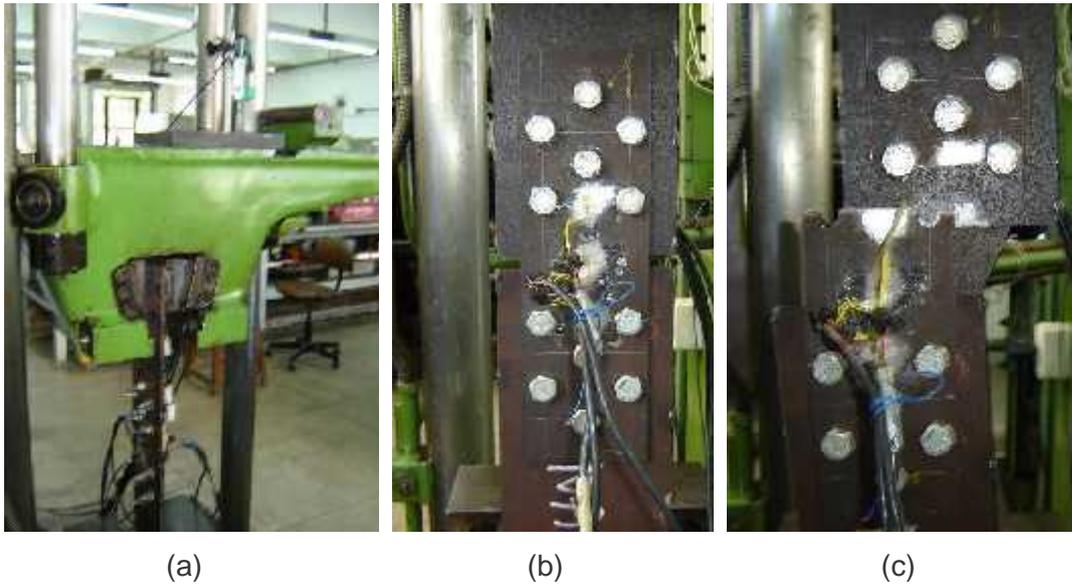


Figura 4.27 – Ensaio 20: (a) conjunto, (b) configuração inicial, (c) depois da ruptura.

4.1.3.3 Ensaio E21_C_PL_N_107_6_30

Com os ensaios anteriores com o valor do parâmetro s igual a 25 e 28 mm verificou-se que o limite do parâmetro s da mudança da seção de ruptura está entre 28 e 25 mm.

Esse ensaio confirmou o limite encontrado anteriormente, apresentando ruptura na seção líquida passando por dois furos, como mostrado na Figura 4.28 (c).

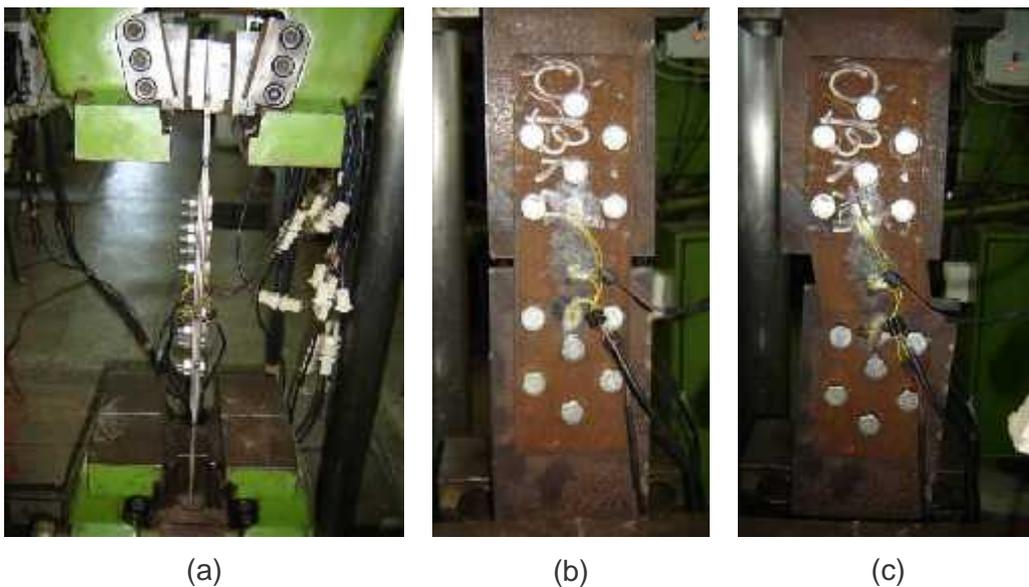


Figura 4.28 – Ensaio 21: (a) conjunto, (b) configuração inicial, (c) depois da ruptura.

4.1.3.4 Ensaio E22_C_PL_N_107_6_50

Para se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada com parafusos posicionados numa única linha foi executado esse ensaio, conforme configuração geométrica mostrada na Figura 4.29.

Esse ensaio adotou uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 6 mm de espessura, com duas chapas soldadas de 3 mm de espessura, e 150 mm de largura, conforme apresentado na Figura 4.30. O comprimento da placa foi determinado pelo comprimento da ligação.

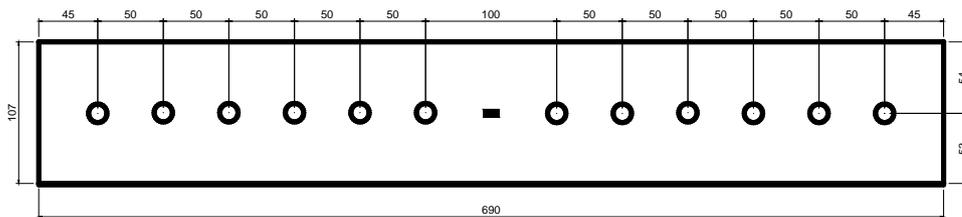


Figura 4.29 – Geometria e posicionamento do extensômetro.

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por um furo, conforme visto em detalhe na Figura 4.30 (c).



Figura 4.30 – Ensaio 22: (a) Posicionamento, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.1.3.5 Resultado dos ensaios – Grupo III (19 a 22)

O resultado do comportamento mecânico conjunto de ensaios é mostrado nos gráficos apresentados na Figura 4.31 e na Figura 4.32.

Os ensaios apresentaram deslocamento inicial devido à acomodação do conjunto chapas e parafusos, e acomodação das garras da máquina de tração. Os ensaios 19, 20 e 21 apresentam gráficos carga *versus* deformação específica mostrados na Figura 4.31, ilustrando a não plastificação na seção do centro da ligação, no limite da fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros.

Os ensaios 19, 20 e 21 apresentaram um comportamento diferente, na seção do centro da ligação do que os ensaios com placa com largura de 145 mm. Esse fato pode estar associado a diferença na geometria dos dois tipos de ensaio. Na deformação específica limite, encontrada por meio do Método da Resistência Contínua, apresentada no capítulo seis dessa tese, a ligação apresenta um equilíbrio de carga nas das seções analisadas. Os resultados são resumidos na Tabela 4.3.

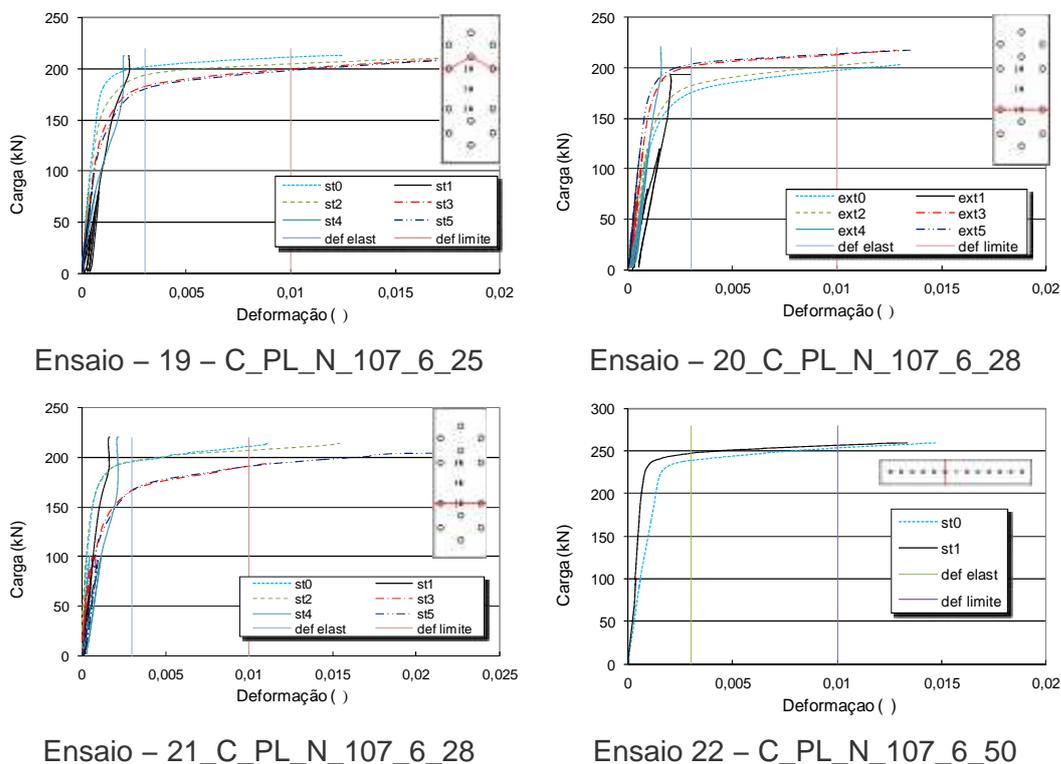


Figura 4.31 – Gráficos carga *versus* deformação específica – Grupo III.

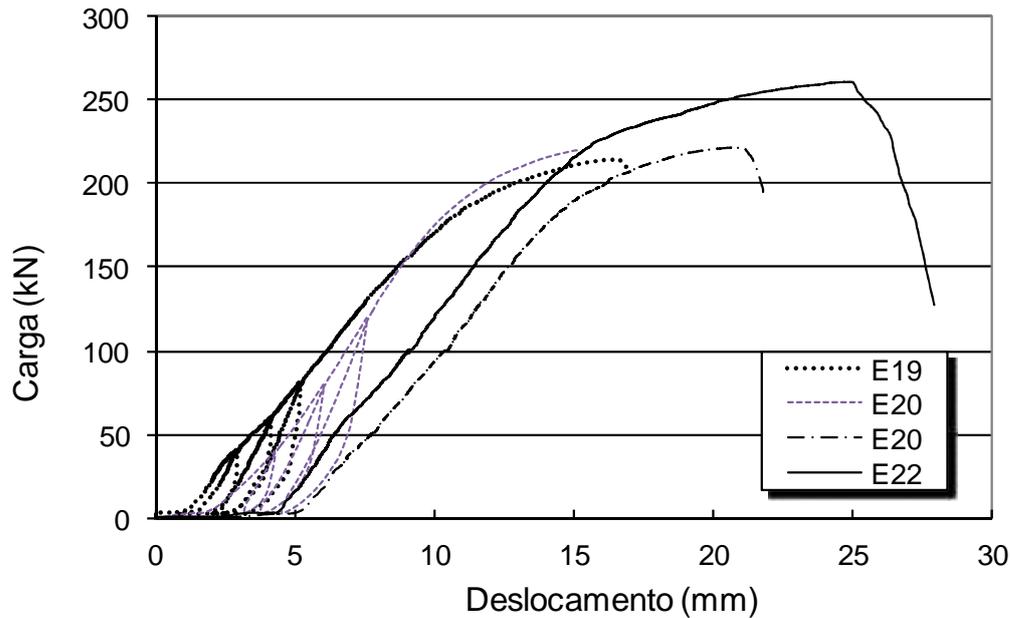


Figura 4.32 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo III.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo III

Ensaio	Carga última (kN)	Desloc. inicial (mm)	Desloc. final (mm)	Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)	
				Par.*	Centro	Par.*	Centro
E19_C_PL_N_107_6_25	214,0	2	16,1	185	–	210	–
E20_C_PL_N_107_6_28	220,7	2	13,4	185	–	215	–
E21_C_PL_N_107_6_30	221,0	5	16,4	185	–	200	–
E22_C_PL_N_107_6_50	260,0	4	21,0	–	240	–	255

* seção entre dois parafusos

4.1.4 Influência da configuração geométrica da ligação (9 e 10)

Com o objetivo de se avaliar a influência da configuração geométrica da ligação, na mudança da seção de ruptura da seção líquida, e identificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada defasada, foram realizados dois ensaios com configuração invertida ou tipo B, conforme geometria mostrada na Figura 4.33.

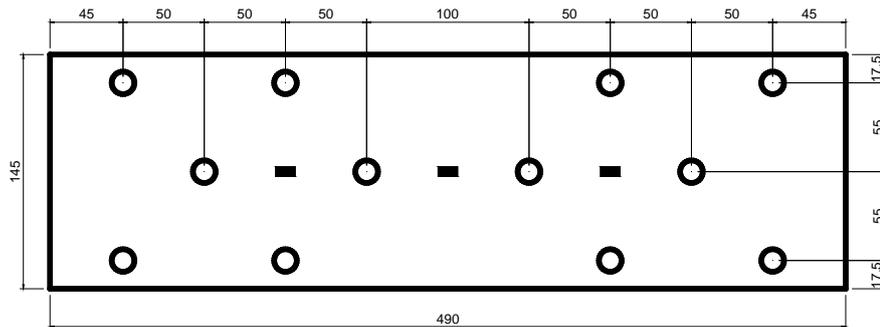


Figura 4.33 – Configuração invertida ou tipo B.

4.1.4.1 Ensaio 9 – C_PL_I_145_15_50

Esse ensaio teve o objetivo de se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida e determinar a distância limite do parâmetro s , para a ruptura na seção líquida passando por três ou dois furos.

Esse ensaio teve placa de aplicação de carga com características geométricas de 15 mm de espessura e 200 mm de largura. O ensaio foi realizado com as mesmas características de produção e execução dos ensaios anteriores.

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, como mostrado na Figura 4.34 (c). Esse resultado é totalmente inesperado, pois teoricamente deveria romper na seção líquida que passa por dois furos.

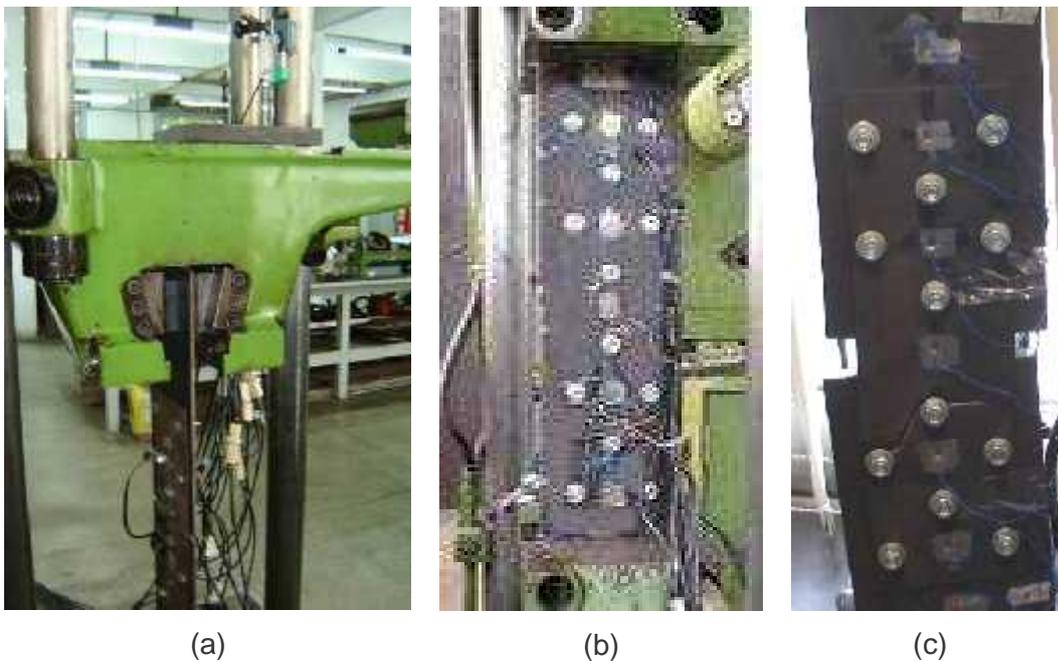


Figura 4.34 – Ensaio 9: (a) posicionamento, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.1.4.2 Ensaio E10_C_PL_I_145_15_70

Buscando-se determinar uma configuração com ruptura passando pela seção da seção líquida de dois furos, foi executado esse ensaio com o parâmetro $s = 70$ mm, para se definir a distância limite da mudança de ruptura de três para dois furos na configuração aparafusada invertida com furos alternados.

O ensaio anterior com o valor do parâmetro $s = 50$ mm rompeu na seção líquida de três furos. Nesse ensaio foi verificado o comportamento mecânico para o parâmetro $s = 70$ mm.

Esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por um furo, conforme mostrado na Figura 4.35. Esse comportamento foi inesperado, pois a seção líquida de um furo é muito maior que a seção líquida de dois furos.



Figura 4.35 – Ensaio 10: (a) posicionamento, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

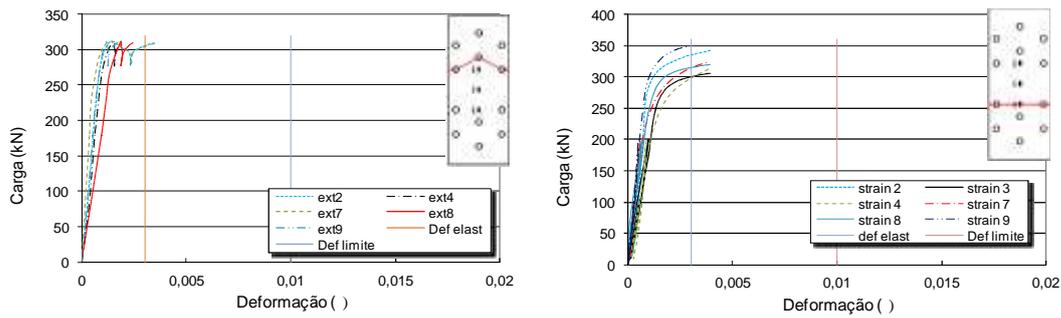
4.1.4.3 Resultado dos ensaios – Grupo IV (9 e 10)

Os gráficos dos comportamentos mecânico desse conjunto de ensaios estão ilustrados na Figura 4.36 e na Figura 4.37. Os ensaios apresentaram deslocamento inicial devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos, e acomodação das garras da máquina de tração.

O gráfico do ensaio E9, carga *versus* deformação específica, mostrado na Figura 4.36, apresenta a não plastificação nas seções onde foram posicionados os extensômetros.

O ensaio E10 apresenta uma maior rigidez na seção dos parafusos do que na seção do centro da ligação.

Um resumo desses ensaios está apresentado na Tabela 4.4.



Ensaio 9 – C_PL_I_145_15_50

Ensaio 10 – C_PL_I_145_15_70

Figura 4.36 – Gráficos carga *versus* deformação específica – Grupo IV.

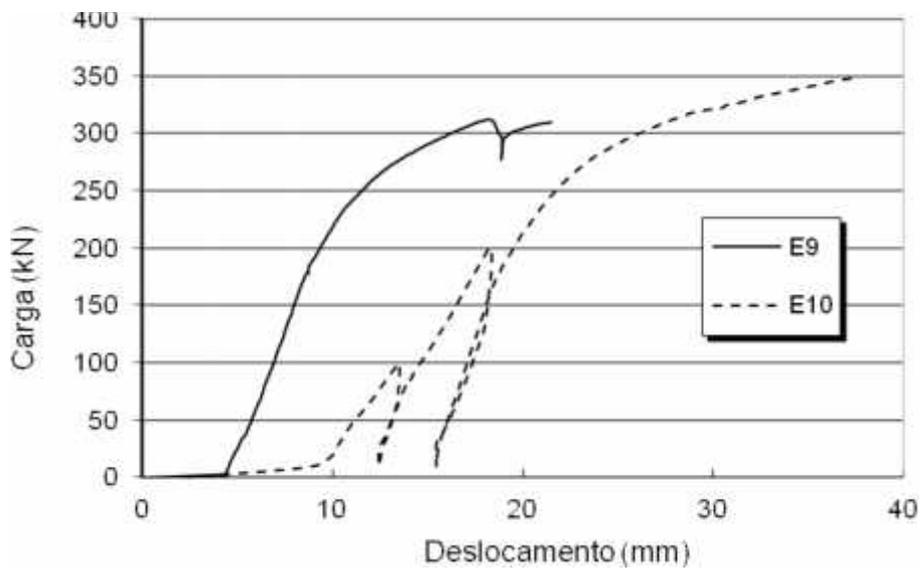


Figura 4.37 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo IV.

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo IV

Ensaio	Carga última (kN)	Desloc. inicial (mm)	Desloc.. final (mm)	Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)	
				Par.*	Centro	Par.*	Centro
E9_C_PL_I_145_15_50	312,0	4	15,1	–	–	–	–
E10_C_PL_I_145_15_70	350,0	5	30,0	325	–	310	–

* seção entre dois parafusos

4.2 Ensaaios com aço inoxidável austenítico

4.2.1 Influência do parâmetro s

Com o objetivo de se determinar o valor do parâmetro s limite na mudança da seção de ruptura da seção líquida foram realizados oito ensaios com valores do parâmetro s igual a 23, 23, 30, 50, 20, 30, 40 e 50 mm. Alguns ensaios foram repetidos em função da necessidade de redundância de resultados ou configuração geométricas diferentes.

Esses ensaios tiveram o objetivo de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada e determinar a distância limite, do parâmetro s para a ruptura passando por três e dois furos.

4.2.1.1 Ensaio E23_A_PL_N_145_15_23

Com o objetivo de se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal na direção paralela a laminação em aço inoxidável austenítico com parafusos alternados, foi executado esse ensaio com placa de largura 145 mm e parâmetro $s = 23$ mm

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 15 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono. O comprimento da placa foi determinado pela necessidade de se cobrir toda a ligação e pela condição de fixação nas garras da máquina de tração.

O teste foi elaborado e executado de acordo com outros ensaios anteriores, com a aplicação de cargas cíclicas crescentes, porém, sem atingir o limite elástico do aço inoxidável austenítico.

Na Figura 4.38 é apresentada o detalhe da placa em aço carbono de 15 mm de espessura usado no ensaio para aplicação da carga. Essa espessura foi determinada de modo a ser duas vezes maior que a necessária para não ocorrer a ruptura a tração dessa placa.

O ensaio exibiu uma ruptura na seção líquida passando por três furos, como mostrado na Figura 4.38 (c).

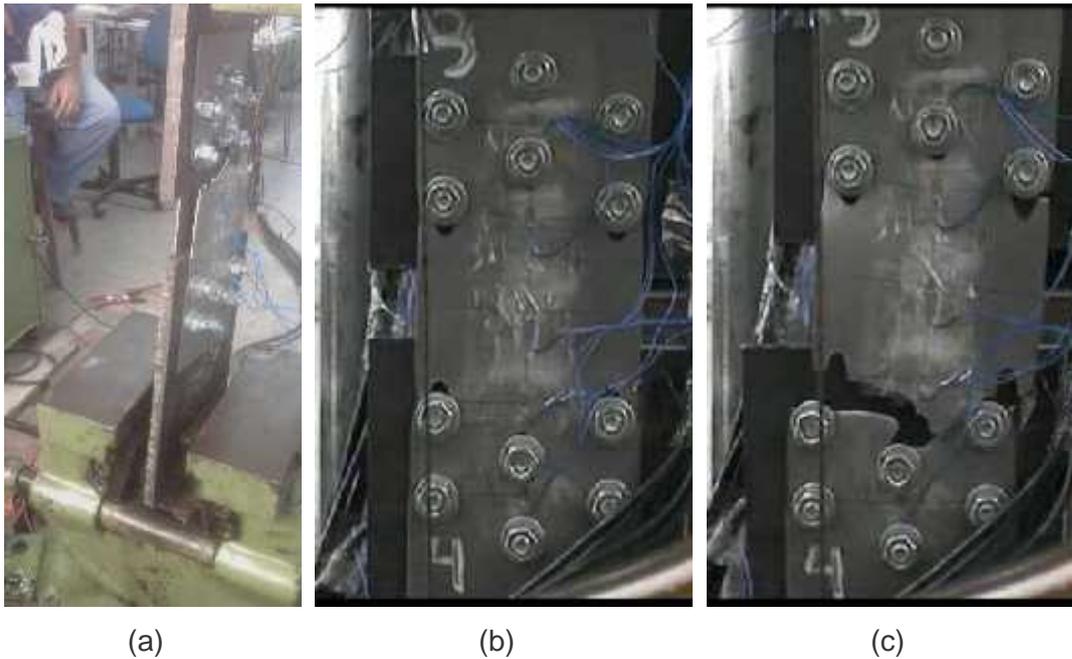


Figura 4.38 – Ensaio 23: (a) chapa interna, (b) configuração inicial, (c) ruptura.

4.2.1.2 Ensaio 24 – A_PL_N_145_15_23

Esse ensaio executado em duplicidade ao E23_A_PL_N_145_15_23 apresentado no trabalho de Santos (2008) teve o objetivo de comprovar, com mais leituras, o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com aplicação de carga na direção paralela a laminação em aço inoxidável austenítico, com placa de largura de 145 mm e parâmetro $s = 23$ mm.

Nesse ensaio adotou-se uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 15 mm de espessura e 200 mm de largura, como mostrado na Figura 4.39.

Nesse ensaio foi posicionado um *clipgage*, que é um sensor mecânico para determinação de deformações específicas, esse com limite de deformação específica de até 100%, fixado a chapa através de cola quente, conforme esquematicamente mostrado na Figura 4.40.

O *clipgage* posicionado na linha diagonal de ruptura apresenta um comportamento inicial similar ao da seção bruta do centro da ligação. Após o limite da deformação específica elástica ele confirma o comportamento dos extensômetros posicionados na primeira coluna de parafusos localizados próximos ao centro da chapa. Esse comportamento pode ser observado no resumo desse grupo de ensaios.



Figura 4.39 – Detalhe do chapa interna e posicionamento do *clipgagem*.

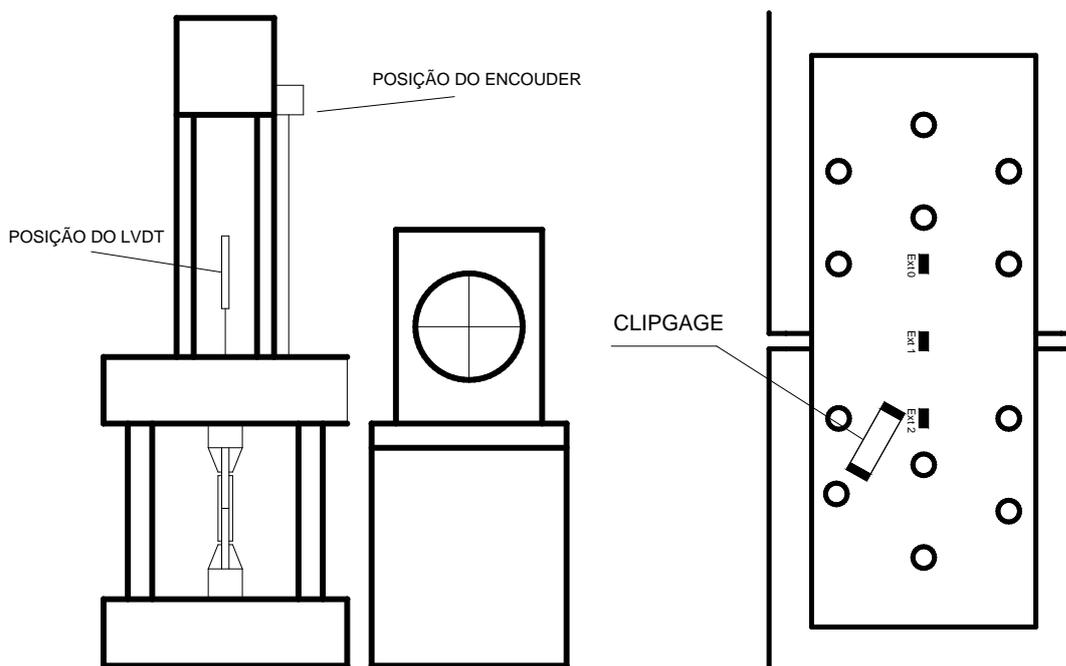


Figura 4.40 – Posicionamento dos instrumentos de leitura.

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme apresentada em foto da Figura 4.41.



Figura 4.41 – (a) configuração inicial, (b) após a ruptura.

4.2.1.3 Ensaio E27_A_PL_N_145_15_30

Esse ensaio teve o objetivo de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com carga aplicada na direção paralela a laminação em aço inoxidável austenítico com parafusos alternados.

A placa interna tinha 15 mm de espessura e espaçamento entre parafusos na direção da aplicação da carga de 30 mm. O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme apresentado na Figura 4.42 (c).

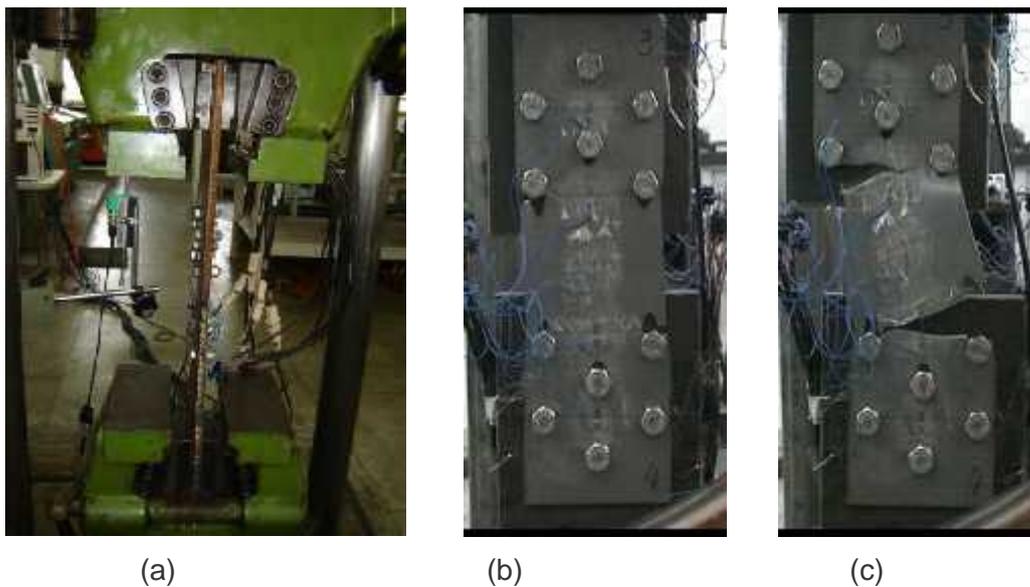


Figura 4.42 – Ensaio 27: (a) ensaio na máquina, (b) alargamento dos furos, (c) ruptura.

4.2.1.4 Ensaio E28_A_PL_N_145_15_50

O ensaio E28_A_PL_N_145_15_50 foi realizado para se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal, com aplicação da carga na direção paralela a laminação em aço inoxidável austenítico, e determinar o valor limite do parâmetro s .

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 15 mm de espessura e 200 mm de largura, e o espaçamento entre parafusos de 50 mm.

A sequência crescente de alargamento dos furos no ensaio com aço inoxidável austenítico e a ruptura na seção líquida passando por dois furos podem ser vistos na Figura 4.43 (c).



Figura 4.43 – Ensaio 28: (a) início do ensaio, (b) alargamento dos furos, (c) ruptura.

4.2.1.5 Ensaio E37_A_PP_N_145_6_20

Esse ensaio também teve o objetivo de se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal e chapas com laminação na direção perpendicular a aplicação da carga, em aço austenítico.

O ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 6 mm de espessura e 200 mm de largura. A geometria e o posicionamento dos extensômetros pode ser visto na Figura 4.44. Com esse ensaio será aferida a influência do uso da direção perpendicular a laminação no limite da mudança da seção de ruptura.

Nesse ensaio foram introduzidos dois transdutores de deslocamento como mostra a Figura 4.45, para visualizar o deslocamento entre chapas em relação ao deslocamento total do conjunto da ligação aparafusada. Esse comportamento pode ser visto no gráfico carga *versus* deslocamento mostrado no resumo desse grupo de ensaios. Em alguns ensaios foram utilizados esses transdutores de deslocamento entre as chapas ensaiadas, para acompanhar e averiguar no decorrer do ensaio algum desequilíbrio presente nos ensaios.

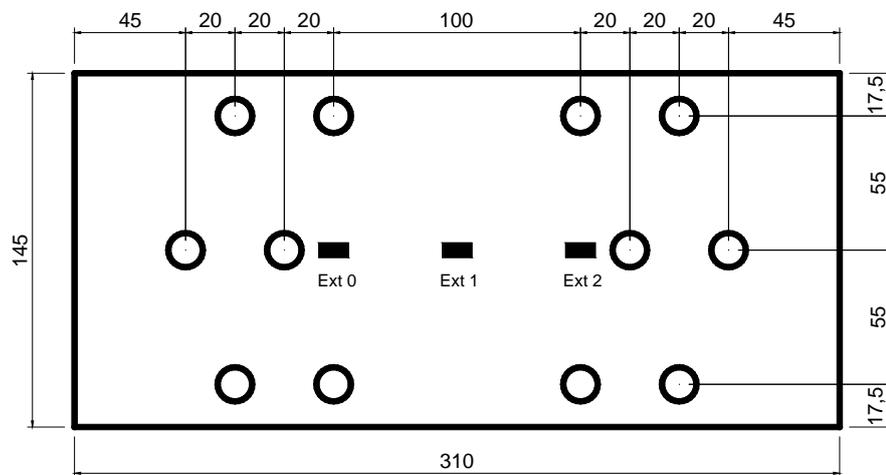


Figura 4.44 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

Adicionalmente aos dois transdutores de deslocamento para se avaliar o deslocamento entre chapas foi colocado um *clipgauge* na última coluna de parafusos perto da borda da chapa, conforme mostrado na Figura 4.45, que apresentou deformação específica mínima, mostrando assim a pequena transferência de solicitações nessa seção.

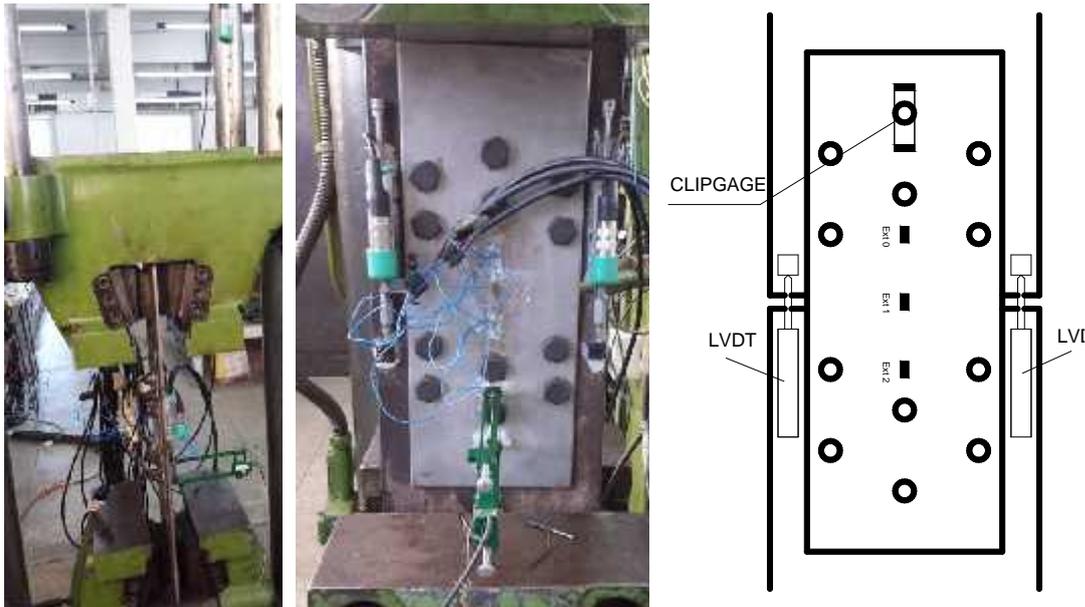


Figura 4.45 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos transdutores de deslocamento e clipgauge.

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme apresentado na Figura 4.46 (c). Nesse ensaio foi verificado o estado da ligação na deformação específica limite, que será definida no Capítulo 6 dessa tese, conforme mostrado na Figura 4.46 (b).

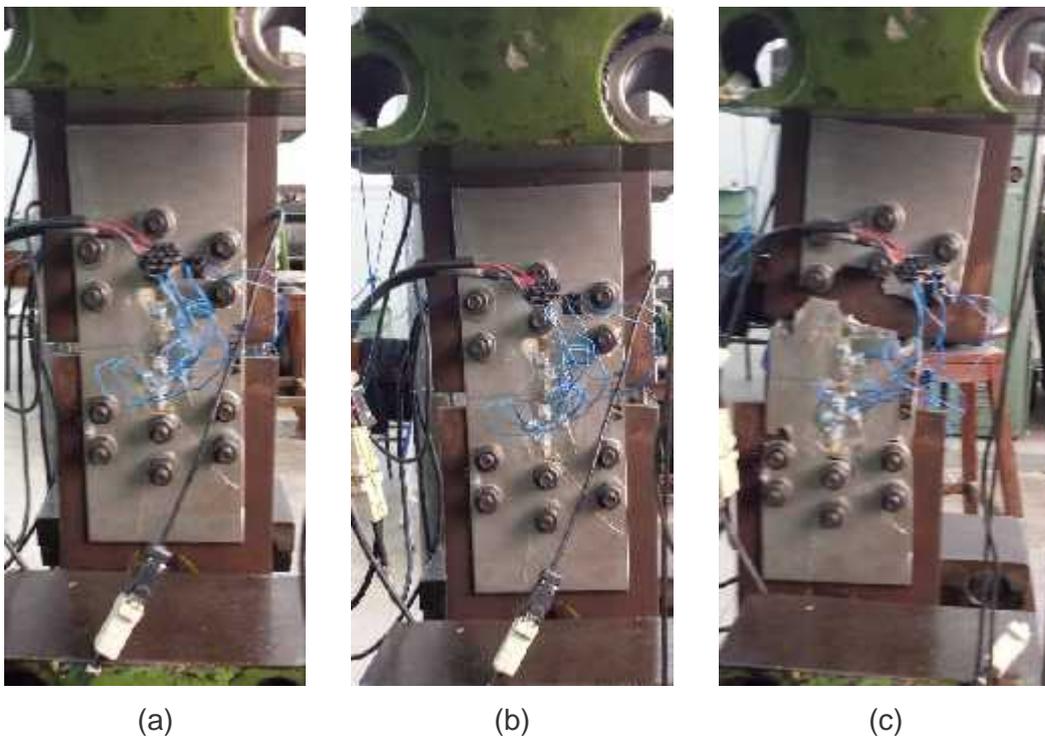


Figura 4.46 – Ensaio 37: (a) início, (b) deformação limite, (c) fim com a ruptura.

4.2.1.6 Ensaio E40_A_PP_I_145_6_30

Esse ensaio visou determinar o valor do parâmetro s para o limite de ruptura passando pela seção da seção líquida com três e um furo e verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida na direção perpendicular a laminação em aço inoxidável austenítico.

Nesse ensaio adotou-se uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 6 mm de espessura, e configuração de furos mostrado na Figura 4.47.

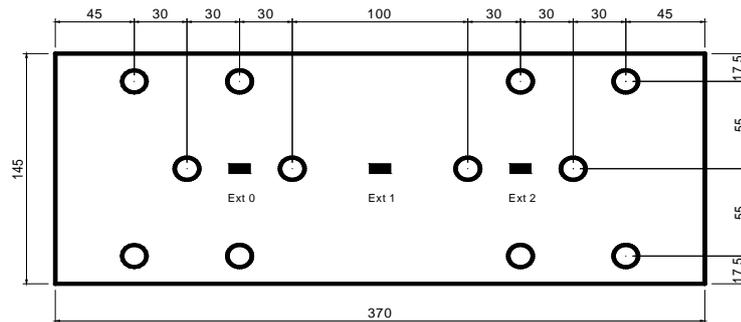


Figura 4.47 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

Foram incluídos nesse ensaio dois transdutores de deslocamento para se avaliar o deslocamento entre chapas, e um clipgagem na primeira coluna de parafusos perto do centro da ligação aparafusada, conforme Figura 4.48. O clipgagem apresentou um comportamento inicial similar ao do centro da ligação, porém, no final registrou menor rigidez que a seção do centro da ligação. Esse comportamento pode ser observado no resumo desse grupo de ensaios, no final dessa análise.

O ensaio apresentou ruptura inesperada na seção líquida de um furo, conforme mostrado na Figura 4.49.

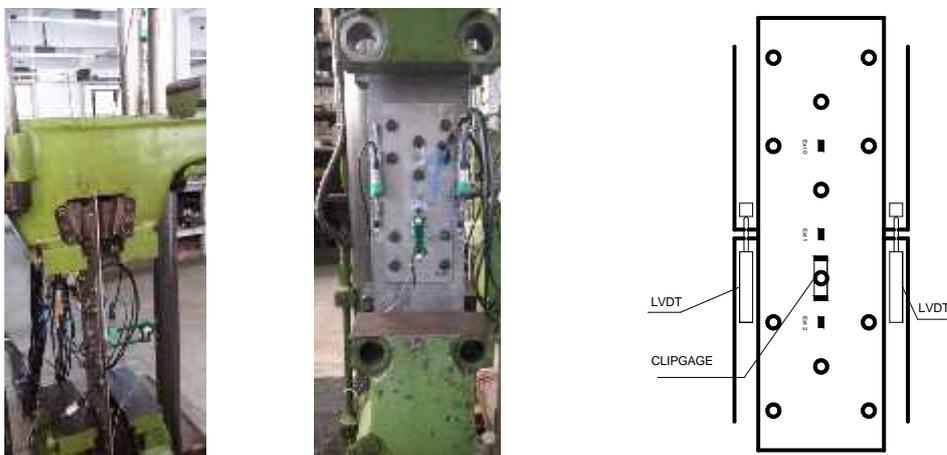


Figura 4.48 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

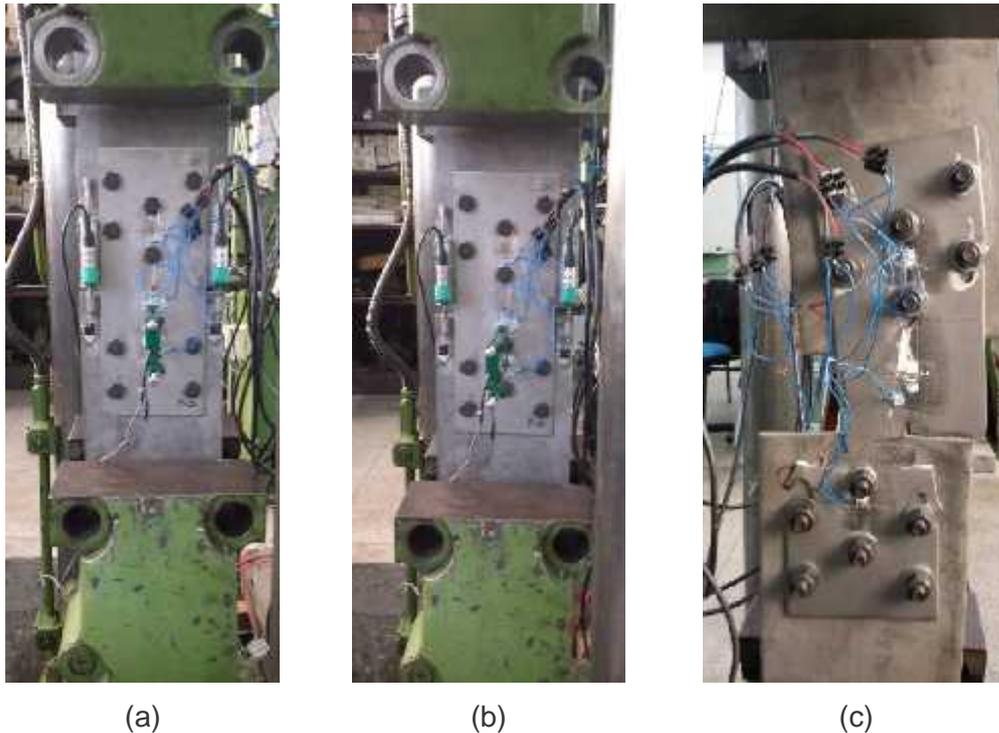


Figura 4.49 – Ensaio 40: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

O ensaio E39_A_PP_I_145_8_25, com parâmetro $s = 25$ mm, mostrou ruptura na seção líquida passando por três furos, o que significa que o limite para a mudança de ruptura para esse tipo de ligação aparafusada deve estar entre 25 e 30 mm.

4.2.1.7 Ensaio 41 – A_PP_I_145_8_40

Nesse ensaio buscou-se determinar o valor do parâmetro s limite para a ruptura de um para três furos, e de se verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida com aplicação de carga na direção perpendicular a laminação em aço inoxidável austenítico com parafusos alternados.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 8 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono. O ensaio tem a sua geometria mostrada na Figura 4.50. Nesse ensaio foram usados parafusos tipo A 490.

Foram posicionado dois transdutores e um clipgage conforme mostrado na Figura 4.51. O clipgage posicionado na primeira seção de um parafuso apresentou um comportamento inicial similar ao do centro da ligação, porém, no final rigidez inferior que a seção do centro da ligação.

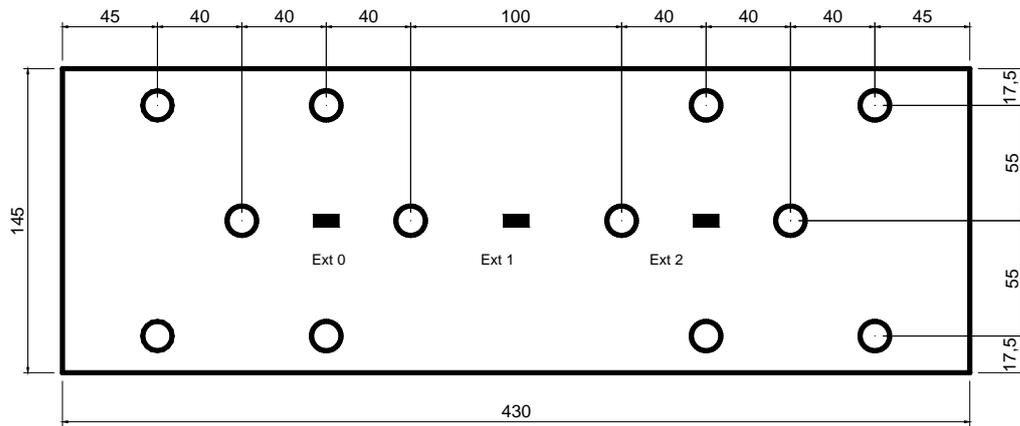


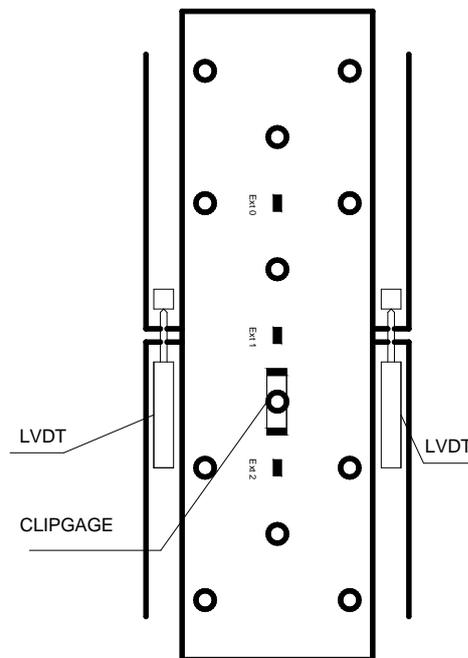
Figura 4.50 – Geometria e posicionamento dos extensômetros no ensaio.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.51 – (a) detalhe da chapa interna, (b) posicionamento dos transdutores e clipgage, (c) desenho esquemático.

O ensaio apresentou ruptura inesperada na seção líquida de um furo e do corpo do parafuso, conforme mostrado na Figura 4.52 (c).

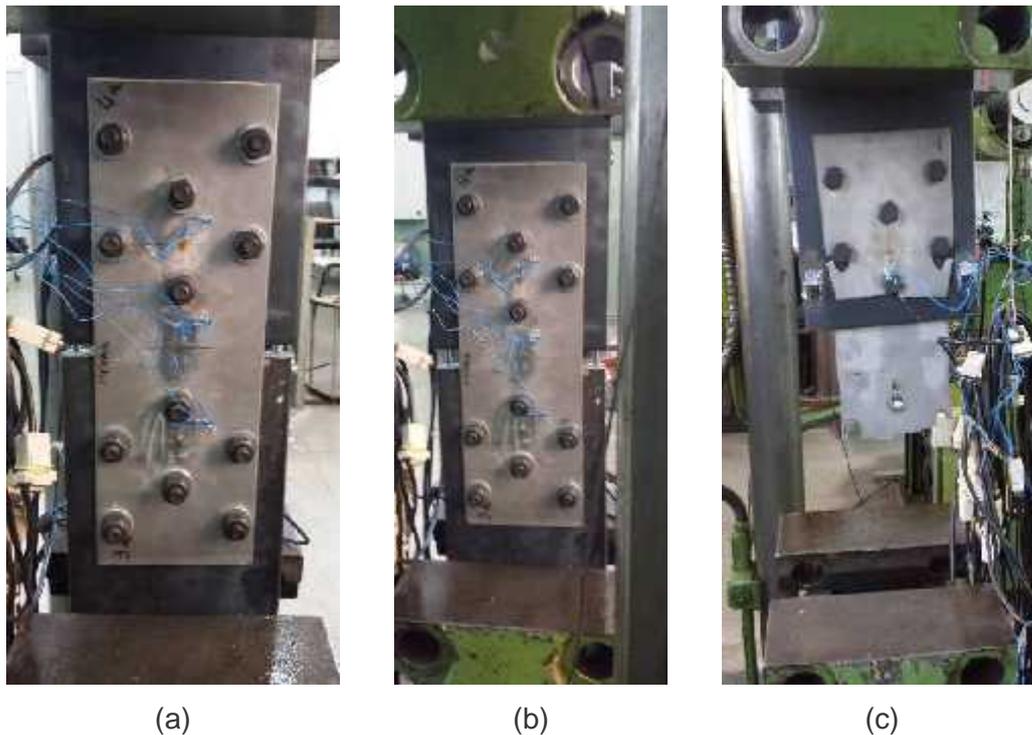


Figura 4.52 – Ensaio 41: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.1.8 Ensaio E42_A_PP_I_145_8_50

Buscou-se determinar o valor do parâmetro s limite para o modo de ruína e analisar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida com aplicação de carga na direção perpendicular à laminação em aço inoxidável austenítico, conforme mostra a Figura 4.53.

O ensaio adotou uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 8 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono.

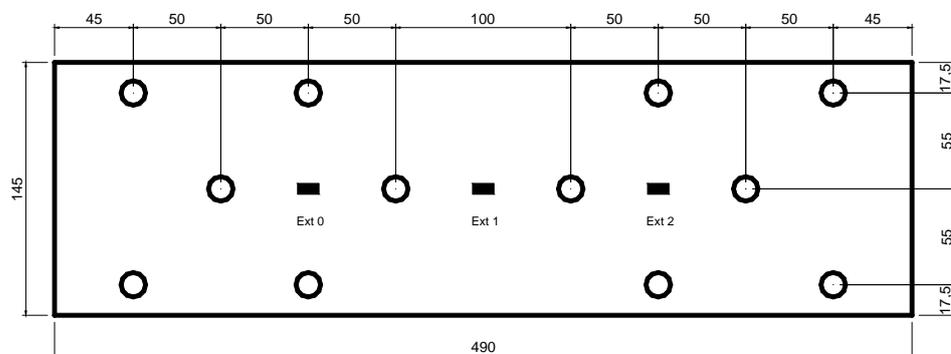


Figura 4.53 – Posicionamento dos extensômetros.

Foram posicionados dois transdutores e um clipgagem, conforme mostrado na Figura 4.54. O clipgagem posicionado, paralelo a primeira seção de um parafuso, apresentou um comportamento menos rígido do que no centro da ligação, porém, no final torna-se similar ao da seção do centro da ligação.

O ensaio apresentou uma ruptura inesperada na seção líquida de um furo como mostrado na Figura 4.55 (c).

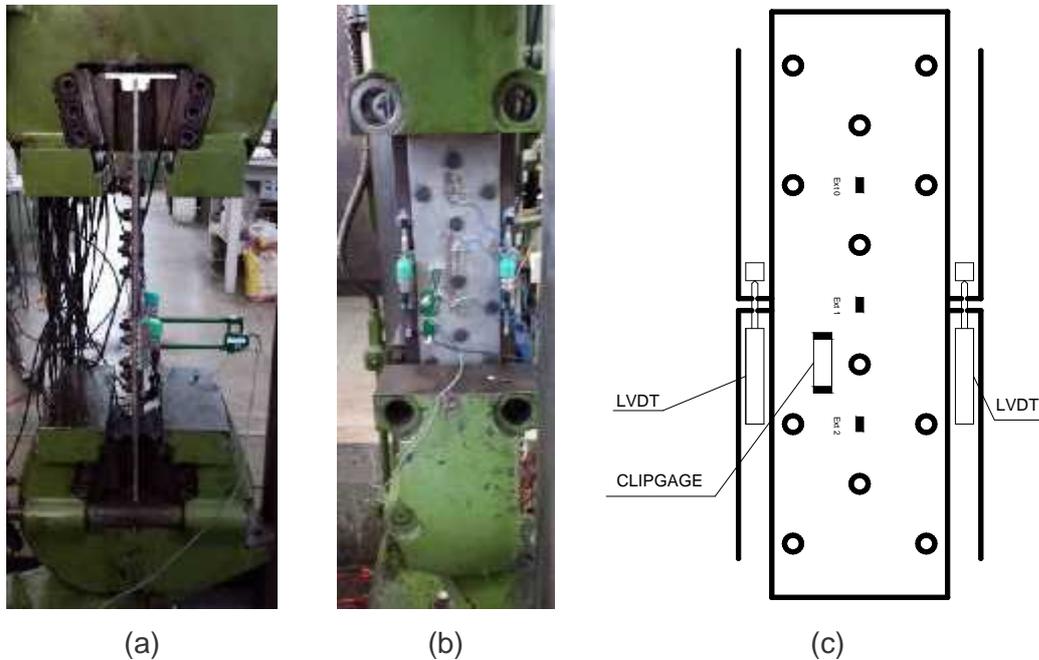


Figura 4.54 – Ensaio 42: (a) detalhe da chapa interna, (b) posicionamento dos transdutores e clipgagem, (c) desenho esquemático.

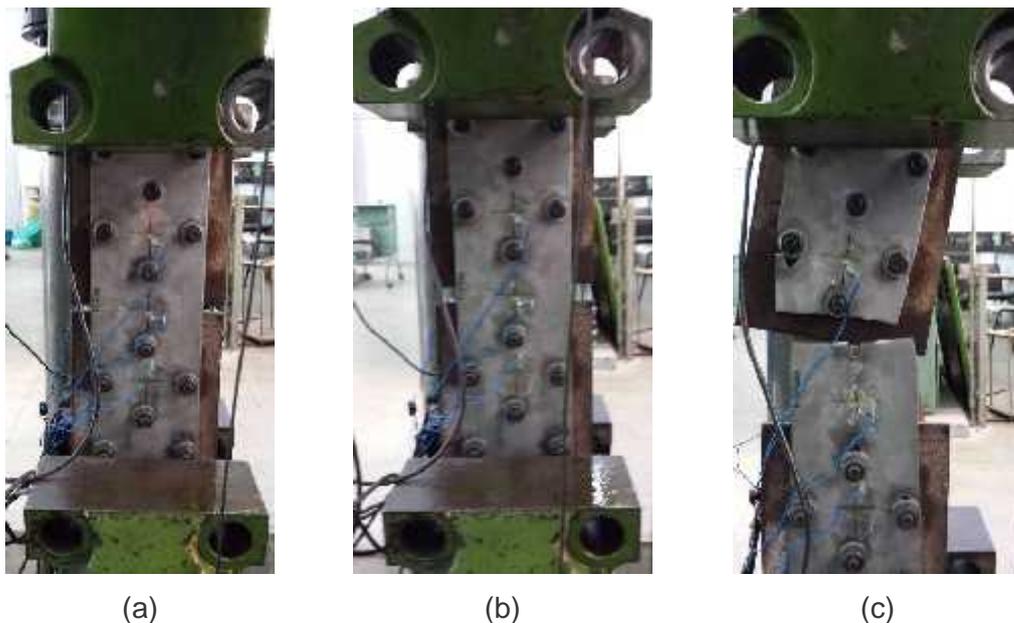


Figura 4.55 – Ensaio 42: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.1.9 Resumo dos ensaios 23 a 28, 37 e 40 a 42 – Grupo V

Os gráficos do comportamento mecânico desse conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.36 e na Figura 4.37. Os resultados dessa série estão resumidos na Tabela 4.5.

Os ensaios apresentaram um deslocamento inicial devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos e acomodação das garras da máquina de tração. O gráfico carga *versus* deslocamento dos ensaios 37, 40, 41 e 42 apresentaram também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio.

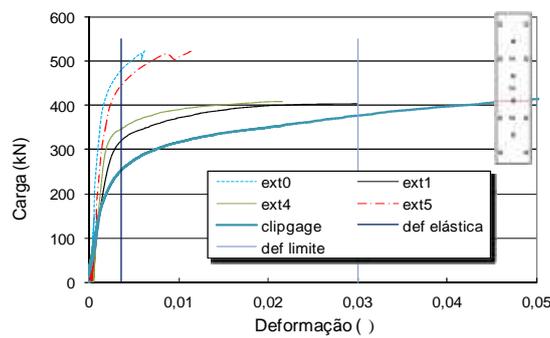
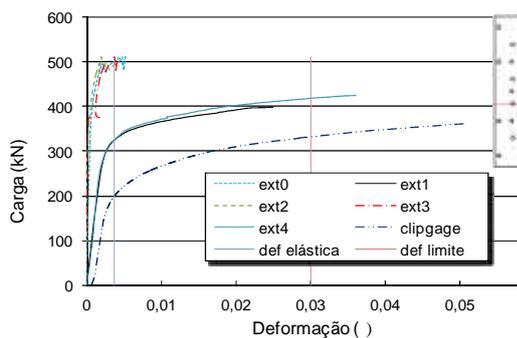
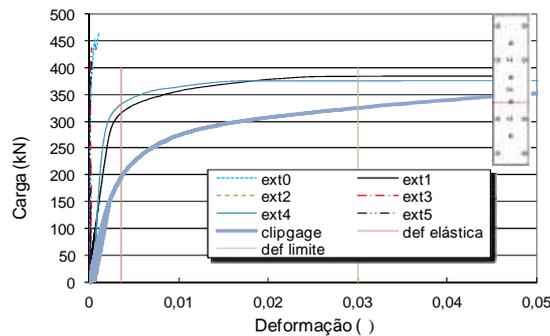
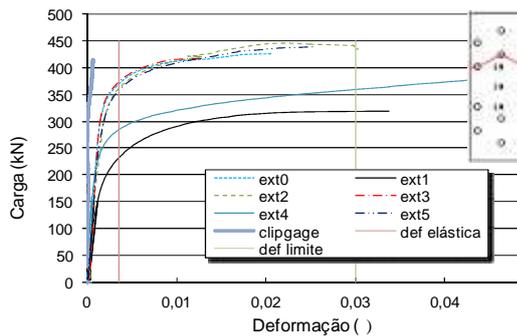
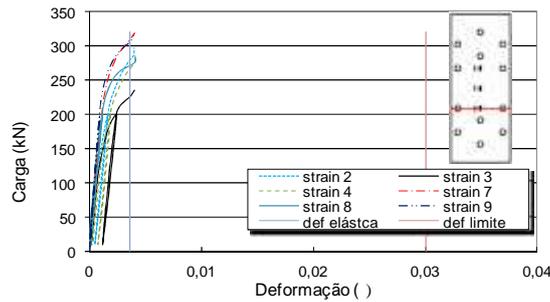
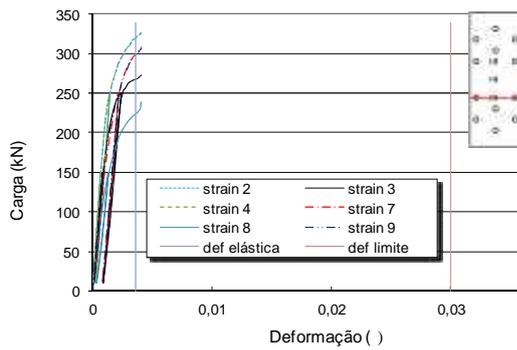
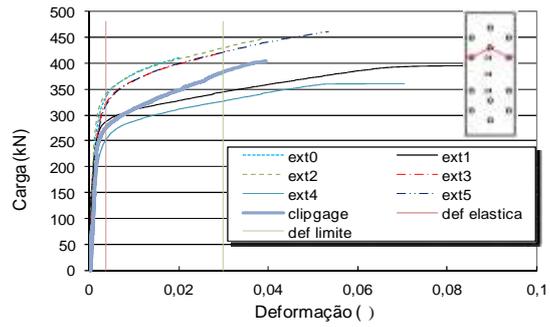
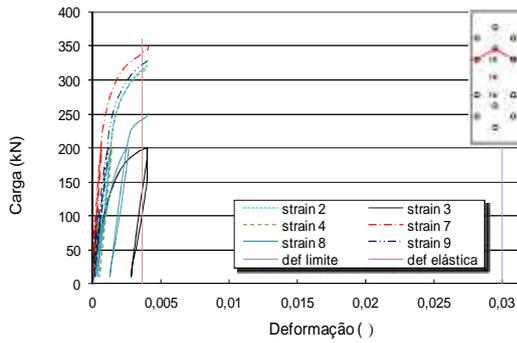
Os ensaios mostraram uma maior rigidez na seção dos parafusos do que na seção do centro da ligação.

Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga, porém, próximo ao fim das leituras apresentam comportamento equilibrado nas seções dos parafusos, como pode ser observado na Figura 4.48.

Os ensaios 23, 27 e 28 foram executados em com um único sistema de aquisição de carga, e apresentaram uma limitação das leituras de deformações específicas devido a programação do LabView.

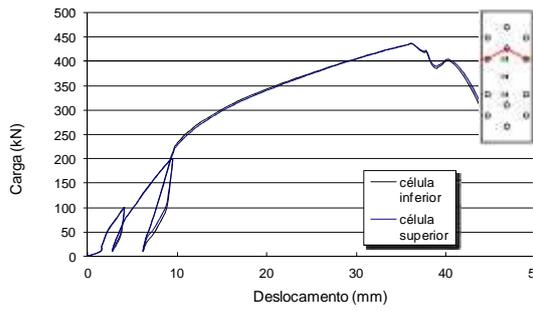
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo V

Ensaio	Carga última (kN)	Desl. inicial (mm)	Desloc. final (mm)		Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)	
			total	ch	Par.*	Centro	Par.	Centro
E23A_PL_N_145_15_23	436,0	2,0	35,0		330	220	–	–
E24A_PL_N_145_15_23	462,2	10,0	45,0		330	270	425	335
E27A_PL_N_145_15_30	459,0	1,0	36,0		310	250	–	–
E28A_PL_N_145_15_50	480,0	1,0	42,0		190	250	–	–
E37_A_PP_N_145_6_20	446,0	5,0	42,5	15	360	260	440	330
E40_A_PP_I_145_6_30	451,8	5,0	71,3	25	325	200	–	380
E41_A_PP_I_145_8_40	496,3	12,0	55,0	25	315	200	–	400
E42_A_PP_I_145_8_50	515,0	7,0	55,0	35	315	250	–	400
* seção entre dois parafusos								

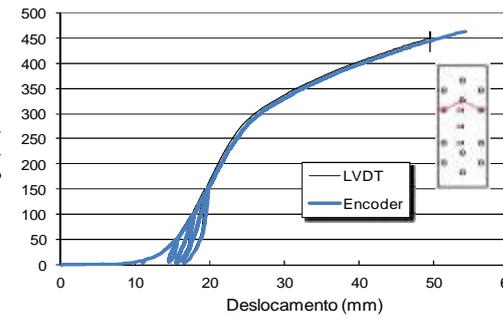
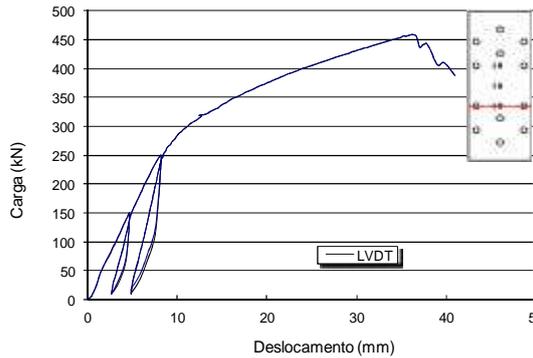


PUC-Rio - Certificação Digital N° 0912759/CA

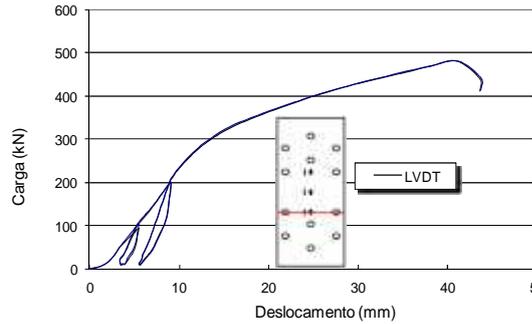
Figura 4.56 – Gráficos carga versus deformação específica – Grupo V.



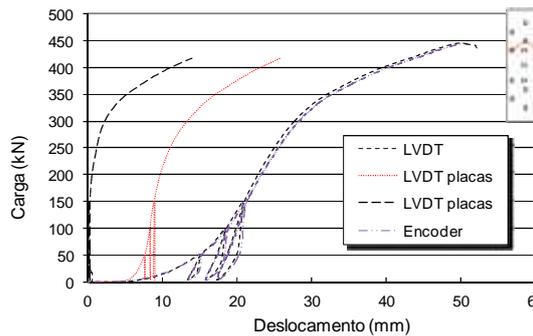
Ensaio 23 – A_PL_N_145_15_23



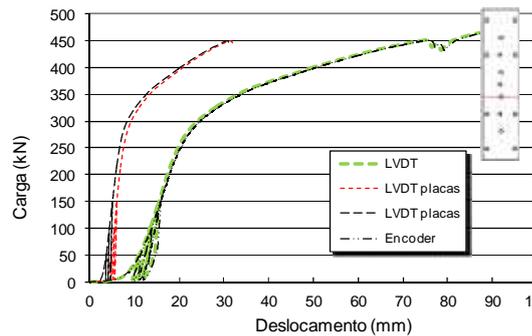
Ensaio 24 – A_PL_N_145_15_23



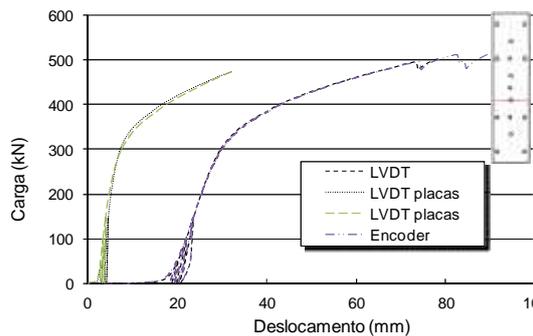
Ensaio 27 – A_PL_N_145_15_30



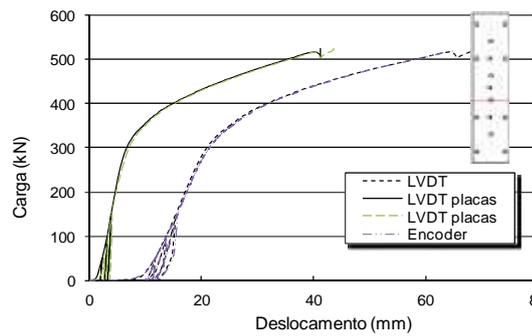
Ensaio 28 – A_PL_N_145_15_50



Ensaio 37 – A_PP_N_145_6_20



Ensaio 40 – A_PP_I_145_6_30



Ensaio 41 – A_PP_I_145_8_40

Ensaio 42 – A_PP_I_145_8_50

Figura 4.57 – Gráficos carga versus deslocamento – Grupo V

4.2.2 Influência do parâmetro t (espessura da placa interna da ligação)

Com o objetivo avaliar a influência da variação da espessura da placa interna, onde é aplicada a carga foram realizados quatro ensaios com valores do parâmetro t variando de 6 e 15 mm. Esses ensaios tiveram o objetivo de verificar o comportamento mecânico da estrutura aparafusada e determinar a distância limite, do parâmetro s , para a ruptura da seção da seção líquida entre três e dois furos na configuração aparafusada com furos alternados.

4.2.2.1 Ensaio E25_A_PL_N_145_15_26

Esse ensaio visou mostrar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal, com aplicação de carga na direção paralela a laminação em aço inoxidável austenítico com parafusos alternados, com placa de largura de 145 mm e parâmetro $s = 26$ mm. Esse ensaio teve o objetivo de determinar o limite da ruptura passando por dois e três furos;

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 15 mm de espessura e 200 mm de largura.

O clipgagem posicionado na linha paralela a de aplicação de carga no nível da primeira linha da seção de um furo, Figura 4.58 (b) e (c), apresenta um comportamento similar a seção do centro da ligação. Porém, ele apresentou um comportamento um pouco mais rígido após o limite da deformação específica elástica, similar ao comportamento dos extensômetros posicionados na seção do centro da ligação.

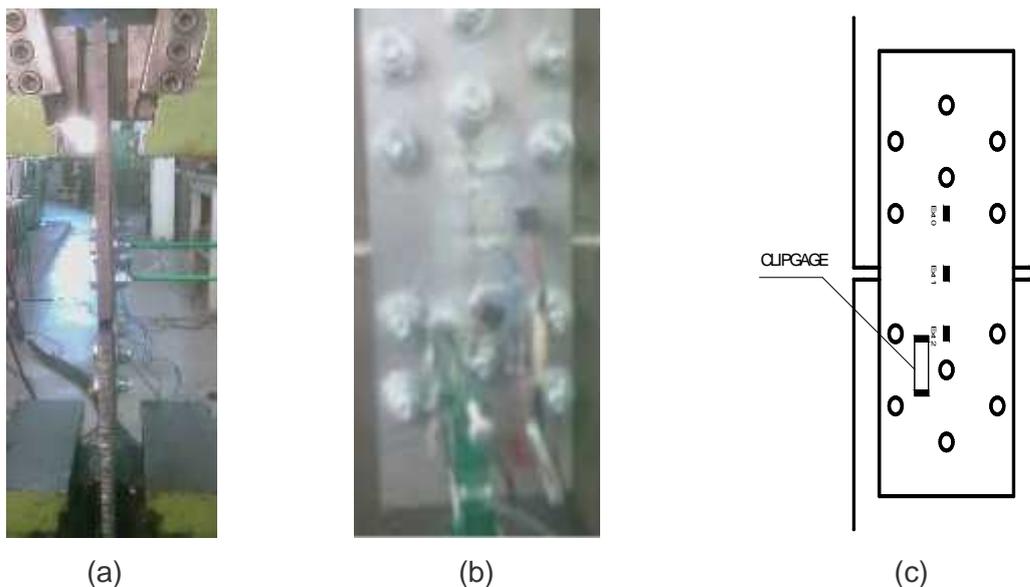


Figura 4.58 – Ensaio 25: (a) Detalhe da chapa interna, (b) posicionamento dos transdutores e clipgagem, (c) desenho esquemático.

O ensaio mostra a ruptura na seção líquida passando por três furos conforme visto na Figura 4.60 (a), e o alongamento dos furos provocado pela grande ductilidade do aço inoxidável austenítico mostrado na Figura 4.60 (b).

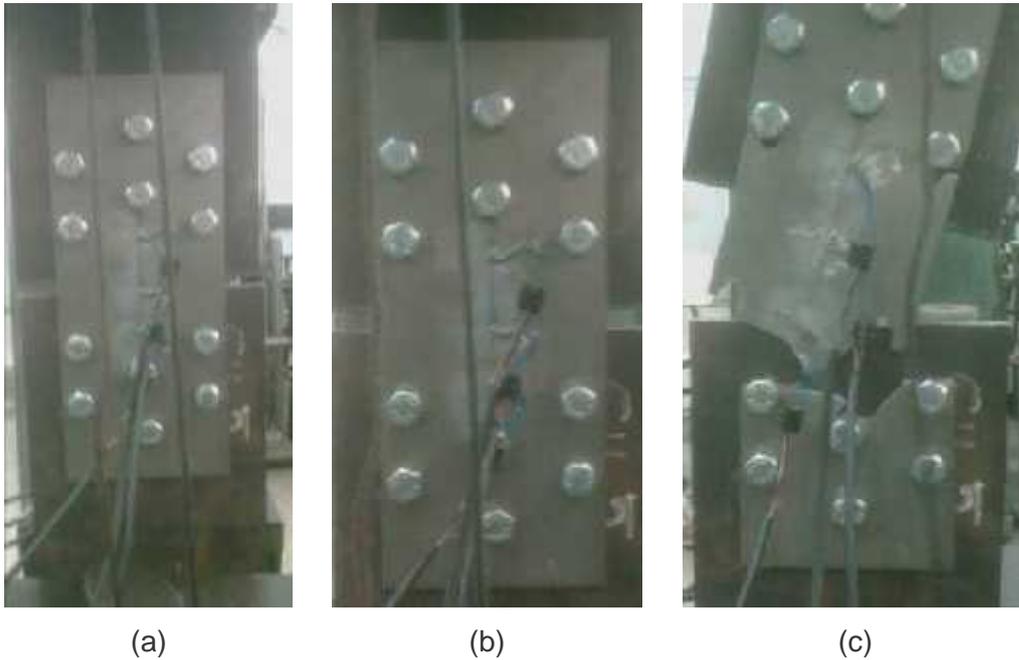


Figura 4.59 – Ensaio 25: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

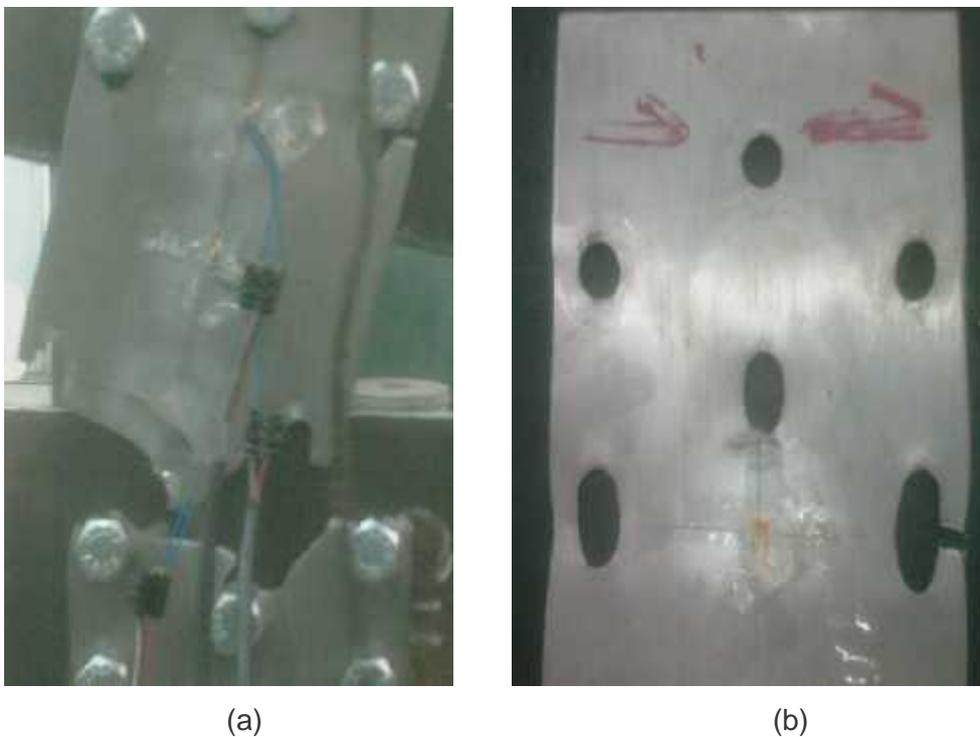


Figura 4.60 – Ensaio 25: (a) detalhe da ruptura na seção líquida em três furos, (b) alargamento dos furos.

4.2.2.2 Ensaio 26_A_PL_N_145_15_30

Esse ensaio teve o intuito de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal, com chapas com aplicação de carga na direção paralela a laminação em aço inoxidável austenítico. O ensaio E25_A_PL_N_145_15_26, com parâmetro $s = 26$ mm, apresentou ruptura em três furos. Esse ensaio com parâmetro $s = 30$ mm visou determinar o valor limite desse parâmetro. Nesse ensaio foi introduzido o clipgagem na seção bruta no centro da ligação assim como o extensômetro elétrico 1, na Figura 4.61 (b). Esse procedimento serviu para validar os dados obtidos, pois os dois apresentaram as mesmas leituras, conforme apresentado no gráfico carga *versus* deformação específica. Esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme Figura 4.62.

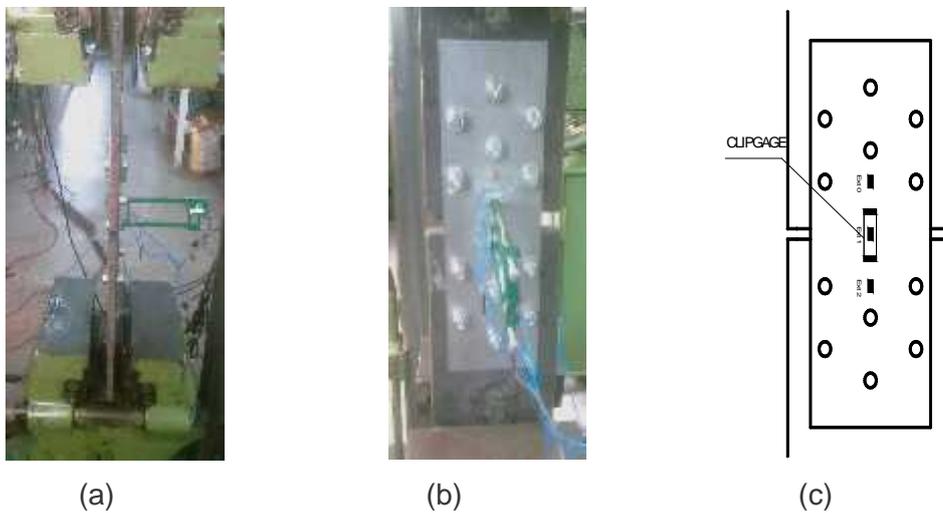


Figura 4.61 – Ensaio 26: (a) detalhe da chapa interna, (b) posicionamento do clipgagem, (c) posicionamento do Clipgagem.

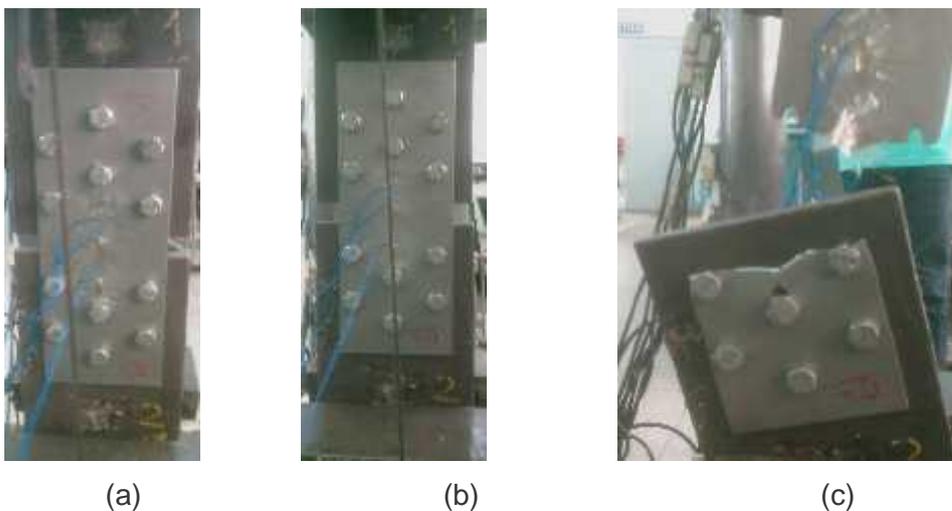


Figura 4.62 – Ensaio 26: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.2.3 . Ensaio E29_A_PL_N_145_6_26

Esse ensaio teve o objetivo de determinar o valor limite do parâmetro s para a ruptura entre dois e três furos, e analisar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com laminação paralela à aplicação de carga em aço inoxidável austenítico.

Esse ensaio teve um espaçamento entre furos de 26 mm e placa de aplicação de carga com características geométricas de 6 mm de espessura e 200 mm de largura, além da utilização do clipgagem, como mostrado na Figura 4.63.

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando entre dois e três furos, conforme Figura 4.64 e Figura 4.65. O parâmetro $s = 26$ mm mostra ser o limite da mudança de ruptura da seção líquida de dois para três furos.

O escorregamento do aço inoxidável foi muito grande nas garras da máquina de tração, conforme mostrado na Figura 4.65, devido a sua dureza e ao seu acabamento superficial ser menos rugoso do que o aço carbono.

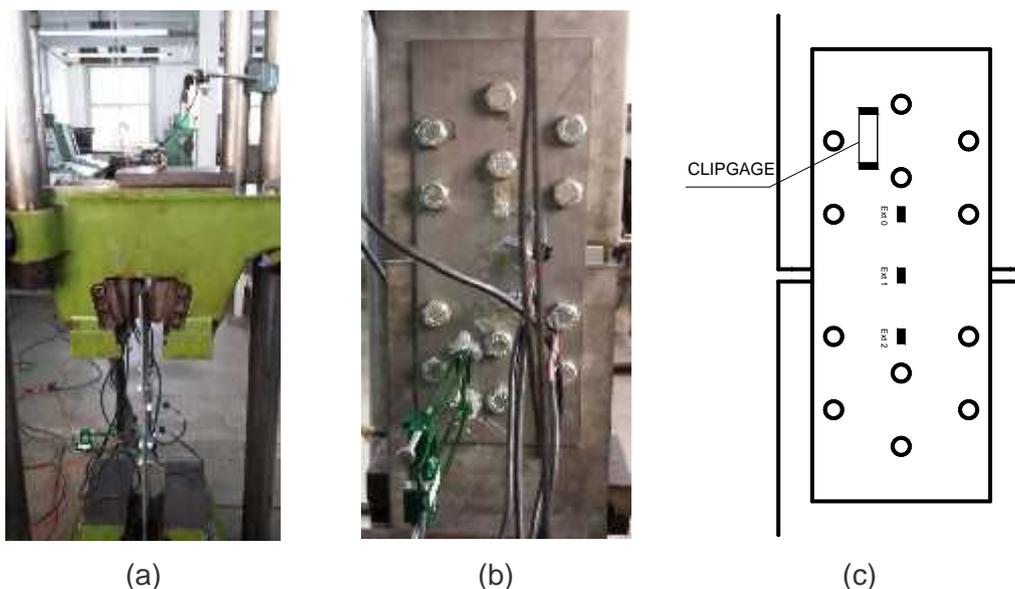


Figura 4.63 – (a) Montagem do ensaio, (b) configuração inicial, (c) clipgagem.

O clipgagem posicionado na terceira seção de parafusos, seção de dois furos, apresenta um comportamento inicial similar ao da seção central. Porém, após a deformação específica elástica apresentou um comportamento mecânico associado ao aumento de carga com menos deformação específica que a seção do centro da ligação. Na deformação específica limite seu comportamento mecânico foi similar ao da seção da primeira coluna de parafusos perto do centro da ligação.



Figura 4.64 – Antes do ensaio e após a ruptura.

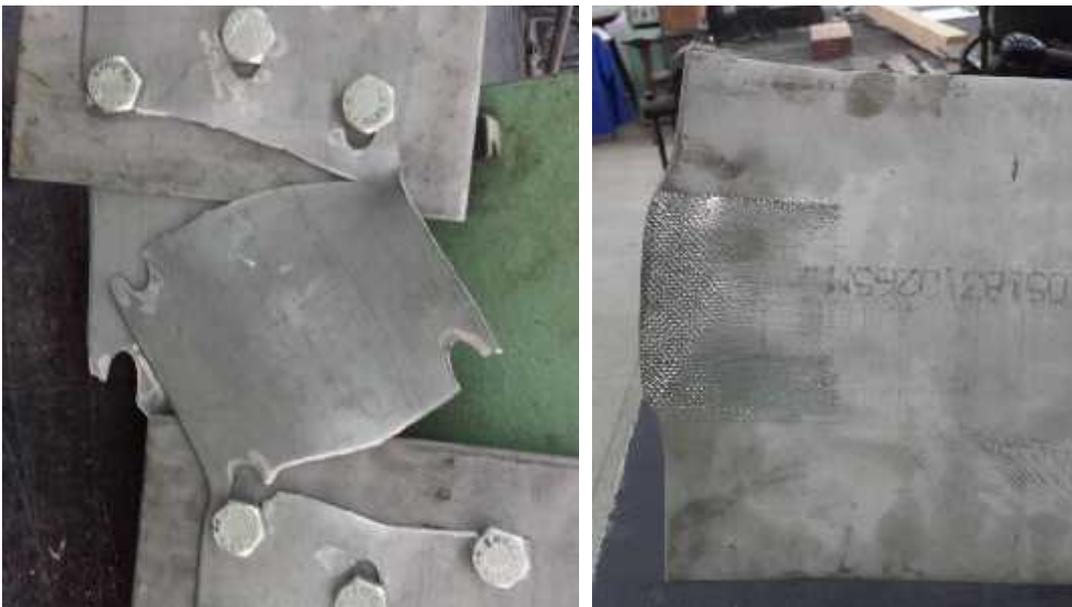


Figura 4.65 – Ruptura na seção líquida passando por dois furos e deformação placa base.

4.2.2.4 Ensaio E30_A_PL_N_145_6_30

Esse ensaio teve como alvo a verificação do comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com laminação na direção paralela a aplicação da carga, foi executado em aço inoxidável austenítico, visando determinar o valor limite do parâmetro s para a mudança da seção de ruptura.

No ensaio foi adotada uma placa de aplicação de carga, com 6 mm de espessura, duas chapas de 3 mm soldadas, e 200 mm de largura, conforme Figura 4.66. O espaçamento entre furos foi de 30 mm, para confirmar a ruptura na seção líquida passando por dois furos.

Foi utilizado um clipgagem, conforme detalhes mostrados na Figura 4.66, para verificar o comportamento da ligação nessa seção, ou seja, na primeira linha de furos.

O ensaio mostra ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme Figura 4.67. Essa ruptura confirmou com o ensaio E29_A_PL_N_145_6_26, que o valor do parâmetro $s = 26$ mm é o valor limite na mudança da seção de ruptura.

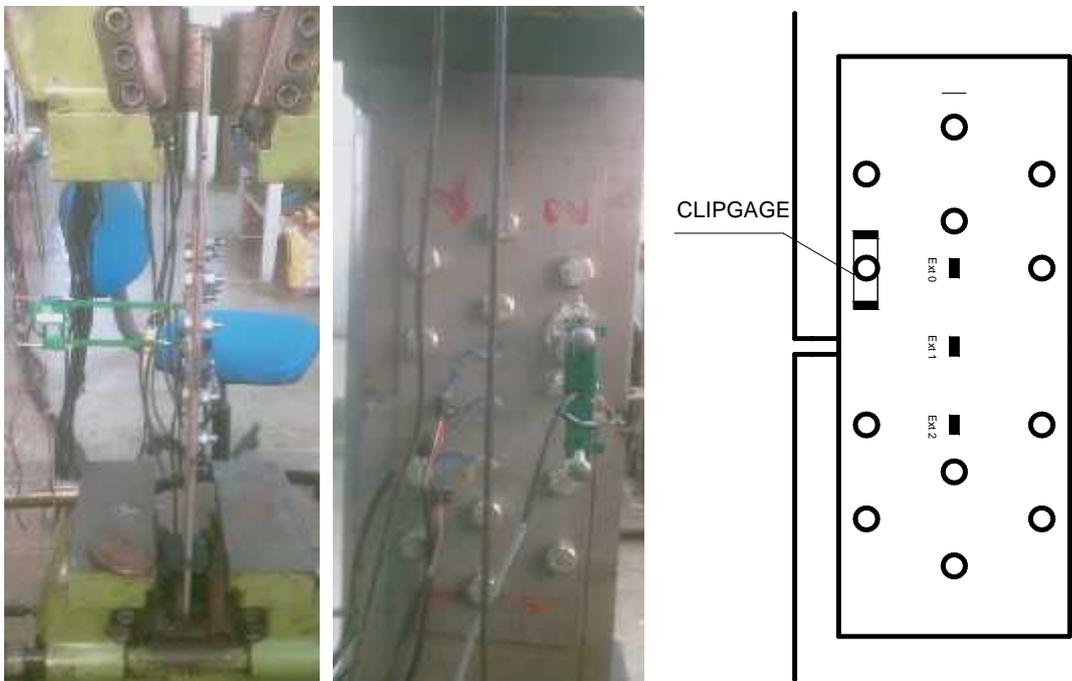


Figura 4.66 – Detalhe do chapa interna e posicionamento do clipgagem.

O clipgagem foi posicionado na primeira seção de parafusos, na direção de um parafuso, de modo a se verificar a concentração das maiores tensões, apresentando o comportamento mecânico menos rígido do que na seção central da ligação, com comportamento similar ao obtido na seção central na deformação específica limite.

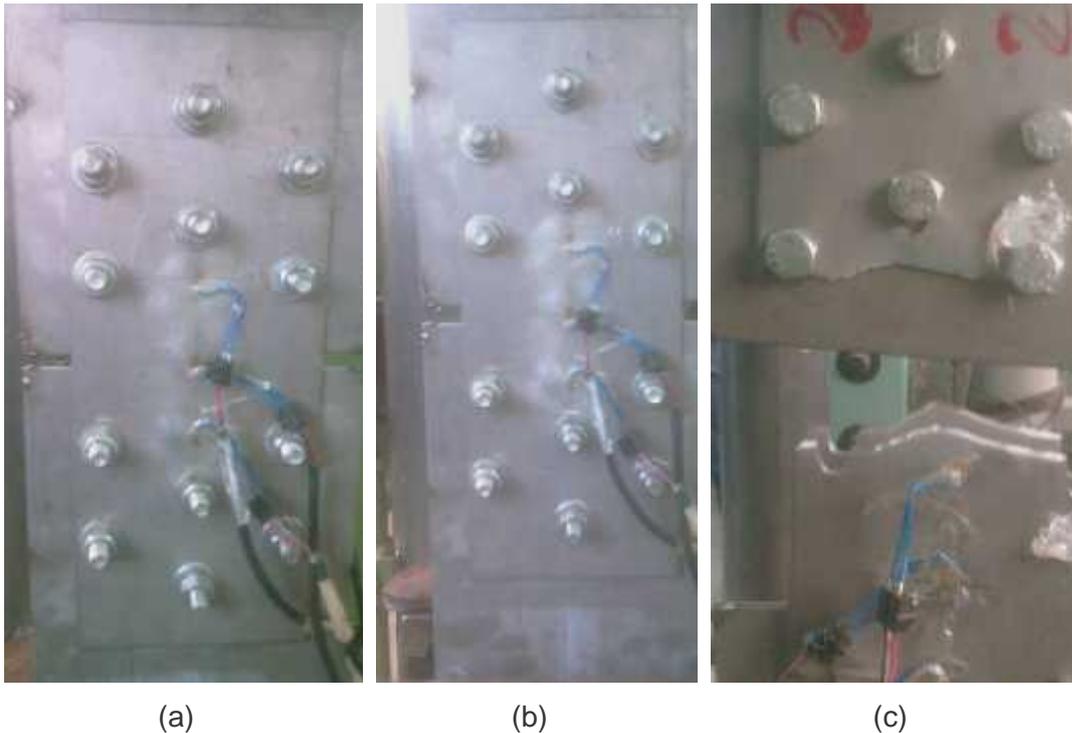


Figura 4.67 – Ensaio 30: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.2.5 Resultado dos ensaios – Grupo VI (25, 26, 29 e 30)

Os gráficos do comportamento mecânico desse conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.36 e na Figura 4.37.

Os ensaios apresentaram deslocamento inicial devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos e acomodação das garras da máquina de tração.

O gráfico carga *versus* deslocamento desses ensaios apresentaram também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio. Os ensaios apresentaram uma maior rigidez na seção dos parafusos do que na seção do centro da ligação.

Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga. Na fase final as leituras apresentaram um comportamento equilibrado nas seções dos parafusos, como pode ser observado na Figura 4.68.

Um resumo desses resultados está presente na Tabela 4.6.

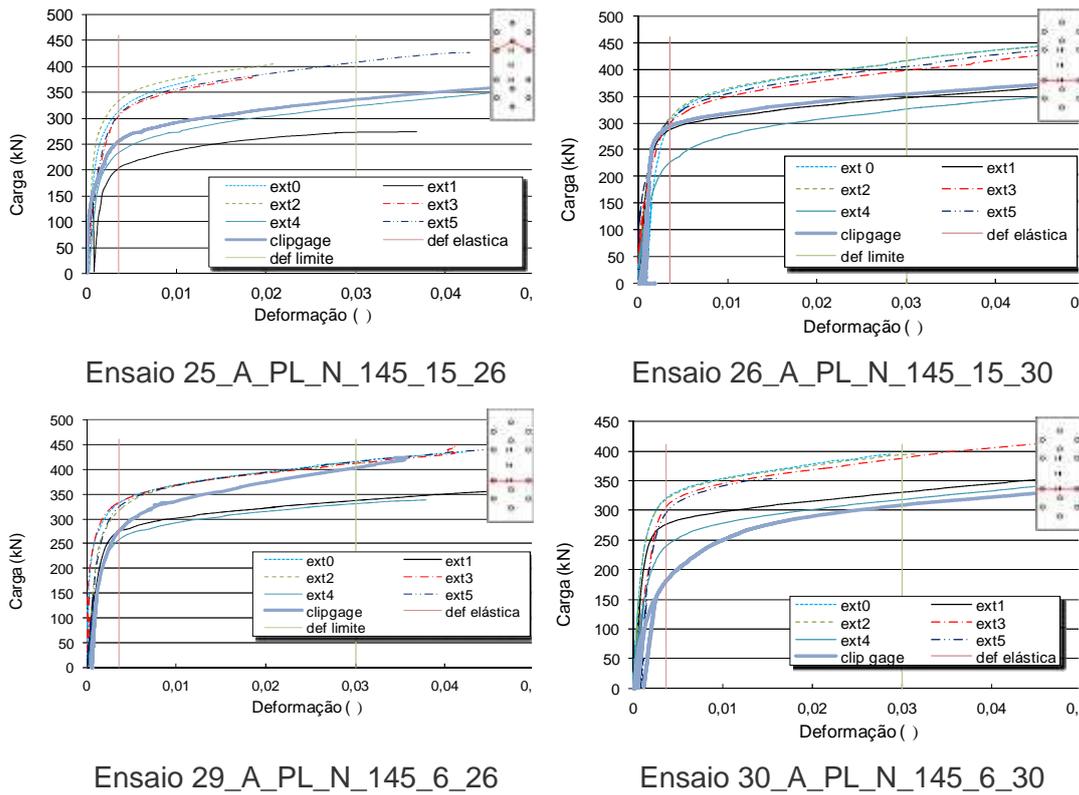


Figura 4.68 – Gráficos carga *versus* deformação específica – Grupo VI

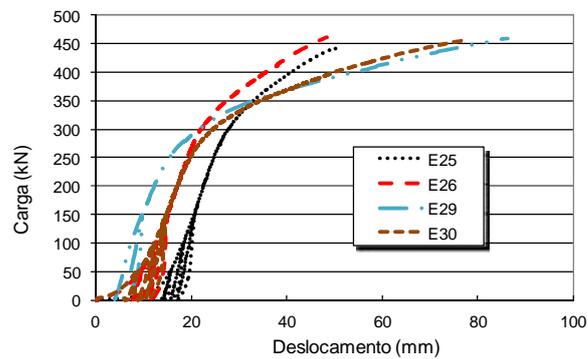


Figura 4.69 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo VI

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo VI

Ensaio	Carga última (kN)	Desloc. inicial (mm)	Desloc. final (mm)	Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)	
				Par.*	Centro	Par.	Centro
E25_A_PL_N_145_15_26	442,0	10,0	41,7	320	220	410	330
E26_A_PL_N_145_15_30	460,8	5,0	48,3	305	260	410	350
E_29_A_PL_N_145_6_26	458,7	4,0	82,0	340	270	420	330
E_30_A_PL_N_145_6_30	456,4	2,0	76,8	320	270	390	340

* seção entre dois parafusos

4.2.3 Influência do parâmetro L

Com o objetivo avaliar a influência da variação da largura da placa de aplicação de carga foram realizados cinco ensaios com valores do parâmetro L = 107 mm: ensaios 34, 35, 36, 44 e 45.

Esses ensaios tiveram o objetivo de verificar o comportamento mecânico da estrutura aparafusada, e determinar a distância limite do parâmetro s para a ruptura passando por três e dois furos.

4.2.3.1 Ensaio E34_A_PL_N_107_6_22

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga com características geométricas de 6 mm de espessura, e 150 mm de largura. O espaçamento entre furos foi de 22 mm, conforme Figura 4.70.

O clipgage posicionado na última seção de um parafuso, conforme mostrado na Figura 4.71, apresentou uma deformação específica mínima mostrando que a pequena transferência de carga nessa seção

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme mostrado na Figura 4.72.

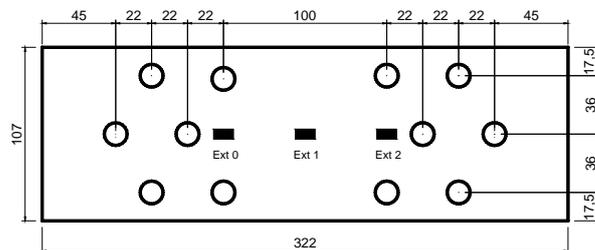


Figura 4.70 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.



Figura 4.71 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos transdutores de deslocamento e clipgage.

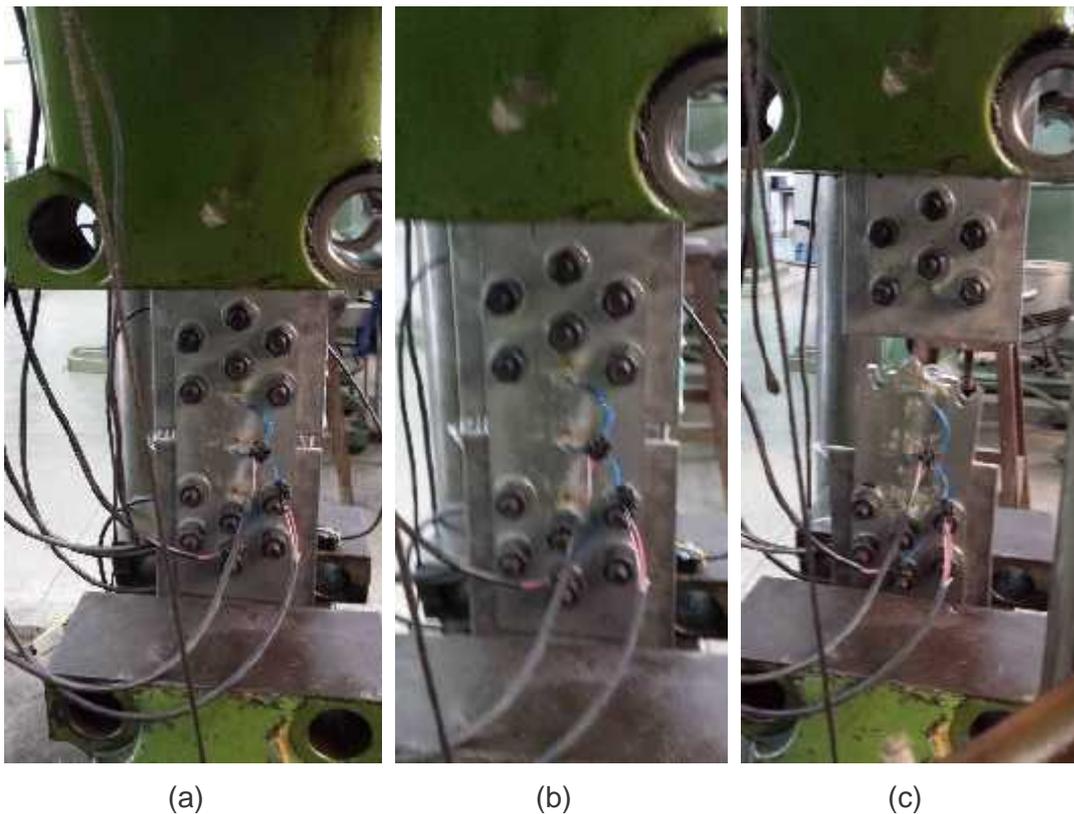


Figura 4.72 – Ensaio 34: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c)ruptura.

4.2.3.2 Ensaio E35_A_PL_N_107_6_24

Esse ensaio com placa de largura de 107 mm também teve o objetivo de determinar o valor limite do parâmetro s para mudança da seção de ruptura. Esse ensaio adotou uma placa de aplicação de carga com características geométricas de 6 mm de espessura, e espaçamento entre furos de 24 mm.

O clipage posicionado na penúltima seção de um parafuso, conforme Figura 4.73 (c) apresentou mais uma vez uma deformação específica mínima confirmando a pequena transferência de carga para esta seção

Esse ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos como mostrado na Figura 4.74. O valor limite do parâmetro s para a mudança da seção de ruptura varia entre 22 mm e 24 mm.



Figura 4.73 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgauge.

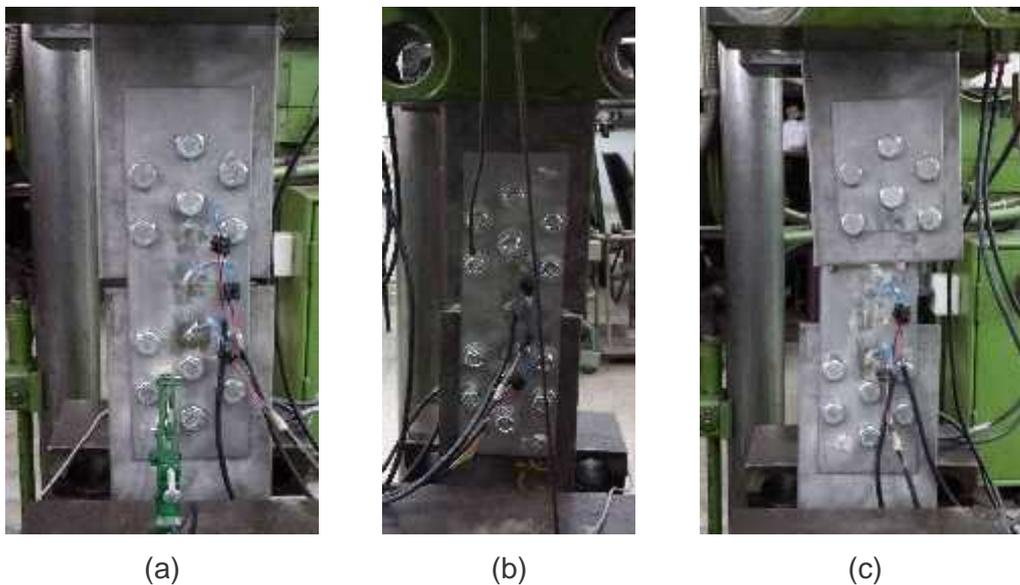


Figura 4.74 – Ensaio 35: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.3.3 Ensaio E36_A_PL_N_107_6_26

Esse ensaio foi executado para se determinar o limite do parâmetro s e verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal, com aplicação de carga na direção paralela a laminação em aço inoxidável austenítico com parafusos defasados.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga com características geométricas de 6 mm de espessura, e 150 mm de largura. A placa de ensaio, ou externa, teve uma largura de 107 mm.

Nesse ensaio o clipgagem posicionado na seção do último furo não apresentou leituras esperadas, para aquela região, provavelmente por problemas de fixação com a cola quente, tendo assim seus valores abandonados.

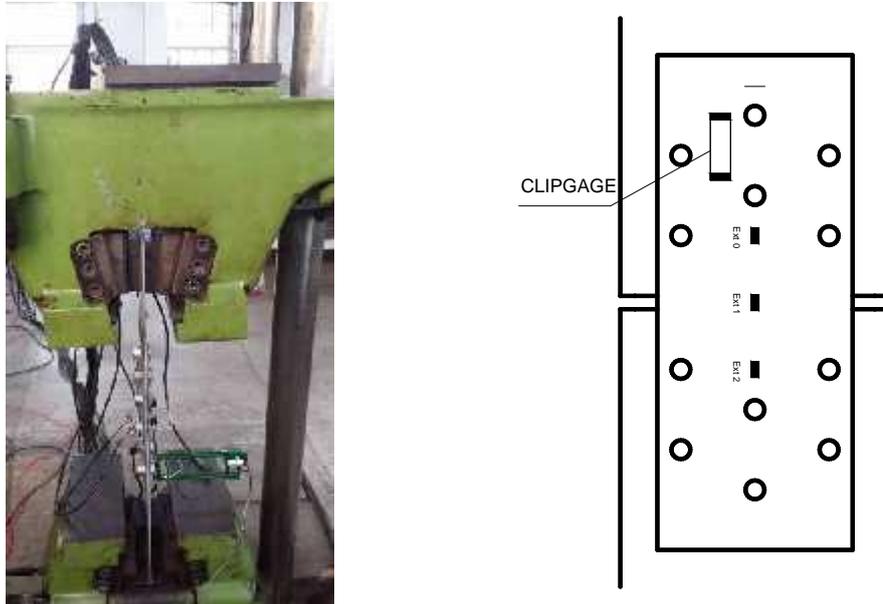


Figura 4.75 – Detalhe da chapa interna e posicionamento do clipgagem.

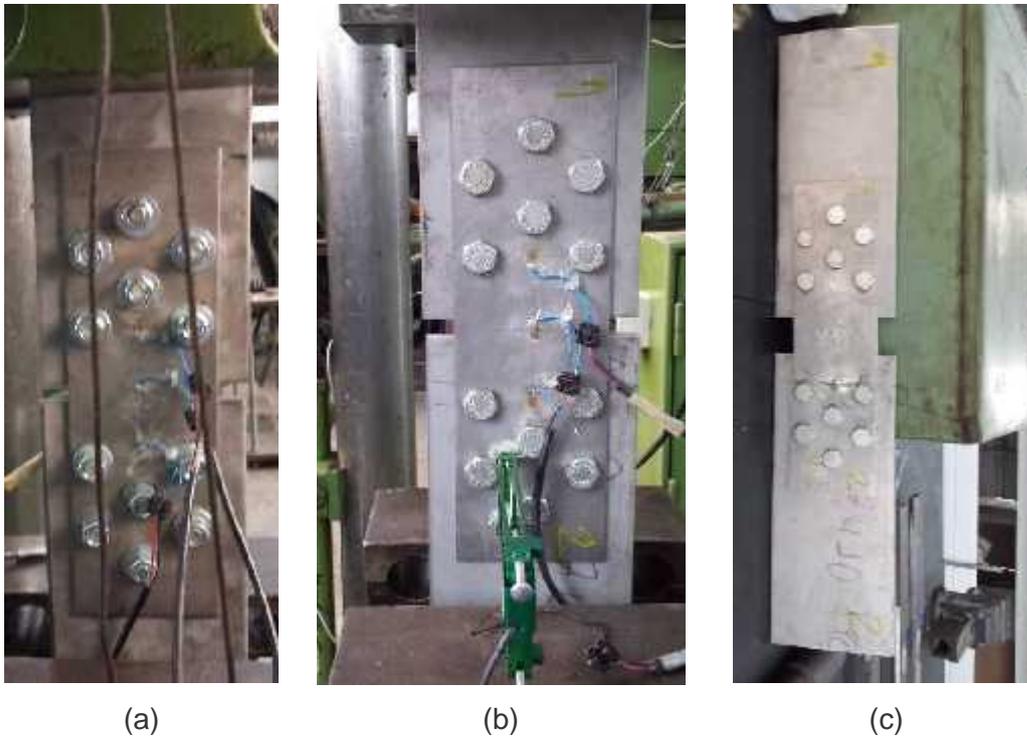


Figura 4.76 – Ensaio 36: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.3.4 Ensaio E44_A_C_N_107_6_18

Esse ensaio teve como objetivo determinar o valor limite para o parâmetro s na mudança do modo de ruína da ligação, e de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal e chapas com laminação na direção perpendicular à aplicação da carga, em aço inoxidável, conforme Figura 4.77.

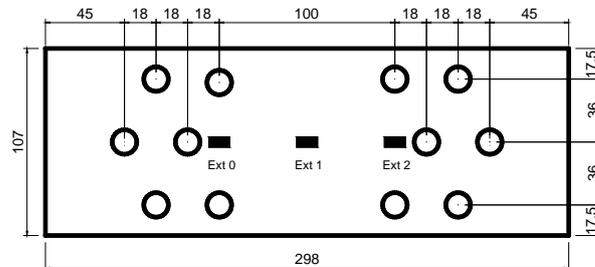


Figura 4.77 – Posicionamento dos extensômetros.

O ensaio foi instrumentado com um clipgagem e dois transdutores de deslocamento, conforme mostra a Figura 4.78 (c). O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme Figura 4.79.

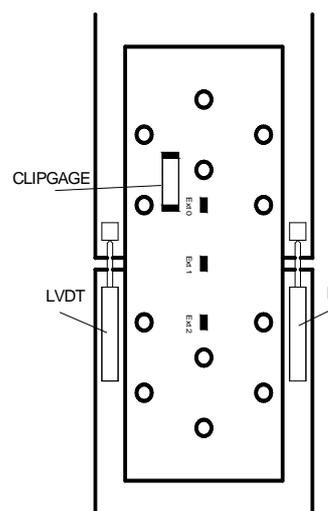
O clipgagem posicionado na direção paralela a primeira seção de um parafuso apresentou um comportamento menos rígido do que no centro e na seção de dois parafusos da ligação. Na deformação específica elástica o clipgagem posicionado na seção de um furo apresentou uma carga de 125 kN, correspondente à metade da apresentada na seção de dois furos 240 kN e no centro da ligação, 220 kN.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.78 – (a) ensaio na máquina, (b) clipgagem, (c) desenho esquemático.



Figura 4.79 – Ensaio 44: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.3.5 Ensaio E45_A_C_N_107_6_23

Esse ensaio teve o objetivo verificar em aço inoxidável austenítico, o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal e chapas com laminação na direção perpendicular a aplicação da carga, e o limite da ruptura da seção passando por dois ou três furos.

O ensaio adotou uma placa de aplicação de carga com características geométricas de 6 mm de espessura, e configuração geométrica mostrada na Figura 4.80.

O clipgagem fixado na última seção de um parafuso, conforme Figura 4.81, apresentou um comportamento com pouca deformação específica desde o início ao fim do ensaio

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme Figura 4.82, diferente do ensaio 44_A_C_N_107_6_18 que apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos. Portanto, o limite da mudança do modo de ruptura para esse tipo de ligação pode ser definido entre 18 mm e 23 mm.

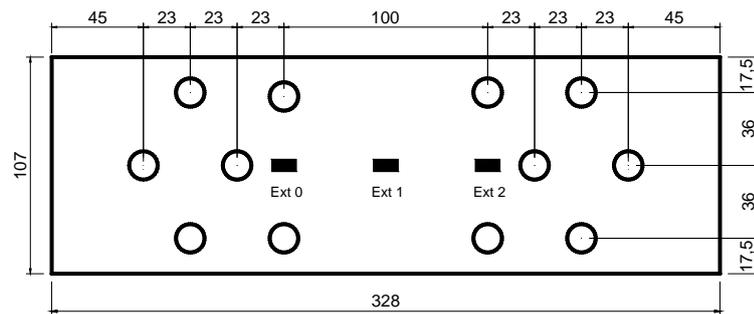


Figura 4.80 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

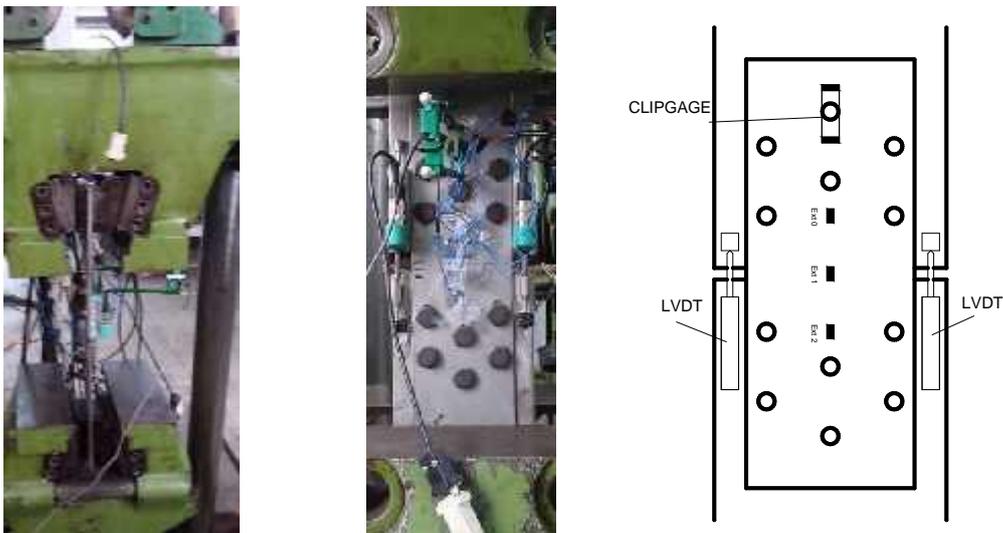


Figura 4.81 – Posicionamento do ensaio, transdutores de deslocamento e clipgagem.

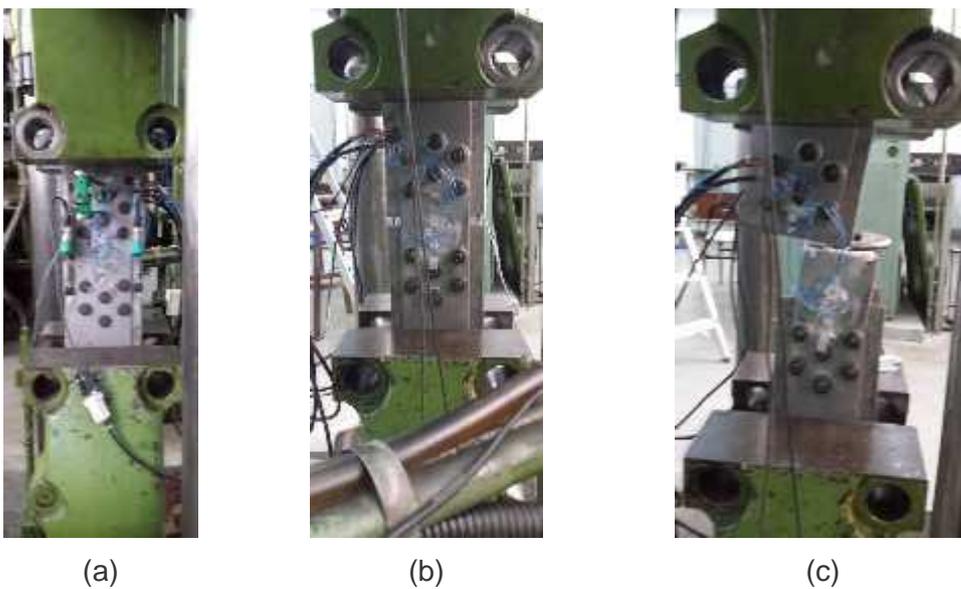


Figura 4.82 – Ensaio 45: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.3.6 Resultado dos ensaios – Grupo VII (34 a 36, 44 e 45)

Os gráficos carga *versus* deformação específica apresentaram na fase elástica nas regiões onde foram posicionados os extensômetros uma maior rigidez na seção entre os parafusos, e menor rigidez na seção central da ligação. No gráfico carga *versus* deformação específica mostrado na Figura 4.83, tem-se a mesma rigidez na seção entre os parafusos e na seção central da ligação.

Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga, mas ao final, as leituras apresentam um comportamento equilibrado nas seções dos parafusos, como pode ser observado nos gráficos carga *versus* deformação específica.

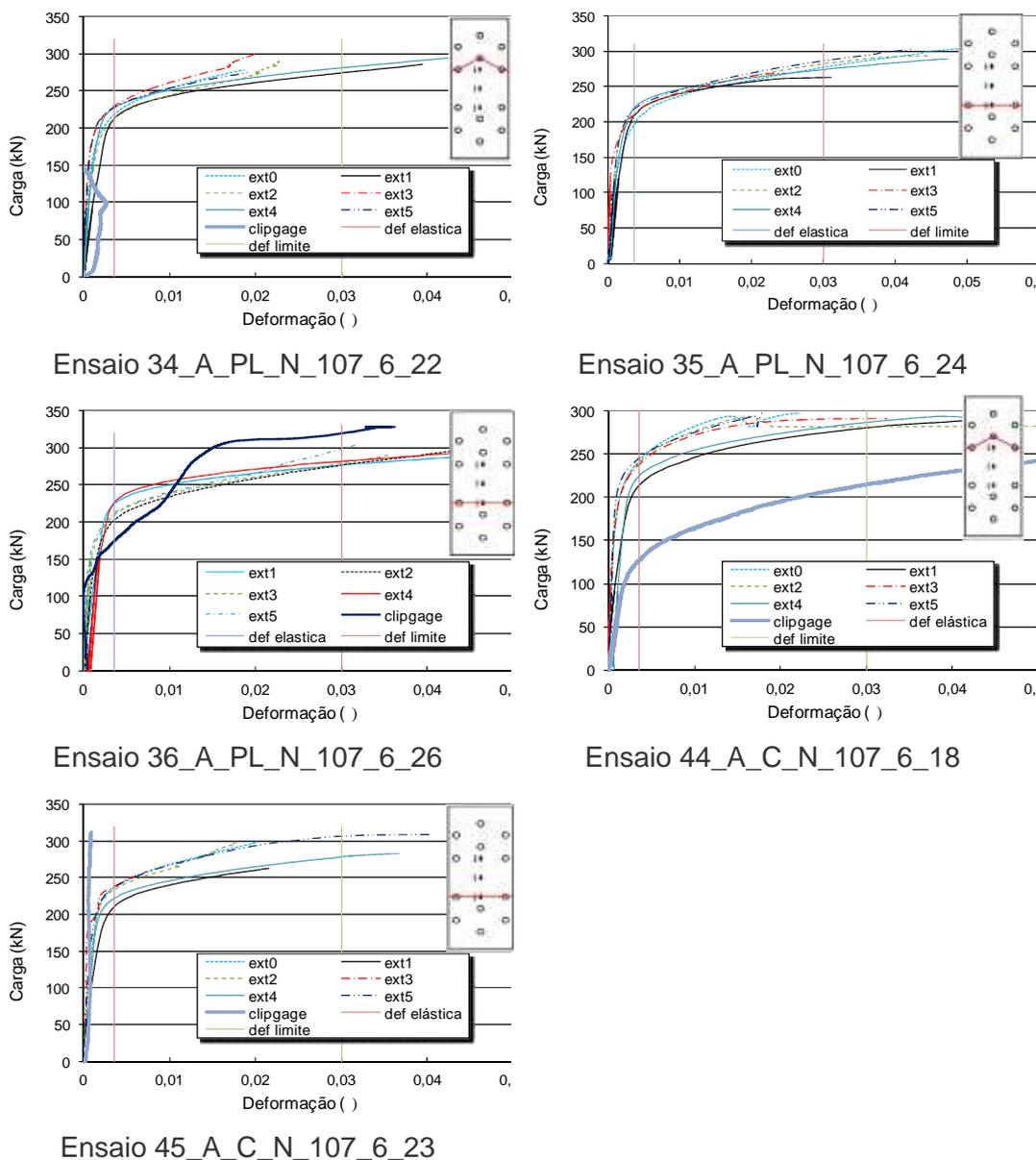


Figura 4.83 – Gráficos carga *versus* deformação específica – Grupo VII

Os gráficos do comportamento carga *versus* deslocamento desse conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.36 e na Figura 4.37.

Os ensaios apresentaram um deslocamento inicial devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos e acomodação das garras da máquina de tração.

O gráfico carga *versus* deslocamento dos ensaios E34_A_PL_N_107_6_22, E44_A_C_N_107_6_18 e E45_A_C_N_107_6_23 apresentam também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio.

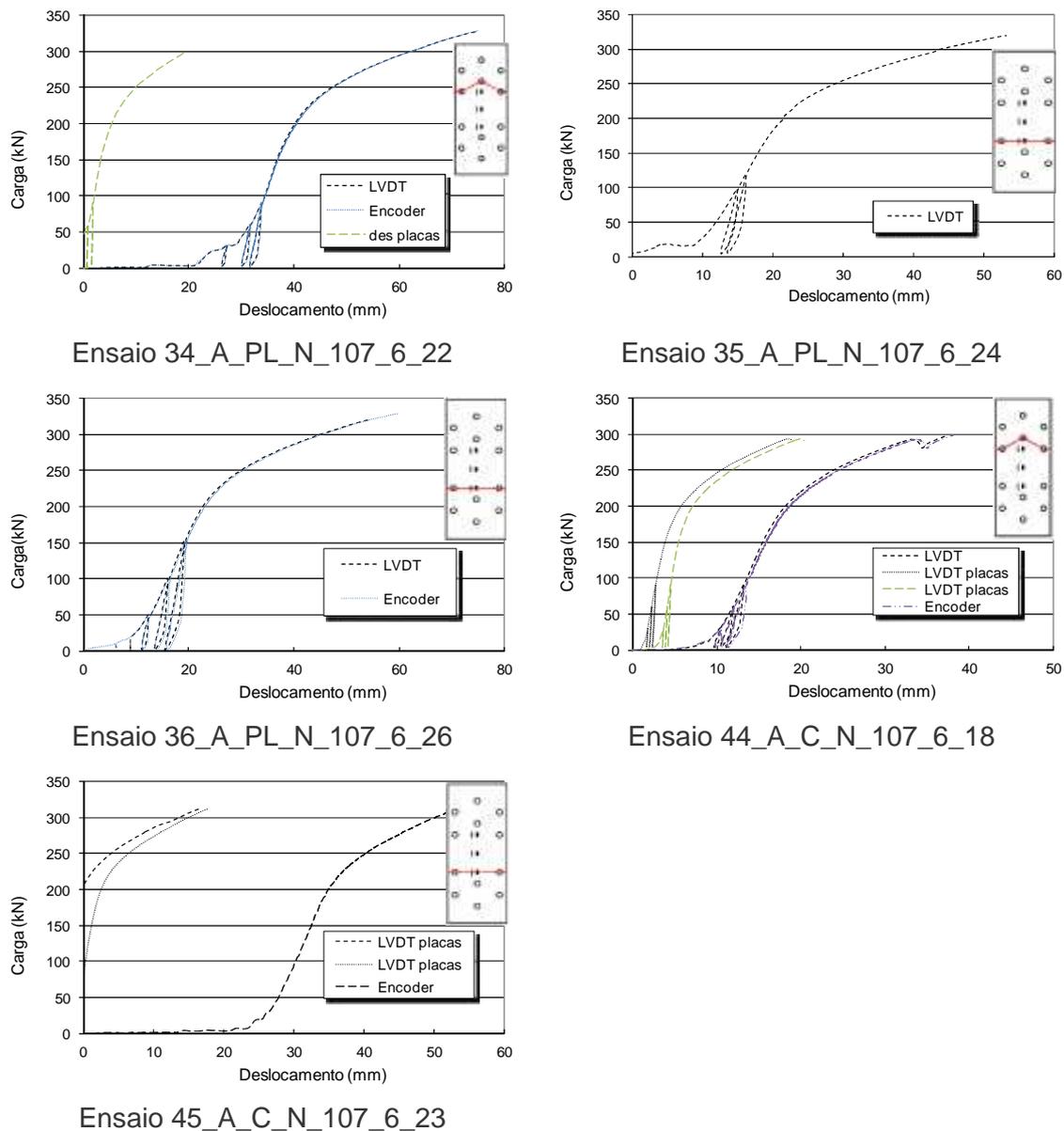


Figura 4.84 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo VII.

Os resultados desse grupo de ensaios estão resumidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo VII

Ensaio	Carga última (kN)	Desloc. inicial (mm)	Desloc.. final (mm)		Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)	
			total	placa	Par*	Centro	Par	Centro
E34A_PL_N_107_6_22	327,4	21,1	43,4	20,1	225	220	–	270
E35A_PL_N_107_6_24	319,4	10,0	43,9	–	215	210	290	260
E36A_PL_N_107_6_26	328,3	7,2	52,8	–	225	210	280	275
E44_A_C_N_107_6_18	290,1	4,3	28,9	16,5	240	220	280	275
E45_A_C_N_107_6_23	312,3	30,1	33,5	17,7	240	220	300	275

* seção entre dois parafusos

4.2.4 Influência da direção de laminação

Com o objetivo de avaliar a influência da variação da configuração geométrica da ligação foram realizados dois ensaios com ligação com laminação paralela e perpendicular à direção da aplicação de carga.

Esses ensaios tiveram o objetivo de verificar o comportamento mecânico da estrutura aparafusada, e determinar a distância limite do parâmetro s para a mudança de ruptura na ligação aparafusada com furos alternados.

4.2.4.1 Ensaio E32_A_PL_I_145_6_60

Esse ensaio mostrou o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida com laminação na direção paralela à aplicação de carga em aço inoxidável austenítico. A placa de aplicação de carga, tinha características geométricas de 6 mm de espessura e espaçamento entre furos de 60 mm, conforme Figura 4.85.

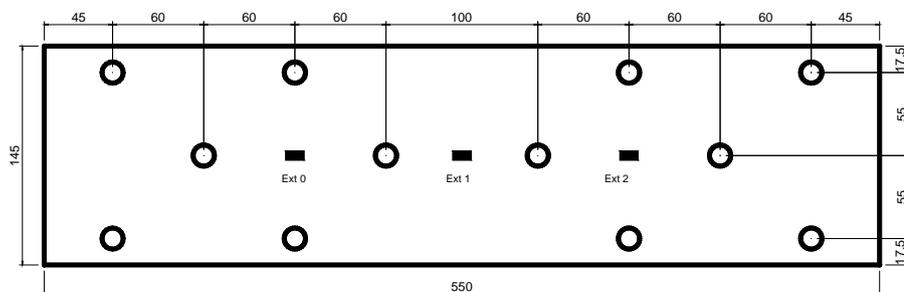


Figura 4.85- Posicionamento dos extensômetros.

Foi utilizado nesse ensaio um clipgagem para leitura da deformação específica na primeira seção de um parafuso conforme e disposição adotada apresentada na Figura 4.86. O ensaio apresentou a ruptura na seção líquida passando por um furo, conforme Figura 4.87.

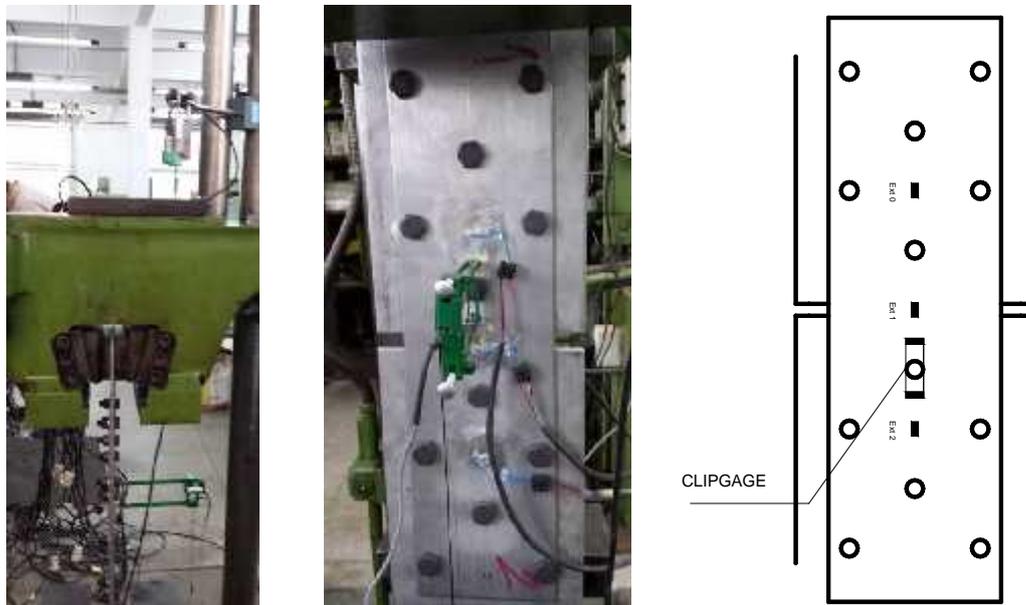


Figura 4.86 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

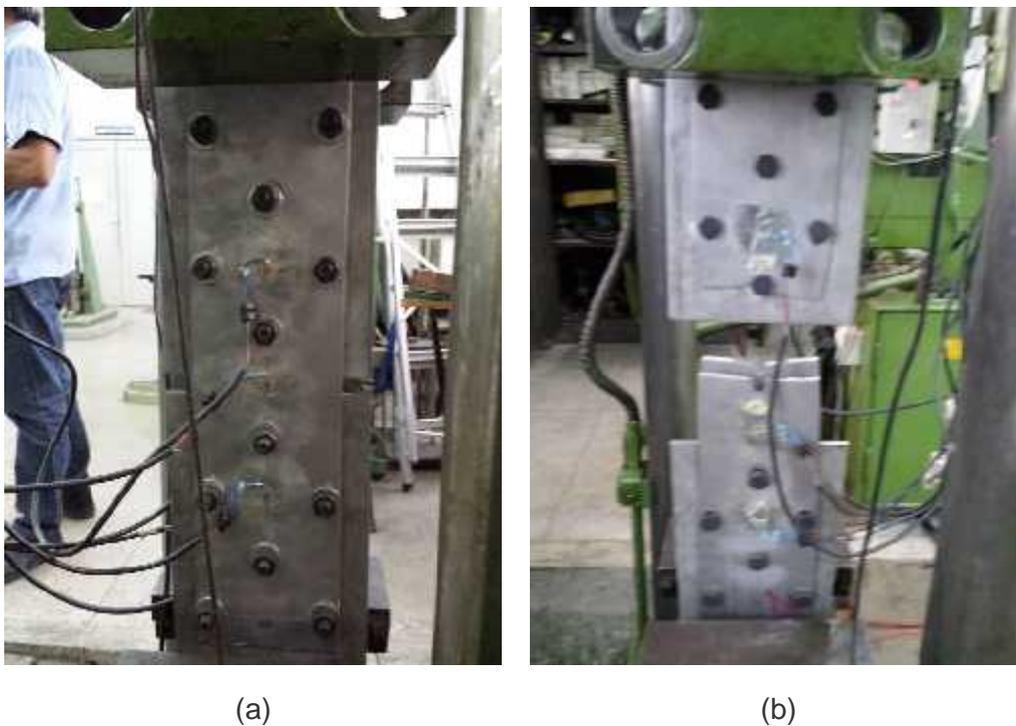


Figura 4.87 – (a) configuração inicial, (b) após a ruptura.

4.2.4.2 Ensaio E43 – A_PP_I_145_8_60

Esse ensaio teve o objetivo de determinar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida, com laminação na direção perpendicular a direção da aplicação da carga em aço inoxidável austenítico, e o valor limite do parâmetro s , conforme Figura 4.88.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga com características geométricas de 8 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono.

Foram utilizados parafusos A490 de 1/2" ou 12,7 mm de diâmetro, que podem ser observado na Figura 4.89 (a), devido a sua cor mais escura, obtida por meio do processo de endurecimento.

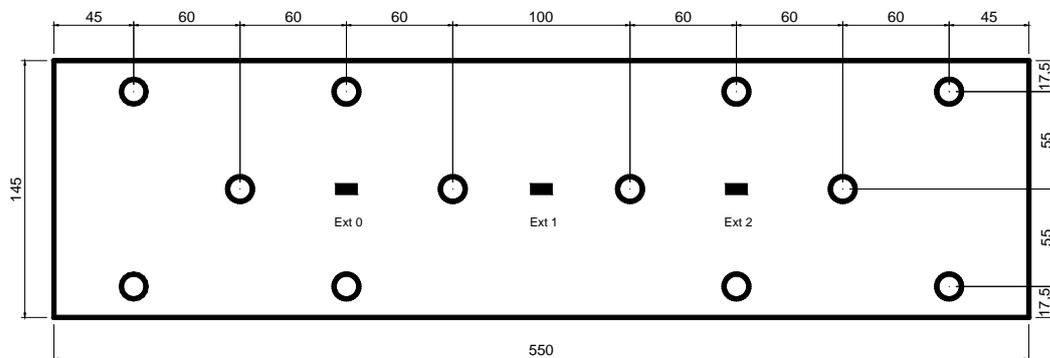


Figura 4.88 – Posicionamento dos extensômetros.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4.89 – Parafusos: (a) A490, (b) corte no A490, (c) corte no A325, (d) A325.

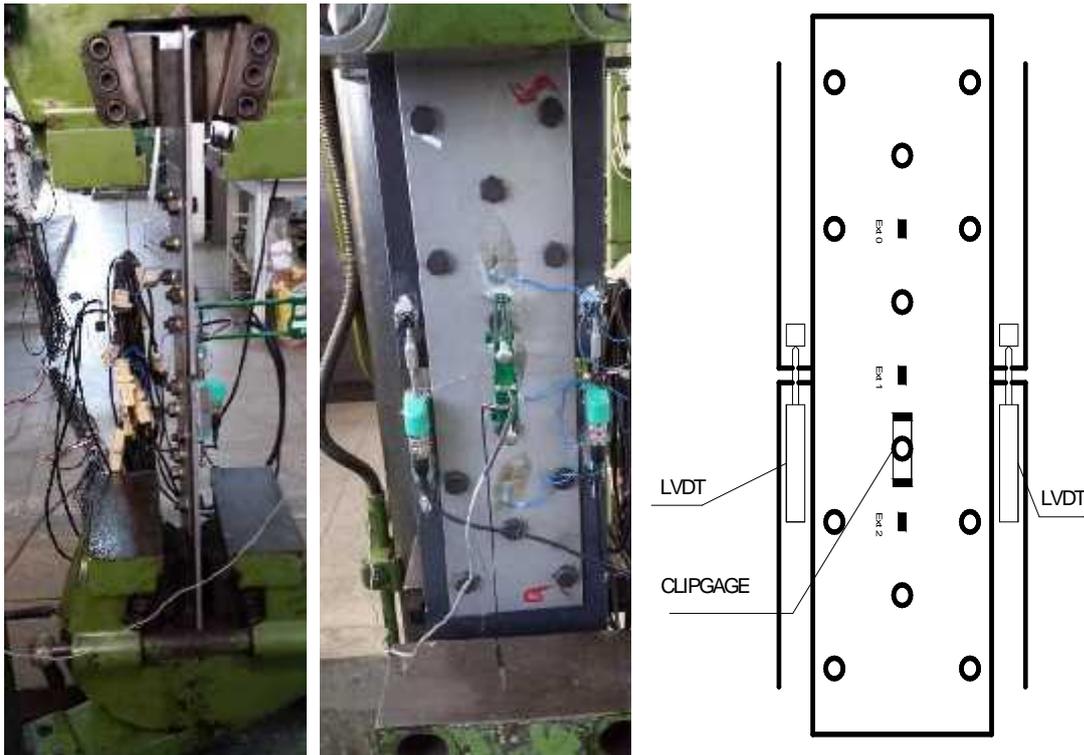


Figura 4.90 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgauge.

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por um furo. Um parafuso também atingiu a ruptura nesse ensaio, conforme Figura 4.89 e Figura 4.92.

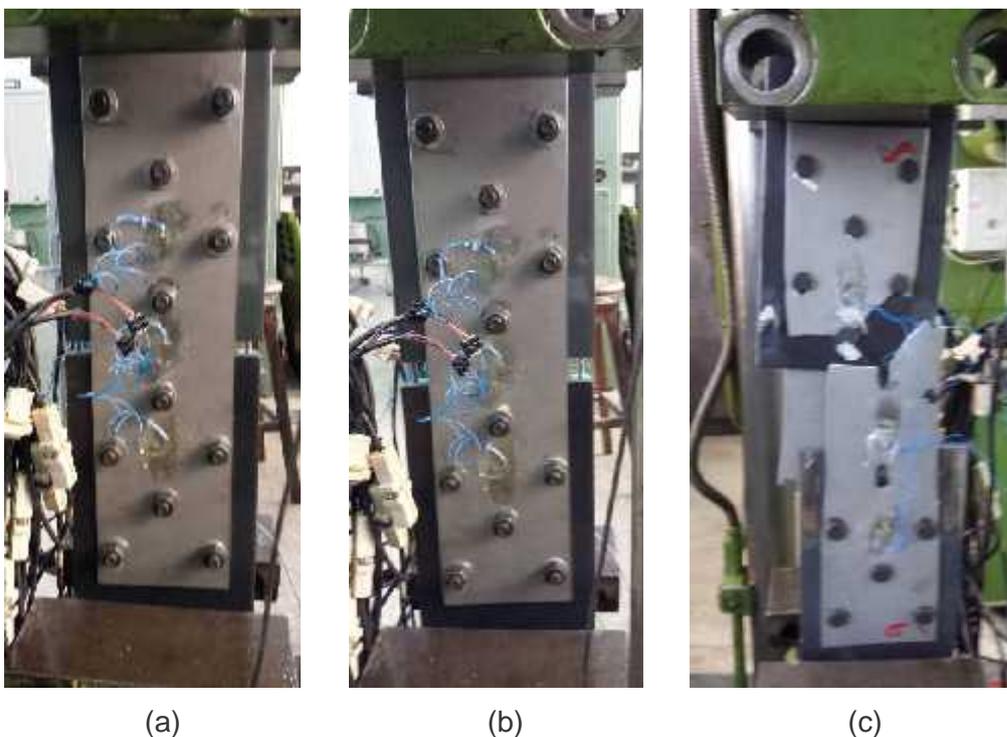


Figura 4.91 – (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) após a ruptura.

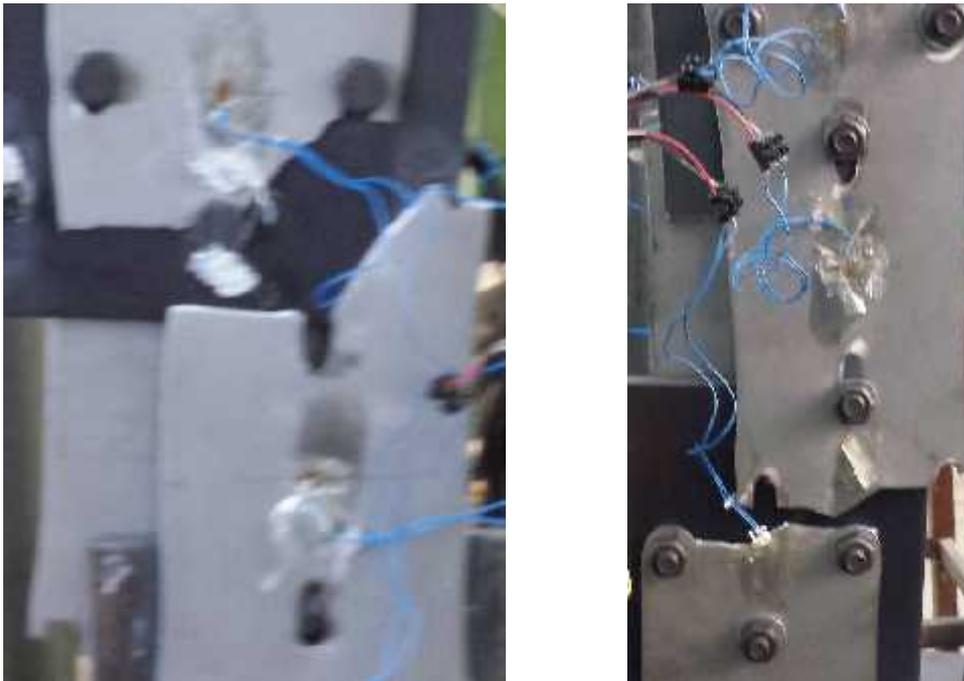


Figura 4.92 – Ruptura na seção líquida passando por um furo com a ruptura de um parafuso.

4.2.4.3 Resultado dos ensaios – Grupo VIII (32 e 43)

Os gráficos do comportamento mecânico desse conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.93 e na Figura 4.94.

Os ensaios apresentaram deslocamentos iniciais devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos e das garras da máquina de tração. O gráfico carga *versus* deslocamento dos ensaios apresentaram também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio.

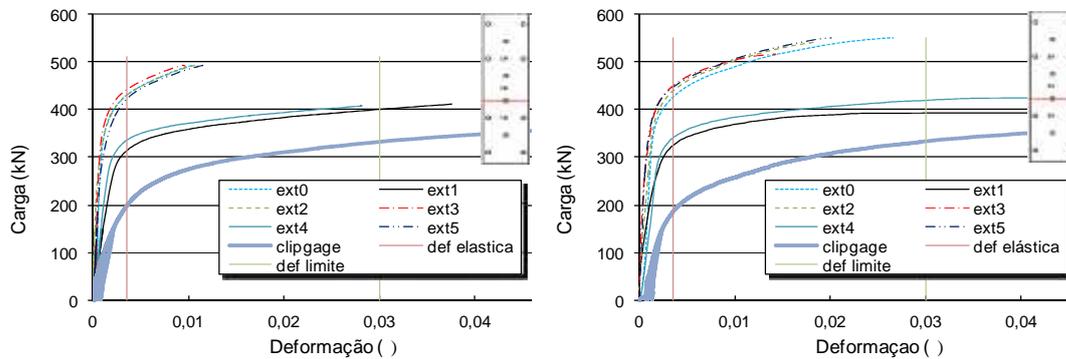
Os gráficos carga *versus* deformação específica apresentaram na fase elástica nas regiões, onde foram posicionados os extensômetros uma maior rigidez na seção entre os dois parafusos, e menor rigidez na seção central da ligação e menor ainda na seção passando por um furo.

Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga.

Os clipgages posicionados na primeira seção de um parafuso dos ensaios apresentaram comportamento menos rígido do que na segunda seção

com dois parafusos, e no final tendem ao comportamento apresentado na seção bruta localizada no centro da ligação.

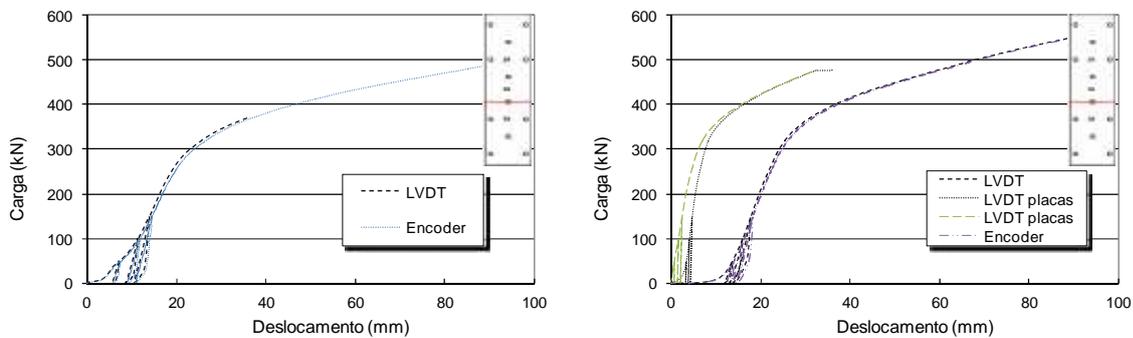
Mais detalhes para esse grupo de ensaios está presente na Tabela 4.3.



Ensaio 32 – A_PL_I_145_6_60

Ensaio 43 – A_PP_I_145_8_60

Figura 4.93 – Gráficos carga versus deformação específica.



Ensaio 32 – A_PL_I_145_6_60

Ensaio 43 – A_PP_I_145_8_60

Figura 4.94 – Gráficos carga versus deslocamento.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo VIII

Ensaio	Carga última (kN)	inicial (mm)	final (mm)		Carga no limite elástico (kN)			Carga na deformação limite (kN)	
			total	chapas	P*	C	P**	C	P**
E32_A_PL_I_145_6_60	494,4	2	94,4	–	420	315	200	400	340
E43_A_PP_I_145_8_60	550,9	7	75,3	25	440	315	200	410	340

P* seção entre dois parafusos
P** seção de um parafusos
C seção do centro da ligação

4.2.5 Influência da configuração geométrica da ligação

Com o objetivo de avaliar a influência da variação da configuração geométrica da ligação foram realizados três ensaios com configurações normais e invertida.

Esses ensaios tiveram o objetivo de verificar o comportamento mecânico da estrutura aparafusada, e determinar a distância limite do parâmetro s para a mudança de ruptura na ligação aparafusada com furos alternados.

4.2.5.1 Ensaio E31_A_PL_I_145_6_55

Esse ensaio visou determinar o limite e comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida com aplicação de carga 'na direção paralela à laminação em aço inoxidável austenítico.

Esse ensaio adotou uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 6 mm de espessura e espaçamento entre furos de 55 mm.

Foi utilizado nesse ensaio um clipgagem para leitura da deformação específica na penúltima seção passando por parafuso e dois transdutores de deslocamento entre as chapas, conforme apresentado na Figura 4.95. O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por um furo, conforme apresentado na Figura 4.96.

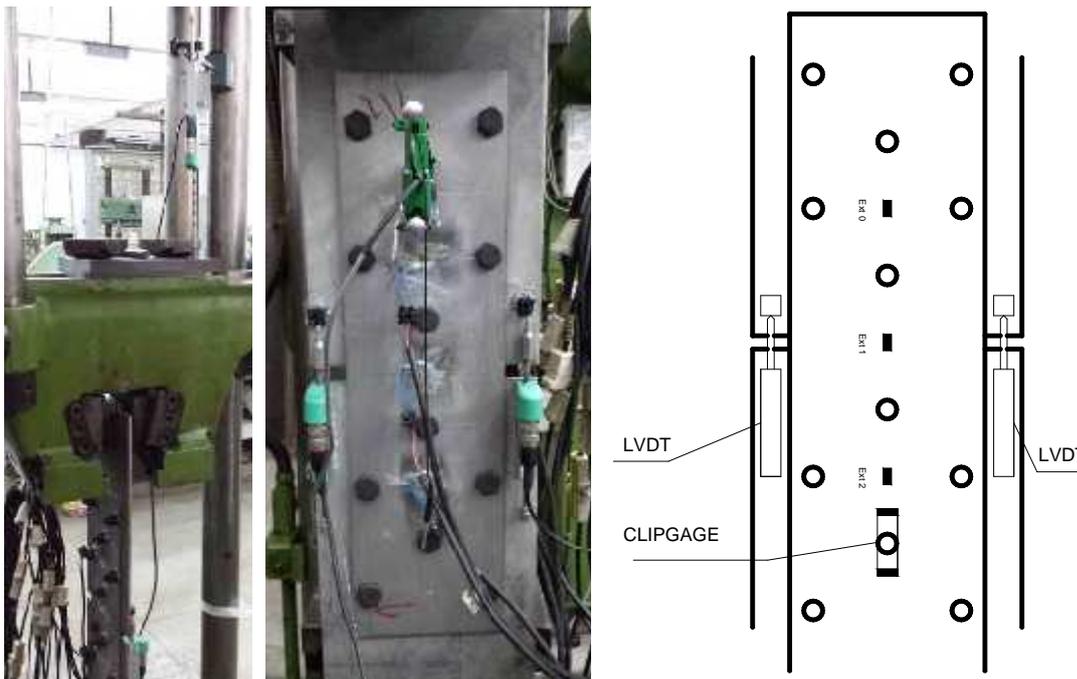


Figura 4.95 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

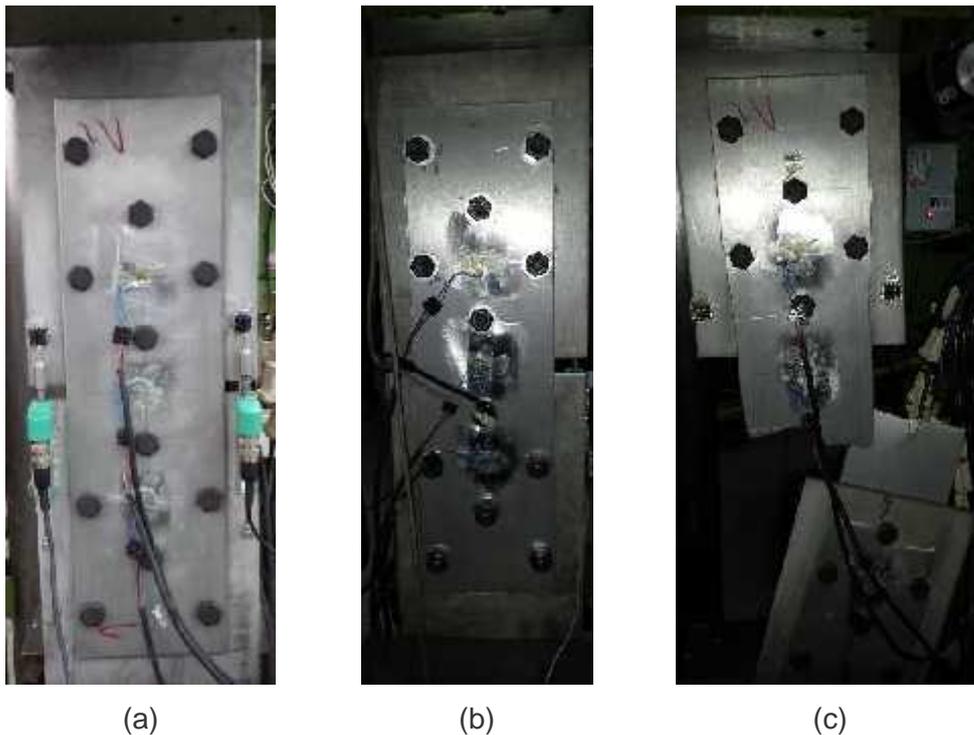


Figura 4.96 – Ensaio 31: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.

4.2.5.2 Ensaio E38_A_C_N_145_6_25

Esse ensaio teve o objetivo de identificar o limite da mudança da seção de ruptura e verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal, com laminação perpendicular à direção de aplicação da carga, em aço inoxidável austenítico, conforme disposição apresentada na Figura 4.97.

O ensaio E37_A_PP_N_145_6_20 com valor do parâmetro $s = 20$ mm apresentou ruptura na seção líquida passando por três furos.

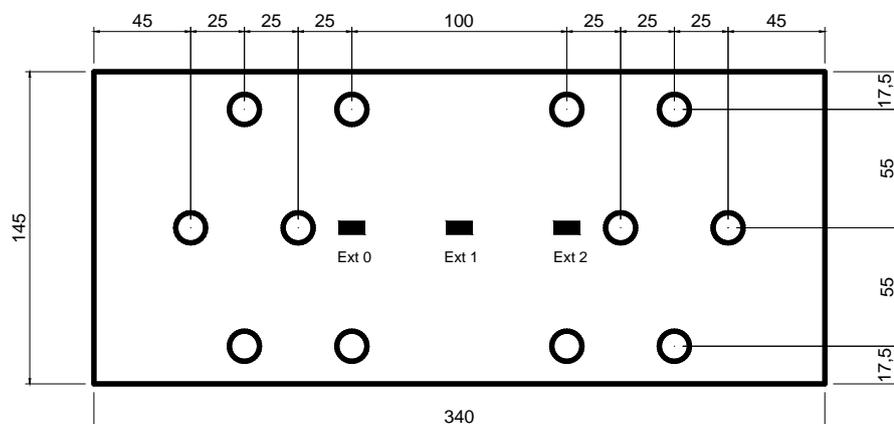


Figura 4.97 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

A montagem do ensaio pode ser vista nas Figura 4.98. O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme a Figura 4.99. Esse comportamento indica que o valor limite para mudança da seção de ruptura se situa entre 20 e 25 mm.

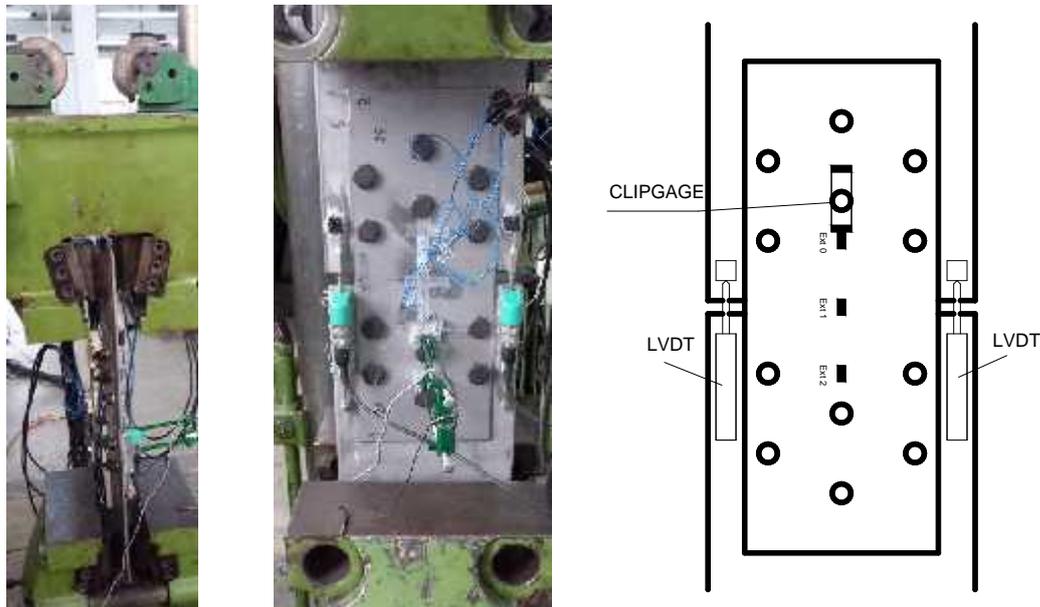


Figura 4.98 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgauge.

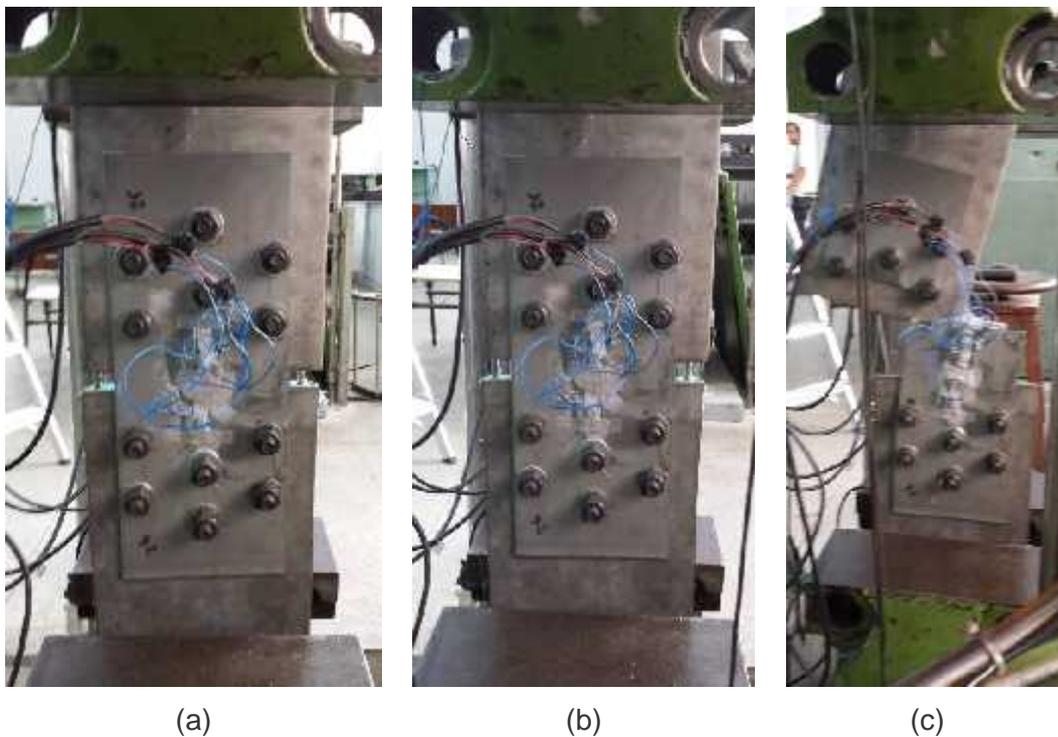


Figura 4.99 – Ensaio 38: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.2.5.3 Ensaio E39_A_C_I_145_8_25

Com o objetivo de determinar o valor limite para o parâmetro s para a mudança de seção de ruptura e verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida com laminação perpendicular a direção da aplicação de carga em aço inoxidável austenítico com parafusos alternados foi executado o ensaio com o posicionamento adotado mostrado na Figura 4.100.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 8 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono.

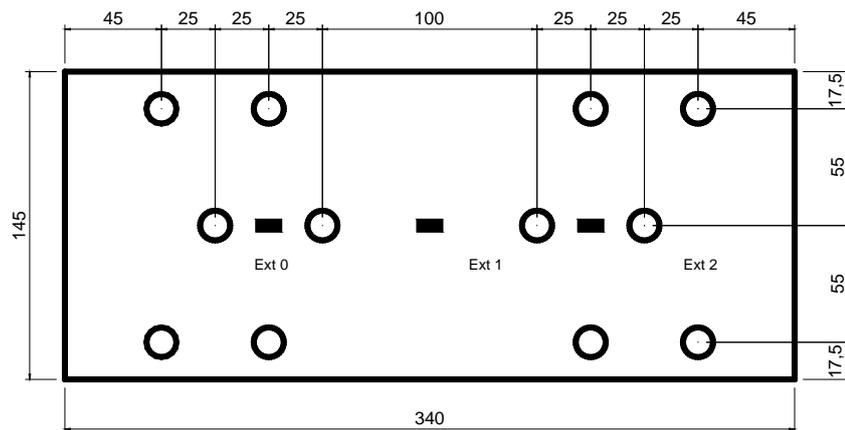


Figura 4.100 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme a Figura 4.102.

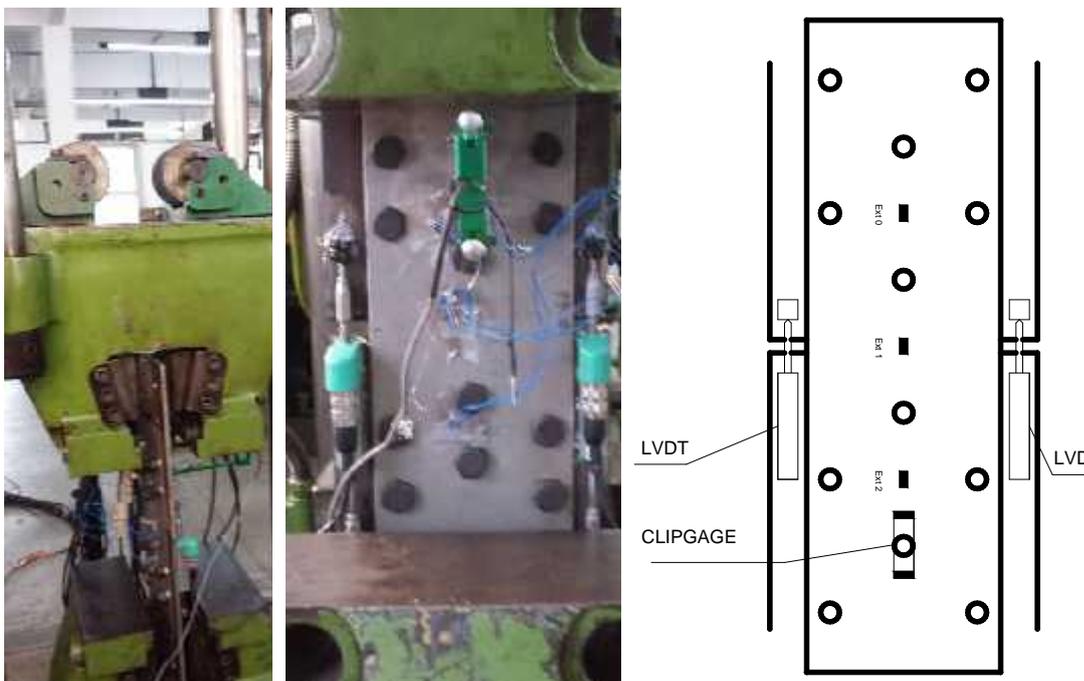


Figura 4.101 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgage.

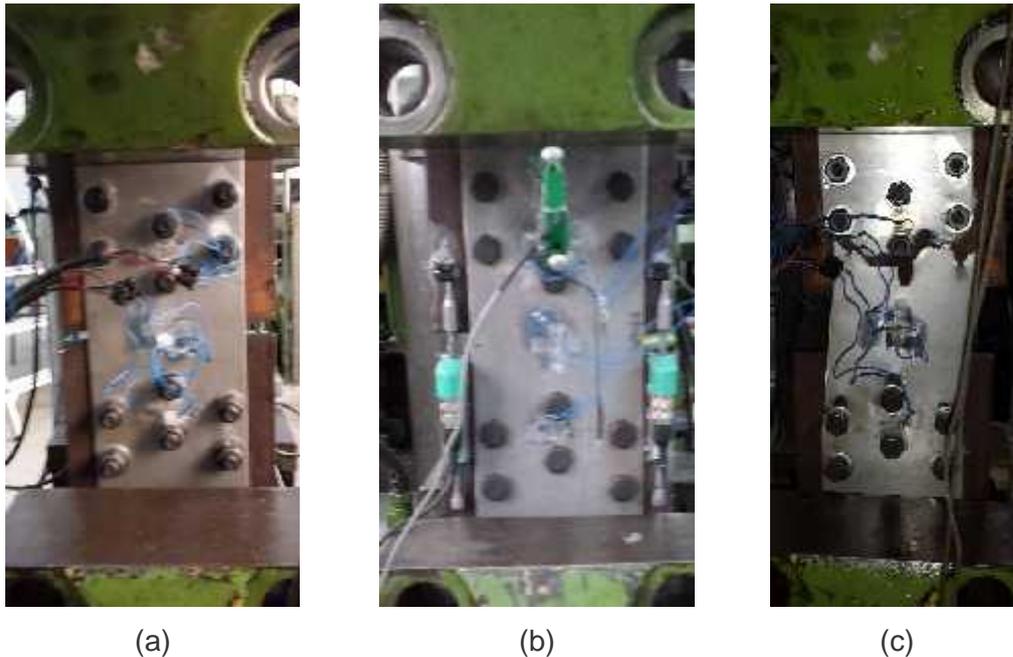


Figura 4.102 – Ensaio 39: (a) antes do ensaio, (b) deformação específica limite, (c) na ruptura.

4.2.5.4 Resultado dos ensaios – Grupo IX (31, 38 e 39)

Os gráficos do comportamento mecânico desse conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.103 e na Figura 4.104.

Os ensaios apresentaram um deslocamento inicial devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos, e acomodação das garras da máquina de tração.

O gráfico carga *versus* deslocamento dos ensaios apresenta também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio.

Os gráficos carga *versus* deformação específica apresentaram na fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros, uma maior rigidez na seção entre os parafusos e menor rigidez na seção central da ligação.

Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga.

O clipgagem posicionado na terceira seção passando por um parafuso do ensaio E39_A_PP_I_145_8_25, apresentou um comportamento inicial similar ao da segunda seção de dois parafusos, e no final tende ser similar ao comportamento da seção no centro da ligação.

O clipgagem posicionado na segunda seção de um parafuso no ensaio E38_A_PP_N_145_6_25 apresentou um comportamento inicial similar ao do

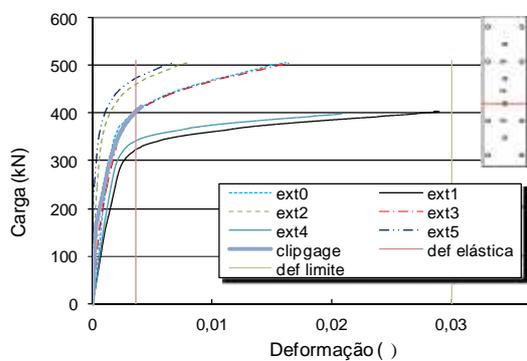
centro da ligação, e no final tende ao comportamento da primeira seção passando por dois parafusos.

O clipgagem posicionado na terceira seção de um parafuso nos ensaios E31_A_PL_I_145_6_55 e E39_A_PP_I_145_8_25 apresentou a mesma concentração de tensão, porém, devido aos diferentes modos de ruptura essa seção se comportou diferentemente após a fase elástica. O resultado desse grupo de ensaios está resumido na Tabela 4.9.

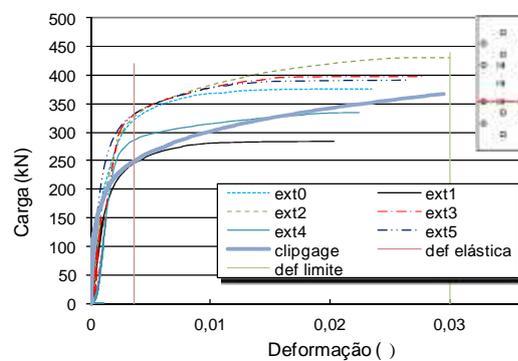
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo IX

Ensaio	Carga última (kN)	inicial (mm)	final (mm)		Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)	
			total	chapas	P	C	P	C
E31_A_PL_I_145_6_55	509,6	2,0	100,0	38,0	430	315	–	410
E38A_PP_N_145_6_25	442,3	30,1	40,4	20,5	330	220	400	350
E39_A_PP_I_145_8_25	472,9	7,2	46,7	19,8	450	325	–	380

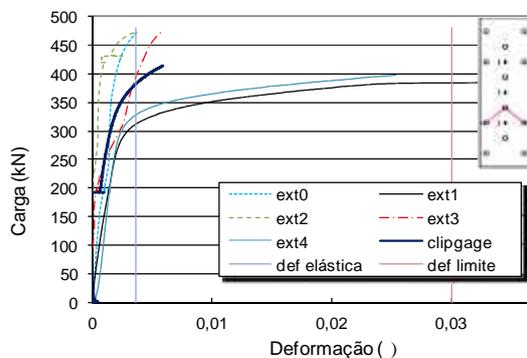
P seção entre dois parafusos
C seção do centro da ligação



Ensaio 31_A_PL_I_145_6_55

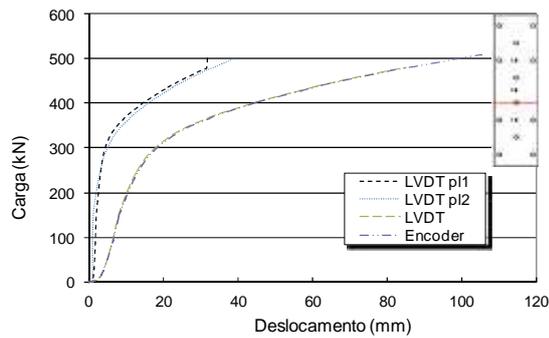


Ensaio 38_A_C_N_145_6_25

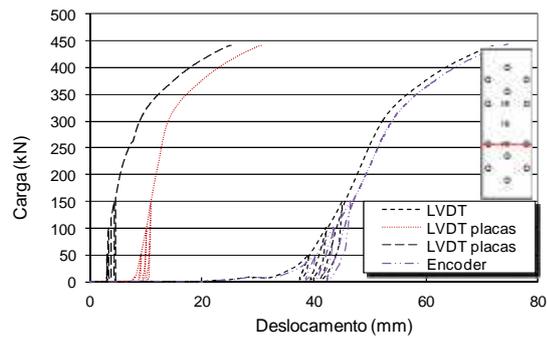


Ensaio 39_A_C_I_145_8_25

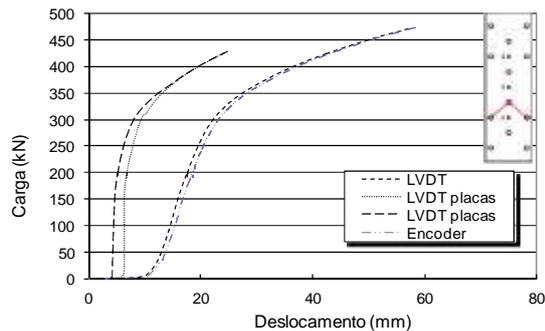
Figura 4.103 – Gráficos carga versus deformação específica – Grupo IX.



Ensaio 31_A_PL_I_145_6_55



Ensaio 38_A_C_N_145_6_25



Ensaio 39_A_C_I_145_8_25

Figura 4.104 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo IX.

4.3 Ensaios de ligações em aço inoxidável duplex

4.3.1 Influência do parâmetro s e L

Com o objetivo de se determinar o valor do parâmetro s limite na mudança da seção de ruptura da seção líquida no aço inoxidável duplex, foram realizados quatro ensaios com valores do parâmetro s igual a 24, 27, 28 e 30 mm, e larguras de chapas de 107 mm e 145 mm.

4.3.1.1 Ensaio E46_D_PL_N_145_8_27

Para se verificar o comportamento mecânico e determinar o limite do parâmetro s para mudança de ruína da configuração aparafusada normal na direção paralela à laminação em aço inoxidável duplex, foi executado o ensaio mostrado na Figura 4.105.

Esse ensaio adotou uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 8 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono, e instrumentos mostrados na Figura 4.106.

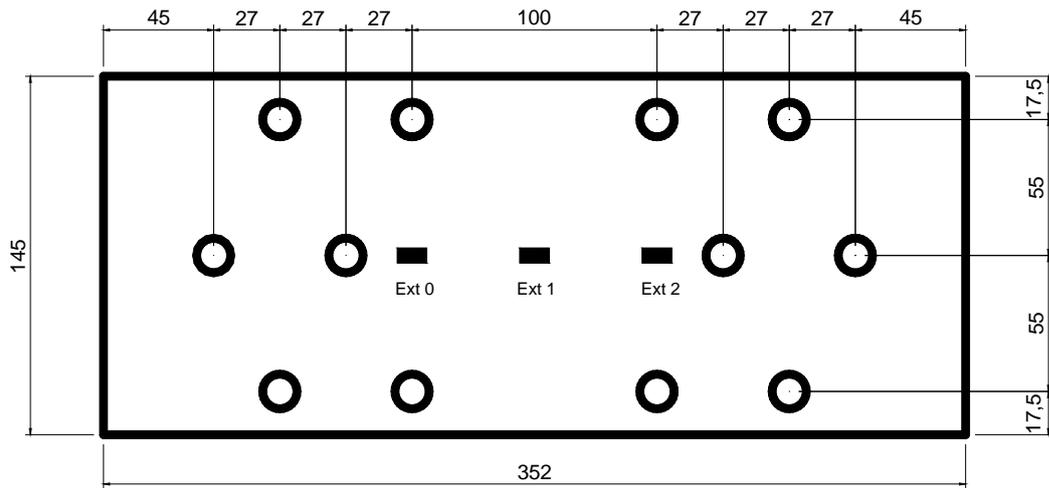


Figura 4.105 – Geometria e detalhe do posicionamento dos extensômetros.

O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por três furos, como mostrado em detalhe na Figura 4.107

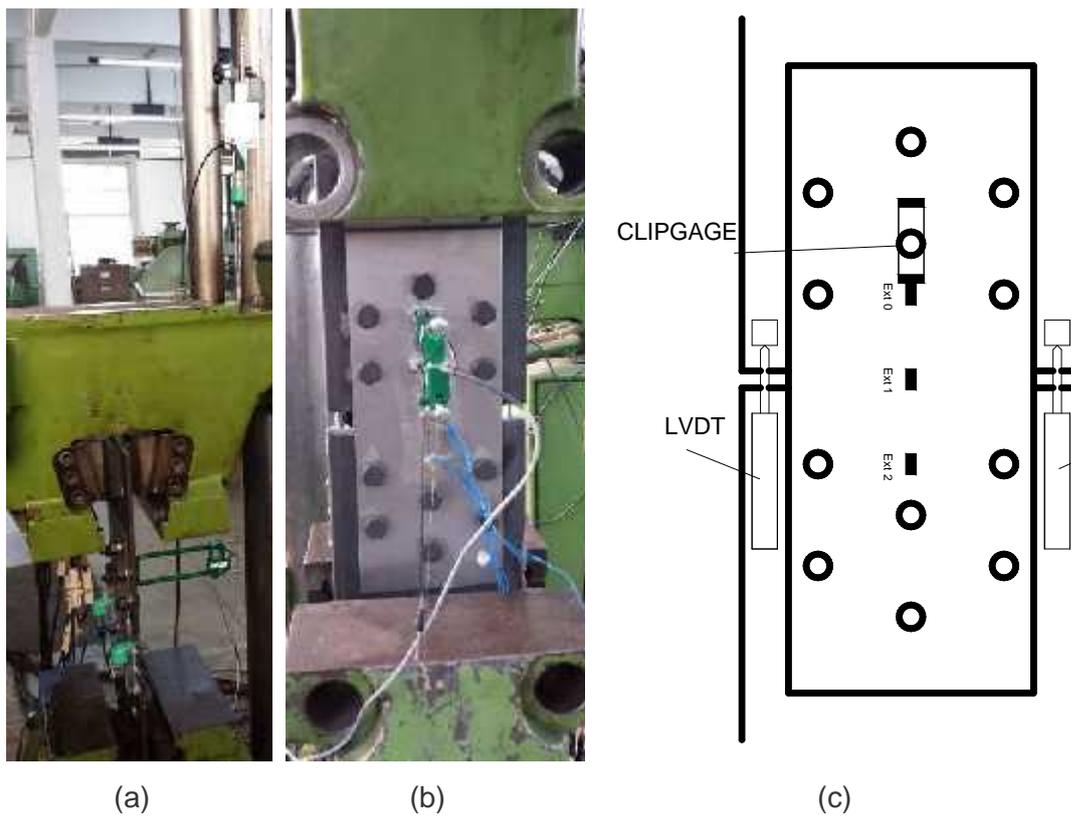


Figura 4.106 – (a) chapa interna e posicionamento, (b) clipgauge, (c) LVDT.

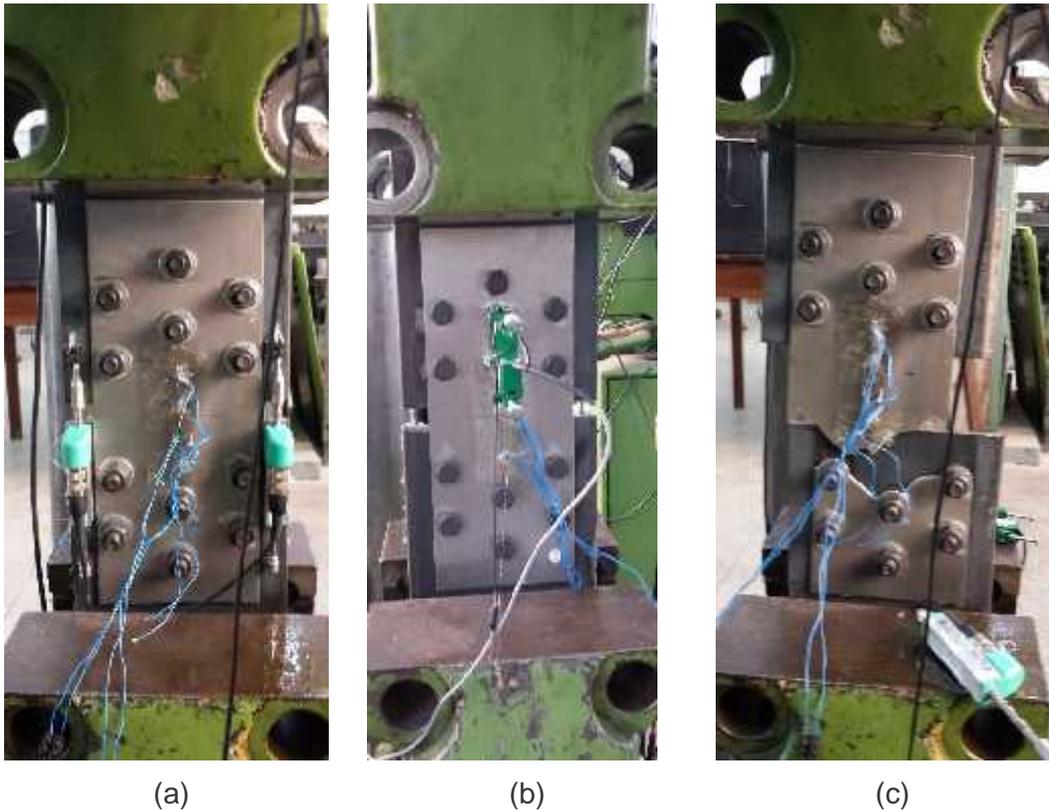


Figura 4.107 – Ensaio 46: (a) antes, (b) deformação específica limite, (c) após a ruptura.

4.3.1.2 Ensaio E47_D_PL_N_145_8_30

Esse ensaio visou determinar do valor do parâmetro s limite, e verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal na direção paralela à laminação em aço inoxidável duplex com parafusos alternados. A configuração do ensaio é mostrada na Figura 4.108

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 8 mm de espessura e 200 mm de largura.

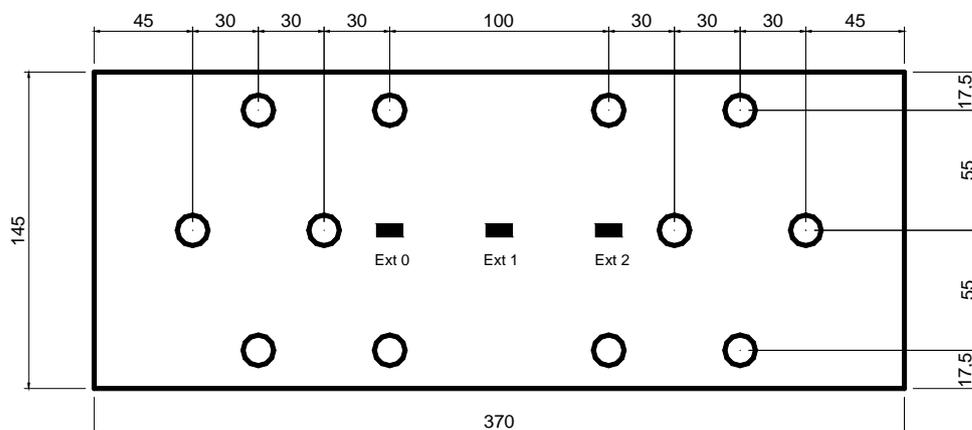


Figura 4.108 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

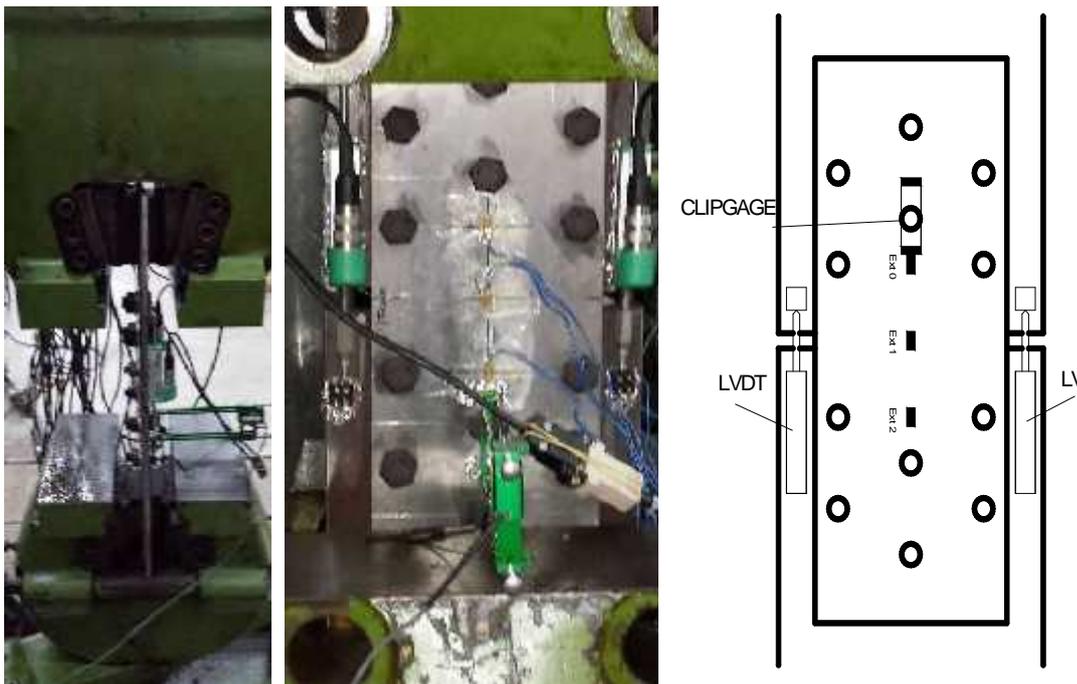


Figura 4.109 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgauge.

O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme mostrado na Figura 4.110.

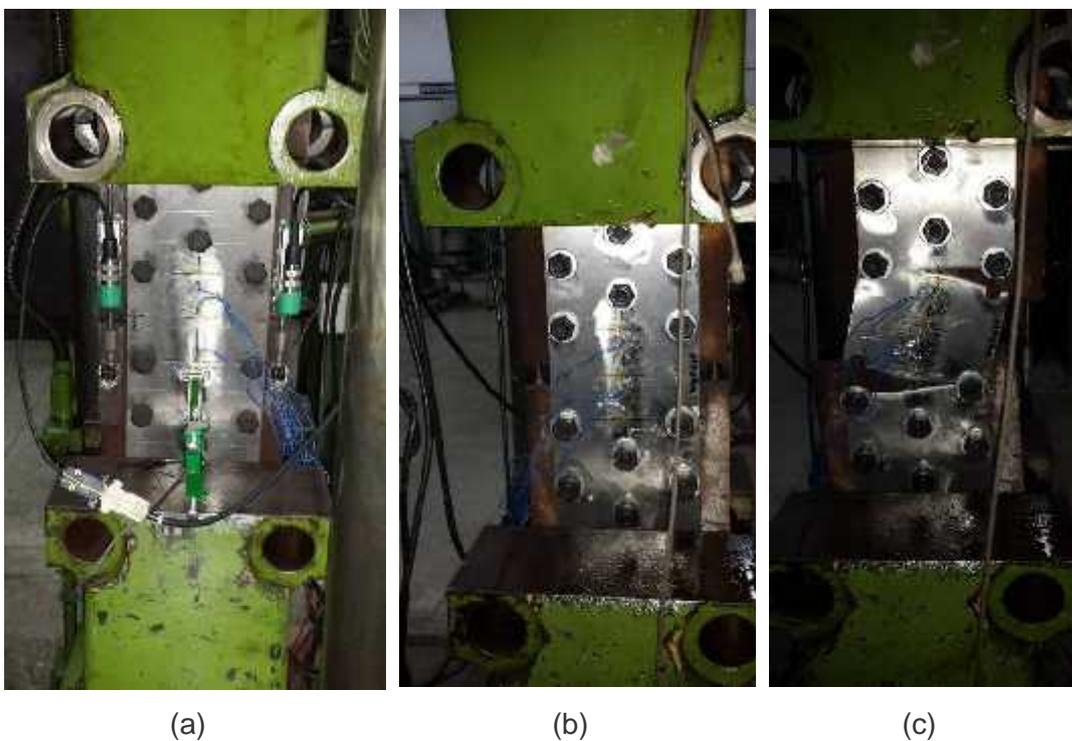


Figura 4.110 – Ensaio 47: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.

4.3.1.3 Ensaio E48_D_PL_N_107_6_24

Para se determinar o limite para mudança do modo de ruína e verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com laminação paralela na direção da aplicação da carga em aço inoxidável duplex, foi executado o ensaio mostrado na Figura 4.111.

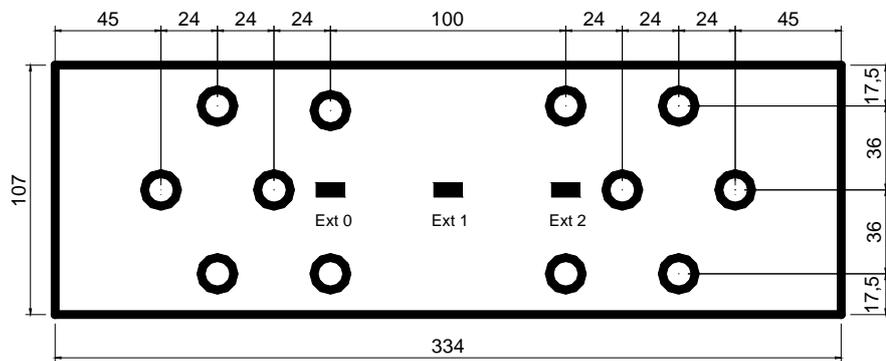


Figura 4.111 – Posicionamento dos extensômetros.

Nesse ensaio foram colocados dois transdutores de deslocamento para medir o deslocamento entre as chapas, e um clipgagem na segunda seção passando por um furo, conforme mostrado na Figura 4.112.

O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por três furos, como mostrado em detalhe na Figura 4.113

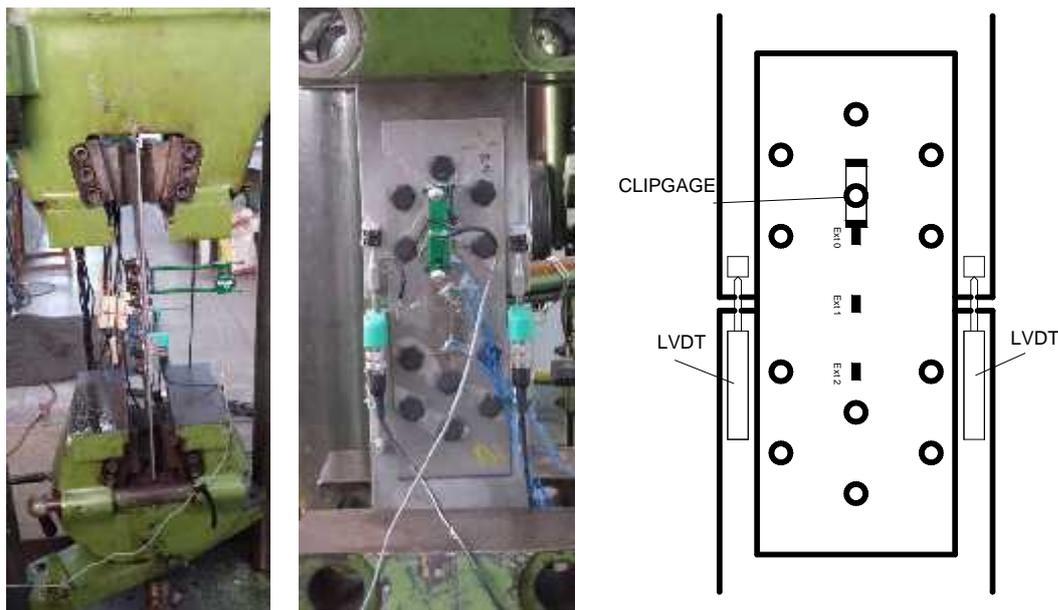


Figura 4.112 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

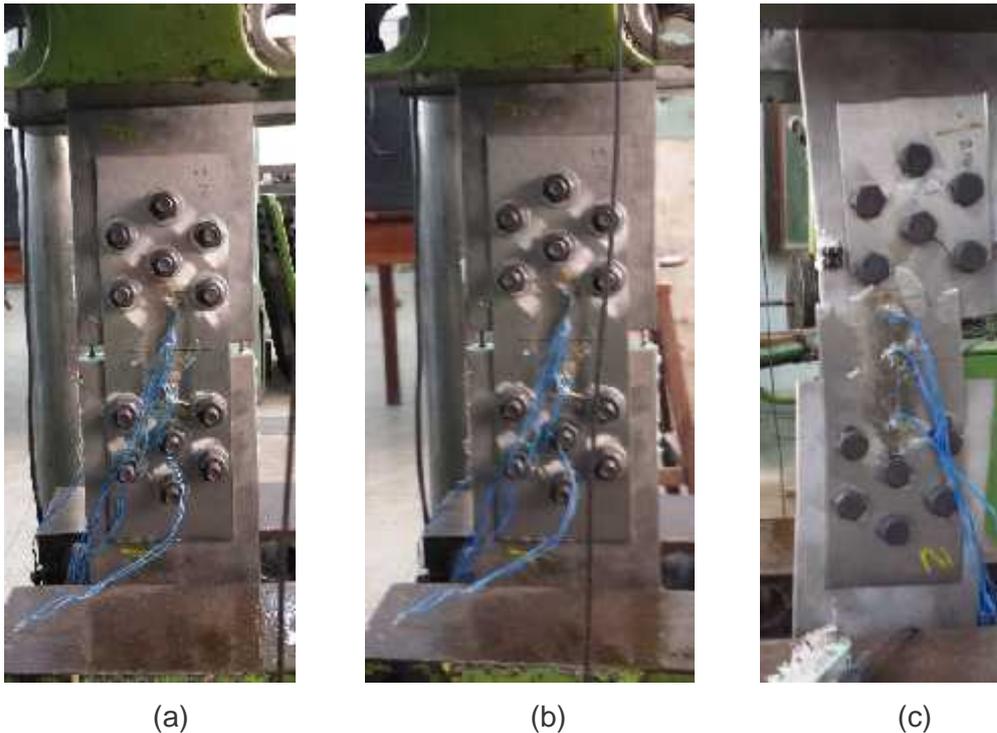


Figura 4.113 – Ensaio 48: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.

4.3.1.4 Ensaio E49_D_PL_N_107_8_28

Esse ensaio teve o objetivo de determinar o valor limite do parâmetro s para a mudança do modo de ruptura, e o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com laminação na direção paralela à aplicação de carga em aço inoxidável duplex.

O ensaio adotou uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 8 mm de espessura e 150 mm de largura em aço carbono, e sua configuração geométrica é mostrada na Figura 4.114.

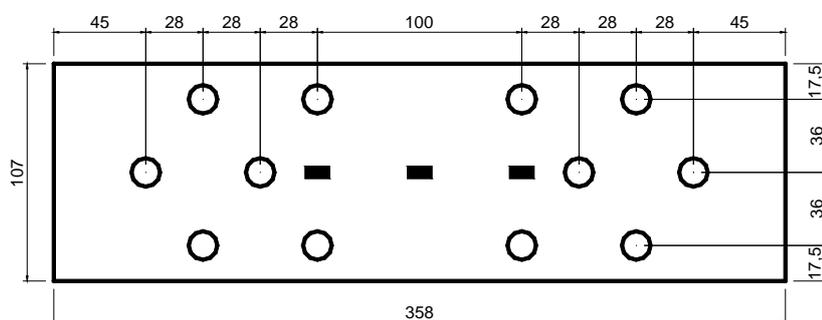


Figura 4.114 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

O ensaio teve dois transdutores de deslocamento posicionados, um de cada lado do ensaio, para medir o deslocamento entre chapas e um clipage

colocado na primeira seção passando por um furo, como mostrado na Figura 4.115.

O ensaio apresentou ruptura na seção líquida passando por dois furos, apresentado em detalhe na Figura 4.116.

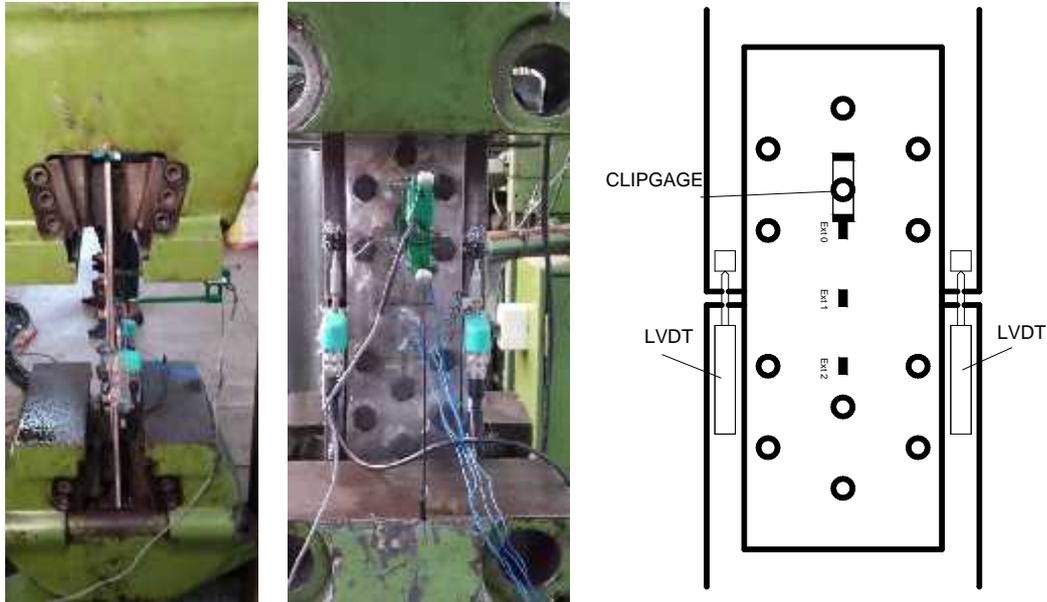


Figura 4.115 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgauge.

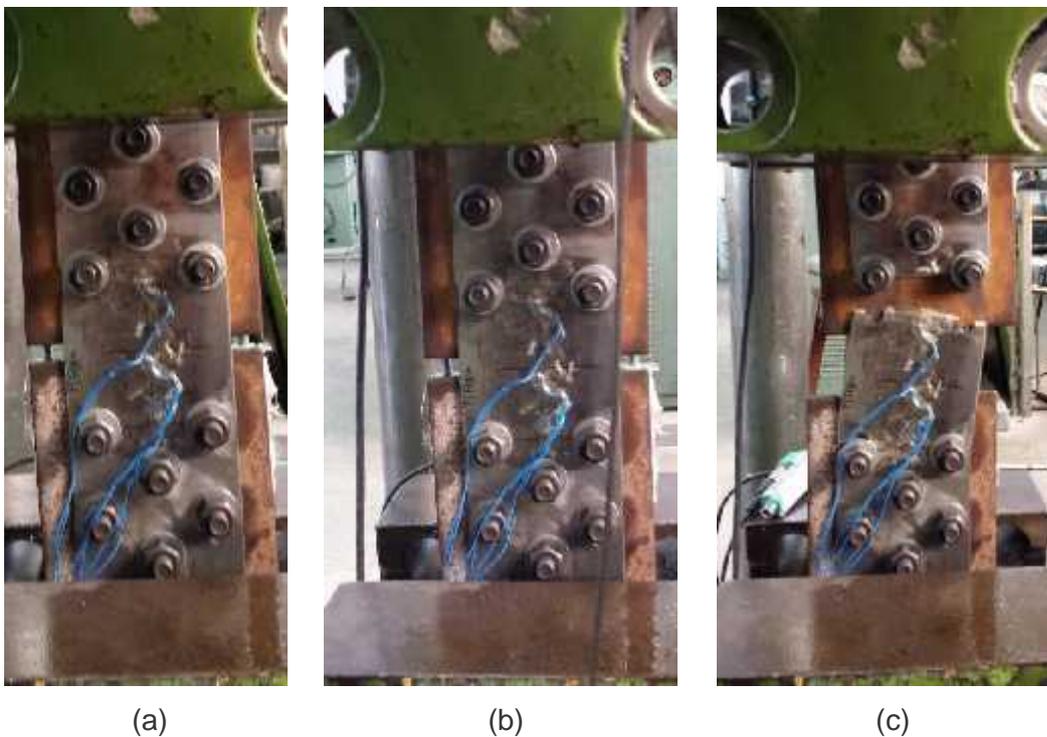


Figura 4.116 – Ensaio 49: (a) antes do ensaio, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.

4.3.1.5 Resultados dos ensaios 46 a 49 – Grupo X

Os gráficos do comportamento mecânico desse conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.117 e na Figura 4.118. Os resultados dessa série estão resumidos na Tabela 4.10.

Os ensaios apresentaram deslocamento inicial devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos, e acomodação das garras da máquina de tração.

O gráfico carga *versus* deslocamento de todos os ensaios apresentam também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio.

Os ensaios 46 e 47 com placa com largura de 145 mm apresentaram gráficos carga *versus* deformação específica, na fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros, uma maior rigidez na seção entre os parafusos e menor rigidez na seção central da ligação.

Os ensaios E48_D_PL_N_107_6_24 e E49_D_PL_N_107_8_28 com placa com largura de 107 mm apresentaram gráficos carga *versus* deformação específica, na fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros, uma menor rigidez na seção entre os parafusos e maior rigidez na seção central da ligação.

Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga. Perto do final dos ensaios as leituras apresentaram um comportamento equilibrado nas seções dos parafusos, como pode ser observado nos gráficos carga *versus* deformação específica.

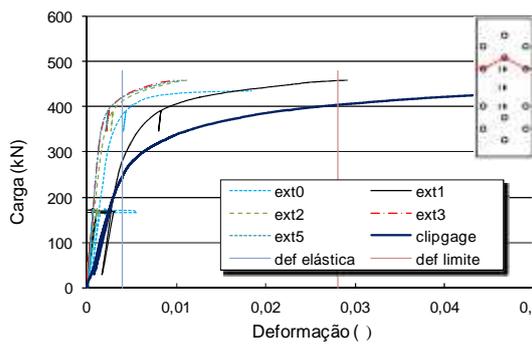
Nos ensaios E46_D_PL_N_145_8_27 e E47_D_PL_N_145_8_30 os clipgages fixados na primeira seção passando por um parafuso apresentaram um comportamento menos rígido inicialmente, porém, ao fim do ensaio apresentaram um comportamento similar ao do centro da ligação.

Nos ensaios E48_D_PL_N_107_6_24 e E49_D_PL_N_107_8_28 os clipgages fixados na primeira seção passando por um parafuso, apresentaram um comportamento menos rígido inicialmente, porém, ao fim do ensaio apresentaram um comportamento similar ao da primeira seção passando por dois parafusos.

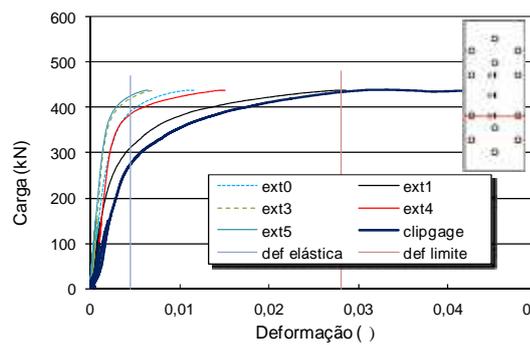
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo X

Ensaio	Carga última (kN)	i _{inicial} (mm)	final (mm)		Carga no limite elástico (kN)			Carga na deformação limite (kN)		
			total	Pl.	P2	C	P1	P2	C	P1
E46D_PL_N_145_8_27	457,7	20,0	50,7	17,7	410	280	250	450	400	-
E47D_PL_N_145_8_30	439,6	8,0	22,3	10,0	410	310	280	440	420	-
E48D_PL_N_107_6_24	327,3	4,0	37,7	11,0	280	325	160	-	-	270
E49D_PL_N_107_8_28	327,0	5,0	22,3	9,0	280	310	205	-	-	315

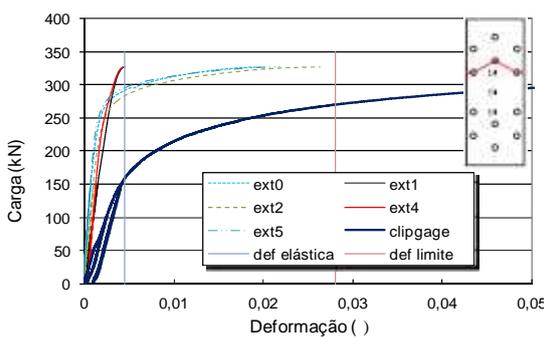
P2 seção entre dois parafusos
P1 seção de um parafusos
C seção do centro da ligação



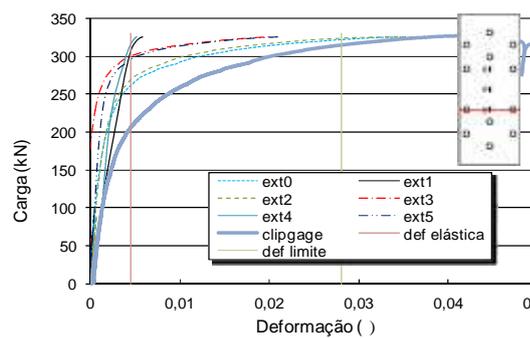
Ensaio 46_D_PL_N_145_8_27



Ensaio 47_D_PL_N_145_8_30



Ensaio 48_D_PL_N_107_6_24



Ensaio 49_D_PL_N_107_8_28

Figura 4.117 – Gráficos carga versus deformação específica – Grupo X.

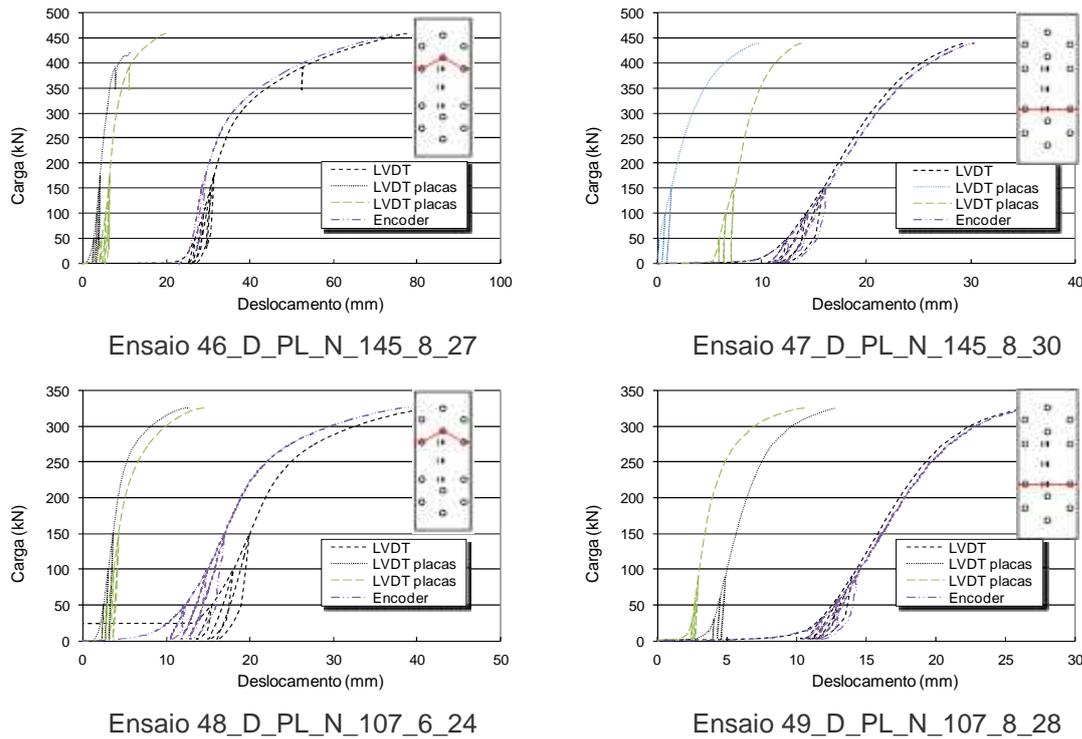


Figura 4.118 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo X.

4.3.2 Influência da configuração geométrica da ligação e da direção da laminação da chapa

Com o objetivo de se determinar o valor do parâmetro s limite na mudança da seção de ruptura da seção líquida no aço inoxidável duplex, foram realizados quatro ensaios com laminação perpendicular a direção da aplicação de carga e configuração invertida ou do tipo B: ensaios 50 a 53.

Esses ensaios tiveram o objetivo de determinar o comportamento mecânico da estrutura aparafusada, e determinar a distância limite do parâmetro s para a mudança da seção de ruptura.

4.3.2.1 Ensaio E50_D_PP_I_145_8_40

O comportamento mecânico e o valor do parâmetro s limite da configuração aparafusada invertida com laminação perpendicular à aplicação da carga em aço inoxidável duplex com parafusos alternados, foi verificada, por meio do ensaio mostrado na Figura 4.119.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga com características geométricas de 8 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono.

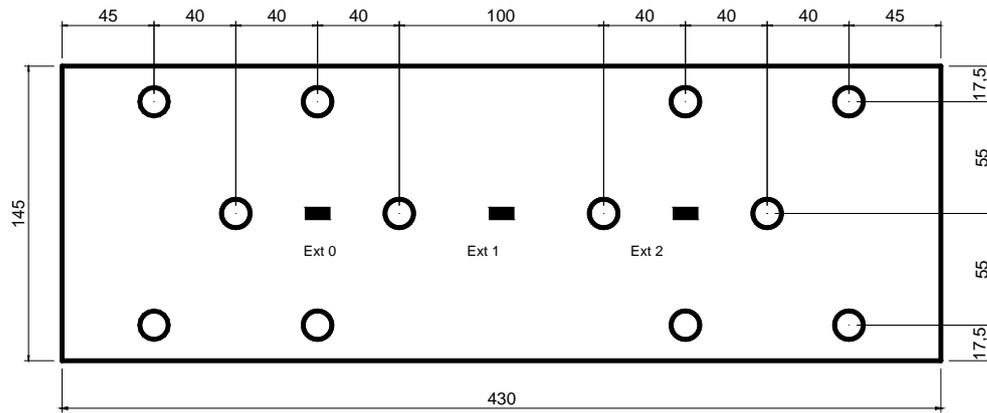


Figura 4.119 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

Nesse ensaio foram posicionados dois transdutores de deslocamento e um clipgace conforme mostrado na Figura 4.120.

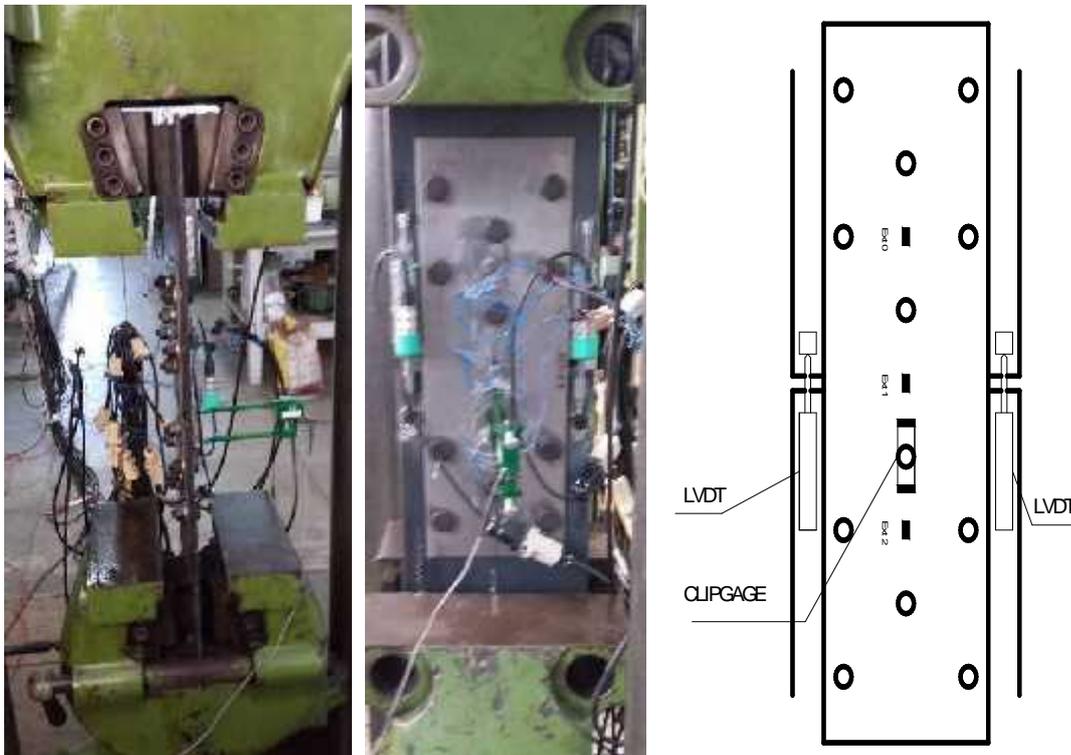


Figura 4.120 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgace.

O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme Figura 4.121.

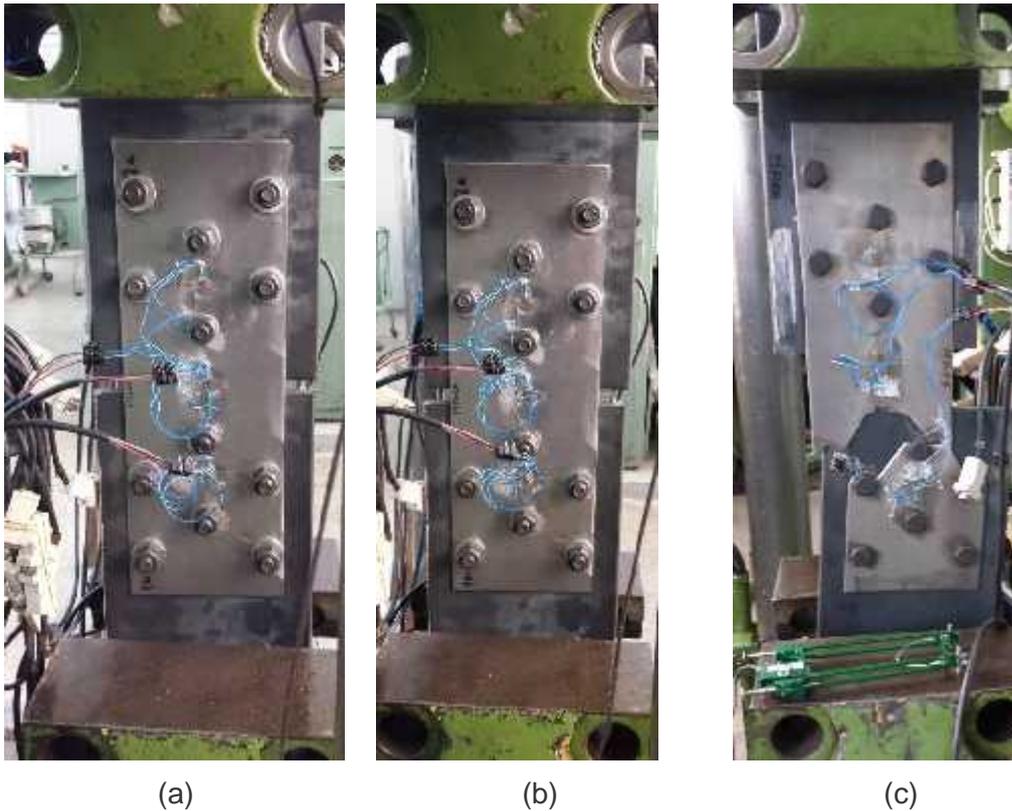


Figura 4.121 – Ensaio 50: (a) antes do ensaio, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.3.2.2 Ensaio E51_D_PP_I_145_8_50

Esse ensaio também teve o objetivo de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida, com laminação na direção perpendicular à aplicação de carga em aço inoxidável, buscando o valor limite do parâmetro s para a mudança do modo de ruptura.

Esse ensaio adotou uma placa de aplicação de carga de 8 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono. A geometria do ensaio é mostrada na Figura 4.122.

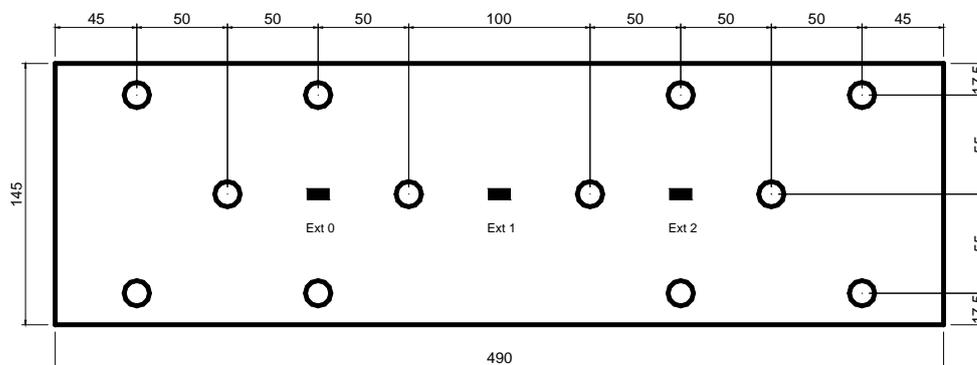


Figura 4.122 – Posicionamento dos extensômetros.

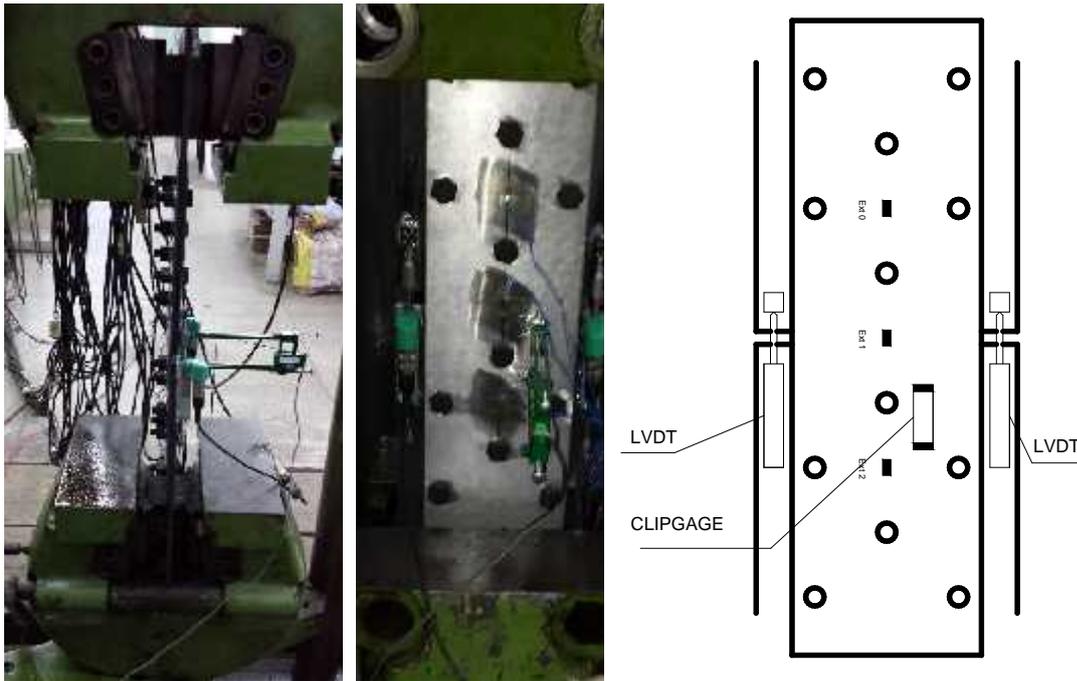


Figura 4.123 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgauge.

O ensaio apresentou uma ruptura na área líquida passando por dois furos na placa interna de aplicação da carga, como mostrado na Figura 4.124. Esse modo de ruína ocorreu devido ao uso de chapas em aço carbono de menor resistência, retiradas de um lote diferente do anteriormente utilizado.

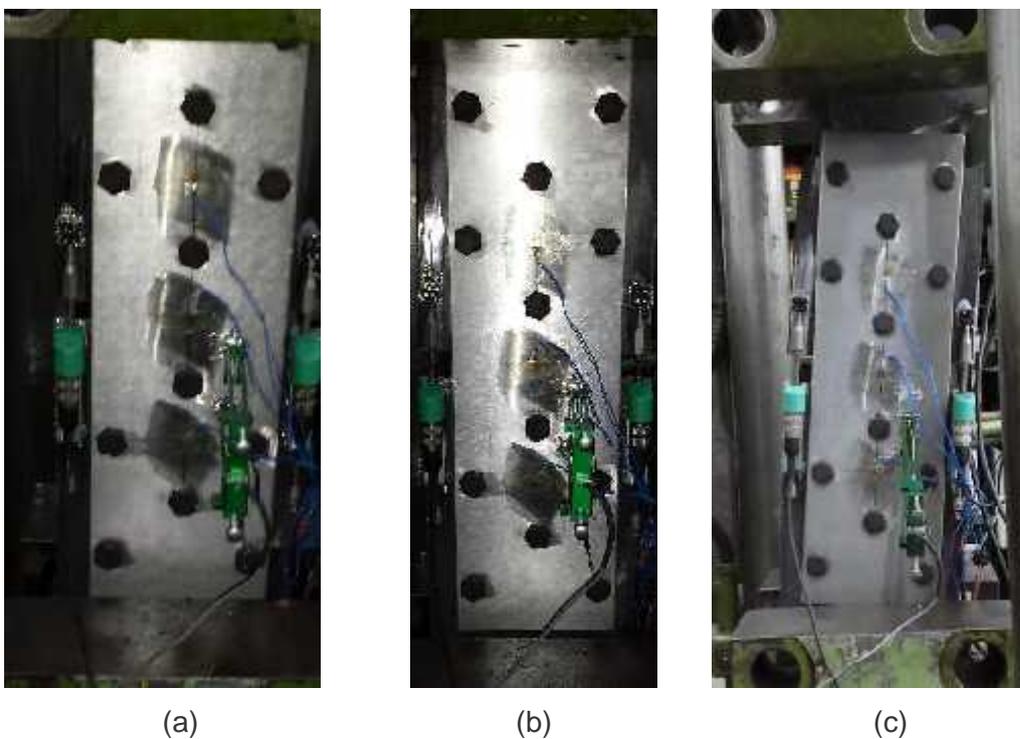


Figura 4.124 – Ensaio 51: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura da placa interna.

4.3.2.3 Ensaio E52_D_PP_I_145_8_50

Esse ensaio semelhante ao ensaio E51_D_PP_I_145_8_50 teve o objetivo de determinar o valor limite para o parâmetro s e de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida com laminação na direção perpendicular a aplicação de carga em aço duplex.

Esse ensaio foi executado com uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 8 mm de espessura, e 200 mm de largura em aço carbono, Figura 4.125.

O ensaio E51_D_PP_I_145_8_50, semelhante a esse, apresentou ruptura na placa de aplicação da carga, devido ao uso de uma chapa de menor resistência.

Nesse ensaio foram usados clipgagem e transdutores de deslocamento conforme mostrado na Figura 4.126. O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por três furos como mostrado na Figura 4.127

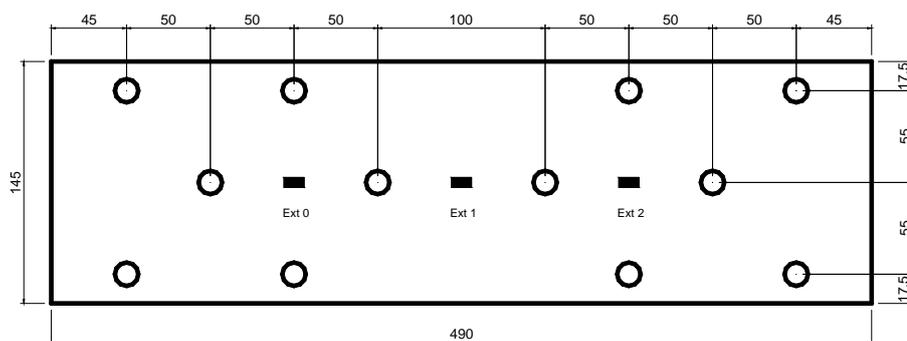


Figura 4.125 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

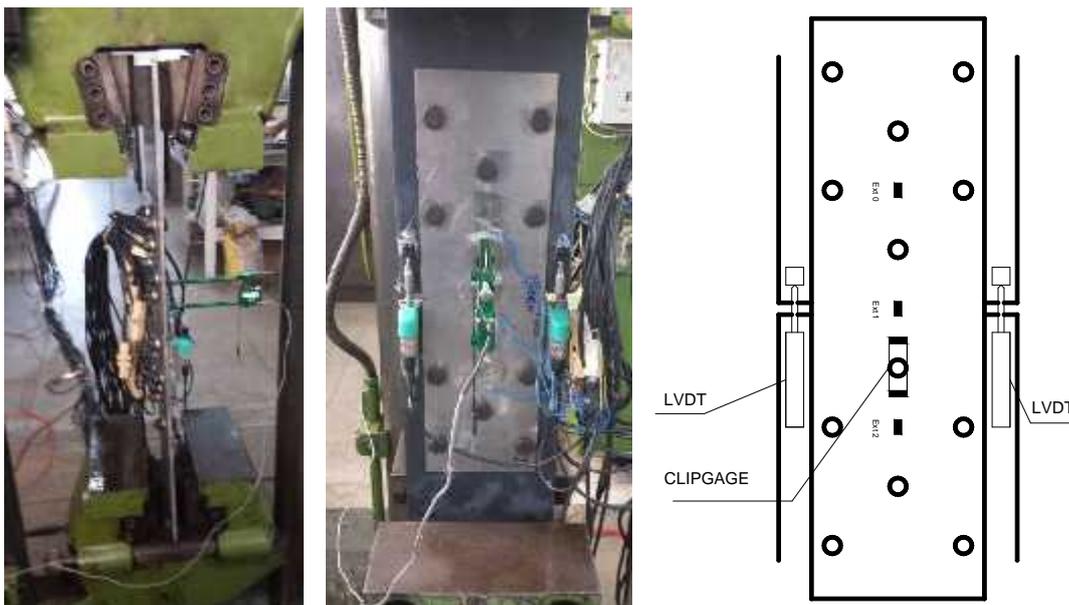


Figura 4.126 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

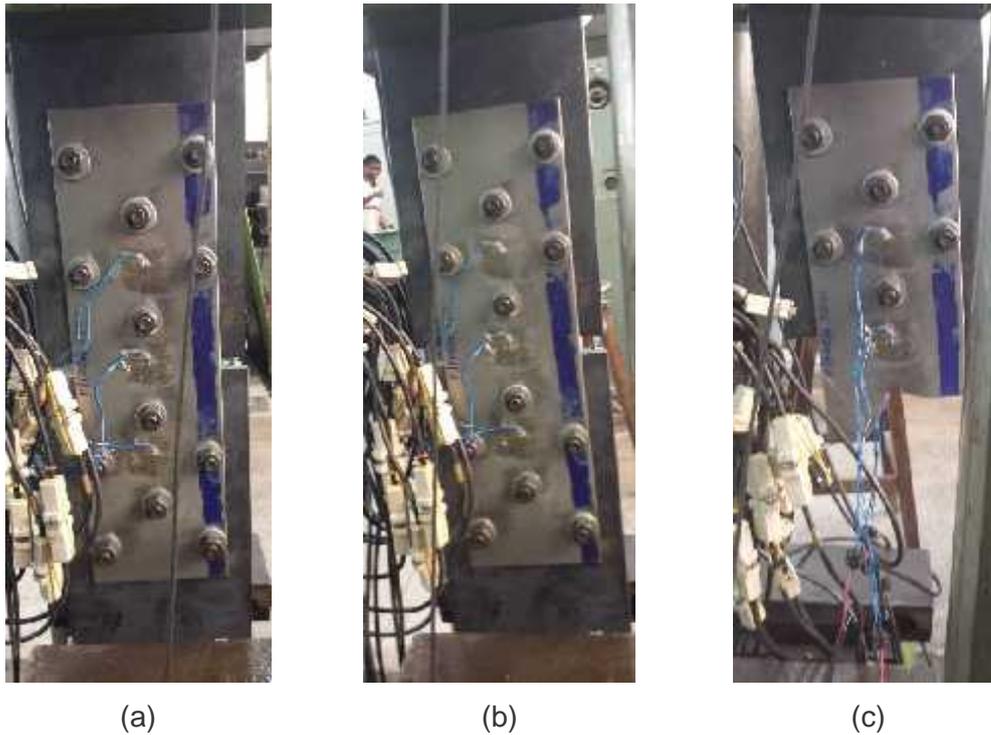


Figura 4.127 – Ensaio 52: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.

4.3.2.4 Ensaio E53_D_PP_I_145_8_60

O ensaio mostrado na Figura 4.128 teve o objetivo de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida na direção perpendicular a direção da laminação em aço inoxidável duplex.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga, com 8 mm de espessura, e 200 mm de largura em aço carbono.

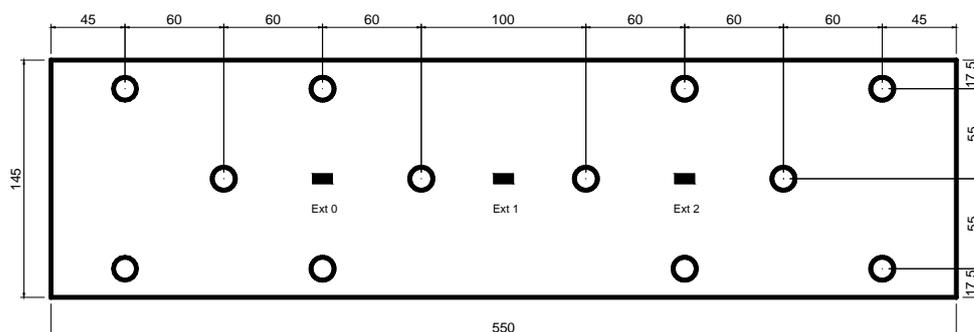


Figura 4.128 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por um furo, conforme Figura 4.129.

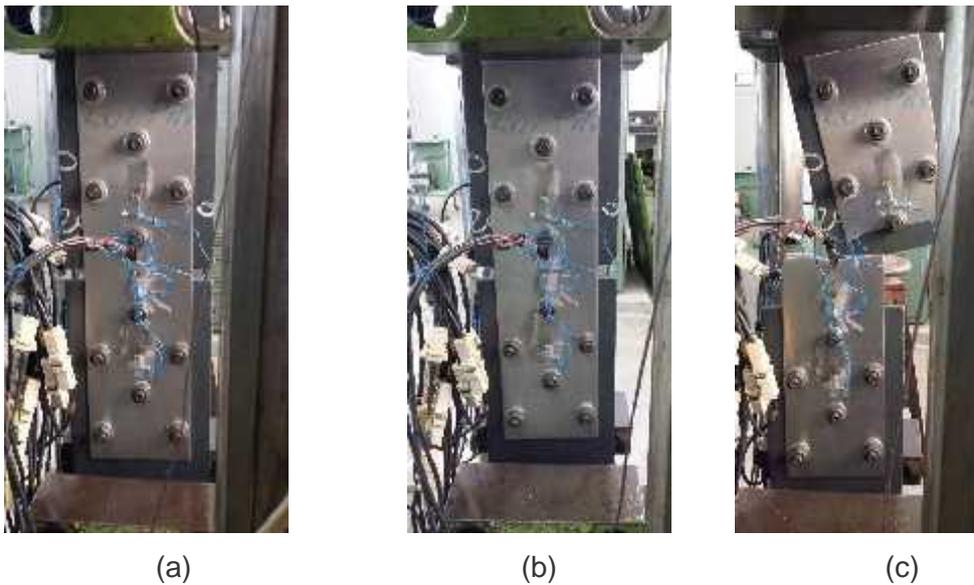


Figura 4.129 – Ensaio 53: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruína.

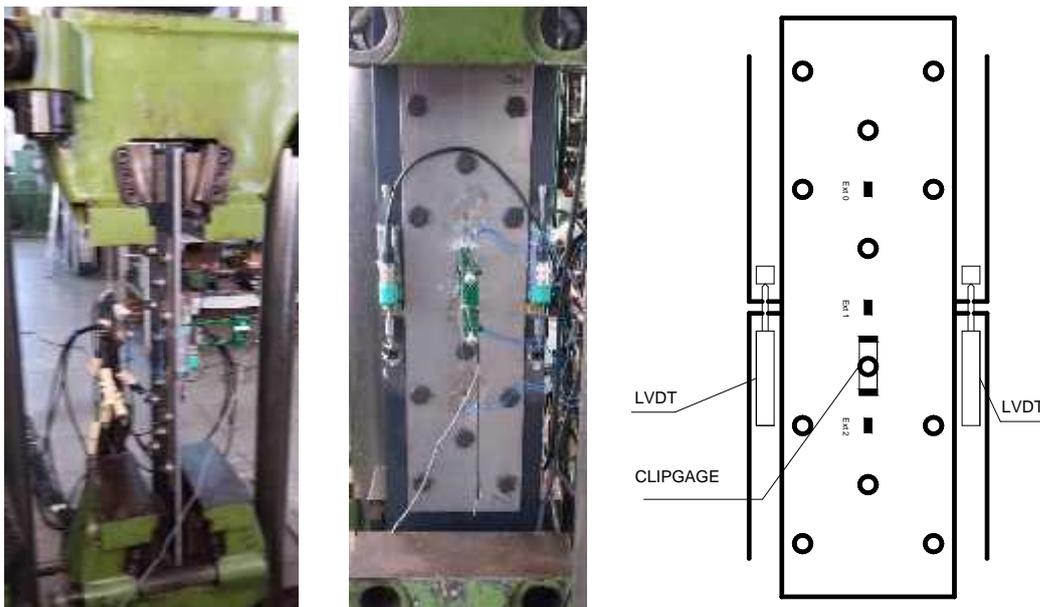


Figura 4.130 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

4.3.2.5 Resultados dos ensaios – Grupo XI (50 a 53)

Os gráficos do comportamento mecânico desse conjunto de ensaios são mostrados nas Figura 4.131 e Figura 4.132. Os ensaios apresentaram um deslocamento inicial devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos, e acomodação das garras da máquina de tração.

O gráfico carga *versus* deslocamento de todos os ensaios apresentam também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio.

Os ensaios apresentaram nos gráficos carga *versus* deformação específica, na fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros, uma maior rigidez na seção entre os parafusos, menor rigidez na seção central da ligação e menor ainda na primeira seção de um furo, onde foi fixado o clipgage, conforme Figura 4.126.

Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga.

Nos ensaios E50_D_PP_I_145_8_40, E51_D_PP_I_145_6_50 e E53_D_PP_I_145_8_60 os clipgages foram fixados em cima da primeira seção de um furo, e apresentaram um comportamento menos rígido inicialmente. Porém, no ensaio E51_D_PP_I_145_6_50 o clipgage foi posicionado paralelo à seção passando por um furo apresentou um comportamento mais rígido por suportar maior parcela de carregamento.

Esses ensaios mostraram que o valor do parâmetro s se situou entre 50 mm e 60 mm sendo esses os valores limites para a mudança da ruptura da ligação aparafusada invertida, ou do tipo B, com laminação perpendicular à direção da aplicação da carga

Um resumo dos resultados desse grupo de ensaios está presente na Tabela 4.11.

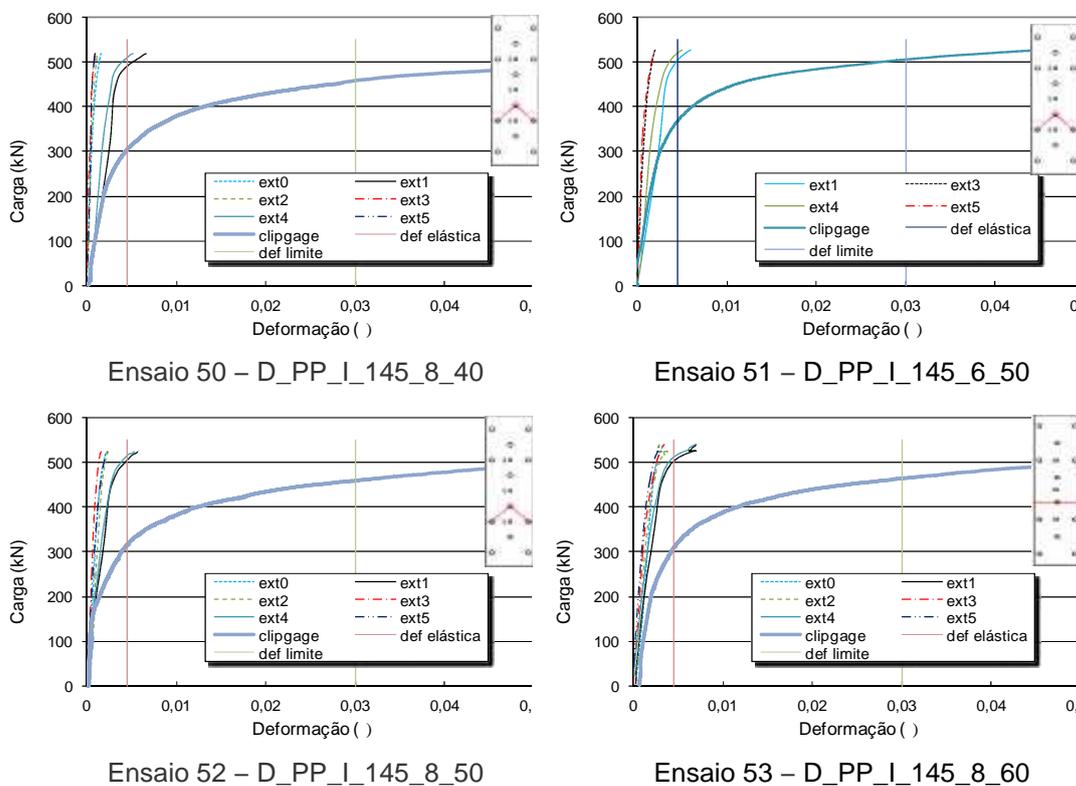
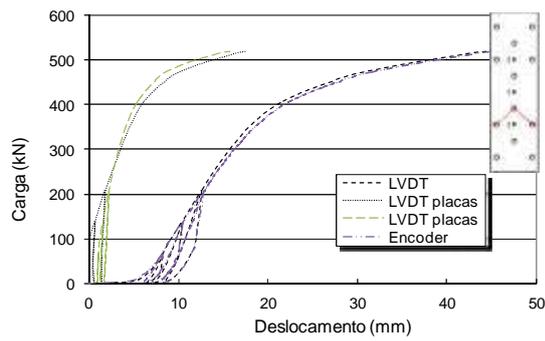
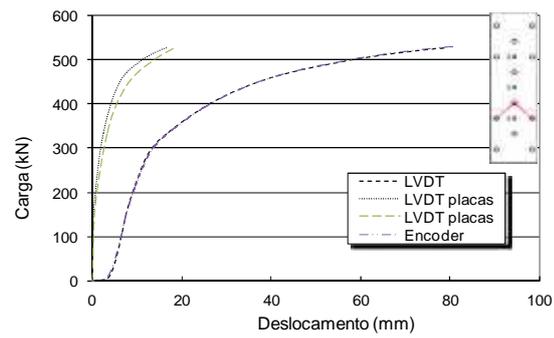


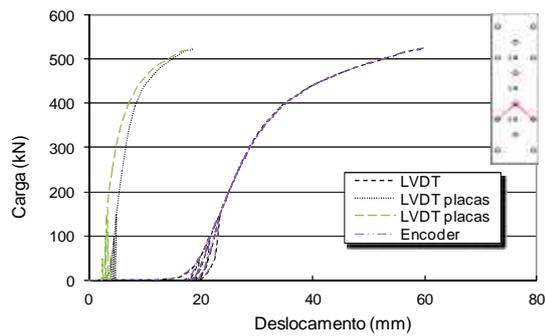
Figura 4.131 – Gráficos carga *versus* deformação específica – Grupo XI.



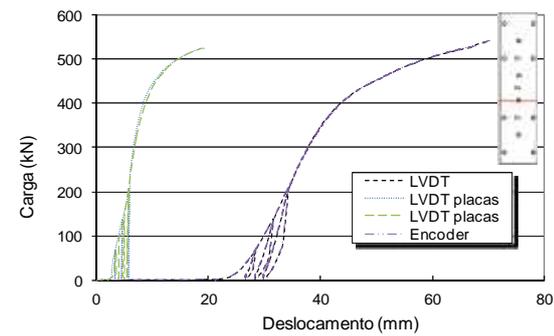
Ensaio 50 – D_PP_I_145_8_40



Ensaio 51 – D_PP_I_145_6_50



Ensaio 52 – D_PP_I_145_8_50



Ensaio 53 – D_PP_I_145_8_60

Figura 4.132 – Gráficos carga *versus* deslocamento – Grupo XI.

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo XI

Ensaio	Carga última (kN)	i _{inicial} (mm)	final (mm)		Carga no limite elástico (kN)		Carga na deformação limite (kN)
			total	placa	C	P	P
E50_D_PP_I_145_8_40	519,0	4,0	40,0	15,0	500	300	460
E51_D_PP_I_145_6_50	529,1	3,0	75,6	18,1	520	370	510
E52_D_PP_I_145_8_50	525,8	15,0	45,0	18,2	520	320	460
E53_D_PP_I_145_8_60	541,2	20,0	54,3	18,0	510	310	475

P seção de um parafuso
C seção do centro da ligação

4.4 Ensaios de ligações em aço inoxidável ferrítico

4.4.1 Influência dos parâmetros s e L

Com o objetivo de aferir o comportamento mecânico da estrutura aparafusada, e determinar o valor do parâmetro s limite na mudança do modo de ruptura no aço inoxidável ferrítico, foram realizados quatro ensaios com valores do parâmetro s variando de 24, 27, 28 e 30 mm e chapas com largura de 107 e 145 mm.

4.4.1.1 Ensaio E54_F_PL_N_145_6_27

A Figura 4.133 mostra a configuração geométrica desse ensaio que teve finalidade de determinar o valor do parâmetro s limite na mudança do modo de ruptura, e de aferir o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal na direção paralela da laminação em aço inoxidável ferrítico.

O ensaio adotou uma placa de aplicação de carga, com características geométricas de 6 mm de espessura e 200 mm de largura em aço carbono.

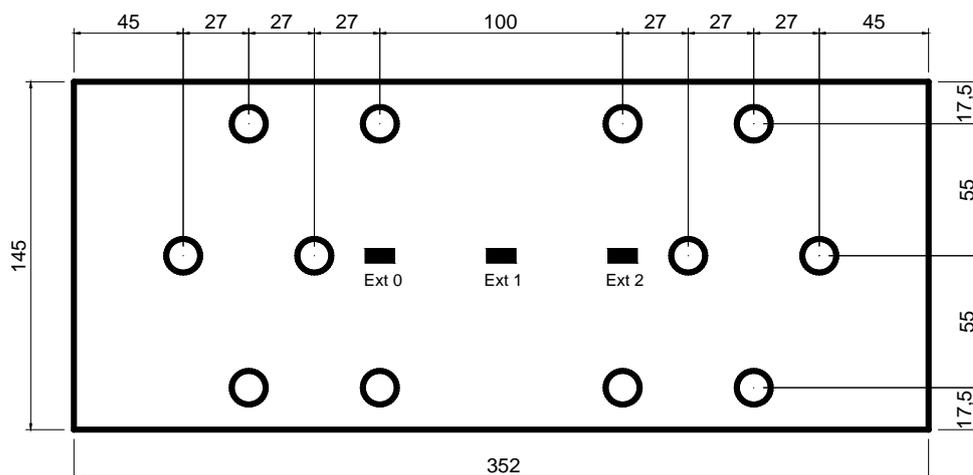


Figura 4.133 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

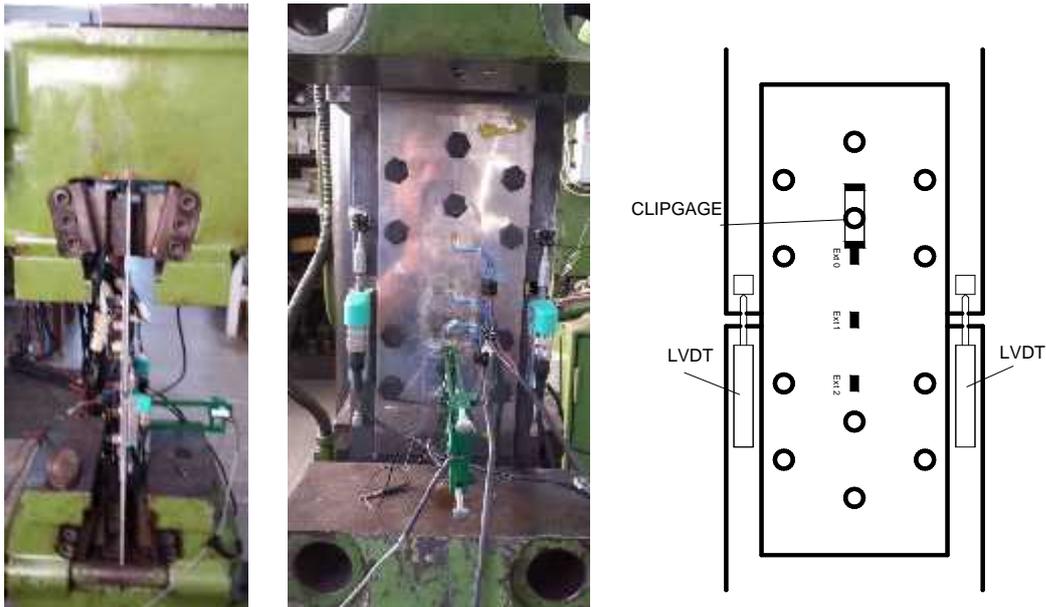


Figura 4.134 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgauge.

O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por três furos, como mostrado na Figura 4.135

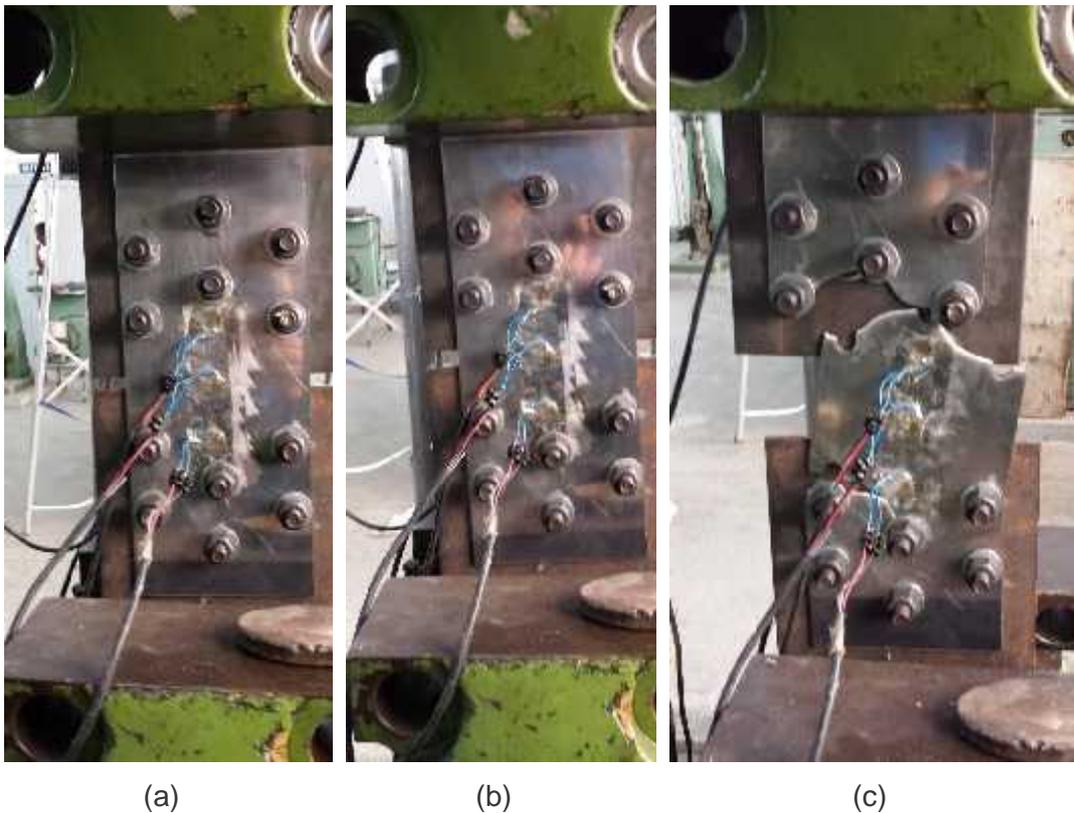


Figura 4.135 – Ensaio 54: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.

4.4.1.2 Ensaio E55_F_PL_N_145_6_30

O ensaio confeccionado conforme Figura 4.136, teve o objetivo de verificar o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com laminação na direção paralela da aplicação de carga em aço inoxidável ferrítico.

Esse ensaio teve uma placa de aplicação de carga com 6 mm de espessura e 200 mm de largura.

O ensaio apresentou o modo de ruína com ruptura na seção líquida passando por dois furos, conforme Figura 4.138.

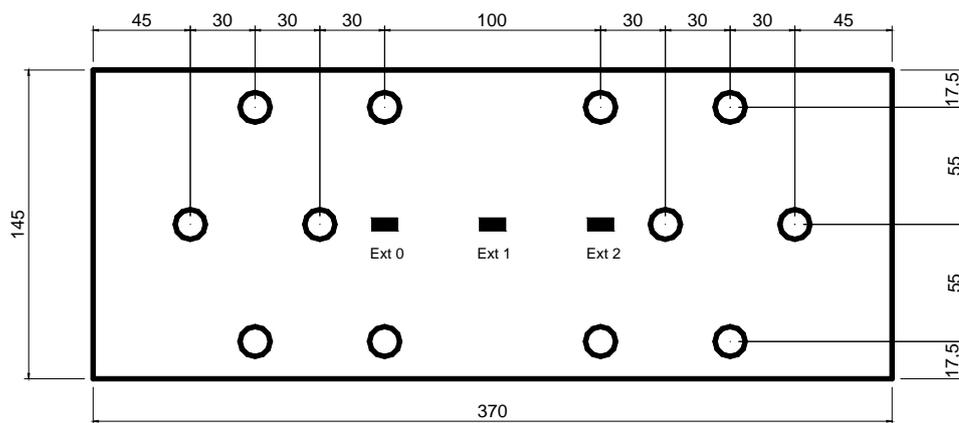


Figura 4.136 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

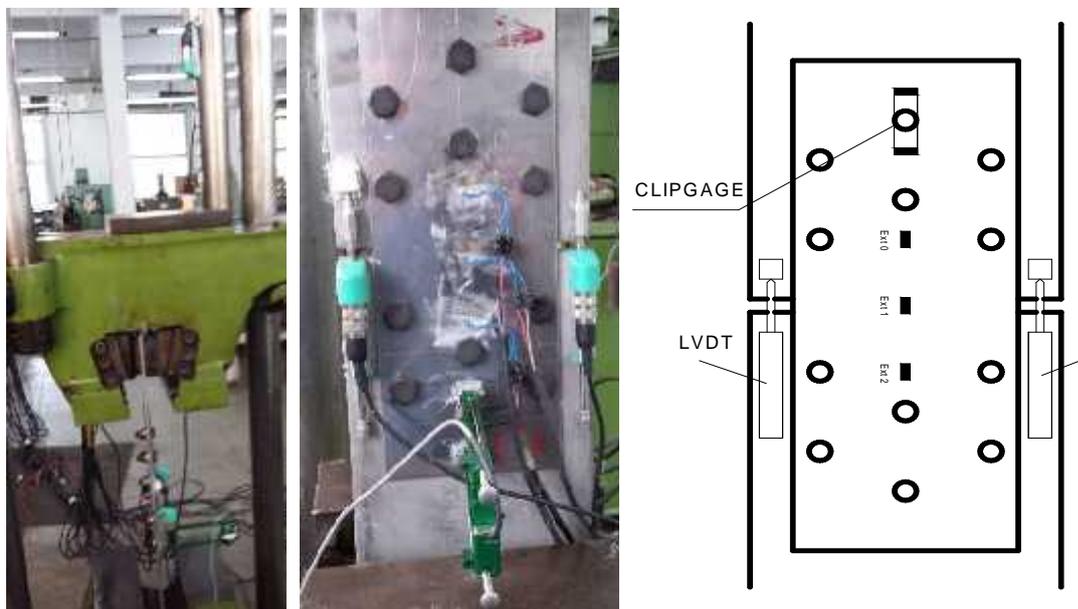


Figura 4.137 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipegue.

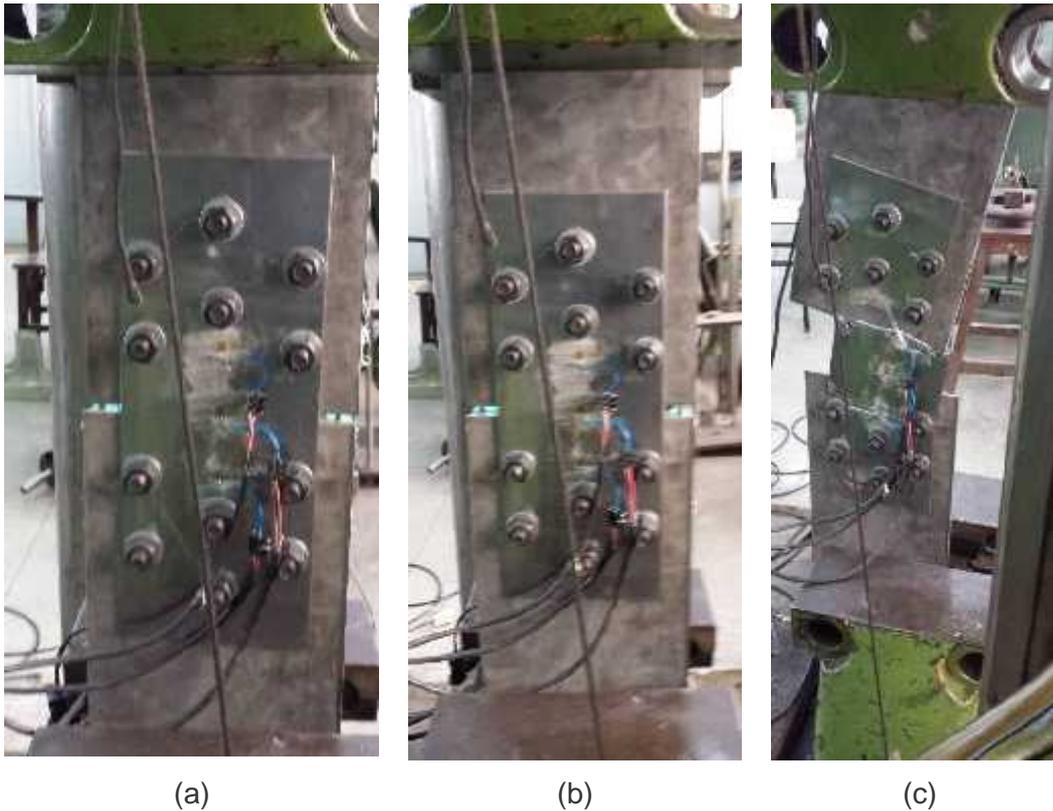


Figura 4.138 – Ensaio 55: (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) ruptura.

4.4.1.3 Ensaio E58_F_PL_N_107_6_24

O comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com laminação na direção paralela da aplicação da carga em aço inoxidável ferrítico e o limite do modo de ruptura foi averiguado nesse ensaio. A configuração geométrica desse ensaio é mostrada na Figura 4.139.

O ensaio teve uma placa de aplicação de carga com 6 mm de espessura e 150 mm de largura em aço carbono.

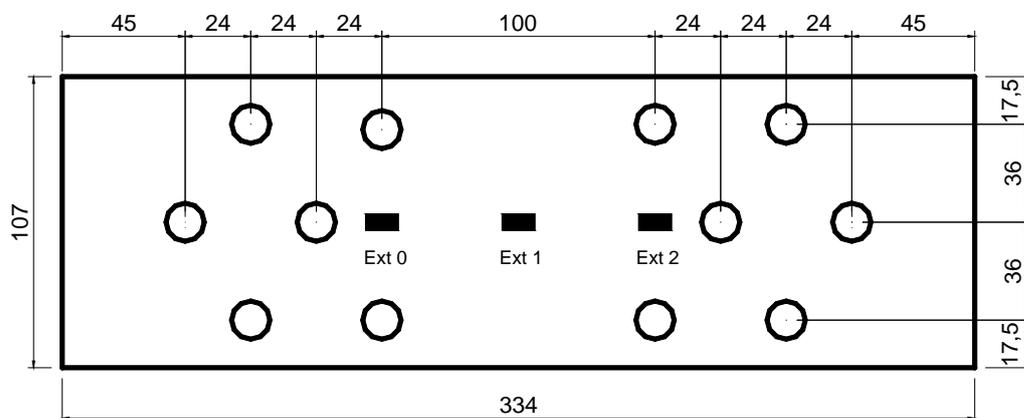


Figura 4.139 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

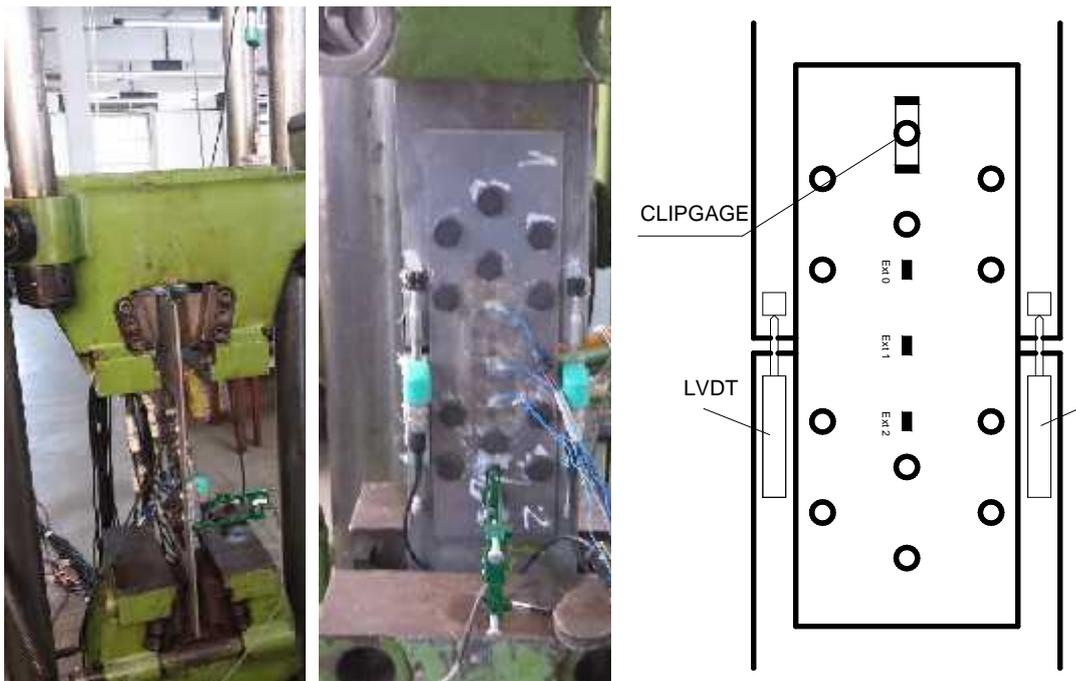
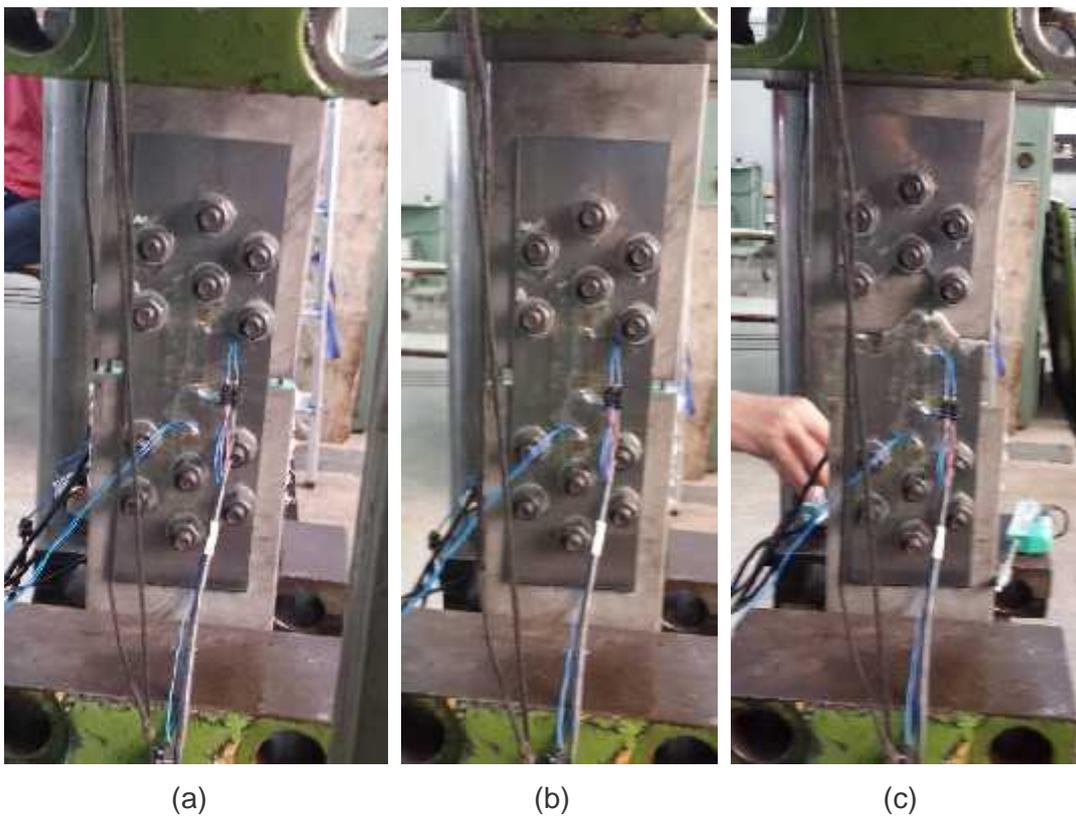


Figura 4.140 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgauge.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.141 – (a) configuração inicial, (b) deformação específica limite, (c) após a ruptura.

4.4.1.4 Ensaio E59_F_PL_N_107_6_28

Para aferir o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com chapas laminadas na direção paralela da aplicação da carga em aço ferrítico, e o limite do modo de ruptura foi executado o seguinte ensaio mostrado na Figura 4.142.

Esse ensaio adotou uma placa de aplicação de carga com 6 mm de espessura e 150 mm de largura em aço carbono.

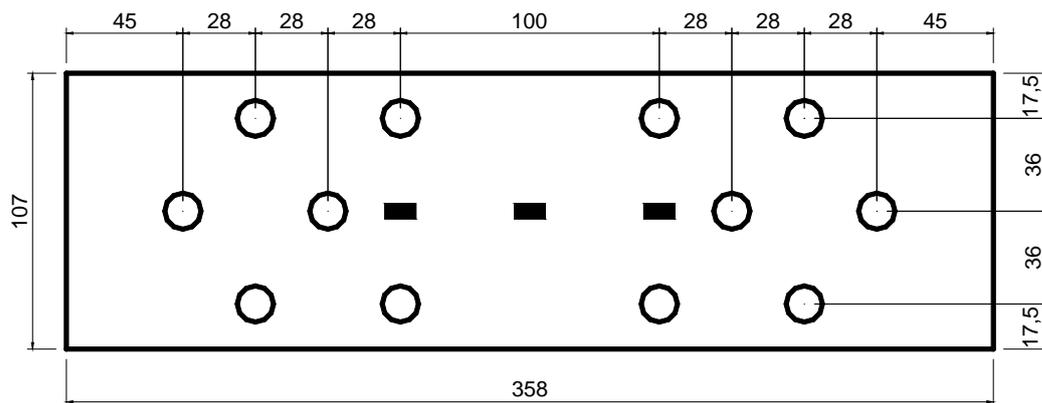


Figura 4.142 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

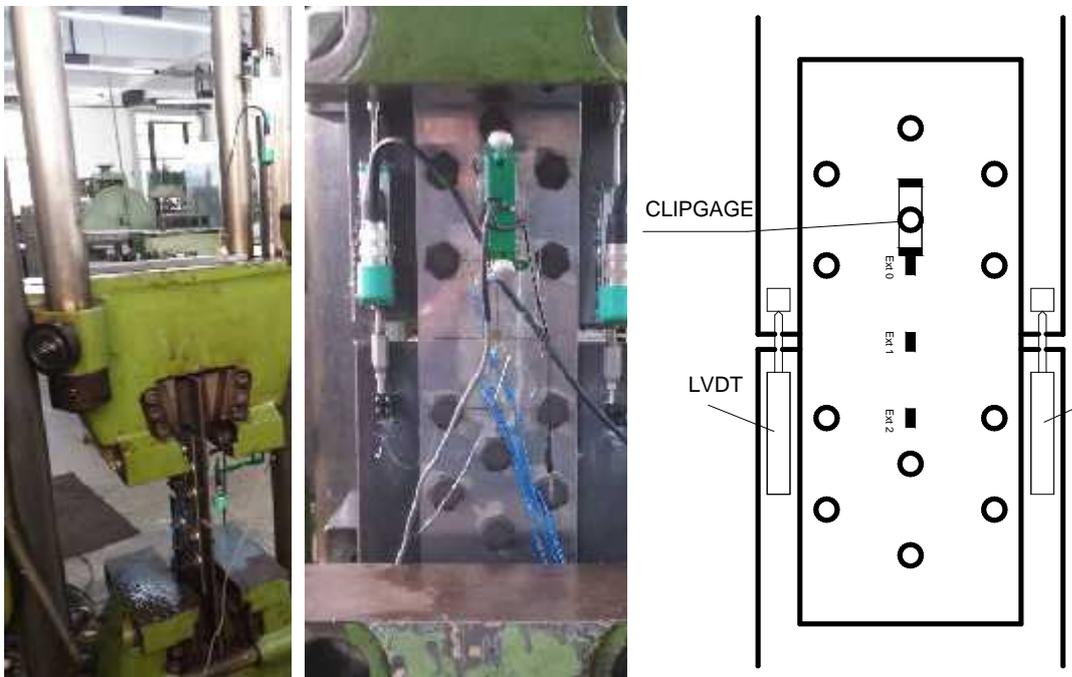


Figura 4.143 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

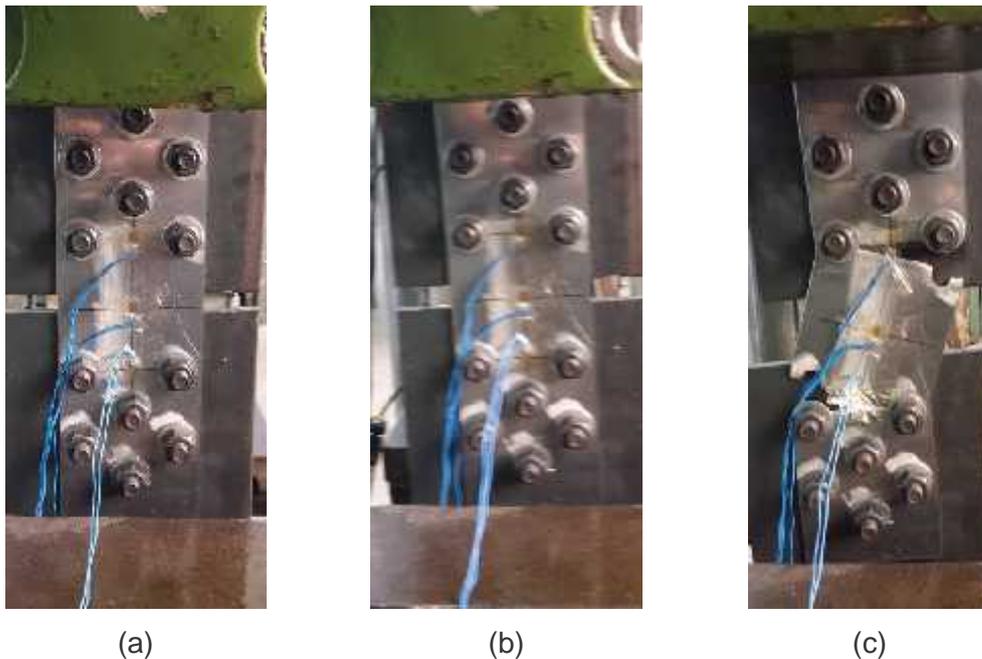


Figura 4.144 – (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) depois na ruptura.

4.4.1.5 Resultado dos ensaios– Grupo XII (54, 55, 58 e 59)

Os gráficos do comportamento mecânico desse conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.145 e na Figura 4.146.

Os ensaios apresentaram deslocamentos iniciais devido a acomodação do conjunto chapas e parafusos e das garras da máquina de tração.

Os gráficos carga *versus* deslocamento de todos os ensaios apresentam também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio.

Os ensaios apresentaram nos gráficos carga *versus* deformação específica, na fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros, uma maior rigidez na seção entre os parafusos, menor rigidez na seção central da ligação e menor ainda na segunda seção passando por um furo, onde foi posicionado o clipgage, conforme ensaios E54_F_PL_N_145_6_27 e E59_F_PL_N_107_6_28. Nos ensaios E55_F_PL_N_145_6_30 e E58_F_PL_N_107_6_24 o clipgage foi instalado em cima da quarta seção passando por um parafuso apresentando uma deformação específica insignificante. Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga.

Esses ensaios mostraram que o valor do parâmetro s se situa entre 27 mm e 30 mm para a placa com largura de 145 mm, e entre 24 e 28 mm para a

placa de largura de 107 mm. Os resultados dessa série estão resumidos na Tabela 4.12.

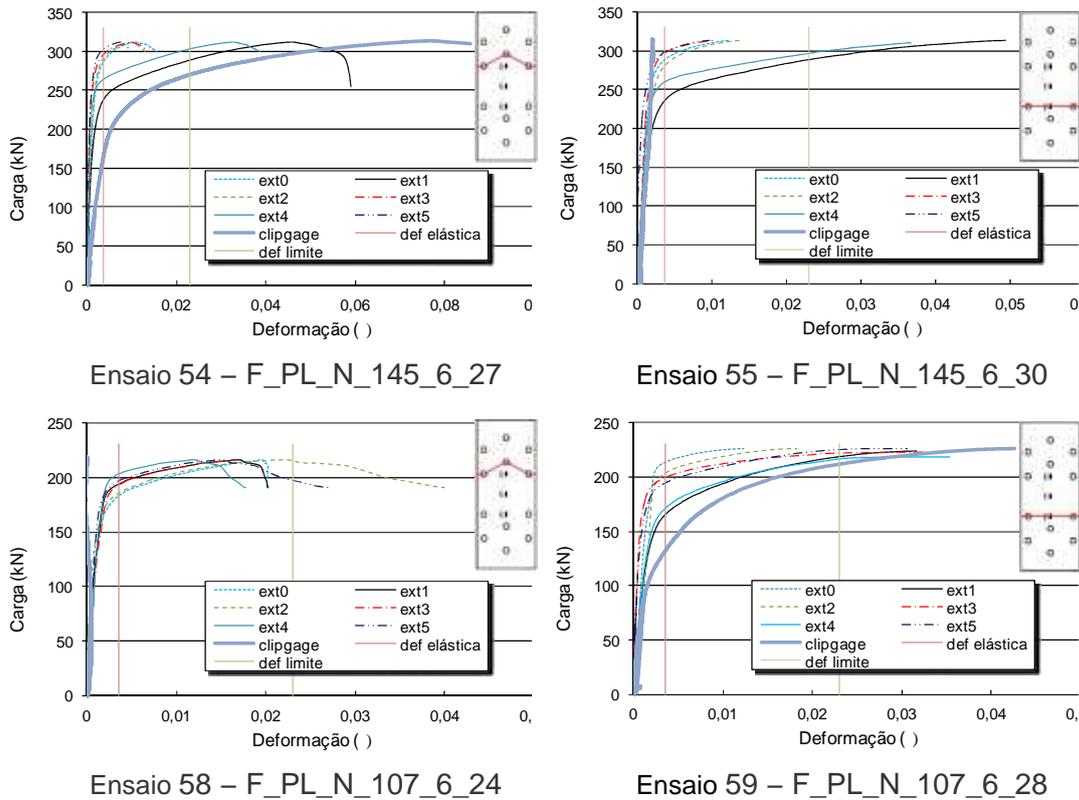


Figura 4.145 – Gráficos carga versus deformação específica – Grupo XII.

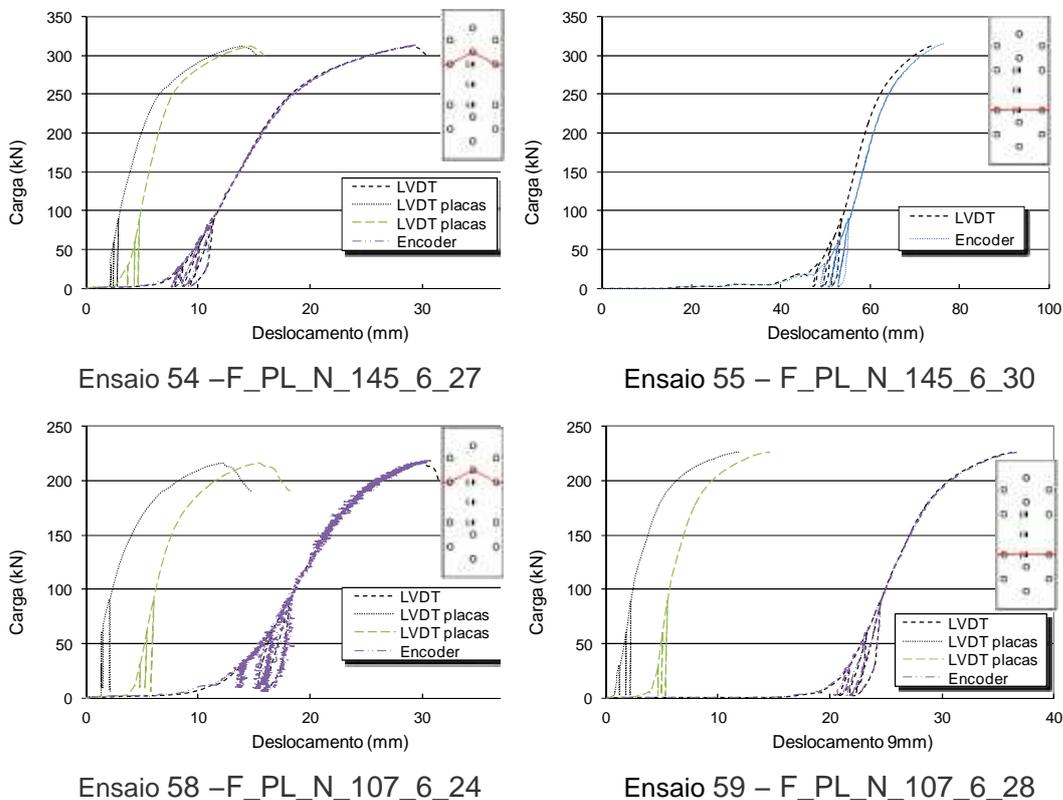


Figura 4.146 – Gráficos carga versus deslocamento – Grupo XII.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo XII

Ensaio	Carga última (kN)	inicial (mm)	final (mm)		Carga no limite elástico (kN)			Carga na deformação limite (kN)		
			tot	pl	P2	C	P1	P2	C	P1
E54F_PL_N_145_6_27	311,4	4,0	29,6	10,0	290	250	170	-	275	270
E55F_PL_N_145_6_30	314,8	38,5	32,5	-	285	245	-	-	290	-
E58F_PL_N_107_6_24	218,2	5,0	30,0	15,0	190	180	-	220	-	-
E59F_PL_N_107_6_28	226,2	15,0	21,0	15,0	210	180	130	220	210	215

P1- seção de um parafuso
P2- seção de dois parafusos
C- seção do centro da ligação

4.4.2 Influência da configuração geométrica da ligação

Com o objetivo de se avaliar a influência da variação da configuração geométrica da ligação foram realizados dois ensaios com ligação invertida, ou tipo B.

Esses ensaios tiveram o objetivo de aferir o comportamento mecânico da configuração aparafusada, e determinar a distância limite do parâmetro s para a mudança de ruptura na ligação aparafusada com furos alternados.

4.4.2.1 Ensaio E56_F_PL_I_145_6_50

Esse ensaio foi executado buscando-se aferir o comportamento mecânico da configuração aparafusada normal com laminação na direção paralela à aplicação da carga em aço inoxidável ferrítico, além de obter o valor limite do parâmetro s na mudança da seção de ruptura.

O ensaio adotou uma placa de aplicação de carga com 6 mm de espessura e 200 mm de largura. A chapa de ensaio é mostrada na Figura 4.147

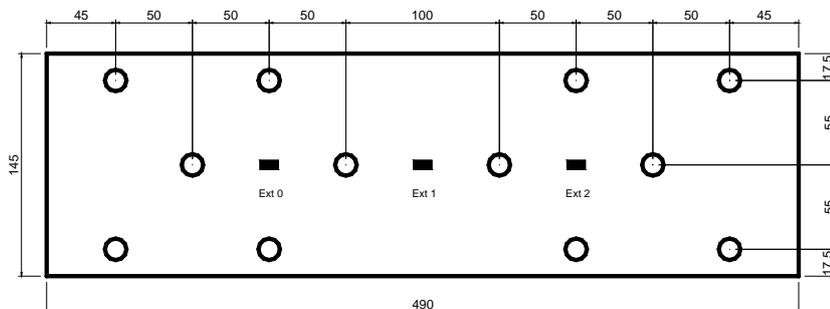


Figura 4.147 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

Foi instalado um clipgagem na segunda seção passando por um furo e transdutores de deslocamento entre as chapas de ensaio, conforme mostrado na Figura 4.148. O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por três furos, conforme mostrado na Figura 4.149

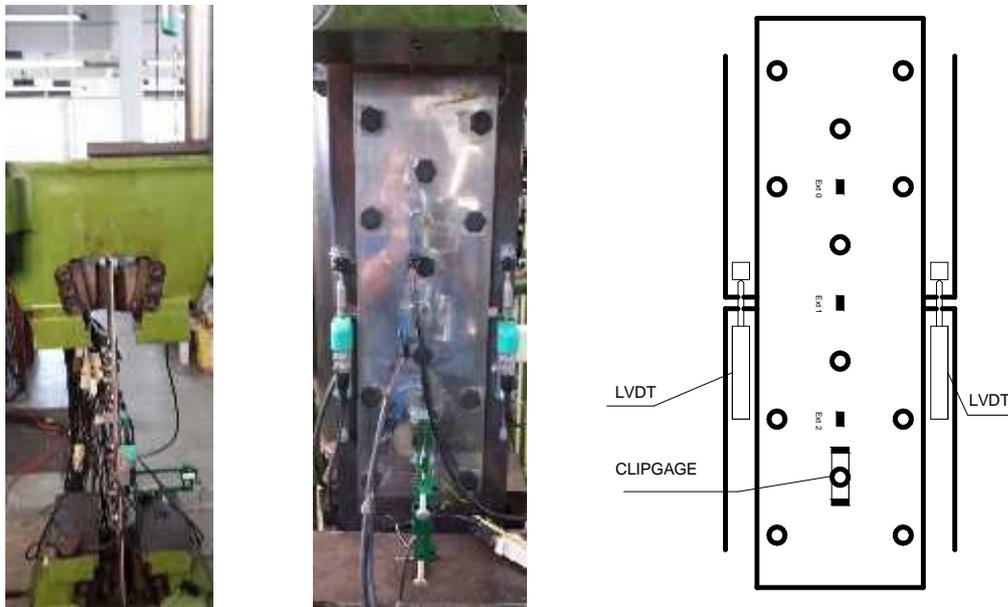


Figura 4.148 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

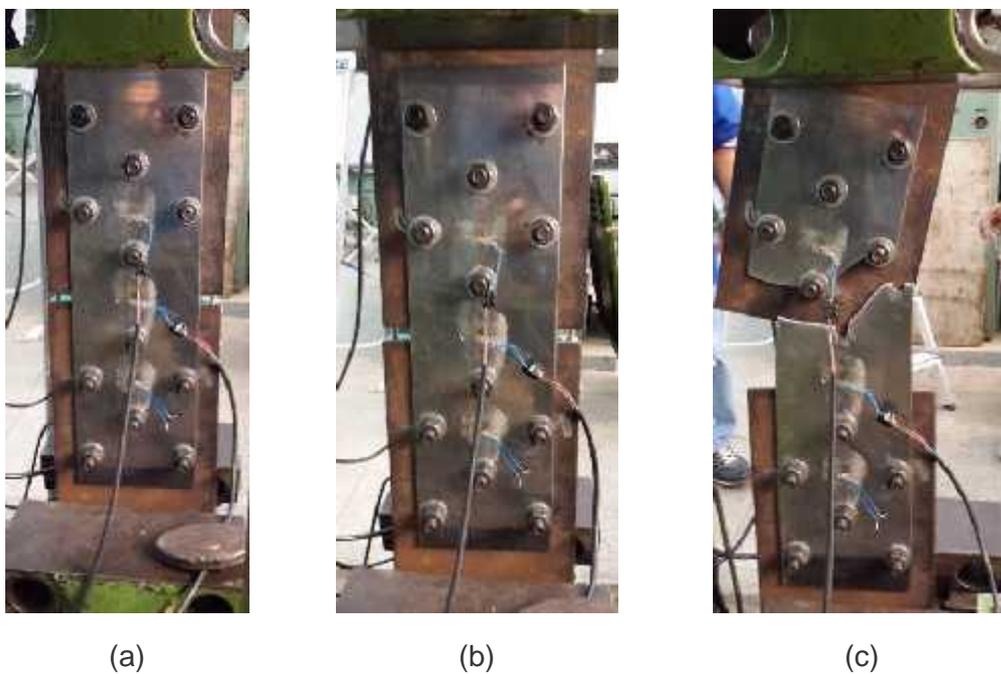


Figura 4.149 – Ensaio 56: (a) configuração inicial, (b) deformação limite, (c) ruptura.

4.4.2.2 Ensaio 57 – F_PL_I_145_6_55

Esse ensaio teve por objetivo determinar o limite do modo de ruptura e de aferir o comportamento mecânico da configuração aparafusada invertida na direção paralela da laminação em aço inoxidável ferrítico. O ensaio está caracterizado geometricamente conforme Figura 4.150.

A placa de aplicação de carga tinha 6 mm de espessura, e 200 mm de largura em aço carbono.

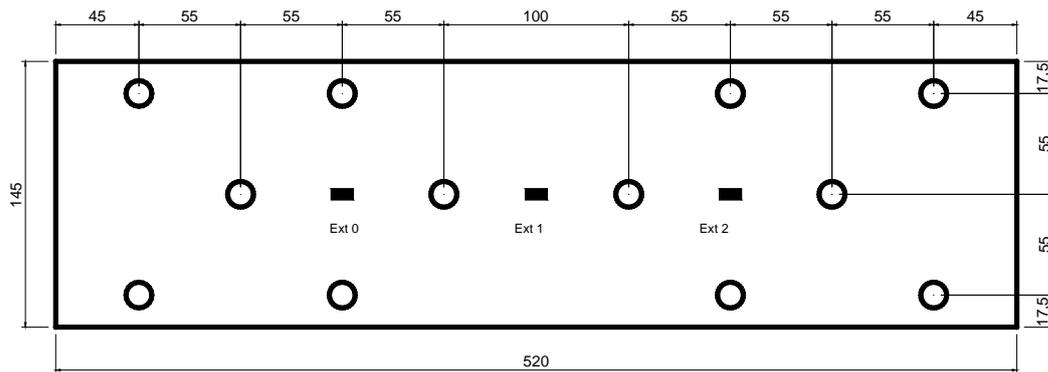


Figura 4.150 – Geometria e posicionamento dos extensômetros.

Na segunda seção passando por um furo foi posicionado o clipgagem, conforme mostrado na montagem do ensaio da Figura 4.151. O ensaio apresentou uma ruptura na seção líquida passando por um furo, conforme mostrado na Figura 4.152.

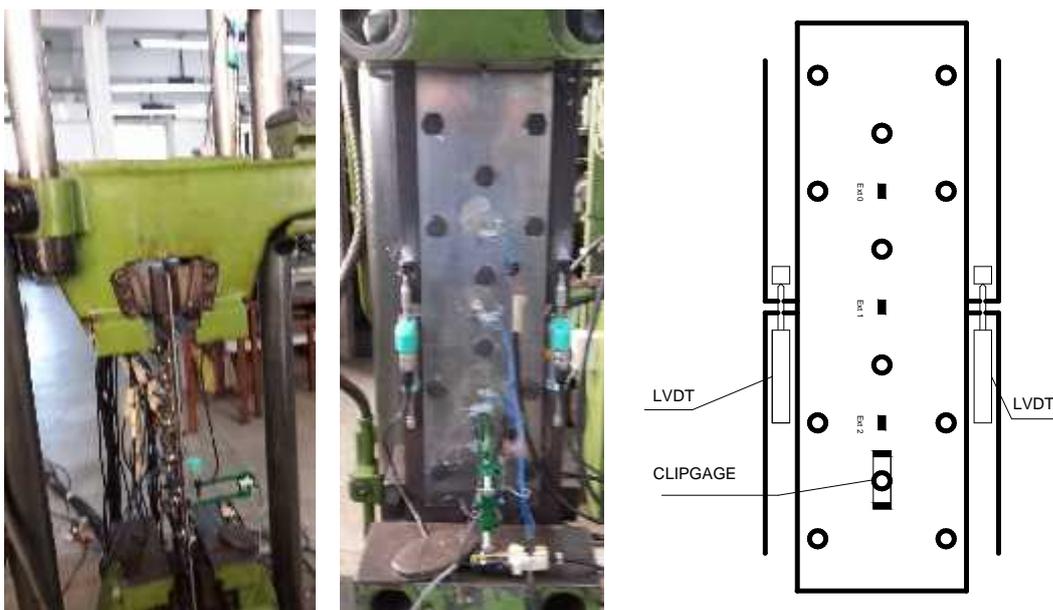


Figura 4.151 – Detalhe da chapa interna e posicionamento dos LVDT e clipgagem.

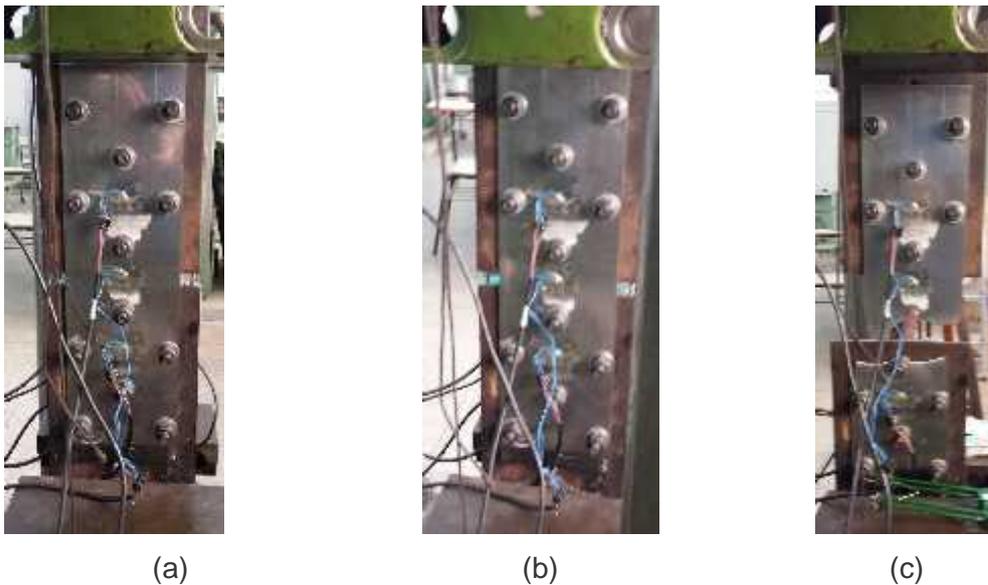


Figura 4.152 – Ensaio 57: (a) configuração inicial, (b) def. limite, (c) ruptura.

4.4.2.3 Resultado dos ensaios 56 e 57 – Grupo XIII

Os gráficos do comportamento mecânico desse conjunto de ensaios são mostrados na Figura 4.153 e na Figura 4.154. Os ensaios apresentaram deslocamentos iniciais devido à acomodação do conjunto chapas e parafusos e acomodação das garras da máquina de tração. Os gráficos carga *versus* deslocamento dos ensaios apresentaram também as curvas relativas aos transdutores posicionados entre as chapas de ensaio.

Todos os gráficos carga *versus* deformação específica apresentaram, na fase elástica, nas regiões onde foram posicionados os extensômetros uma maior rigidez na seção entre os parafusos e menor rigidez na seção central da ligação. Os extensômetros apresentaram um comportamento não equilibrado nas seções durante a aplicação de carga, devido ao desequilíbrio na distribuição da carga. O clipgage posicionado na segunda seção passando por um parafuso do ensaio E56_F_PL_I_145_6_50, e apresentou um comportamento inicial com mais deformação específica do que ao da seção passando por dois parafusos e do centro da ligação, indicando que pode ter havido descolamento do mesmo.

Já para o clipgage posicionado na mesma seção no ensaio E57_F_PL_I_145_6_55, o comportamento inicial foi similar ao do centro da ligação, e na fase final do ensaio tendeu ao comportamento da primeira seção de dois parafusos.

Esses ensaios definiram o valor do parâmetro s entre 50 e 55 mm como sendo o limite para mudança da seção de ruptura. Nos locais onde foram fixados os instrumentos de leitura as deformações específicas não atingiram a

deformação limite. O resultado desse grupo de ensaios está presente na Tabela 4.13. A Tabela 4.14 apresenta um resumo de todos os ensaios e uma comparação com resultados teóricos.

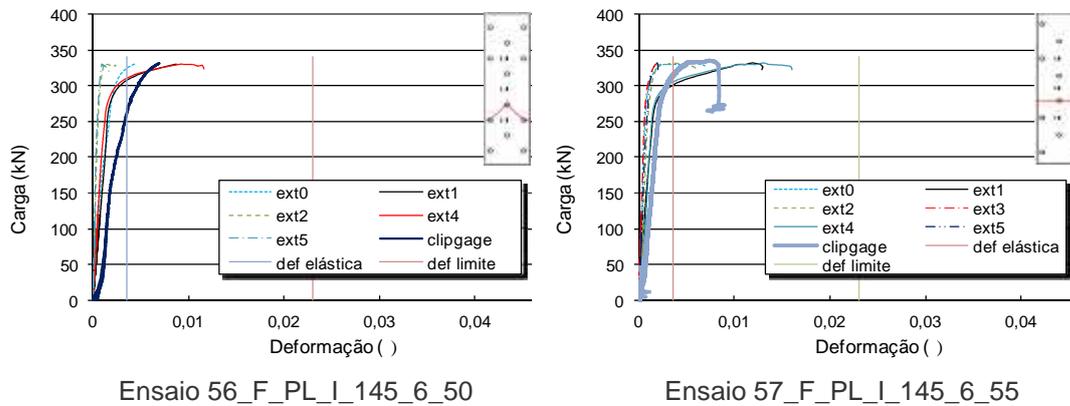


Figura 4.153 – Gráficos carga versus deformação específica.

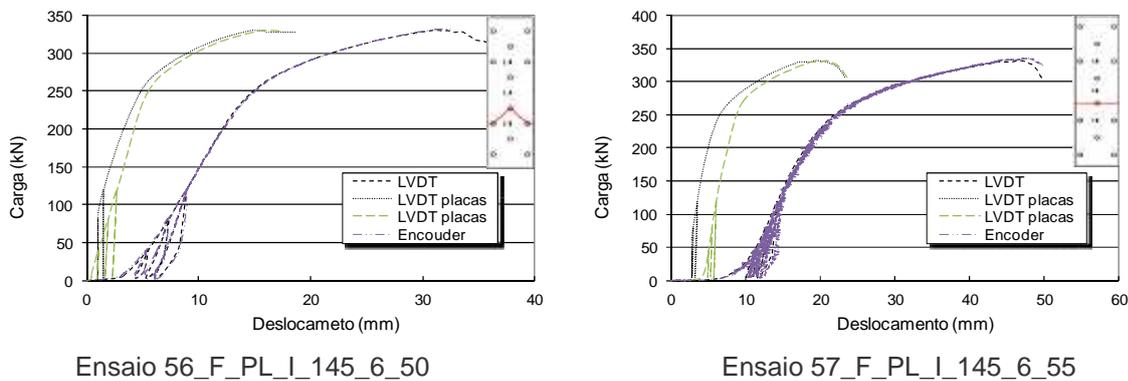


Figura 4.154 – Gráficos carga versus deslocamento.

Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios experimentais – Grupo XIII

Ensaio	Carga última (kN)	Desloc. inicial (mm)	Desloc. final (mm)		Carga no limite elástico (kN)		
			total	chapas	2par.	Centro	1par.
E56_F_PL_I_145_6_50	330,4	2,0	32,5	17,0	–	315	270
E57_F_PL_I_145_6_55	333,3	5,0	41,7	15,0	330	305	320

Tabela 4.14 – Tabela resumo comparativo com resultados teóricos

ENSAIO	Carga Última EXP. (kN)	Tipo de Ruptura EXP.	Carga Última EC 3. (kN)	Tipo de Ruptura EC 3	Diferença EXP./EC 3 (%)
E1_C_PL_N_145_6_25	312,7	3F	278,3	3F	11,0
E2_C_PL_N_145_6_28	319,9	3F	282,3	3F	11,8
E3_C_PL_N_145_6_30	308,9	3F	285,1	3F	7,7

ENSAIO	Carga Última EXP. (kN)	Tipo de Ruptura EXP.	Carga Última EC 3. (kN)	Tipo de Ruptura EC 3	Diferença EXP./EC 3 (%)
E4_C_PL_N_145_6_30	300,1	2F	285,1	3F	5,0
E5_C_PL_N_145_6_35	299,8	PLACA	292,7	3F	2,6
E6_C_PL_N_145_6_35	297,5	2F	292,7	3F	1,6
E7_C_PL_N_145_6_40	313,3	2F	300,9	2F	4,0
E8_C_PL_I_145_6_50	332,5	3F	300,9	2F	9,5
E9_C_PL_I_145_15_50*	312,0	3F	300,9	2F	3,6
E10_C_PL_I_145_15_70*	350,0	1F	300,9	2F	14,0
E11_C_PL_N_145_8_30	311,6	2F	285,1	3F	8,5
E12_C_PL_N_145_10_30	308,7	2F	285,1	3F	7,6
E13_C_PL_N_145_10_30*	309,5	3F	285,1	3F	7,9
E14_C_PL_N_145_12_30	287,2	2F	285,1	3F	0,7
E15_C_PL_N_145_15_30	314,3	2F	285,1	3F	9,3
E16_C_PL_N_145_15_30*	296,0	2F	285,1	3F	3,7
E17_C_PL_N_145_8_50*	326,0	2F	300,9	2F	7,7
E18_C_PL_N_145_15_50*	310,0	2F	300,9	2F	2,9
E19_C_PL_N_107_6_25	214,0	3F	180,4	3F	15,7
E20_C_PL_N_107_6_28	220,7	2F	184,1	3F	16,6
E21_C_PL_N_107_6_30	221,6	2F	186,8	3F	15,7
E22_C_PL_N_107_6_50	260,0	1F	239,6	1F	7,8
E23_A_PL_N_145_15_23*	436,0	3F	305,0	AB	30,0
E24_A_PL_N_145_15_23	462,2	3F	305,0	AB	34,0
E25_A_PL_N_145_15_26	442,0	2F/3F	305,0	AB	31,0
E26_A_PL_N_145_15_30	460,8	2F	305,0	AB	33,8
E27_A_PL_N_145_15_30*	459,0	2F	305,0	AB	33,6
E28_A_PL_N_145_15_50*	480,0	2F	305,0	AB	36,5
E29_A_PL_N_145_6_26	458,7	2F/3F	305,0	AB	33,5
E30_A_PL_N_145_6_30	456,4	2F	305,0	AB	33,2
E31_A_PL_I_145_6_55	509,6	1F	305,0	AB	40,1
E32_A_PL_I_145_6_60	494,4	1F	305,0	AB	38,3
E33_A_PL_I_145_6_60	463,3	1F	305,0	AB	34,2
E34_A_PL_N_107_6_22	327,4	3F	225,1	AB	31,2
E35_A_PL_N_107_6_24	319,4	2F	225,1	AB	29,5
E36_A_PL_N_107_6_26	328,3	2F	225,1	AB	31,4
E37_A_PP_N_145_6_20	446,4	3F	303,0	AB	32,1
E38_A_PP_N_145_6_25	442,3	2F	303,0	AB	31,5
E39_A_PP_I_145_8_25	472,9	3F	303,0	AB	35,9

ENSAIO	Carga Última EXP. (kN)	Tipo de Ruptura EXP.	Carga Última EC 3. (kN)	Tipo de Ruptura EC 3	Diferença EXP./EC 3 (%)
E40_A_PP_I_145_6_30	451,8	1F	303,0	AB	32,9
E41_A_PP_I_145_8_40	496,3	1F	303,0	AB	38,9
E42_A_PP_I_145_8_50	515,0	1F	303,0	AB	41,2
E43_A_PP_I_145_8_60	550,9	1F	303,0	AB	45,0
E44_A_PP_N_107_6_18	290,1	3F	223,6	AB	22,9
E45_A_PP_N_107_6_23	312,3	2F	223,6	AB	28,4
E46_D_PL_N_145_8_27	457,7	3F	429,8	AB	6,1
E47_D_PL_N_145_8_30	439,6	2F	429,8	AB	2,2
E48_D_PL_N_107_6_24	327,3	3F	313,6	AB	4,2
E49_D_PL_N_107_8_28	327,0	2F	317,2	AB	3,0
E50_D_PP_I_145_8_40	519,0	3F	468,1	AB	9,8
E51_D_PP_I_145_6_50	529,1	1F/3F	468,1	AB	11,5
E52_D_PP_I_145_8_50	525,8	1F/3F	468,1	AB	11,0
E53_D_PP_I_145_8_60	541,2	1F	468,1	AB	13,5
E54_F_PL_N_145_6_27	311,4	3F	289,7	AB	7,0
E55_F_PL_N_145_6_30	314,8	2F	289,7	AB	8,0
E56_F_PL_I_145_6_50	330,4	3F	289,7	AB	12,3
E57_F_PL_I_145_6_55	333,3	1F	289,7	AB	13,1
E58_F_PL_N_107_6_24	218,2	3F	206,3	3F	5,5
E59_F_PL_N_107_6_28	226,2	2F	213,8	AB	5,5
				Média	18,08
				Desvio Padrão	13,48
* Ensaio realizados no mestrado					

Os ensaios apresentaram uma diferença percentual média dos resultados teóricos para os experimentais de 18,08%, justificando a realização desse trabalho. O presente capítulo apresenta a investigação dos seguintes parâmetros: espessura da placa interna; distância s entre furos na direção paralela à aplicação da carga; largura da chapa da ligação com espessura constante de 3 mm; tipos de aço: aço carbono e os aços inoxidáveis austenítico, ferrítico e duplex; direção da laminação: paralela e perpendicular a direção de aplicação de carga e o tipo de ligação: A ou normal e B ou invertido, conforme mostrado nas Figura 3.20 à Figura 3.23.