

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL NO EMPENAMENTO DE PEÇAS
AERONÁUTICAS USINADAS A PARTIR DE PLACAS LAMINADAS DE
LIGAS DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 7XXX**

Aluno: Alexandre Hyodo

São Carlos

2002

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL NO EMPENAMENTO DE PEÇAS
AERONÁUTICAS USINADAS A PARTIR DE PLACAS LAMINADAS DE
LIGAS DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 7XXX**

Aluno: Alexandre Hyodo

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais como requisito
Parcial à obtenção do título de MESTRE
EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientação: Dr. Claudemiro Bolfarini

São Carlos
2002

HYODO, Alexandre

Influência da tensão residual no empenamento de peças aeronáuticas usinadas a partir de placas laminadas de ligas de alumínio da série 7XXX. São Carlos,

EBDSC, 2002

150p.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência E Engenharia de Materiais como requisito Parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus Pais, Elcio (*in memorium*) e Neuza, à minha esposa Vivian e a minha filha Gabriela pela inspiração, incentivo e compreensão que me motivaram em todos os momentos da realização desse trabalho.

VITAE DO CANDIDATO

- 1998 – atual: Eng^o de Desenvolvimento de Processos – Embraer
Engenharia de Fabricação – Usinados
- 1997 - 1998: Eng^o de Desenvolvimento de Materiais e Processos - Embraer
Engenharia de Materiais e Normas – Engenharia do Produto
- 1996 – 1997: Eng^o do Produto – Produtos Laminados
Aços Villares S.A. – Usina Pindamonhangaba
- 1995 – 1996: Eng^o Trainee
Braço – Mapri Indústrias Metalúrgicas S.A. (atualmente MAPRI
Textron)
- 1989 – 1993: Graduado em Engenharia de Materiais pela UFSCar.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
ALEXANDRE HYODO

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS,
EM 19, DEZEMBRO DE 2002.

BANCA EXAMINADORA:

CLAUDEMIRO BOLFARINI
ORIENTADOR
PPG-CEM / DEMA-UFSCar

WALTER LIBARDI
PPG-CEM / DEMA-UFSCar

JOÃO MANUEL DOMINGOS DE ALMEIDA ROLLO
EESC / USP

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho, em especial:

A Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A. – Embraer pela oportunidade desenvolver este trabalho tanto no âmbito tecnológico quanto no acadêmico.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos – DEMa / UFSCar por abrir as portas de sua estrutura de ensino e pesquisa para auxiliar na fundamentação e conceituação de um trabalho até então tido como puramente tecnológico.

Ao Engenheiro Luiz Toshihiro Massuda por acreditar no meu potencial e me introduzir na área de Engenharia de Fabricação de Peças Usinadas para desenvolver um assunto dessa envergadura.

Ao Engenheiro Mestre Paulo Celso Pires pela sua sólida base acadêmica e ampla vivência gerencial que elevou esse trabalho para uma dimensão corporativa, e cuja conduta profissional e pessoal são fatores de inspiração e motivação profissional e pessoal.

Ao Professor Doutor Claudemiro Bolfarini (Orientador) pela paciência, prontidão, simplicidade de visão e clareza de propósito que viabilizou execução deste Mestrado em tão pouco tempo.

Ao Professor Doutor Walter Libardi pelas valiosas discussões e sugestões sobre a modelagem do modelo mecânico envolvido no trabalho.

Aos Engenheiros Anderson Yoshizato e João Paulo Rebucci Lirani pela contribuição fundamental na interpretação do algoritmo e da efetiva implementação do programa de cálculo do perfil de tensões residuais e cálculo do parâmetro W .

Ao técnico Lucio Pereira que recebe os méritos pela paciência, dedicação e pró – atividade demonstrada durante a realização dos ensaios de remoção de camadas nas placas de matéria-prima amostradas do estoque da Embraer.

RESUMO

O mercado de aviões regionais tem evoluído rapidamente e o pronto atendimento às exigências do mercado exige dos fabricantes de aeronaves a garantia da fabricação de peças primárias usinadas na quantidade, qualidade e prazo planejados. Para isso necessita-se de robustez de processo, ou seja, as peças fabricadas devem estar em conformidade com as especificações de engenharia e definições geométricas de projeto independentemente do tipo de matéria-prima utilizada no processo de usinagem. Dentre as disfunções que ocorrem durante a usinagem, o empenamento tem uma grande importância pois aumenta significativamente o tempo de fabricação de uma peça primária.

Uma das variáveis importantes a ser considerada neste processo é a influência do material que ainda escapa ao gerenciamento do processo, pois é assunto que recentemente começou a ser estudado e apresentado na literatura técnica, ao contrário de outros como os parâmetros de usinagem e condições de ferramentas de corte, assuntos extensivamente explorados.

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência do material, em específico, das tensões residuais oriundas do processo de fabricação das placas de ligas de alumínio da série 7XXX, no empenamento das peças primárias fabricadas através da usinagem. A técnica utilizada para determinação das tensões residuais foi a de remoção de camadas, técnica essa que fornece dados de macro tensão residual ao longo da espessura da matéria-prima (na forma de placa), condição essa considerada mais adequada ao estudo em questão. Além disso, foi determinado o parâmetro W , que expressa o nível de energia elástica armazenada no material e é função das tensões residuais existentes no material, e este valor foi correlacionado com o empenamento durante a usinagem de peças reais com diferentes valores de W . Placas com baixos valores de W (abaixo de $1,0 \text{ kJ/m}^3$), mostraram na usinagem valores de empenamento significativamente menor do que placas do mesmo material com valor de W acima de $2,0 \text{ kJ/m}^3$. Isto demonstra a confiabilidade do método de remoção de camadas e que seu resultado pode ser utilizado no como um dos parâmetros de qualificação de fornecedores.

ABSTRACT

The fast growing of regional jets market has required from airframe manufacturers a prompt attending to market demands and the primary parts fabrication at a planned quality, quantity, and time at low costs. In order to achieve this, the process robustness is a key concept to be kept in mind, it means that the manufactured parts shall be conform to engineering specifications and geometric tolerances as well, regardless the raw material source used in machining process. Warping or machining distortion is one of the main problems identified during machining process. The corrective action for warping impacts the manufacturing lead-time, production costs, and production plan accomplishment. The influence of raw material on machining process performance is one of the main variables, is an assumption of this work. Recently, studies related to this approach have started and little technical literature is available. Otherwise, the availability of technical literature related to machining parameters, and cutting tools has been exhaustively explored.

The aim of this work is to study the influence of material, in specific, the residual stress originated during thermo-mechanical processing of 7XXX series aluminum alloy plates, on warping of primary parts manufactured through milling machining. The layer removal method was the experimental technique chosen to measure the residual stress. Through this method is possible to determine the through thickness residual stress profile, the more suitable information for this study. In addition to this, the W parameter, which gives the average residual stress level per volume unit of plate and is a function of existing residual stress profile was also derived. It was correlated to warping level of machined from plates with several W parameter values. Parts machined from low W parameter values (lower than $1,0 \text{ kJ/m}^3$) plates presented warping measurements remarkably lower than measurements made with parts machined from plates with W parameters values higher than $2,0 \text{ kJ/m}^3$. This trend agrees with data available in literature and demonstrates the layer removal method results dependability, and its suitability to be applied for suppliers qualification purposes.

PUBLICAÇÕES

HYODO, A.; PIRES, P.C. **REPORT NR: 145-AT-363 Empenamento em peças usinadas a partir de placas laminadas da liga 7050-T7451 e 7475-T7351.**

Nov. 2000. EMBRAER. 81 pp.

HYODO, et ali. **Empenamento em peças estruturais aeronáuticas usinadas a partir de placas laminadas de ligas de alumínio da série 7XXX.** Anais 14^o

CBECIMAT. 3-6 Dezembro 2000. São Pedro, SP. 12pp.

HYODO, A.; PIRES, P.C. **REPORT NR: 145-MA-350 Comparative analysis of mechanical properties of 7050-T7451 and 7475-T7351 aluminum alloy plates in standards and low residual stress qualities.**

EMBRAER. Jun. 2002. 37 pp.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	VII
VITAE DO CANDIDATO.....	IX
AGRADECIMENTOS	XIII
RESUMO	XV
ABSTRACT.....	XVII
PUBLICAÇÕES	XIX
SUMÁRIO.....	XXI
ÍNDICE DE TABELAS	XXIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XXV
SIMBOLOS E ABREVIACÕES	XXXIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ROBUSTEZ DE PROCESSO.....	1
1.2 ANÁLISE SISTÊMICA DO PROCESSO DE USINAGEM	3
1.3 ANÁLISE SISTÊMICA DO PROBLEMA DE EMPENAMENTO	5
1.4 RELEVÂNCIA DO PAPEL DO MATERIAL NO EMPENAMENTO.....	7
1.5 OBJETIVO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 7XXX.....	11
2.2 TENDÊNCIAS NA FABRICAÇÃO DE PLACAS DE ALUMÍNIO.....	11
2.3 FONTES DE GERAÇÃO E ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS	12
2.4 TENSÃO RESIDUAL	13
2.5 CORRELAÇÃO ENTRE ENERGIA ELÁSTICA ARMAZENADA E TENDÊNCIA AO EMPENAMENTO	34

3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	37
3.2	MÉTODOS UTILIZADOS	37
4	RESULTADOS.....	47
4.1	ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO NO EMPENAMENTO 47	
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS	50
4.3	ENERGIA ELÁSTICA ARMAZENADA - PARÂMETRO W.....	62
4.4	ENSAIOS DE FABRICAÇÃO - CORRELAÇÃO DE W X EMPENAMENTO APÓS USINAGEM	70
5	DISCUSSÃO.....	79
5.1	ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO PROCESSO NO EMPENAMENTO 80	
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS	80
5.3	ENSAIOS DE "TRY-OUT" DE FABRICAÇÃO	94
6	CONCLUSÕES.....	99
7	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	101
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
9	APÊNDICE 1	109
9.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS	109

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Tipo de tensão (escala) medida por cada técnica experimental.	16
Tabela 2 - Probabilidade de empenamento em função da energia elástica armazenada[7].	34
Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova em função da espessura de placa.	38
Tabela 4 – Espessura de camada removida em função da espessura de placa.	40
Tabela 5 – Influência do processo no empenamento: parâmetros de ensaio... ..	42
Tabela 6 Classes de espessura de placas para liga 7475-T7351 segundo AMS 4202 [5].....	49
Tabela 7 Classes de espessura de placas para liga 7050-T7451 segundo AMS 4050 G.....	50
Tabela 8 Resumo dos dados de parâmetro W para placas 7475-T7351.....	63
Tabela 9 Resumo dos dados de parâmetro W para placas 7050-T7451.....	64
Tabela 10 - Empenamento medido na máquina tridimensional.....	73
Tabela 11 – Variações entre os pontos de mínimo e máximo empenamento ..	77
Tabela 12 Valores médios de W por fornecedor para a liga 7050-T7451.	91
Tabela 13 Valores médios de W por fornecedor para a liga 7475-T7351.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variação do desempenho relativo ao conceito de processo robusto e de à prova de erro. (a) Variação do desempenho do produto, a partir de uma visão do consumidor externo. (b) Variação do desempenho da produção, a partir de uma visão do cliente interno. Figura traduzida de Kolarik [1].	2
Figura 2 Fluxo de informações e material em transformação num processo de usinagem.	4
Figura 3 Desvio do fluxo normal do processo de usinagem.	5
Figura 4 Fonte de variação de processo.	8
Figura 5 – Fontes de geração e alívio de tensões residuais na fabricação de placas de liga de alumínio. Modificada de [10].	10
Figura 6 - Efeito do estiramento no perfil de tensões residuais. Modificada de [10].	13
Figura 7 Redistribuição da tensão residual durante a remoção de camada. Adaptado de [47].	18
Figura 8 Corpo de prova com curvatura constante (R) após a remoção de camada.	19
Figura 9 Situação onde o corpo de prova é usinado para uma espessura e' após a remoção de uma camada de espessura e .	21
Figura 10 Remoção de camadas.	27
Figura 11 Esquema de deformação do corpo de prova após a i -ésima remoção de camada.	29
Figura 12 Esquema da deformação do corpo de prova antes da remoção de camada i e $i+1$.	30
Figura 13 - Localização dos corpos de prova para ensaio de remoção de camada.	38
Figura 14 - Detalhamento do jogo de corpos de prova.	39
Figura 15 - Esquema da marcação na face inferior do corpo de prova.	40
Figura 16 - Esquema do dispositivo de medição de flecha.	40
Figura 17 - Convenção de sinais para medição da flecha (f).	41

Figura 18 - Disposição das placas durante a usinagem na máquina Gantry. [8]	43
Figura 19 - Caverna do ERJ-170 durante a usinagem. [8].....	44
Figura 20 – Posicionamento da peça dentro da placa. [8].....	45
Figura 21 - Flecha medida na direção de laminação de uma placa de 3 polegadas de espessura para diferentes condições de usinagem. [8].....	47
Figura 22 - Flecha medida na direção perpendicular à laminação de uma placa de 3 polegadas de espessura para diferentes condições de usinagem. [8]	48
Figura 23 - Comparação de flecha na direção de laminação de uma placa de 3 polegadas de espessura usinada em equipamento convencional e usinagem em alta velocidade. [8].....	49
Figura 24 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7475-T7351 Classe 1.....	51
Figura 25 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7475-T7351 Classe 3.....	52
Figura 26 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7475- T7351 Classe 1.....	53
Figura 27 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7475- T7351 Classe 3.....	54
Figura 28 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 1.....	55
Figura 29 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 2.....	56
Figura 30 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 3.....	57
Figura 31 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050- T7451 Classe 4.....	58
Figura 32 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050- T7451 Classe 1.....	59
Figura 33 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050- T7451 Classe 2.....	60

Figura 34 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 3.....	61
Figura 35 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 4.....	62
Figura 36 W_L x W_{LT} de placas da liga 7475-T7351 com espessura até 31,8 mm.	65
Figura 37 W_L x W_{LT} de placas da liga 7475-T7351 com espessura até 50,8 mm.	66
Figura 38 W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura Classe 1 (até 50,8 mm).	67
Figura 39 W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 76,2 mm.	68
Figura 40 W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 101,6 mm.	69
Figura 41 W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 127 mm.	70
Figura 42 - Valores de empenamento em função da posição para o corpo de prova PN 170-04070-001 com $W = 1,21 \text{ KJ/m}^3$	71
Figura 43 - Valores de empenamento em função da posição para o corpo de prova PN 170-04070-001 com $W = 3,7 \text{ KJ/m}^3$	71
Figura 44 - Empenamento das placas antes da realização do ensaio.....	72
Figura 45 - Empenamento após o desbaste na face superior da placa.....	72
Figura 46 - Empenamento após a usinagem final das peças.	73
Figura 47 - Caverna do ERJ-170 após a usinagem.....	74
Figura 48 – Empenamento após desbaste na peça localizada a 1,0 mm da face da placa.....	74
Figura 49 – Empenamento após desbaste na peça localizada a 15,0 mm da face da placa.....	75
Figura 50 - Empenamento após desbaste na peça localizada a 8,0 mm da face da placa.....	75
Figura 51 - Empenamento após usinagem final da peça localizada a 1,0 mm da face da placa.....	76

Figura 52 – Empenamento após usinagem final da peça localizada a 15,0 mm da face da placa.	76
Figura 53 - Empenamento após usinagem final da peça localizada a 8,0 mm da face da placa.....	77
Figura 54 Deformações medidas em amostras na condição T7451. Traduzido de Prime [42].....	82
Figura 55 Perfil de tensões residuais após alívio de tensões por estiramento (7050-T7451). Traduzido de Prime [42].....	82
Figura 56 – (a) Detalhe do piso de carga usinado a partir de placa 7050-T7451. (b) Detalhe da linha de montagem do Boeing C-17 Globemaster. Adaptado de [56].....	84
Figura 57 Distribuição de tensão residual. (a) resfriamento rápido em água fria. (b) resfriamento rápido em água quente. Traduzido de [11].....	85
Figura 58 Mapeamento da tensão residual em placas utilizando o método de ultrassom. Adaptado de [56].....	86
Figura 59 – Pós processamento da simulação da distribuição de tensões em uma placa após o tratamento térmico e estiramento. Adaptado e traduzido de [56].....	87
Figura 60 – Contribuição de W_L em W em função dos fornecedores para a liga 7050-T7451.....	88
Figura 61 Contribuição de W_L em W em função dos fornecedores para a liga 7475-T7351.....	89
Figura 62 – Comparação da relação W_{LT}/W_L x Fornecedores para a liga 7050-T7451.....	90
Figura 63 - Comparação da relação W_{LT}/W_L x Fornecedores para a liga 7475-T7351.....	91
Figura 64 – Parâmetro W em função da espessura para vários fornecedores..	92
Figura 65 - – Parâmetro W em função da espessura para vários fornecedores.	93
Figura 66 – Valores de W para placas convencionais e otimizadas em função da espessura da placa. Traduzido de [38].	94
Figura 67 – Perfil de tensões da placa utilizada para a usinagem da tampa.....	97

Figura 68 Correlação empenamento máximo medido e parâmetro W obtido nos ensaios de fabricação.....	98
Figura69 Gráfico do perfil de tensão residual para placa AA 7475–T7351 com 25,4 mm de espessura.	110
Figura70 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475–T7351 com 50,8 mm de espessura.	111
Figura71 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 31,8 mm de espessura.	112
Figura72 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 76,2 mm de espessura.	113
Figura73 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475–T7351 com 50,8 mm de espessura.	114
Figura74 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 12,7 mm de espessura.	115
Figura75 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7351 com 50,8 mm de espessura.	116
Figura76 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 76,2mm de espessura.	117
Figura77 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 82,55 mm de espessura.	118
Figura78 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 101,6 mm de espessura.	119
Figura79 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 25,4 mm de espessura.	120
Figura80 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 25,4 mm de espessura.	121
Figura81 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 50,8 mm de espessura.	122
Figura82 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 101,6 mm de espessura.	123
Figura83 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 127 mm de espessura.	124

Figura84 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.....	125
Figura85 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 25,4 mm de espessura.....	126
Figura86 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.....	127
Figura87 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.....	128
Figura88 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.....	129
Figura89 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.....	130
Figura90 Gráfico do perfil de tensão residual para placa AA 7475-T7351 com 25,4 mm de espessura.....	131
Figura91 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.....	132
Figura92 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 31,8 mm de espessura.....	133
Figura93 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.....	134
Figura94 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.....	135
Figura95 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 12,7 mm de espessura.....	136
Figura96 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7351 com 50,8 mm de espessura.....	137
Figura97 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2mm de espessura.....	138
Figura98 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 82,55 mm de espessura.....	139
Figura99 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.....	140

Figura100 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 25,4 mm de espessura.....	141
Figura 101 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 25,4 mm de espessura.....	142
Figura102 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 50,8 mm de espessura.....	143
Figura103 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 101,6 mm de espessura.	144
Figura104 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 127 mm de espessura.....	145
Figura105 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.....	146
Figura106 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 25,4 mm de espessura.....	147
Figura107 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 76,2 mm de espessura.....	148
Figura108 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050–T7451 com 101,6 mm de espessura.	149
Figura109 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.....	150
Figura110 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.	151

SIMBOLOS E ABREVIACÖES

A: área da seção transversal

b: espessura do corpo de prova

CAM: Computer Aided Manufacturing

CN: comando numérico

d^2v/dx^2 : equação diferencial da viga

de' : espessura para a remoção de camada intermediária e'

df/de : variação da deflexão em função da espessura

dF : variação na força axial

dF' : força contrária de equilíbrio

dM'_f : momento contrário de equilíbrio

dM_f : momento devido a atuação da força dF

$d\sigma$: variação da tensão na camada removida

$d\sigma_f$: variação devido a tensão de flexão

$d\sigma_n$: variação devido a tensão normal

e: espessura remanescente de placa

E: Módulo de Elasticidade (Módulo de Young)

e' : dimensão intermediária de espessura de viga

f: flecha

h: espessura da camada removida – método da deflexão

h: espessura inicial da placa – altura do corpo de prova

I: momento de inércia

IADS: International Alloy Designation System

l: distância entre apoios

R: raio de curvatura

S(i): tensão residual induzida pelas remoções anteriores – método da deflexão

S: rigidez (*stiffnes*)

u(i): relaxação de tensão na camada removida modelo mecânico incremental

u_1 : tensão residual aparente na direção 1

u_2 : tensão residual aparente na direção 2

W : energia elástica armazenada - parâmetro W

W_L : componente de W na direção longitudinal (L)

W_{LT} : componente de W na direção longitudinal (LT)

z/E : relação profundidade de camada removida e espessura inicial de placa

Δu : diferença de tensão no modelo mecânico incremental

$\Delta \varepsilon$: diferença de deformação – método da deflexão

$\Delta \sigma$: variação total na tensão na dimensão

Φ_B^e : Fator de forma para flexão elástica

ε : deformação – método da deflexão

$\varepsilon_0(e)$: deformação – ‘fonte’ de deformação

ε_i : deformação na superfície - método da deflexão

ε_S : deformação após a remoção da i -ésima camada - método da deflexão

λ : constante para uma dada geometria – Eq. (2.20)

ν : coeficiente de Poisson

ρ : densidade

$\sigma(e)$: tensão residual na camada removida do corpo de prova, Mpa – Eq. (2.4)

$\sigma(e)$: tensão residual no corpo de prova, Mpa considerando as camadas removidas – Eq. (2.18)

$\sigma_0(e)$: tensão inicial em função da espessura – ‘fonte’ de tensão

σ_1 : tensão residual real obtida através da lei de Hooke – Eq.(2.24)

σ_2 : tensão residual real obtida através da lei de Hooke – Eq.(2.25)

σ_f : tensão produzida devido a flexão

σ_L : perfil de tensão residual na direção longitudinal

σ_{LT} : perfil de tensão residual na direção transversal

σ_n : tensão normal

1 INTRODUÇÃO

1.1 Robustez de processo

O desempenho de um determinado produto deve atender as expectativas do cliente, não importando o ambiente, aplicação, configuração e método de operação. A falta de eficácia e eficiência no desempenho do produto ou processo resulta na perda de tempo de trabalho, danos ambientais, desperdício de energia e materiais, atraso na entrega, excesso de manutenção, além de outros custos, inconveniências e danos pessoais. Segundo Kolarik [1], isto demonstra que ultimamente os consumidores compram os seus produtos já contando com os benefícios potenciais.

A robustez em desempenho refere à capacidade de fabricar e entregar, consistentemente, produtos e serviços de alto desempenho para todos os usuários, sobre uma razoável faixa de aplicação, ambiente, configuração e utilização / métodos operacionais.

A aplicação desse conceito possui duas perspectivas, uma do ponto de vista do cliente externo e outra do cliente interno como mostra a Figura 1 (a) e (b). Segundo essa visão, o que se deseja é a manutenção da variação do desempenho de processo e produção em níveis bastante reduzidos ao mesmo tempo em que se aumenta o nível de desempenho, sem utilizar tolerâncias apertadas ou materiais mais caros.

A aplicação das duas visões deste conceito no objeto em estudo é apropriada se o processo de usinagem for tratado de forma sistêmica. Ou seja, se o processo em análise for considerado como um sistema formado por um conjunto coordenado de ações para a obtenção de um produto final, tanto do ponto de vista do cliente interno, quanto do cliente externo.

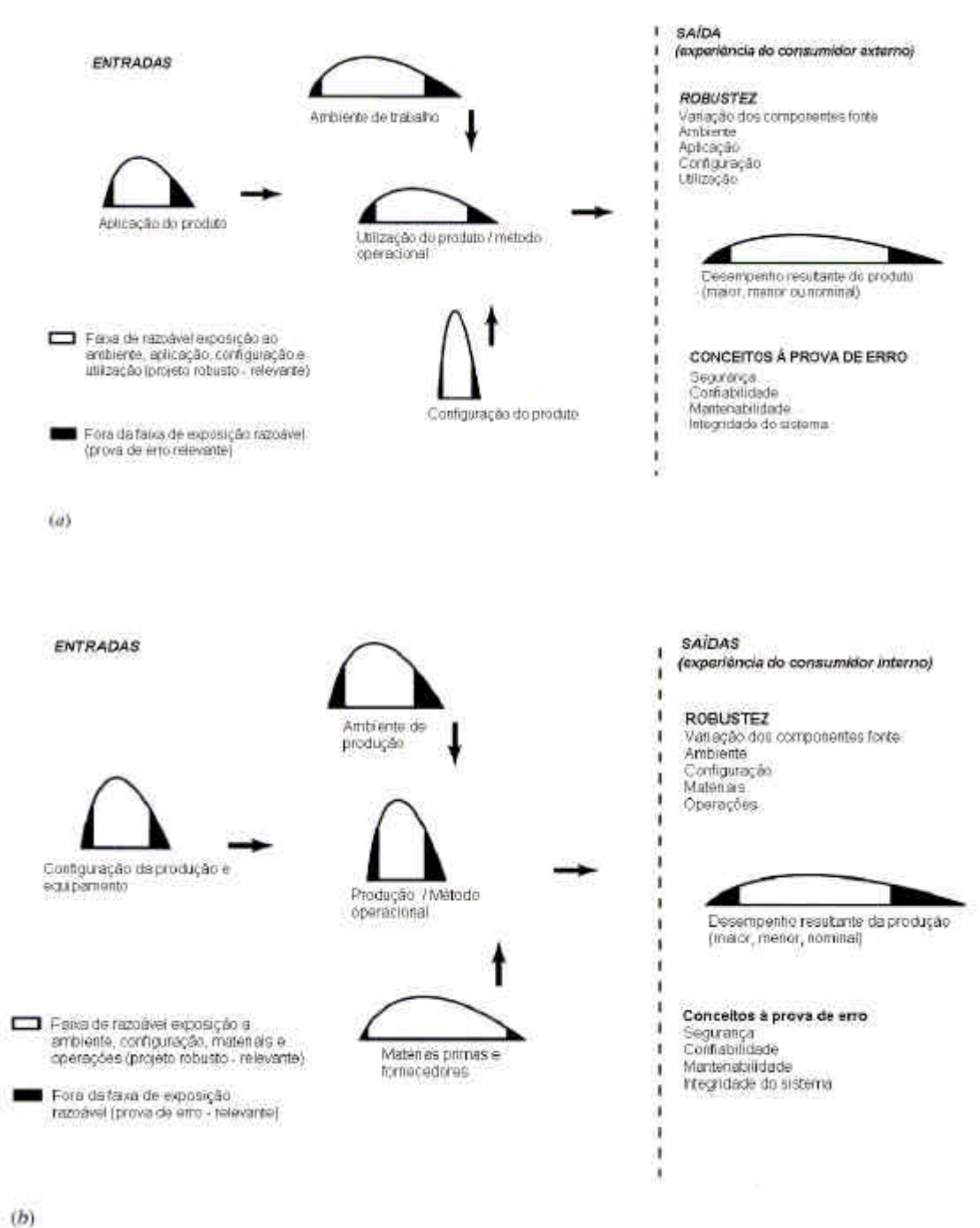


Figura 1 Variação do desempenho relativo ao conceito de processo robusto e de à prova de erro. (a) Variação do desempenho do produto, a partir de uma visão do consumidor externo. (b) Variação do desempenho da produção, a partir de uma visão do cliente interno. Figura traduzida de Kolarik [1].

1.2 Análise sistêmica do processo de usinagem

A análise sistêmica do processo de usinagem permite identificá-lo como um conjunto de ações e atividades de transformação de uma matéria-prima (e.g.: placa ou forjado) em uma peça primária usinada, necessitando de operações complementares de acabamento (rebarbação), inspeção e pintura. Todas as etapas do processo de usinagem são coordenadas pelo programa de comando numérico - CN, que é elaborado a partir de informações extraídas do desenho da peça.

Atualmente, é comum se trabalhar com informações tridimensionais da peça, nos chamados sólidos. Para isso existem programas CAM (Computer Aided Manufacturing) que permitem a simulação do programa CN, ou seja esses programas permitem a simulação do caminho da ferramenta na matéria – prima conforme o programa CN delineado. Além disso, há também outra ferramenta de grande importância, à medida que as máquinas aumentam as velocidades características de corte e translação, como o caso das máquinas de usinagem em alta velocidade, que são os programas de simulação de máquinas. Neste caso, a partir de informações CAD (Computer Aided Design) e de movimentos da máquina, juntamente com informações do programa CN é possível prever uma eventual colisão do cabeçote da máquina na peça ou interferência da peça no envelope de translação da máquina.

Dessa forma pode-se enxergar a Figura 2 como um fluxo normal do processo de usinagem, onde é possível identificar as informações da peça (sólido da peça) e matéria-prima como entradas do processo. Em seguida identificam-se as atividades de usinagem, propriamente dita, e como descritas anteriormente, que envolvem as atividades de definição de estratégia de usinagem, programação CN e simulações de caminho de ferramenta e movimentação de máquina (estratégia de usinagem). Ainda nessa fase é realizada a usinagem propriamente dita. Em seguida, operações complementares antes de ser dada conformidade da peça de acordo com a especificação de produto. Dada a conformidade, a peça segue para as operações de montagem de subconjuntos e conjuntos e depois montagem final.

No entanto, a atual abordagem adotada na análise sistêmica considera todos parâmetros ligados à peça e aos parâmetros de processo, mas, pouco é considerado em relação ao material. Isto é, o comportamento do material durante a usinagem ou também a interação do material com ferramenta durante o processo de usinagem.

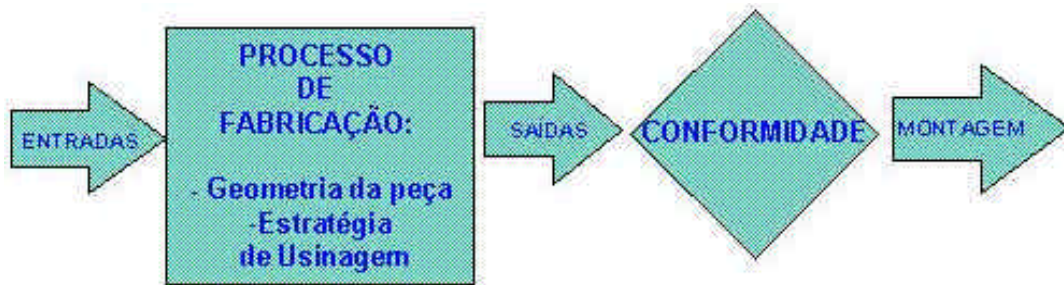


Figura 2 Fluxo de informações e material em transformação num processo de usinagem.

Considerações desse tipo ampliariam o espectro de análise do processo de usinagem e auxiliariam, por exemplo, a compreender o fenômeno de empenamento durante a usinagem, cuja ocorrência é freqüente nessa tecnologia, e que se configura um desvio do fluxo normal do processo. A Figura 3 evidencia esse desvio do fluxo normal de processo (em vermelho) caracterizado por operações corretivas e de retrabalho.



Figura 3 Desvio do fluxo normal do processo de usinagem.

1.3 Análise sistêmica do problema de empenamento

Para se encontrar a causa fundamental do empenamento em peças usinadas, a análise foi estruturada, no cenário tecnológico atual, a partir das entradas do processo, onde foram avaliadas as suas fontes potenciais de variação.

1.3.1 A variável geometria da peça - rigidez

Do ponto de vista do material de um componente estrutural, pode-se tratar a sua rigidez como a relação entre o módulo de elasticidade e a sua densidade. Por exemplo para uma viga em flexão, a sua rigidez (S) é dada por:

$$S = \frac{E^{1/2}}{\mathbf{r}} \quad \text{Eq. (1.1) [2]}$$

Ao considerar a geometria de uma peça para relacionar com a rigidez de um componente, deve-se considerar o fator de forma da peça, que para o caso de viga em flexão fica:

$$S = \frac{E^{1/2} \cdot \Phi_B^e}{\mathbf{r}} \quad \text{Eq. (1.2)}$$

onde Φ_B^E é o fator de forma que é dado por

$$\Phi_B^E = \frac{4 \cdot P \cdot l}{A^2} \quad \text{Eq. (1.3)}$$

onde A, é a área da seção transversal; e l, é o momento de inércia.

Em geral, peças com menor rigidez são mais suscetíveis ao empenamento e peças com mesma rigidez deveriam possuir comportamentos semelhantes durante a usinagem. Na prática, essa tendência se confirma, mas, não é regra geral. Existem peças que numa série inteira de produção nunca empenaram e repentinamente, da mesma forma que começam a empenar, param e vice-versa. A prática tem mostrado que, em alguns casos críticos, onde a alteração de geometria da peça foi feita com base na tentativa e erro, no sentido de aumentar a sua rigidez e com o efetivo aumento do peso da peça, tiveram relativo sucesso. Isto mostra que a rigidez da peça, apesar de importante, não é a causa fundamental do problema de empenamento. Assim, a geometria da peça, como definida pela engenharia do produto, pode ser considerada uma constante desse fluxo de processo. Isto é, a princípio, a geometria da peça não deveria sofrer alterações em função da usinagem, como parte de uma metodologia de solução do empenamento por tentativa e erro.

1.3.2 Variáveis de processo de fabricação

O programa de comando numérico é responsável pela definição de cada ação na usinagem: estratégia e ferramentas. Ao definir a estratégia de usinagem, o programador CN define os parâmetros de processo para uma determinada peça. Ou seja, toda vez que uma peça é usinada a mesma seqüência de corte é empregada assim como são utilizados os mesmos tipos de ferramentas. Somente se houver uma alteração na estratégia de usinagem ou troca de ferramenta, no sentido de otimizar o processo é que esse programa CN é revisado.

Do ponto de vista de ferramenta de corte, uma fonte potencial geradora de empenamento poderia ser a utilização de ferramentas desgastadas. Dessa forma a ferramenta não trabalharia nas condições ideais de corte do material do que realmente cortar. O gerenciamento adequado da recuperação de ferramentas e de recuperação das mesmas permite uma manutenção do

padrão de utilização de ferramentas nas diversas fases da usinagem, desde o desbaste até o acabamento [3].

1.3.3 A variável material

Em geral, os materiais utilizados para usinagem são comprados conforme especificação de material e de fornecedores previamente qualificados. A cada recebimento de material, estão previstos ensaios de recebimento e juntamente com os certificados de qualidade é possível verificar se o material está conforme sua especificação. Em geral as especificações adotadas envolvem basicamente composição química, propriedades mecânicas (estáticas e dinâmicas) e requisitos de corrosão [4;5]. Assim, todo material que chega na Usinagem para ser trabalhado foi aprovado segundo a sua especificação. Logo, do ponto de vista das propriedades do material isto não deveria ser problema para a usinagem, pois os materiais são fornecidos conforme especificação.

Neste cenário, a conclusão parece ser que não há problemas aparentes no processo, pois com geometria definida, material especificado, programação CN elaborada e ferramentas controladas, todas as variáveis estão sob controle. Mas o fato é que, com frequência, são fabricadas peças empenadas a partir de forjados, perfis extrudados e, principalmente, a partir de placas laminadas de liga de alumínio, que constituem o grande universo de fabricação da usinagem. Isto reforça a idéia de se estudar a influência do material no empenamento, como será visto a seguir.

1.4 Relevância do papel do material no empenamento

Em geral, a análise do empenamento durante a usinagem se limita em verificar o processo somente. Isto significa que o grande foco de estudo reside nos parâmetros de corte, tipos de ferramenta e na estratégia de corte adotada [6]. Existe, no entanto, uma variável do processo que nem sempre é levada em conta que é o material.

O entendimento do comportamento do material durante a usinagem vem ganhando mais importância à medida que é reconhecido como uma variável limitadora do desempenho global do processo. Empresas como a Pechiney –

Rhenalu [7] e a Corus [12] além de grupos de trabalho envolvendo operadores, fabricantes de matéria-prima e montadores [13,14].

Na verdade, este cenário sugere uma situação na qual se tem uma determinada característica do material cuja variação excede as características usuais do processo de usinagem. Ou seja, essa característica é uma propriedade do material cuja variação é maior do que a robustez do processo de usinagem pode absorver; e que dentro de certos valores, não tem influência no desempenho da usinagem. No entanto, acima de uma faixa de valores, reduz o desempenho do processo gerando peças empenadas que, à princípio, são reprovadas para as operações subseqüentes - Figura 4. A comparação da Figura 4 com a Figura 1 (b) mostra que quando essa característica trata-se de uma propriedade do material cuja variação é maior do que a robustez do processo, essa característica cai em valores fora da faixa de exposição razoável do processo. Ainda nessa figura é possível observar que o rendimento global do processo é limitado pelo componente de menor robustez. Sendo, portanto, responsável pela geração de produtos fora da especificação.

Nesse contexto, resta saber qual característica do material está envolvida no desempenho da usinagem e verificar se, de alguma forma não está definida na especificação do material.



Figura 4 Fonte de variação de processo.

Trabalhos recentes evidenciam o crescente envolvimento tanto acadêmico quanto tecnológico sobre a ligação específica entre matéria-prima e

empenamento em usinagem [15]. Os fornecedores de matéria-prima têm mostrado algum desenvolvimento nessa área como a Pechiney-Rhénalu [7] e a Corus Aluminium Rolled Products [12]. A Corus (antiga Hoogovens) tem trabalhado numa metodologia para determinação da distribuição de tensões residuais utilizando difração de raios-X [16] e também patenteou a varredura e medição de tensões residuais em placas utilizando o método de ultrassom [17]. A Corus tem duas patentes relacionadas a fabricação de placas espessas e buscando conjugar resistência mecânica, tenacidade e minimização de distorção durante a usinagem [18,19]. A Alcoa tem trabalhado com placas espessas, acima de 152 mm (6 polegadas) de espessura para a fabricação de painéis integrados para a fabricação de asas e patenteou o processo de elaboração e processamento da liga [20]. Nessa mesma linha de fabricação de placas espessas de alumínio com propriedades otimizadas, a Pechiney-Rhenalu patenteou um processo de fabricação de placas de ligas da série 7XXX [21] e ligas de alumínio - cobre com baixo nível de tensão residual [22]. Neste cenário, observa-se que há muito trabalho de desenvolvimento interno em andamento nas empresas fabricantes de placas de alumínio e que, pela análise das patentes, o diferencial de competitividade entre essas empresas está nos ganhos relacionados a pequenos ajustes dos processos, seja na laminação, na adição de elementos de liga (e.g., zircônia para melhorar as propriedades de resfriamento rápido) ou no estiramento para melhorar e potencializar o envelhecimento artificial.

Segundo esses trabalhos, há uma ligação entre a história termo-mecânica do material e a geração de tensões residuais no produto, o que possui impacto direto sobre o desempenho do processo de usinagem [7;10] - Figura 5. Como pode ser observado, há uma propriedade do material relacionada com o problema de empenamento durante a usinagem e há uma lacuna na literatura a respeito da determinação dessa propriedade e a sua influência efetiva no desempenho do processo de usinagem.

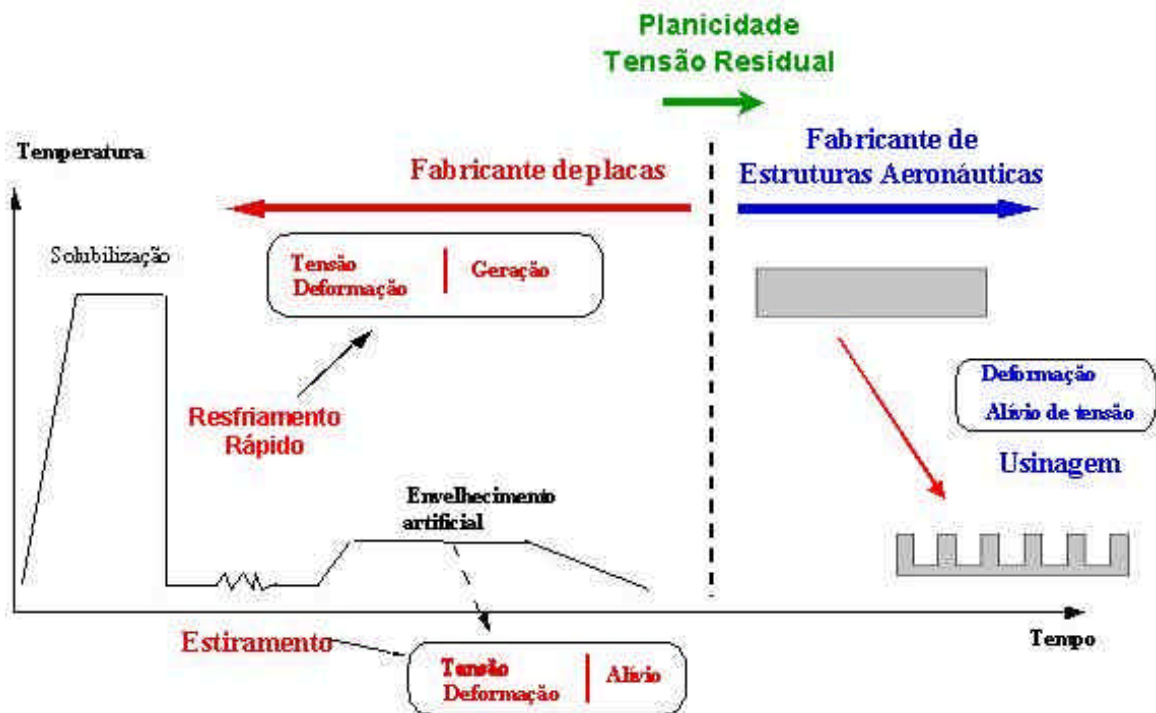


Figura 5 – Fontes de geração e alívio de tensões residuais na fabricação de placas de liga de alumínio. Modificada de [10].

1.5 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a determinação da tensão residual em placas laminadas de ligas de alumínio da série 7XXX e correlacioná-la com o empenamento durante usinagem. Como objetivo secundário, pretende-se estabelecer um critério de classificação de placas com base no nível de tensão residual visando garantir estabilidade no processo de fabricação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligas de alumínio da série 7XXX

Dois representantes da liga da série 7XXX, a liga 7050-T7451 e 7475-T7351, foram escolhidos para estudo neste trabalho. Segundo a classificação desenvolvida pela Aluminum Association [23], chamado de sistema internacional de classificação de ligas (International Alloy Designation System - IADS) [24], para ligas laminadas o primeiro dígito indica o grupo de liga ou o principal elemento de liga, o segundo dígito indica modificações da liga original ou limites de impureza e os últimos dois dígitos identificam a liga de alumínio. Então no caso das ligas da série 7XXX o zinco (Zn) é o elemento principal e quando combinado com pequenas quantidades de magnésio resulta em ligas tratáveis termicamente de elevada resistência. Geralmente, outros elementos como cobre e cromo são também adicionados em pequenas quantidades. Os dígitos após a letra que designa cada uma das ligas, mostra a seqüência específica de tratamentos termomecânicos básicos que o material é submetido para chegar na condição de fornecimento. No caso, o T7 significa que o material foi solubilizado e superenvelhecido / estabilizado. Os dígitos adicionais como T_51 significam que, no caso de placa, ela passou por um processo de alívio de tensão por estiramento com uma deformação plástica permanente de 1 – 3 %. As especificações de materiais das placas da liga 7050-T7451 [4] e 7475-T351 [5] podem trazer mais detalhes, por exemplo, sobre composição química, propriedades mecânicas e espessuras de fornecimento.

2.2 Tendências na fabricação de placas de alumínio

Os avanços em ligas de alumínio para aplicações aeroespaciais durante as últimas décadas têm sido associadas com um melhor entendimento das relações entre composição, processamento, microestrutura e propriedades [25;26]. O conhecimento básico tem origem em duas fontes diferentes: a literatura científica fornece as principais diretrizes para essas relações [29;30]; e desenvolvimentos industriais que fornecem informações detalhadas de como

o processamento afeta as propriedades e microestruturas. A combinação adequada das informações de aplicação no produto [31] e de requisitos estruturais do material (microestrutura – processamento - propriedade) obtidas de ambas as fontes tem substituído a abordagem do tipo ‘tentativa e erro’ para o projeto de uma liga, mas também tem reduzido significativamente o tempo de desenvolvimento para se conseguir resultado desejado como o caso da Pechiney [7] e da Corus [12,16]. Trabalhos publicados pela Alcoa [31] e pela Pechiney [37,38] revelam a preocupação com a adequação dos produtos laminados ao uso pelos fabricantes de estruturas aeronáuticas [27]. Para cumprir essa tarefa as novas ligas devem oferecer baixo peso estrutural, alta tenacidade a fratura [3], durabilidade e segurança [34;35] em espessuras cada vez maiores [36].

2.3 Fontes de geração e alívio de tensões residuais

Durante o processo de fabricação de placas laminadas de ligas de alumínio existem diversas etapas que podem contribuir tanto para a geração quanto para o alívio de tensões residuais. Na maioria dos casos o nível destas tensões ainda é elevado o suficiente para influenciar fortemente o processo de usinagem [39]. O gerenciamento adequado das etapas do processo de fabricação permite a obtenção de placas com maior ou menor tensão residual sem alterar as propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas e as de corrosão (exfoliação e corrosão sob tensão) [38]. A Figura 5 mostra essas etapas de fabricação e sua influência na geração e alívio das tensões residuais.

2.3.1 O perfil de tensões residuais

O perfil final de tensões é dependente da história termo-mecânica do processo [7;11;12]. O processo de estiramento, segue o resfriamento rápido, e consiste em deformar plasticamente a placa, à frio, de 1 a 3% [4;5]. Essa operação altera o perfil de tensões residuais presente na placa após o resfriamento rápido. O estiramento atua na tensão residual da placa no sentido de atenuar o perfil de tensões obtidas no processo de resfriamento rápido. A Figura 6 mostra a alteração do perfil de tensões residuais gerado pelo processo de estiramento para uma liga de alumínio 7010.

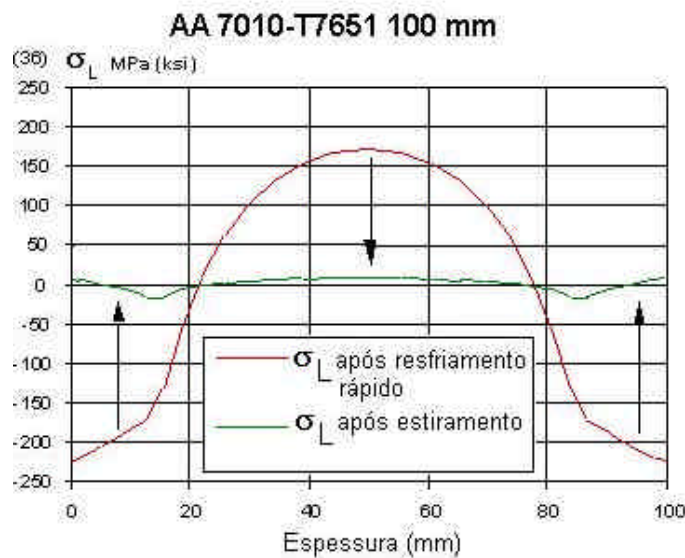


Figura 6 - Efeito do estiramento no perfil de tensões residuais. Modificada de [10]

Da mesma forma esse fenômeno ocorre para as placas das ligas 7050 [4] e 7475 [5]. Logo, o que se pode observar na Figura 6 é que o estiramento tem um efeito de transformar a forma da curva de tensões de um formato liso (tipo "U" invertido) e com grandes tensões para um formato com inflexões (tipo "W") e com tensões diminuídas em até uma ordem de grandeza em relação às iniciais.

2.4 Tensão residual

Os efeitos da tensão residual nos materiais e nos componentes de engenharia vêm despertando interesse de várias áreas do conhecimento, tanto do ponto de vista acadêmico quanto do ponto de vista tecnológico. Trabalhos relevantes nessa área remontam a década de 50 [40] em três grandes abordagens: metodologias e técnicas experimentais para a determinação da tensão residual; efeitos da tensão residual na vida útil e no processamento de componentes estruturais; e a determinação da origem das tensões residuais associadas aos processos de transformação dos materiais. Nos parágrafos a seguir serão vistos os conceitos, métodos de medição de tensão residuais mais utilizados. E também será detalhado o método e a modelagem adotada neste trabalho.

2.4.1 Definição de tensão residual

As tensões residuais podem ser definidas como aquelas que permanecem num material ou componente após ter sido fabricado ou processado na ausência de forças externas ou gradientes térmicos. Em geral, as técnicas de medição de tensão residual medem preferencialmente deformações, a partir das quais as tensões são deduzidas utilizando os parâmetros apropriados para cada material tais como módulo de Young e coeficiente de Poisson.

2.4.2 Tipos de tensão residual

Em função da escala considerada, as tensões residuais podem ser classificadas como macro e como micro tensões residuais, ambas podendo estar presentes no material ao mesmo tempo. As macro tensões residuais freqüentemente referidas como tipo I, atuam em todo o volume de um determinado componente sobre uma dimensão muito maior que o tamanho de grão. Essa classe se refere às tensões que se desenvolvem no material de um componente numa escala maior que o tamanho de grão. As micro tensões residuais, que se originam a partir das diferenças existentes na microestrutura, podem ser classificadas como tipo II e tipo III. As tensões residuais tipo II são micro tensões residuais que operam ao nível de tamanho de grão. A existência dessas tensões é esperada em materiais monofásicos devido à anisotropia existente entre cada grão do material. Da mesma maneira, espera-se a existência dessas tensões em materiais polifásicos devido a diferenças de propriedades entre essas fases. Já as tensões residuais tipo III são geradas em nível atômico. Essencialmente, essas tensões resultam da presença de discordâncias e outros defeitos cristalinos. Freqüentemente as tensões tipo II e III são consideradas uma única classe chamada microtensões.

2.4.3 Métodos para medição da tensão residual

As principais técnicas para a determinação de tensões residuais são:

1. Método do furo cego;
2. Difração de raios-X;
3. Síncrotron;
4. Difração de neutrons;

5. Curvatura e remoção de camadas;
6. Crack compliance [42;43];
7. Magnético;
8. Ultrassom;
9. Raman / Fluorescência.

A seleção da técnica mais adequada para a determinação de tensões residuais deve levar em conta aspectos práticos; aspectos dos materiais; e características de medição.

Do ponto de vista prático, a escolha da técnica de medição de tensão residual deve também considerar requisitos de custo, disponibilidade do equipamento, facilidade de transporte, velocidade de medição, existência de um procedimento - padrão e o nível de experiência necessário.

Da mesma forma, do ponto de vista do material em análise, a escolha deve cobrir fatores tais como a classe do material que pode ser examinado com uma técnica específica, informação de uma propriedade necessária, preparação da superfície, etc.

As características de medição incluem informações das características físicas de cada técnica incluindo a resolução, penetração, tensão média na área ou volume, tipo de tensão, estado de tensão, gradiente de tensão, volume amostrado e incerteza.

Cada técnica de medição possui suas vantagens e desvantagens, sendo que a sua aplicação está vinculada à adequação ao escopo da análise em andamento. A Tabela 1 fornece um panorama dos métodos, tipo de tensão (escala) medida por cada uma delas e o que se observa em cada caso. Dessa forma, fatores como material, técnica de medição, características físicas da técnica experimental e custo são fundamentais para a definição da técnica experimental mais adequada para uma análise de tensões residuais num componente estrutural ou matéria - prima. Outro fator importante que deve ser levado em consideração é o tipo de análise que se pretende fazer com os dados obtidos, principalmente quando a análise de tensões residuais não é atividade fim mas atividade intermediária de um estudo de maior abrangência.

2.4.4 Método de remoção de camadas por usinagem

Neste trabalho o método escolhido foi o de remoção de camadas [41]. O do método parte do princípio que uma peça plana que contenha tensões residuais, caso tenha uma parte retirada por um processo qualquer, deforma-se de tal forma a manter o equilíbrio estático das forças e momentos internos. Esta deformação é representada por uma deflexão, representada por uma flecha (f). Essa deflexão naturalmente depende do tipo e da magnitude da tensão residual envolvida, cuja distribuição através da espessura do corpo de prova pode ser caracterizada por uma função $\sigma(e)$, onde “e” é a espessura remanescente do corpo de prova.

Tabela 1 – Tipo de tensão (escala) medida por cada técnica experimental.

Técnica Experimental	Tipo de Tensão	Observações
Furo Cego	Macro	Habilidade do experimentador
Difração de Raio X	Macro / Micro	Para aço, resolução de 1 mm de diâmetro e 15 μ m de profundidade
Síncrotron	Macro / Micro	Mede somente deformação. Obtenção de tensão, raramente
Difração de Neutrons	Macro / Micro	Análise de custo elevado e baixa disponibilidade
Remoção de Camadas	Macro	O método de remoção de camadas pode ser combinado com outras técnicas de medição tal como difração de raios X e magnético para dar informações do perfil de tensões residuais.
Magnético	Macro	Sensível a microestrutura, anisotropia e textura.
Ultrassom	Macro	Habilidade do experimentador
Raman / Fluorescência	Macro	Análise de custo elevado e baixa disponibilidade

2.4.5 Cálculo das tensões residuais e da energia elástica armazenada

O tratamento analítico das tensões residuais tem como marco os trabalhos de TREUTING e READ [40] onde o método de remoção de camadas foi aplicado em chapas finas de material. A teoria envolvida neste trabalho, tem como base a teoria de placas desenvolvida por Timoshenko [49], e foram consideradas as tensões principais do material; e essas tensões foram explicitamente expressadas como funções de curvaturas.

Trabalhos desenvolvidos por DOI e KATAOKA [44] aplicaram esse mesmo princípio para o estudo de placas ortotrópicas. Nestes trabalhos a metodologia foi aplicada em placas de aço utilizando-se duas técnicas: método da deflexão ou curvatura e o método do “strain-gauge”.

Os trabalhos de JEANMART e BOUVAIST[11] são pioneiros na aplicação dessa teoria na análise de tensões residuais em placas espessas de alumínio. Neste caso foram determinadas as tensões residuais em placas espessas de alumínio durante o resfriamento rápido, tendo demonstrado boa correlação entre os dados calculados por análise numérica e obtidos experimentalmente pelo método de remoção de camadas.

Segundo NIKU LARI e FLAVENOT [48;50], o princípio do método é bastante simples – tendo sido desenvolvido e aplicado, primeiramente, em chapas finas como será visto a seguir.

2.4.5.1 Princípio do método de remoção de camadas em chapas finas

Segundo a literatura [48;50], uma peça plana que contenha tensão residual é deformada de tal maneira que mantenha o equilíbrio estático das forças e momentos internos. Num corpo de prova na forma de paralelepípedo, essa deformação pode ser representada por uma deflexão (f) – denominada flecha. A deflexão naturalmente depende do tipo e magnitude das tensões residuais envolvidas, cuja distribuição através da espessura do material pode ser caracterizada por uma função $\sigma(e)$, onde e é a espessura remanescente de material após a remoção de material (d_e) - Figura 7.

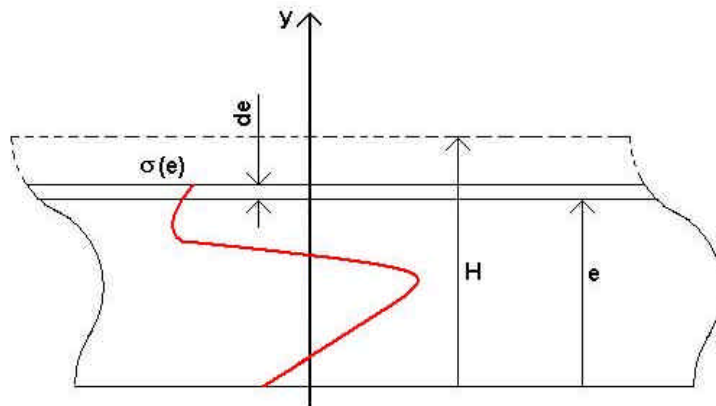


Figura 7 Redistribuição da tensão residual durante a remoção de camada. Adaptado de [47].

Se as camadas nas quais existam tensões residuais forem sucessivamente removidas por usinagem, o balanço das tensões internas e momentos são alterados. Para restabelecer este balanço, a peça deve mudar a forma. A variação da deflexão “df” produzida pela remoção de uma camada de espessura “de” pode ser relacionada com a tensão na superfície $\sigma_e(e)$ que existia na camada removida pela equação:

$$s_e(e) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{E \cdot e^2}{l^2} \cdot \frac{df}{de} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

onde l é a distância entre apoios e E é o módulo de Young dos materiais. Essa equação é baseada nas seguintes hipóteses: (1) o corpo de prova pré-tensionado é homogêneo e isotrópico; seus eixos coincidem com aqueles das tensões principais; (2) a tensão na direção da espessura é desprezível; (3) as tensões transversais serão inicialmente consideradas desprezíveis embora, a rigor, devam ser consideradas.

Portanto, somente a tensão principal $\sigma_e(e)$ paralela ao eixo do corpo de prova será considerado. Será comparado a uma viga sujeita a um momento fletor constante, que tem portanto uma curvatura constante - Figura 8. A variação da tensão será somente na espessura do corpo de prova, permanecendo idêntica em todo o seu comprimento e largura.

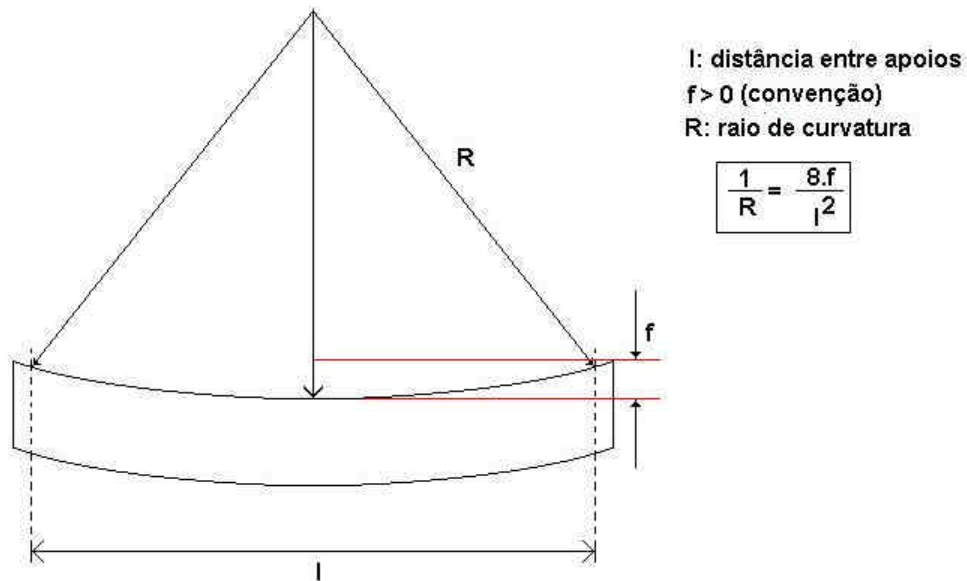


Figura 8 Corpo de prova com curvatura constante (R) após a remoção de camada.

Para demonstrar a equação 4, é necessário o equilíbrio do corpo de prova após a remoção de camada de espessura “ e ”, onde a dimensão do mesmo é e e a tensão na camada é $\sigma(e)$.

A remoção da camada causa um desequilíbrio de forças e momentos que o corpo de prova está submetido. A introdução das variações na força axial e momento são dados por:

$$\begin{aligned} dF &= -\mathbf{s}_e(e) \cdot b \cdot de \\ dM_f &= -\mathbf{s}_e(e) \cdot b \cdot de \cdot \frac{e}{2} \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

desde que o equilíbrio deve ser mantido, o corpo de prova é deformado de tal maneira a criar uma força dF' e um momento dM' contrários tal que:

$$\begin{aligned} dF' &= \mathbf{s}_e(e) \cdot b \cdot de \\ dM'_f &= \mathbf{s}_e(e) \cdot b \cdot de \cdot \frac{e}{2} \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Assim, o corpo de prova atua como se tivesse uma força normal atuando sobre ele:

$$dF' = \mathbf{s}_e \cdot b \cdot de \quad \text{Eq. (2.4)}$$

a uma distância $e/2$ do eixo, com um momento de:

$$dM'_f = \mathbf{s}_e \cdot b \cdot de \cdot \frac{e}{2} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

O momento fletor criado pela tensão no corpo de prova, assumido como uma viga de curvatura constante, pode ser relacionado a deflexão pela equação a seguir:

$$M = -\frac{8EI(e)}{l^2} \cdot f \quad \text{Eq. (2.6)}$$

onde I representa o momento de inércia remanescente. Obtido pela integração dupla da equação diferencial da viga:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad \text{Eq. (2.7)}$$

A equação 4 dá o valor da tensão $\sigma(e)$ presente em cada camada usinada no momento da remoção. Esta tensão, no entanto, não é a tensão procurada que é a tensão em cada camada antes de iniciar a operação de remoção. Para obter esse valor, a variação da tensão, para essa dimensão, que resulta da remoção das camadas situadas acima dela, devem ser adicionadas à tensão $\sigma(e)$.

Quando o corpo de prova é usinado para uma dimensão e' , e uma camada de espessura de' é removida, é como se a placa estivesse submetida a força a seguir:

$$dF' = \mathbf{s}_e'(e') \cdot b \cdot de' \quad \text{Eq. (2.8)}$$

situada a uma distância $e'/2$ da linha neutra – Figura 9 .

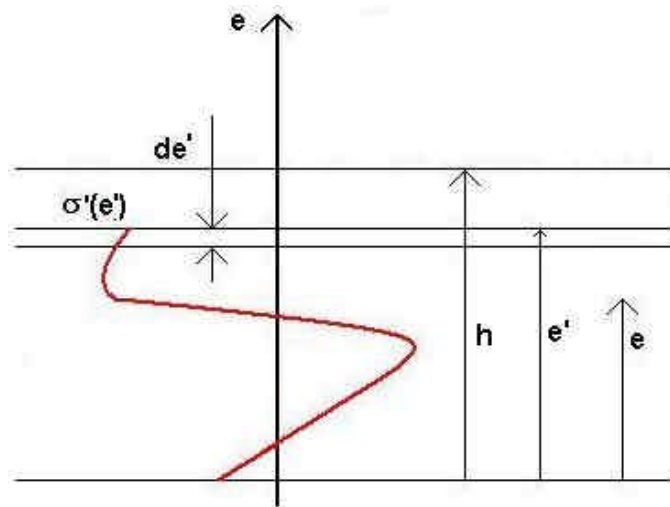


Figura 9 Situação onde o corpo de prova é usinado para uma espessura e' após a remoção de uma camada de espessura de' .

Esta força produz um momento:

$$dM' = \mathbf{s}_e(e') \cdot b \cdot de' \cdot \frac{e'}{2} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

De acordo com o raciocínio acima, a força dF' e o momento dM' produzidos pela remoção da camada de' na dimensão e' causa uma variação na tensão normal $d\sigma$ na dimensão e ($e < e'$) tal que:

$$d\mathbf{s} = d\mathbf{s}_n + d\mathbf{s}_f \quad \text{Eq. (2.10)}$$

$d\sigma_n$ devido a tensão normal é dada por:

$$d\mathbf{s} = \frac{dF'}{b \cdot e'} = \mathbf{s}_e(e') \cdot \frac{de'}{e'} \quad \text{Eq. (2.11)}$$

$d\sigma_f$ devido a tensão flexão produzida pelo momento dM' é dada por:

$$d\mathbf{s}_f = dM \cdot \frac{\frac{e - \frac{e'}{2}}{b \cdot \frac{e'^3}{12}}}{e'^2} = 6 \cdot \mathbf{s}_e(e') \cdot \left(e - \frac{e'}{2} \right) \cdot \frac{de'}{e'^2} \quad \text{Eq. (2.12)}$$

onde b representa a largura do corpo de prova.

Donde:

$$d\mathbf{s} = d\mathbf{s}_n + d\mathbf{s}_f = \mathbf{s}_e'(e') \frac{de'}{e'} \left(\frac{6 \cdot e}{e'} - 2 \right) \quad \text{Eq. (2.13)}$$

Foi visto, equação 4, que:

$$\mathbf{s}_e'(e') = -\frac{4}{3} \cdot \frac{E \cdot e'^2}{l^2} \cdot \frac{df}{de'} \quad \text{Eq. (2.14)}$$

portanto:

$$d\mathbf{s} = -\frac{8Eedf}{l^2} + \frac{8}{3} \cdot \frac{Ee'}{l^2} df \quad \text{Eq. (2.15)}$$

A variação total de tensão na dimensão e é devido a remoção das camadas acima da dimensão e e é dada pela expressão:

$$\Delta\mathbf{s} = -\frac{8Ee}{l^2} \int_h^e df + \frac{8}{3} \frac{E}{l^2} \int_h^e e' df \quad \text{Eq. (2.16)}$$

A tensão residual que existia no corpo de prova antes da usinagem é portanto igual a:

$$\mathbf{s}(e) = \mathbf{s}_e(e) + \Delta\mathbf{s} \quad \text{Eq. (2.17)}$$

ou seja,

$$\mathbf{s}(e) = -\frac{4}{3} E \frac{e^2}{l^2} \frac{df}{de} - \frac{8Ee}{l^2} \int_h^e df + \frac{8}{3} \frac{E}{l^2} \int_h^e e' df \quad \text{Eq. (2.18)}$$

ou

$$\mathbf{s}(e) = \mathbf{I} \left\{ -e^2 \frac{de}{df} + 6e[f(h) - f(e)] + 2 \int_f^e e' df \right\} \quad \text{Eq. (2.19)}$$

onde,

$$\mathbf{I} = \frac{4}{3} \frac{E}{l^2} \quad \text{Eq. (2.20)}$$

Quando tensões biaxiais estão envolvidas e quando os eixos das tensões residuais 1 e 2 são conhecidas e escolhidas de tal forma que elas sejam os próprios eixos de medição (deflexões 1 e 2), é possível determinar o valor da tensão residual aparente u_1 e u_2 utilizando as equações a seguir baseada na equação (2.8)

$$u_1 = -\frac{4}{3} E \frac{e^2}{l_1^2} \frac{df_1}{de} + \frac{8Ee}{l_1^2} [f_1(h) - f_1(e)] + \frac{8}{3} \frac{E}{l_1^2} \int_h^e e' df_1 \quad \text{Eq. (2.22)}$$

$$u_2 = -\frac{4}{3} E \frac{e^2}{l_2^2} \frac{df_2}{de} + \frac{8Ee}{l_2^2} [f_2(h) - f_2(e)] + \frac{8}{3} \frac{E}{l_2^2} \int_h^e e' df_2 \quad \text{Eq. (2.23)}$$

As tensões residuais aparentes estão relacionadas com as reais tensões residuais através da lei de Hooke:

$$\begin{aligned} u_1 &= \mathbf{s}_1 - \mathbf{n}\mathbf{s}_2 \\ u_2 &= \mathbf{s}_2 - \mathbf{n}\mathbf{s}_1 \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.24)}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_1 &= \frac{u_1 + \mathbf{n}u_2}{1 - \mathbf{n}^2} \\ \mathbf{s}_2 &= \frac{u_2 + \mathbf{n}u_1}{1 - \mathbf{n}^2} \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.25)}$$

A medição das flechas f_1 e f_2 a cada remoção de camada permite medir as tensões σ_1 e σ_2 .

2.4.5.2 Determinação das tensões residuais em peças espessas

A grande vantagem prática deste método está na possibilidade de se determinar as tensões residuais em peças espessas. É conhecido que a distribuição da tensão residual e sua magnitude varia em função da espessura da peça. Esta é a principal razão para o desenvolvimento de uma metodologia para calcular a tensão residual em peças espessas, baseada na medição de peças finas. O princípio do cálculo é baseado no conceito de fonte de tensão, Equação 4. Considera-se que, uma 'fonte' de tensão caracterizada por uma 'fonte' de deformação $\varepsilon_0(e)$, tal que:

$$\mathbf{s}_0(e) = E\mathbf{e}_0(e) \quad \text{Eq. (2.26)}$$

a peça, sob ação dessa 'fonte', reage em uma tensão de flexão $\sigma_f(e)$ e uma tensão normal $\sigma_n(e)$ de tal forma a manter o equilíbrio dos momentos e tensões na peça.

A tensão residual medida na peça é assim a superposição dos efeitos de três tensões:

$$\mathbf{s}(e) = \mathbf{s}_0(e) + \mathbf{s}_n(e) + \mathbf{s}_f(e) \quad \text{Eq. (2.27)}$$

se a distribuição das tensões numa amostra fina de espessura h (medida utilizando o método da deflexão) for conhecida, a fonte de tensão $\sigma_0(e)$ pode ser deduzida. Usando essa fonte, as reações $\sigma_f(e)$ e $\sigma_n(e)$ podem ser então recalculadas para uma espessura h' e a distribuição da tensão para a peça pode ser determinada pela equação:

$$\mathbf{s}'(e) = \mathbf{s}_0(e) + \mathbf{s}'_n(e) + \mathbf{s}'_f(e) \quad \text{Eq. (2.28)}$$

Assim, no caso de shot peening, para o qual esse método é bastante adequado utilizando uma amostra fina, foi mostrado que a distribuição das tensões residuais é dada pelas equações a seguir:

Na região plastificada do corpo de prova:

$$\mathbf{s}(e) = -\frac{4}{3} \frac{Ee^2}{l^2} \frac{df}{de} + \frac{8Ee}{l^2} \cdot [f(h) - f(e)] + \frac{8}{3} \frac{E}{l^2} \int_h^e e' df \quad \text{Eq. (2.29)}$$

Na região do corpo de prova que permaneceu na condição original:

$$\mathbf{s}(e) = \frac{8Ee}{l^2} \cdot f(h) + \frac{8}{3} \frac{E}{l^2} \int_h^e e' df \quad \text{Eq. (2.30)}$$

que, no último caso, pode ser escrito na forma:

$$\mathbf{s}(e) = Ae + B \quad \text{Eq. (2.31)}$$

onde:

$$A = \frac{8Ee}{l^2} \cdot f(h) \quad \text{Eq. (2.32)}$$

e

$$B = \frac{8}{3} \frac{E}{l^2} \int_h^e e' df \quad \text{Eq. (2.33)}$$

Na região não plastificada do corpo de prova, durante o shot peening, a distribuição da tensão é portanto linear. Ela é a soma da tensão de flexão e normal:

$$\mathbf{s}(e) = \mathbf{s}_n(e) + \mathbf{s}_f(e) \quad \text{Eq. (2.34)}$$

onde

$$\mathbf{s}_n(e) = \frac{h}{2} \cdot A + B \quad \text{Eq. (2.35)}$$

$$\mathbf{s}_f(e) = A \cdot \left(e - \frac{h}{2}\right) \quad \text{Eq. (2.36)}$$

$$\mathbf{s}_f^{Máx} = \frac{Ah}{2} \quad \text{Eq. (2.37)}$$

Foi visto que no caso de uma amostra de espessura h' , a distribuição linear das tensões fica:

$$\mathbf{s}'(e) = \mathbf{s}'_n(e) + \mathbf{s}'_f(e) \quad \text{Eq. (2.38)}$$

onde

$$\mathbf{s}'_n(e) = \mathbf{s}_n(e) \cdot \frac{h}{h'} \quad \text{Eq. (2.39)}$$

$$\mathbf{s}'_f(e) = \left(2 \cdot \mathbf{s}_f(\text{max}) \cdot \frac{h^2}{h'^3} + bJ_1 \frac{h'-h}{h^3} \right) \cdot \left(e - \frac{h'}{2} \right) \quad \text{Eq. (2.40)}$$

Esse modelamento serviu de base para o desenvolvimento deste trabalho. Com base nele foi desenvolvido um algoritmo [51] não somente para o cálculo da distribuição das tensões residuais mas também para a determinação da energia elástica armazenada na placa. A seção a seguir mostra o desenvolvimento do modelo mecânico incremental aplicado ao ensaio de remoção de camadas.

2.4.5.3 Explicação do modelo mecânico incremental [51]

Considera-se um corpo de prova na forma de uma barra contendo tensão residual na sua dimensão maior. O método permite determinar a tensão residual (u). Pela combinação de sua componente longitudinal (u_L) e transversal (u_T) medidos nos corpos de prova L e LT, é possível determinar o campo de tensão residual na placa laminada.

2.4.5.3.1 O efeito da remoção da i -ésima camada

A camada está entre a altura $h(i)$ e $h(i+1)$. Sendo Δu a diferença da tensão residual induzida no material remanescente do corpo de prova devido a relaxação de tensão $u(i)$, tensão que é assumida constante dentro da camada removida. A deflexão é uma flexão, portanto Δu é uma função linear em relação a espessura:

$$\Delta u = (ax + b)dh(i) \quad \text{Eq. (2.41)}$$

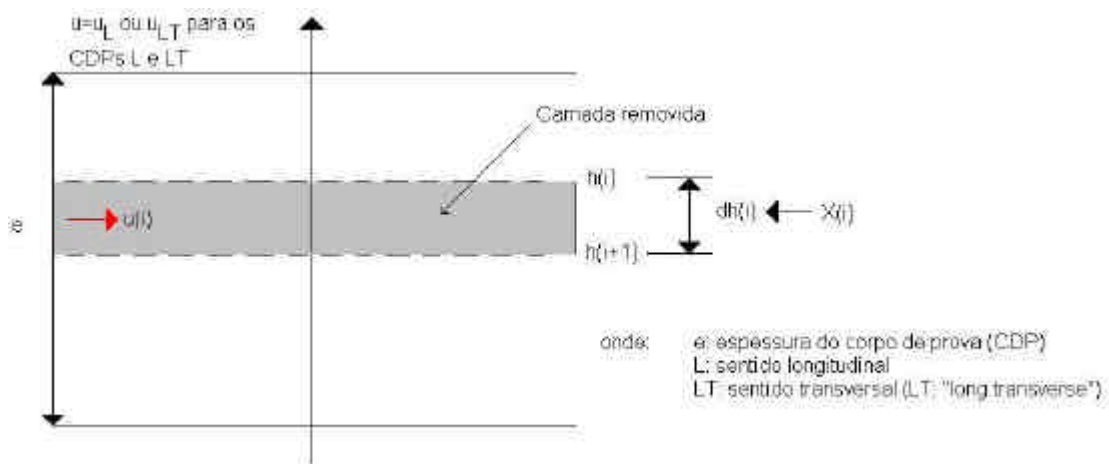


Figura 10 Remoção de camadas.

2.4.5.3.2 Equilíbrio de forças no corpo de prova

Antes de usinar o i -ésimo passe:

$$\int_0^{h(i)} (u + \Delta u) dx = 0$$

e

$$\int_0^{h(i+1)} (u + \Delta u) dx = 0$$

$$\int_0^{h(i)} (u + \Delta u) dx = \int_0^{h(i+1)} (u + \Delta u) dx \therefore u(i) = \frac{1}{2} ah^2(i+1) + bh(i+1) \quad \text{Eq. (2.42)}$$

2.4.5.3.3 Equilíbrio de momentos no corpo de prova

Antes da usinagem do i -ésimo passe:

$$\int_0^{h(i)} (u + \Delta u) x dx = 0$$

e

$$\int_0^{h(i+1)} (u + \Delta u) x dx = 0$$

$$\int_0^{h(i)} (u + \Delta u) x dx = \int_0^{h(i+1)} (u + \Delta u) x dx$$

Portanto,

$$\begin{aligned} \frac{ah^3(i+1)dh(i)}{3} + \frac{bh^2(i+1)dh(i)}{2} &= u(i)(h^2(i) - h^2(i+1)) \\ \frac{ah^3(i+1)}{3} + \frac{bh^2(i+1)}{2} &= u(i)(h^2(i) - h^2(i+1)) \end{aligned} \quad \text{Eq. (2.43)}$$

De (2.42) e (2.43) obtém-se:

$$a = a(i) = \frac{6u(i)h(i)}{h^3(i+1)}; b = b(i) = -\frac{u(i)}{h^2(i+1)}(3h(i) - h(i+1))$$

$a=a(i)$ e $b=b(i)$ são os coeficientes que determinam os efeitos da remoção da camada i na tensão $\Delta u(i)$.

2.4.5.3.4 Método da deflexão

A amostra contém tensão residual na maior dimensão. O raio da deflexão é constante e está relacionado com a deflexão medida na metade do comprimento do corpo de prova – conforme explicado em 2.4.5.1 e ilustrado na Figura 8.

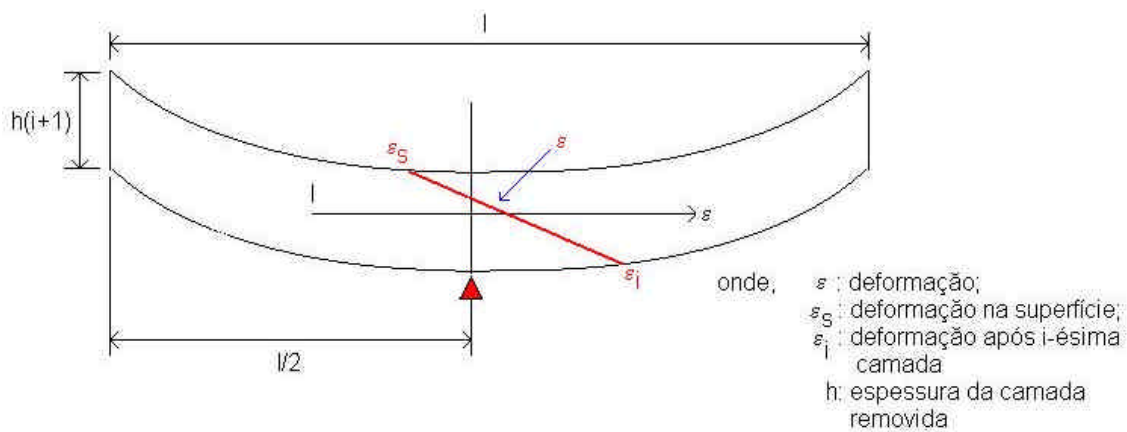


Figura 11 Esquema de deformação do corpo de prova após a i-ésima remoção de camada.

$$\frac{1}{R} = \frac{\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s}{h(i+1)} \Rightarrow (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s)(i+1) = \frac{8h(i+1)f(i+1)}{l^2} \quad \text{Eq. (2.44)}$$

Pode-se calcular o efeito sobre a deformação se essa deformação for medida sobre a superfície.

$$\Delta \mathbf{e}(i) = \frac{\Delta u(i)}{E}$$

$$\Delta \mathbf{e}(i) = \mathbf{e}(i+1) - \mathbf{e}(i)$$

$$\Delta(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s)(i) = (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s)(i+1) - (\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_s)(i) = \Delta \mathbf{e}_i(i) - \Delta \mathbf{e}_s(i)$$

$$\Delta \mathbf{e}_i(i) = \frac{\Delta u_i(i, x=0)}{E} = \frac{b(i)}{E}$$

$$\Delta \mathbf{e}_s(i) = \mathbf{e}_s^{\text{após}}(x = h(i+1)) - \frac{8f(i)}{l^2}(h(i) - h(i+1))$$

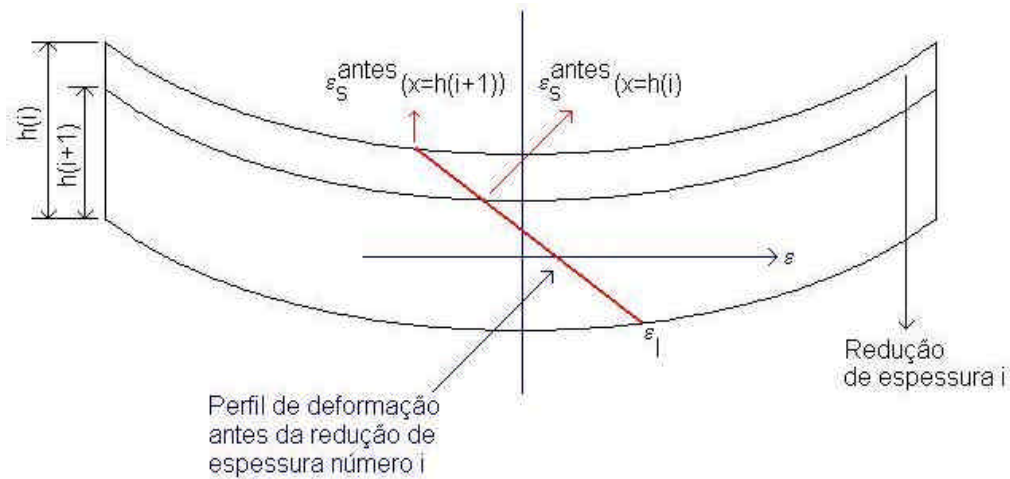


Figura 12 Esquema da deformação do corpo de prova antes da remoção de camada i e $i+1$.

$$\frac{1}{R} = \frac{8f(i)}{l^2}$$

$$\Delta \mathbf{e}_s(i) = \mathbf{e}_s^{\text{Após}}(x = h(i+1)) - \mathbf{e}_s^{\text{Antes}}(x = h(i+1)) + \frac{8f(i)}{l^2}(h(i) - h(i+1))$$

$$\mathbf{e}_s^{\text{Após}}(x = h(i+1)) - \mathbf{e}_s^{\text{Antes}}(x = h(i+1)) = \frac{\Delta u(x = h(i+1); i)}{E} = \frac{(a(i)h(i+1) + b(i)dh(i))}{E}$$

$$\Delta \mathbf{e}_s(i) = \frac{(a(i)h(i+1) + b(i)dh(i))}{E} + \frac{8f(i)}{l^2}(h(i) - h(i+1));$$

$$\Delta(\mathbf{e}_l - \mathbf{e}_s)(i) = \frac{a(i)h(i+1)dh(i)}{E} - \frac{8f(i)}{l^2}(h(i) - h(i+1))$$

$$\Delta(\mathbf{e}_l - \mathbf{e}_s)(i) = \frac{8f(i)}{l^2} \cdot [h(i+1)f(i+1) - h(i)f(i)]$$

Portanto,

$$a(i) = -8 \frac{E}{l^2} [f(i+1) - f(i)]$$

$$u(i) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{E}{l^2 dh(i)} \cdot [f(i+1) - f(i)] \cdot \frac{h^3(i+1)}{h(i)}$$

$$b(i) = \frac{4}{3} \cdot \frac{E}{l^2 dh(i)} \cdot [f(i+1) - f(i)] \cdot \frac{h(i+1) \cdot (3h(i) - h(i+1))}{h(i)}$$

Portanto,

$$\Delta S(i) = (a(i)x + b(i))dh(i)$$

$$\Delta S(i, x) = \frac{4E}{l^2} \cdot [f(i+1) - f(i)] \cdot \left[-2x + \frac{h(i+1)(3h(i) - h(i+1))}{3h(i)} \right]$$

$\Delta\sigma(i, x)$: efeito da remoção da camada i na tensão que está sobre x .

A tensão inicial é calculada levando em consideração todos os efeitos induzidos pelas remoções anteriores, da seguinte forma:

$$u(i) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{E}{l^2} \cdot [f(i+1) - f(i)] \cdot \frac{h^3(i+1)}{h(i) \cdot (h(i) - h(i+1))} - S(i); \text{ onde}$$

$$S(i) = \sum_{k=1}^{i-1} \Delta S \left(k, \frac{h(i) + h(i+1)}{2} \right)$$

Calcula-se $S(i)$ utilizando-se $(h(i)+h(i+1)/2)$ que está localizado no meio da camada removida.

$$S(i) = -\frac{4E}{3l^2} \sum_{k=1}^{i-1} [f(k+1) - f(k)] \cdot \left[-(h(i) + h(i+1)) + \frac{h(k+1) \cdot (3h(k) - h(k+1))}{3h(k)} \right]$$

Assim, o cálculo da tensão residual na camada removida i , considerando as remoções anteriores, é dada por:

$$u(i) = -\frac{4}{3} \cdot \frac{E}{l^2} \cdot [f(i+1) - f(i)] \cdot \frac{h^3(i+1)}{h(i) \cdot (h(i) - h(i+1))} - S(i) \quad \text{Eq. (2.45)}$$

onde $S(i)$ é a contribuição da remoção das camadas anteriores:

$$S(i) = -\frac{4E}{3l^2} \sum_{k=1}^{i-1} [f(k+1) - f(k)] \cdot \left[-(h(i) + h(i+1)) + \frac{h(k+1) \cdot (3h(k) - h(k+1))}{3h(k)} \right]$$

Eq. (2.46)

onde: E : módulo de Young

l : distância entre apoios do corpo de prova

$f(i)$: flecha medida após a remoção da i -ésima camada

$h(i)$: espessura remanescente do corpo de prova

$S(i)_L$: calculado conforme equação (4)

2.4.5.3.5 Cálculo do perfil de tensão residual longitudinal e transversal

Com base nos desenvolvimentos do item anterior é possível calcular o perfil de tensão residual ao longo da espessura do corpo de prova, no sentido longitudinal (L) e transversal(LT). A tensão principal longitudinal $\mathbf{s}(i)_L$ num plano i é dada pela equação (2.1).

$$\mathbf{s}(i)_L = \frac{u(i)_L + \mathbf{n}u(i)_{LT}}{1 - \mathbf{n}^2} \quad \text{Eq. (2.47)}$$

onde:

$u(i)_L$ e $u(i)_{LT}$: são calculados pelas equações 5 e 7 respectivamente

\mathbf{n} : coeficiente de Poisson

A tensão principal transversal $\mathbf{s}(i)_{LT}$ num plano i é dada pela equação 4.

$$\mathbf{s}(i)_{LT} = \frac{u(i)_{LT} + \mathbf{n}u(i)_L}{1 - \mathbf{n}^2} \quad \text{Eq.(2.48)}$$

Os valores de $u(i)_L$ e $S(i)_L$ são calculados pelas equações (2.49) e (2.50).

$$u(i)_L = -\frac{4}{3} \frac{E}{lf^2} [f(i+1)_L - f(i)_L] \frac{h^3(i+1)}{h(i)(h(i) - h(i+1))} - S(i)_L \quad \text{Eq.(2.49)}$$

onde: E : módulo de Young

lf : distância entre apoios do corpo de prova

$f(i)$: flecha medida após a remoção da i-ésima camada

$h(i)$: espessura remanescente do corpo de prova

$S(i)_L$: calculado conforme equação (4)

$$S(i)_L = \frac{4E}{lf^2} \sum_{k=1}^{i-1} [f(k+1)_L - f(k)_L] \left[-(h(i) + h(i+1)) + \frac{h(k+1)(3h(k) - h(k+1))}{3h(k)} \right]$$

Eq.(2.50)

Os valores de $u(i)_{LT}$ e $S(i)_{LT}$ são calculados pelas equações (2.51) e (2.52).

$$u(i)_{LT} = -\frac{4}{3} \frac{E}{lf^2} [f(i+1)_{LT} - f(i)_{LT}] \frac{h^3(i+1)}{h(i)(h(i)-h(i+1))} - S(i)_{LT} \quad \text{Eq. (2.51)}$$

onde: $S(i)_{LT}$: calculado conforme equação (2.52)

$$S(i)_{LT} = \frac{4E}{lf^2} \sum_{k=1}^{i-1} [f(k+1)_{LT} - f(k)_{LT}] \left[-(h(i)+h(i+1)) + \frac{h(k+1)(3h(k)-h(k+1))}{3h(k)} \right]$$

Eq. (2.52)

A partir da integração das curvas de tensões é possível calcular a energia elástica armazenada na placa, representada pelo parâmetro W, calculado conforme as equações (2.53) e (2.54) respectivamente para as direções longitudinal (L) e transversal (LT).

$$W_L (KJ / m^3) = \frac{500}{Ee} \sum_{i=1}^{N-1} \mathbf{s}_L(i) [\mathbf{s}_L(i) - \mathbf{ns}_{LT}(i)] dh(i) \quad \text{Eq. (2.53)}$$

$$W_{LT} (KJ / m^3) = \frac{500}{Ee} \sum_{i=1}^{N-1} \mathbf{s}_{LT}(i) [\mathbf{s}_{LT}(i) - \mathbf{ns}_L(i)] dh(i) \quad \text{Eq. (2.54)}$$

onde: e : espessura inicial da placa

$dh(i)$: espessura obtida pela diferença a i -ésima camada e a anterior.

A energia total é dada pela equação (2.55).

$$W_{TOTAL} = W_L + W_{LT} \quad \text{Eq. (2.55)}$$

A energia total dada por W_{TOTAL} será referenciada daqui por diante como parâmetro W, ou simplesmente W.

2.5 Correlação entre energia elástica armazenada e tendência ao empenamento

Segundo Heymès [7;8], há uma correlação entre a quantidade de energia elástica armazenada, representada por W , a tendência ao empenamento de peças usinadas a partir de placas laminadas. Esta correlação deve, porém, levar em conta a rigidez geométrica das peças, ou seja, para um mesmo nível de energia elástica, peças mais rígidas deverão sofrer menor empenamento. Isto quer dizer que para um certo valor de parâmetro W constante, peças cujas paredes possuem elevada relação altura/largura de parede (a/l) ou largura/espessura de alma (l/e) são mais suscetíveis a empenamento durante usinagem. Dados de literatura [7;8] indicam de uma maneira geral um comportamento conforme a Tabela 2. Em geral, placas com $W < 1,0 \text{ KJ/m}^3$ apresentam uma baixa probabilidade de empenamento. Por outro lado, placas com $W > 2,0 \text{ KJ/m}^3$ possuem uma alta probabilidade de apresentarem problemas de empenamento. Para placas com valores de W intermediários ($1,0 < W < 2,0 \text{ KJ/m}^3$), a suscetibilidade ao empenamento está associada a geometria da peça e estratégia de usinagem.

Tabela 2 - Probabilidade de empenamento em função da energia elástica armazenada[7].

Energia elástica - W (KJ/m^3)	Probabilidade de empenamento
$W < 1,0$	baixa
$1,0 < W < 2,0$	média
$W > 2,0$	elevada

O mapeamento do parâmetro W para várias espessuras de placas disponíveis em estoque permitirá conhecer o nível de tensão residual presente nas placas fornecidas atualmente em função do fornecedor. Algumas decorrências naturais desse trabalho são: (1) classificação do nível de tensão residual das placas por fornecedor através da determinação do W característico de cada fornecedor; (2) determinação do parâmetro W em função da espessura; (3) comparação dos parâmetros W dos fornecedores e classificação dos mesmos

nas faixas de baixa, média ou elevada probabilidade de empenamento e (4) análise da repetibilidade do fornecimento, através da análise da média e desvio-padrão dos parâmetros W obtidos das placas fornecidas. Essa é uma forma de analisar a estabilidade do processo do fornecedor sem, no entanto, conhecer ou auditar o processo de fabricação "*in-loco*". A determinação do parâmetro W e sua correlação com empenamento durante a usinagem representará um importante fator no controle da não conformidade de peças durante a fabricação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução deste trabalho foram realizados ensaios de remoção de camadas em placas para (1) a determinação do perfil de tensão residual ao longo da espessura da placa; e (2) a determinação do parâmetro W. Foram realizados ensaios de fabricação de peças reais utilizando placas de parâmetro W com valores pré-determinados a fim de correlacioná-los com a distorção das mesmas após usinagem.

3.1 Materiais utilizados

Os ensaios de remoção de camadas e de usinagem de peças reais foram realizados em placas das ligas de alumínio 7050-T7451 e 7475-T7351 em várias espessuras de fornecimento de seis fornecedores diferentes. A composição química, as propriedades mecânicas e de corrosão dessas placas são definidas nas especificações:

1. Society of Automotive Engineers. Aluminum alloy plate 6.2Zn – 2.3Cu - 2.2Mg - 0.12Zr (7050-T7451) solution heat-treated, stress relieved, and overaged. AMS 4050. [4]
2. Society of Automotive Engineers. Aluminum alloy plate 5.7Zn - 2.2Mg - 1.6Cu - 0.22Cr (7475-T7351) solution heat-treated, stress relieved by stretching, and precipitation heat treated. AMS 4202. [5]

3.2 Métodos utilizados

3.2.1 Amostragem para ensaio de remoção de camadas

Os ensaios de remoção de camadas foram realizados utilizando dois corpos de prova, sendo um na direção longitudinal (paralela à direção de laminação) e o outro na direção transversal (perpendicular à direção de laminação). A amostragem foi realizada conforme o croqui da Figura 13. Foram utilizados cortes por fresa e serra, com o devido cuidado para não aquecer a região adjacente ao corte, através do uso de fluido de corte.

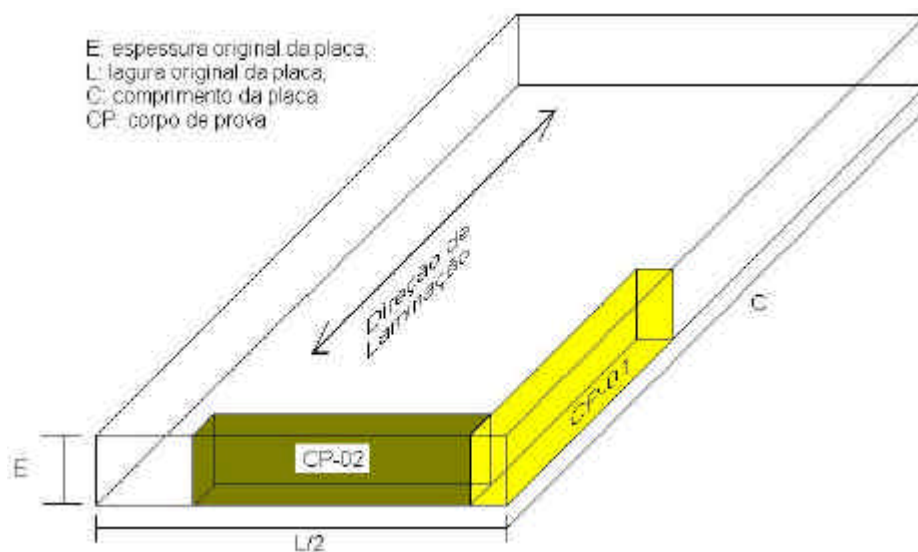


Figura 13 - Localização dos corpos de prova para ensaio de remoção de camada.

As dimensões dos corpos de prova devem obedecer a Tabela 3 à Figura 14 com tolerância de 0,1 mm em qualquer uma das dimensões.

Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova em função da espessura de placa.

Tipo	A (espessura da placa - mm)	B (5 x espessura – mm)	C (mm)
1	25,4	127	25
2	50,8	254	25
3	76,2	381	25
4	101,6	508	25
5	127,0	635	25
6	152,4	762	25
7	177,8	889	25
8	203,2	1016	25

Maiores detalhes dos corpos de prova são mostrados na Figura 14.

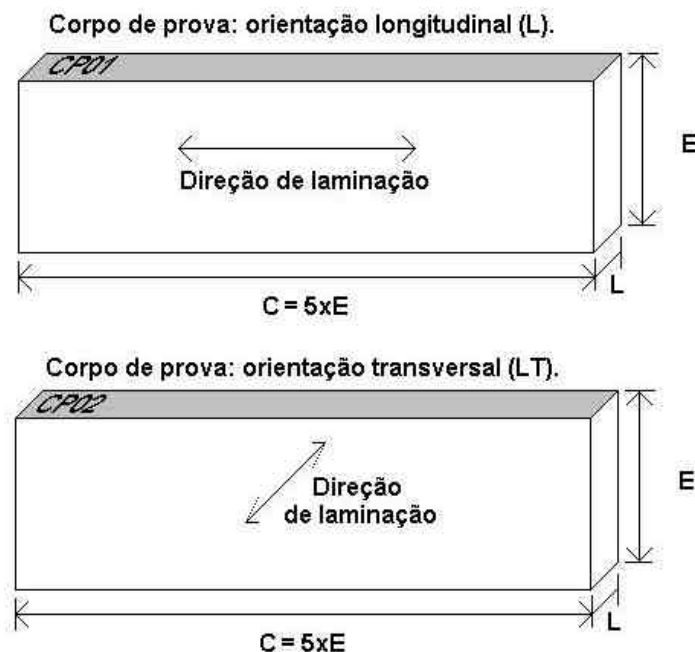


Figura 14 - Detalhamento do jogo de corpos de prova.

3.2.2 Ensaio de remoção de camadas

O ensaio consiste em retirar camadas sucessivas do corpo de prova, com espessura pré-determinada, conforme indicado na Tabela 4 até que restem menos de 10 mm no corpo de prova. A remoção de camadas deve ser realizada observando as seguintes condições de usinagem:

- profundidade de corte: conforme Tabela 4
- velocidade de corte: 250 - 700 m/min
- avanço por dente: 0,1 - 0,25 mm/dente

ferramenta: diâmetro 25 mm - 2 lâminas - inserto de metal.

O inserto da ferramenta para a realização do ensaio não deve apresentar desgaste excessivo. Antes do início do ensaio deve ser marcado o ponto central na face inferior do corpo de provas conforme mostra a Figura 15.

Após a marcação o corpo de prova deve ser posicionado sobre dois apoios conforme dispositivo esquematizado na Figura 16. Os apoios devem ser posicionados a 10 mm de cada extremidade do corpo de prova. Deve ser posicionado um relógio comparador no ponto central marcado conforme figura 6 e zerado antes do início do ensaio. O dispositivo deve garantir um

paralelismo entre o corpo de prova e a base dos suportes com desvio menor que 1 mm.

Tabela 4 – Espessura de camada removida em função da espessura de placa.

CLASSE	Espessura da placa (mm)	Camada removida (mm)
1	25,4	1
2	50,8	2
3	76,2	3
4	101,6	4
5	127,0	5
6	152,4	6
7	177,8	7
8	203,2	8

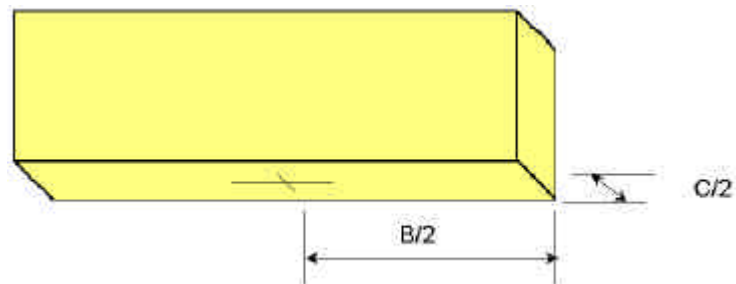


Figura 15 - Esquema da marcação na face inferior do corpo de prova.

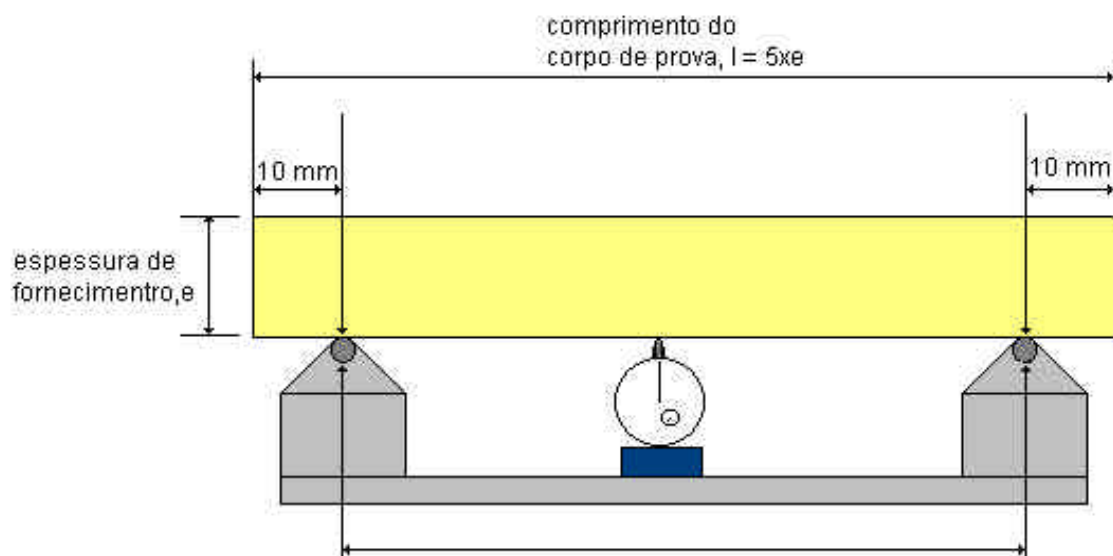


Figura 16 - Esquema do dispositivo de medição de flecha.

Após a remoção de cada camada, o corpo de prova deve ser novamente posicionado sobre os apoios e realizada a medição da flecha (f) e espessura remanescentes. A flecha deve ser sempre medida no ponto central previamente marcado na face inferior do corpo de prova. Estes valores devem ser anotados para inserção no programa de cálculo de energia elástica armazenada.

Por convenção fica definido que a flecha para baixo é positiva enquanto que para cima é negativa, conforme mostrado na Figura 17.

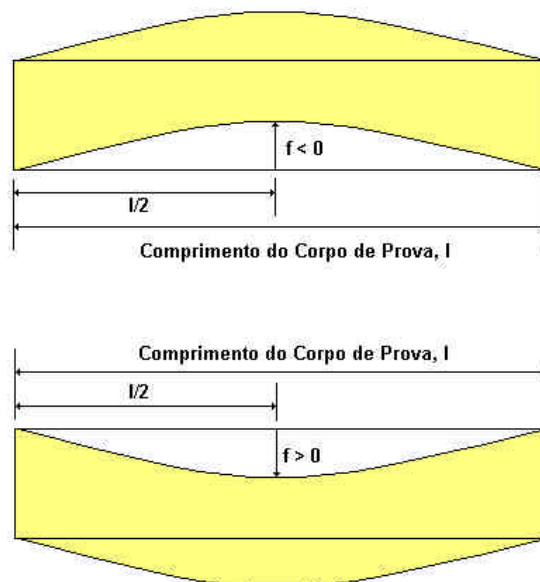


Figura 17 - Convenção de sinais para medição da flecha (f).

3.2.3 Cálculo da energia elástica armazenada e correlação com empenamento

O cálculo da energia elástica armazenada foi realizado com base nos modelagem desenvolvida no item 2.4.5. Para isso foi desenvolvido um programa de computador em linguagem Delphi que permite o calculo do perfil de tensões e da energia elástica armazenada (parâmetro W). De acordo com estes resultados foram escolhidas placas contendo níveis de energia elástica armazenada - valores de parâmetro W - considerados altos, médios e baixos. Estas placas foram usinadas para a fabricação de peças reais onde, em cada peça, foi verificado e medido o empenamento. Este empenamento foi

correlacionado com o valor W para cada caso avaliado. A geometria de peça escolhida para os testes de fabricação foi aquela considerada mais crítica quanto ao empenamento nas condições usuais de usinagem, dentre as geometrias de peças sendo usinadas no calendário de produção normal da empresa [9].

3.2.4 Ensaios de verificação da influência do processo no empenamento

Foram realizados ensaios de remoção de camada conforme descrito no item 2.2 retirando-se diversos corpos de prova de uma mesma placa 7050-T7451 e usinando-se em máquinas e parâmetros diferentes a fim de se avaliar a influência dos parâmetros de usinagem no empenamento. Foram utilizadas as condições de usinagem descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Influência do processo no empenamento: parâmetros de ensaio.

Parâmetro de Ensaio	Condição de Norma	Condição Embraer
Rotação	1.650 rpm	3.500 rpm
Avanço	250 mm/min	1.400 mm/min
Profundidade de Corte	3 mm	3 mm e 9 mm
Ferramenta	3 cortes / Aço rápido	2 cortes / Aço Rápido e Metal duro

3.2.5 Correlação de W x Empenamento após usinagem

3.2.5.1 Ensaio de usinagem em peças reais

Foram realizados testes fazendo-se a usinagem de peças reais em condições normais de fabricação e utilizando-se placas laminadas com valores diversos de energia elástica armazenada. O objetivo destes testes foi verificar se a variável energia elástica armazenada - parâmetro W - escolhida para quantificar a tendência de um material empenar seria capaz de prever adequadamente o desempenho em usinagem.

Os ensaios foram realizados nas peças descritas nas seções a seguir.

3.2.5.1.1 Baia do trem de pouso

Foram realizados dois ensaios na máquina Gantry, sendo um com uma placa do Fornecedor 2 com W igual a $1,21 \text{ KJ/m}^3$ e o outro com uma placa do Fornecedor 1 com W igual a $3,7 \text{ KJ/m}^3$.

3.2.5.1.2 Nervura I

Foram usinadas simultaneamente 3 peças a partir de três placas diferentes na máquina Gantry com as mesmas condições de usinagem.



Figura 18 - Disposição das placas durante a usinagem na máquina Gantry. [8]

Das três placas utilizadas duas foram fornecidas pelo Fornecedor 5, sendo uma normal de fabricação, outra de baixa tensão residual. A terceira placa foi selecionada dentre as fornecidas pelo Fornecedor 1.

3.2.5.1.3 Caverna da fuselagem

Esta peça foi originalmente concebida para ser fabricada em quatro partes que seriam montadas. Utilizando-se o conceito de “Design For Assembling” (DFA) a mesma foi modificada para monolítica. Esta peça apresenta paredes delgadas em uma estrutura complexa o que a torna propensa ao empenamento em usinagem. O ensaio de usinagem foi realizado utilizando-se uma placa 7475-

T7351 de 38,1 mm de espessura de baixa tensão residual ($W= 0,8 \text{ KJ/m}^3$) fabricada pelo Fornecedor 5 - Figura 19.



Figura 19 - Caverna do ERJ-170 durante a usinagem. [8]

3.2.5.1.4 Tampa dianteira

Nesse ensaio foram usinadas três peças a partir de uma placa de baixa tensão residual ($0,8 \text{ KJ/m}^3$). O posicionamento da peça na placa foi feito a três distâncias diferentes da face inferior conforme mostrado na Figura 20.

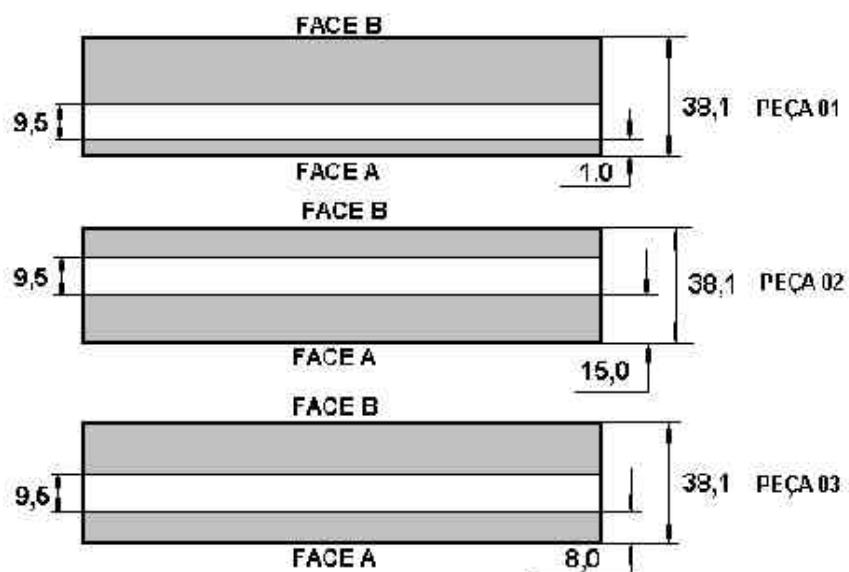


Figura 20 – Posicionamento da peça dentro da placa. [8]

Esta peça apresenta um problema crônico de empenamento. A mesma é normalmente usinada a partir de uma placa de espessura igual a 9,5 mm. Como a placa de baixa tensão disponível era de 38 mm, resolveu-se desbastá-la para retirar uma placa de espessura igual a 9,5 mm da mesma. Para tanto utilizaram-se três situações de localização a fim de avaliar a simetria do perfil de tensões. O objetivo desse ensaio foi verificar como uma peça fabricada com o mesmo material se comportaria em situações de tensões diferentes devido a esta diferença de posicionamento.

4 RESULTADOS

A partir do desenvolvimento da metodologia do ensaio de remoção de camadas (3.2.2), foram realizados ensaios de remoção de camadas concomitantemente com ensaios de fabricação de peças(4.4). Dessa forma foi possível estabelecer uma correlação entre o nível de energia elástica armazenada (valor do parâmetro W) e os valores de empenamento medidos. Estabelecida essa correlação, o passo seguinte foi fazer o levantamento dos perfis de tensão residual em placas disponíveis no estoque de matéria prima e verificar os valores de W para as várias espessuras e fornecedores.

4.1 Ensaios de verificação da influência do processo no empenamento

Os gráficos na Figura 21 representam o empenamento medido em corpos de prova retirados da mesma placa, no sentido longitudinal, usinados com parâmetros diferentes de usinagem convencional [8].

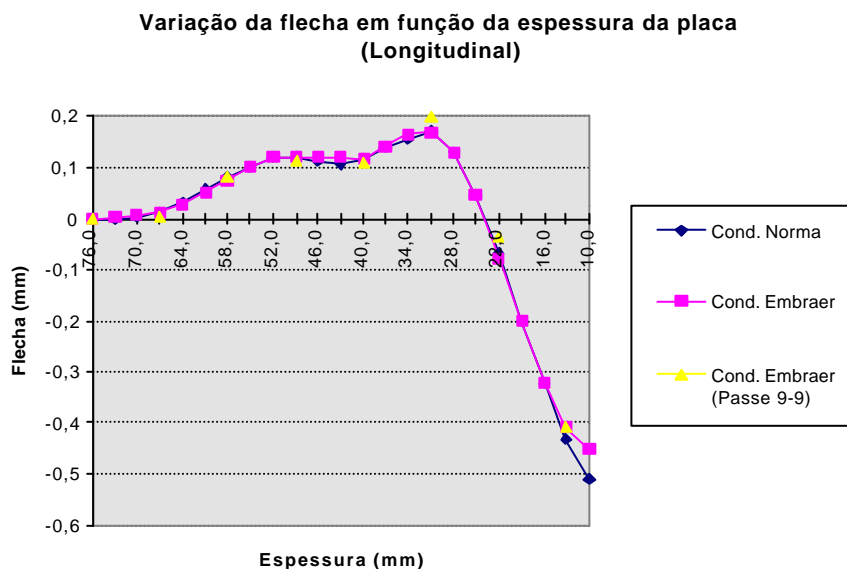


Figura 21 - Flecha medida na direção de laminação de uma placa de 3 polegadas de espessura para diferentes condições de usinagem. [8]

Os gráficos na Figura 22 representa o empenamento medido em corpos de prova retirados da mesma placa, no sentido transversal, usinados com parâmetros diferentes de usinagem convencional.

Os gráficos na Figura 23 representam um comparativo do empenamento medido em corpos de prova retirados da mesma placa, no sentido longitudinal, usinados com parâmetros diferentes de usinagem convencional e em alta velocidade.

Nota-se que para corpos de prova retirados de uma mesma placa o empenamento é praticamente independente das condições de usinagem, dentro da faixa de variáveis verificada.

Os resultados obtidos nos ensaios de remoção de camadas foram agrupados: (1) por ligas (7475-T7351 e 7050-T7451); e (2) por classe de espessura. A classe de espessura adotada está de acordo com a respectiva especificação de matéria-prima. Para as placas da liga 7475-T7351 as classes de espessura de acordo com a AMS 4202 C [8].

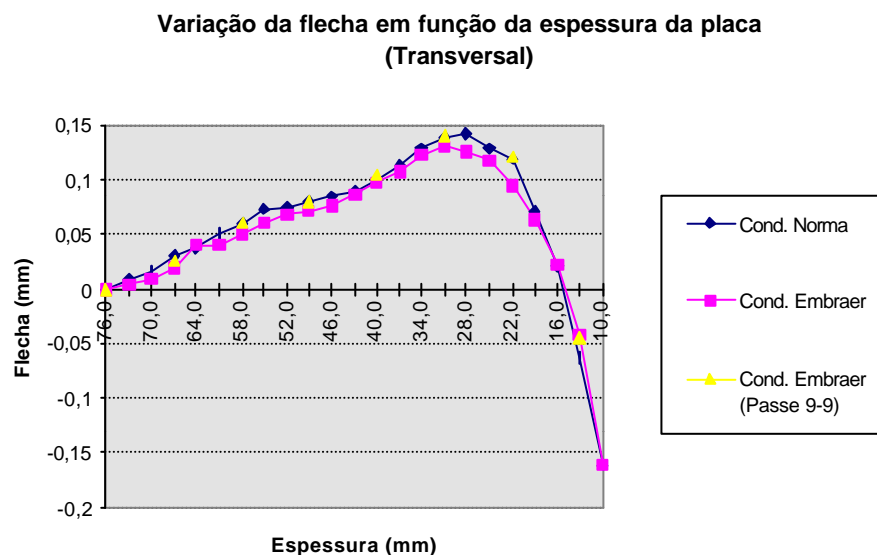


Figura 22 - Flecha medida na direção perpendicular à laminação de uma placa de 3 polegadas de espessura para diferentes condições de usinagem. [8]

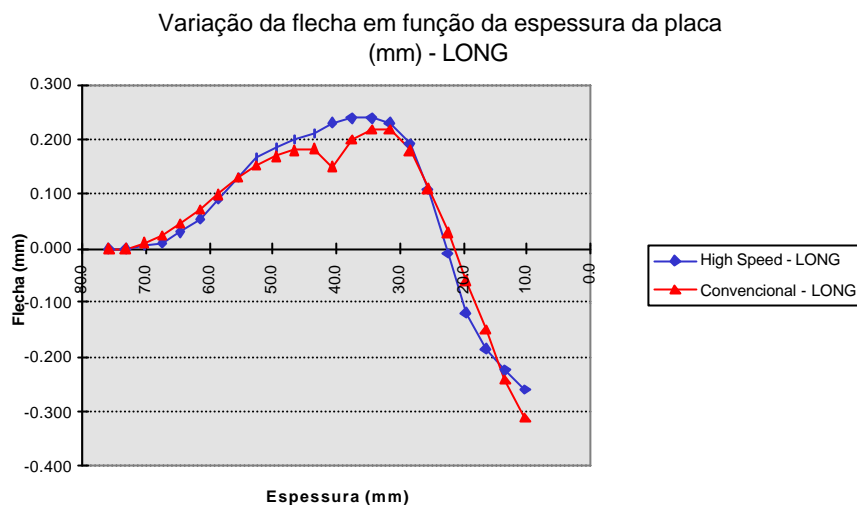


Figura 23 - Comparação de flecha na direção de laminação de uma placa de 3 polegadas de espessura usinada em equipamento convencional e usinagem em alta velocidade. [8]

Tabela 6 Classes de espessura de placas para liga 7475-T7351 segundo AMS 4202 [5].

Classe de Espessura	Espessura	
	Milímetros (mm)	Polegadas (pol.)
1	Acima de 6,35 a 38,10 excl.	Acima de 0,250 a 1,500 excl.
2	38,10	1,500
3	Acima de 38,10 a 50,80 incl.	Acima de 1,500 a 2,000 incl.
4	Acima de 50,80 a 63,50 incl.	Acima de 2,000 a 2,500 incl.
5	Acima de 63,50 a 76,20 incl.	Acima de 2,500 a 3,000 incl.
6	Acima de 76,20 a 88,90 incl.	Acima de 3,000 a 3,500 incl.
7	Acima de 88,90 a 101,60 incl.	Acima de 3,500 a 4,000 incl.

Para as placas da liga 7050-T7451 as classes de espessura estão de acordo com a AMS 4050 [4].

Tabela 7 Classes de espessura de placas para liga 7050-T7451 segundo AMS 4050 G.

Classe de Espessura	Espessura nominal	
	Milímetros (mm)	Polegadas (pol.)
1	Até 51	Até 2,000
2	Acima de 51 a 76 incl.	Acima de 2,001 a 3,000 incl.
3	Acima de 76 a 102 incl.	Acima de 3,001 a 4,000 incl.
4	Acima de 102 a 127 incl.	Acima de 4,001 a 5,000 incl.
5	Acima de 127 a 152 incl.	Acima de 5,001 a 6,000 incl.
6	Acima de 152 a 178 incl.	Acima de 6,001 a 7,000 incl.
7	Acima de 178 a 203 incl.	Acima de 7,001 a 8,000 incl.

4.2 Caracterização das placas

A caracterização das placas foi realizada em placas de matéria-prima disponíveis em estoque. Portanto, as placas são efetivamente aquelas aprovadas de acordo com as respectivas especificações de matéria-prima, definidas pela Engenharia do Produto, e utilizadas para a fabricação de peças estruturais primárias por usinagem.

4.2.1 Perfil de tensão residual normalizado

São apresentados a seguir os perfis médios de tensão residual com as espessuras normalizadas - denominado simplesmente como perfil de tensão residual normalizado - calculados a partir dos dados experimentais obtidos durante a realização dos ensaios de remoção de camadas para as placas da liga 7050-T7451 e 7475-T7351. Na abscissa, os gráficos possuem uma relação z/E (espessura normalizada) e na ordenada, os valores de tensão residual média. Conforme descrito na Tabela 6 e Tabela 7, os gráficos estão separados por classe de espessura por liga. No APÊNDICE 1, para cada fornecedor de placa de matéria-prima, os perfis estão separados por liga e por espessura. Conforme já foi dito, os ensaios foram realizados em função da disponibilidade de material no estoque. Dessa forma, não foi possível obter o mesmo universo de dados, para alguns fornecedores.

4.2.1.1 Liga 7475-T7351

Nos itens 4.2.1.1.1 e 4.2.1.1.2 apresentam os perfis de tensão residual médio longitudinal (L) e transversal (LT), respectivamente.

4.2.1.1.1 Sentido longitudinal

Os corpos de prova ensaiados estão de acordo com da amostragem descrita em 3.2.1. Neste caso, a maior dimensão do corpo de prova coincide com a direção de laminação da placa de matéria-prima.

A Figura 24 mostra o perfil de tensão residual médio normalizado de placas 7475-T351 com 25,4 mm de espessura para o Fornecedor 1. O valor máximo do perfil de tensão residual médio foi 10 MPa e o valor mínimo foi -10 MPa.

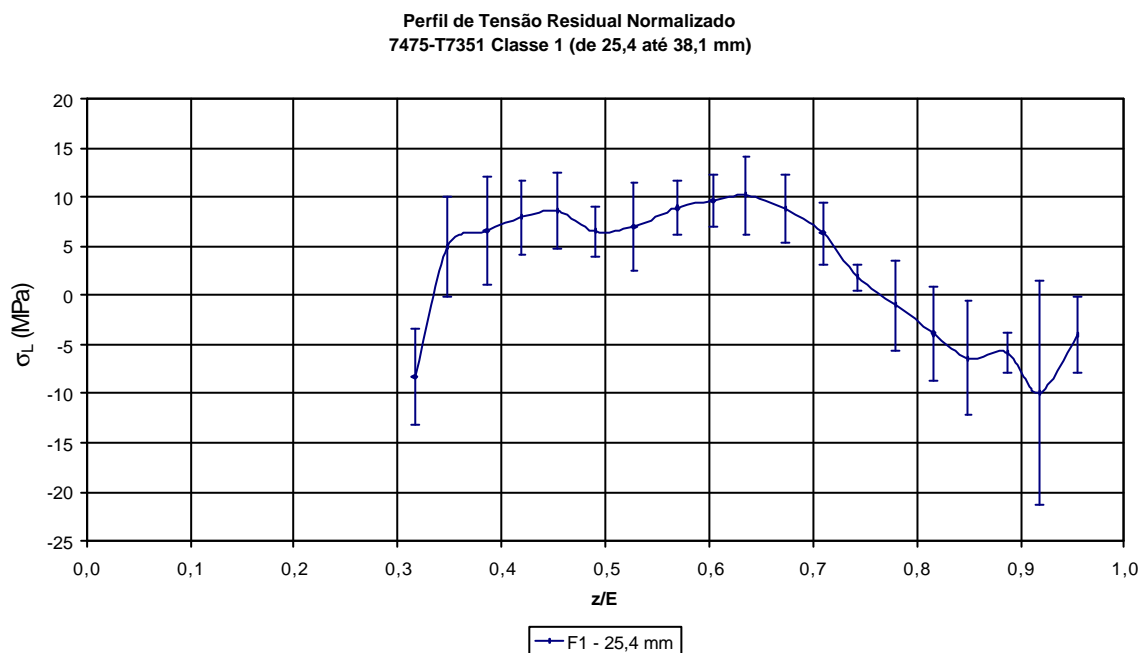


Figura 24 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7475-T7351 Classe 1.

A Figura 25 mostra o perfil de tensão residual médio normalizado de placas 7475-T351 com 50,8 mm de espessura para os Fornecedores 1, 2 e 5. Na prática, todos os perfis podem ser considerados simétricos, com um pico de tensão de tração no centro, dois picos de compressão para z/E em torno de 0,20 e 0,9. Os valores das tensões dos perfis para z/E próximos de 0,2 e 1,0 coincidem com as superfícies da placa. Para o Fornecedor 1, perfil de tensão residual médio normalizado variou de -25 MPa a 25 MPa. A variação perfil de tensão residual médio normalizado para o Fornecedor 2, de -20 MPa a 15 MPa. A menor variação do perfil de tensão residual médio normalizado foi para o Fornecedor 5, que ficou entre -10MPa e 12 MPa.

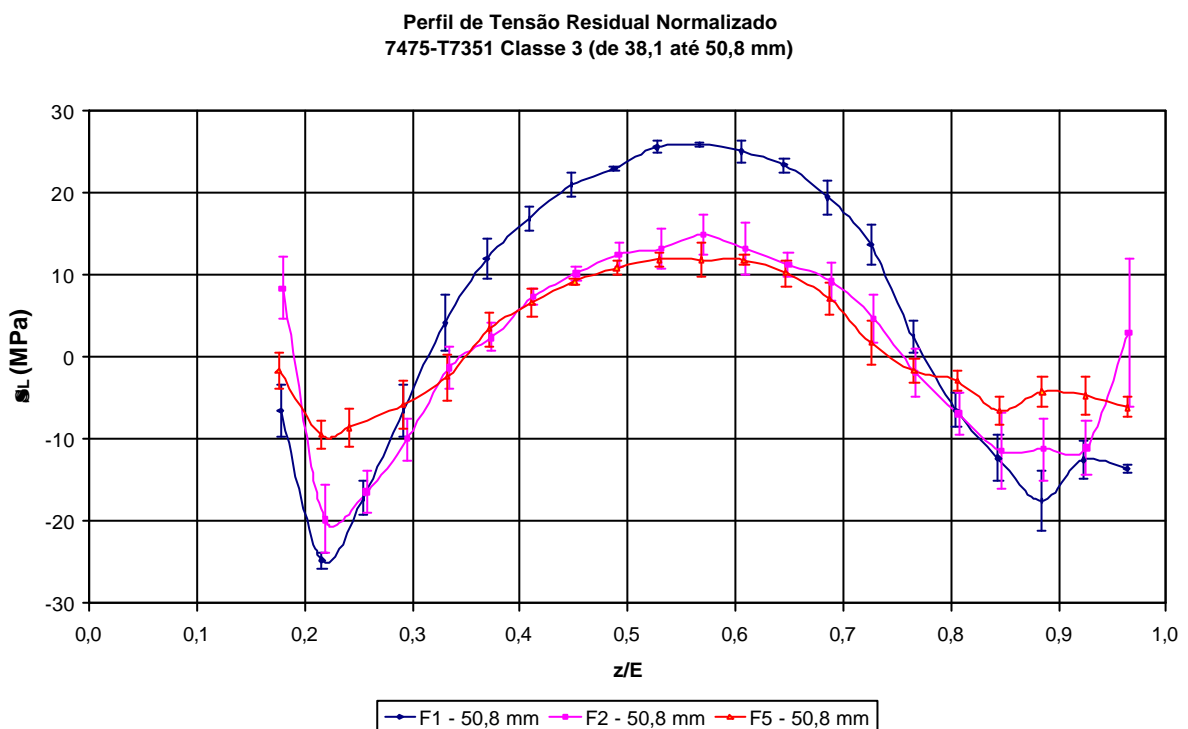


Figura 25 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7475-T7351 Classe 3.

4.2.1.1.2 Sentido transversal

A Figura 26 mostra o perfil de tensão residual médio normalizado de placas 7475-T351 com 25,4 mm de espessura para o Fornecedor 1. Os valores de tensão deste perfil variaram de -5 MPa a aproximadamente 8 MPa.

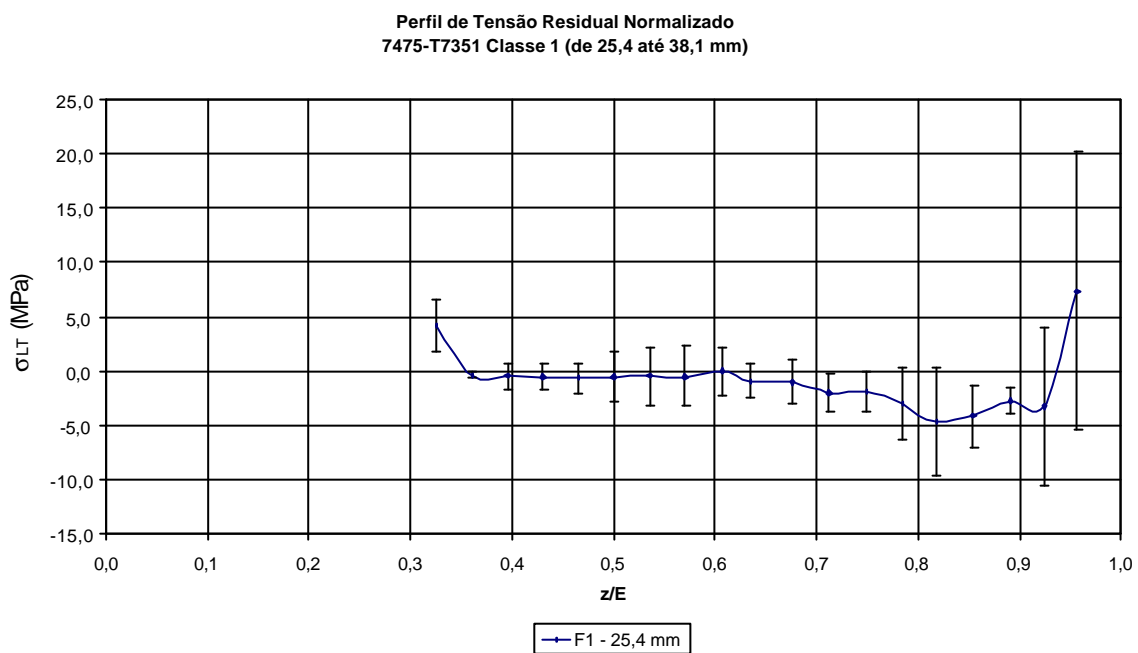


Figura 26 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7475-T7351 Classe 1.

A Figura 27 mostra o perfil de tensão residual médio normalizado de placas 7475-T351 com 50,8 mm de espessura para os Fornecedores 1, 2 e 5. Na prática, todos os perfis podem ser considerados simétricos, com um pico de tensão de tração no centro, dois picos de compressão para z/E em torno de 0,20 e 0,9. Os valores das tensões dos perfis para z/E próximos de 0,2 e 1,0 coincidem com as superfícies da placa. Para o Fornecedor 1, perfil de tensão residual médio normalizado variou de -16 MPa a 13 MPa. A variação perfil de tensão residual médio normalizado para o Fornecedor 2, de -18 MPa a 10 MPa. A menor variação do perfil de tensão residual médio normalizado foi para o Fornecedor 5, que ficou entre -8 MPa e 5 MPa.

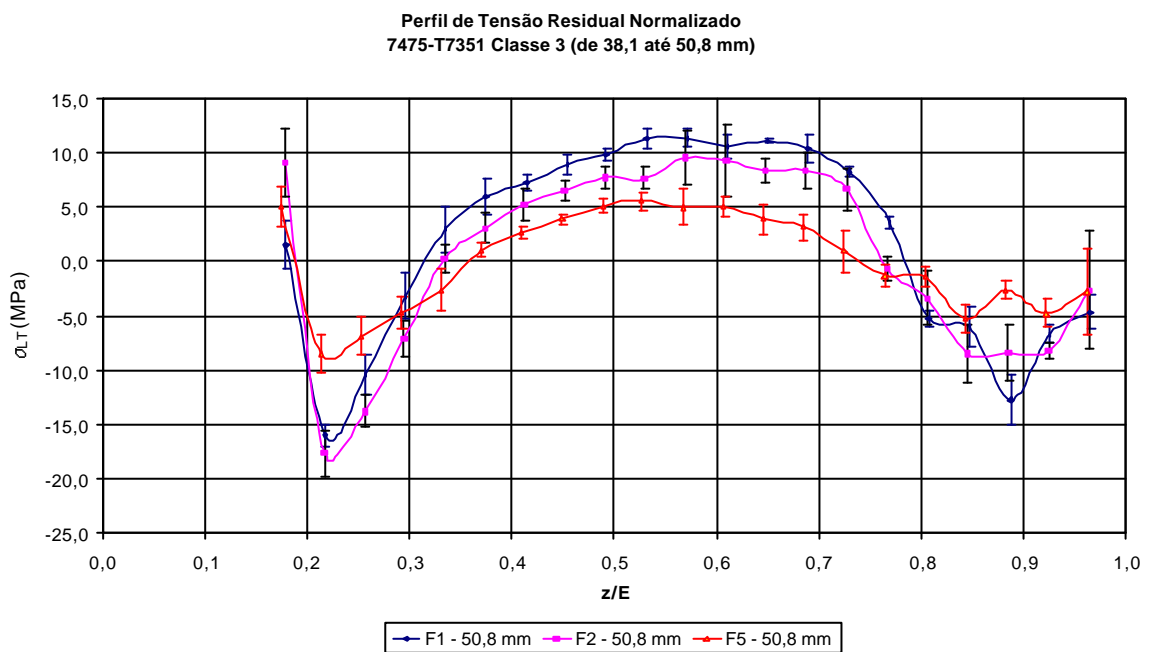


Figura 27 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7475-T7351 Classe 3.

4.2.1.2 Liga 7050-T7451

Nos itens 4.2.1.2.1 e 4.2.1.2.2 apresentam os perfis de tensão residual médio longitudinal (L) e transversal (LT), respectivamente.

4.2.1.2.1 Sentido longitudinal

A

Figura 28 apresenta os perfis de tensão residual médio para placas da liga 7050-T7451 para espessuras da classe 1 (até 50,8 mm). Com exceção da curva do Fornecedor 2 para a espessura de 12,7 mm, todas as outras curvas apresentaram simetria com valores variando de - 30 MPa na espessura de 50,8 mm para o Fornecedor 4, até 25 MPa na espessura de 25,4 mm para o Fornecedor 4. A menor amplitude do perfil de tensões residuais calculada foi o perfil do Fornecedor 5 para a espessura de 25,4 mm.

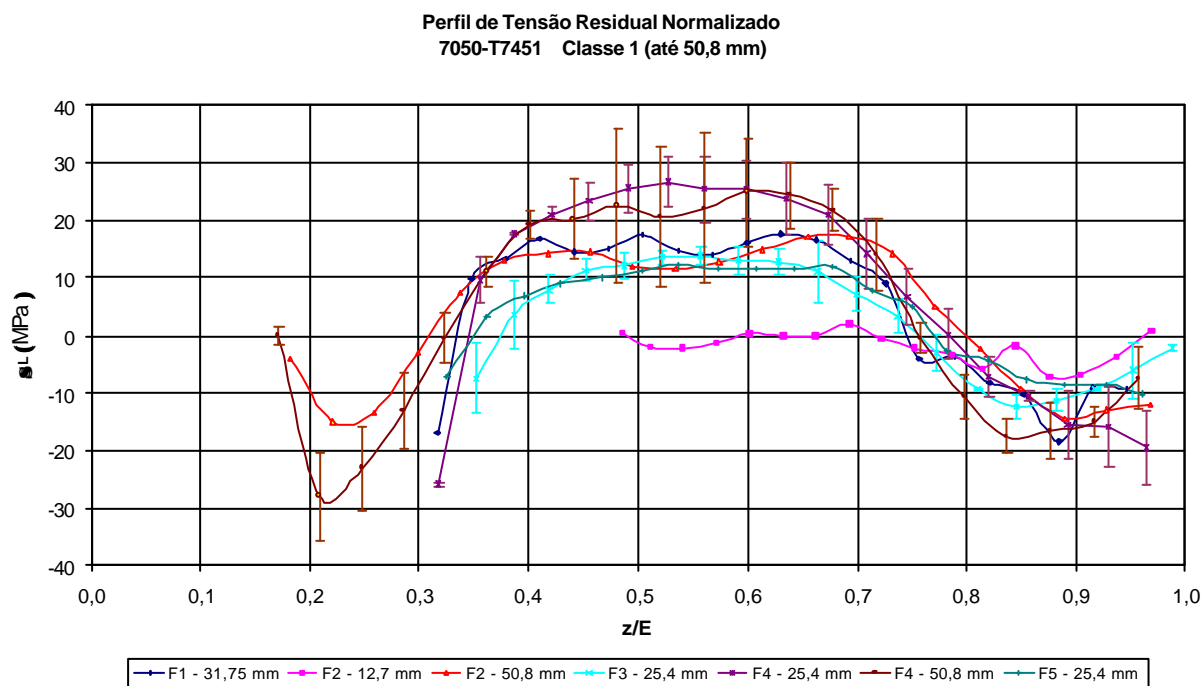


Figura 28 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 1.

A Figura 29 apresenta os perfis de tensão residual médio para placas da liga 7050-T7451 para espessuras da classe 2 (de 50,8 até 76,2 mm). As curvas apresentaram simetria com valores variando de - 20 MPa na espessura de 76,2 mm para o Fornecedor 1, até 20 MPa na espessura de 76,2 mm para o Fornecedor 6. A menor amplitude do perfil de tensões residuais calculada foi o perfil do Fornecedor 5 para a espessura de 76,2 mm, que variou de - 10 MPa a 10 MPa.

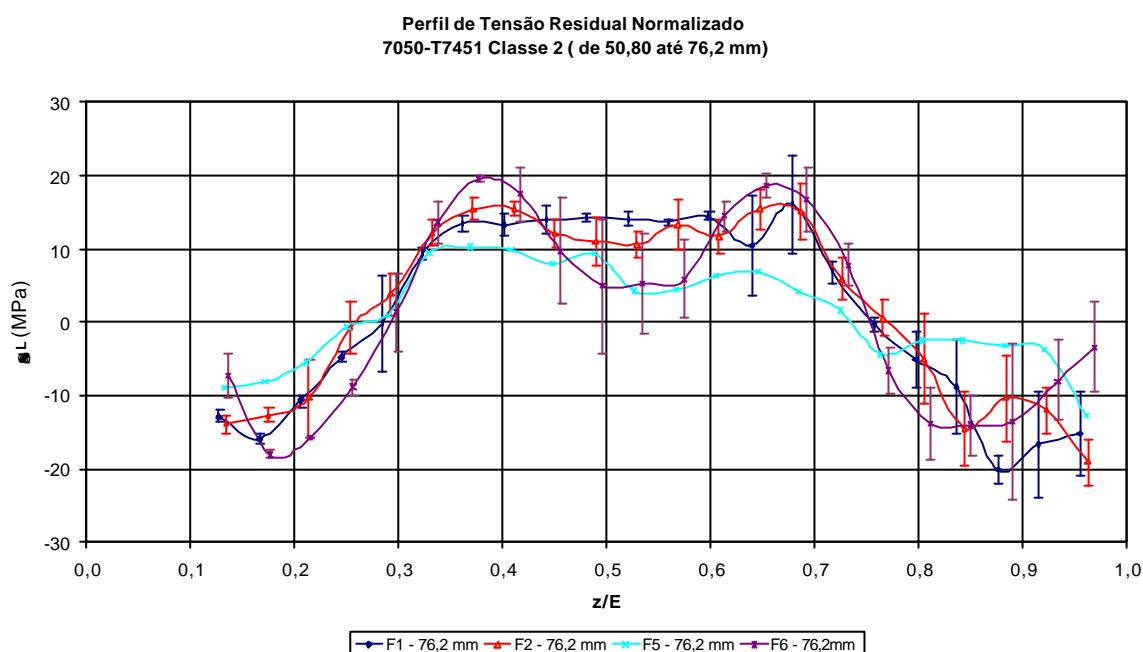


Figura 29 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 2.

A Figura 30 apresenta os perfis de tensão residual médio para placas da liga 7050-T7451 para espessuras da classe 3 (de 76,2 até 101,6 mm). Com exceção da curva do Fornecedor 4, as curvas apresentaram simetria com a curva do Fornecedor 2, na espessura de 101,6 mm, contendo o menor valor de - 24 MPa mas também o maior valor de 18 MPa. A menor amplitude do perfil de tensões residuais calculada foi o perfil do Fornecedor 5 para a espessura de 101,6 mm, que variou de - 12 MPa a 5 MPa.

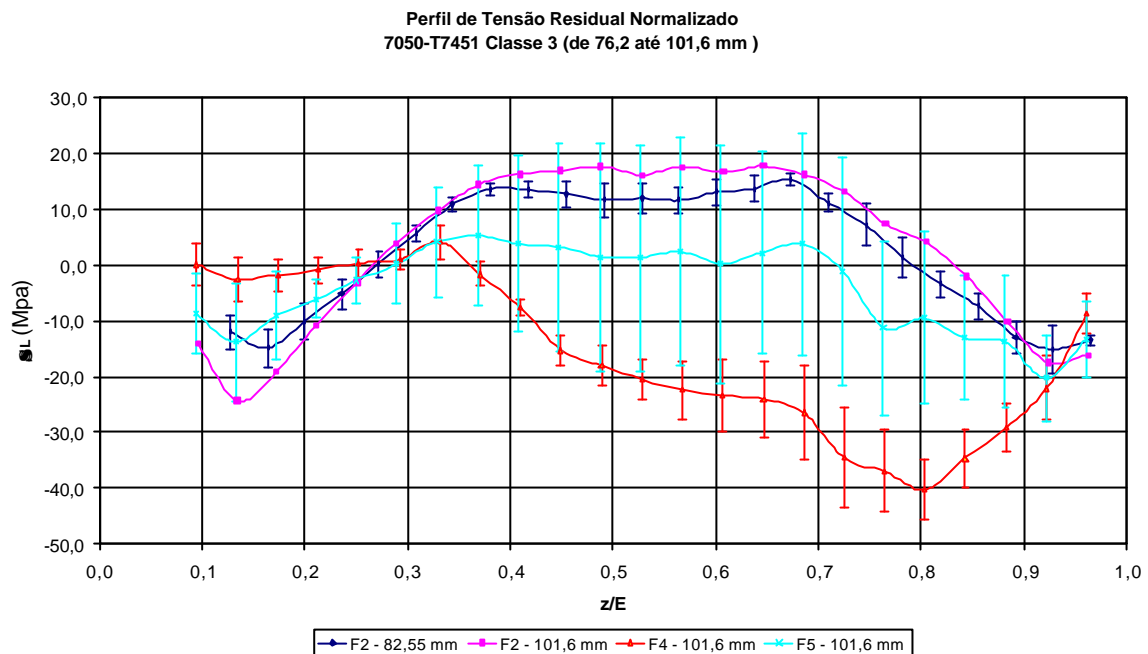


Figura 30 - Curvas de tensão residual longitudinal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 3.

A Figura 31 apresenta dois perfis bem distintos de tensão residual médio para placas da liga 7050-T7451 para espessuras da classe 4 (de 101,6 até 127 mm). A curva do Fornecedor 1 possui uma simetria, variando entre -20 MPa e 15 MPa. Já o Fornecedor 4, a curva é totalmente assimétrica, apresentando um pico de 5 MPa e outro de -40 MPa.

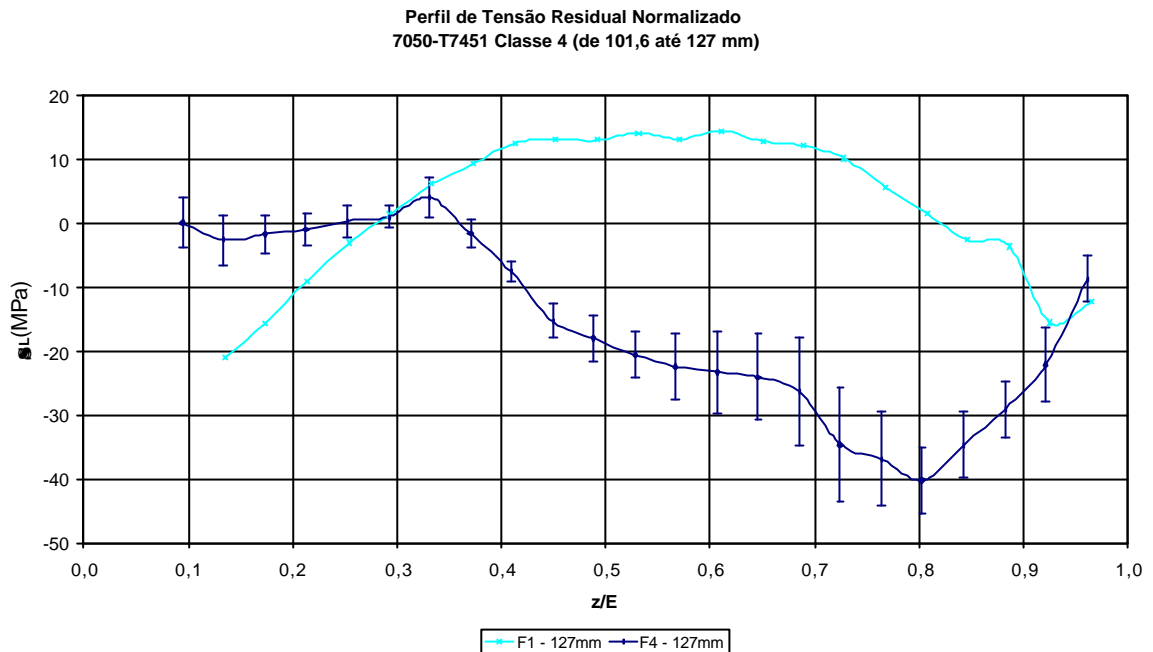


Figura 31 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 4.

4.2.1.2.2 Sentido transversal

A Figura 32 apresenta os perfis de tensão residual médio para placas da liga 7050-T7451 para espessuras da classe 1 (até 50,8 mm). Com exceção da curva do Fornecedor 2 para a espessura de 12,7 mm, todas as outras curvas apresentaram simetria com valores variando de -20 MPa na espessura de 50,8 mm para o Fornecedor 4, até 18 MPa na espessura de 31,75 mm para o Fornecedor 1. A menor amplitude do perfil de tensões residuais calculada foi o perfil do Fornecedor 5 para a espessura de 25,4 mm.

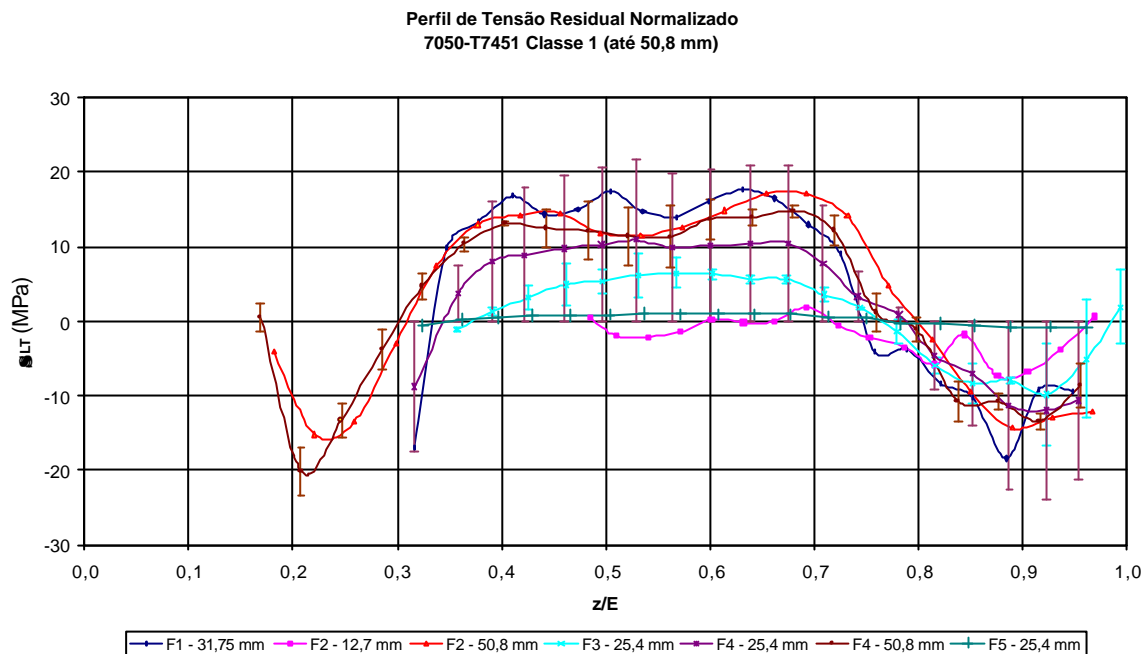


Figura 32 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 1.

A Figura 33 apresenta os perfis de tensão residual médio para placas da liga 7050-T7451 para espessuras da classe 2 (de 50,8 até 76,2 mm). As curvas apresentaram simetria com valores variando de - 20 MPa até 16 MPa na espessura de 76,2 mm para o Fornecedor 1. A menor amplitude do perfil de tensões residuais calculada foi o perfil do Fornecedor 5 para a espessura de 76,2 mm, que variou de - 12 MPa a 10 MPa.

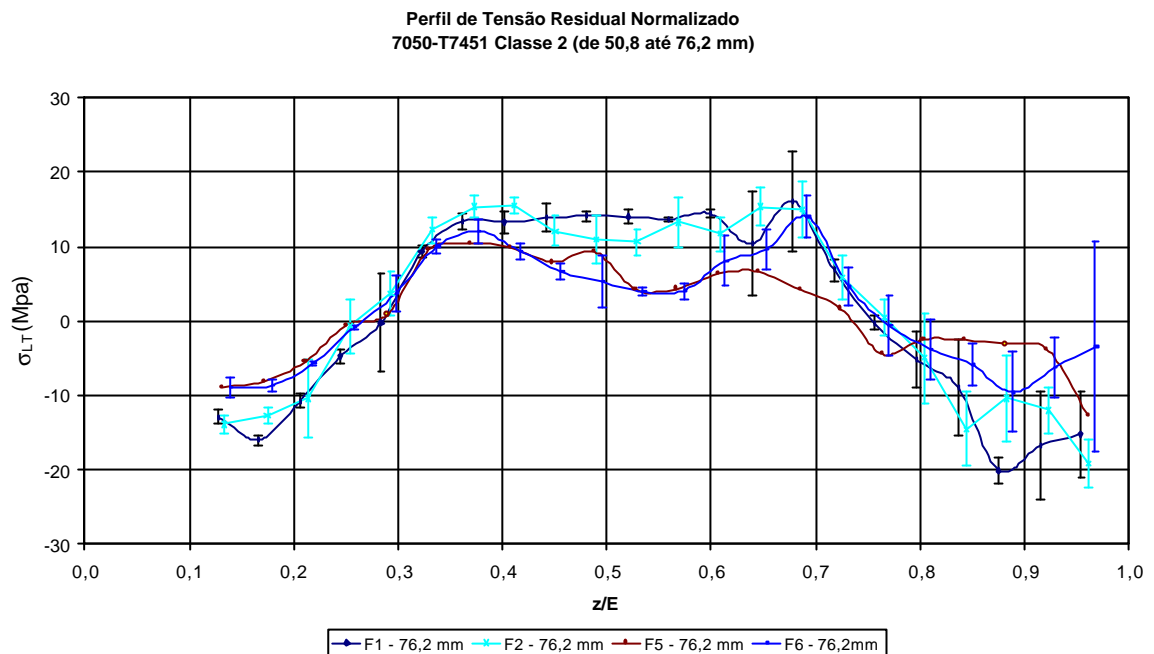


Figura 33 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 2.

A Figura 34 apresenta os perfis de tensão residual médio para placas da liga 7050-T7451 para espessuras da classe 3 (de 76,2 até 101,6 mm). Com exceção da curva do Fornecedor 4, as curvas apresentaram simetria como a curva do Fornecedor 2, na espessura de 101,6 mm, contendo o menor valor de - 24 MPa mas também o maior valor de 18 MPa. A menor amplitude do perfil de tensões residuais calculada foi o perfil do Fornecedor 5 para a espessura de 101,6 mm, que variou de - 20 MPa a 5 MPa.

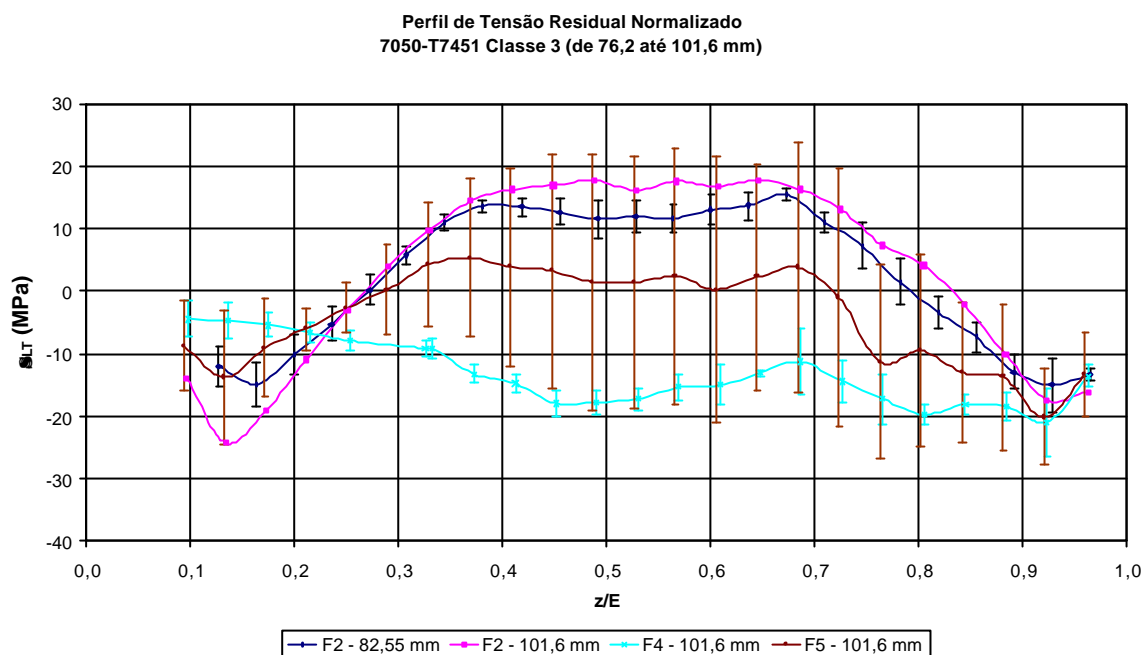


Figura 34 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 3.

A Figura 35 apresenta dois perfis de tensão residual médio para placas da liga 7050-T7451 para espessuras da classe 4 (de 101,6 até 127 mm). A curva do Fornecedor 1 possui uma simetria, variando entre -20 MPa e 15 MPa. Já o Fornecedor 4, a curva transversal, ao contrário da longitudinal - Figura 31- é simétrica, com valores variando de -12 MPa até 7 MPa.

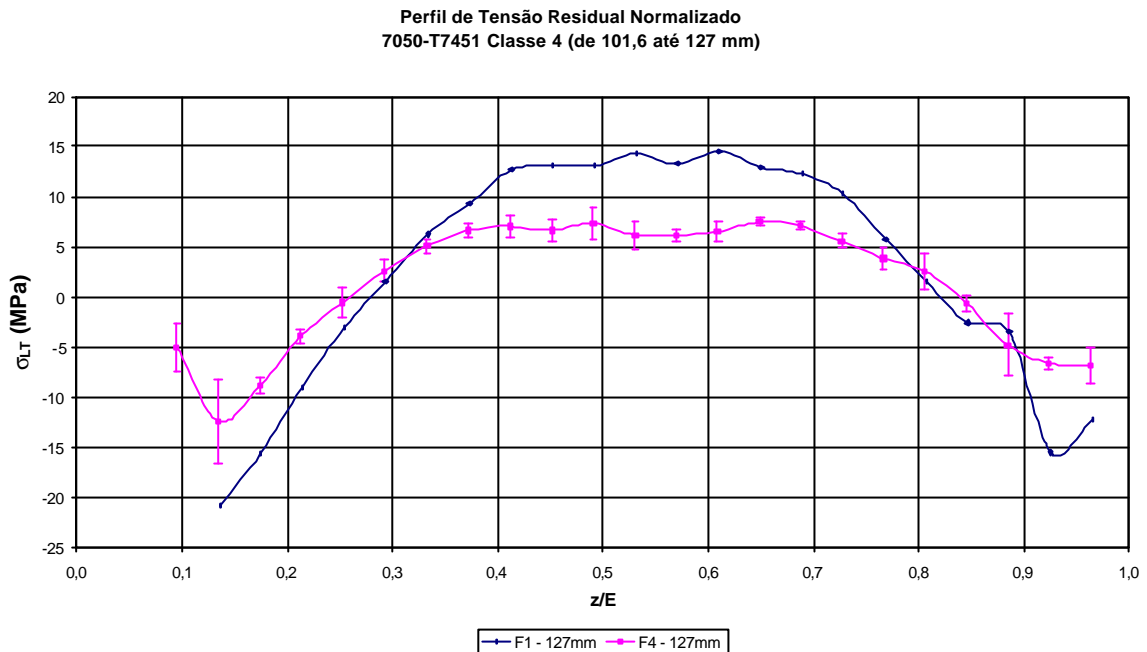


Figura 35 - Curvas de tensão residual transversal normalizado para a liga 7050-T7451 Classe 4.

4.3 Energia elástica armazenada - parâmetro W

Os valores de W mostrados a seguir, foram obtidos a partir dos perfis de tensão residual calculados conforme modelagem apresentada em 2.4.5 de cada placa ensaiada. A Tabela 8 apresenta um resumo dos dados de parâmetro W obtidos durante os ensaios de remoção de camada para placas de liga 7475-T7351. A Tabela 9 apresenta um resumo dos dados de parâmetro W obtidos durante os ensaios de remoção de camada para placas de liga 7050-T7451. Estão apresentados na forma de um gráfico, onde a componente longitudinal de W, a W_L , está na abscissa, e a componente transversal, W_{LT} , está na ordenada. Os gráficos estão organizados por liga e espessura de placa e fornecedores que podem ser identificados pela legenda. As linhas para $W = 1,0 \text{ kJ/m}^3$ e $W = 2,0 \text{ kJ/m}^3$ delimitam regiões de baixa, média e elevada probabilidade ao empenamento, conforme apresentado na Tabela 2 em 2.5.

Tabela 8 Resumo dos dados de parâmetro W para placas 7475-T7351.

Fornecedor	Espessura (mm)	W_L (kJ/m ³)	W_T (kJ/m ³)	W_{Total} (kJ/m ³)
1	25,4	0,27	0,02	0,29
1	25,4	0,21	0,18	0,39
1	25,4	0,91	0,34	1,25
1	50,8	1,52	0,15	1,67
1	50,8	1,28	0,14	1,42
1	50,8	1,54	0,21	1,75
2	50,8	0,38	0,23	0,61
2	50,8	0,56	0,31	0,87
2	50,8	0,78	0,35	1,13
5	50,8	0,22	0,07	0,3
5	50,8	0,3	0,07	0,37
5	50,8	0,33	0,14	0,47

Tabela 9 Resumo dos dados de parâmetro W para placas 7050-T7451.

Fornecedor	Espessura (mm)	W_L (kJ/m³)	W_T (kJ/m³)	W_{Total}(kJ/m³)
1	31,75	2,96	0,67	3,63
1	76,2	3,22	0,4	3,62
1	76,2	3,18	0,52	3,7
1	76,2	3,3	0,4	3,7
1	76,2	3,53	0,36	3,89
1	127	2,64	0,37	3,01
2	12,7	0,2	0,14	0,34
2	50,8	0,75	1,34	1,34
2	76,2	1,06	0,54	1,63
2	76,2	1,62	0,62	2,24
2	76,2	1,66	0,76	2,42
2	82,55	0,81	0,51	1,32
2	82,55	1,06	0,5	1,56
2	82,55	1,53	0,55	2,08
2	82,55	1,87	0,6	2,47
2	82,55	2	0,6	2,6
2	101,6	2,13	0,89	3,01
3	25,4	0,34	0,17	0,51
3	25,4	0,73	0,08	0,8
4	25,4	2,24	0	2,24
4	25,4	2,81	0,22	3,04
4	25,4	2,84	0,21	3,04
4	50,8	0,82	0,32	1,14
4	50,8	1,07	0,34	1,42
4	50,8	2,75	0,4	3,15
4	101,6	1,32	0,61	1,93
4	101,6	2,76	0,72	3,48
4	101,6	2,93	0,95	3,88
4	127	1,16	0,09	1,25
4	127	1,34	0,11	1,44
4	127	1,84	0,05	1,89
5	25,4	3,47	0,04	3,51
5	76,2	1,1	0,21	1,31
5	101,6	1,22	0,82	2,04
5	101,6	2,62	0,39	2,91
5	101,6	3,7	1,27	4,97
6	76,2	0,68	0,21	0,89
6	76,2	0,85	0,19	1,04
6	76,2	0,84	0,37	1,21
6	101,6	3,61	0,41	4,03

4.3.1 Diagramas W_L x W_{LT} para 7475-T7351

A Figura 36 mostra o gráfico W_L x W_{LT} de placas da liga 7475-T7351 com espessura até 31,8 mm. O maior valor de W encontrado foi 1,25 kJ/m^3 do fornecedor 1 para uma placa de 31,8 mm de espessura.

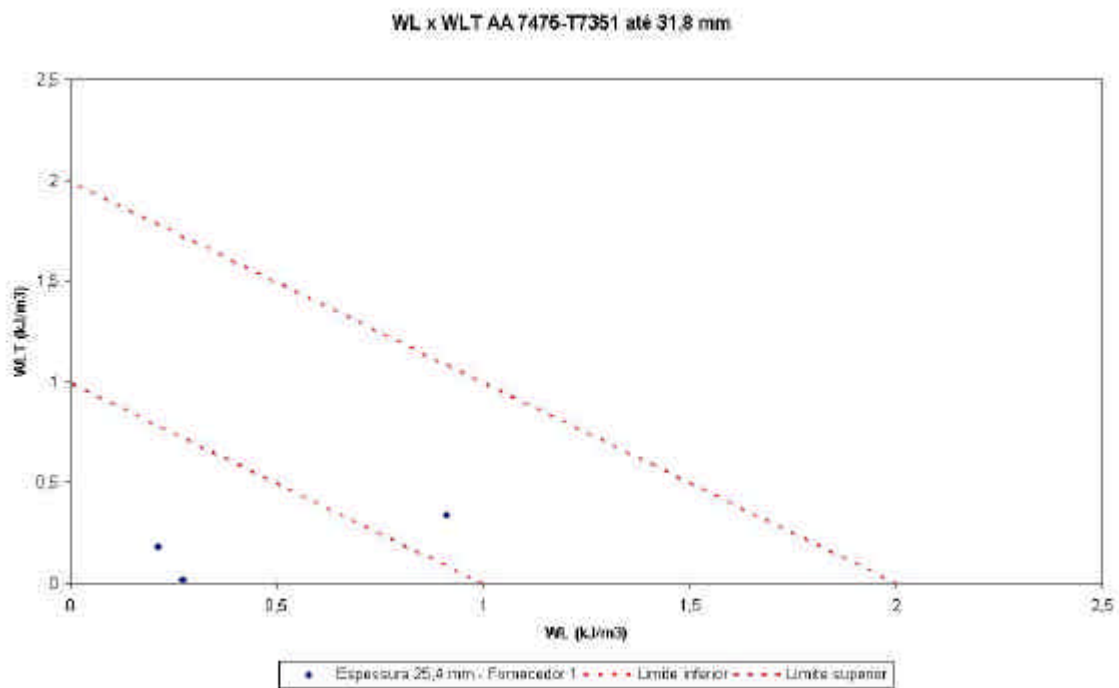


Figura 36 W_L x W_{LT} de placas da liga 7475-T7351 com espessura até 31,8 mm.

A Figura 37 mostra o gráfico W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 50,8 mm. O maior valor de W encontrado foi 1,75 kJ/m^3 do fornecedor 1 para uma placa de 50,8 mm de espessura.

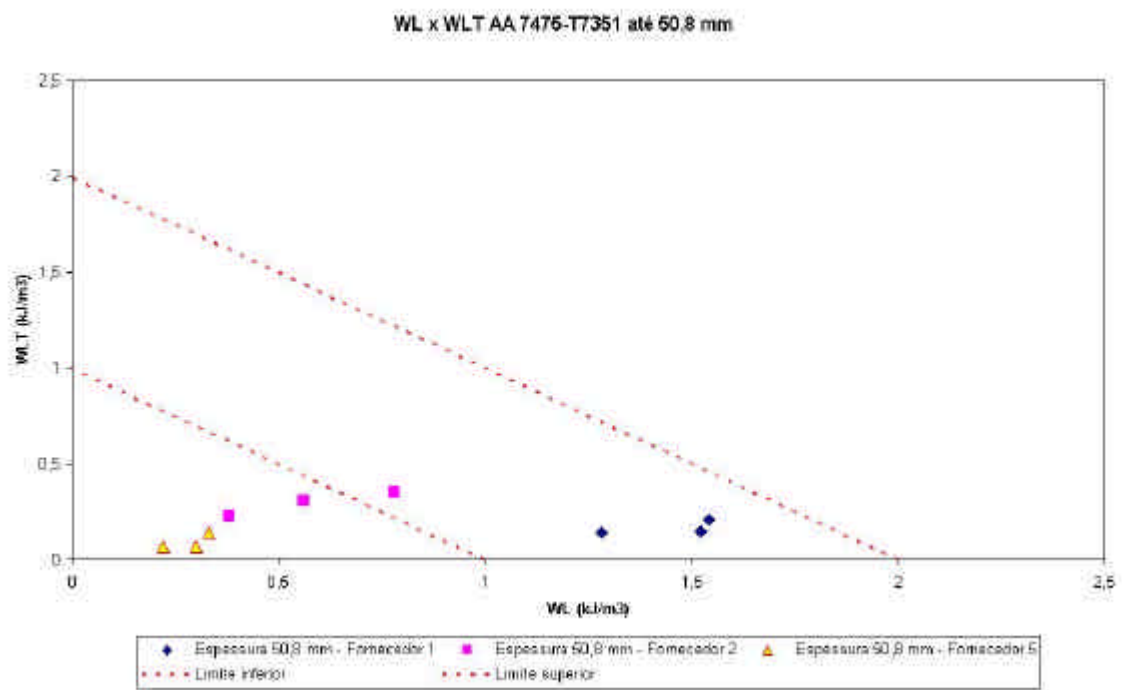


Figura 37 W_L x W_{LT} de placas da liga 7475-T7351 com espessura até 50,8 mm.

4.3.2 Diagramas W_L x W_{LT} para 7050-T7451

A Figura 38 mostra o gráfico W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 50,8 mm. O maior valor de W encontrado foi 3,51 kJ/m³ do fornecedor 5 para uma placa de 25,4 mm de espessura.

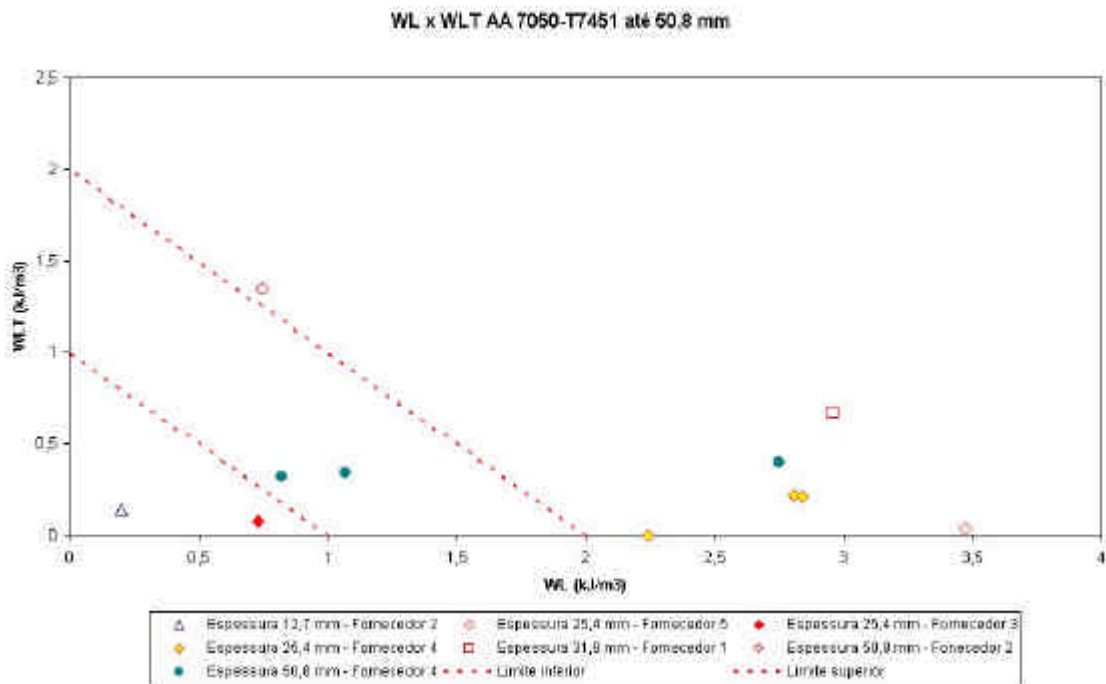


Figura 38 W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura Classe 1 (até 50,8 mm).

A Figura 39 mostra o gráfico W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 76,2 mm. O maior valor de W encontrado foi 3,9 kJ/m³ do fornecedor 1 para uma placa de 76,2 mm de espessura.

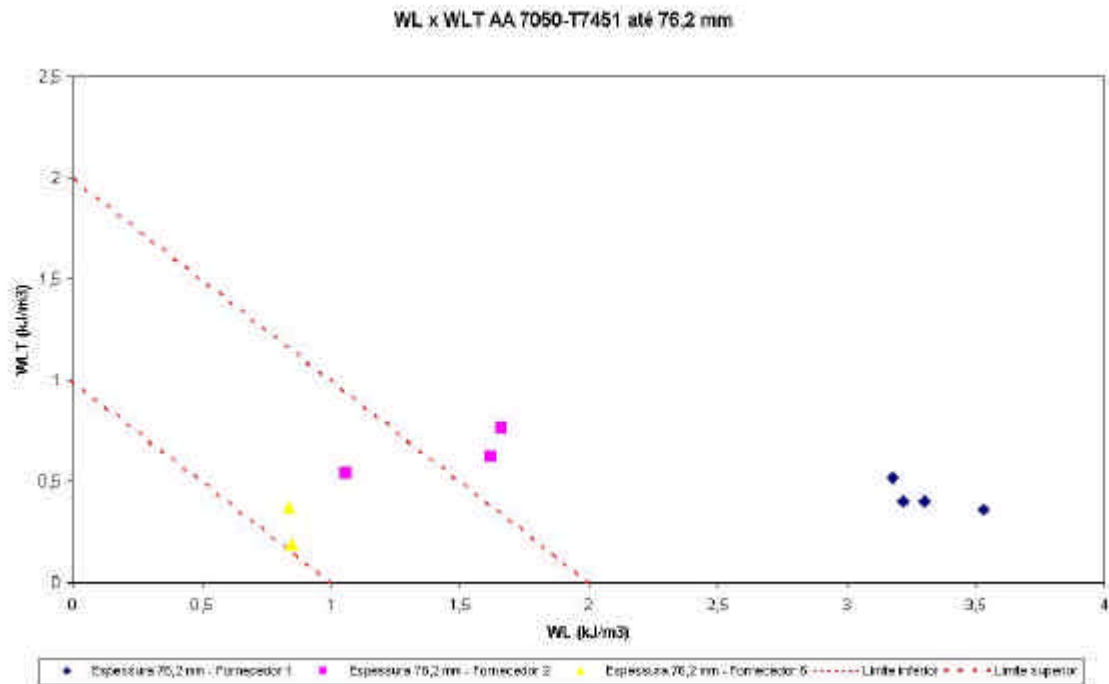


Figura 39 W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 76,2 mm.

A Figura 40 mostra o gráfico W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 101,6 mm. O maior valor de W encontrado foi 4,97 kJ/m³ do fornecedor 5 para uma placa de 101,6 mm de espessura.

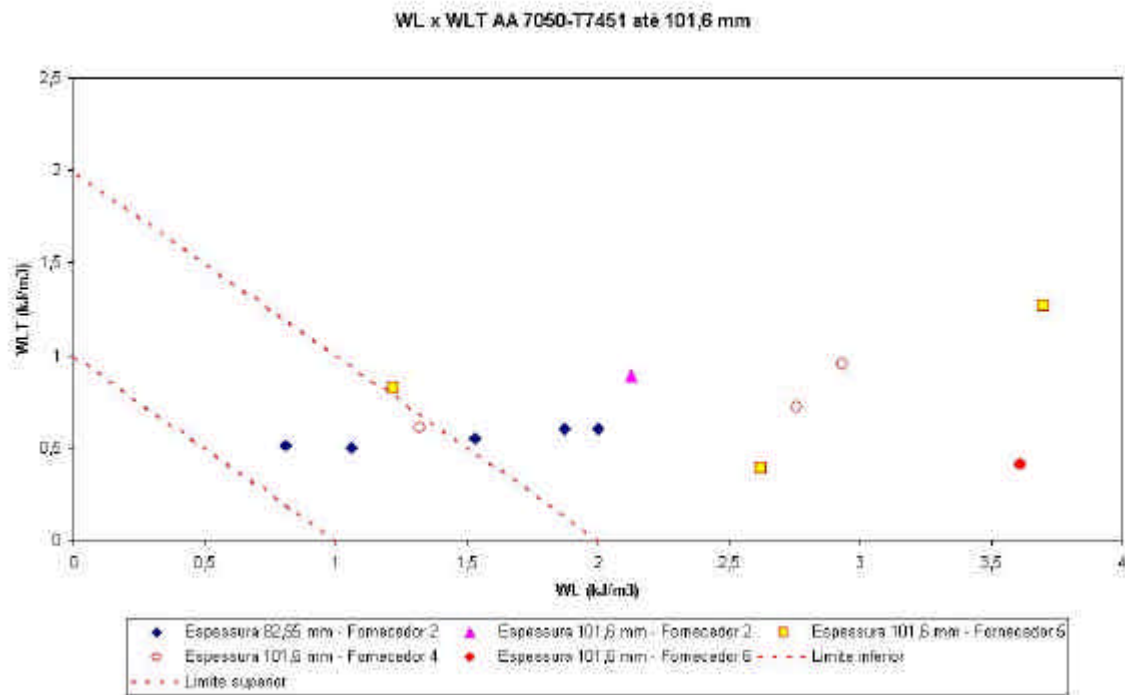


Figura 40 W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 101,6 mm.

A Figura 41 mostra o gráfico W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 127 mm. O maior valor de W encontrado foi 3,01 kJ/m^3 do fornecedor 1 para uma placa de 127 mm de espessura.

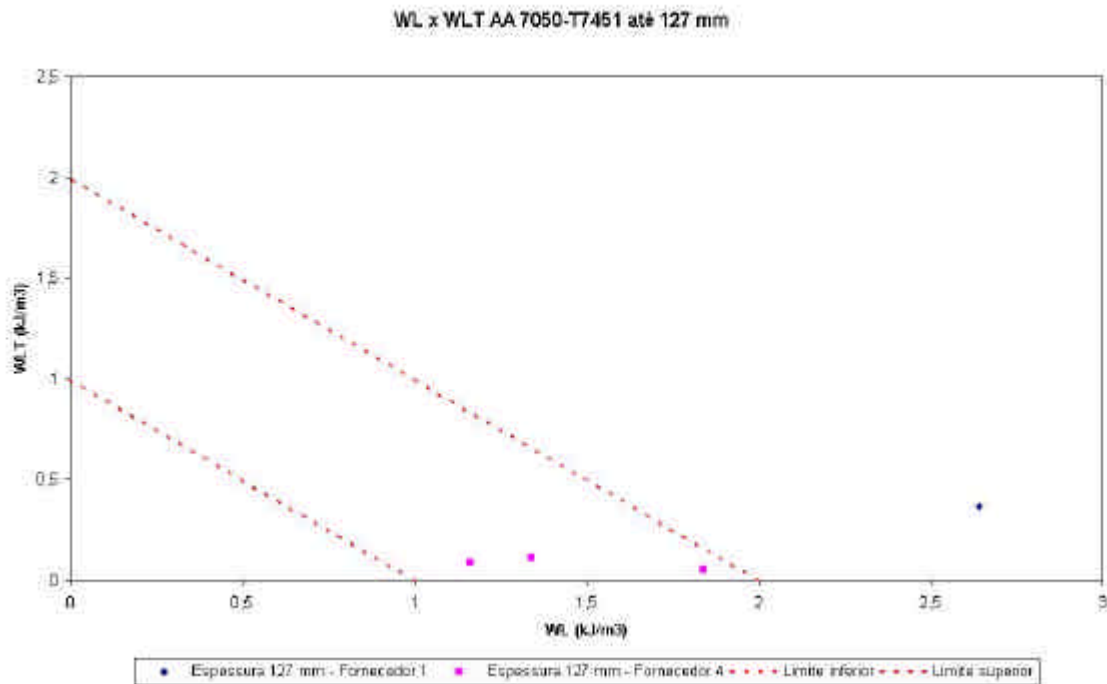


Figura 41 W_L x W_{LT} de placas da liga 7050-T7451 com espessura até 127 mm.

4.4 Ensaios de fabricação - Correlação de W x Empenamento após usinagem

São apresentados a seguir os resultados obtidos após a realização dos ensaios de fabricação.

4.4.1 Baía do trem de pouso

O empenamento após a usinagem está representado na Figura 42 e Figura 43. Os resultados obtidos para a placa de menor energia elástica ($1,21 \text{ kJ/m}^3$) mostram um empenamento máximo de 0,51 e 1,32 mm respectivamente para peças consideradas. Já a placa de maior energia apresentou empenamento máximo de 3,58 mm ($3,7 \text{ kJ/m}^3$).

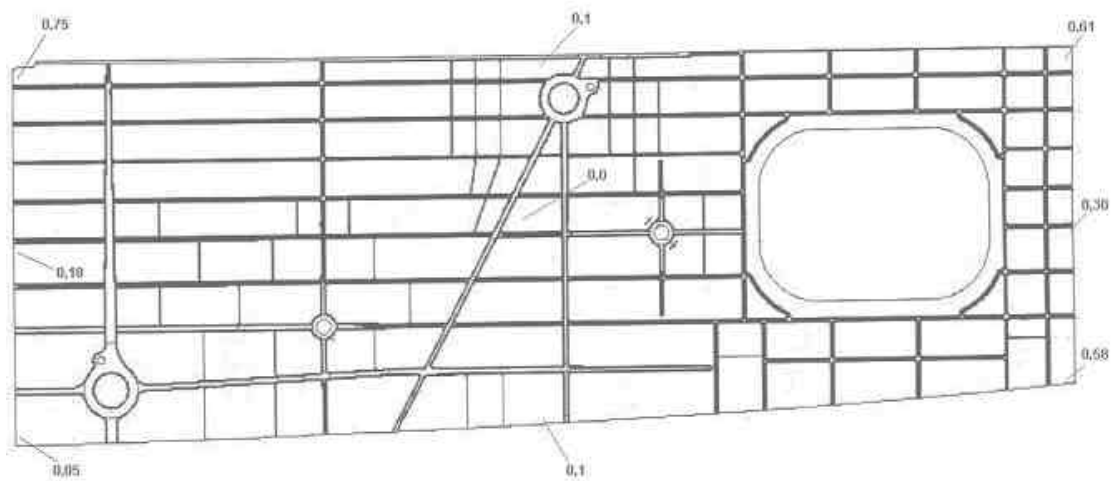


Figura 42 - Valores de empenamento em função da posição para o corpo de prova PN 170-04070-001 com $W = 1,21 \text{ KJ/m}^3$.

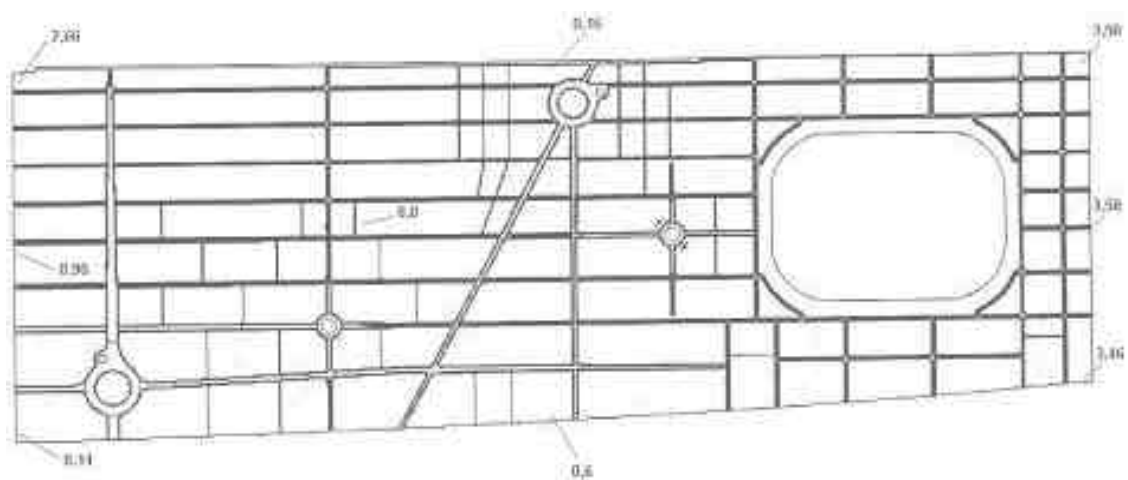


Figura 43 - Valores de empenamento em função da posição para o corpo de prova PN 170-04070-001 com $W = 3,7 \text{ KJ/m}^3$.

4.4.2 Nervura I do Wing Stub

Os resultados da medição da planicidade das placas estão indicados na Figura 44 e Figura 45.

0,5	1,3	0,75	1,4	0,4	0,0
Empenamento inicial, mm		Empenamento inicial, mm		Empenamento inicial, mm	
1,9	1,2	1,1	0,9	0,0	0,0
Peça 01 Fornecedor 1		Peça 02 Fornecedor 5		Peça 03 Fornecedor 5	

Figura 44 - Empenamento das placas antes da realização do ensaio.

8,3	8,9	4,5	5,2	6,8	7,2
Empenamento após faceamento, mm		Empenamento após faceamento, mm		Empenamento após faceamento, mm	
8,9	8,2	5,0	5,2	7,7	7,3
Peça 01 Fornecedor 1		Peça 02 Fornecedor 5		Peça 03 Fornecedor 5	



Figura 45 - Empenamento após o desbaste na face superior da placa.

Após o desbaste de 11,5 mm na face superior das placas, foram soltos os parafusos de fixação no dispositivo de usinagem e realizadas medições do empenamento que conforme mostrado na Figura 44.

Após a usinagem as peças foram colocadas na posição vertical para minimizar o efeito do peso próprio e o empenamento foi medido em 55 pontos utilizando-se uma máquina tridimensional. A Figura 46 mostra o empenamento das peças após a usinagem e a Tabela 10 apresenta um resumo destas medidas.



Figura 46 - Empenamento após a usinagem final das peças.

Tabela 10 - Empenamento medido na máquina tridimensional

	Fornecedor 1 ($W=3,7\text{kJ/m}^3$)	Fornecedor 5 ($W=0,8\text{kJ/m}^3$)	Fornecedor 5 ($W=1,2\text{kJ/m}^3$)
Empenamento mínimo (mm)	-0,324	-0,201	-0,497
Empenamento máximo (mm)	1,496	0,997	2,104
Variação (mm)	1,820	1,198	2,601

Verificou-se que o empenamento na placa de baixa tensão residual foi significativamente menor que o medido nas demais.

4.4.3 Caverna da fuselagem dianteira

A medição de empenamento após a usinagem resultou num valor máximo de 0,5 mm. A figura 24 mostra a peça sobre o desempenho após a usinagem. Este ensaio de fabricação foi realizado com um material do fornecedor 5 fabricado

numa condição de baixa tensão residual. O valor de W medido junto ao fornecedor foi $0,8 \text{ kJ/m}^3$, o mesmo utilizado na peça 2 do item 4.4.2.



Figura 47 - Caverna do ERJ-170 após a usinagem.

4.4.4 Tampa dianteira

Os resultados de medição de empenamento após o desbaste inicial para obter uma placa com 9,5 mm são mostrados nas Figura 48, Figura 49, e Figura 50. Os resultados finais de empenamento após a usinagem completa são apresentados nas Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

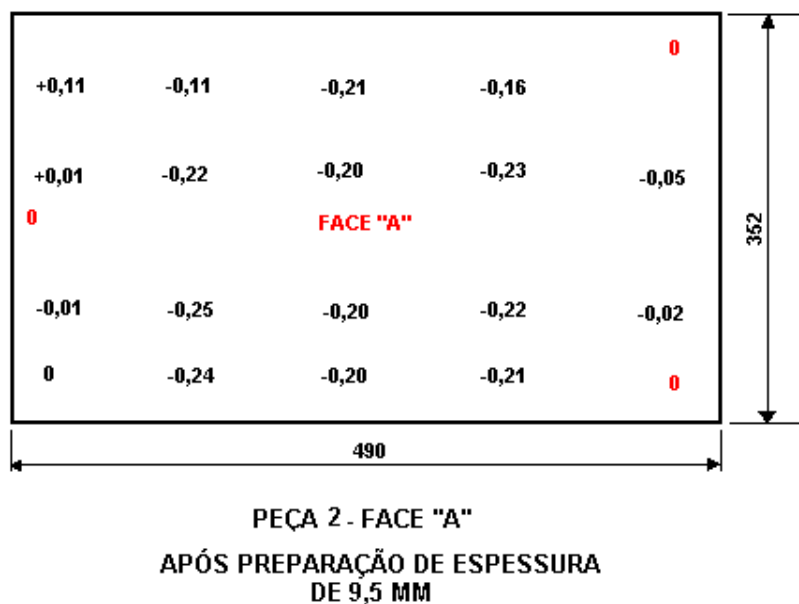
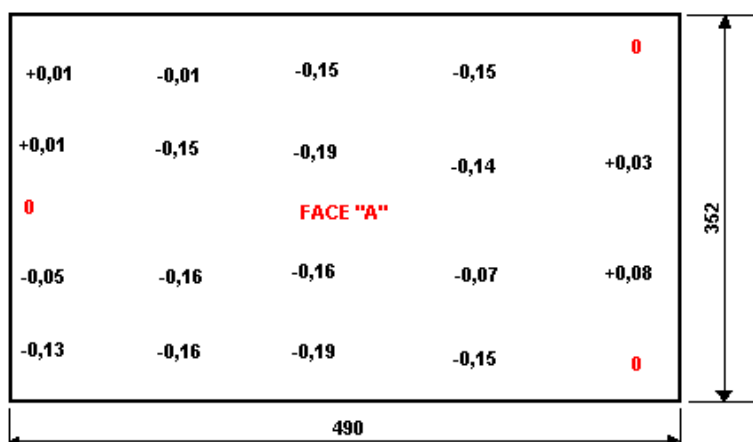


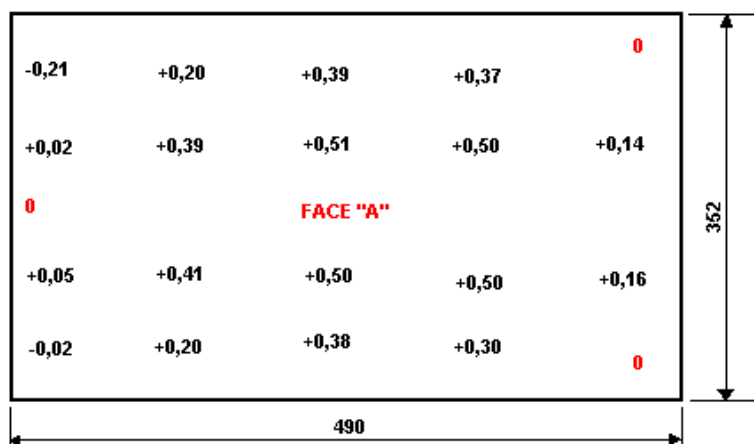
Figura 48 – Empenamento após desbaste na peça localizada a 1,0 mm da face

da placa.



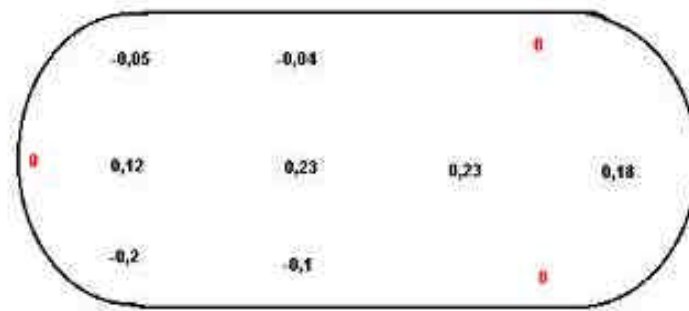
PEÇA 1 - FACE "A"
APÓS PREPARAÇÃO DE ESPESSURA
DE 9,5 MM

Figura 49 – Empenamento após desbaste na peça localizada a 15,0 mm da face da placa.



PEÇA 3 - FACE "A"
APÓS PREPARAÇÃO DE ESPESSURA
DE 9,5 MM

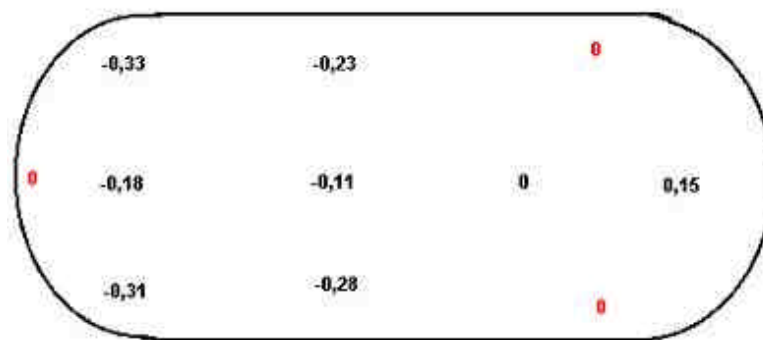
Figura 50 - Empenamento após desbaste na peça localizada a 8,0 mm da face da placa.



PEÇA 1 - FACE "A"
APÓS USINAGEM FINAL.
ESPESSURAS DE 6,0 E 3,5MM

PEÇA ACEITA QUANTO A EMPENAMENTO SEM APLICAÇÃO DE PESO

Figura 51 - Empenamento após usinagem final da peça localizada a 1,0 mm da face da placa.



PEÇA 2 - FACE "A"
APÓS USINAGEM FINAL.
ESPESSURAS DE 6,0 E 3,5MM

PEÇA ACEITA QUANTO A EMPENAMENTO SEM APLICAÇÃO DE PESO

Figura 52 – Empenamento após usinagem final da peça localizada a 15,0 mm da face da placa.

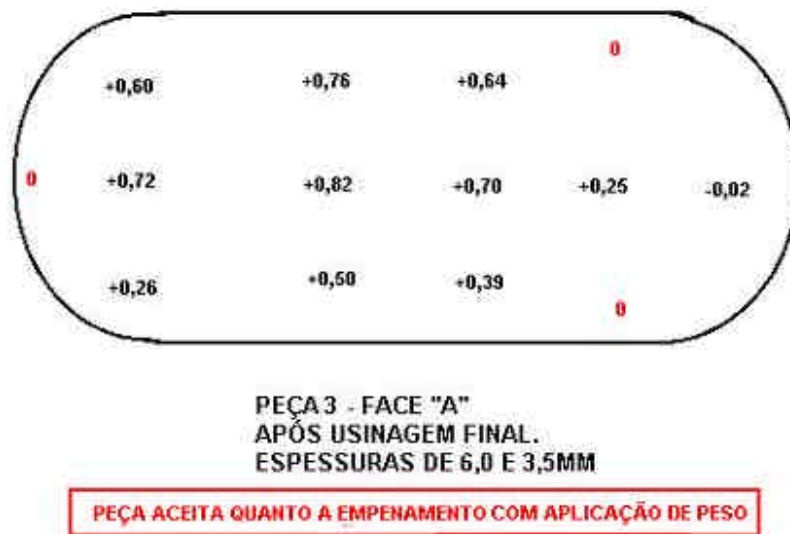


Figura 53 - Empenamento após usinagem final da peça localizada a 8,0 mm da face da placa.

A tabela 6 resume as variações entre os pontos de mínimo e máximo empenamento após o desbaste e após a finalização das peças.

Tabela 11 – Variações entre os pontos de mínimo e máximo empenamento

	Empenamento após desbaste (mm)	Empenamento final (mm)
Peça 1	0,22	0,43
Peça 2	0,25	0,48
Peça 3	0,53	0,84

As peças 1 e 2, usinadas com distância de 1,0 mm e 15,0 mm da superfície da placa, apresentaram empenamento equivalente tanto após o desbaste como após a usinagem final. A peça 3, usinada a 8,0 mm a partir da superfície, apresentou o maior empenamento (Figura 20).

5 DISCUSSÃO

Neste trabalho, o problema de empenamento de peças estruturais primárias usinadas a partir de placas de alumínio foi analisado segundo uma abordagem sistêmica.

O material foi identificado como uma variável de importância no desempenho do processo de usinagem. Conforme visto em 1.1, o desempenho do material limita a saída do processo de fabricação. Uma forma de entender a robustez do processo de usinagem, é como a capacidade do processo de manter a qualidade dos produtos fabricados dentro de determinadas condições de fornecimento de matéria-prima.

A propriedade do material envolvida no problema de empenamento e identificado como causa fundamental, como visto em 1.2 e 1.3, é a tensão residual presente nas placas. Essas tensões resultam de determinadas etapas do processo de fabricação, e a realização de tratamentos térmicos auxilia no seu alívio – e.g., envelhecimento artificial de ligas de alumínio tratáveis termicamente. No entanto, o nível de tensão residual resultante pode ser tal que ainda gere problemas de empenamento durante a usinagem de peças. Dentro dessa linha as principais empresas fabricantes de matéria-prima para o setor aeroespacial já estão trabalhando neste assunto. O acompanhamento criterioso de artigos publicados relacionados a esse assunto em seminários, congressos e conferências [7;12] bem como patentes [19,20,21] depositadas nos últimos anos mostram que algumas empresas estão em estágio adiantado de desenvolvimento, tendo este tipo de produto em prateleira, outras estão nas etapas iniciais de desenvolvimento.

O método de remoção de camadas foi definido como o mais adequado para o levantamento do perfil de tensão residual macroscópica, ou apenas perfil de tensão residual, e a determinação do nível de energia elástica armazenada em placas.

5.1 Ensaios de verificação da influência do processo no empenamento

Primeiramente, antes de realizar os ensaios de remoção de camadas havia uma dúvida no que diz respeito à influência de determinados parâmetros de corte nos resultados do ensaio de remoção de camadas. Isto principalmente em função do nível de interação material – ferramenta. Nas condições utilizadas as propriedades do material foram mantidas constantes sendo alteradas as condições de usinagem. Não houve variação quanto ao empenamento medido ao longo de toda a espessura das placas ensaiadas indicando que a influência do material é mais importante do que a do processo para a faixa de condições avaliada [8]. É importante salientar que o processo de usinagem em alta velocidade produz peças com o mesmo nível de empenamento que o processo convencional. Portanto não é possível produzir peças sem empenamento pelo processo de usinagem em alta velocidade utilizando-se placas com alta tensão residual [8].

Mas antes de realizar um estudo mais detalhado sobre a variação do nível de energia elástica armazenada em placas de matéria-prima, foram realizados alguns estudos preliminares procurando correlacionar o nível de energia elástica armazenada com o nível de empenamento em peças usinadas. Para isso, foi feita uma amostragem de placas onde foram realizados os ensaios de remoção de camadas, em seguida a determinação do perfil de tensões residuais e a determinação do parâmetro W . Somente após a determinação do parâmetro W foram realizados os ensaios de fabricação que serão apresentados a seguir em 5.3.

5.2 Caracterização das placas

A obtenção dos perfis de tensão residual por fornecedor, liga e espessuras permitiram identificar um perfil de tensão residual característico para um dado fornecedor. Por exemplo, os perfis de tensão residual ao longo da espessura da placa, no sentido longitudinal, da liga 7050-T7451 para a espessura de 76,2 mm para os fornecedores com disponibilidade de dados, são diferentes. A Figura 72 representa perfil simétrico de tensões residual do Fornecedor 1, com

tensões variando de 30 MPa a -30MPa com aparência mais 'parabólica' – “U invertido” - com duas pequenas inversões na tensão próximo às superfícies da placa – próximo de 10 mm e 68 mm na espessura. Da mesma forma observa-se na Figura76 um formato simétrico do perfil de tensão residual com valores máximos variando entre 20 MPa e -20MPa. Além das com duas pequenas inversões na tensão próximo às superfícies da placa – próximo de 10 mm e 60 mm na espessura, a diferença mais marcante entre este perfil – Fornecedor 2 - e o anterior é que este apresenta dois picos locais de tensão no perfil. Apesar da Figura86 apresentar o perfil de tensão residual de apenas uma placa do Fornecedor 5, ela possui semelhanças com o perfil de tensão residual do Fornecedor 2. O fornecedor 6 apresenta um perfil de tensões residuais com as duas inversões de pico mais pronunciadas - Figura88 – apesar de ocorrerem na mesma espessura calculada para os fornecedores 2 e 5, a diferença de tensão é aproximadamente o dobro e se for considerado o desvio padrão referente a outros perfis que entraram no cálculo desse perfil médio, o valor mínimo no eixo de simetria da tensão pode chegar a ser de compressão – da ordem de 5 MPa. Trabalhos recentes desenvolvidos por Prime [42;43], utilizam a técnica de “crack compliance” para a determinação do perfil de tensões residuais através da espessura de placas de ligas de alumínio da liga 7050-T74 e 7050-T7451. Da mesma forma que no desenvolvimento deste trabalho, os dados iniciais de entrada são dados de deformação, obtidos por “strain gauge” - Figura 54 – compare com a Figura 21 e Figura 22, para usinagem convencional, e Figura 23, para usinagem de alta velocidade. E após um tratamento desses dados experimentais, obtém-se um perfil de tensões residuais ao longo da espessura da placa semelhante ao desenvolvido neste trabalho - Figura 55.

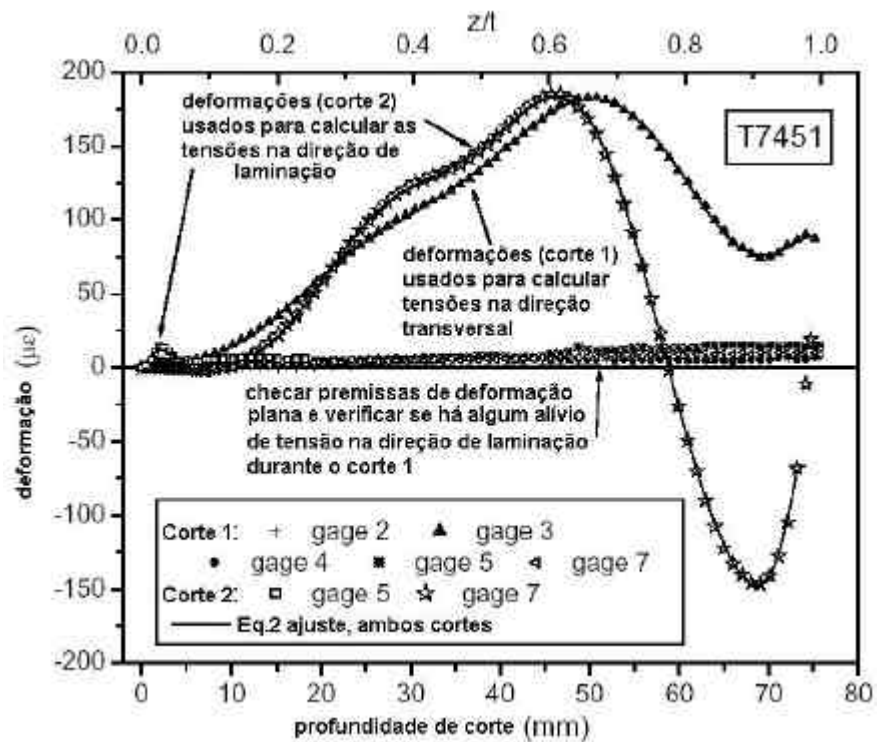


Figura 54 Deformações medidas em amostras na condição T7451. Traduzido de Prime [42].

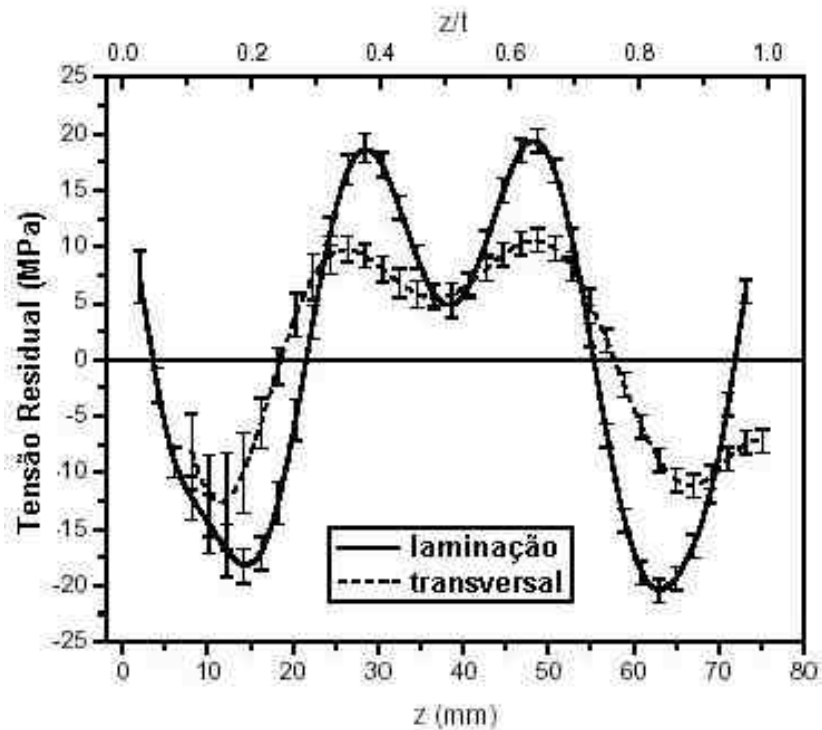


Figura 55 Perfil de tensões residuais após alívio de tensões por estiramento (7050-T7451). Traduzido de Prime [42]

É possível observar que os pontos de mínimo do perfil de tensões residuais, em torno de 15 mm e 65 mm de profundidade coincidem com os mesmos pontos obtidos pelo método de remoção de camadas. Os picos de tensão locais citados no parágrafo anterior também coincidem à aproximadamente 25 e 50 mm de profundidade. O método do “crack compliance” ao contrário do método de remoção de camadas é mais complexo pois exige uma preparação do corpo de prova com “strain-gauges” e exige técnica experimental mais refinada. Apesar dos resultados aparentemente serem mais precisos que os obtidos pelo método de remoção de camadas, este é mais adequado para as condições de trabalho numa área de produção, onde há disponibilidade de um sem número de recursos e experiência na tecnologia de usinagem.

O formato “W” do perfil de tensões residuais através da espessura de placas laminadas é bastante conhecido e tem sido atribuído às diferenças de composição química, procedimento de resfriamento rápido (“quenching”) e microestrutura do material [52]. Segundo Cassada [53], a essa variação nas propriedades mecânicas ao longo da espessura está relacionada gradientes de composição induzidas pelo processamento e variação de taxa de resfriamento que podem afetar significativamente a distribuição de partículas de precipitados e de composição através da espessura da placa, influenciando nas propriedades da placa.

Conforme descrito em 2.1, as ligas objeto de estudo neste trabalho sofrem alívio de tensões por estiramento ou por compressão. Com relação ao processo de compressão à frio, os trabalhos desenvolvidos por Cudd et al. [54] concluíram que a aplicação de 2 – 3% de compressão a frio em placas espessas alivia uma parte significativa das tensões residuais. E quando a compressão a frio ocorre em etapas, onde ocorre sobreposição das compressões, gera uma distribuição de tensões desejável para usinagem de peças pois as tensões na superfície serão removidas e as tensões remanescentes permanecerão em valores baixos. O princípio desse processo explorado por Cudd et al. [54] foi desenvolvido tecnologicamente e patenteado pela Corus [19]. Esse processo consiste no alívio de tensões de uma placa tratável termicamente após a solubilização e o resfriamento rápido, onde a

mesma é submetida a uma deformação plástica aplicada através das etapas: (a) aplicação de alívio de tensões por estiramento; e (b) aplicação de alívio de tensões por compressão a frio. Segundo a patente, a combinação adequada desses tratamentos conferem ao material melhores propriedades de resistência mecânica e tenacidade e, pelo menos, menor empenamento após usinagem. Uma aplicação desse conceito pode ser evidenciada pelo trabalho realizado pela Corus descrito em [12] onde placas espessas de 7050-T7451 foram aplicadas no painel de piso do Boeing C-17 Globemaster [56] - Figura 56.

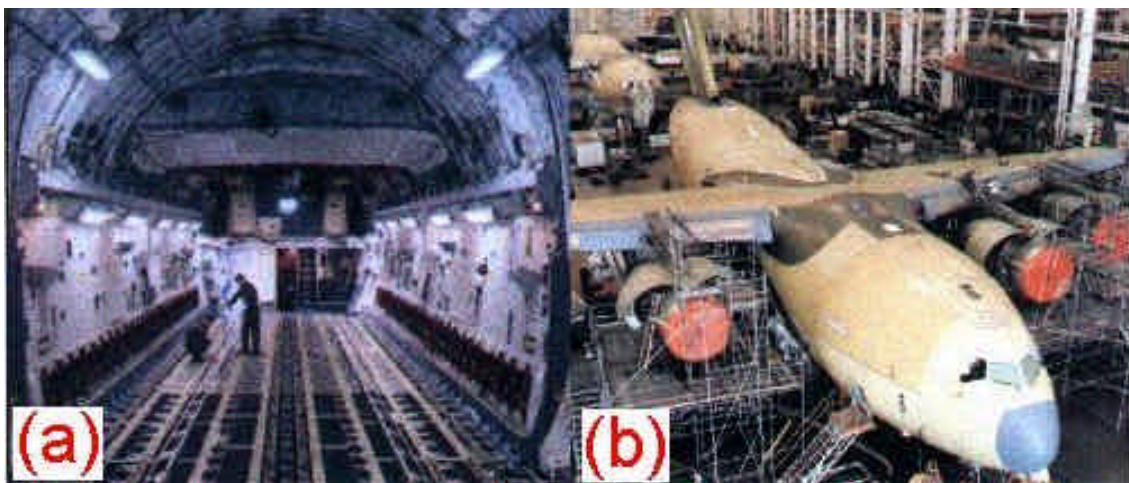


Figura 56 – (a) Detalhe do piso de carga usinado a partir de placa 7050-T7451. (b) Detalhe da linha de montagem do Boeing C-17 Globemaster. Adaptado de [56].

Segundo o trabalho de Bouvaist [11], após a solubilização e o resfriamento rápido, o perfil de tensões residuais é aproximadamente parabólico – vide Figura 57 – com valores chegando até aproximadamente 200 MPa.

O processo de alívio de tensões por estiramento deve deformar a plasticamente a placa entre 1,5 – 3,0%, segundo a especificação de placas da liga 7050-T7451 [4], o que provoca uma redução significativa da amplitude do perfil de tensões residuais – vide perfil verde da Figura 6 – o nível de tensões de pico variou aproximadamente uma ordem de grandeza, ou seja de 200MPa para 20 MPa. Isto, de alguma forma está relacionada com a energia elástica armazenada na placa e será visto mais adiante.

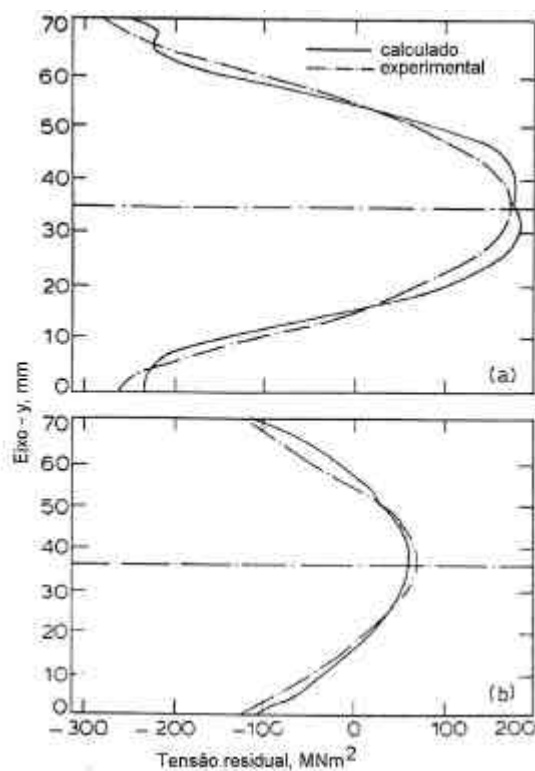


Figura 57 Distribuição de tensão residual. (a) resfriamento rápido em água fria. (b) resfriamento rápido em água quente. Traduzido de [11].

Segundo a patente de US 6.406.567 B1 da Corus [19], as placas que combinaram estiramento e compressão a frio no processo de alívio de tensões mantiveram as propriedades de resistência mecânica e tenacidade com boas propriedades de usinagem, com baixo potencial de empenamento. A história termomecânica influencia fortemente o nível de tensões residuais. Nessa patente [19] são apresentadas duas rotas tecnológicas onde foi variado apenas a seqüência de estiramento e compressão a frio. Os resultados obtidos foram distintos no que diz respeito a propriedades mecânicas. O melhor resultado foi uma combinação de 0,6 – 0,7 % de estiramento, seguido de 0,9 – 1,1 % de compressão a frio.

Neste caso, foram obtidos os melhores valores de resistência à tração, tenacidade à fratura e empenamento em usinagem, segundo um critério 8.6 de uma especificação de placas 7050-T7451 da Boeing, BMS 7-323 B – citado em [19]. A eficácia dos tratamentos termomecânicos foi verificada através de um método desenvolvido pela Corus que utiliza método de ultra-som – patente US 6,234,020 B1 [19]. Este método permite o mapeamento dos valores e

distribuição da tensão residual em toda a extensão da placa de alumínio, através de um ensaio não-destrutivo, utilizando técnicas de varredura por ultrassom. A Figura 58 mostra um mapeamento realizado em uma placa de 150 mm de espessura, uma largura de 1250 mm e um comprimento de 5500 mm. A placa foi laminada, solubilizada e resfriada (“quenching”), sendo estirada em seguida antes de realizar as medições de tensão residual. As cores na Figura 58 apresentam os níveis de tensão residual. Do centro da placa (azul escuro) para a periferia (vermelho), há um aumento gradativo das tensões residuais.

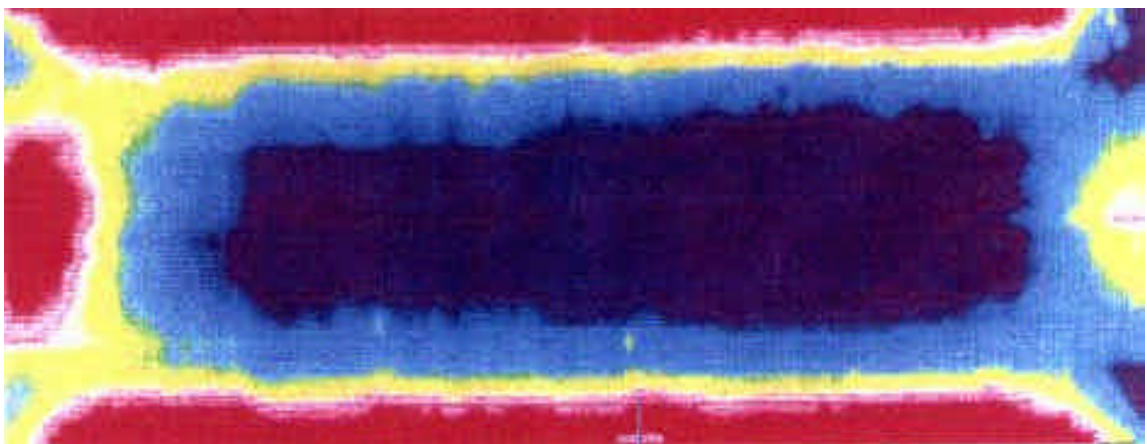


Figura 58 Mapeamento da tensão residual em placas utilizando o método de ultrassom. Adaptado de [56].

Uma outra forma de analisar a distribuição das tensões residuais é através da simulação da seqüência de passes com o auxílio do método dos elementos finitos - Figura 59. Neste caso, a seção analisada foi a seção LT.

De um modo geral, as placas apresentam um perfil médio e valor máximo de tensões característico para cada fornecedor como apresentados em 4.2. As placas do Fornecedor 1 mostram um perfil de tensões do tipo "U invertido" e com tensão máxima maior que a dos demais fornecedores (Figura72). Este fato pode sugerir que o procedimento de estiramento após a solubilização e resfriamento rápido (“quenching”) não objetiva um nível de alívio de tensões que gere um bom desempenho da matéria prima durante a usinagem.

O formato do perfil tensões residuais é útil para a comparação de rotas tecnológicas de laminação, solubilização e resfriamento e alívio de tensões por deformação (estiramento e / ou conformação a frio). No entanto, a sua

aplicação como comparação do nível de tensão residual em placas deixa a desejar. Para esse fim, o parâmetro W – energia elástica armazenada – apresentado em 2.4.5 é o mais adequado.

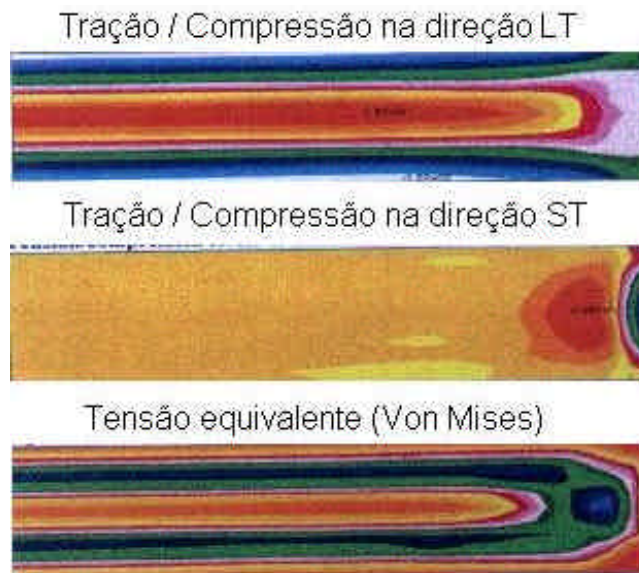


Figura 59 – Pós processamento da simulação da distribuição de tensões em uma placa após o tratamento térmico e estiramento. Adaptado e traduzido de [56].

De fato, o parâmetro W foi determinado no sentido de analisar o universo de energia elástica armazenada das placas disponíveis em estoque e verificar o potencial de empenamento em peças usinadas.

Conforme mostrado em 4.3, cada valor individual de W é referente a um lote de fabricação de placas. Os eixos do gráfico da energia elástica armazenada são compostos pela componente de W na longitudinal (W_L) e pela componente de W na transversal (W_{LT}). As linhas de $W = 1,0 \text{ kJ/m}^3$ e $W = 2,0 \text{ kJ/m}^3$ são utilizados como referência para delimitar níveis críticos de energia elástica armazenada, conforme descrito em 2.5.

Percebe-se em todos os gráficos $W_L \times W_{LT}$, em 4.3, que a componente longitudinal (W_L) é a que mais contribui para o valor de W . Essa contribuição é da ordem de 80%, variando em função do fornecedor - Figura 60.

Essa contribuição era esperada pois a maior parte das deformações numa placa durante a laminação ocorre no sentido longitudinal. Procedimentos de laminação que envolvem etapas de laminação na transversal (“cross-rolling”) nas etapas iniciais do desbaste do lingote, não são possíveis em todas as

plantas de laminação devido à limitação da largura do laminador mas são referenciadas em patentes, e.g., " Manufacture of thick aluminum alloy plate" da Hoogovens Aluminium Walzprodukte GmbH [18].

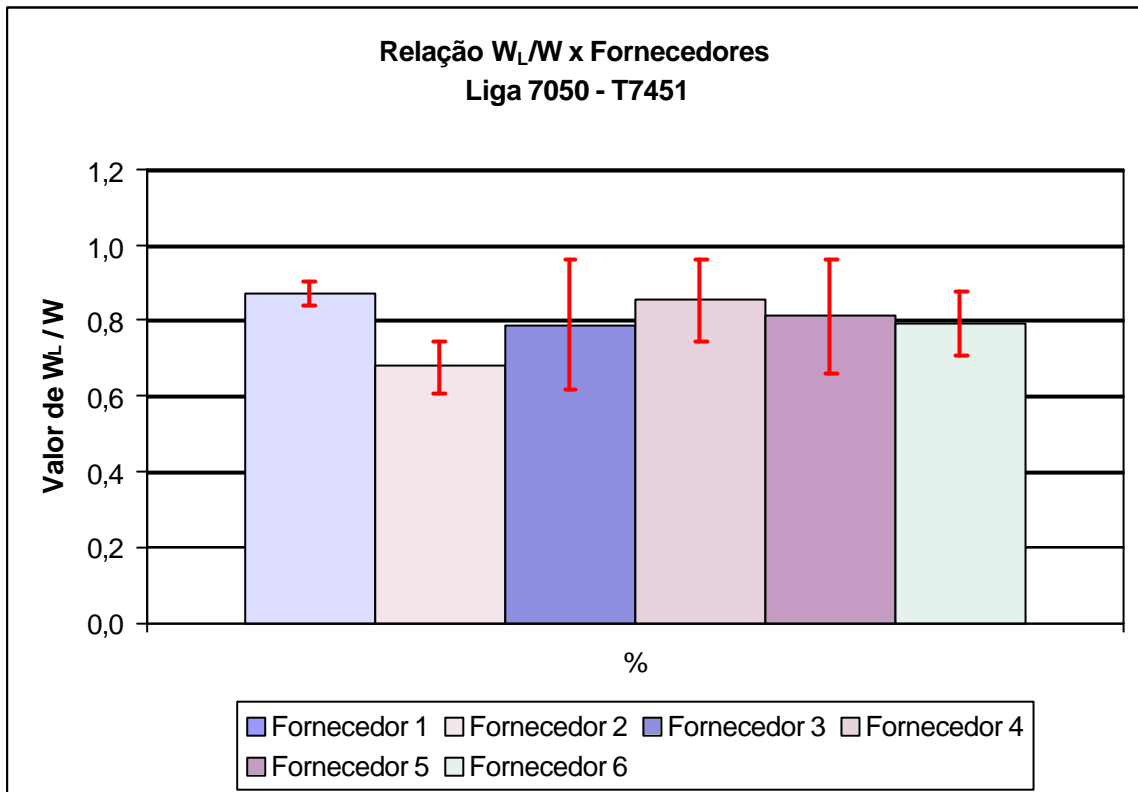


Figura 60 – Contribuição de W_L em W em função dos fornecedores para a liga 7050-T7451.

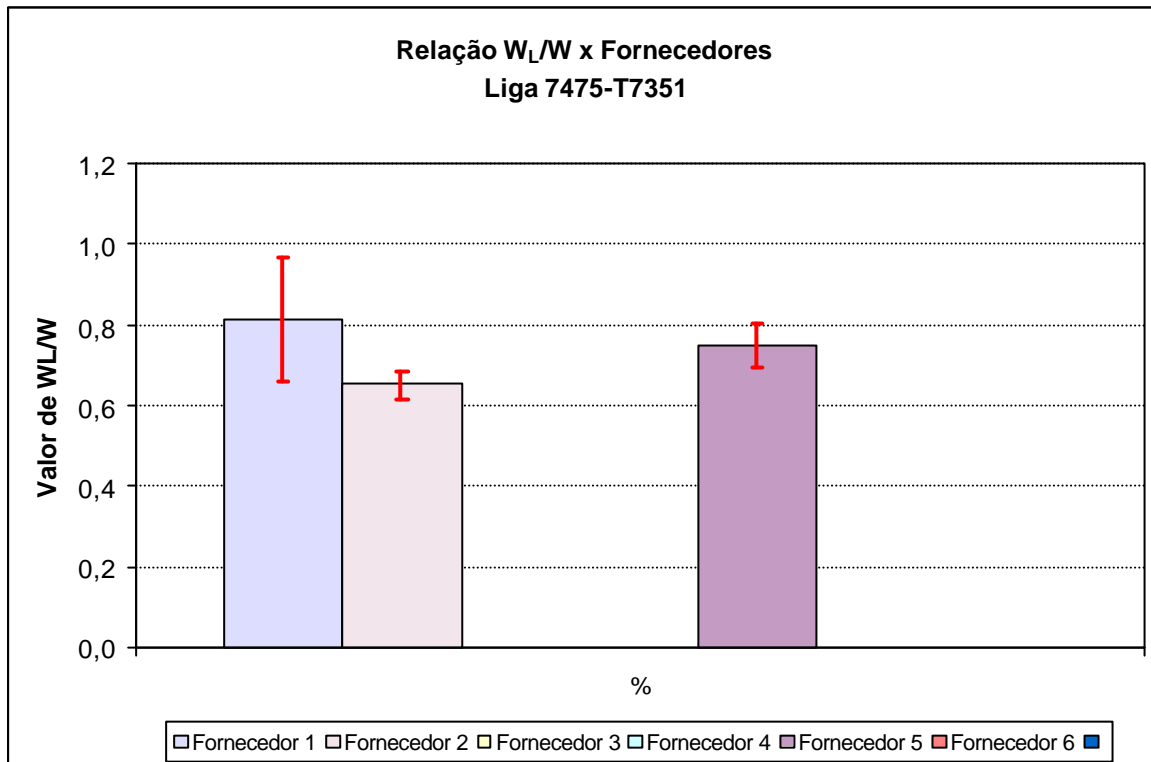


Figura 61 Contribuição de W_L em W em função dos fornecedores para a liga 7475-T7351.

O menor valor de W_L/W encontrado foi do Fornecedor 2, tanto para 7050-T7451 - Figura 60 quanto para 7475-T7351 - Figura 61. Outra forma de avaliar a contribuição de cada componente no valor de W total é através da relação W_{LT}/W_L . Essa relação é uma outra forma de comparação direta das componentes longitudinal (W_L) e transversal (W_{LT}) de W . Quanto mais essa relação se aproximar da unidade maior equivalência da contribuição de cada uma das componentes de W . No diagrama $W_L \times W_{LT}$, essa relação está relacionada com a localização dos pontos experimentais mais próximos ou não da bissetriz do quadrante $W_L \times W_{LT}$. Quanto mais próximos os dados experimentais estiverem da origem, menor será o valor de W .

Assim, a Figura 62 mostra o valor médio de W_{LT}/W_L para a liga 7050-T7451 para vários fornecedores.

Para o fornecedor 1 os valores de W_{LT}/W_L encontrados para a liga 7050-T7451 foi $0,15 \pm 0,04$. Para a liga 7475-T7351 para W_{LT}/W_L foi $0,27 \pm 0,3$. Estes valores demonstram o elevado grau de anisotropia existente na matéria – prima fabricada por esse fornecedor. Observa-se que para a liga 7050, a contribuição da componente transversal é da ordem de 15% e de maneira consistente, pois o desvio padrão dos dados experimentais foi de apenas 0,15. De certa forma, a dispersão dos dados experimentais compromete essa análise para a liga 7475 que é menor que 1/3, mas também demonstra o nível de anisotropia do material processado pelo Fornecedor 1.

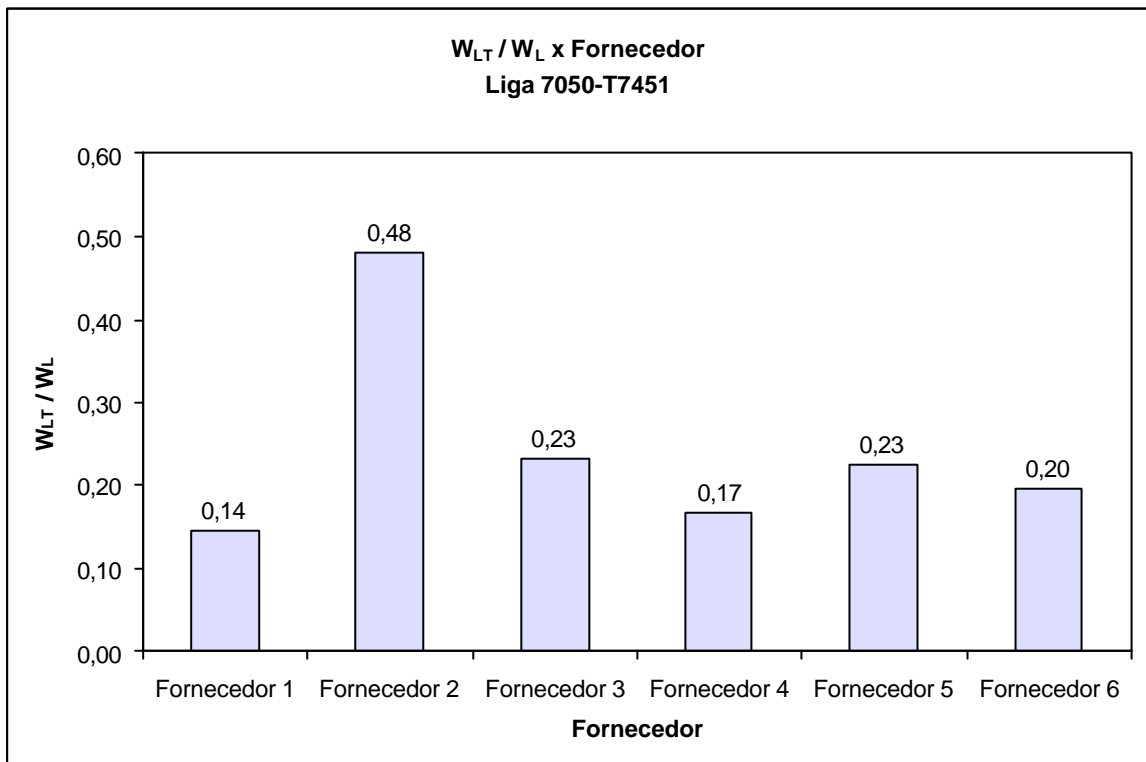


Figura 62 – Comparação da relação W_{LT}/W_L x Fornecedores para a liga 7050-T7451.

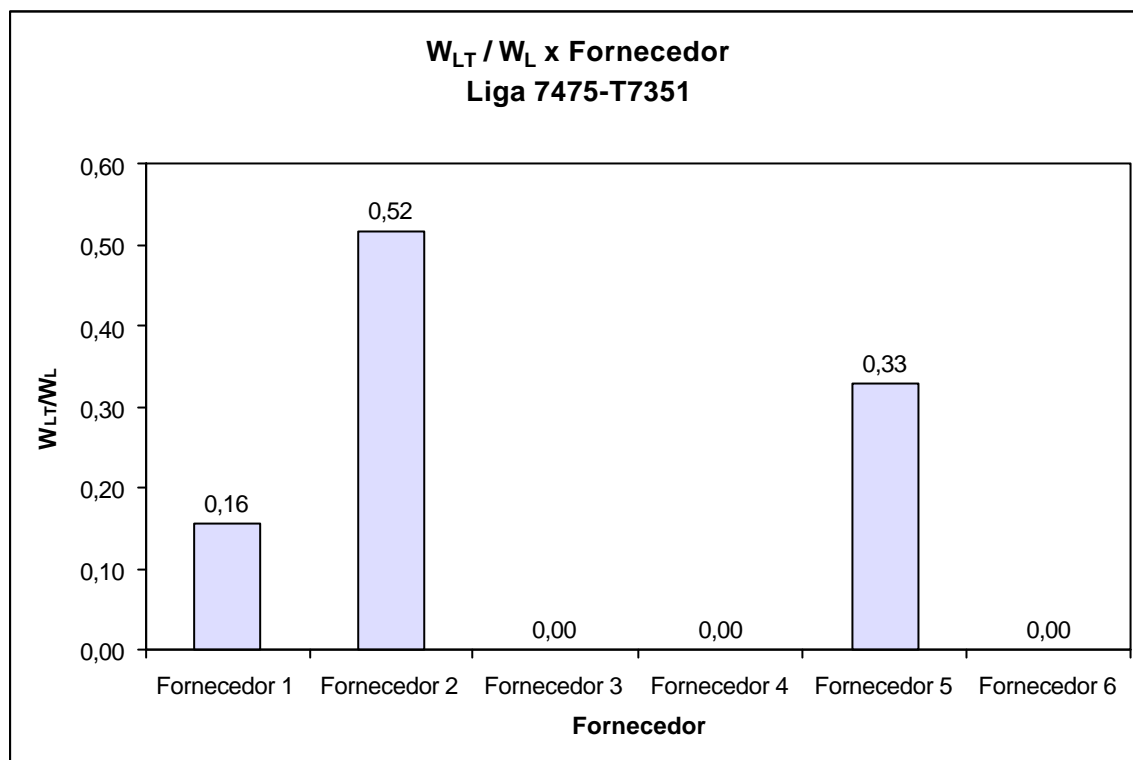


Figura 63 - Comparação da relação W_{LT}/W_L x Fornecedores para a liga 7475-T7351.

A Tabela 12 apresenta os valores médios de W por fornecedor para a liga 7050-T7451 segundo a amostragem realizada no desenvolvimento deste trabalho. O maior valor característico encontrado foi $3,59 \pm 0,30$ para o Fornecedor 1 e o menor foi $0,66 \pm 0,21$ para o Fornecedor 3.

Tabela 12 Valores médios de W por fornecedor para a liga 7050-T7451.

Fornecedor	W_L (kJ/m ³)		W_{LT} (kJ/m ³)		W (kJ/m ³)	
	$W_L^{Média}$	STD	$W_{LT}^{Média}$	STD	$W^{Média}$	STD
Fornecedor 1	3,14	0,31	0,45	0,12	3,59	0,30
Fornecedor 2	1,34	0,60	0,64	0,30	1,91	0,76
Fornecedor 3	0,54	0,28	0,13	0,06	0,66	0,21
Fornecedor 4	1,99	0,82	0,34	0,29	2,33	0,95
Fornecedor 5	2,42	1,22	0,55	0,50	2,95	1,41
Fornecedor 6	1,50	1,41	0,30	0,11	1,79	1,50

A Tabela 13 apresenta os valores médios de W por fornecedor para a liga 7475-T7351 segundo a amostragem realizada no desenvolvimento deste trabalho. O maior valor característico encontrado foi $1,13 \pm 3,59$ para o Fornecedor 1 e o menor foi $0,38 \pm 0,09$ para o Fornecedor 3.

Tabela 13 Valores médios de W por fornecedor para a liga 7475-T7351.

Fornecedor	W_L (kJ/m ³)		W_{LT} (kJ/m ³)		W (kJ/m ³)	
	W_L^{Media}	STD	W_{LT}^{Media}	STD	W^{Media}	STD
Fornecedor 1	0,96	0,60	0,15	0,10	1,13	3,59
Fornecedor 2	0,57	0,20	0,30	0,06	0,87	0,26
Fornecedor 5	0,28	0,06	0,09	0,04	0,38	0,09

No entanto, em termos de valores absolutos para a liga 7475-T7351, o menor valor encontrado foi $0,29 \text{ kJ/m}^3$ do Fornecedor 1 para uma placa de 25,4 mm de espessura - Figura 36. Já para a liga 7050-T7451, o menor valor encontrado foi $0,34 \text{ kJ/m}^3$ para o Fornecedor 2 para uma placa de 12,7 mm de espessura - Figura 37.

A variação do parâmetro W_{Total} em função da espessura da placa para uma dada liga também pode ser aplicada para a comparação de fornecedores. A Figura 64 mostra o gráfico W_{Total} x espessura para a liga 7475-T7351.

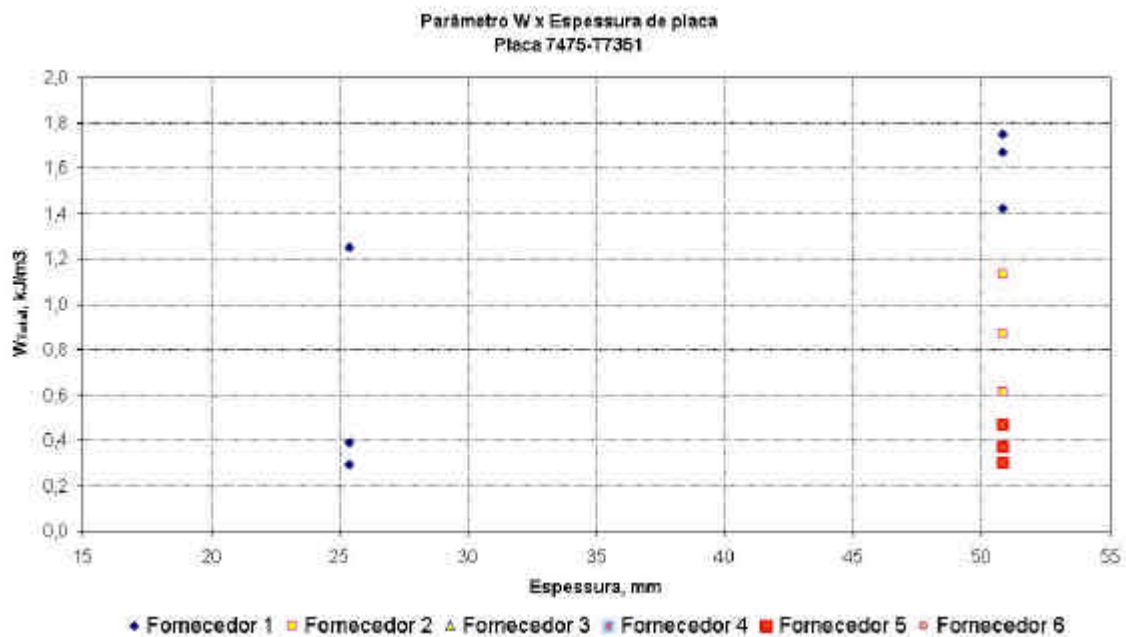


Figura 64 – Parâmetro W em função da espessura para vários fornecedores.

A dispersão geral dos dados se dá em função dos dados experimentais de três fornecedores. Apesar do número reduzido de dados experimentais, para espessuras de 25,4 e 50,8 mm, observa-se uma tendência de aumento do valor de W com a espessura. Esta tendência, fica mais clara para os dados do Fornecedor 1. E na espessura de 50,8 mm observa-se que o Fornecedor 5 possui a menor dispersão dos valores de W_{Total} com o menor valor médio dos dados obtidos. Nessa mesma amostragem, para a espessura de 50,8 mm, o maior valor médio de W_{Total} foi para o Fornecedor 1.

A Figura 65 mostra o gráfico W_{Total} x espessura para a liga 7050-T7451. A dispersão dos valores de W_{Total} variou em função da espessura e dos fornecedores. Os maiores valores de W medidos estão entre as espessuras de 76,2 a 100,8 mm. Abaixo de 76,2 mm e acima de 100,8 mm, a tendência dos valores de W é diminuir.

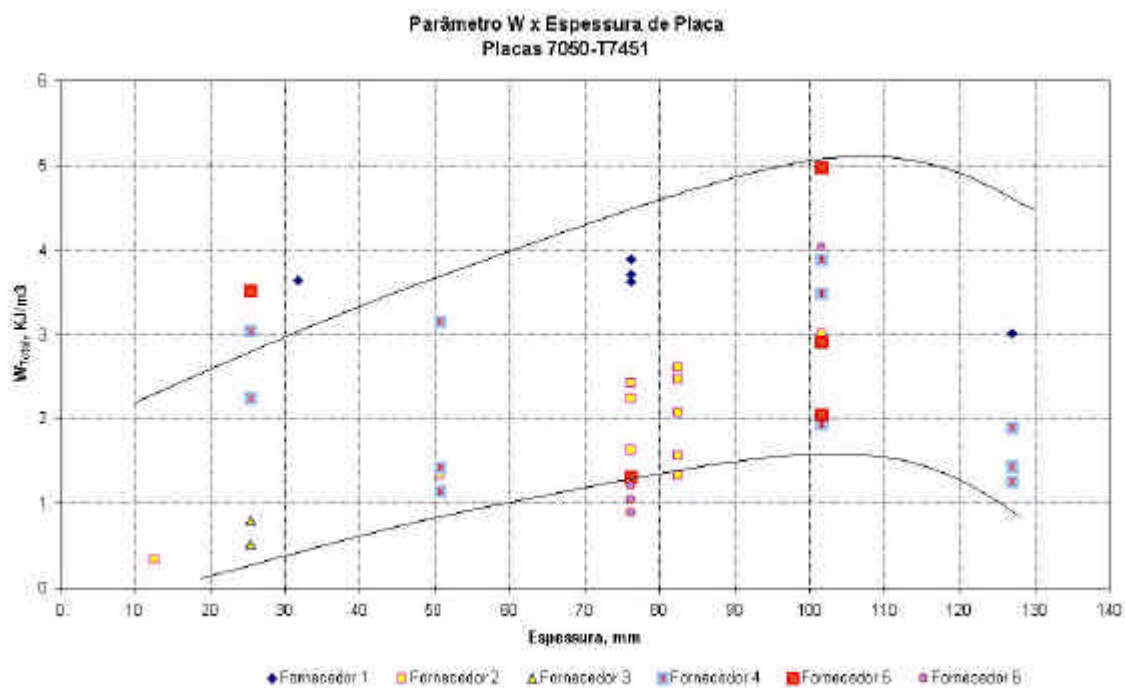


Figura 65 - – Parâmetro W em função da espessura para vários fornecedores.

Os valores obtidos neste trabalho coincidem com as medidas realizadas por Lequeu et al. [8] para ligas 7XXX, conforme mostra a Figura 66. Ainda segundo esse trabalho, o processamento adequado das placas pode não

somente reduzir a dispersão dos dados de W_{Total} mas também reduzir o nível de W_{Total} em até 50%.

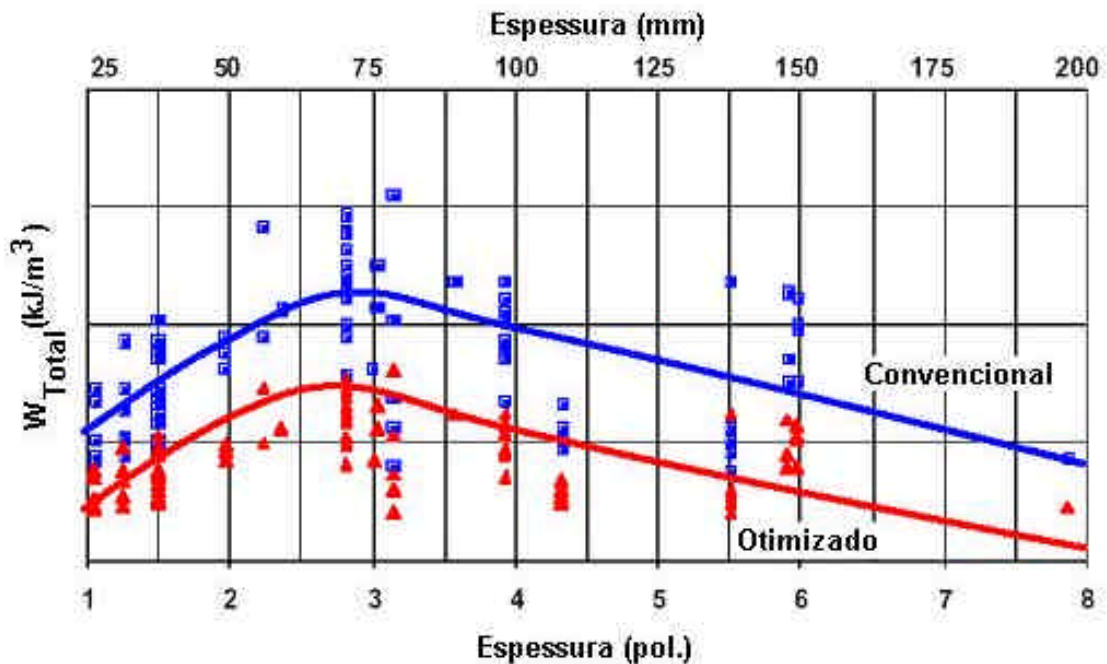


Figura 66 – Valores de W para placas convencionais e otimizadas em função da espessura da placa. Traduzido de [38].

5.3 Ensaios de "try-out" de fabricação

Os resultados de "try-out" de fabricação permitiram verificar a correlação entre o nível de tensão residual na placa de matéria prima – parâmetro W - e o empenamento medido durante e após a usinagem da peça. Além de permitir verificar a eficácia da aplicação do modelo desenvolvido em condições reais de fabricação.

5.3.1 Baía do trem de pouso

As peças usinadas a partir da placa do Fornecedor 2 com $W=1,21 \text{ KJ/m}^3$ apresentaram um nível de empenamento muito baixo, sendo que uma peça teve distorção máxima de 0,51 mm e a outra de 1,32 mm. Já a peça usinada a partir da placa do Fornecedor 1 com $W=3,7 \text{ KJ/m}^3$ apresentou distorção de 3,58 mm.

Estes resultados permitem comprovar a correlação direta entre o valor de energia elástica armazenada (parâmetro W) e o empenamento em peças

usinadas. Este ensaio também permitiu verificar que é necessário considerar a rigidez geométrica da peça. Nas regiões onde há presença de reforços o empenamento foi menor do que o verificado nas regiões sem reforços.

De qualquer modo para uma dada geometria de peça o empenamento é proporcional à energia elástica armazenada, que é a manifestação das tensões residuais do material.

5.3.2 Nervura I do Wing Stub

As placas apresentaram empenamento inicial diferente (planicidade). Os empenamentos medidos após o desbaste da face superior e após a usinagem completa não tiveram qualquer correlação com o empenamento inicial, mostrando que uma inspeção de recebimento que considere apenas o dimensional não garante o desempenho da placa no processo de usinagem.

Considerando a variação entre empenamento inicial e empenamento após o primeiro desbaste, verifica-se que foi semelhante para as placas normais (standard) e aproximadamente a metade para a placa de baixa tensão residual (LRS).

As três peças foram usinadas simultaneamente comprovando mais uma vez que diferenças no valor de energia elástica armazenada são responsáveis pelo comportamento em usinagem.

A medição do empenamento após a usinagem completa mostrou empenamento nas duas direções (positivo e negativo) para todas as peças, porém a maior variação foi verificada na placa standard do Fornecedor 5 (2,601 mm).

A peça que mostrou menor empenamento foi a usinada com a placa LRS do Fornecedor 5 (1,198 mm).

5.3.3 Caverna da fuselagem dianteira

Esta peça confirmou os resultados verificados nos testes anteriores, indicando que placas de baixa tensão residual são mais estáveis durante a usinagem do que as placas atualmente utilizadas.

Esta peça por apresentar paredes finas tem uma rigidez geométrica baixa, o que deveria favorecer a ocorrência de empenamento. O resultado de

empenamento máximo igual a 0,5 mm demonstra a capacidade de estabilizar o processo quando se utilizam placas de baixa tensão residual.

5.3.4 Tampa dianteira

O menor empenamento verificado quando se posiciona a peça a 1,0 mm da superfície deve-se ao fato sua alma ficar localizada em uma região onde a tensão residual é praticamente nula, conforme se verifica na figura 31.

O posicionamento da peça a 15,0 mm coincide com a metade da placa, se for adicionada metade de 9,5 (que corresponde à espessura da placa menor desbastada a partir da placa mais espessa, ou seja: $15 \text{ mm} + 4,75 \text{ mm} = 19,75 \text{ mm}$, que é aproximadamente metade de 38,1 mm). Neste caso a linha neutra da peça coincide com a linha neutra da placa. Apesar de haver um valor elevado de tensão nesta região, existe uma particularidade, que é o fato de haver uma simetria do perfil de tensões. Em outras palavras, empena-se para ambos os lados e um empenamento positivo acaba compensando um negativo gerando um empenamento global baixo. A pior situação está quando se posiciona a peça a 8,0 mm pois neste caso não é possível compensar as tensões, pois além de não haver simetria, a variação da tensão na espessura nessa região é mais pronunciada (ver reta amarela na Figura 67).

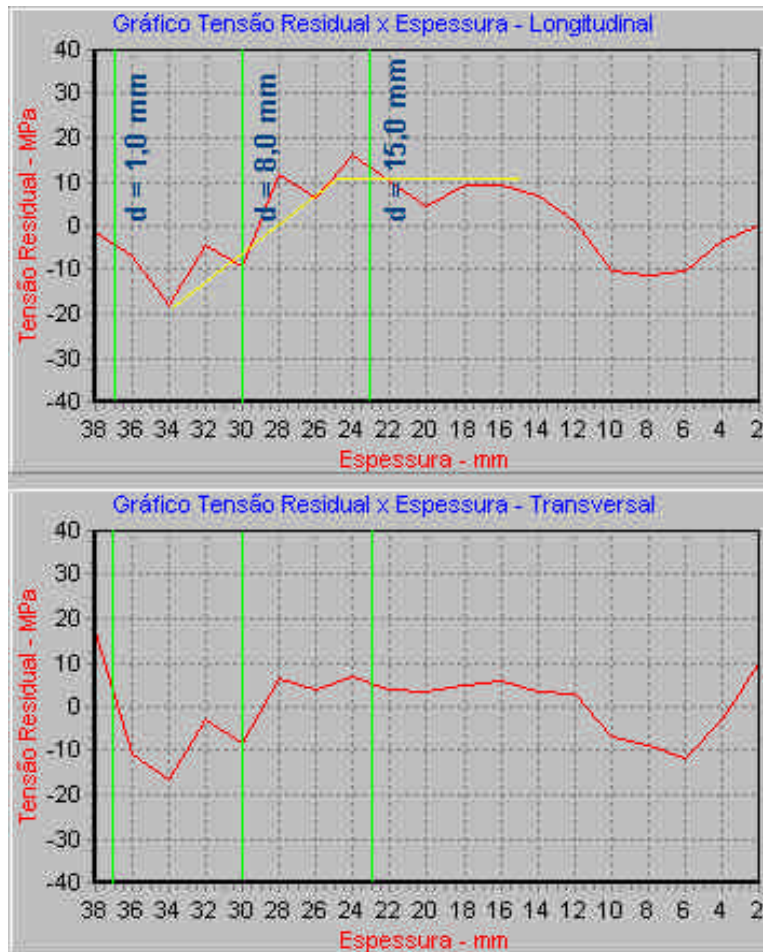


Figura 67 – Perfil de tensões da placa utilizada para a usinagem da tampa.

Com base nas medições de empenamento obtidas durante a realização dos ensaios de fabricação, pode-se obter uma correlação preliminar como mostra a Figura 68. No gráfico desta figura pode-se observar uma linha horizontal para $W = 1,0 \text{ kJ/m}^3$ e outra para $W=2,0 \text{ kJ/m}^3$, pois segundo Heymès [7], valores de W menores que $1,0 \text{ kJ/m}^3$ possuem menor probabilidade de empenamento. E valores de W acima de $2,0 \text{ kJ/m}^3$ possuem maior probabilidade de empenamento. O gráfico da Figura 68 apresenta ainda uma regressão linear. A equação da regressão está indicada ao lado. Apesar da baixa correlação linear (0,44) ela é suficiente para confirmar os intervalos de W indicados no trabalho de Heymès [7].

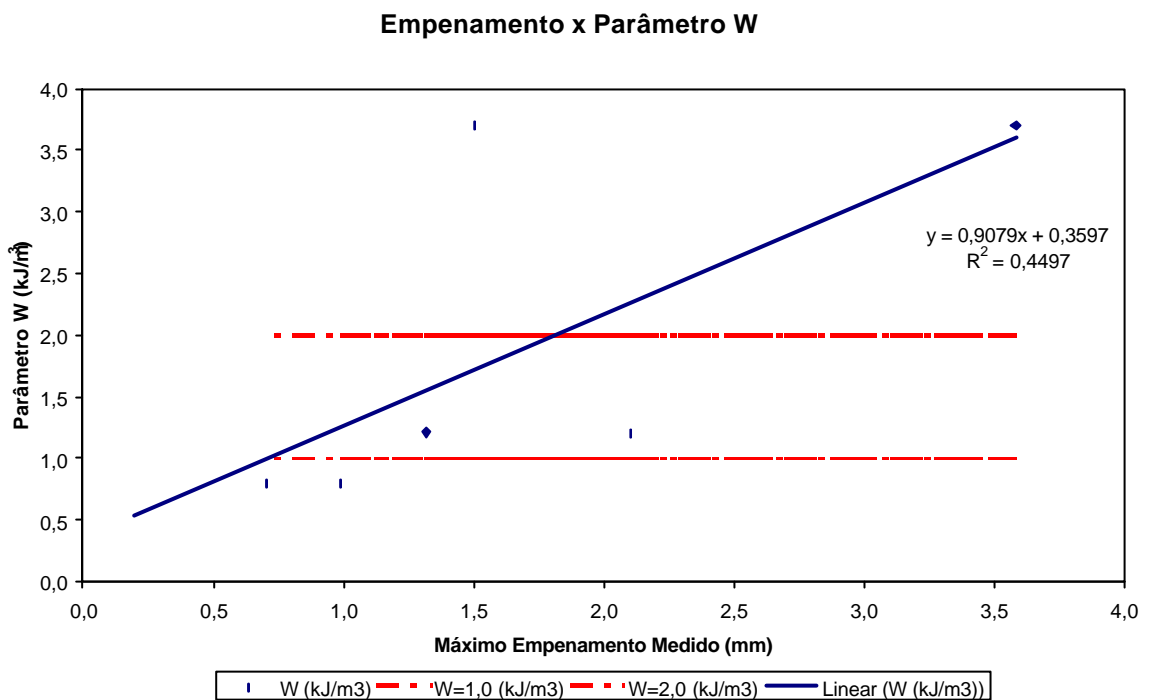


Figura 68 Correlação empenamento máximo medido e parâmetro W obtido nos ensaios de fabricação.

A título de exemplificação, se um empenamento da ordem de 0,8 mm for considerado admissível, o valor de W_{Total} deverá ser aproximadamente 1,0 KJ/m³, segundo a regressão linear. Este valor coincide com os trabalhos de Heymès [7], conforme detalhado em 2.5, onde os níveis de W_{Total} são correlacionados com a probabilidade de empenamento em peças usinadas a partir de placas.

6 CONCLUSÕES

A principal causa do empenamento na usinagem de peças a partir de placas laminadas é a tensão residual presente nas mesmas. Esta tensão é inerente aos processos termo-mecânicos de fabricação das placas, porém pode ser controlada pelo fabricante.

As variáveis do processo de usinagem exercem pouca influência no empenamento final de peças usinadas, dentro dos parâmetros usuais praticados.

O processo de usinagem em alta velocidade da mesma maneira que o processo convencional, não é capaz de produzir peças sem empenamento, a menos que utilize placas com níveis de W_{Total} baixos.

O perfil de tensões no material pode ser representado pela energia elástica armazenada, chamada de parâmetro W . Este parâmetro revela um comportamento médio considerando todo o volume da placa e não apenas um plano.

O parâmetro W permite portanto prever o comportamento relativo ao empenamento antes de se usinar uma peça.

Os ensaios de caracterização das placas mostraram que o material de fornecimento regular não é capaz de assegurar a robustez do processo de usinagem.

O Fornecedor 1 envia sistematicamente material com alta energia elástica armazenada, indicando que tem um processo capaz e centrado em um valor elevado de energia. Isto sugere que este fornecedor tem um bom domínio do processo, e que, pelo fato do parâmetro W não ser um requisito de provisionamento (e.g., AMS-4050 [4]), provavelmente o Fornecedor 1 consegue um processo de fabricação mais enxuto e de custo mais baixo.

Os fornecedores 2 e 5 mostraram uma grande variação nos valores de W , sugerindo um baixo controle de processo no que se refere à energia elástica armazenada. Esta situação configura o caso mais crítico de fornecimento, pois é responsável pelas grandes variações de qualidade verificadas nas peças fabricadas.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Desenvolver um modelo matemático capaz de carregar um estado de tensões em um software de elementos finitos para modelar previsão de empenamento em usinagem. Isto permitirá definir o melhor posicionamento de um sólido da peça dentro de uma placa de matéria-prima.

Expandir esse estudo para a placas de matéria prima da nova geração de ligas de alumínio de aplicação em estruturas aeronáuticas primárias.

Comparar as propriedades mecânicas de placas convencionais com placas consideradas de baixa tensão residual, principalmente no que diz respeito à vida em fadiga, propagação de trinca e requisitos de corrosão.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KOLARIK, W.J. **Creating quality: process design for results**. McGraw-Hill. 54-59pp. 1999
2. Ashby, M.F. **Materials selection in mechanical design**. Butterworth-Heinemann. Second edition. 2000. 502pp.
3. BRINKSMEIER, H.E. et ali. **Residual stress – measurement and causes in machining processes**. Annals of the CIRP. Vol. 31/2/1982. pp. 491-509.
4. Society of Automotive Engineers. **Aluminum alloy plate 6.2Zn – 2.3Cu - 2.2Mg - 0.12Zr (7050-T7451) solution heat-treated, stress relieved, and overaged**. AMS 4050.
5. Society of Automotive Engineers. **Aluminum alloy plate 5.7Zn - 2.2Mg - 1.6Cu - 0.22Cr (7475-T7351) solution heat treated, stress relieved by stretching, and precipitation heat treated**. AMS 4202. Lakehurst, NJ. 2000. p. 1 – 9.
6. CALDARERA, L. Jr. **Stress management – When milling high performance aluminum alloys, the best way to prevent part distortion is to control residual stress**. Cutting tool engineering. March 1996. pp. 52-58.
7. HEYMES, F et ALLI. **Development of new Al alloys for distortion free machined aluminium aircraft components**. Proceedings of 1st international non-ferrous processing and technology conference, St. Louis Missouri, 1997.
8. HYODO, et ali. **Empenamento em peças estruturais aeronáuticas usinadas a partir de placas laminadas de ligas de alumínio da série 7XXX**. Anais 14^o CBECIMAT. 3-6 Dezembro 2000. São Pedro, SP. 12pp.
9. HYODO, A.; PIRES, P.C. **REPORT NR: 145-AT-363 Empenamento em peças usinadas a partir de placas laminadas da liga 7050-T7451 e 7475-T7351**. Nov. 2000. EMBRAER. 81 pp.
10. F. Heymès; T.J. Warner; B. Commet; P. Lequeu; P. Lassince **Distortion Free Aeronautical Parts :Optimization from Quenching to Machining**. Aeromat 1999.

11. JEANMART, P.; BOUVAIST, J. **Finite element calculation and measurement of thermal stresses in quenched plates of high strength 7075 aluminium alloy**, Materials Science Technology, October 1985. Vol. 1, pp. 765-769.
12. MOLDENHAUER, S. et. ali. **Recent improvement in high strength thick AA 7050-plate**. Materials Science Forum Vols. 331 – 337 (2000) pp. 1101 – 1106.
13. MARTIN, R; EVANS, D. **Reducing costs in aircraft: the metals affordability initiative consortium**. Advanced materials: featured overview. Home page: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0003/martin-0003.html> acessada em 09/03/2002.
14. NEWBORN, M.A. **Integrated process modeling for residual stress and machining distortion**. Alcoa Technical Center. Aeromat 2000. 46 transparências.
15. MILLER et ali. **Mechanical behavior of thin sheets machined from AA7050-T7451 plate**. Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications. Switzerland. Vols. 331-337. pp. 1243-1248.
16. HEINZ, A.; JAENSSON, B. **Stress relieving method for thick aluminum alloy plate: evaluation by x-ray diffraction residual stress measurement**. Home page: <http://www.tms.org/Meetings/Annual-97/Program/Sessions/TA330F.html> Acessado em 03/02/2002.
17. Hoogovens Aluminum Walzprodukte GmbH, Koblenz, Germany, Alfred Haszler, Hormoz Ghaziary. **Method for residual stress measuring**. Intl. Cl. G01H 11/08. US 6,234,020 B1. May 22, 2001.
18. HOOGOSENS ALUMINIUM WALZPRODUKTE GmbH, Koblenz, Germany, Alfred Haszler, Alfred L. Heinz, Otmar M. Müller. **Manufacture of thick aluminum alloy plate**. Int. Cl. C22F/104. US 1996000588026 EP 1995000201243. Jan. 17, 1996. Sept 8, 1998.
19. HOOGOSENS ALUMINIUM WALZPRODUKTE GmbH, Koblenz, Germany, Alfred Haszler, Alfred L. Heinz, Otmar M. Müller. **Stress relieving of an age hardenable aluminum alloy product**. Int. Cl. C22F/104. US 1997000990028 EP 1994096203563. Dec. 12, 1997. Dec. 12, 2000.

20. ALUMINUM COMPANY OF AMERICA, Pittsburgh, PA, Shelly Myasato, Gary H. Bray, John Liu, James T. Staley. **Aluminum alloy products suited for commercial jet aircraft wing members.** Int. Cl. C22C 21/06. US 005865911A. May 26, 1995. Feb. 2, 1999.
21. PECHINEY-RHENALU, Paris, France. Ravi Shahani, Jean François Verdier, Philippe Lassince, Guy Michel Raynaud, Christophe Sigli, Pierra Sainfort, Fabrice Heymès, Philippe Lequeu, Guy-Michel Raynaud. **Thick Al-Zn-Mg-Cu alloy products with improved properties.** Intl.Cl. C22C 21/10. US 6027582. February 22, 2000.
22. PECHINEY - RHENALU, Paris, France. Fabrice Heymès, Philippe Lequeu, Guy-Michel Raynaud. **Al-Cu-Mg sheet metals with low levels of residual stress.** Intl.Cl. C22C 21/00. US 1996000663017. June 17, 1996. June 20, 2000.
23. Aluminum Association <http://www.aluminum.org/> acessada em Março de 2002.
24. **Aluminum standards and data 1997**, The Aluminum Association. Washington D.C.
25. STALEY, J.T.; LIU, J.; HUNT, W.H., Jr **Aluminum alloys for aerostructures.** Advanced Materials & Processes. October 1997. 17-20 p.
26. WARNER, T.J. et alii. **Aluminium alloy development for affordable airframe structures.** 3rd. ASM International Paris Conference on Synthesis, Processing and Modelling of Advanced Materials. Pp. 79-88.
27. RENDIGS, K.-H. **Aluminium structures used in aerospace – status and prospects.** Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications. Vol. 242. 1997. pp. 11-24.
28. FRIDLANDER, I.N. **Russian aluminum alloys for aerospace and transport applications.** Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications. Switzerland. 2000. pp.921-926.
29. VASUDEVAN, A.K.; DOHERTY, R.D. **Aluminum alloys – contemporary research and applications.** Treatise on Materials Science and Technology. Vol. 31. 1989. 702 p.

30. SAINFORT, P.; SIGLI, C.; RAYANAUD, G.M.; GOMIERO, Ph. **Structure and property control of aerospace alloys**. Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications. Switzerland. Vol. 242. 1997. pp. 25-32.
31. STARK, E.A., Jr; STALEY, J.T. **Application of modern aluminum alloys to aircraft**. Alcoa Technical Center. 1995. 41 pages.
32. EHRSTRÖM, J.C; WARNER, T. **Metallurgical design of alloys for aerospace structures**. Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications. Switzerland. Vol. 331-337. 2000. pp. 5-16.
33. HORNBOGEN, E.; STARKE, JR. E.A. **Theory assisted design of high strength low alloy aluminum**. Acta Metallurgica Materialia. Vol. 41. No. 1. pp. 1-6. 1993.
34. STALEY, J.T. HUNT, W.H. Jr. **Needs of the aircraft industry for aluminum products**. 12th. Annual NCMS Technical Conference and Exposition. 7 pages. in <http://techcon.ncms.org/98con/> acessada em 31/01/2002.
35. LIU, J.; KULAK, M. **A new paradigm in the design of aluminum alloys for aerospace applications**. Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications. Switzerland. Vol. 331-337. 2000. pp. 127-140.
36. SHAHANI, R. et. al. **High strength 7XXX alloys for ultra-thick aerospace plate: optimisation of alloy composition**. Proceedings of ICAA-6. 1998. pp. 1105-1110.
37. Pechiney-Rhénalu. Shaping the Sky: Pechiney on board < [http://www.Pechiney-aerospace.com / site / avion / centre _ piece.cfm?id_piece=1&teste=486](http://www.Pechiney-aerospace.com/site/avion/centre_piece.cfm?id_piece=1&teste=486)> acessado em: 10 mar 2002.
38. Lequeu P, Lassince P, Warner T, Raynaud G.M. **Engineering for the future: weight saving and cost reduction initiatives**. Aircraft Engg Aerospace Tech. 73, 147 (2001).
39. WEBSTER, G.A. **Role of residual stress in engineering applications**. Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications. Switzerland. Vols. 347-349. 2000. pp. 1-9.
40. TREUTING, R.G.; READ, W.T. Jr **A mechanical determination of biaxial residual stress in sheet materials** Journal of applied physics, v 22, number 2, 130-134, February 1951.

41. KANDIL, F.A.; LORD, J.D.; FRY, A.T. e GRANT, P.V. **A review of residual stress measurement methods – a guide to technique selection.** National Physical Laboratory – NPL: Materials Centre. Teddington Middlesex, UK, February 2001. 42p.
42. PRIME, M.B.; JACOBSON, L. A.; PACHECO, M. A.. **Residual stress measured before and after stress relief in rolled aluminum plate.** Los Alamos National Laboratory. LA-UR-01-4723. Submitted to: Book of Abstracts. 1999 ASME Mechanics and Materials Conference June 27- 30, 1999. Blacksburg, Virginia USA. Pages 241 – 242.
43. PRIME, M.B.; HILL, M. R. **Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate.** Los Alamos National Laboratory. LA-UR-01-4723. Submitted to: Scripta Materialia v(46), Number 1, pp. 77-82, 2002.
44. KATAOKA, K.; DOI, O. **Measurement of principal residual stresses in orthotropic plate when their directions are unknown.** Bulletin of JSME. Vol. 16. nº 102. Dec. 1973. 1867-1876 pp.
45. TREUTING, R.G.; LYNCH, J.J.; WISHART, H.B.; RICHARDS, D.G. **Residual stress measurements.** ASM. Cleveland, Ohio. October 1951. p 42 – 96.
46. HARIRI, S.; VAUCHER, R.; FLAHAUT, P.; EYZOP, D., ROBIN, C. **Residual stresses measurements by dissolution methods.** MAT-TEC 96. J. Lu. Technology Transfer Series. IITT International. 7p.
47. FLAVENOT, J.F. **Layer removal method.** Centre Techniques des Industries Mécaniques. in Handbook of Measurements of residual stresses. SME, Inc. The Fairmont Press, Inc. 35 – 40 pp.
48. FLAVENOT, J.F.; LARI, N. **La mesure des contraintes résiduelles.** nº 31 Septembre 1977. France. 43 p.
49. TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. **Theory of plates and shells.** Mc Graw-Hill Book Company, Inc. 1968. 580 p.
50. NIKU LARI, A.; FLAVENOT, J.F. **Mésure des contraintes résiduelles sur des surface planes.** Matériaux et Structures. Ed. Hermes [1977].

51. Heymès, F. FAX: Ref: CRV/ALT/FH/99.279 **Explanation on the mechanical model used for the residual stress measurements**. Pechiney – CRV Aeronautics / Technical Products. Voreppe, June 21st 1999. 7 pp.
52. CHAKRABARTI, D. J.; WEILAND, H; CHENEY, B.A.; STALEY, J.T. **Through thickness property variations in 7050 plate**. Materials Science Forum. Transtec Publications. V. 217-222 (1996). Pp. 1085 – 1090.
53. MILLER, M.P.; HARLEY, E.J., TURNER, T.J.; BEAUDOIN, A.J.; CASSADA, W.A. **Mechanical behavior of thin sheet machined from AA 7050T7451 plate**. Materials Science Forum. Transtec Publications. V. 331-337 (2000). Pp. 1243 – 1248.
54. TANNER, D.A.; ROBINSON, J.S.; CUDD, R.L. **Cold compression residual stress reduction in aluminum alloy**. Materials Science Forum. Transtec Publications. V. 347-349 (2000). Pp. 235-240.
55. KEIDEL, C. et al. **Achieving web – balanced property combinations in high performance aluminium products**. Corus Aluminium Rolled Products. Aeromat 2002. 16 p.
56. HEINZ, A.; HASZLER, A.; MÜLLER, O.; MILLER, W.S. **Innovative aluminium materials and components for future aerospace applications..** Corus Aluminum Walzprodukte GmbH. 2000. 5 páginas..

9 APÊNDICE 1

9.1 Caracterização das placas

A caracterização das placas foi realizada em placas de matéria-prima disponíveis em estoque. As placas, portanto, são efetivamente aquelas aprovadas de acordo com a respectiva especificação de matéria prima, definida pela Engenharia do Produto, e utilizadas para a fabricação de peças estruturais primárias por usinagem.

9.1.1 Dados de Ensaios de remoção de camadas

São apresentados a seguir os perfis médios de tensão residual calculados a partir dos dados experimentais medidos durante a realização dos ensaios de remoção de camadas para as placas da liga 7050-T7451 e 7475-T7351. Para cada fornecedor de placa de matéria-prima, os perfis estão separados por liga e por espessura. Os ensaios foram realizados em função da disponibilidade de material no estoque. Sendo assim, para alguns fornecedores não foi possível obter o mesmo universo de dados.

9.1.1.1 Sentido longitudinal

Os corpos de prova ensaiados estão de acordo com da amostragem descrita em 3.2.1. Neste caso, a maior dimensão do corpo de prova coincide com a direção de laminação da placa de matéria-prima.

9.1.1.1.1 Perfis de tensão residual do Fornecedor 1

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas de ligas 7475-T7351 e 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 1.

9.1.1.1.1 Liga 7475-T7351

A Figura69 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7475-T7351 de 25,4 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio foi 10 MPa e o mínimo foi -10MPa.

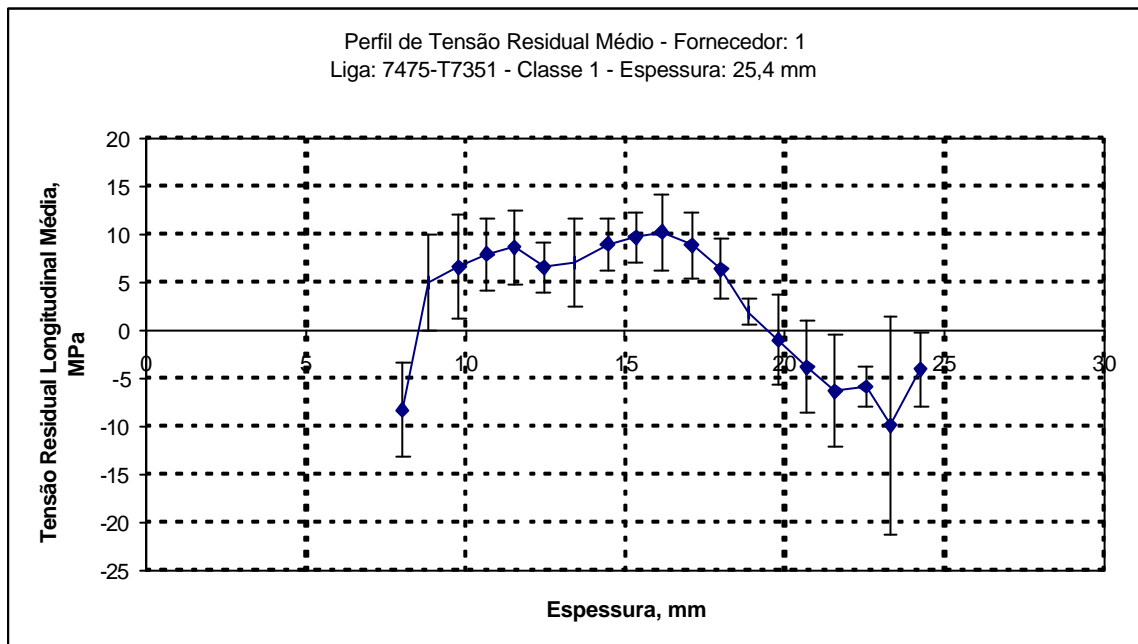


Figura69 Gráfico do perfil de tensão residual para placa AA 7475-T7351 com 25,4 mm de espessura.

A Figura70 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7475-T7351 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio foi aproximadamente 25 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -25MPa.

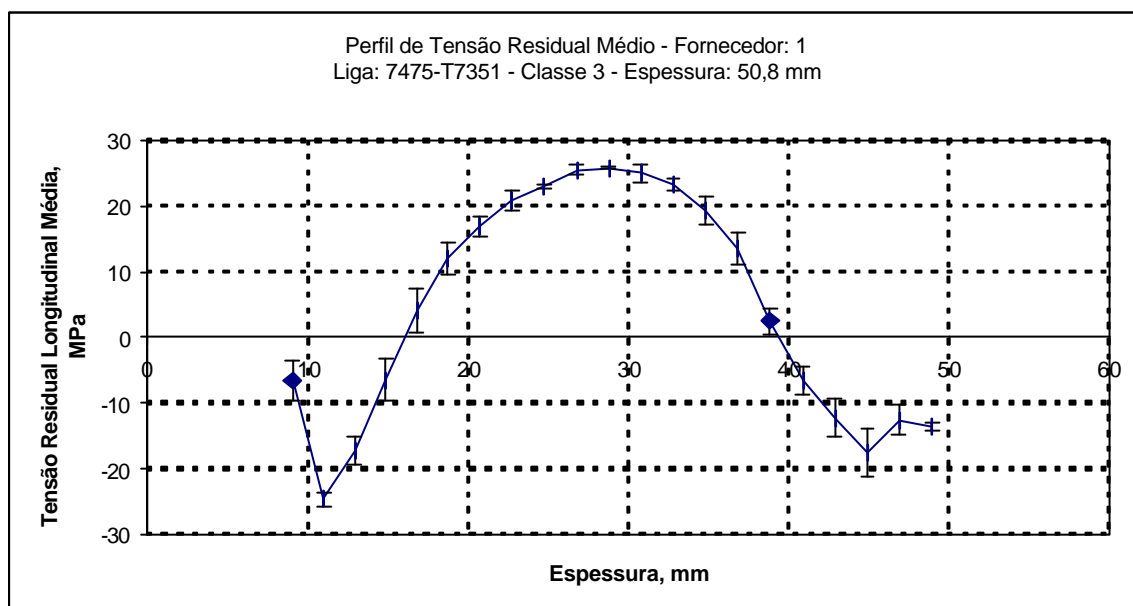


Figura70 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475–T7351 com 50,8 mm de espessura.

9.1.1.1.2 Liga 7050-T7451

A Figura71 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 31,75 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio calculado foi 30 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -30 MPa.

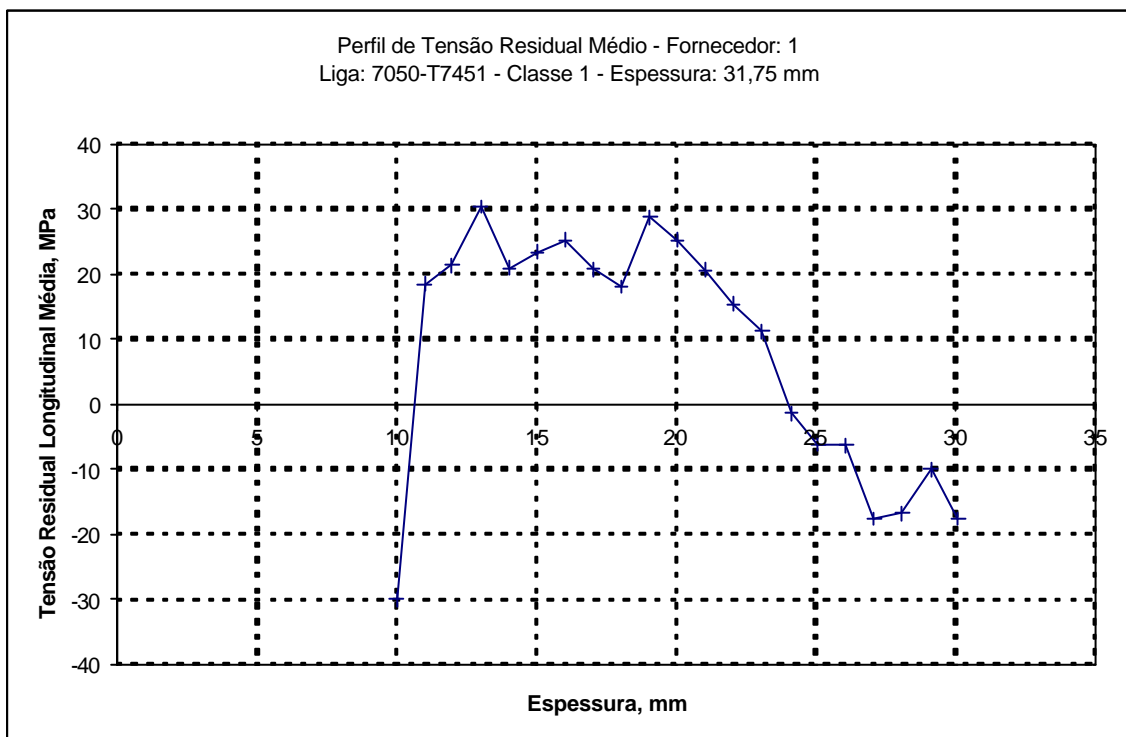


Figura71 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 31,8 mm de espessura.

A Figura72 apresenta o perfil de tensão residual média em placas 7050-T7451 de 76,2 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio calculado foi aproximadamente 32 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -35 MPa.

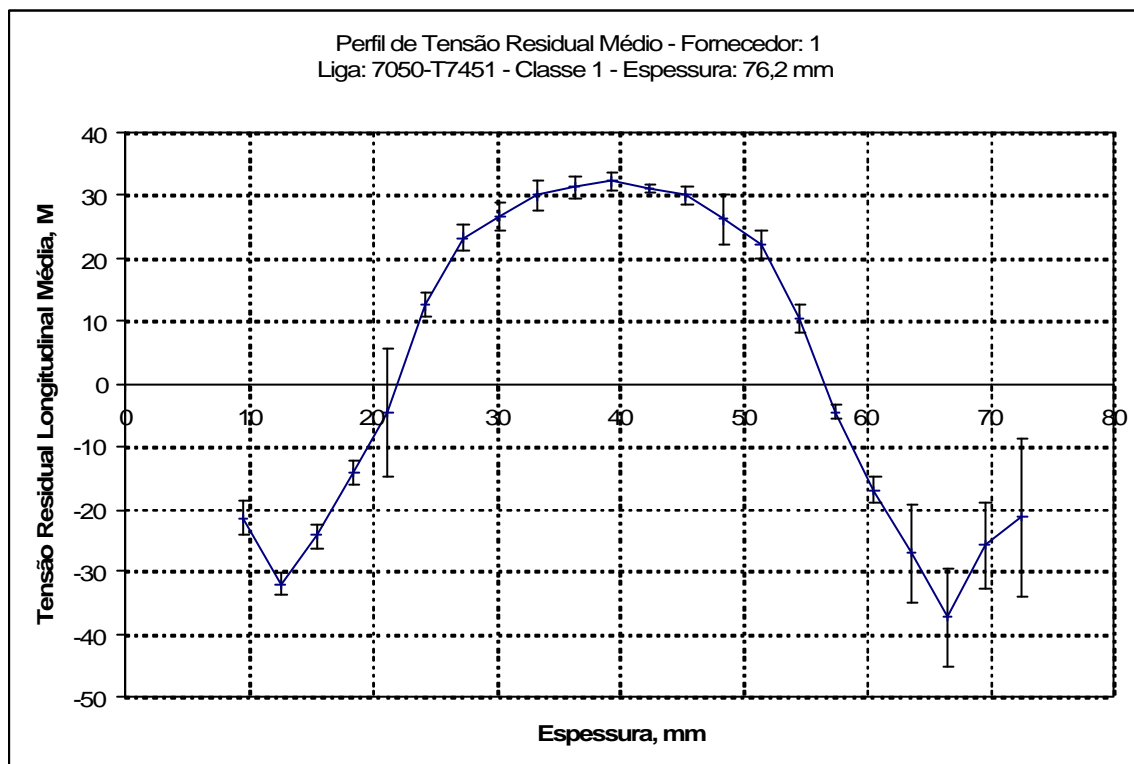


Figura72 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.

9.1.1.1.2 Perfil de tensão residual do Fornecedor 2

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas de ligas 7475-T7351 e 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 2.

9.1.1.1.2.1 Liga 7475-T7351

A Figura73 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7475-T7351 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio foi aproximadamente 15 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20MPa.

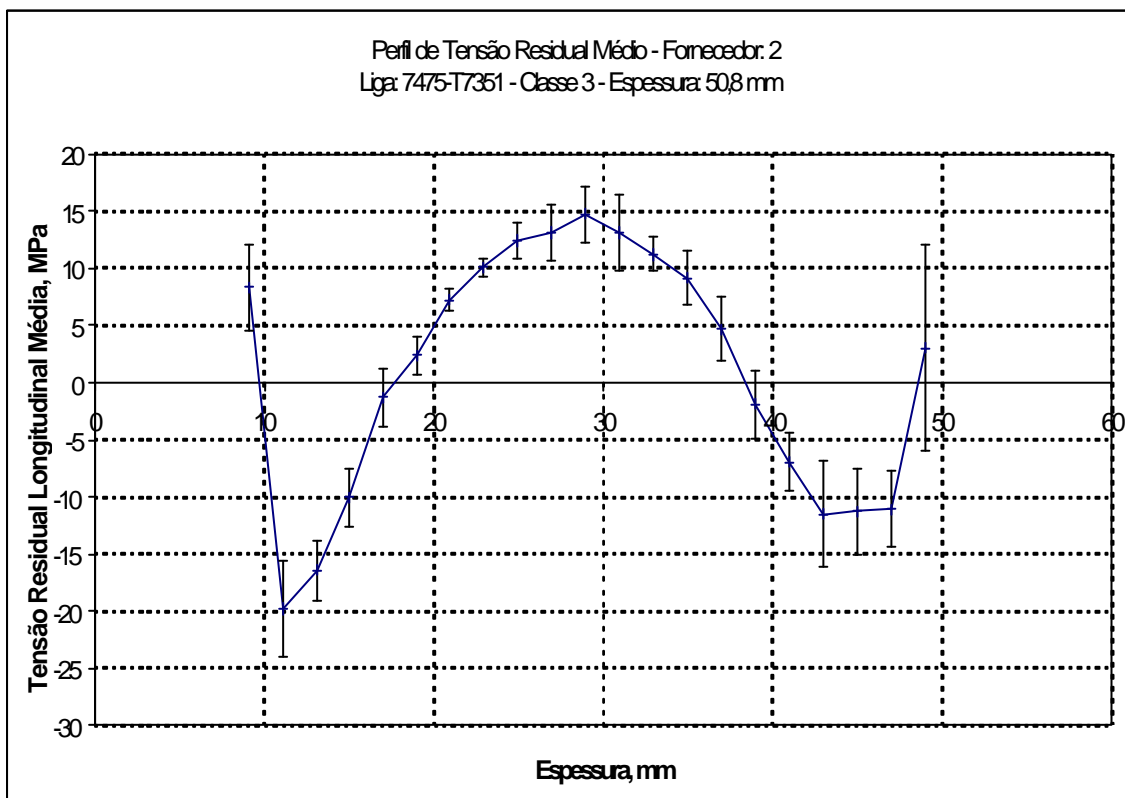


Figura73 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.

9.1.1.1.2.2 Liga 7050-T7451

A Figura74 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 12,7 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 13 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -13 MPa.

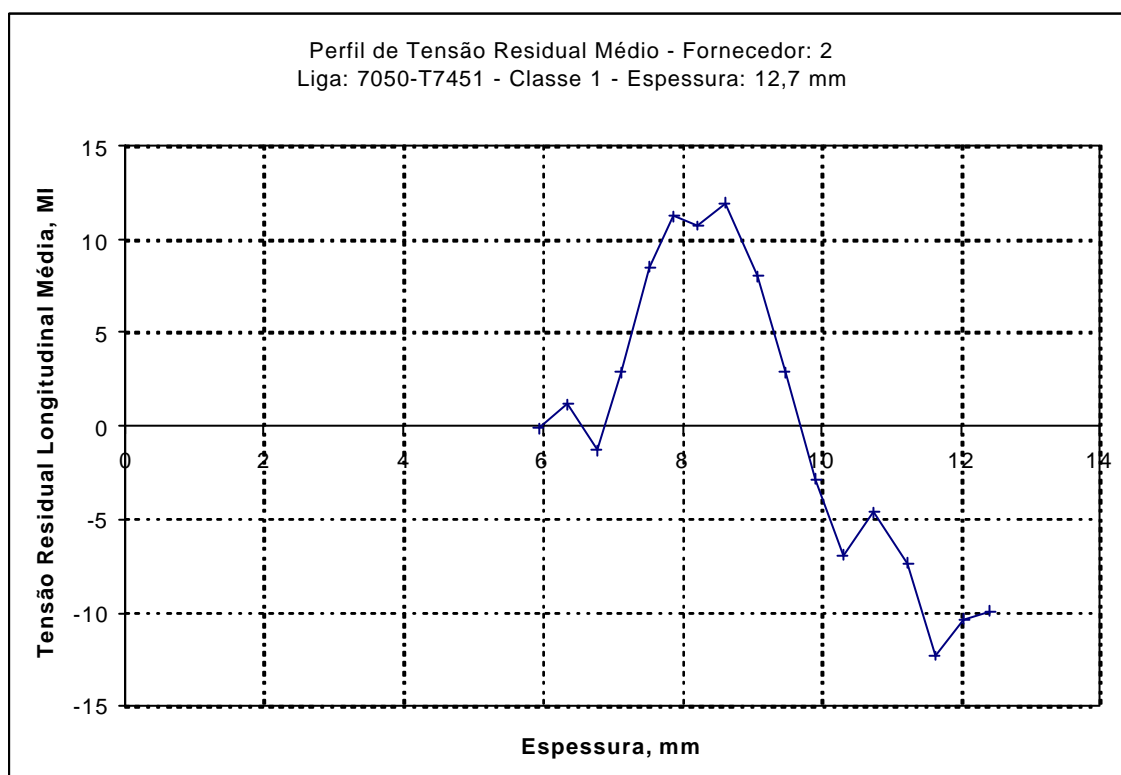


Figura74 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 12,7 mm de espessura.

A Figura75 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 19 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -23 MPa.

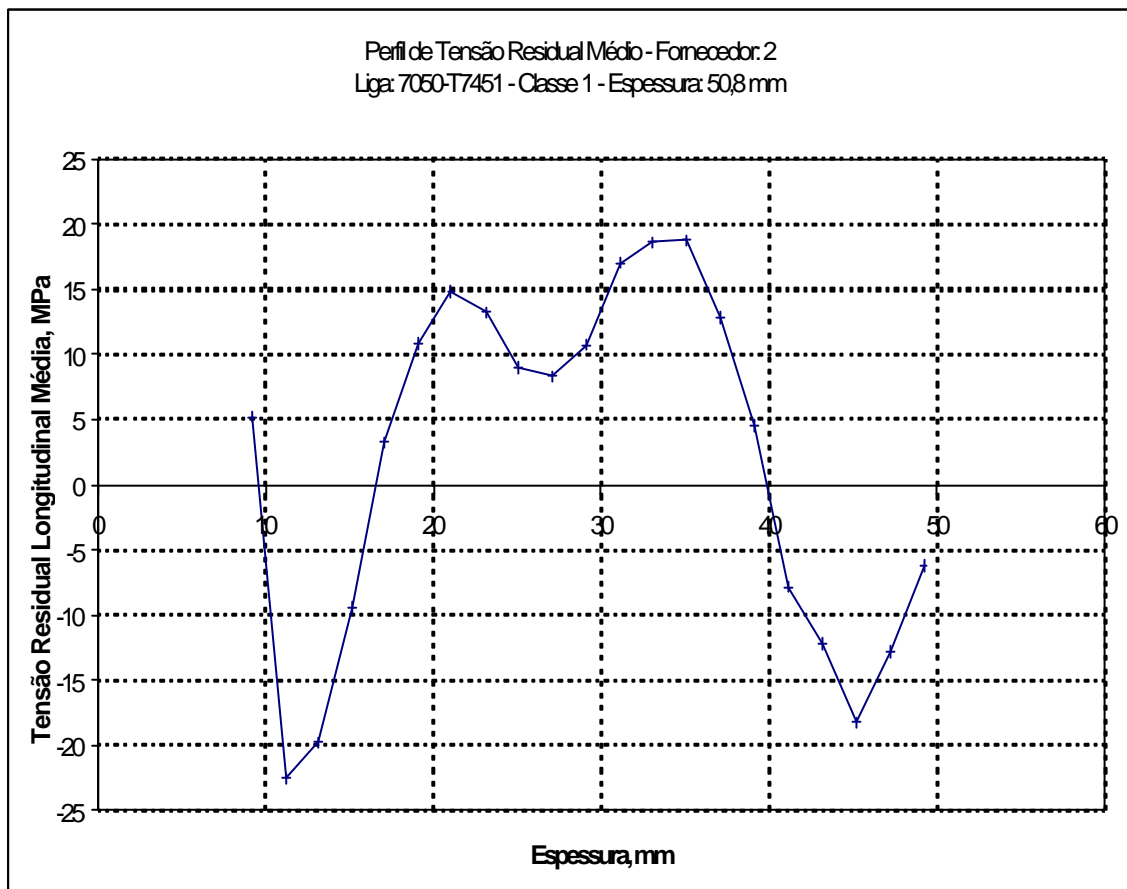


Figura75 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7351 com 50,8 mm de espessura.

A Figura76 apresenta o perfil de tensão residual médio de uma placa 7050-T7451 de 76,2 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 22 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

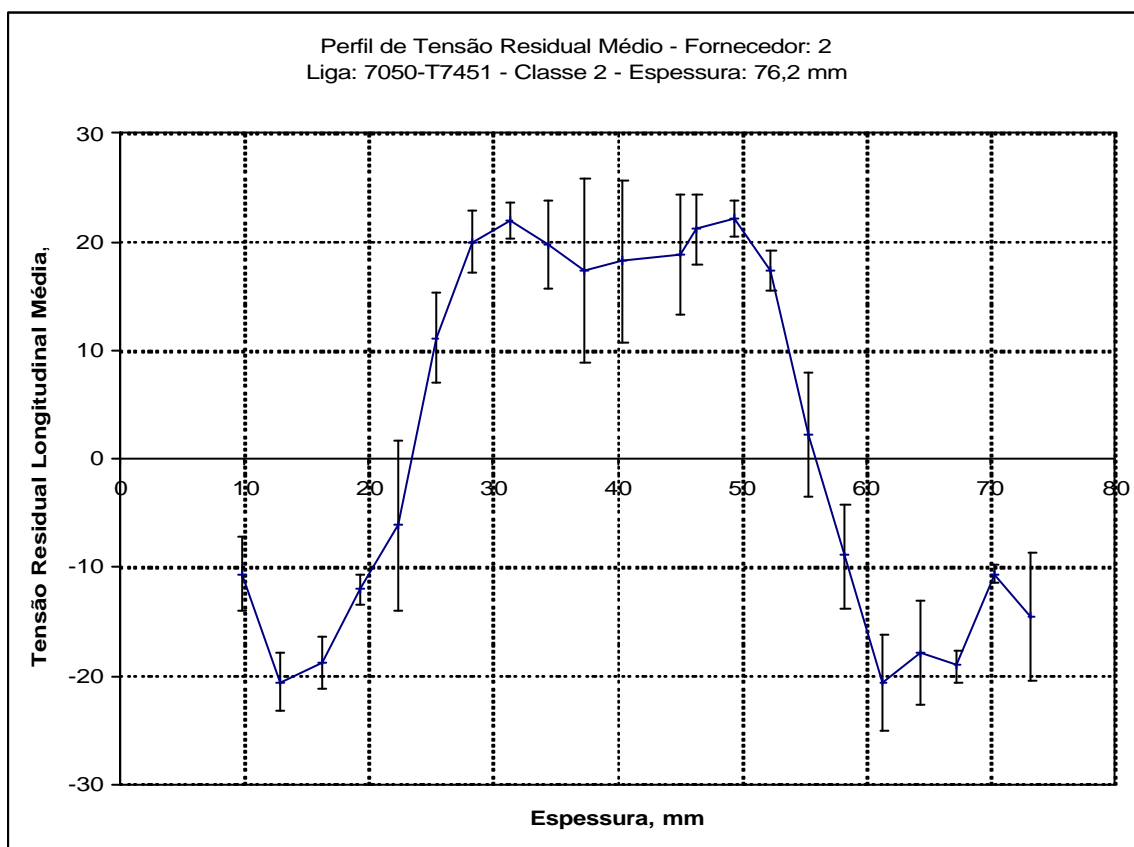


Figura76 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2mm de espessura.

A Figura77 apresenta o perfil de tensão residual médio de uma placa 7050-T7451 de 88,6 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 25 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -21 MPa.

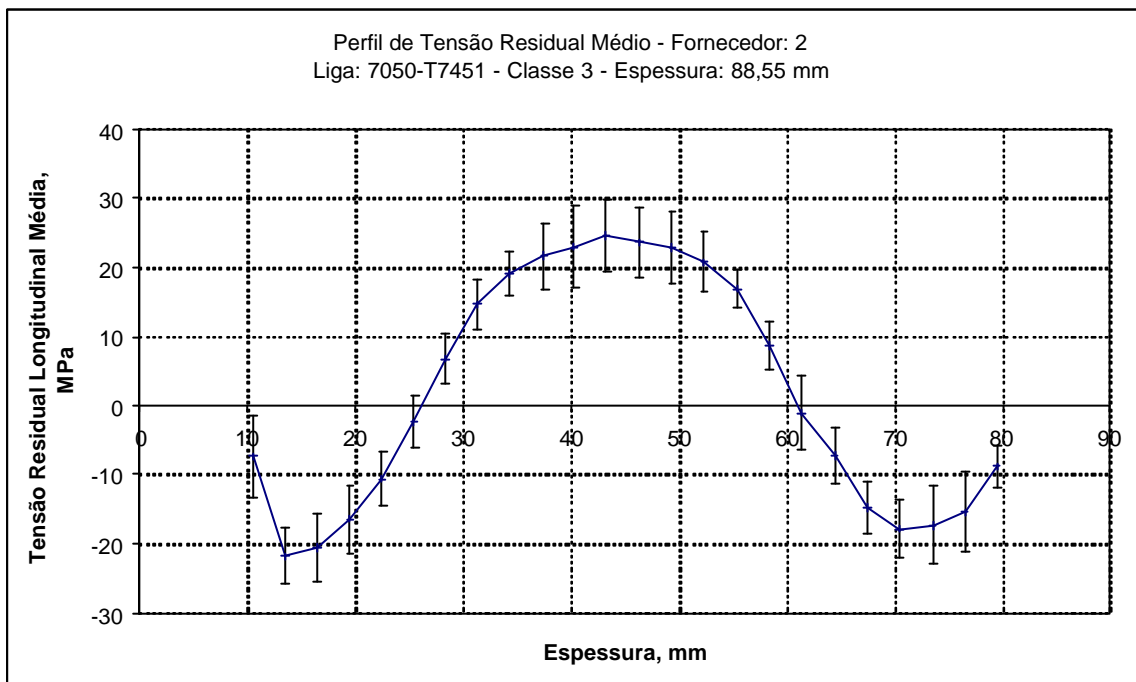


Figura77 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 82,55 mm de espessura.

A Figura78 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 101,6 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 30 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -30 MPa.

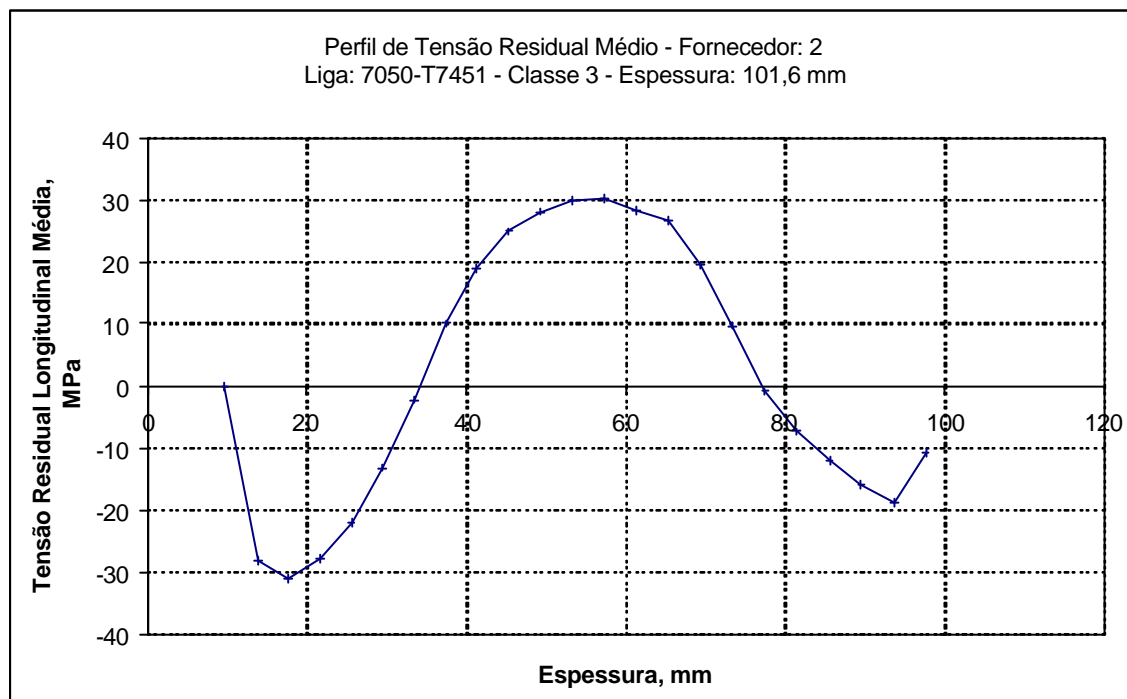


Figura78 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.

9.1.1.1.3 Perfil de tensão residual do Fornecedor 3.

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas da liga 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 3.

9.1.1.1.3.1 Liga 7050-T7451

A Figura79 apresenta o perfil de tensão residual médio de placa 7050-T7451 de 25,4 mm de espessura do fornecedor 3. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 13 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -13 MPa.

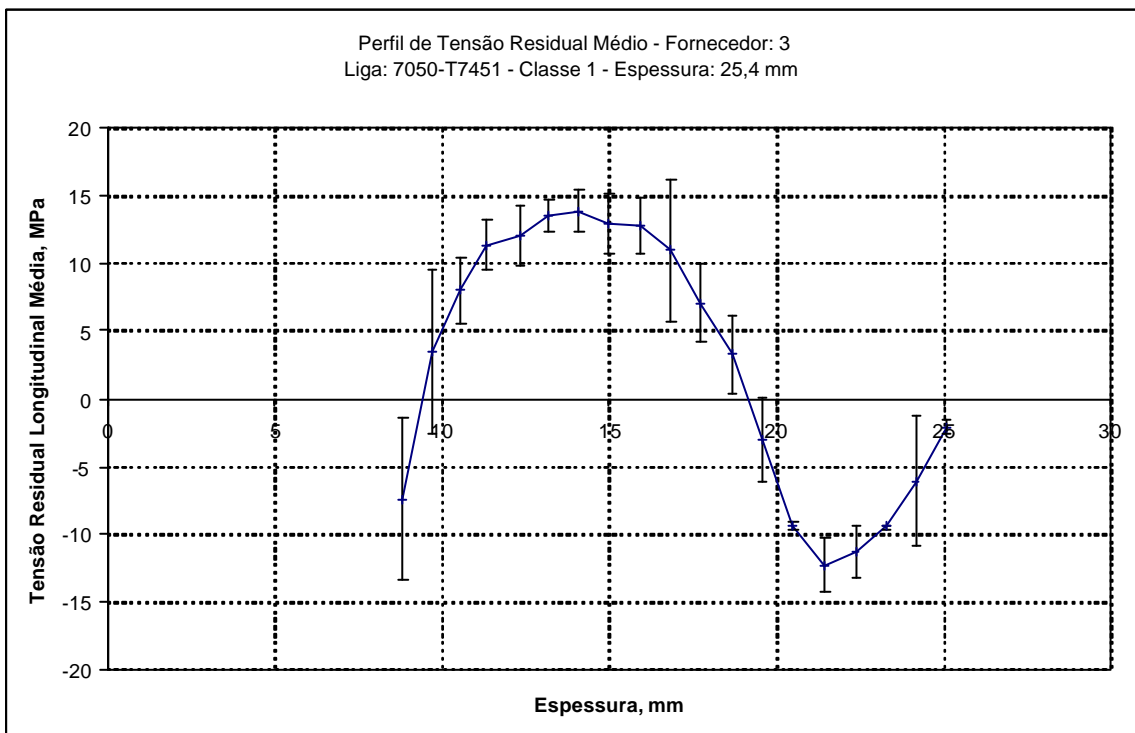


Figura79 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 25,4 mm de espessura.

9.1.1.1.4 Perfil de tensão residual do Fornecedor 4.

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas da liga 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 4.

9.1.1.1.4.1 Liga 7050-T7451

A Figura80 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 25,4 mm de espessura do fornecedor 4. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 25 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

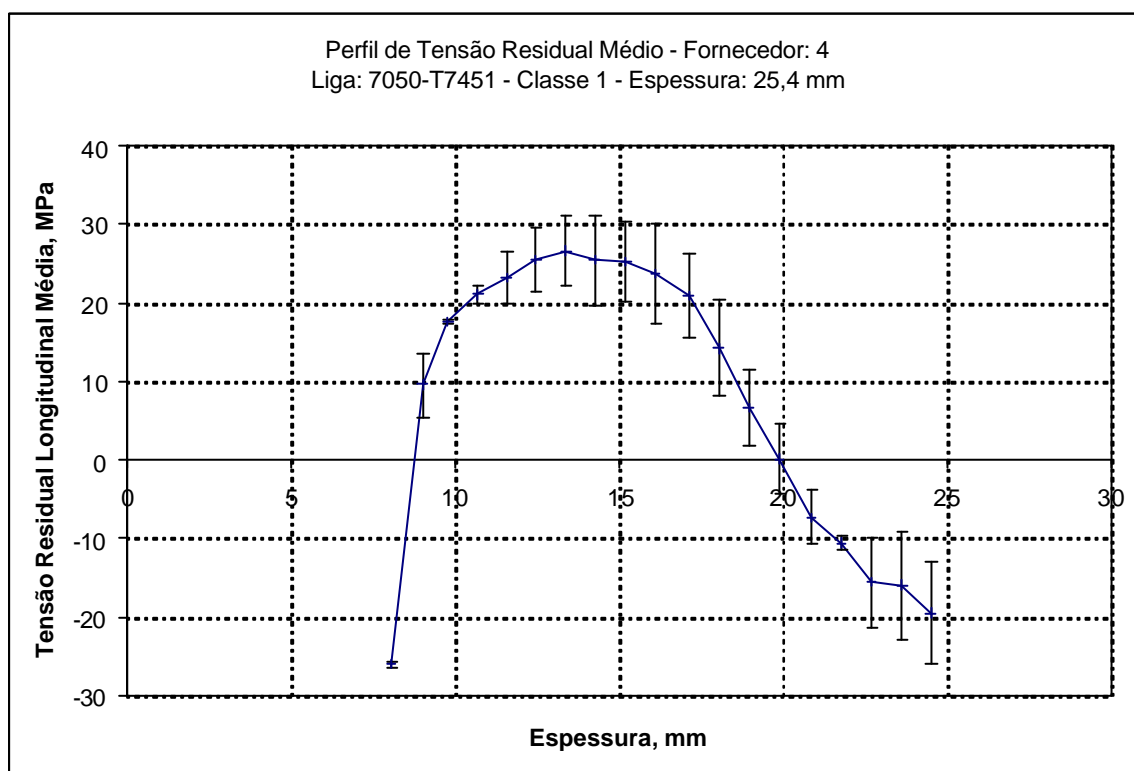


Figura80 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 25,4 mm de espessura.

A Figura81 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 4. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 25 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -28 MPa.

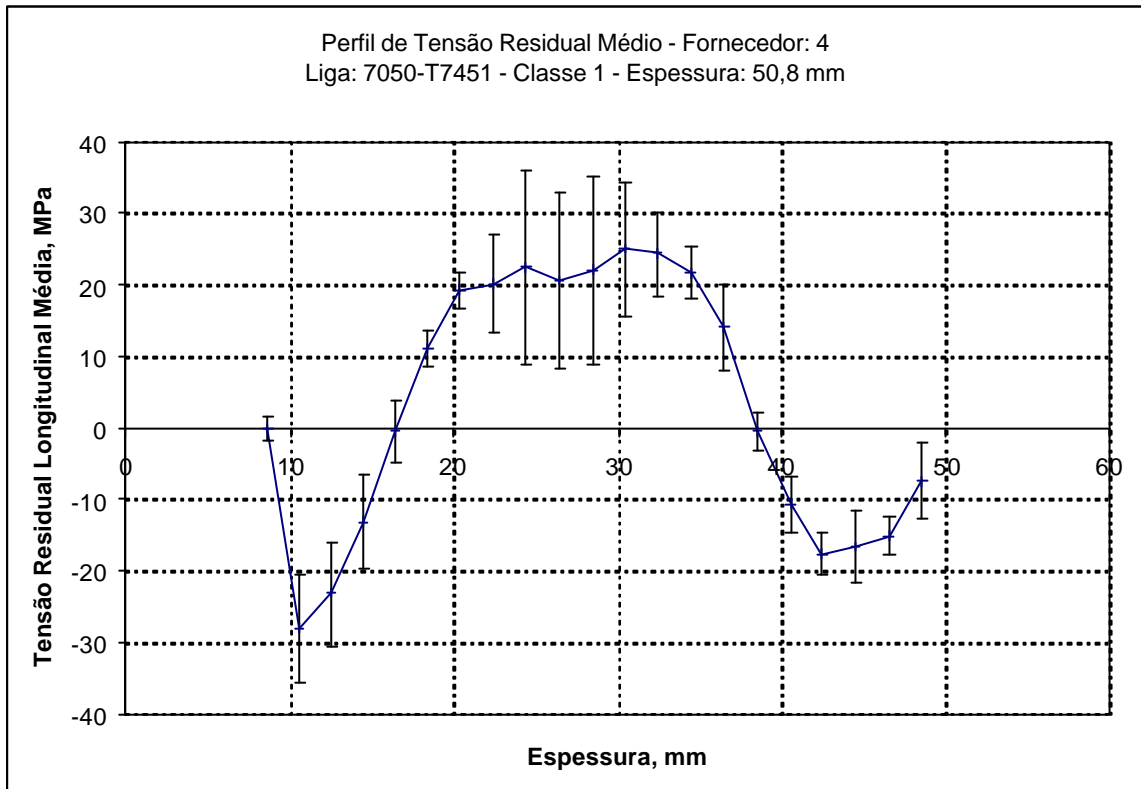


Figura81 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 50,8 mm de espessura.

A Figura82 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 101,6 mm de espessura do fornecedor 4. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 5 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -40 MPa.

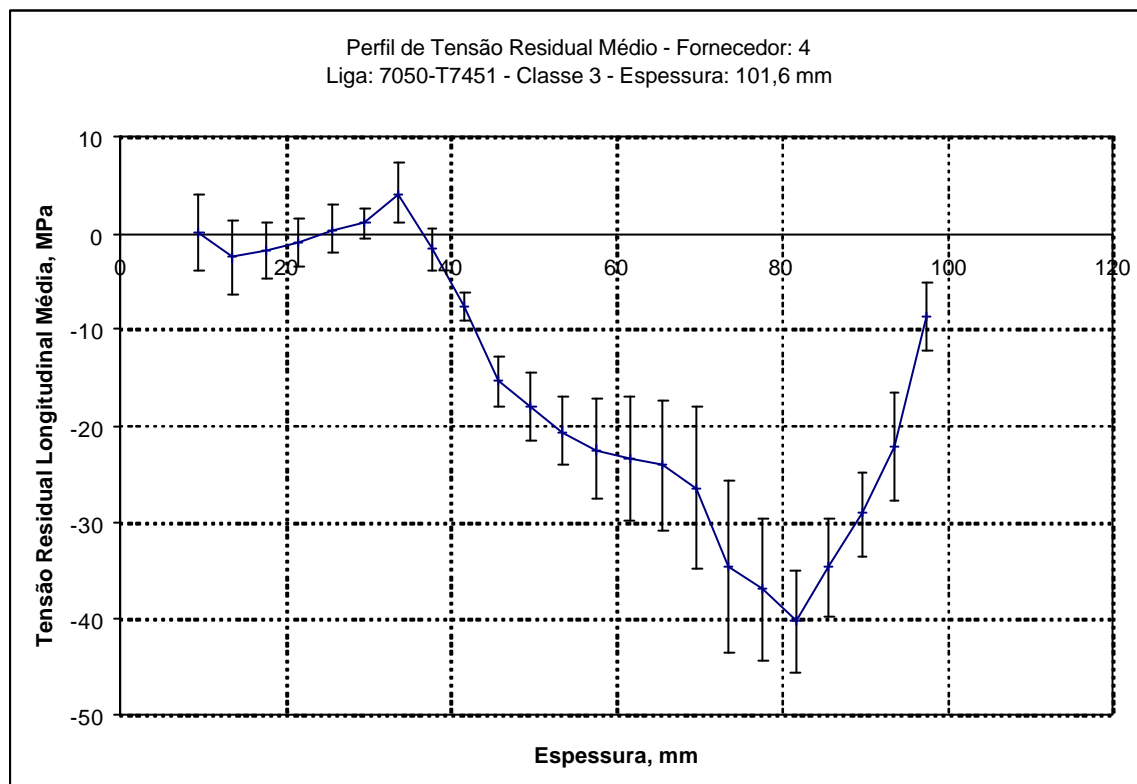


Figura82 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.

A Figura83 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 127 mm de espessura do fornecedor 4. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 22 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -22 MPa.

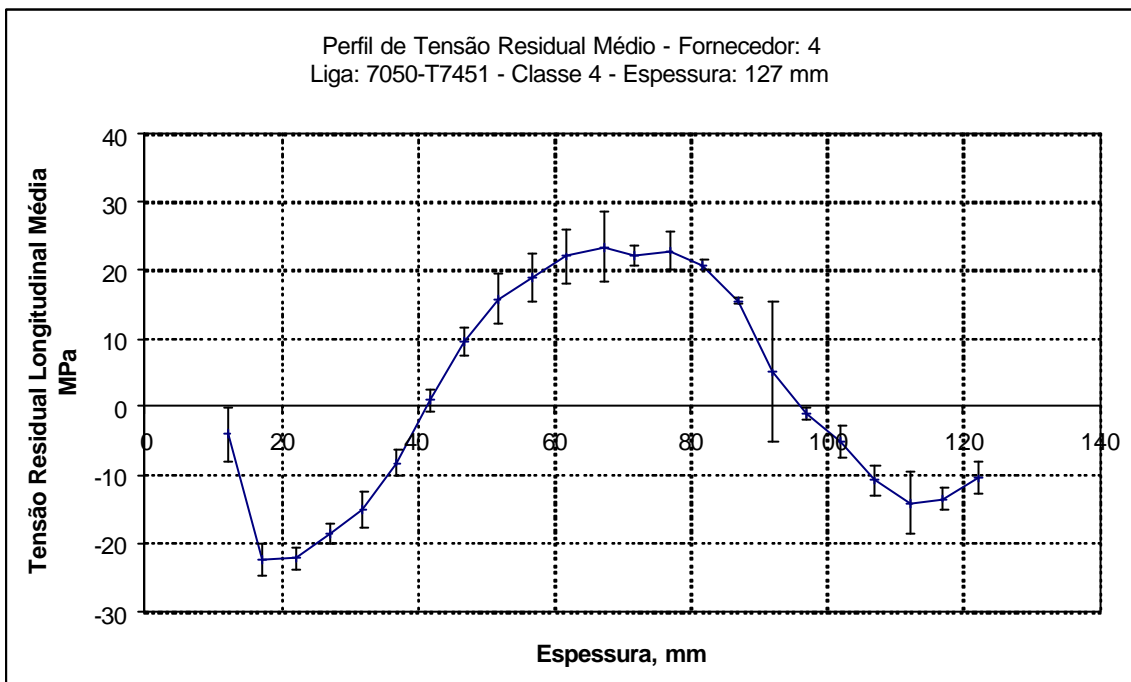


Figura83 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 127 mm de espessura.

9.1.1.1.5 Perfil de tensão residual do Fornecedor 5.

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas de ligas 7475-T7351 e 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 5.

9.1.1.1.5.1 Liga 7475-T7351

A Figura84 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7475-T7351 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 5. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio foi 12 MPa e o mínimo foi -9MPa.

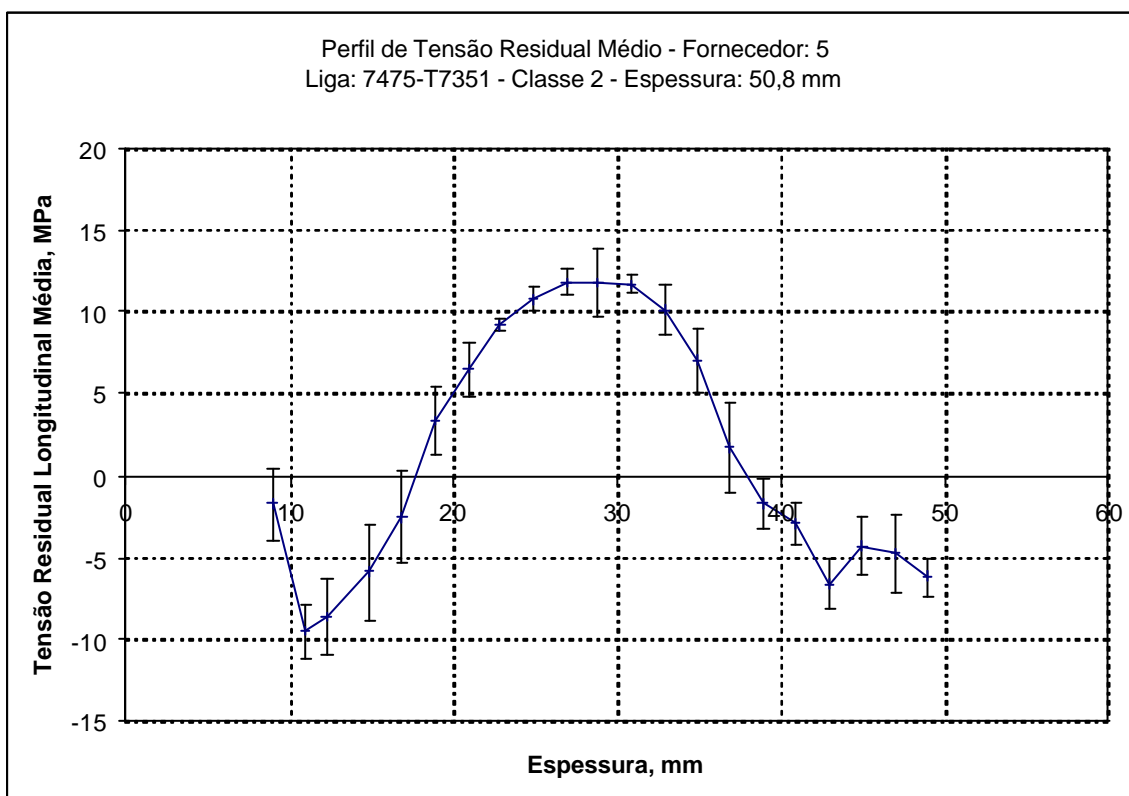


Figura84 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.

9.1.1.1.5.2 Liga 7050-T7451

A Figura85 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 25,4 mm de espessura do fornecedor 5. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 30 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

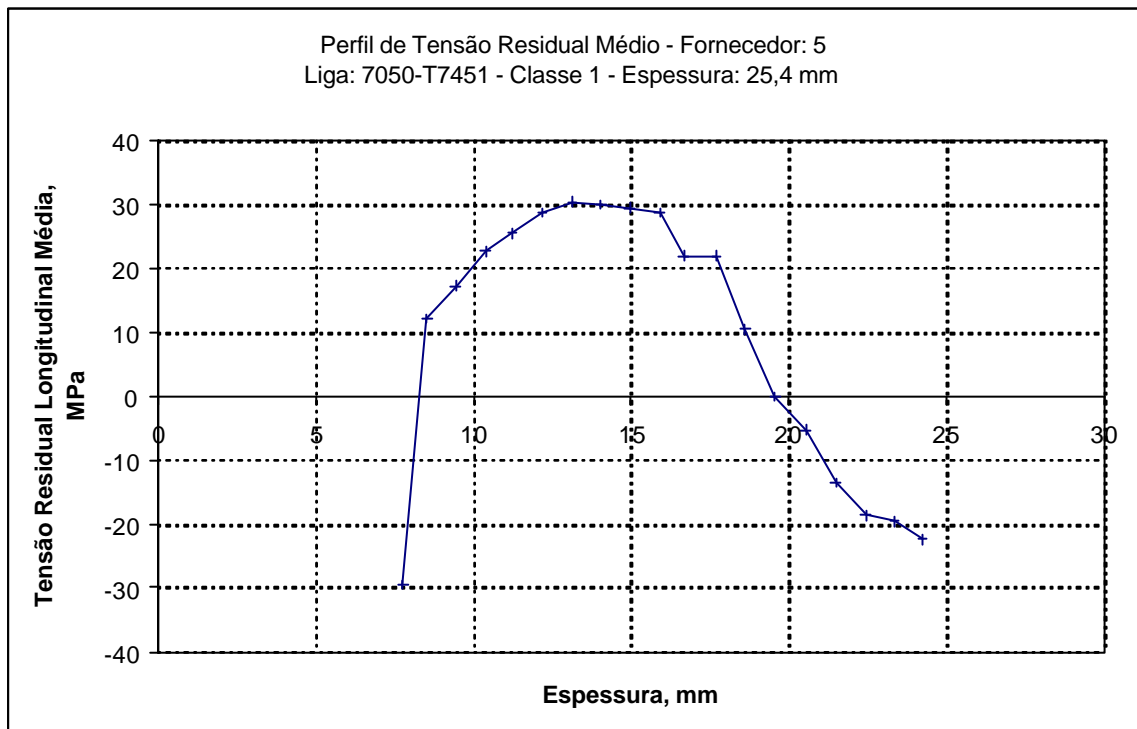


Figura85 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 25,4 mm de espessura.

A Figura86 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 76,2 mm de espessura do fornecedor 5. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 23 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

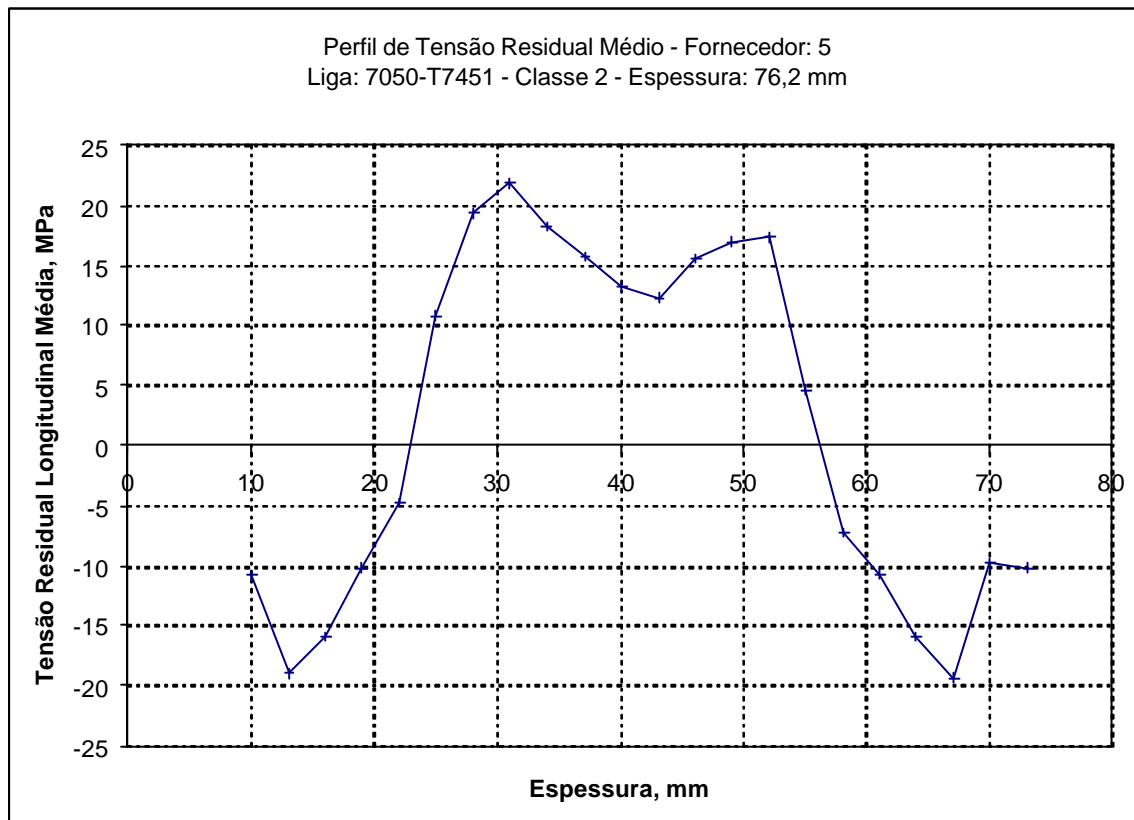


Figura86 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.

A Figura87 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 101,6 mm de espessura do fornecedor 5. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 12 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -23 MPa.

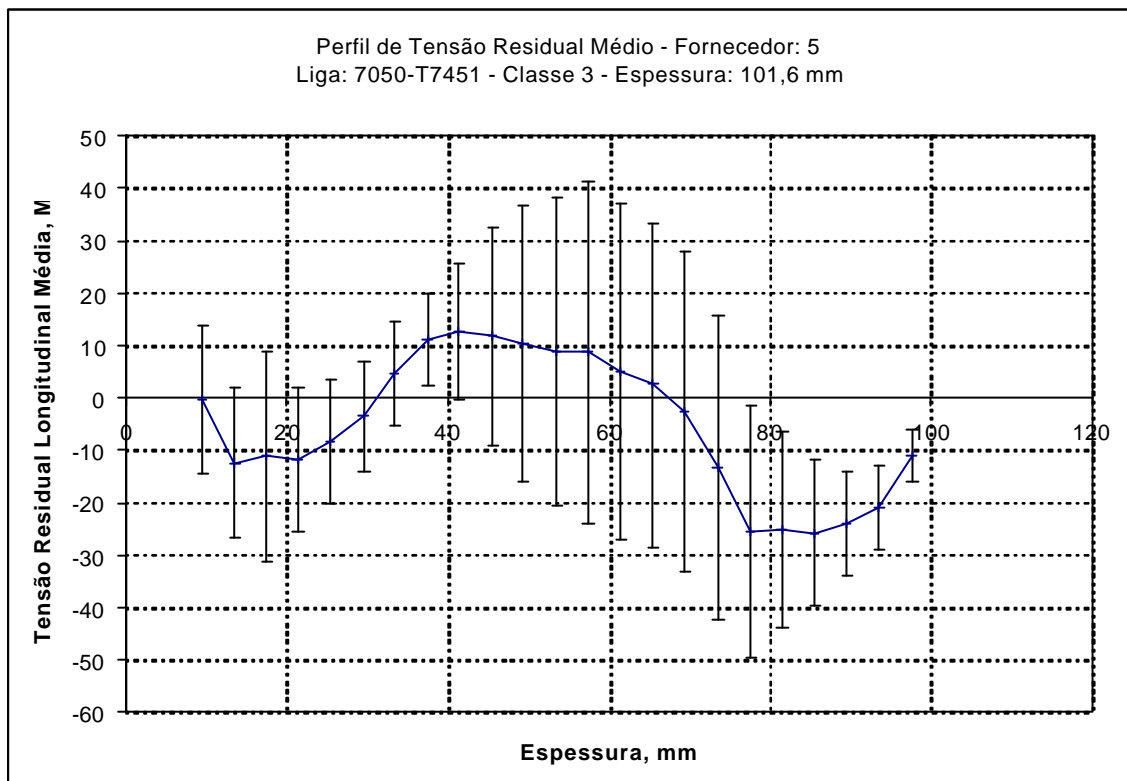


Figura87 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.

9.1.1.1.6 Perfil de tensão residual do Fornecedor 6.

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas da liga 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 6.

9.1.1.1.6.1 Liga 7050-T7451

A Figura88 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 76,2 mm de espessura do fornecedor 6. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 20 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -18 MPa.

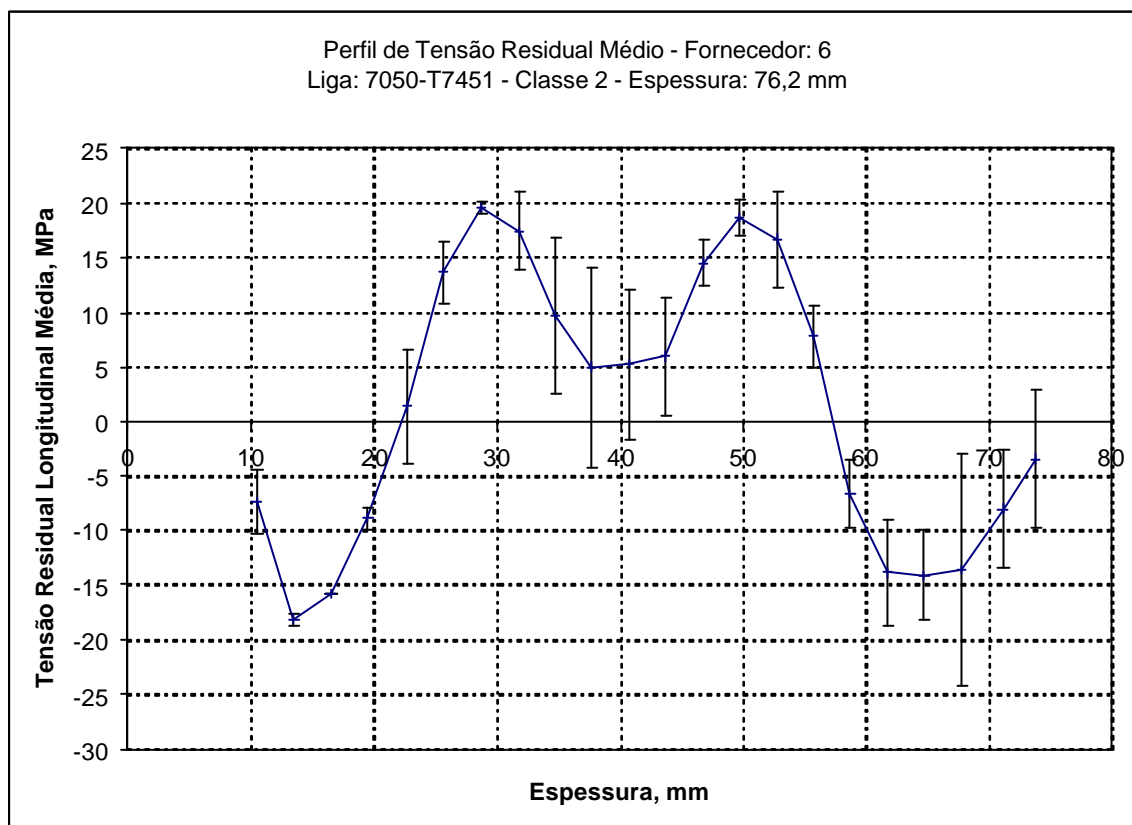


Figura88 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.

A Figura89 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 101,6 mm de espessura do fornecedor 6. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 12 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -48 MPa.

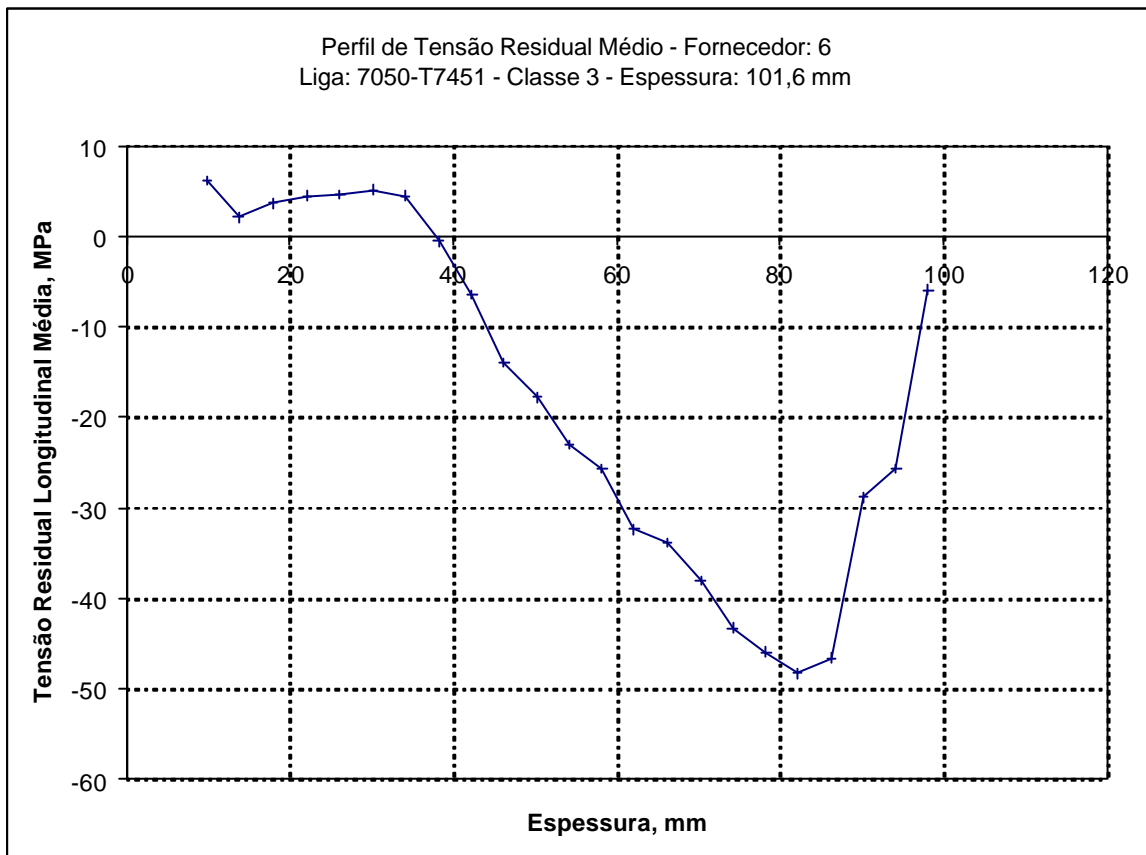


Figura89 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.

9.1.1.2 Sentido Transversal Longo

Os corpos de prova ensaiados estão de acordo com da amostragem descrita em 3.2.1. Neste caso, a maior dimensão do corpo de prova está perpendicular à direção de laminação da placa de matéria-prima.

9.1.1.2.1 Perfis de tensão residual do Fornecedor 1

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas de ligas 7475-T7351 e 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 1.

9.1.1.2.1.1 Liga 7475-T7351

A Figura90 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7475-T7351 de 25,4 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio foi 8 MPa e o mínimo foi -5 MPa.

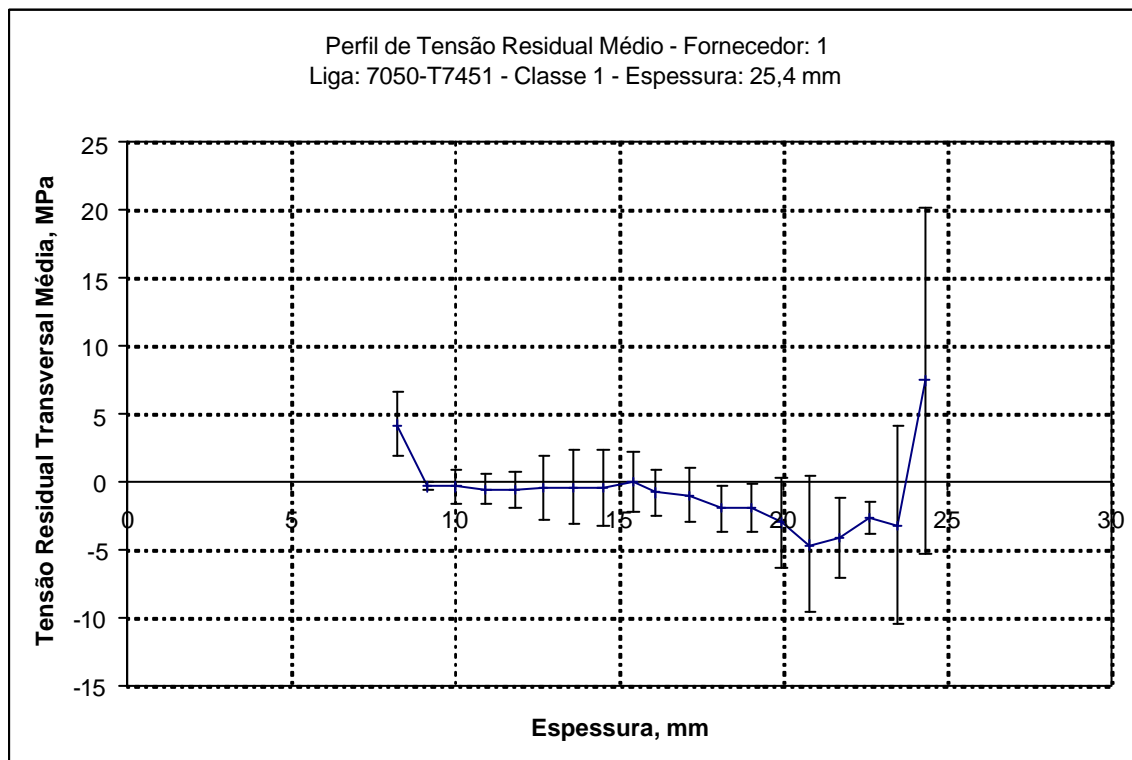


Figura90 Gráfico do perfil de tensão residual para placa AA 7475-T7351 com 25,4 mm de espessura.

A Figura91 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7475-T7351 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio foi 12 MPa e o mínimo foi -15 MPa.

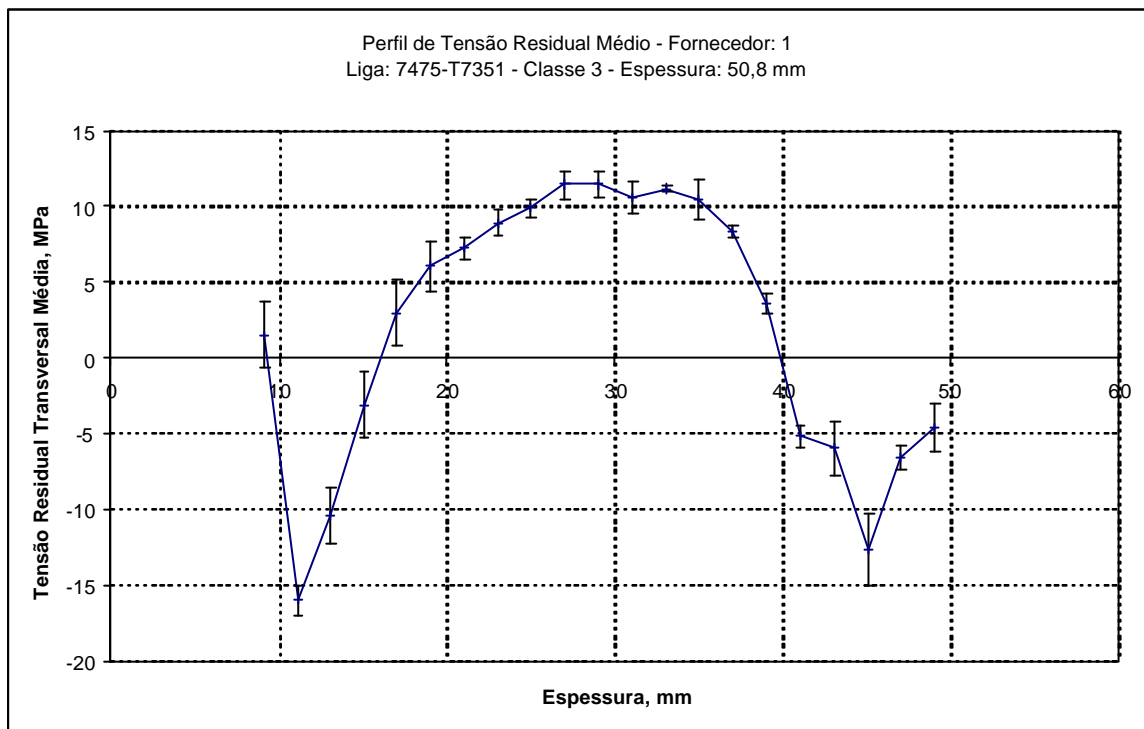


Figura91 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.

9.1.1.2.1.2 Liga 7050-T7451

A Figura92 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 31,75 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio calculado foi 18 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

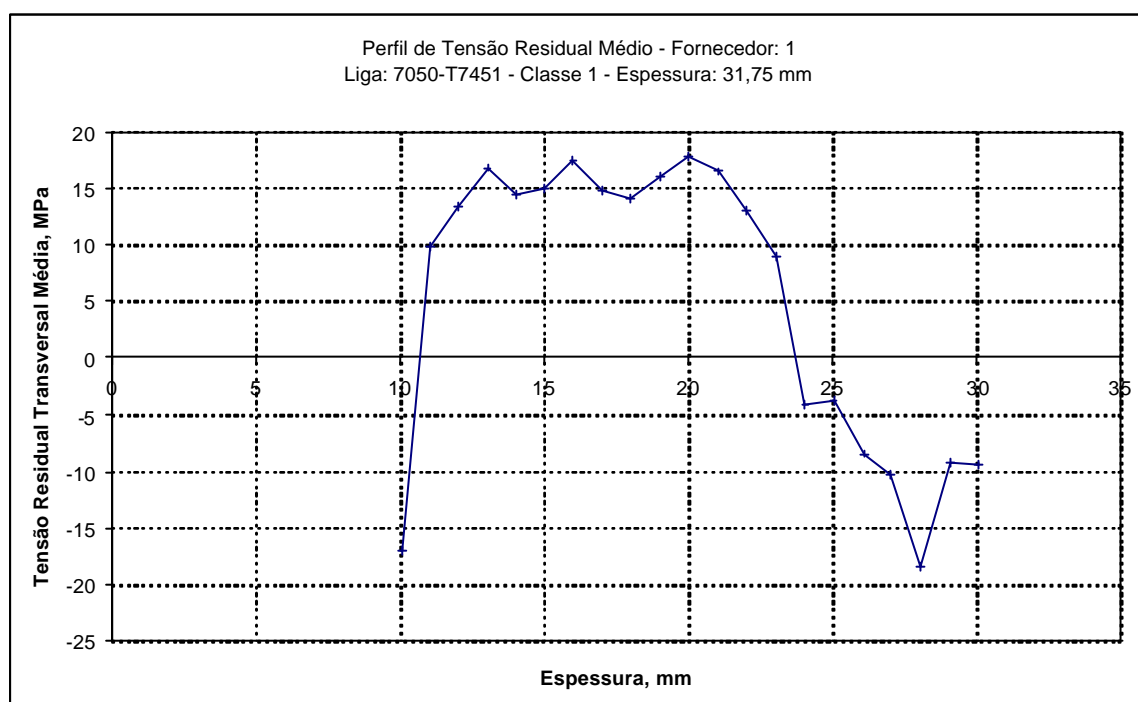


Figura92 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 31,8 mm de espessura.

A Figura93 apresenta o perfil de tensão residual média em placas 7050-T7451 de 76,2 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio calculado foi aproximadamente 15 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

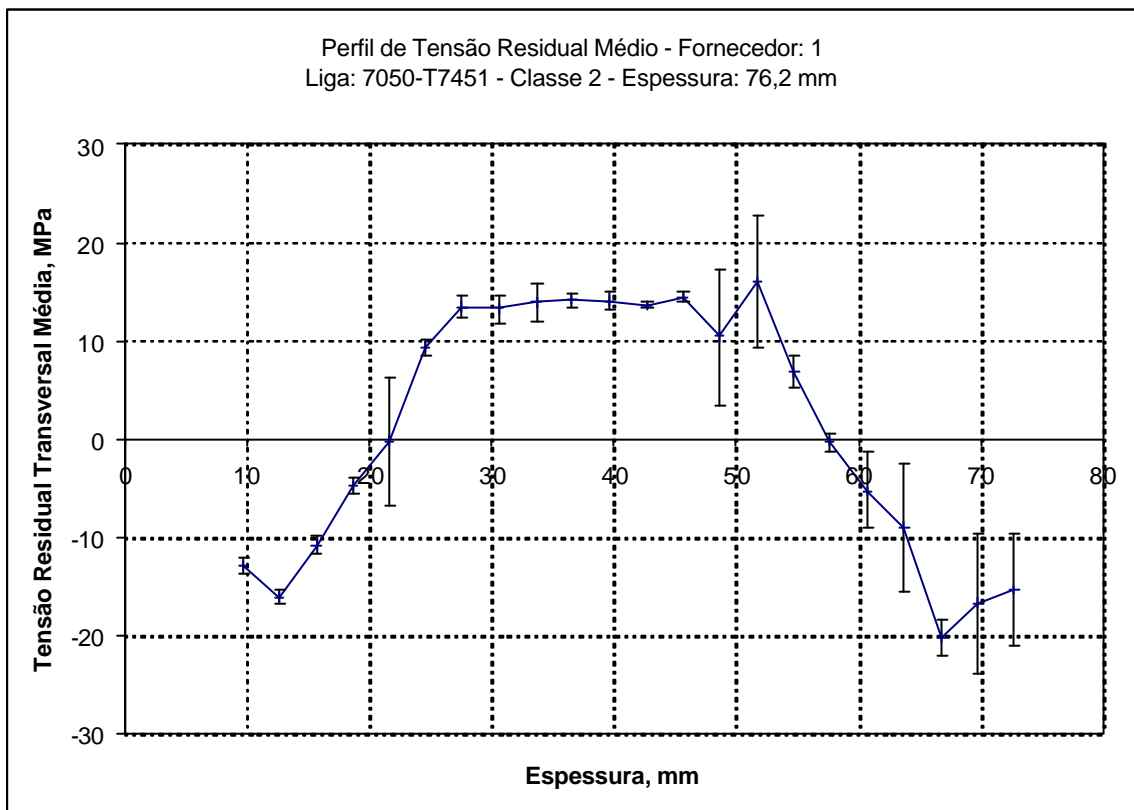


Figura93 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.

9.1.1.2.2 Perfil de tensão residual do Fornecedor 2

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas de ligas 7475-T7351 e 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 2.

9.1.1.2.2.1 Liga 7475-T7351

A Figura94 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7475-T7351 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 1. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio foi aproximadamente 10 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -18MPa.

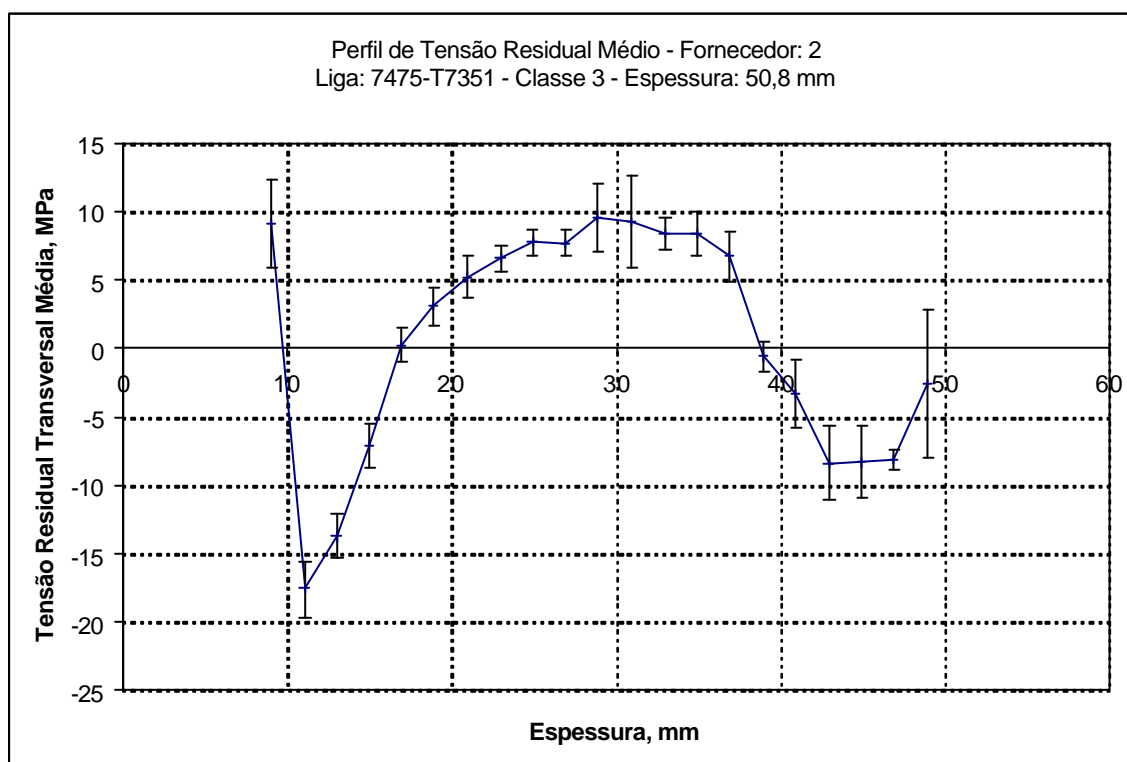


Figura94 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.

9.1.1.2.2.2 Liga 7050-T7451

A Figura95 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 12,7 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 2 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -8 MPa.

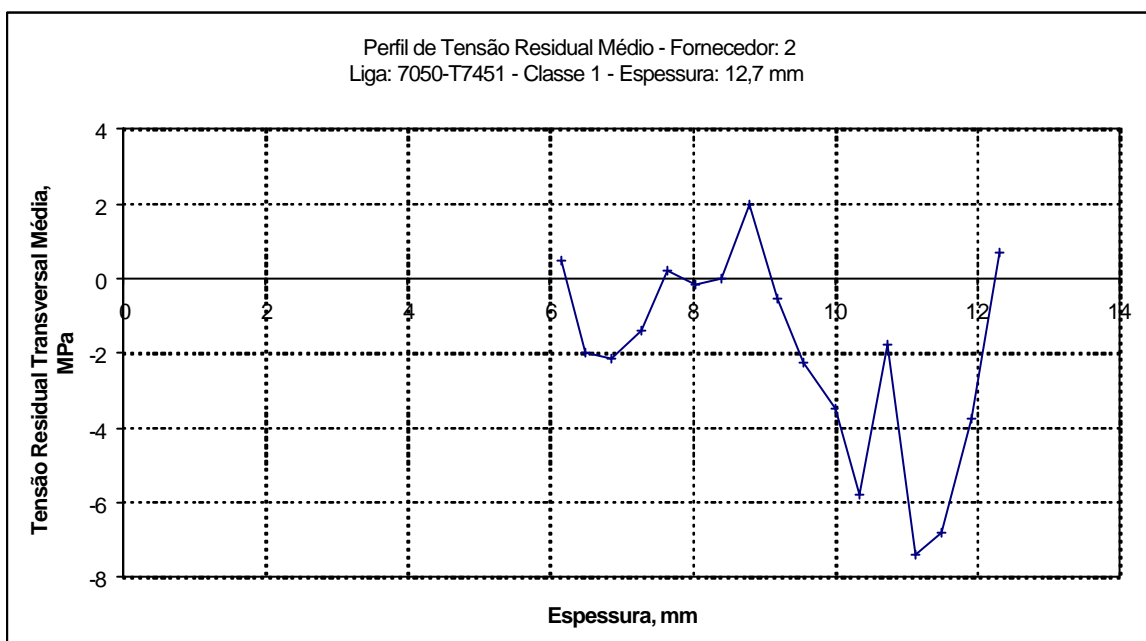


Figura95 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 12,7 mm de espessura.

A Figura96 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 19 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -15 MPa.

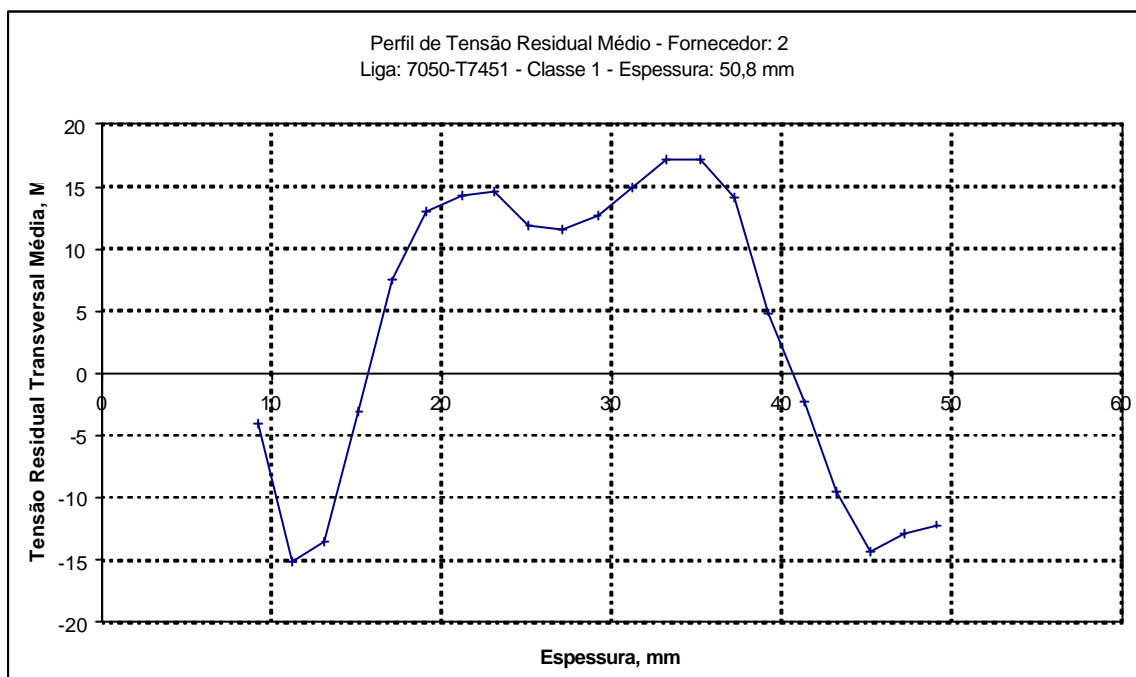


Figura96 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7351 com 50,8 mm de espessura.

A Figura97 apresenta o perfil de tensão residual médio de uma placa 7050-T7451 de 76,2 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 15 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

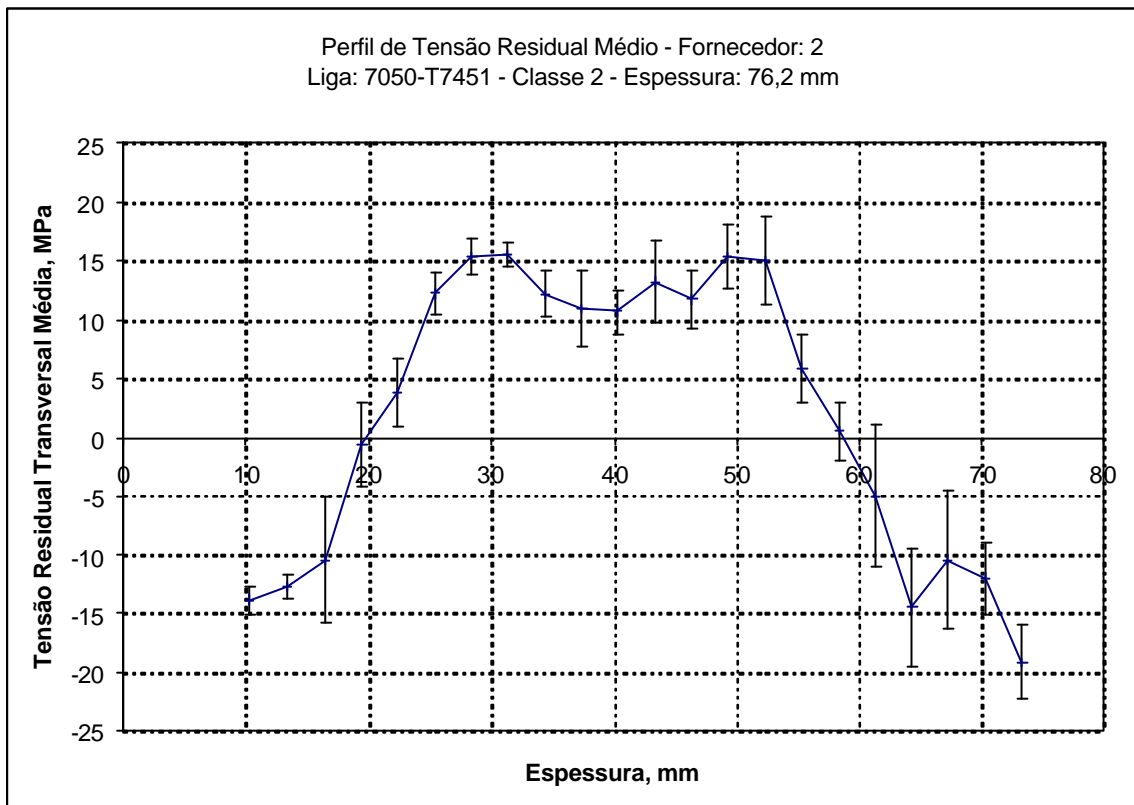


Figura97 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2mm de espessura.

A Figura98 apresenta o perfil de tensão residual médio de uma placa 7050-T7451 de 88,6 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 17 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -15 MPa.

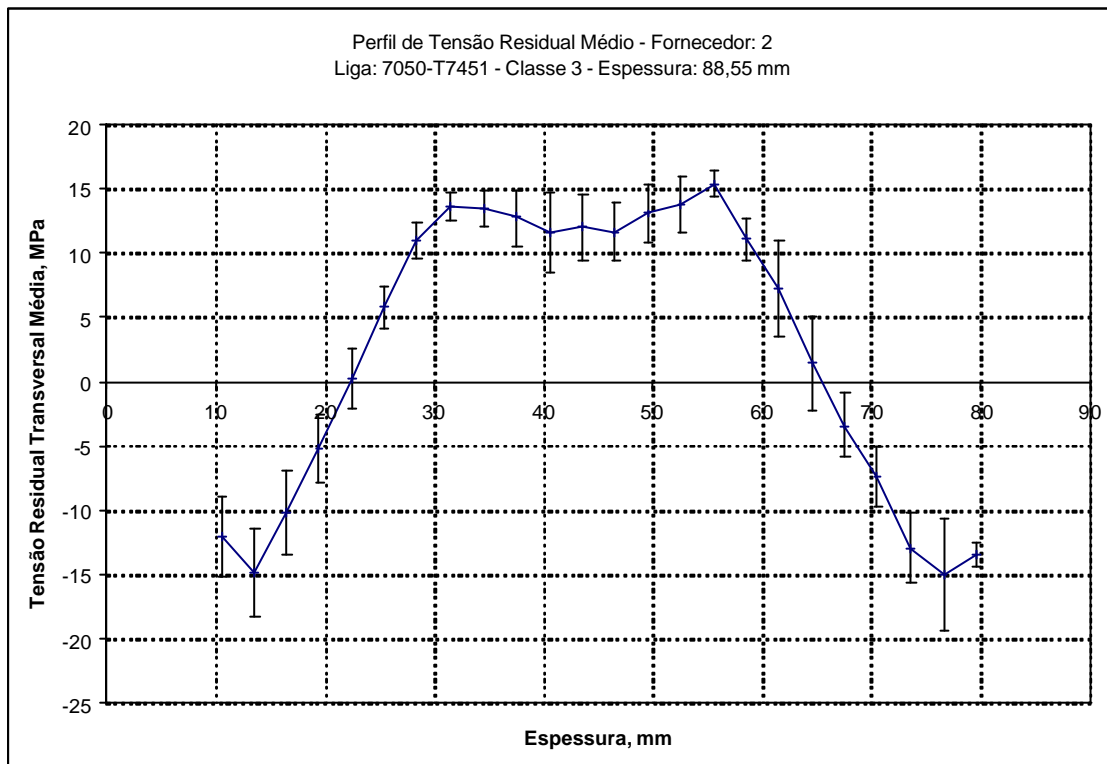


Figura98 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 82,55 mm de espessura.

A Figura99 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 101,6 mm de espessura do fornecedor 2. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 18 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -25 MPa.

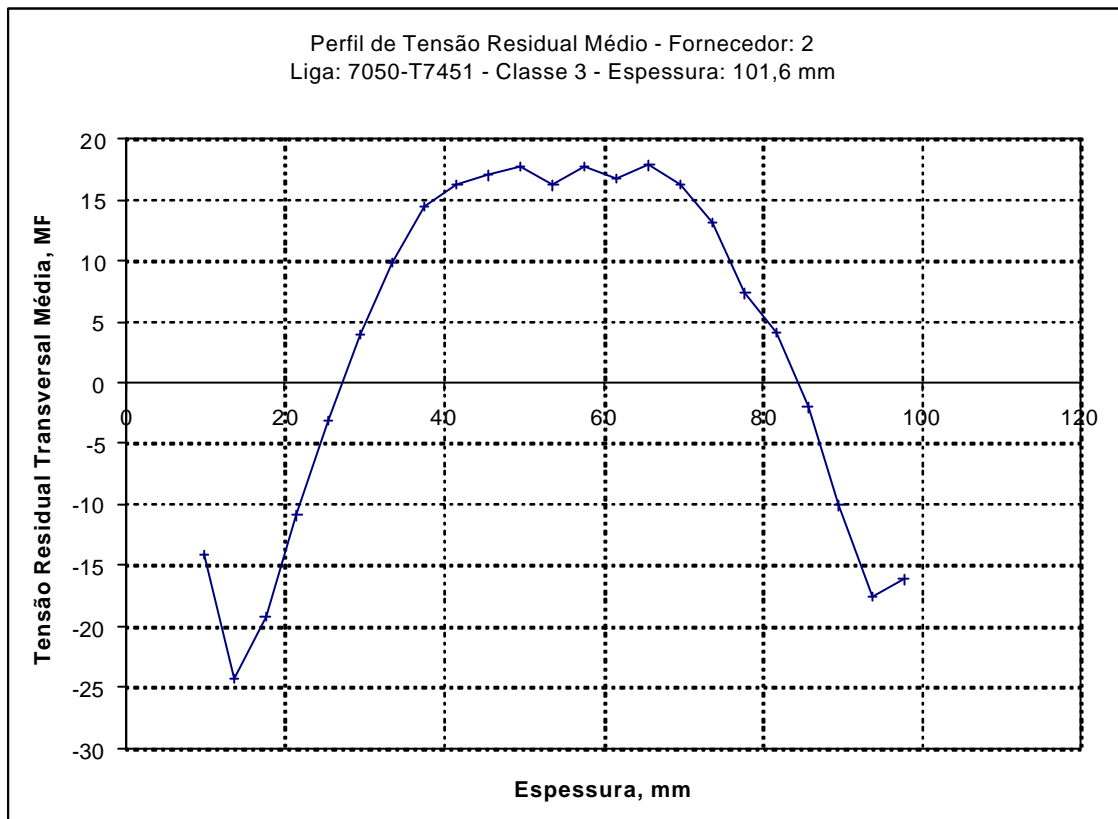


Figura99 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.

9.1.1.2.3 Perfil de tensão residual do Fornecedor 3.

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas da liga 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 3.

9.1.1.2.3.1 Liga 7050-T7451

A Figura100 apresenta o perfil de tensão residual médio de placa 7050-T7451 de 25,4 mm de espessura do fornecedor 3. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 7 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -10 MPa.

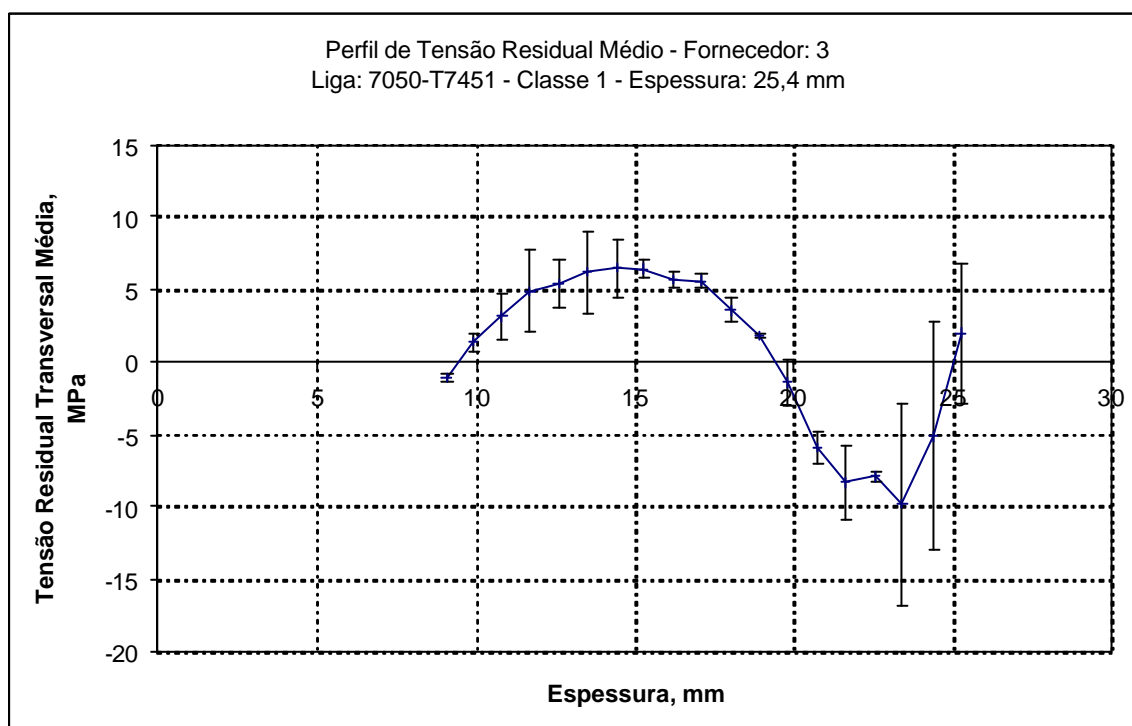


Figura100 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 25,4 mm de espessura.

9.1.1.2.4 Perfil de tensão residual do Fornecedor 4.

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas da liga 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 4.

9.1.1.2.4.1 Liga 7050-T7451

A Figura 101 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 25,4 mm de espessura do fornecedor 4. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 11 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -12 MPa.

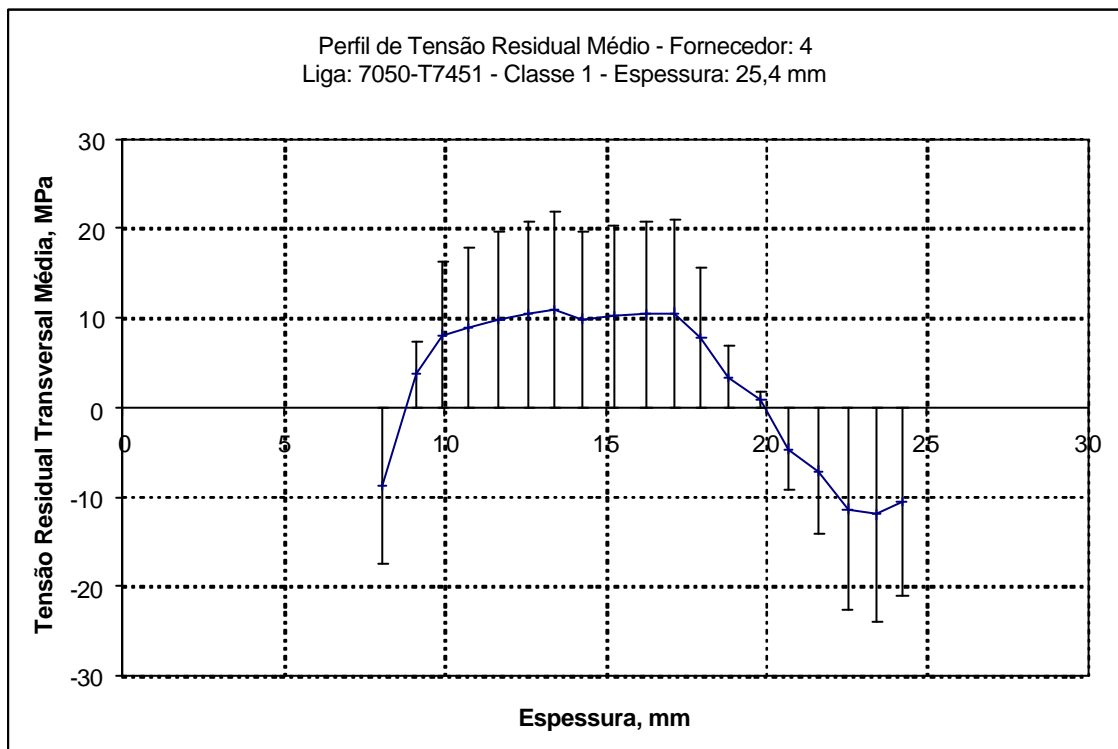


Figura 101 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 25,4 mm de espessura.

A Figura102 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 4. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 15 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

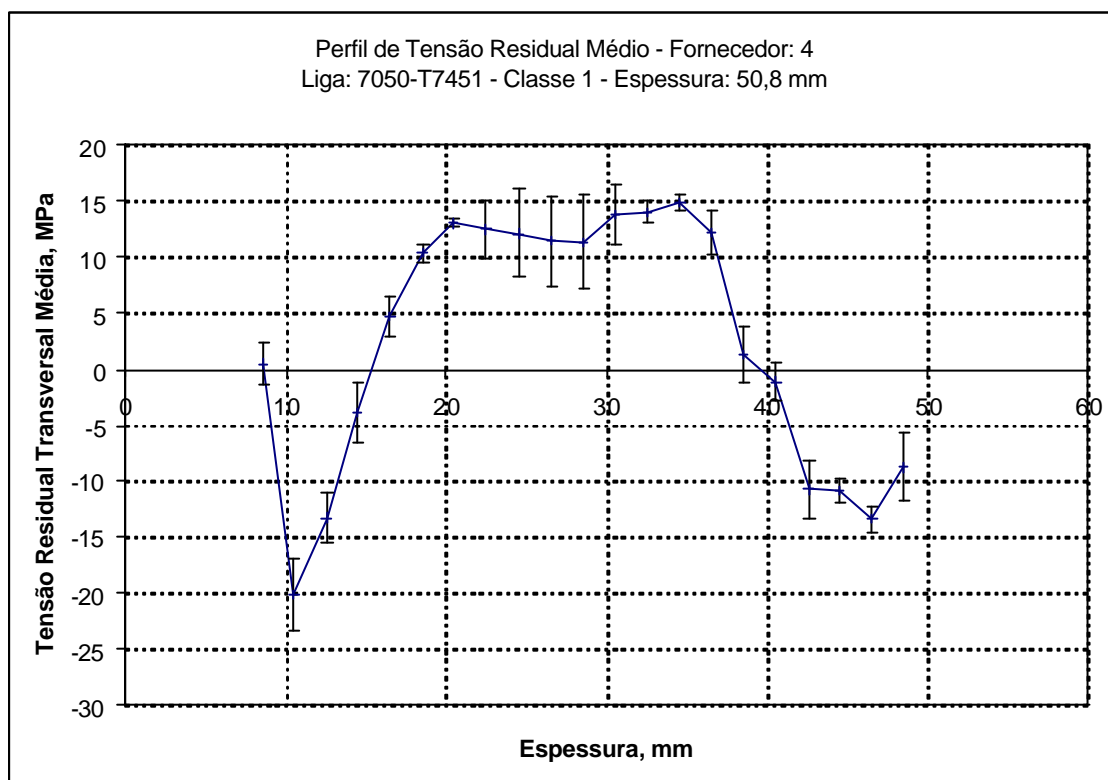


Figura102 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 50,8 mm de espessura.

A Figura103 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 101,6 mm de espessura do fornecedor 4. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente - 5 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

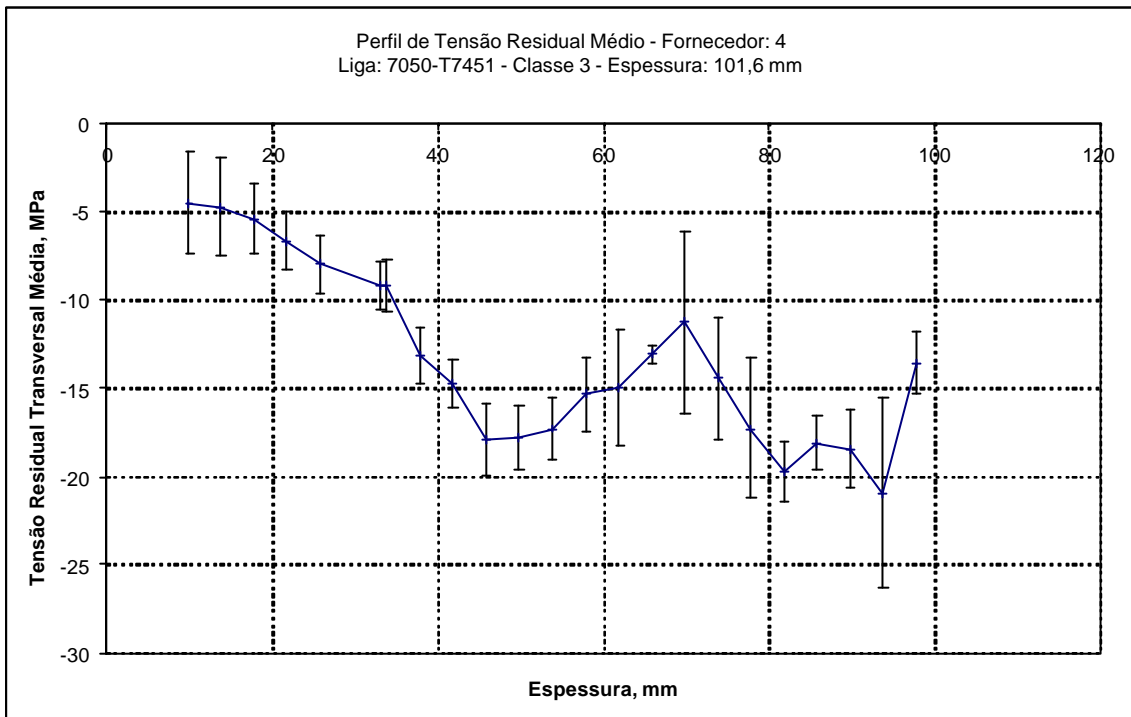


Figura103 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.

A Figura104 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 127 mm de espessura do fornecedor 4. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 7 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -12 MPa.

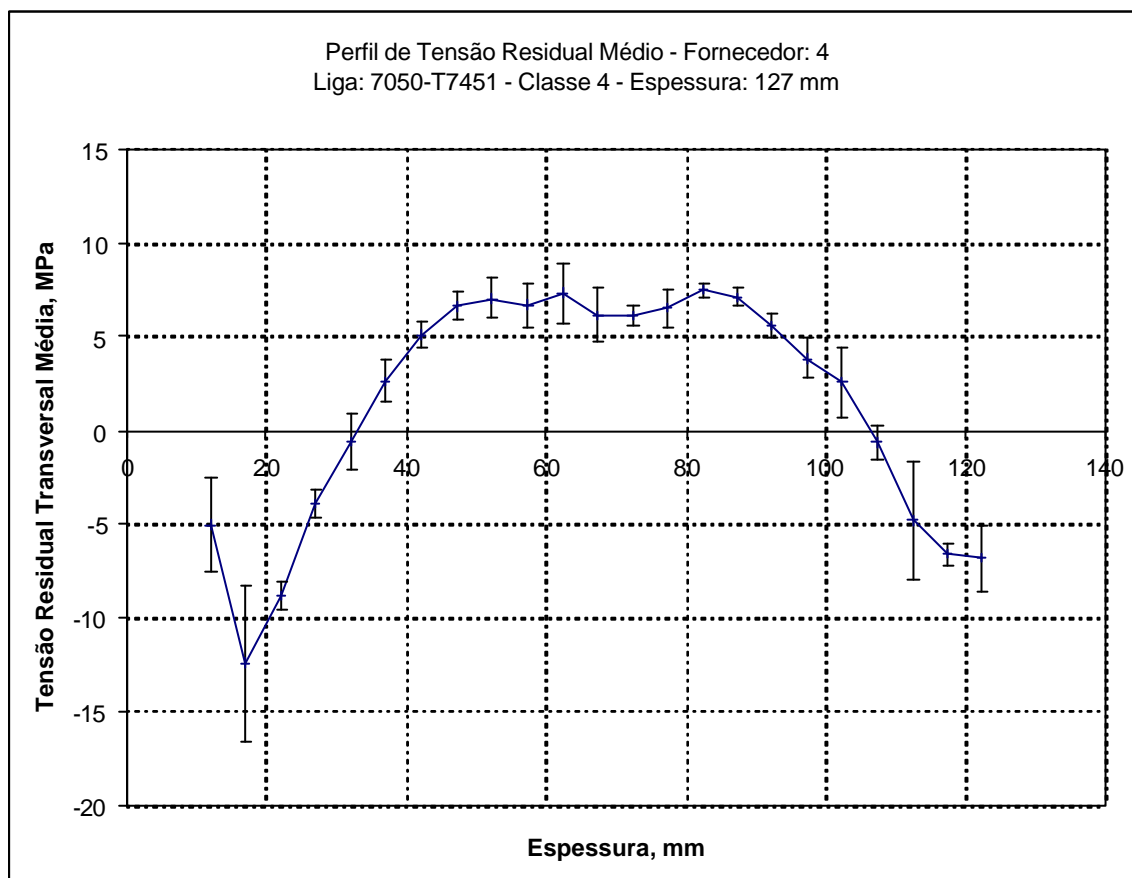


Figura104 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 127 mm de espessura.

9.1.1.2.5 Perfil de tensão residual do Fornecedor 5.

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas de ligas 7475-T7351 e 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 5.

9.1.1.2.5.1 Liga 7475-T7351

A Figura105 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7475-T7351 de 50,8 mm de espessura do fornecedor 5. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual médio foi 7 MPa e o mínimo foi -8MPa.

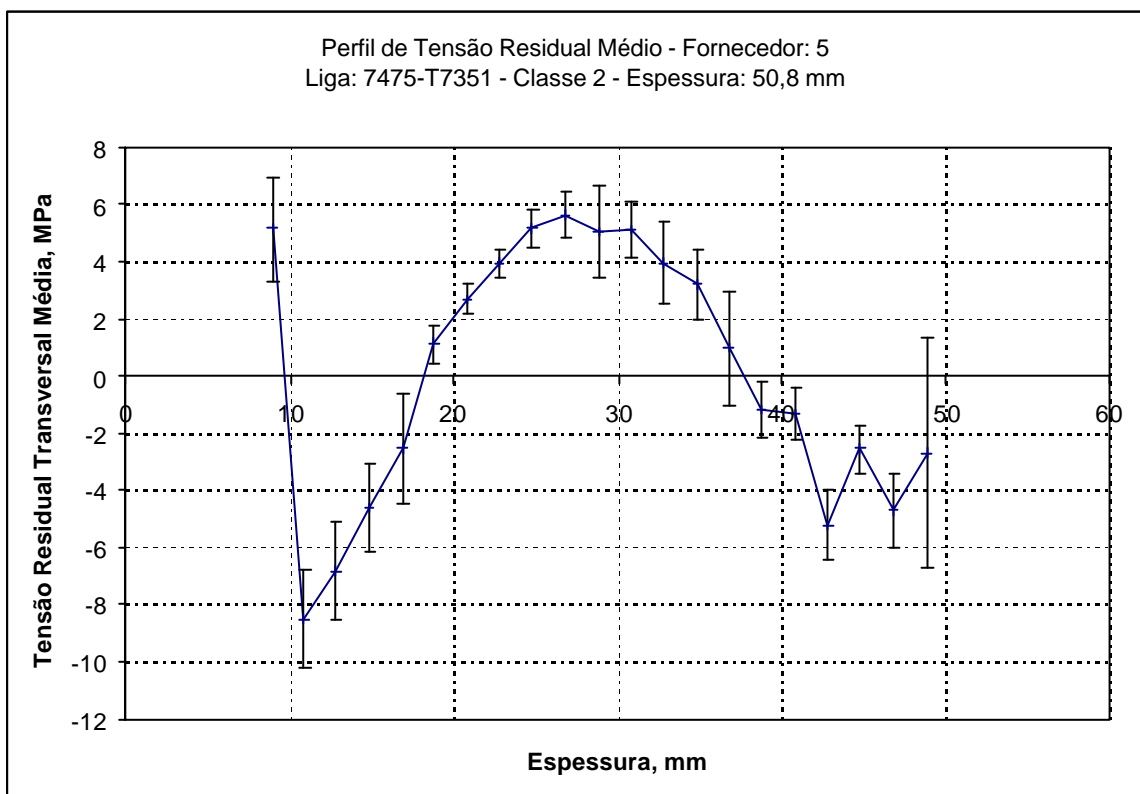


Figura105 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7475-T7351 com 50,8 mm de espessura.

9.1.1.2.5.2 Liga 7050-T7451

A Figura106 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 25,4 mm de espessura do fornecedor 5. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 12 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -10 MPa.

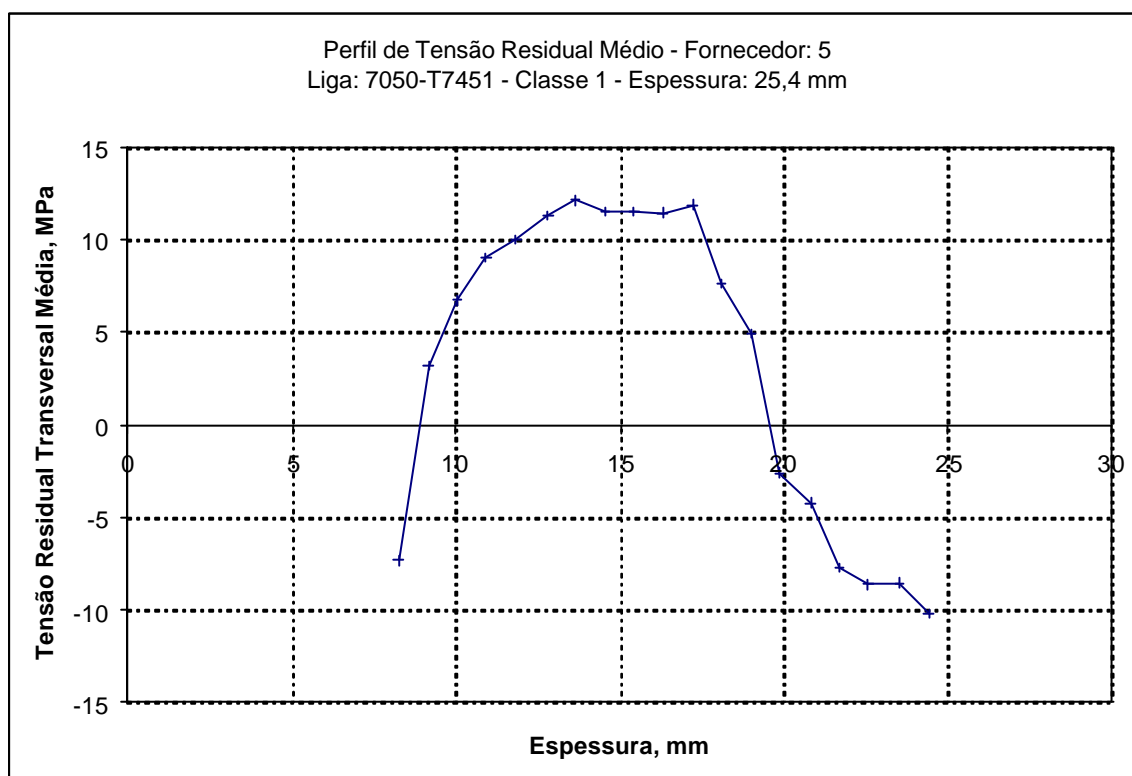


Figura106 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 25,4 mm de espessura.

A Figura107 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 76,2 mm de espessura do fornecedor 5. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 10 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -14 MPa.

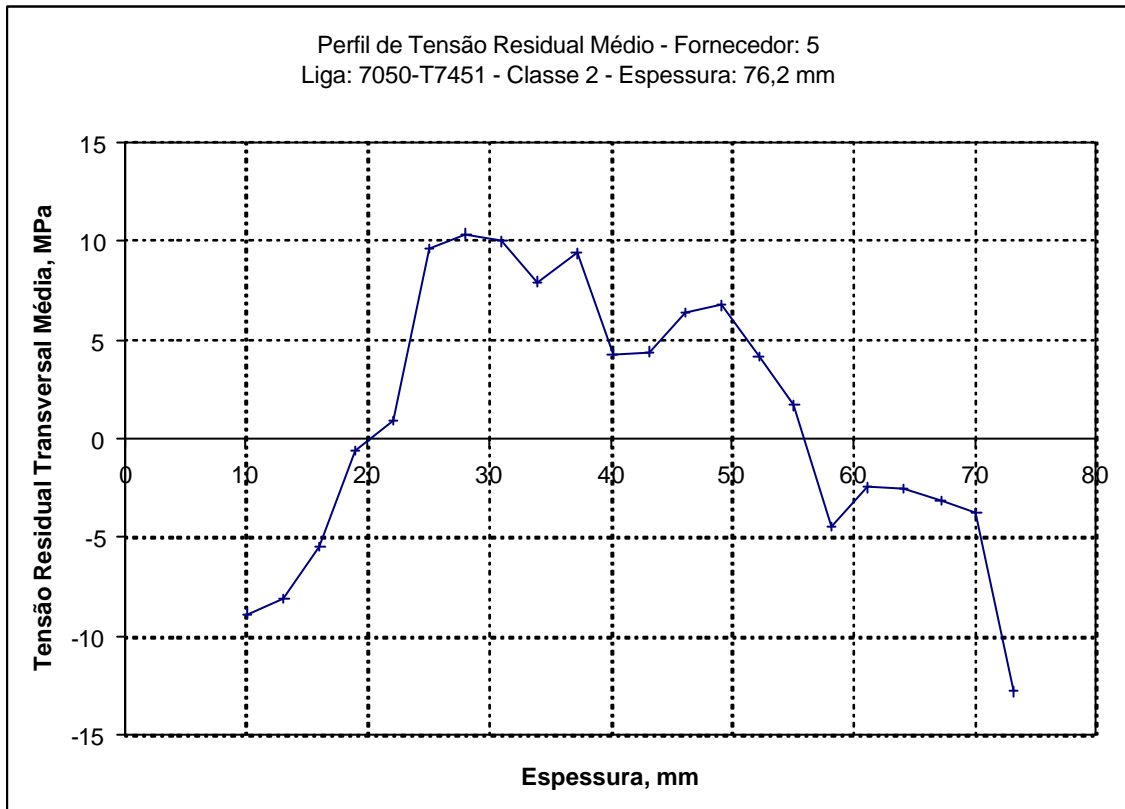


Figura107 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.

A Figura108 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 101,6 mm de espessura do fornecedor 5. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 5 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -20 MPa.

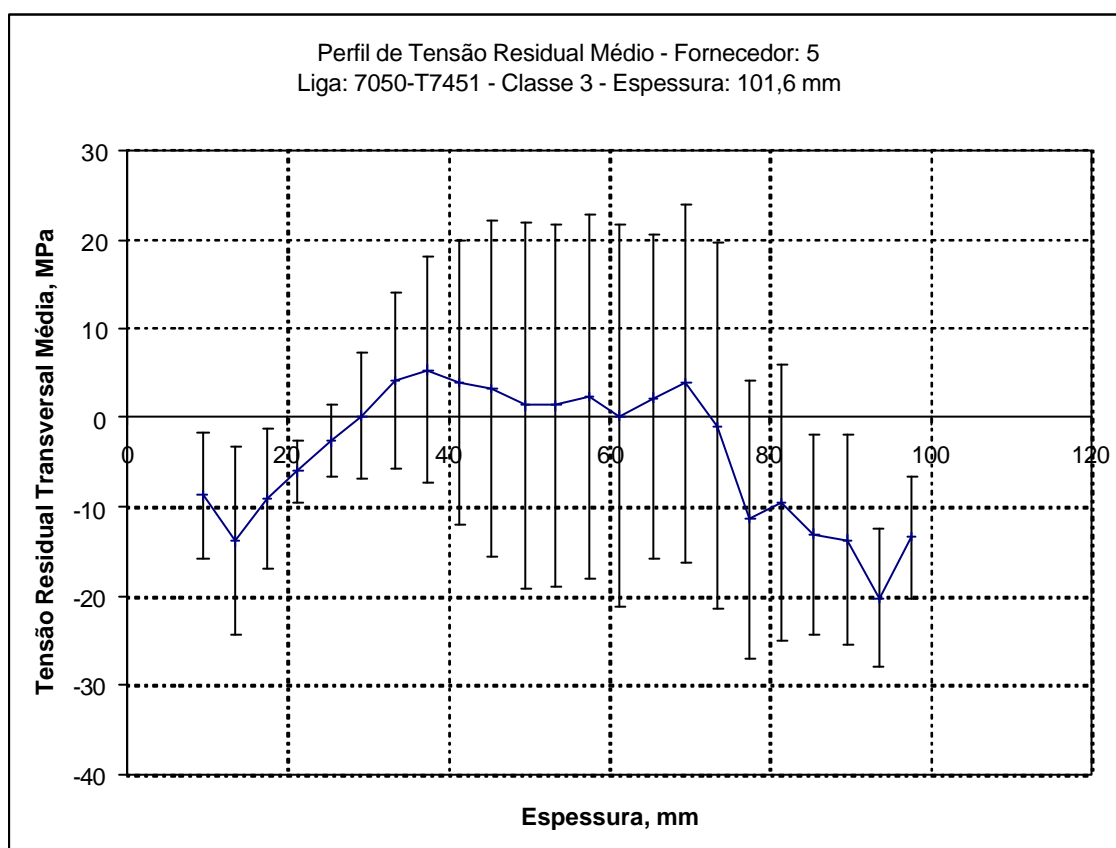


Figura108 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.

9.1.1.2.6 Perfil de tensão residual do Fornecedor 6

A seguir são apresentados os perfis de tensões residuais médios de placas da liga 7050-T7451 para várias espessuras de placas do fornecedor 6.

9.1.1.2.6.1 Liga 7050-T7451

A Figura109 apresenta o perfil de tensão residual médio de placas 7050-T7451 de 76,2 mm de espessura do fornecedor 6. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 14 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -8 MPa.

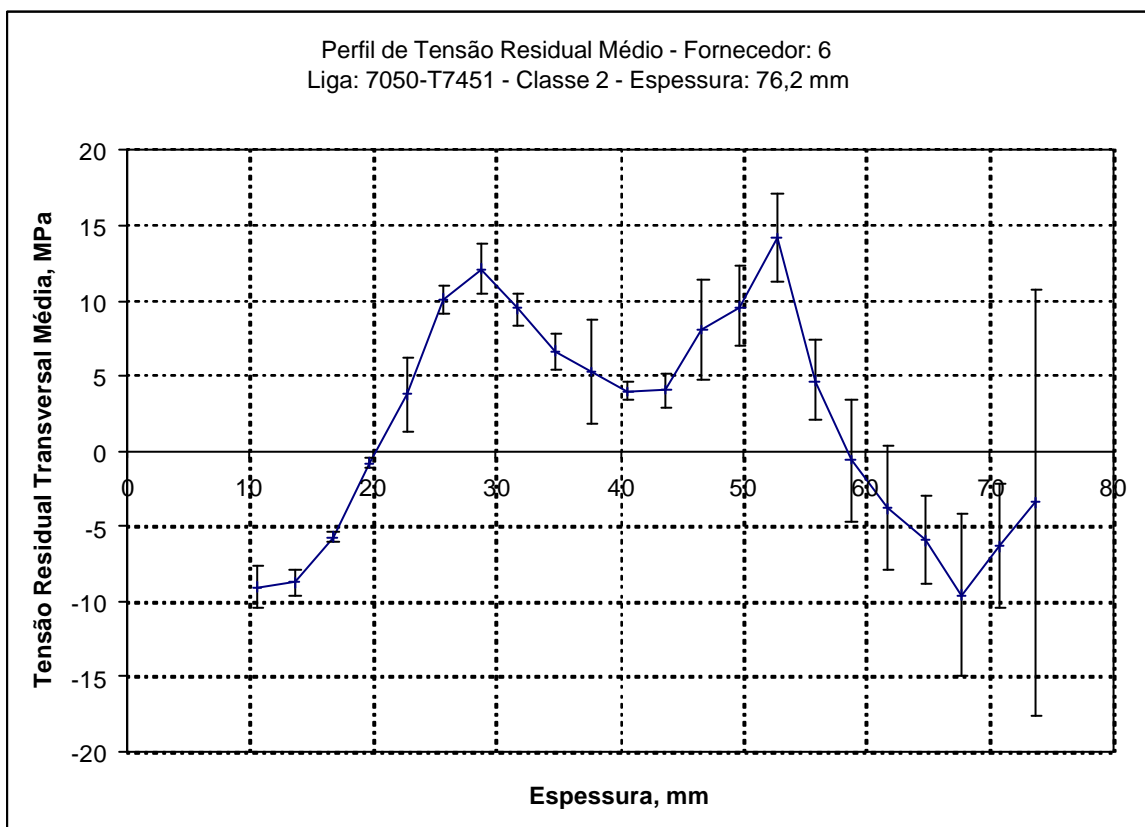


Figura109 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 76,2 mm de espessura.

A Figura110 apresenta o perfil de tensão residual de uma placa 7050-T7451 de 101,6 mm de espessura do fornecedor 6. Neste caso, o valor máximo do perfil de tensão residual foi aproximadamente 0 MPa e o valor mínimo obtido foi aproximadamente -22 MPa.

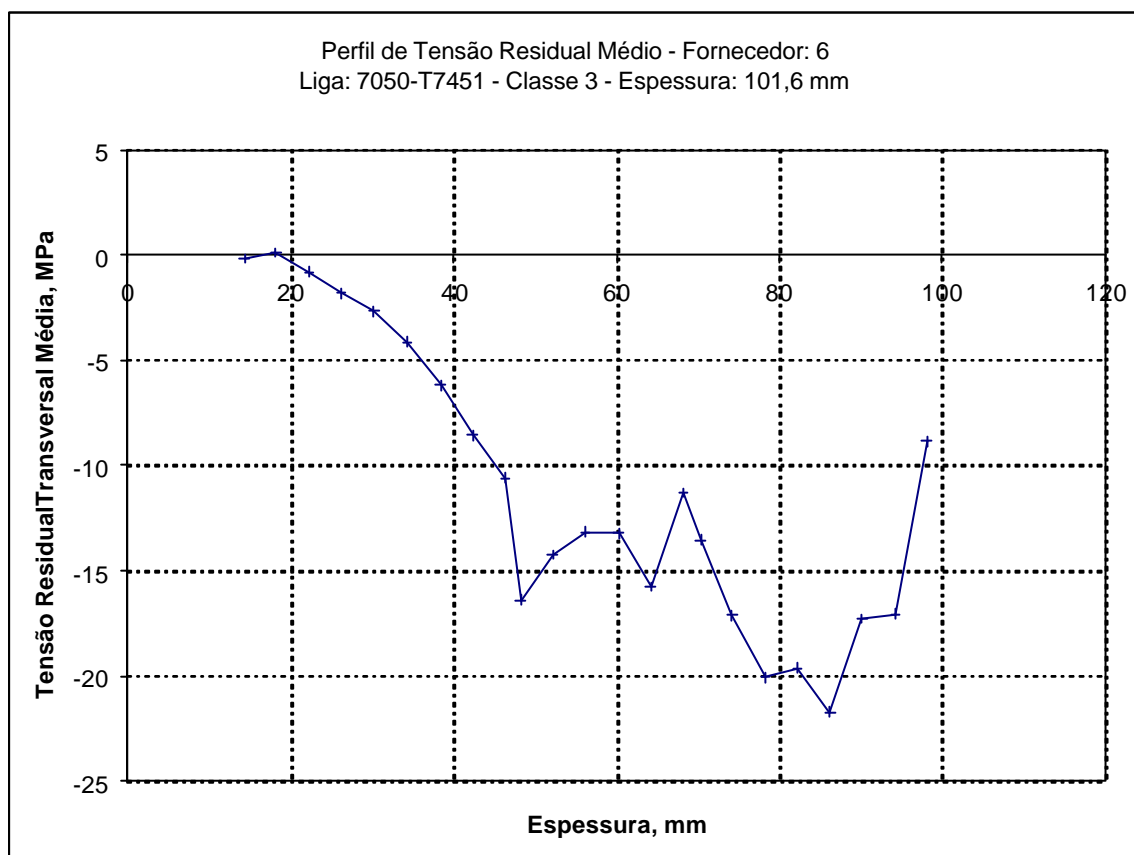


Figura110 Gráfico do perfil de tensões residuais para placa AA 7050-T7451 com 101,6 mm de espessura.

