

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Vinicius Bianchezzi

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO NA TENSÃO
RESIDUAL E SUA CONSEQUÊNCIA NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE COMPONENTES TERMOPLÁSTICOS.**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal
de Santa Catarina para a obtenção
do Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. José Carlos
de Carvalho Pereira

Florianópolis, 2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bianchezzi, Vinicius

Influência dos parâmetros de injeção na tensão residual e sua consequência no comportamento mecânico de componentes termoplásticos. / Vinicius Bianchezzi; orientador, José Carlos de Carvalho Pereira – Florianópolis, SC, 2014.

101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Técnica do furo cego. 4. Delineamento de experimentos (DOE). 5. Injeção de termoplásticos. I. Carvalho Pereira, José Carlos de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Vinicius Bianchezzi

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO NA TENSÃO RESIDUAL E SUA CONSEQUÊNCIA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPONENTES TERMOPLÁSTICOS.

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 28 de Fevereiro de 2014.

Prof. Dr. Eng. Armando Albertazzi Gonçalves Jr.
Coordenador do Curso

Banca Examidora:

Prof. José Carlos de Carvalho Pereira, Dr
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Edison da Rosa, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Guilherme Barra, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar a Deus por sua sabedoria.

À minha noiva Ana Carolina pela compreensão e incentivo durante esta jornada.

Aos meus pais Vilmar e Nilda pelo incentivo e carinho demonstrados ao longo de toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

Com muita satisfação agradeço ao professor José Carlos de Carvalho Pereira pela paciência, incentivo e orientação, contribuindo para a concretização desta jornada.

Gostaria de deixar também o meu muito obrigado aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica por sua competência e dedicação na arte de disseminar conhecimentos.

À Whirlpool Unidade de Eletrodomésticos S.A., em especial ao meu gestor Jorge R. Giordan, que me incentivou e patrocinou o desenvolvimento e emprego de novas tecnologias que serviram de base para a validação do conteúdo deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, em especial ao Vitor T. Endo, Marcos H. Herrmann e Lincoln R. Garcia, pelo apoio e conhecimentos compartilhados ao longo destes anos.

Por fim, aos meus pais, noiva e amigos que estiveram sempre ao meu lado me incentivando e apoiando para que este projeto pudesse se tornar realidade.

RESUMO

As tensões residuais, inerentes a diversos processos de fabricação, na grande maioria dos casos não promove qualquer alteração nas características físicas dos componentes nos quais se encontram presentes, contudo dependendo do campo de tensões residuais da peça e das solicitações externas, estas tensões podem comprometer ou aprimorar o desempenho estrutural da mesma. Componentes poliméricos, de um modo geral, mas principalmente aqueles manufaturados pelo processo de injeção estão sujeitos a tensões residuais, as quais são influenciadas pelos parâmetros de processo empregados. Além disto, usualmente estas tensões não são consideradas nas simulações estruturais de desenvolvimento de componentes, o que às vezes leva a resultados insatisfatórios. Assim, o presente trabalho, pautado na necessidade de aprimorar o desempenho estrutural de componentes termoplásticos, propõe uma metodologia para determinação da influência dos parâmetros de injeção nas tensões residuais e suas consequências no comportamento mecânico de componentes termoplásticos. A metodologia empregada neste trabalho envolve técnicas experimentais e numéricas para o estudo das tensões residuais em peças injetadas. Com relação aos procedimentos experimentais, são utilizados a técnica de delineamento de experimentos - DOE, com o objetivo de avaliar estatisticamente a influência dos parâmetros de processo de fabricação no estado de tensões do componente, e o método do furo cego, que permite a avaliação do gradiente de tensões residuais ao longo da espessura da parede da peça. Já a parte numérica consiste na utilização de ferramentas de simulação

do processo de injeção de polímeros, associada a análises estruturais por meio de *softwares* comerciais de elementos finitos. Esta estratégia permitiu uma boa correlação de resultados experimentais e numéricos, reforçando assim a importância de simulações acopladas, as quais consideram efeitos oriundos do processo de fabricação no comportamento mecânico do produto final, no desenvolvimento e aprimoramento do projeto estrutural de componentes termoplásticos.

Palavras-chaves: Tensões residuais, técnica do furo cego, delineamento de experimentos – DOE, simulação numérica, injeção de termoplásticos.

ABSTRACT

The residual stress, intrinsic to several manufacturing process, in most cases does not cause any physical characteristic changes in the components in which it is present, although depending on the component residual stress field and the external loads applied, these internal stresses may compromise or improve the part structural performance. Mostly polymeric components, but especially those manufactured by injection process have residual stress, which are an outcome from the process parameters employed. Moreover, these stresses are not used in plastic components development structural simulations, what occasionally leads to unsatisfactory results. So, the present thesis, guided on the need to enhance the structural performance of thermoplastic components, propose a methodology to define the injection parameters influence on residual stresses and their consequences on the mechanical behavior of thermoplastic parts. The methodology applied in this thesis uses experimental and numerical techniques for the study of residual stresses in molded parts. Regarding the experimental procedures, are employed techniques of design of experiments – DOE to statistically evaluate the manufacturing process parameters influence on the residual stress field of a component, and the hole-drilling technique, to obtain residual stress gradient through components wall thickness. For the numerical experiments, finite element models are applied linking the injection process simulations with structural analysis, through the use of commercial simulations tools. This strategy allowed good correlation of experimental and numerical results, so reinforcing the importance of coupled simulations,

which take in account effects coming from manufacturing process in the mechanical behavior of the final product, in the development and improvement of thermoplastic components structural design.

Key words: Residual stress, hole-drilling technique, design of experiments – DOE, numerical simulation, thermoplastic molded parts.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE MONÔMEROS DE ETILENO COMPONDO UMA MACROMOLÉCULA DE POLIETILENO, EXEMPLO DE HOMOPOLÍMERO.	29
FIGURA 2 – CLASSIFICAÇÃO DE POLÍMEROS QUANTO A SUA FUSIBILIDADE, COM EXEMPLOS.....	30
FIGURA 3 – FORMULAÇÃO QUÍMICA DO POLIESTIRENO, UM HOMOPOLÍMERO, E DO ABS, UM COPOLÍMERO.	31
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DO CICLO DE INJEÇÃO.....	33
FIGURA 5 – MICROGRAFIA MOSTRANDO A ESTRUTURA DE CAMADAS MORFOLÓGICAS DO PP INJETADO [9].	36
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DO FLUXO DE MATERIAL NO PREENCHIMENTO DA CAVIDADE [7].	36
FIGURA 7 – INFLUÊNCIA DO PESO MOLECULAR E DA TAXA DE CISALHAMENTO NA DISTRIBUIÇÃO MORFOLÓGICA [7].	37
FIGURA 8 – OBTENÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES RESULTANTE DO ALÍVIO PROVOCADO PELO FURO [19].	39
FIGURA 9 – EXEMPLOS DE ROSETAS, EXTENSÔMETROS PRÓPRIOS PARA DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS [15].	40
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE TENSÃO RESIDUAL NÃO UNIFORME AO LONGO DA ESPESSURA DE UMA PEÇA PARA FURAÇÃO EM K INCREMENTOS.....	41
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA ROSETA, EM DISPOSIÇÃO HORÁRIA, E TENSÕES PRINCIPAIS NO MÉTODO DO FURO CEGO. .	41

FIGURA 12 – INTERPRETAÇÃO FÍSICA DOS COEFICIENTES ajk MOSTRADAS ATRAVÉS DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DE UM FURO OBTIDO EM 4 PASSOS DE PROFUNDIDADE.	41
FIGURA 13 – CAMPO DE DEFORMAÇÕES DEVIDO À PRESSÃO APLICADA NA PAREDE CILÍNDRICA DO FURO.	44
FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO FURO NA DETERMINAÇÃO DE a_{41} A a_{44}	44
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DE EXECUÇÃO DE DOE.	48
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO GENÉRICA DE UM PROCESSO OU SISTEMA [20].	49
FIGURA 17 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL.	52
FIGURA 18 – EXEMPLO DE GRÁFICO DE PARETO.	53
FIGURA 19 – GRÁFICO DOS EFEITOS PRINCIPAIS.	54
FIGURA 20 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO DE EFEITOS.	55
FIGURA 21 – ESTUFA NOVA TÉCNICA NT514 (CORTESIA LAB. FÍSICO QUÍMICO – WHIRLPOOL).	57
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS NO TRATAMENTO TÉRMICO.	58
FIGURA 23 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA ASTM D638 TIPO I.	58
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA EM RELAÇÃO AO SENTIDO DE LAMINAÇÃO.	59
FIGURA 25 – CORPO DE PROVA INSTRUMENTADO.	60
FIGURA 26 – MÁQUINA UNIVERSAL DE TESTES <i>EMIC</i> DL 3000 (CORTESIA <i>EMIC</i>).	60
FIGURA 27 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS HBM - SPIDER8 (CORTESIA GRANTE).	60
FIGURA 28 – REPRESENTAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO EXTENSÔMETRO EM ¼ DE PONTE.	61

FIGURA 29 – CORPO DE PROVA AO FINAL DO ENSAIO.	61
FIGURA 30 – CURVA TENSÃO X DEFORMAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE E_1 E E_2	61
FIGURA 31 – CURVA DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL X DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL PARA DETERMINAÇÃO DE N_{12} E N_{21}	62
FIGURA 32 – GRÁFICOS MOSTRANDO DISTRIBUIÇÃO NORMAL PARA OS VALORES DO MÓDULO DE <i>YOUNG</i> E DO COEFICIENTE DE <i>POISSON</i>	62
FIGURA 33 – CORPO DE PROVA APOIADO NO EQUIPAMENTO DE TESTE (INSTANTE INICIAL).	63
FIGURA 34 – MODELAMENTO DO CP EM ELEMENTOS HEXAÉDRICOS, COM DESTAQUE DA POSIÇÃO DOS EXTENSÔMETROS.	63
FIGURA 35 – CORPO DE PROVA FLEXIONADO SOBRE O EQUIPAMENTO DE TESTE.	64
FIGURA 36 – GRADIENTE DE TENSÕES AO LONGO DA ESPESSURA DO CP, QUANDO FLEXIONADO SOBRE O EQUIPAMENTO DE TESTE.	64
FIGURA 37 – SEÇÃO DA AMOSTRA MOSTRANDO OS AVANÇOS INCREMENTAIS DE FURAÇÃO DE 0,2MM, REPRESENTADOS PELAS CAMADAS COLORIDAS, ATÉ A PROFUNDIDADE DE 1,4MM, CAMADA AMARELA.	64
FIGURA 38 – DIFERENÇA DE DEFORMAÇÕES DOS TRÊS EXTENSÔMETROS DA ROSETA OBTIDAS PELA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE ALÍVIO DE TENSÕES A CADA INCREMENTO DE FURAÇÃO.	65
FIGURA 39 – GRÁFICO COMPARANDO AS TENSÕES EQUIVALENTES DE <i>VON MISES</i> OBTIDAS DIRETAMENTE MODELO DE SIMULAÇÃO COM AS OBTIDAS POR MEIO EMPREGO DAS DEFORMAÇÕES NO <i>SOFTWARE EVAL</i>	66
FIGURA 40 – GRÁFICO COMPARANDO AS TENSÕES MAX. PRINCIPAL OBTIDAS DIRETAMENTE MODELO DE SIMULAÇÃO COM AS OBTIDAS POR MEIO EMPREGO DAS DEFORMAÇÕES NO <i>SOFTWARE EVAL</i>	66
FIGURA 41 – AMOSTRA PARA PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS INSTRUMENTADA COM ROSETA, TIPO B, PARA TESTE.	67

FIGURA 42 – APARATO PARA FLEXÃO E FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS.	68
FIGURA 43 – AMOSTRA 2 (<i>DUMMY</i>) FLEXIONADA SOBRE O APARATO.	68
FIGURA 44 – EQUIPAMENTO DE FURO SEGO EXECUTANDO FURAÇÃO NA AMOSTRA.	68
FIGURA 45 – DIFERENÇA DE DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL DAS 3 AMOSTRAS COMPARADAS COM AS DEFORMAÇÕES SIMULADAS.	69
FIGURA 46 – DIFERENÇA DE DEFORMAÇÃO 45° DAS 3 AMOSTRAS COMPARADAS COM AS DEFORMAÇÕES SIMULADAS	69
FIGURA 47 – DIFERENÇA DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL DAS 3 AMOSTRAS COMPARADAS COM AS DEFORMAÇÕES SIMULADAS.	70
FIGURA 48 – EQUIPAMENTO DE FURO CEGO MONTADO COM LENTE DE AUMENTO DOTADA DE MARCAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DO CENTRO DO FURO.	71
FIGURA 49 – IMAGEM ATRAVÉS DA LENTE DE AUMENTO VISUALIZANDO A CENTRALIZAÇÃO DO FURO EXECUTADO NA AMOSTRA.	71
FIGURA 50 – COMPARATIVO ENTRE VALORES TENSÃO RESIDUAL EQUIVALENTE DE <i>VON MISES</i> OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE, COM OS VALORES TENSÃO EQUIVALENTE DE <i>VON MISES</i> RETIRADOS DIRETAMENTE DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.	72
FIGURA 51 – COMPARATIVO ENTRE VALORES TENSÃO RESIDUAL MAX. PRINCIPAL OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE, COM OS VALORES TENSÃO MAX. PRINCIPAL RETIRADOS DIRETAMENTE DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.	72
FIGURA 52 – IMAGEM DO COMPONENTE PRATELEIRA CONGELADOR.	73
FIGURA 53 – VISCOSIDADE DO MATERIAL EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISLHAMENTO PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE PROCESSAMENTO, CORTESIA AUTODESK SIMULATION MOLDFLOW.	74
FIGURA 54 – MATRIZ DO EXPERIMENTO $2^5_{V^{-1}} = 16$, REPRESENTADA NA FORMA DE ÁRVORE DE AMOSTRAGEM.	75
FIGURA 55 – NÍVEIS “+1” E “-1” DO PERFIL DE INJEÇÃO.	76

FIGURA 56 – NÍVEIS “+1” E “-1” DO PERFIL DE RECALQUE, REPRESENTADO PARA TEMPO DE RECALQUE 3S.	77
FIGURA 57 – PAINEL DE CONTROLMASTER 8, NA TELA DE CONFIGURAÇÃO DO PERFIL DE INJEÇÃO.	77
FIGURA 58 – ESPECIFICAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS PARA CORRELAÇÃO COM TABELA 9.	78
FIGURA 59 – POSIÇÃO DA ROSETA NA PEÇA.	78
FIGURA 60 – TELA DE CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO NO <i>SOFTWARE</i> RSM.	79
FIGURA 61 – TELA DE CONFIGURAÇÃO DOS EXTENSÔMETRO NO <i>SOFTWARE</i> DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	80
FIGURA 62 – TENSÃO RESIDUAL EQUIVALENTE DE <i>VON MISES</i> DE OITO AMOSTRAS.	81
FIGURA 63 – MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO.	82
FIGURA 64 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL EQUIVALENTE DE <i>VON MISES</i> AO LONGO DA ESPESSURA DO ELEMENTO 7939 DA AMOSTRA 1.	83
FIGURA 65 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EQUIVALENTE DE <i>VON MISES</i> PRESENTE NA PRATELEIRA DEVIDO AO CARREGAMENTO EXTERNO, SEM CONDIÇÃO INICIAL DE TENSÃO RESIDUAL.	84
FIGURA 66 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO EQUIVALENTE DE <i>VON MISES</i> PRESENTE NA PRATELEIRA DEVIDO AO CARREGAMENTO EXTERNO, CONSIDERANDO CONDIÇÃO INICIAL DE TENSÃO RESIDUAL.	84
FIGURA 67 – GRÁFICO COMPARATIVO DOS NÍVEIS TENSÕES RESIDUAIS DAS AMOSTRAS 1 E 6 COM AS AMOSTRAS 15 E 12, QUE DIFEREM ENTRE SI SOMENTE PELA TEMPERATURA DE PLASTIFICAÇÃO.	85
FIGURA 68 – COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DAS TENSÕES RESIDUAIS VIRTUAIS E EXPERIMENTAL PARA A AMOSTRA 1.	86
FIGURA 69 – GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS.	87

FIGURA70 – <i>NOMAL PLOT</i> MOSTRANDO FATORES SIGNIFICATIVOS PARA TENSÃO RESIDUAL VIRTUAL.....	88
FIGURA 71 – <i>NOMAL PLOT</i> MOSTRANDO FATORES SIGNIFICATIVOS DO EXPERIMENTO FÍSICO.	88
FIGURA 72 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO DE EFEITOS PARA TENSÕES RESIDUAIS SIMULADAS.	90
FIGURA 73 – GRÁFICO DE INTERAÇÃO DE EFEITOS PARA TENSÕES RESIDUAIS EXPERIMENTAIS.	90
FIGURA 74 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL EQUIVALENTE DE <i>VON MISES</i> AO LONGO DA ESPESSURA DO ELEMENTO 7939 DAS AMOSTRAS 1 A 8.	98
FIGURA 75 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL EQUIVALENTE DE <i>VON MISES</i> AO LONGO DA ESPESSURA DO ELEMENTO 7939 DAS AMOSTRAS 9 A 16.	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EXEMPLO HIPOTÉTICO DE MATRIZ DE EXPERIMENTOS COM 3 FATORES E DOIS NÍVEIS CADA, MOSTRANDO TAMBÉM MATRIZ DE INTERAÇÕES [20].	47
TABELA 2 – RESOLUÇÃO PARA EXPERIMENTOS FATORIAIS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE FATORES E NÚMERO DE TRATAMENTOS [22].	51
TABELA 3 – MATRIZ EXPERIMENTAL DE DOE DE TRÊS FATORES COM QUATRO TRATAMENTOS.	51
TABELA 4 – TABELA DE IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.	59
TABELA 5 – PROPRIEDADES MECÂNICAS MÉDIAS DO PSAI INNOVA R830D.	62
TABELA 6 – DEFORMAÇÕES DECORRENTES DOS INCREMENTOS FURAÇÃO PARA OS TRÊS EXTENSÔMETROS DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.	65
TABELA 7 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO STYRON 688G.	74
TABELA 8 – MATRIZ EXPERIMENTAL DO DOE REALIZADO.	76
TABELA 9 – <i>GAGE FACTOR</i> PARA OS TRÊS EXTENSÔMETROS DA ROSETA.	78
TABELA 10 – MATRIZ <i>a</i> DE CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DO FURO CEGO.	96
TABELA 11 – MATRIZ <i>b</i> DE CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DO FURO CEGO.	97

LISTA DE SÍMBOLOS

ALFABETO LATINO

E – módulo de elasticidade ou módulo de Young;

a_{jk} – constante de calibração para tensões isotrópicas;

b_{jk} – constante de calibração para tensões cisalhantes;

\bar{a} – matriz de calibração para tensões isotrópicas;

\bar{b} – matriz de calibração para tensões cisalhantes;

j – número de incrementos de profundidade da furação;

k – número seqüencial para incrementos de furação;

P_k – tensão isotrópica devido à furação no incremento de profundidade k ;

p_j – deformação isotrópica no incremento de profundidade j ;

Q_k – tensão cisalhante à 45° devido à furação no incremento de profundidade k ;

q_j – deformação cisalhante à 45° no incremento de profundidade j ;

T_k – tensão cisalhante x - y devido à furação no incremento de profundidade k ;

t_j – deformação cisalhante x - y no incremento de profundidade j ;

ALFABETO GREGO

β – ângulo medido no sentido horário do eixo X (extensômetro 1) até o eixo da máxima tensão principal;

ϵ_j^r – deformação radial medida após alívio devido à furação no incremento de furação j ;

$(\epsilon_1)_j$ – deformação medida pelo extensômetro 1 após alívio devido à furação no incremento de furação j ;

$(\epsilon_2)_j$ – deformação medida pelo extensômetro 2 após alívio devido à furação no incremento de furação j ;

$(\varepsilon_3)_j$ – deformação medida pelo extensômetro3 após alívio devido à furação no incremento de furação j ;

ν – coeficiente de Poisson;

θ – ângulo entre o eixo do extensômetro de referência (extensômetro1) e o eixo X ;

σ_{max} – tensão máxima principal;

σ_{min} – tensão mínima principal;

$(\sigma_x)_k$ – tensão normal X devido à furação no incremento de profundidade k ;

$(\sigma_y)_k$ – tensão normal Y devido à furação no incremento de profundidade k ;

$(\tau_{xy})_k$ – tensão cisalhante XY devido à furação no incremento de profundidade k ;

SUMÁRIO

Dedicatória	v
Agradecimentos.....	vii
Resumo.....	ix
Abstract	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xix
Lista de Símbolos	xxi
Sumário	xxiii
1. Introdução	25
2. Objetivos	28
2.1. Objetivo Geral	28
2.2. Objetivos Específicos	28
3. Revisão Bibliográfica.....	29
3.1. Polímeros Termoplásticos	29
3.2. Processo de Injeção de Termoplásticos	32
3.3. Determinação de Tensões Residuais	38
3.4. Delineamento de experimentos (DOE – <i>Design of experiments</i>).....	45
3.1.1 Seleção de Fatores e Matriz Experimental	48
3.1.2 Análise dos Resultados.....	52
4. Determinação de Tensões Residuais Sob Condições Controladas	56
4.1. Caracterização Mecânica do Poliestireno de Alto Impacto ..	57
4.1.1. Fabricação dos Corpos de Prova.....	57
4.1.2. Instrumentação dos Corpos de Prova	59
4.1.3. Ensaio de Tração Uniaxial.....	60
4.2. Simulação Numérica do Experimento de Tensão Residual..	63
4.3. Procedimento Experimental de Tensões Residuais	67

5. Avaliação da Influência dos Parâmetros de Injeção na Tensão Residual e Comportamento Mecânico de Componente Plástico.....	73
5.1. Planejamento do Experimento e Obtenção das Amostras	74
5.2. Determinação das Tensões Residuais.....	78
5.3. Simulação das Tensões Residuais	82
5.4. Correlação Virtual Experimental.....	86
5.5. Avaliação Estatística do Experimento	87
6. Conclusão.....	91
7. Referencias Bibliográficas	93
Apêndice A – Tabelas com as constantes das Matrizes a e b para roseta de tipo B de 1/16in com furo de 2,0mm.....	96
Apêndice B – Gráfico com distribuição de tensão residual equivalente de <i>von Mises</i> ao longo da espessura do elemento 7939 de todas amostras de elementos finitos	98
Apêndice C – Matriz de experimentos com resultados para tensão residual teórica máxima do elemento 7939 do modelo de elementos finitos	100
Apêndice D – Matriz de experimentos com resultados para tensão residual Experimental máxima.....	101

1. INTRODUÇÃO

A constante necessidade de evolução e inovação dos produtos industrializados, a qual é impulsionada pela acirrada competitividade entre as empresas, vem demandando soluções de engenharia cada vez mais elaboradas. Estas soluções, nem sempre são economicamente viáveis ou até mesmo nem factíveis, quando se pensa em materiais mais tradicionais, como metais e cerâmicos.

Desta forma, associado à evolução tecnológica dos processos de fabricação e da ciência de materiais, o emprego de materiais poliméricos, que há algumas décadas se restringia a componentes de apelo visual e de pouca função estrutural, vem se ampliando e tomando o lugar dos materiais metálicos em diversos setores da indústria.

Dentre as características apresentadas pelos materiais poliméricos que tem permitido o seu emprego em detrimento aos materiais metálicos, podem ser citadas: o baixo custo da matéria prima, sua baixa densidade, capacidade de absorção de vibrações, resistência à ambientes corrosivos e facilidade em produzir peças com geometria complexa, dentre outras. Além disto, em algumas situações o tempo de fabricação de peças poliméricas também é inferior ao de componentes manufaturados em outros materiais, implicando na redução do custo final de produção.

Contudo, a substituição do material da peça requer não somente conhecimento do seu comportamento mecânico, como também requer mudança do processo de fabricação e tudo o que pode acarretar em decorrência do processo empregado [1].

Os polímeros do tipo termoplásticos podem ser moldados em peças de engenharia por diversos processos de transformação, como extrusão, moldagem por injeção, sopro, compressão, termoformagem, dentre outros. A moldagem por injeção é o processo empregado em mais de 33% de todos os materiais plásticos processados mundialmente, devido sua maior versatilidade no que se diz respeito à complexidade geométrica, aplicação e produtividade.

O conceito básico da moldagem por injeção consiste em injetar o material termoplástico no seu estado “fundido” dentro da cavidade de um molde com refrigeração, dentro da qual este se solidifica adquirindo a forma do componente a ser produzido. Embora, a primeira vista o processo possa parecer simples, a qualidade da peça injetada e as suas propriedades dependem do correto controle de diversos parâmetros, cujos valores permitidos estão compreendidos dentro de uma faixa de variação muito estreita [2].

Durante o processo de injeção os termoplásticos passam por um ciclo termomecânico bastante complexo, o qual promove uma grande variação nas propriedades reológicas, mecânicas e fluídicas do material, devido aos altos gradientes de temperatura, pressão e da taxa de cisalhamento tanto ao longo da espessura da peça injetada, quanto ao longo do fluxo do material [3, 4]. Como consequências do histórico termomecânico sofrido pelo material durante seu processamento podem resultar: empenamentos, retrações localizadas, variações nas propriedades mecânicas e tensões residuais, fatores estes que influenciam diretamente a qualidade final, o desempenho mecânico e a vida útil da peça.

Visto que os parâmetros de injeção, que serão descritos nos capítulos que se seguem, são os responsáveis por controlar o ambiente termomecânico ao qual o termoplástico estará sujeito durante seu processamento e, por sua vez, este ambiente tem forte influência nas propriedades e na qualidade final das peças, a correta definição e controle destes parâmetros é crucial para que o componente atenda aos requisitos de projeto. Desta forma, prever o desempenho mecânico e a qualidade de um componente estrutural injetado em função dos parâmetros de processo é essencial para que este não falhe em operação.

Com a evolução computacional, tanto de processadores (*hardware*) quanto de *softwares* de simulação numérica, ocorrida nos últimos 20 anos associada aos avanços decorrentes de pesquisas nas áreas de polímeros e da mecânica do contínuo, a utilização de ferramentas de simulação numérica tem se tornado cada vez mais difundida. As análises por volumes finitos (*Computational Fluids Dynamics – C.F.D.*) e por elementos finitos (*Finite Elements Analysis –*

F.E.A.) têm auxiliado no projeto de moldes, na determinação de parâmetros de injeção e na previsão de comportamento mecânico de peças poliméricas por meio de análises integradas.

Tendo conhecimento das informações mencionadas anteriormente e visando fabricar produtos cada vez mais confiáveis e competitivos, a Whirlpool, empresa líder do mercado latino americano de eletrodomésticos, e que utiliza muitos componentes em material polimérico em seus produtos, investe no desenvolvimento virtual de peças plásticas para minimizar os custos de não conformidade.

Assim motivado, o presente trabalho visa reduzir as falhas de componentes plásticos decorrentes da presença de tensões residuais, por meio do desenvolvimento de uma metodologia robusta de otimização dos parâmetros de injeção baseada em simulação de elementos finitos, e respaldada em experimentos para a medição de tensões residuais oriundas do processo de fabricação.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência dos parâmetros de injeção nas tensões residuais de um componente termoplástico da linha branca, e a influência da tensão residual no comportamento das peças quando submetidas a esforços mecânicos externos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinação das propriedades mecânicas sob os atuais parâmetros de processo;
- Realização de análise de injeção no *software* comercial *MoldFlow* e cálculo das tensões residuais do modelo de elementos finitos;
- Determinar através do método de *Hole-Drilling* as tensões residuais presentes no componente injetado sob as condições de injeção atuais e validar o modelo virtual;
- Comparar o desempenho mecânico do componente submetido a esforços mecânicos por meio de simulação por elementos finitos, a ser realizada utilizando um *software* comercial, onde um dos modelos levará em conta as tensões residuais calculadas pela simulação de injeção, e o outro será realizado da forma tradicional, sem considerar as tensões residuais;
- Determinar por meio da metodologia de Delineamento de Experimentos DOE (*Design of Experiments*) os parâmetros ótimos de injeção de modo a minimizar a influência das tensões residuais no comportamento mecânico de peças termoplásticas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Polímeros ou plásticos, como são comumente conhecidos, são, segundo a *International Union of Pure and Applied Chemistry – IUPAC*, materiais ou substâncias caracterizadas por uma repetição múltipla de uma ou mais espécies de átomos ou grupo de átomos unidos uns aos outros, em quantidades suficientes para fornecer um conjunto de propriedades que não variam acentuadamente com a adição ou remoção de uma ou algumas unidades constitucionais.

A união destes átomos ou grupos de átomos, também conhecidos como monômeros, por meio do processo de polimerização dão origem as macromoléculas, vide Figura 1, que são as constituintes dos polímeros. As macromoléculas de um polímero podem ser compostas por um único monômero, assim caracterizando o material como homopolímero, ou por mais tipos de monômeros, o que o caracteriza como um copolímero.



Figura 1 – Representação esquemática de monômeros de etileno compondo uma macromolécula de polietileno, exemplo de homopolímero.

Os polímeros empregados em componentes de engenharia na linha branca, em sua grande maioria polímeros sintéticos, podem ser

classificados quanto a sua fusibilidade e processabilidade, em termoplásticos e termofixos, conforme demonstrado na Figura 2.

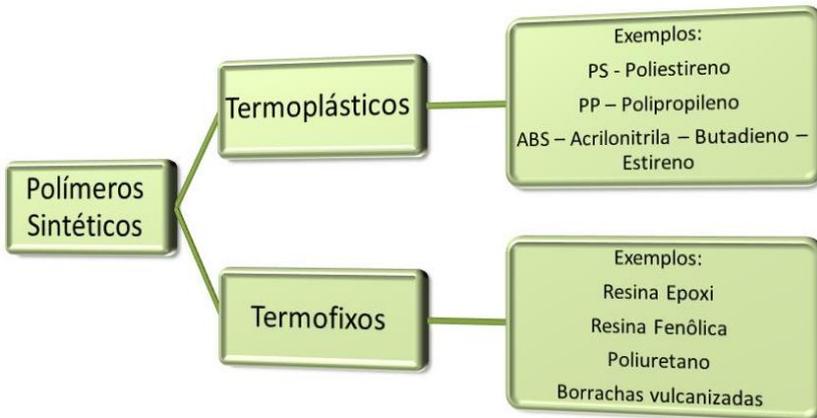


Figura 2 – Classificação de polímeros quanto a sua fusibilidade, com exemplos.

Os polímeros termofixos têm como característica predominante a reticulação de suas cadeias, ligações primárias entre cadeias, o que proporciona a eles elevada rigidez, elevada resistência mecânica e resistência térmica. Contudo, esta mesma reticulação os torna insolúveis e infusíveis, ou seja, não reprocessáveis ou recicláveis.

Por sua vez, os termoplásticos não apresentam tal reticulação. A interação entre suas cadeias se dá através de ligações secundárias, força de Van der Waals, interação dipolo-dipolo ou ligações de hidrogênio. Isto permite que os termoplásticos, ao serem aquecidos, possam ser processados e reprocessados através de diversos processos, dentre eles o processo de injeção.

Devido a esta característica, quanto a sua reprocessabilidade, os polímeros termoplásticos se tornam mais atrativos para diversos ramos industriais, inclusive para a linha branca. Dentre os termoplásticos *commodities* mais empregados neste setor, encontram-se o poliestireno cristal – GPPS, homopolímero amorfo transparente e de elevada rigidez, o polipropileno – PP, homo ou copolímero com elevada resistência química e boa flexibilidade, e por fim, o ABS, copolímero com boa resistência a impacto e melhor resistência mecânica entre os três. A

Figura 3 ilustra a formulação química do PS e ABS, respectivamente um homopolímero e um copolímero.

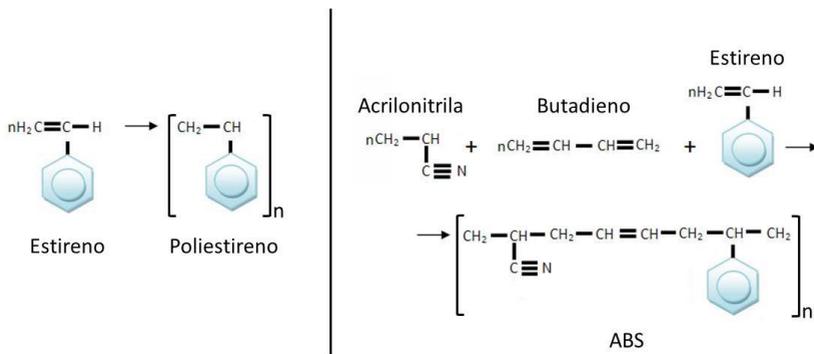


Figura 3 – Formulação química do Poliestireno, um homopolímero, e do ABS, um copolímero.

3.2. PROCESSO DE INJEÇÃO DE TERMOPLÁSTICOS

O processo de injeção de termoplástico é um dos muitos processos de transformação de polímeros em produtos acabados. Atualmente, cerca de 60% dos equipamentos de processamento de polímeros são injetoras [5].

Independentemente do processo utilizado para fabricar componentes de plásticos, a matéria prima passa por três etapas básicas [6]:

- 1) Plastificação – etapa que transforma o estado original do material, normalmente sólido, por meio de aquecimento e ação de esforços mecânicos, a outro, usualmente pastoso ou fundido, em que sua forma possa ser modificada na etapa seguinte;
- 2) Conformação – normalmente com o auxílio de pressão externa, a matéria-prima reproduz a forma da ferramenta (molde ou matriz), garantindo que a geometria do componente seja obtida;
- 3) Estabilização de Forma – por meio de resfriamento, cura ou remoção de solventes o material se solidifica permanecendo com a forma da ferramenta, na qual foi conformado;

Na injeção, o termoplástico granulado (*pellets*) que se encontra no funil de alimentação é admitido à unidade de injeção, a qual é composta por cilindro e fuso. No interior da unidade de injeção, o polímero é fundido e homogeneizado por meio do aquecimento do cilindro e esforços mecânicos, como atrito e cisalhamento, gerados pela rotação do fuso. Durante este processo, o material é transportado para frente do cilindro, onde é acumulado, completando a etapa de dosagem – etapa de plastificação. Posteriormente, se tem início a injeção propriamente dita, onde ocorre o preenchimento das cavidades – etapa de conformação. No recalque, fase que segue a injeção, a pressão é aumentada para compensar retrações decorrentes do início da solidificação do material, causada pelo início do resfriamento do molde. Por fim, se dá o restante do resfriamento – etapa de estabilização de forma e extração da peça. Simultaneamente a etapa de resfriamento se dá início a dosagem do novo ciclo. Todas as etapas do ciclo de injeção, descrito anteriormente, se encontram representadas na Figura 4.

Durante as etapas básicas de transformação do termoplástico do seu estado bruto a um componente acabado, este está sujeito a um ambiente termomecânico definido pela temperatura da massa, taxa de resfriamento, pressão na cavidade e velocidade do escoamento. Estes quatro fatores são definidos por autores como variáveis de controle de processo ou “macro-variáveis” e controlam praticamente todo o processo de injeção [6, 7].

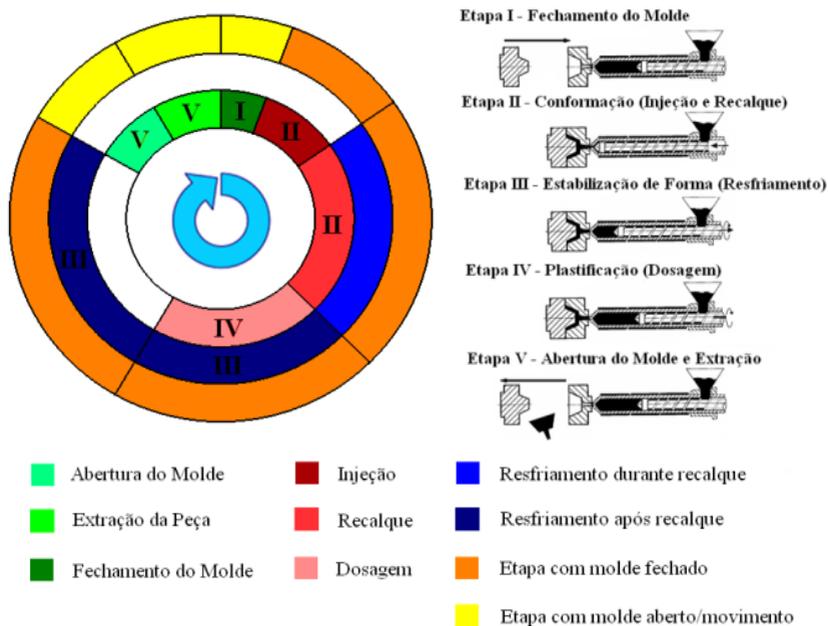


Figura 4 – Representação do Ciclo de Injeção.

Uma vez que estas “macro-variáveis” são as responsáveis pelo processo, controlá-las de maneira adequada é imprescindível, pois alterando-as é possível compensar fatores externos como temperatura e umidade, e assim, garantir condições ótimas de produção e qualidade. Contudo, não existem controles diretos para estas variáveis. Desta forma, este controle é feito de maneira indireta por meio dos parâmetros de injeção, os quais são programados no equipamento que age sobre o processo, modificando suas variáveis de controle.

Como principais variáveis, ou também denominados de parâmetros de injeção, para uma máquina injetora de acionamento hidráulico tem-se [7]:

- **Velocidade de avanço do fuso ou perfil de injeção:** quanto maior for seu valor, maior será a velocidade de escoamento do material pela cavidade, conseqüentemente, maior a taxa de cisalhamento, favorecendo a dissipação viscosa, o que modifica a temperatura da massa;

- **Pressão de injeção:** controla a força e a velocidade do movimento axial do parafuso durante a injeção;

- **Pressão de recalque ou perfil de recalque:** regula a pressão no interior da cavidade após a injeção, o que promove maior ou menor compactação das macromoléculas poliméricas;

- **Tempo, posição ou pressão de comutação:** momento em que o avanço do parafuso deixa de ser controlado pela velocidade programada e passa a respeitar a pressão de recalque preestabelecida, marcando a transição entre injeção e recalque. Assim como o parâmetro anterior, este também tem influencia na pressão na cavidade;

- **Tempo de recalque:** define o período que a pressão de recalque ficará atuando sobre o material no interior da cavidade. Este fator, associado a pressão de recalque, garante que não exista contra fluxo de material da cavidade para o fuso;

- **Temperatura do cilindro de aquecimento:** regula a temperatura da massa;

- **Tempo de residência:** influencia a temperatura da massa. É o tempo máximo que o material pode permanecer no “canhão” sem que ocorra sua degradação;

- **Velocidade de rotação do parafuso:** influencia a temperatura da massa;

- **Temperatura do fluido de resfriamento do molde:** ajusta a temperatura das paredes da cavidade do molde, influenciando a taxa de resfriamento do termoplástico no interior da cavidade;

- **Vazão do fluido de refrigeração:** assim como a variável anterior, controla a taxa de resfriamento;

- **Tempo de molde fechado:** altera a taxa de resfriamento do material, pois após a abertura do molde, o componente passa a resfriar não uniformemente, tendo primeiramente apenas um dos lados resfriado ao ar, fato este que só é balanceado após a extração;

- **Contrapressão:** é a pressão do atuador do parafuso contrária ao seu retorno durante a etapa de dosagem, modifica a temperatura e a homogeneidade da massa;

- **Curso de dosagem:** modifica a quantidade de material dosado, assim pode alterar a pressão no interior da cavidade durante a injeção e o recalque;

- **Força de fechamento:** caso esse parâmetro seja inferior ao correto, o material sai da cavidade para a superfície de fechamento do molde, por consequência diminuindo a pressão na cavidade. Isso resulta em alteração da massa, erro dimensional e surgimento de rebarbas.

- **Número de Pontos de Injeção:** têm influência sobre o gradiente de pressão e temperatura da massa no interior da cavidade, os quais estão relacionados com a estabilidade dimensional da peça.

Durante a injeção, à medida que a massa fundida avança para o interior da cavidade, a sua temperatura, que na saída do bico injetor pode ser dita como temperatura de injeção, vai se reduzindo devido às trocas térmicas com o molde. Na interface de contato entre o polímero e a parede ocorre uma redução drástica da viscosidade, solidificação, de uma fina camada de material, conhecida como camada congelada, cuja espessura e morfologia dependem das condições do processo próximas às paredes do molde.

A formação desta camada promove uma redução na seção transversal do escoamento, aumentando assim a perda de carga e reduzindo, conseqüentemente, a pressão de preenchimento da cavidade. Além disto, a presença desta camada causa um resfriamento mais lento da região central da peça, devido à baixa condutividade térmica do material [8]. Isto associado às características termomecânicas ao longo do fluxo resulta, para polímeros semi-cristalinos, em uma microestrutura que apresenta três camadas distintas ao longo da espessura, sendo elas: pele, transição e núcleo, vide Figura 5.

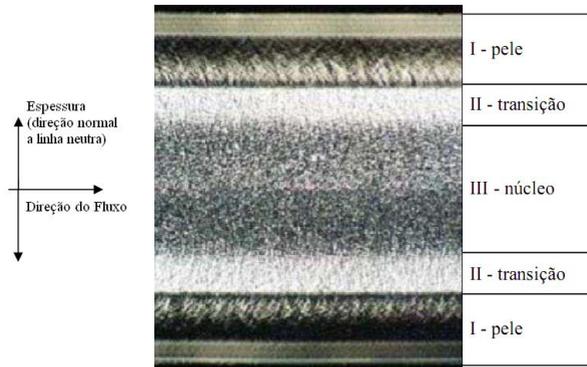


Figura 5 – Micrografia mostrando a estrutura de camadas morfológicas do PP injetado [9].

Na Figura 6 é apresentado de forma esquemática, o fluxo do material no interior da cavidade, e os perfis de velocidade, temperatura e de taxa de cisalhamento, bem como as conformações das cadeias poliméricas em diferentes regiões da espessura, as quais são influenciadas pelas associações destes perfis, que formam o ambiente termomecânico.

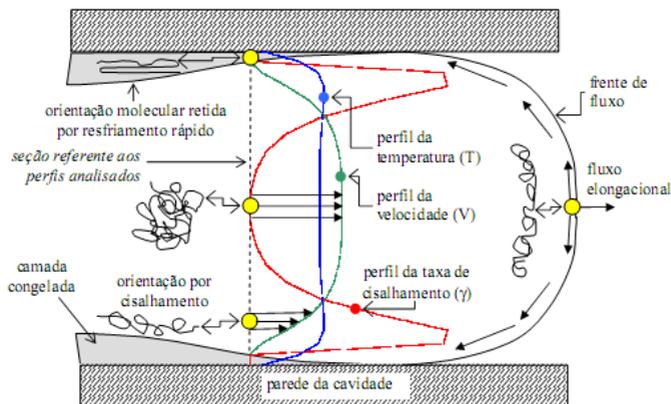


Figura 6 – Representação do fluxo de material no preenchimento da cavidade [7].

A magnitude dos perfis é fortemente associada aos parâmetros de injeção e a eles estão relacionadas às espessuras das camadas

apresentadas na Figura 5, assim como as estruturas morfológicas que as compõem.

Na pele, normalmente, encontram-se cadeias fortemente orientadas no sentido do fluxo, enquanto no núcleo, para polímeros semi-cristalinos, verifica-se a formação de esferulitos isotrópicos. Já na região de transição, a qual está sujeita a altas taxas de cisalhamento, pode ocorrer a formação de esferulitos alongados no sentido do gradiente térmico, ou a formação de *shish-kebab*, que são microestruturas energeticamente mais favoráveis em taxas de cisalhamento superiores a um valor crítico ($\gamma_{\text{crítico}} = 10^5 \text{ s}^{-1}$), dificilmente alcançável em polímeros de baixo peso molecular, vide Figura 7 [7].

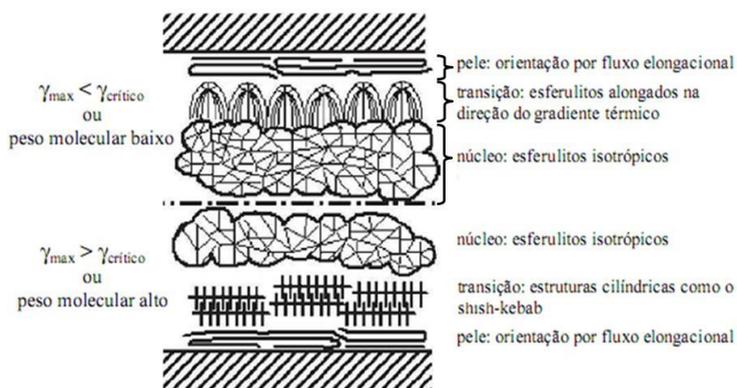


Figura 7 – Influência do peso molecular e da taxa de cisalhamento na distribuição morfológica [7].

3.3.DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Tensão residual é um campo de tensões auto-equilibrado que ocorre em componentes ou estruturas mesmo sem a aplicação de forças externas ou gradientes de temperatura, sendo normalmente resultante do processo de fabricação, tratamentos térmicos ou do processo de montagem [10 - 12].

A presença de tensões residuais em uma peça pode ser prejudicial ou favorável, isto irá depender do campo de tensões residuais e das solicitações externas. Comumente a existência de tensões residuais é desfavorável, quando elas são trativas. A ocorrência de tensões residuais em peças plásticas pode resultar em distorções dimensionais e de forma, como retrações e empenamentos localizados, redução da vida útil do produto, quando trativas, e *enviromental stress cracking*, quando o componente está sujeito a condições ambientais específicas [12 - 14].

As tensões residuais podem ser determinadas por vários métodos, sendo os mais usuais: a) o de remoção de camadas, também conhecido como *layer removal*; b) o furo cego, ou *hole-drilling*; c) o de fotoelasticidade de transmissão.

O método de fotoelasticidade de transmissão é baseado na anisotropia óptica, ou birrefringência, desenvolvida por certos materiais quando solicitados mecanicamente, termicamente, ou na presença de tensões residuais. Esta anisotropia óptica promove, quando o componente é visto através de um polaroscópio, a formação de franjas isocromáticas, as quais possibilitam visualizar imediatamente as magnitudes e campos de tensão e deformação presentes na peça. Contudo, este método é aplicável somente a materiais transparentes e birrefringentes. Nos polímeros, esta anisotropia é determinada pela configuração química e pela conformação de suas cadeias.

A técnica de remoção de camadas é fundamentada na medição da curvatura de peças ou amostras planas após finas camadas de material terem sido removidas de sua superfície. Em resposta a esta remoção de camadas, a amostra restabelece o equilíbrio das tensões internas empenando-se. Assim, medindo a curvatura como função da profundidade da camada removida é possível calcular a distribuição de

tensões ao longo da espessura da amostra antes da remoção das camadas [13]. Esta técnica é capaz de fornecer resultados mais consistentes de distribuição de tensões residuais ao longo da espessura e na extensão de toda a peça. Entretanto, ela demanda muito tempo, além de ser somente aplicável a peças planas.

Por sua vez, o processo do furo cego é potencialmente mais flexível na determinação das tensões residuais em peças com geometria complexa, pois a medida é tomada em apenas uma pequena região [14]. Este método tem como base teórica as equações de Kirsch, as quais permitem determinar o estado de tensões ao redor de um furo passante existente numa placa infinita com carregamento conhecido [19]. Embora a formulação deste método seja baseada em uma placa, ele pode ser aplicado em peças com geometria qualquer.

O estado de tensões residuais final (σ'), medido após a usinagem de um furo passante em um componente, pode ser representado pela subtração do campo de concentração de tensões (σ''), dado pela solução de Kirsch, do estado de tensões na placa inicialmente sem furo (σ) [19]. A Figura 8 demonstra esquematicamente os estados de tensão residuais decorrentes da aplicação do método do furo cego.

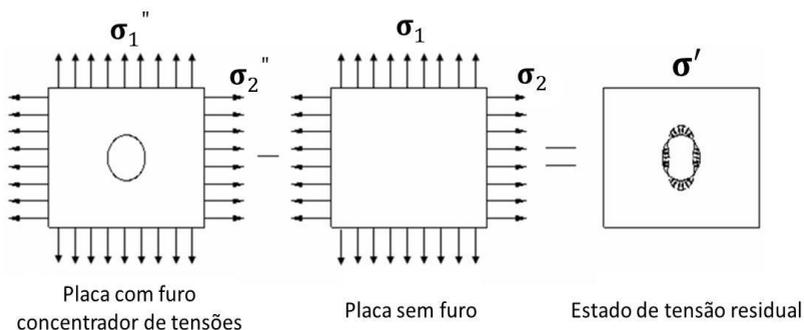


Figura 8 – Obtenção do estado de tensões resultante do alívio provocado pelo furo [19].

No procedimento de furo cego, um extensômetro especial do tipo roseta, Figura 9, é colado à amostra. Em seguida, um furo é feito precisamente no centro da roseta. A remoção de material da peça em razão da furação promove o alívio das tensões internas e consequentes

deformações nas proximidades do furo, as quais são captadas pelos extensômetros. Assim, utilizando as deformações registradas e empregando-se cálculos apropriados, é possível obter os valores das tensões residuais ao longo dos dois eixos principais da amostra.

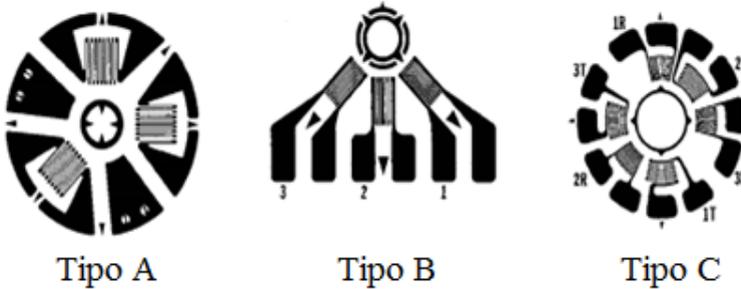


Figura 9 – Exemplos de rosetas, extensômetros próprios para determinação de tensões residuais [15].

No método do furo cego são feitos j incrementos/passos de furação e em cada incremento é medida a deformação elástica radial (ϵ_j^r). Esta deformação elástica radial, medida pela roseta nos arredores da furação, ao final do passo j de furação, depende da tensão residual que existia originalmente no material removido durante todos os incrementos de furação realizados anteriormente, $1 \leq k \leq j$, e se correlacionam por meio da equação abaixo [15 - 17]:

$$\epsilon_j^r = \frac{1 + \nu}{E} \sum_{k=1}^j \left(a_{jk} \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)_k \right) + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \left(b_{jk} \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)_k \cos(2\theta) \right) + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \left(b_{jk} (\tau_{xy})_k \sin(2\theta) \right) \quad (1)$$

Sendo σ_x e σ_y as tensões normais, e τ_{xy} a tensão cisalhante no passo k de furação nas direções previamente definidas, x e y ; θ o ângulo medido no sentido anti-horário do eixo x com relação ao eixo do extensômetro de referência, extensômetro 1, conforme mostrado na Figura 10 e Figura 11. As constantes a_{jk} e b_{jk} são constantes de

calibração que indicam a deformação aliviada no j -ésimo passo de furação em um furo de j incrementos, devido a uma tensão unitária no furo no passo de furação k , vide Figura 12; E o módulo de *Young* e ν o coeficiente de *Poisson* do material da peça em análise [15 - 17].

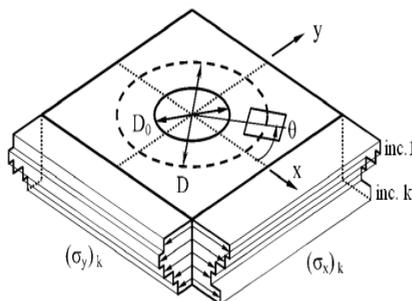


Figura 10 – Representação esquemática de tensão residual não uniforme ao longo da espessura de uma peça para furação em k incrementos.

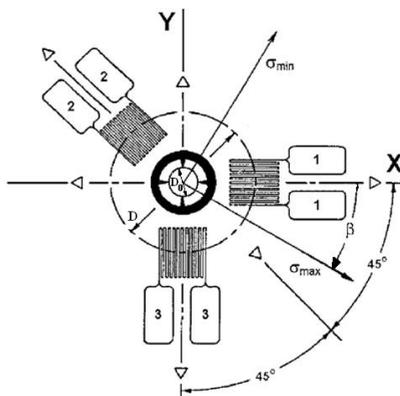


Figura 11 – Representação esquemática de uma roseta, em disposição horária, e tensões principais no método do furo cego.

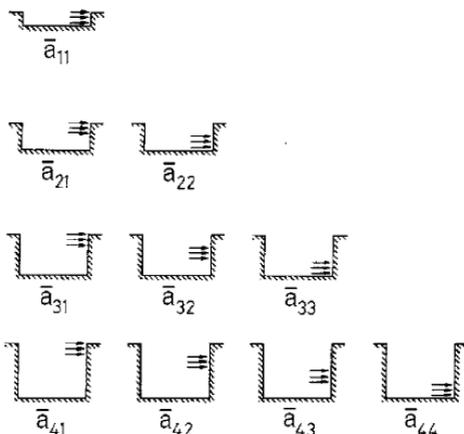


Figura 12 – Interpretação física dos coeficientes a_{jk} mostradas através das seções transversais de um furo obtido em 4 passos de profundidade.

As matrizes de constantes \bar{a} e \bar{b} , apresentadas na Tabela 10 e Tabela 11 do Apêndice A, respectivamente, podem ser determinadas por meio de um experimento de calibração. Porém, desta forma, os valores encontrados só podem ser empregados para o cálculo de tensões na peça em questão ou em peças com mesmos parâmetros geométricos, como: tipo de roseta, diâmetro e profundidade do furo; e de material. Ou seja, para qualquer modificação nos parâmetros, um novo experimento de calibração deve ser realizado. Assim, a utilização do método dos elementos finitos torna o método muito mais prático, pois permite realizar o cálculo das constantes de calibração para diferentes parâmetros geométricos e de material de uma maneira muito mais rápida do que o procedimento experimental de calibração.

Para determinar as tensões residuais a cada incremento k da furação em uma peça, convém reescrever a Equação 1 de forma a relacionar as deformações medidas ε_1 , ε_2 e ε_3 com as tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} no sistema cartesiano, assim obtendo-se [12, 15 - 17]:

$$\begin{aligned} (\varepsilon_1)_j &= \sum_{k=1}^j \left(A_{jk} \left((\sigma_y)_k + (\sigma_x)_k \right) - B_{jk} \left((\sigma_y)_k - (\sigma_x)_k \right) \right) \\ (\varepsilon_2)_j &= \sum_{k=1}^j \left(A_{jk} \left((\sigma_y)_k + (\sigma_x)_k \right) - 2B_{jk} (\tau_{xy})_k \right) \quad (2) \\ (\varepsilon_3)_j &= \sum_{k=1}^j \left(A_{jk} \left((\sigma_y)_k + (\sigma_x)_k \right) + B_{jk} \left((\sigma_y)_k - (\sigma_x)_k \right) \right) \end{aligned}$$

Sendo A_{jk} e B_{jk} descritos da forma:

$$\begin{aligned} A_{jk} &= -a_{jk} \frac{1 + \nu}{2E} \\ B_{jk} &= -\frac{b_{jk}}{2E} \end{aligned} \quad (3)$$

As tensões desconhecidas, σ_x e σ_y e τ_{xy} , podem ser encontradas resolvendo as séries apresentadas na Equação 2. Contudo, estas podem ser mais facilmente determinadas. Para isto, é matematicamente conveniente trabalhar com as variáveis tensão e deformação transformadas. As deformações transformadas p , q e t são dadas por [15]:

$$\begin{aligned} p_j &= \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)_j}{2} \\ q_j &= \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)_j}{2} \\ t_j &= \frac{(\varepsilon_3 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_1)_j}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

Analogamente, as tensões transformadas P , Q e T são dadas por:

$$\begin{aligned} P_k &= \frac{((\sigma_y)_k + (\sigma_x)_k)}{2} \\ Q_k &= \frac{((\sigma_y)_k - (\sigma_x)_k)}{2} \\ T_k &= (\tau_{xy})_k \end{aligned} \quad (5)$$

Assim, a solução da Equação 2 com as constantes de calibração a_{jk} e b_{jk} , definidas para cada incremento de furação k de uma furação com j passos ($1 \leq k \leq j$), é dada por:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^j a_{jk} P_k &= \frac{E}{1 + \nu} p_j \\ \sum_{k=1}^j b_{jk} Q_k &= E q_j \\ \sum_{k=1}^j b_{jk} T_k &= -E t_j \end{aligned} \quad (6)$$

Para calcular as constantes de calibração a_{jk} e b_{jk} através do método de elementos finitos assume-se um campo de tensões atuando na superfície cilíndrica do furo, Figura 13, no caso da constante a_{jk} aplica-se um estado equi-biaxial de tensões, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_a$ e $\tau_{xy} = 0$, Figura 14, já no caso da constante b_{jk} utiliza-se um estado de cisalhamento puro, $-\sigma_x = \sigma_y = \sigma_b$ e $\tau_{xy} = 0$.

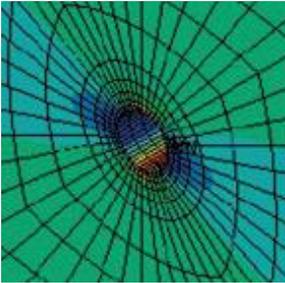


Figura 13 – Campo de deformações devido à pressão aplicada na parede cilíndrica do furo.

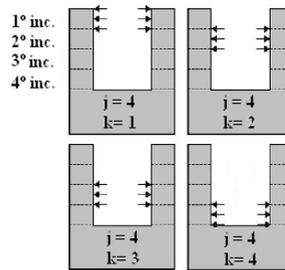


Figura 14 – Representação esquemática da seção transversal do furo na determinação de a_{41} a a_{44} .

Uma vez que as tensões aplicadas no interior da furação são conhecidas, e iguais a unidade, e tendo como resultado da análise de elementos finitos os valores das deformações na posição dos extensômetros, basta aplicar os valores na Equação 6 para se determinar os componentes das matrizes de constantes \bar{a} e \bar{b} .

A norma ASTM E837-08, apresenta tabelas com os valores das constantes das matrizes \bar{a} e \bar{b} para os três tipos de rosetas presentes em seu texto, vide Tabela 10 e Tabela 11 no Apêndice A para constantes da roseta tipo B, utilizadas no presente trabalho. Uma vez que os valores presentes nas tabelas são função do tamanho da roseta utilizada e do diâmetro do furo realizado, eventualmente se fazem necessárias algumas conversões.

Se a roseta empregada for de $1/32$ in, basta multiplicar os valores de profundidade de tensão e profundidade do furo da Tabela 10 e Tabela 11 por 0,5. Caso a roseta utilizada seja de $1/8$ in, deve-se multiplicar os

valores de profundidade de tensão e profundidade do furo da Tabela 10 e Tabela 11 por 2 [15].

Para ajustar os valores dos coeficientes das matrizes em relação ao diâmetro do furo, com $d = 2,0\text{mm}$, como recomenda a norma ASTM E837-08, é necessário aplicar uma regra de três simples, conforme mostrado pela Equação 7 [15].

$$b_{jk}' = b_{jk} \frac{d'}{d} \quad (7)$$

3.4. DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE – DESIGN OF EXPERIMENTS)

Experimentos são realizados por engenheiros em diversos campos e têm um importante papel no desenvolvimento de novos produtos e novos processos, bem como no aprimoramento de produtos e processos existentes.

Normalmente, a execução de experimentações tem como intuito descobrir algo sobre algum processo ou sistema particular, que no caso do presente projeto é avaliar a influência das variáveis do processo de injeção na tensão residual e suas consequências no comportamento mecânico de componentes termoplásticos.

Formalmente, se pode definir um experimento como um teste ou série de testes, nos quais modificações propositalmente são empregadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema em questão, para que se possa observar e identificar as reações que tais alterações promovem na saída do processo ou sistema [20].

O delineamento de experimentos DOE é uma metodologia para planejar, conduzir e analisar estatisticamente experimentos, de modo a obter conclusões válidas e objetivas, satisfazendo ainda dois grandes objetivos: a) a maior precisão estatística possível das respostas e b) o menor custo possível dos testes [20, 21].

A ferramenta DOE é bastante poderosa e tem uma vasta aplicação no ramo industrial, pois apresenta técnicas de análise de dados adequadas para o uso de estratégia de amostragem de experimentos hierárquicos, os quais permitem, com um número de amostras

minimizado, determinar quais as principais fontes de variação, tanto de curto, quanto de longo prazo, de um processo e a contribuições destas, bem como a de suas interações, no produto final [22].

Para melhor compreensão e emprego da metodologia de DOE faz-se necessário contextualizar algumas terminologias e conceitos:

- **Variáveis de resposta:** são as respostas de interesse do experimento, normalmente sendo as saídas de um ou mais processos ou sistemas. São dependentes e sofrem algumas alterações, quando modificações são introduzidas propositalmente nos fatores que regulam ou ajustam os processos ou sistemas. Usualmente, podem existir uma ou mais variáveis resposta (Y) que são importantes de se avaliar em um experimento [22], vide exemplo na Tabela 1;

- **Fatores de Controle:** são comumente os parâmetros de controle de um processo ou sistema. Os fatores de controle, investigados, são modificados sistematicamente durante o experimento, com o objetivo de avaliar o efeito destas alterações nas variáveis de resposta, permitindo assim determinar quais são os principais fatores do processo ou sistema. Os fatores de controle são divididos em quantitativos (pressão de injeção, temperatura, velocidade, etc.) e qualitativos (diferentes máquinas, operadores, tipo de material, etc.). Nos experimentos, os fatores podem ser representados por números arábicos (1, 2, 3...) ou por letras (A, B, C...) [22], vide exemplo na Tabela 1;

- **Níveis dos fatores:** são as condições de trabalho dos fatores de controle avaliados nos experimentos. Os níveis são identificados por nível baixo “-1” e nível alto “+1”. A determinação dos níveis, ou faixa de variação entre os níveis, representa um grande papel no experimento, pois, em casos onde mal definidos, podem invalidar o experimento [22];

- **Tratamentos:** é a combinação dos níveis de fatores de controle. Isto significa que cada uma das amostras do experimento representará um tratamento [22], vide exemplo na Tabela 1;

- **Matriz de experimentos:** é a matriz composta pela combinação dos fatores de controle com seus respectivos níveis, cada uma de suas linhas corresponde a um tratamento. Este é o plano formal construído para conduzir os experimentos [22], vide exemplo na Tabela 1;

Tabela 1 – Exemplo hipotético de matriz de experimentos com 3 fatores e dois níveis cada, mostrando também matriz de interações [20].

Tratamentos	Fatores de Controle			Interações dos Fatores			Variável Resposta(s) Y (massa do comp. [g])	
	A	B	C	AB	AC	BC		ABC
1	-	-	-	+	+	+	-	70
2	+	-	-	-	-	+	+	82
3	-	+	-	-	+	-	+	64
4	+	+	-	+	-	-	-	78
5	-	-	+	+	-	-	+	62
6	+	-	+	-	+	-	-	93
7	-	+	+	-	-	+	-	55
8	+	+	+	+	+	+	+	90

• **Efeito principal:** é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado.

$$\text{Efeito Principal } X = \frac{2 \cdot (\sum y^+ - \sum y^-)}{2^n} \quad (8)$$

Onde, y corresponde ao valor da variável resposta para um determinado tratamento, “+1” e “-1” correspondem, respectivamente, aos níveis alto e baixo do fator X em questão, e n corresponde ao número total de fatores que compõem o experimento [22];

• **Efeito de interação (ou interação entre fatores):** é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator, ou seja, o efeito de um fator dependente da configuração dos níveis dos outros fatores [22].

$$\text{Interação de Efeitos } X * Z = \frac{2 \cdot [(\sum y^{++} + \sum y^{--}) - (\sum y^{+-} - \sum y^{-+})]}{2^n} \quad (9)$$

Ou simplesmente:

$$\text{Interação de Efeitos } XZ = \frac{2 \cdot (\sum y^{+-} - \sum y^{-+})}{2^n} \quad (10)$$

Onde, y corresponde ao valor da variável resposta para um determinado tratamento, “+1” e “-1” correspondem, respectivamente, aos níveis alto e baixo dos fatores X e Z ou da combinação dos fatores XZ em questão, e n corresponde ao número total de fatores que compõem o experimento;

• **Aleatorização:** a aleatorização é um processo utilizado na execução dos tratamentos de experimentos para balancear os efeitos produzidos pelos fatores não-controláveis nas respostas analisadas e para se atender aos requisitos dos métodos estatísticos, os quais exigem que os componentes do erro experimental sejam variáveis aleatórias independentes [22]. A aleatorização pode ser realizada através de um simples sorteio dos tratamentos, ou mais usualmente, é definida de modo a maximizar a velocidade de execução dos tratamentos e/ou minimizar o número alterações de programações de equipamentos ou processos para gerar todos os tratamentos.

A utilização de DOE como método de execução de experimentos requer planejamento, execução minuciosa e um bom domínio dos processos envolvidos, pois equívocos no planejamento ou execução dos experimentos podem invalidar todos os resultados. Assim, na prática de DOEs, usualmente, segue-se um roteiro conforme o fluxograma representado na Figura 15.

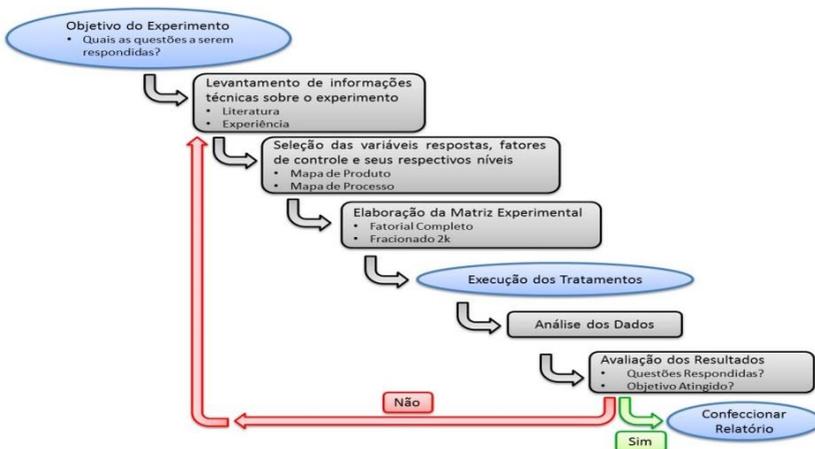


Figura 15 – Fluxograma de Execução de DOE.

3.1.1 SELEÇÃO DE FATORES E MATRIZ EXPERIMENTAL

Uma vez os objetivos dos experimentos tendo sido estabelecidos e com base nos conhecimentos técnicos sobre o processo ou produto em

questão, são estabelecidos as variáveis respondidas, os fatores de controle e seus respectivos níveis.

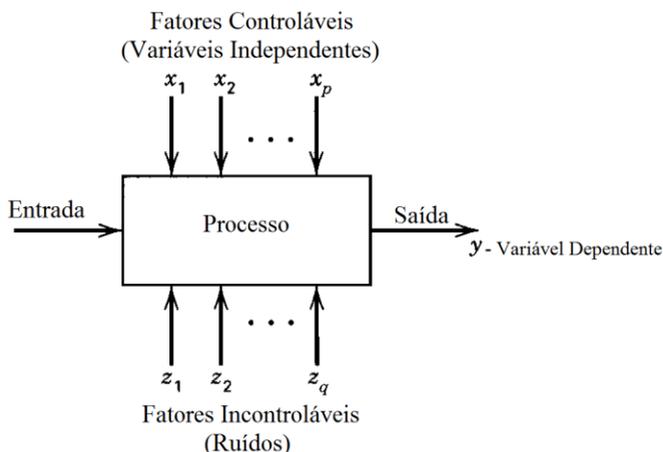


Figura 16 – Representação genérica de um processo ou sistema [20].

A Figura 16 demonstra de uma forma clara, que existem dois tipos de fatores que podem influenciar a saída, variável resposta, de um processo: a) os controláveis e b) os incontroláveis.

Os fatores incontroláveis, como a própria designação diz, são aqueles sobre os quais se tem pouca ou nenhuma ação. Contudo, é recomendável, sempre que possível, monitorá-los durante os experimentos. Por sua vez, os fatores controláveis, aqueles que podem ser manipulados, são, juntamente com seus níveis, os que constituirão a matriz experimental.

Tomando como exemplo o processo de injeção de um componente termoplástico qualquer, fica evidente, pelo que foi descrito no Capítulo 3, seção 3.1, que a realização de um DOE com abordagem completamente fatorial de fatores, mesmo que com apenas dois níveis 2^n_{full} , resultaria em um número bastante elevado de experimentos. Entretanto, de maneira geral, as interações de fatores de ordem alta (terceira, quarta ou superiores) são pequenas e podem ser confundidas com o desvio padrão dos efeitos [22].

Assim, para reduzir o número de tratamentos e ainda identificar os efeitos predominantes, usualmente os principais e os decorrentes de interações de segunda ordem, são empregados DOEs com abordagem fatorial fracionadas ou parciais. Esta forma de abordagem por não determinar todos as interações de parâmetros, promove uma perda na resolução do experimento, a qual é função do fracionamento empregado, ou seja, do número de tratamentos executados.

Os experimentos fracionados, como a própria denominação diz, são frações de DOEs completamente fatoriais. São frequentemente empregados quando existe um grande número de fatores a serem avaliados com restrição no número de amostras possíveis de serem manufaturadas ou de tempo de execução.

A resolução do experimento indica o nível de confundimento, ou *Aliasing*, que ocorrerá entre os efeitos dos fatores e os efeitos das interações de 2ª ou maior ordem dos fatores. Experimentos completamente fatoriais têm ordem infinita e dependendo do fracionamento empregado, terão suas resoluções reduzidas. Abaixo, segue uma breve explicação dos confundimentos para as resoluções III, IV, V e VI e a Tabela 2 mostra a resolução de um experimento em função do número de fatores avaliados e número de tratamentos.

- **Resolução III:** não há confundimento entre efeitos principais. Contudo, efeitos principais tem confundimentos com efeitos de interações simples, ou de segunda ordem.

- **Resolução IV:** não há confundimentos entre efeitos principais ou destes com efeitos de interação de segunda ordem. Contudo, efeitos de segunda ordem apresentam confundimentos entre si.

- **Resolução V:** não há confundimentos entre efeitos principais ou destes com efeitos de interação de segunda ordem. Os efeitos de interação simples não apresentam confundimentos entre si, somente havendo confundimento com efeitos de interação de tripla ou de terceira ordem.

- **Resolução VI:** os efeitos principais têm como confundimento os efeitos de interações de quinta ordem, os efeitos de interações simples têm como confundimento somente as interações de quarta ordem e por fim, as interações de terceira ordem tem confundimento entre si.

Tabela 2 – Resolução para experimentos fatoriais em função do número de fatores e número de tratamentos [22].

Tratamentos	Fatores de Controle														
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Full	III													
8		Full	IV	III	III	III									
16			Full	V	IV	IV	IV	III							
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Full	VII	V	IV							
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Para facilitar a compreensão, a Tabela 3 é um exemplo de um DOE fracionado $2^{3-1}_{III} = 4$, onde 2 indica o número de níveis dos fatores, 3 o número de fatores, A, B e C, respectivamente discriminados na tabela, III a resolução do experimento e 1 o número a ser subtraídos dos fatores para resultar no número total de tratamentos [22].

Tabela 3 – Matriz experimental de DOE de três fatores com quatro tratamentos.

Tratamentos	Fatores de Controle			Interações dos Fatores			
	A (Pressão de Injeção)	B (Temperatura da Massa)	C (Pressão de Recalque)	AB	AC	BC	ABC
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	-	-	+	-	+
3	+	-	-	-	-	+	+
4	-	-	+	+	-	-	+

A Tabela 3 também permite verificar a estrutura de confundimentos do experimento por meio dos grupos de cores, onde $A=BC$, $B=AC$ e $C=AB$. Desta forma, neste DOE ao se analisar os resultados dos tratamentos, através do cálculo de significância dos fatores, e estes indicarem que AB é significativo, não se terá certeza se a interação é realmente significativa, uma vez que está é igual, confundida, com o fator principal C. Este fato, também se repete para o restante dos fatores de acordo com as cores da tabela.

Entretanto, algumas interações, principalmente as de maior ordem, têm probabilidade reduzida de ocorrência, assim o conhecimento do processo em questão e a experiência do executor do DOE permitem atribuir certas hipóteses associadas à interpretação dos resultados,

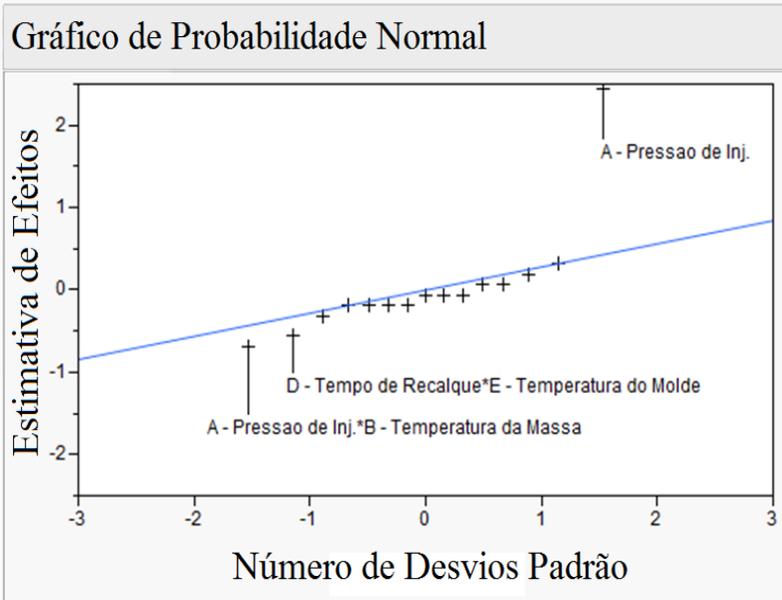
possibilitando filtrar as interações não factíveis e utilizar racionalmente os resultados de experimentos fracionados [22].

3.1.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Existem diversas técnicas para avaliações dos resultados de um DOE e determinação das significâncias dos fatores e de suas interações. Dentre as ferramentas mais empregadas, e que serão abordadas no presente trabalho, estão:

- Gráfico de Probabilidade Normal ou *Normal Plot*;
- Gráfico de Pareto ou *Pareto Plot*;
- Gráfico de Efeitos Principais;
- Gráfico de Interação de Efeitos.

O gráfico de probabilidade normal, Figura 17, é uma forma bastante usual e de simples visualização para avaliação da significância do efeito dos fatores manipulados.



Coefficiente angular da reta azul é igual ao *Lenth's PSE*.

Figura 17 – Exemplo de Gráfico de Probabilidade Normal.

No exemplo de gráfico de probabilidade normal, Figura 17, os pontos representam os efeitos dos fatores e de suas interações, e a linha azul representa o ruído do experimento. Assim, os pontos que se encontram distantes da linha azul são aqueles com uma dada significância estatística, ou seja, quanto mais longe desta linha, maior será o valor do efeito do fator comparado com o ruído do experimento [22].

Normalmente, pontos de fatores com efeito significativo serão representados no gráfico de modo diferenciado dos demais, desta forma, neste exemplo, tem-se como fatores significativos A, e as interações DE e AB, os quais se encontram identificados no gráfico.

O gráfico de Pareto também é bastante utilizado para avaliação das significâncias dos efeitos e de suas interações. Nesta forma de avaliação é possível visualizar tanto a magnitude quanto a importância dos efeitos, um em relação aos outros, vide Figura 18.

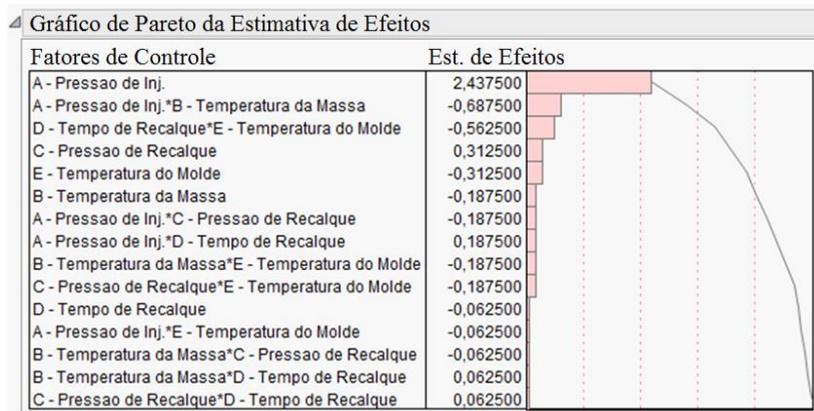


Figura 18 – Exemplo de Gráfico de Pareto.

A Figura 19 mostra um exemplo de gráfico dos efeitos principais. Nela é possível visualizar o efeito dos fatores de controle, sem interações, através da inclinação das retas que unem as médias do nível “+1” e “-1” dos respectivos fatores.

O coeficiente angular da reta que une as médias para cada nível de um dado fator indica o grau de significância do mesmo, ou seja,

quanto maior a magnitude do coeficiente angular, maior será a significância do respectivo fator. Consequentemente, maior será a variação que este imprime na média total do experimento, linha horizontal vermelha na Figura 19, quando o dado fator de controle é manipulado do nível “+1” para o nível “-1” e vice-versa.

Por fim, o gráfico da Figura 19 mostra, de uma forma simples, se os fatores são positivos ou negativos, o que está diretamente relacionado ao sinal dos respectivos coeficientes angulares, e isto tem implicação direta na forma como o valor médio da variável resposta varia, crescendo ou decrescendo, quando alterna-se do nível “-1” para o nível “+1”.

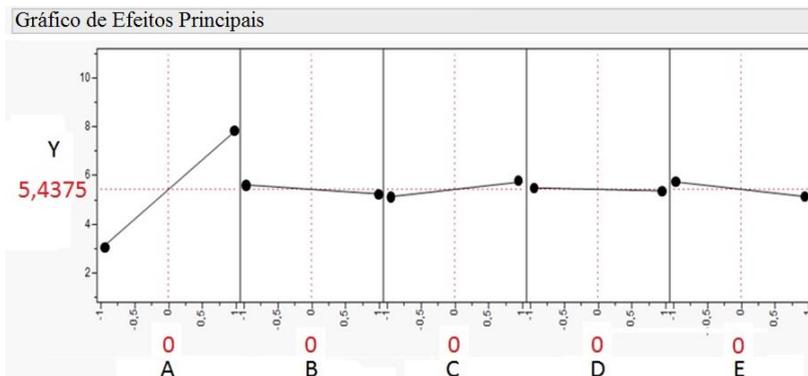


Figura 19 – Gráfico dos Efeitos Principais.

O gráfico de interações de efeitos, Figura 20, é construído na forma de uma matriz, na qual são representadas todas as interações simples possíveis entre os fatores do experimento.

A matriz sobre a qual as interações são visualmente dispostas contém, no eixo y, a faixa de variação dos valores da variável resposta Y, do valor mínimo ao valor máximo encontrado no experimento, e no eixo x os níveis de cada fator de controle. Assim, cada linha mostra como o valor da variável resposta irá se comportar com a manipulação dos níveis dos fatores dispostos nas colunas, quando o fator da linha se encontra no nível “+1”, linhas azuis, e no nível “-1”, linhas vermelhas.

Quando interações significativas entre fatores estão presentes no experimento, o efeito de um fator irá variar com a configuração, nível

“-1” ou nível “+1”, do outro. Isto pode ser visto facilmente na Figura 20, quando são visualizadas as linhas e colunas correspondentes às interações DE e AB, regiões evidenciadas em vermelho.

Por fim, este tipo de gráfico é de grande valia para a avaliação da robustez do projeto ou processo. Este permite determinar, em casos onde há uma interação expressiva entre dois fatores, qual deve ser a configuração do nível do primeiro fator que retorna a menor variação possível da variável resposta em função da modificação dos níveis do segundo fator [22].

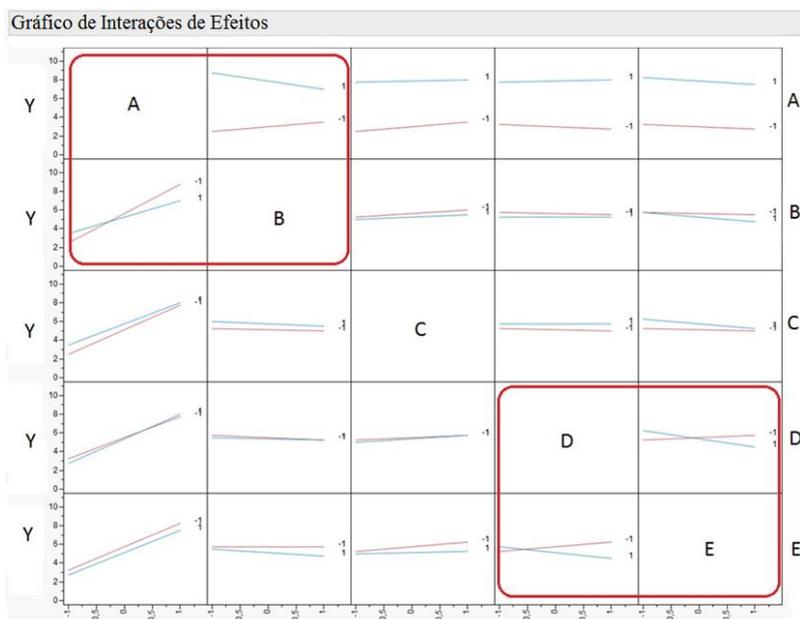


Figura 20 – Gráfico de Interação de Efeitos.

4. DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS SOB CONDIÇÕES CONTROLADAS

A técnica do furo cego para determinação de tensão residuais descrita pela norma ASTM E837, envolve uma série de procedimentos que podem influenciar nos resultados de tensão residual. Além disto, esta é constituída por formulações para materiais isotrópicos e utiliza constantes de calibração empíricas, as quais foram obtidas em estudos com materiais metálicos que são tipicamente isotrópicos.

Assim, objetiva-se estabelecer um método para aplicação dos extensômetros e um procedimento para execução dos testes, de modo a avaliar a capacidade da técnica do furo cego em fornecer resultados confiáveis de tensão residual ao longo da espessura em materiais poliméricos. Conforme apresentado anteriormente, estes materiais apresentam, dependendo do seu processo de fabricação, certo grau de anisotropia. Sendo assim, neste trabalho, se fez necessário à execução de um experimento sob condições controladas, ou seja, onde as tensões atuantes no corpo de prova são conhecidas.

Uma vez que a técnica de *hole-drilling* permite a avaliação de tensões não uniformes ao longo da espessura do material, os corpos de prova foram flexionados sobre um aparato de raio conhecido, estando assim sujeitos a um nível de tensão, que conhecidamente, varia linearmente ao longo da espessura.

Conforme pode ser verificado nas Equações 1 a 6, apresentadas no Capítulo 3, seção 3.2, para se correlacionar as deformações registradas nos extensômetros empregados no método do furo cego, o conhecimento de algumas propriedades mecânicas dos materiais, como o módulo de elasticidade, ou módulo de *Young*, e o coeficiente de Poisson são indispensáveis.

Além disto, a fim de se obter uma boa correlação de resultados virtuais e experimentais, as condições do material a ser caracterizado devem ser as mais próximas possíveis do material a ser testado.

4.1. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO

Como material para realização dos testes sob condições controladas, foi escolhido o poliestireno de alto impacto (PSAI) Innova R830D extrudado na espessura de 2,1mm +/- 0,1mm, uma vez que nesta forma este material permite a fácil fabricação de corpos de prova e suas propriedades mecânicas nas diferentes direções possuem menor variação do que termoplásticos injetados.

4.1.1. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O processo de confecção dos corpos de prova se iniciou pela transformação da matéria-prima, *pellets* de PSAI, em uma chapa 1000x600x2,1mm por meio de um processo de transformação de termoplásticos denominado de extrusão.

De posse da chapa do material a ser avaliado esta foi cortada em pedaços retangulares de 350x220mm de modo a caberem na estufa de secagem Nova Técnica NT514, Figura 21, e a orientação de laminação foi marcada em cada uma das novas peças.

A fim de reduzir a orientação molecular, a qual pode promover uma ortotropia nas propriedades mecânicas do material, e minimizar as tensões residuais decorrentes do processo de fabricação que influenciariam no processo de determinação das tensões residuais sob condições conhecidas, as amostras foram submetidas a um tratamento térmico.



Figura 21 – Estufa Nova Técnica NT514 (cortesia Lab. Físico Químico – Whirlpool).

No tratamento térmico as amostras foram inseridas na estufa a 80°C, juntamente com chapas metálicas e pequenos pesos, por 4 horas. Para evitar possível empenamento pelo alívio das tensões, as placas poliméricas foram dispostas entre chapas metálicas, formando uma pilha, a qual tinha como base e topo chapas metálicas. Por fim, quatro pesos de 500g foram colocados nos quatro cantos do topo da pilha, conforme ilustrado na Figura 22.



Figura 22 – Representação esquemática da disposição das amostras no tratamento térmico.

A partir das placas tratadas termicamente foram usinados corpos de prova segundo a norma ASTM D638 tipo I, demonstrado na Figura 23. A usinagem dos corpos de prova se deu conforme três orientações pré-definidas em relação à direção de laminação 0°, 45° e 90°, conforme indicado na Figura 24, a fim de se verificar eventual ortotropia do material.

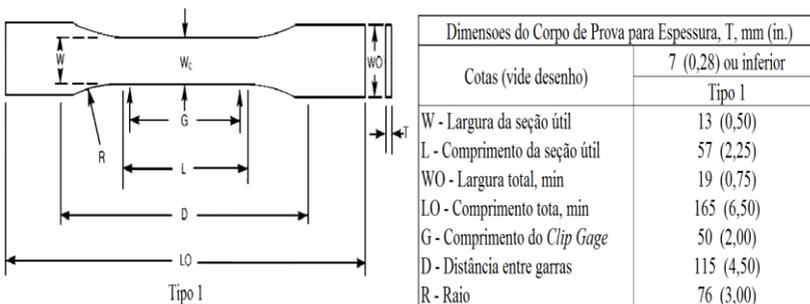


Figura 23 – Geometria e dimensões do corpo de prova ASTM D638 Tipo I.



Figura 24 – Representação esquemática da disposição dos corpos de prova em relação ao sentido de laminação.

Buscando uma forma simples para o controle dos corpos de prova, os mesmos foram identificados conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Tabela de Identificação dos Corpos de Prova

Características dos Corpos de Prova	Identificação
Orientação 0° (longitudinal)	L01 – L05
Orientação 90° (transversal)	T01 – T05
Orientação 45° (diagonal)	D01 – D05

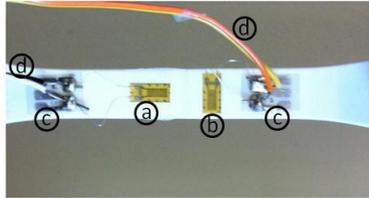
4.1.2. INSTRUMENTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Visando a correta determinação das propriedades mecânicas necessárias para a medição de tensões residuais, módulo de *Young* e coeficiente de Poisson, os corpos de prova, CPs, foram instrumentados com dois extensômetros cada.

Para aplicação dos extensômetros, a região central dos CPs foi lixada e limpa adequadamente, e com auxílio de fita adesiva e lentes de aumento, os extensômetros foram devidamente posicionados e alinhados, de acordo com a necessidade do experimento. Então, algumas gotas de cola, composta por éster de cianoacrilato, foram empregadas para garantir a correta adesão dos extensômetros à superfície dos corpos de prova, como pode ser visualizado na Figura 25.

Por fim, foram colados ao corpo de prova pequenos terminais de ligação, aos quais, utilizando um ferro de solda, foram soldados os

terminais dos extensômetros e os fios para conexão com o equipamento de aquisição de dados.



- (a) Extensômetro axial (c) Terminais de ligação
 (b) Extensômetro transversal (d) Fiação

Figura 25 – Corpo de prova instrumentado.

4.1.3. ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Por se tratar de um ensaio bastante prático e capaz de fornecer as informações de interesse do presente trabalho, tanto para a realização dos experimentos reais de tensão residuais, quanto para os experimentos virtuais, simulações, empregou-se o ensaio de tração uniaxial para determinação do módulo de *Young* e o coeficiente de *Poisson*.

Os ensaios foram executados nas dependências do GRANTE – Grupo de Análise e Projeto Mecânico, utilizando uma máquina universal de testes *Emic DL 3000*, Figura 26, e o sistema de aquisição de dados mostrado Figura 27.



Figura 26 – Máquina universal de testes *Emic DL 3000* (cortesia EMIC).



Figura 27 – Sistema de aquisição de dados HBM - Spider8 (cortesia GRANTE).

Com os extensômetros axial e transversal dos corpos de prova conectados ao Spider8, em canais diferenciados e na configuração de $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone, conforme representado esquemática da Figura 28, as amostras foram devidamente fixadas na máquina de teste e tracionadas a uma taxa de deslocamento prescrito de 5mm/mm até a sua ruptura, como é possível verificar na Figura 29. Para minimizar efeitos de temperatura, os experimentos foram conduzidos em ambiente com temperatura controlada.

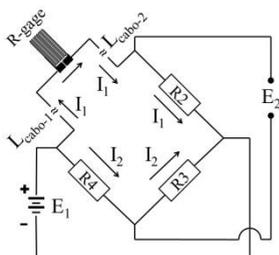


Figura 28 – Representação da configuração do extensômetro em $\frac{1}{4}$ de ponte.



Figura 29 – Corpo de prova ao final do ensaio.

Após os ensaios das amostras L01-L05 e T01-T05, os dados foram tratados dando origem à Figura 30 e à Figura 31, nas quais é demonstrado o método para obtenção da constante elástica do material, Módulo de *Young*, e o coeficiente de *Poisson*, mediante avaliação do coeficiente angular das curvas.

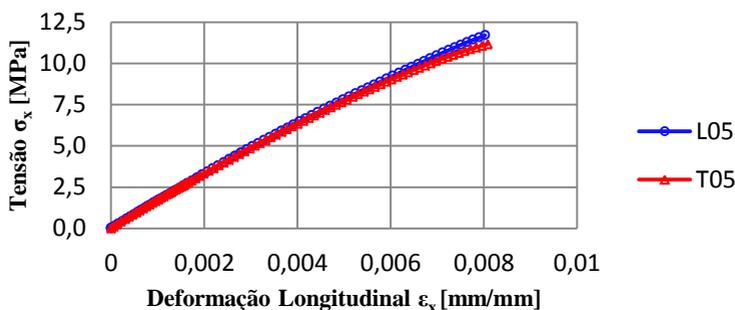


Figura 30 – Curva tensão x deformação para determinação de E_1 e E_2 .

Sendo que o subíndice x representa o eixo que define a direção de aplicação da carga, e o subíndice y representa o eixo que define a direção ortogonal a x, ambos contidos no plano de medição das deformações dos corpos de prova.

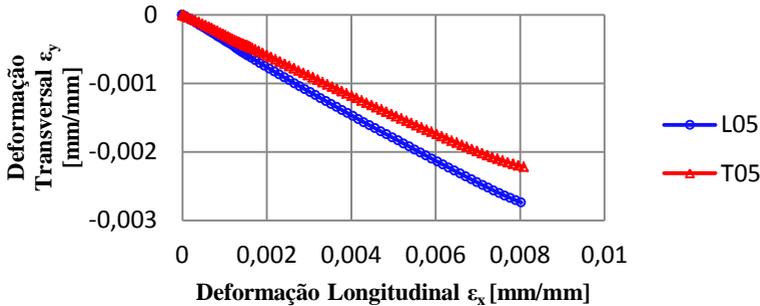


Figura 31 – Curva deformação longitudinal x deformação transversal para determinação de ν_{12} e ν_{21} .

Com base nas pequenas diferenças dos valores de propriedades mecânicas verificadas entre as amostras de 0° e 90° em relação ao sentido de extrusão do material, além do equacionamento de tensões residuais não considerar a ortotropia dos materiais, optou-se por não executar os testes dos corpos de prova D01 – D05 e adotou-se como valores para o módulo de *Young* e para o coeficiente de *Poisson* a média dos valores do corpos de prova L01-05 e T01-05, conforme pode ser visto na Tabela 5 e cuja distribuição pode ser verificada na Figura 32.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas médias do PSAI Innova R830D.

Módulo de <i>Young</i> E [MPa]	Coefficiente de <i>Poisson</i> ν
1507,7	0,317

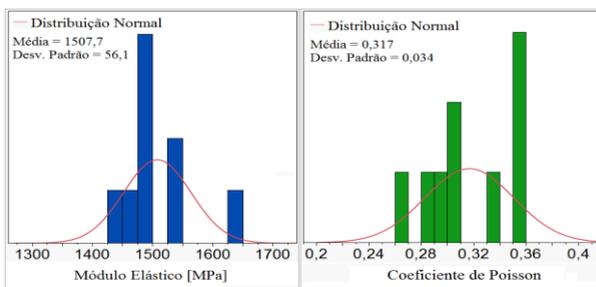


Figura 32 – Gráficos mostrando distribuição normal para os valores do módulo de *Young* e do coeficiente de *Poisson*.

4.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EXPERIMENTO DE TENSÃO RESIDUAL

O modelo de elementos finitos, Figura 33, implementado em software comercial, replica virtualmente as condições de contorno empregadas na execução do procedimento experimental para determinação de tensões residuais sob condições controladas.

Na simulação, assim como no experimento, os corpos de prova retangulares são flexionados sobre o aparato de teste de aço com raio conhecido de 170mm, o qual foi considerado na simulação como um corpo rígido, indeformável, uma vez que sua rigidez é muito superior a da amostra. Já o corpo de prova, com a posição da roseta, foi modelado com elementos hexaédricos lineares, como pode ser visto na Figura 34, e as propriedades mecânicas empregadas no modelo são as presentes na Tabela 5.

O objetivo do presente modelo é fornecer valores de tensões e deformações para comparação com os valores experimentais encontrados, além de avaliar se o procedimento experimental empregado para determinação de tensão residual é capaz de fornecer valores confiáveis.



Figura 33 – Corpo de prova apoiado no equipamento de teste (Instante inicial).

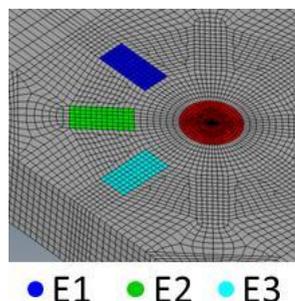


Figura 34 – Modelamento do CP em elementos hexaédricos, com destaque da posição dos extensômetros.

Durante a execução do procedimento experimental, o corpo de prova será flexionado, com a roseta disposta na sua região central,

apresentando assim, níveis e gradientes de tensão conforme pode ser visto na Figura 35 e na Figura 36.

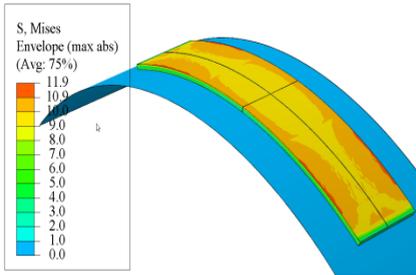


Figura 35 – Corpo de prova flexionado sobre o equipamento de teste.

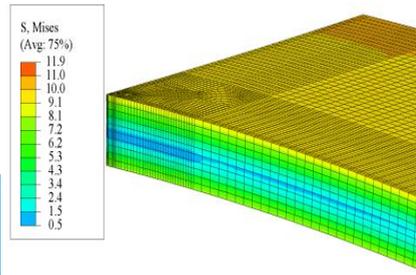


Figura 36 – Gradiente de tensões ao longo da espessura do CP, quando flexionado sobre o equipamento de teste.

Após o corpo ser flexionado, o equipamento de furo cego será posicionado de modo a executar um furo de 1,5mm de diâmetro no centro da roseta, região vermelha na Figura 34, com avanços incrementais de 0,2mm, conforme demonstrado pelas camadas coloridas na Figura 37, até atingir a profundidade de 1,4mm,

Ao executar-se a furação, as tensões internas presentes na porção de material removido são aliviadas, promovendo assim deformações que são registradas pelos extensômetros das rosetas conforme Figura 38.

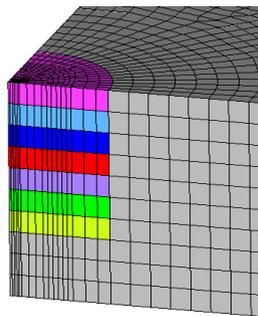


Figura 37 – Seção da amostra mostrando os avanços incrementais de furação de 0,2mm, representados pelas camadas coloridas, até a profundidade de 1,4mm, camada amarela.

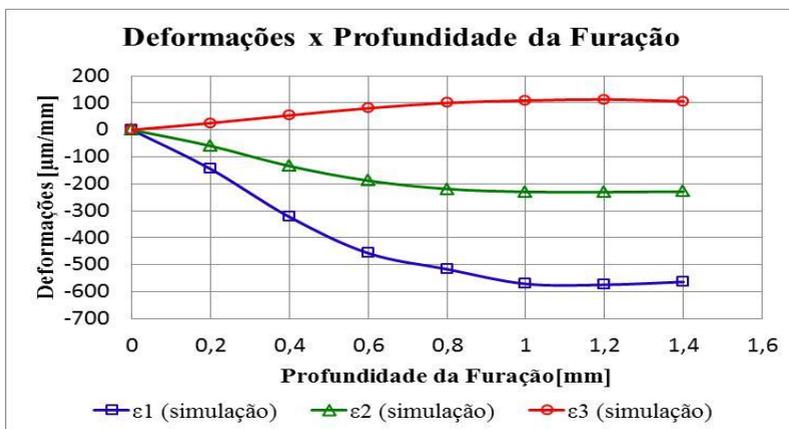


Figura 38 – Diferença de deformações dos três extensômetros da roseta obtidas pela simulação numérica do processo de alívio de tensões a cada incremento de furação.

Uma vez obtidas às deformações decorrentes dos incrementos de furação, por meio da simulação de elementos finitos, Tabela 6, estes valores foram empregados em um *software* comercial para que as tensões residuais fossem calculadas de acordo com a ASTM E837 para tensões não uniformes.

O *software* Eval, no qual as deformações do modelo virtual foram empregadas como dados de entrada, utiliza o equacionamento descrito do Capítulo 3, seção 3.3 e as informações dos Anexos A e B, para calcular as tensões residuais equivalentes de von Mises, demonstrado na Figura 39, e as tensões Máxima Principal, evidenciadas na Figura 40, ao longo da espessura da amostra.

Tabela 6 – Deformações decorrentes dos incrementos furação para os três extensômetros do modelo de elementos finitos.

Avanço da Furação [mm]	ϵ_1 Teórico [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	ϵ_2 Teórico [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	ϵ_3 Teórico [$\mu\text{m}/\text{mm}$]
0	0,00	0,00	0,00
0,2	-145,05	-59,57	25,21
0,4	-323,09	-134,40	53,83
0,6	-457,71	-188,64	80,29
0,8	-517,13	-219,35	100,26
1	-571,70	-230,26	108,84
1,2	-575,11	-231,10	113,02
1,4	-564,28	-229,28	105,84

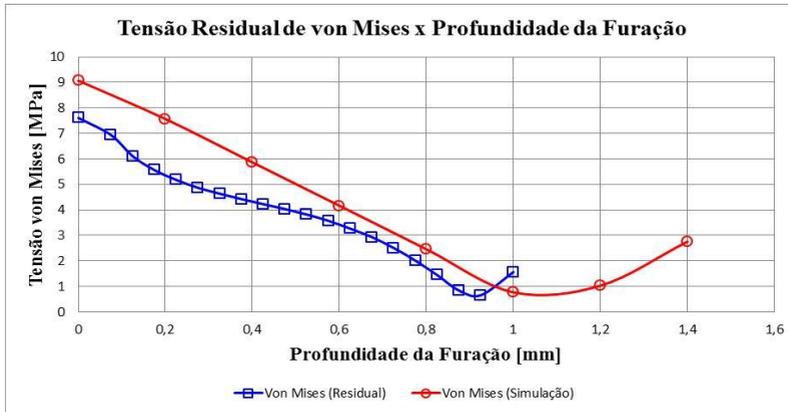


Figura 39 – Gráfico comparando as tensões equivalentes de *von Mises* obtidas diretamente modelo de simulação com as obtidas por meio emprego das deformações no *software Eval*.

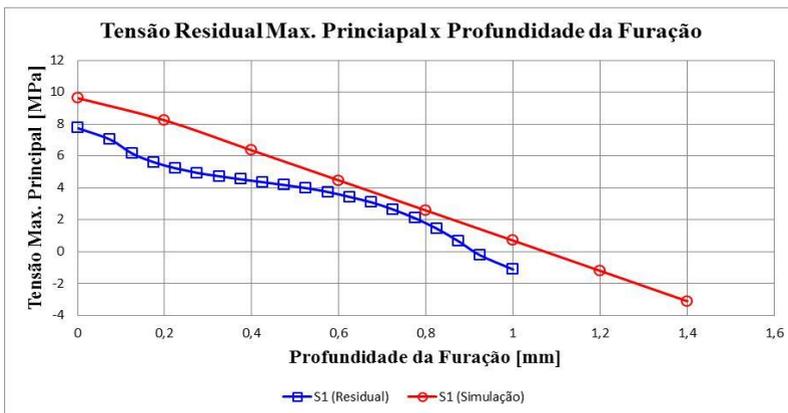


Figura 40 – Gráfico comparando as tensões Max. Principal obtidas diretamente modelo de simulação com as obtidas por meio emprego das deformações no *software Eval*.

Avaliando os gráficos presentes nas Figura 39 e Figura 40, é possível notar que a curva azul, obtida por meio do emprego das deformações registradas no modelo de simulação numérica no *software* comercial de cálculo de tensões residuais Eval, que acompanha o equipamento de furo cego, retorna valores levemente distintos dos valores da tensão equivalente de *von Mises* retirados diretamente do

modelo de elementos finitos. Contudo, esta apresenta uma tendência bastante semelhante à verificada na curva vermelha.

Além disto, verifica-se que a curva azul está representada somente até a profundidade 1,0mm. Este fato que se deve a programação do software Eval que utilizada como limite máximo de profundidade 40% do raio da roseta, vide Figura 11. Enquanto que, a norma de determinação de tensões residuais ASTM E837-08 estabelece como profundidade máxima, para peças finas, 40% do diâmetro da roseta, o qual é de 5,1mm.

4.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS

Para procedimento experimental de tensões residuais quatro corpos de prova nas dimensões 220x30x2,0mm foram confeccionados passando pelo mesmo processo de tratamento de alívio de tensões internas descritos no Capítulo 4, seção 4.1.1.

Posteriormente, também como explicado na seção 0, as amostras foram instrumentadas, cada uma com uma roseta colada no seu centro. O extensômetro E1 foi devidamente posicionado longitudinalmente à peça, tendo por consequência que os extensômetros E2 e E3 ficaram, respectivamente, posicionados a 45° e a 90° em relação ao eixo longitudinal como pode ser visto na Figura 41.

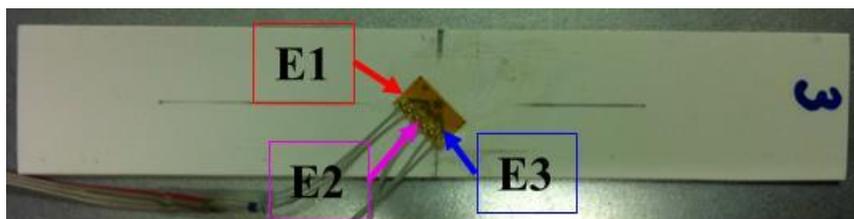


Figura 41 – Amostra para procedimento experimental de tensões residuais instrumentada com roseta, Tipo B, para teste.

Para induzir um nível de tensões conhecido no corpo de prova, contudo não constante ao longo da espessura, empregou se um a parato

de alumínio com raio 170mm, sobre o qual os corpos de prova foram flexionados, conforme é mostrado na Figura 42 e Figura 43.



Figura 42 – Aparato para flexão e fixação das amostras.



Figura 43 – Amostra 2 (*dummy*) flexionada sobre o aparato.

Por fim, o equipamento de *hole-drilling* Restan MTS-3000 foi posicionado e o procedimento de furação se seguiu com avanços incrementais de 0,2mm, com intervalos de 30s cada, para a aquisição das deformações desenvolvidas, até atingir a profundidade de 1,4mm, vide Figura 44.

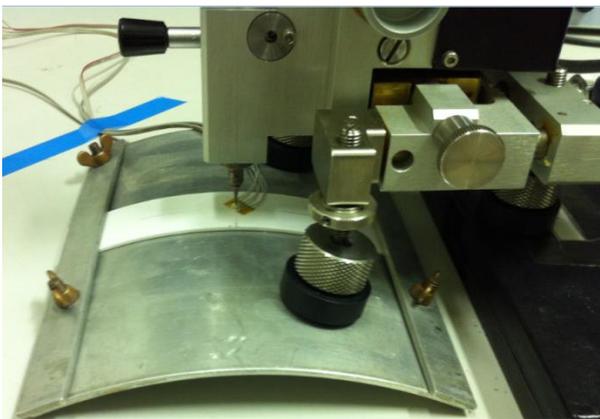


Figura 44 – Equipamento de furo sego executando furação na amostra.

As deformações decorrentes do alívio das tensões registradas pelos extensômetros da roseta foram aquisitadas pelo sistema de

aquisição de sinais HBM-Plus, e seus valores se encontram, comparados com os simulados, nas Figura 45 à Figura 47.

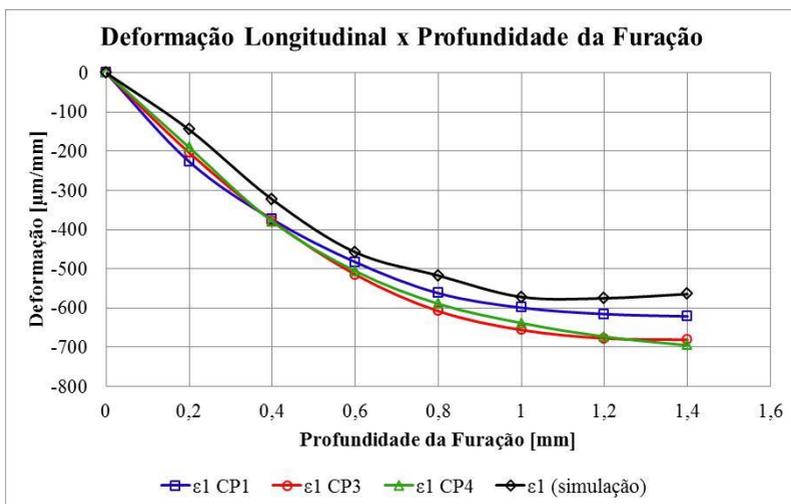


Figura 45 – Diferença de deformação longitudinal das 3 amostras comparadas com as deformações simuladas.

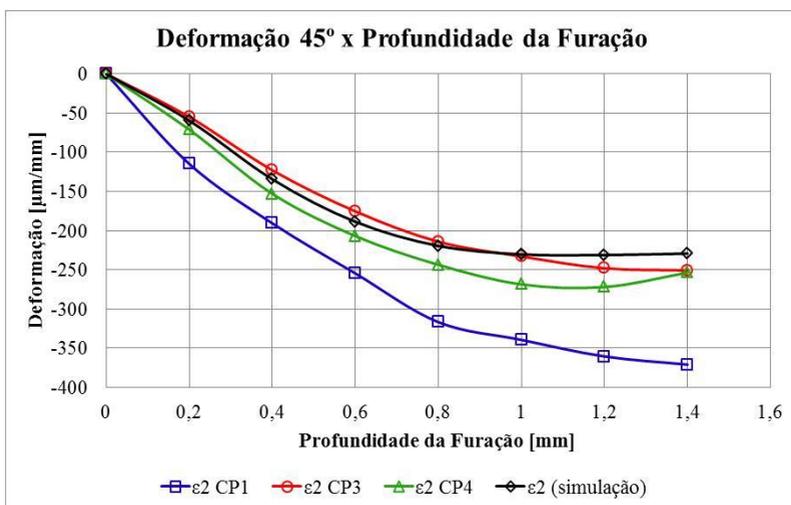


Figura 46 – Diferença de deformação 45° das 3 amostras comparadas com as deformações simuladas

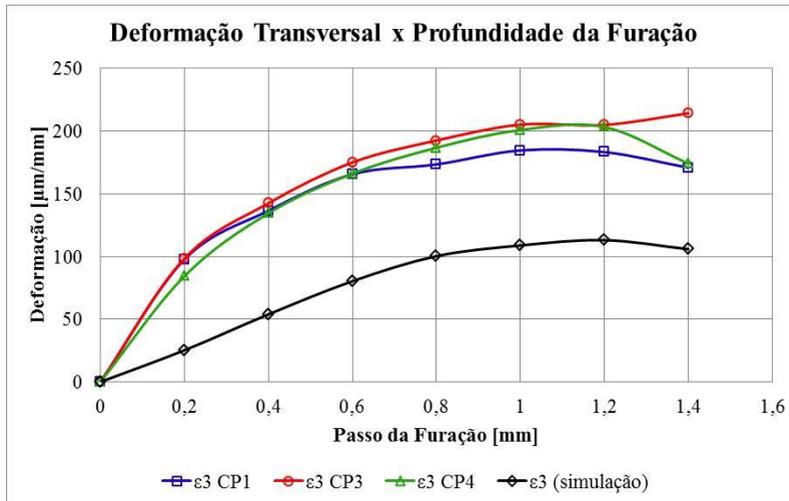


Figura 47 – Diferença de deformação transversal das 3 amostras comparadas com as deformações simuladas.

Avaliando as figuras acima, verifica-se uma boa correlação teórico-experimental para as deformações longitudinais e 45° , já no gráfico das deformações transversais embora o comportamento das curvas sejam os mesmos, a curva teórica encontrada está deslocada dos valores experimentais. Este fato pode estar relacionado com desalinhamentos, angulares ou translacionais, ocorridos no posicionamento da amostra no aparato de flexão, o que pode ter induzido deformações transversais maiores que as esperadas. Além disto, pode ter ocorrido uma pequena plastificação das amostras durante os incrementos de furação, a qual não foi considerada no modelo de simulação numérica.

Para a conversão dos valores experimentais de deformação, além de entrar com estes valores de deformação em software comercial ou empregá-los ao equacionamento apresentado no Capítulo 3, seção 3.3, é necessário verificar se houve pequenas excentricidades da furação em relação ao centro da roseta, para que esta possa ser corrigida. Na prática, isto é feito acomplando-se uma lente de aumento ao equipamento de furo cego, e com o auxílio dos relógios comparadores, que foram zerados com a broca no centro da roseta, medir a posição do centro do

furo. Vide Figura 48 e Figura 49 que demonstram o procedimento descrito acima.



Figura 48 – Equipamento de furo cego montado com lente de aumento dotada de marcação para determinação do centro do furo.

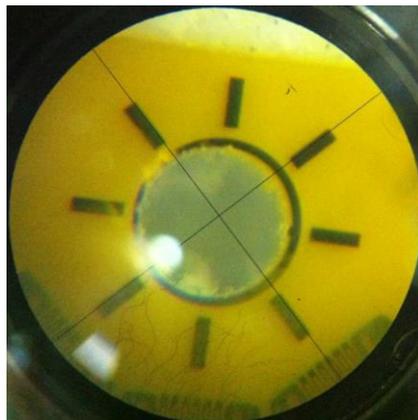


Figura 49 – Imagem através da lente de aumento visualizando a centralização do furo executado na amostra.

Empregando os valores das deformações e das excentricidades dos furos no software Eval, que acompanha o equipamento de furo cego, foi obtido o nível de tensão residual presente nas amostras, os quais se encontram comparados com os valores teóricos, na Figura 50 e na Figura 51.

Avaliando os gráficos das Figura 50 e da Figura 51, verifica-se uma boa correlação teórico-experimental, sendo que para profundidades de furo superiores à 0,6mm, os pontos das curvas experimentais são mais próximos dos valores teóricos. Para valores inferiores o maior distanciamento desses valores pode estar relacionado a dois fatores: a) a dificuldade de estabelecer a profundidade zero no equipamento, momento em que o broca toca a superfície da amostra, e b) o tamanho do avanço de furação foi demasiado para uma região com elevado gradiente de tensão.

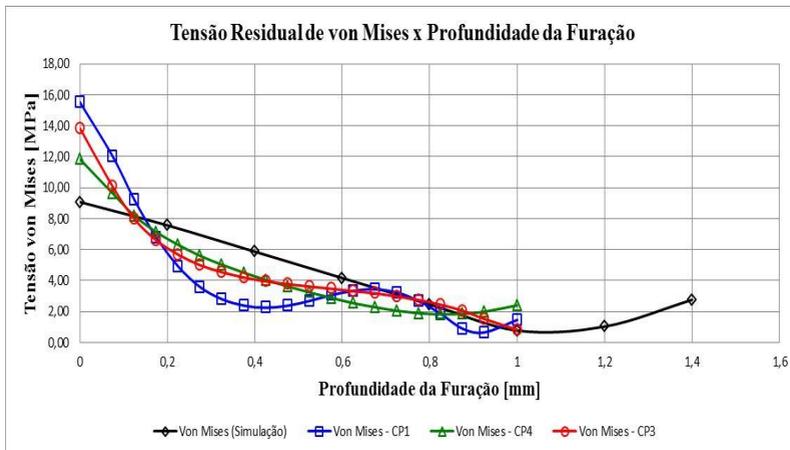


Figura 50 – Comparativo entre valores tensão residual equivalente de *von Mises* obtidos experimentalmente, com os valores tensão equivalente de *von Mises* retirados diretamente do modelo de elementos finitos.

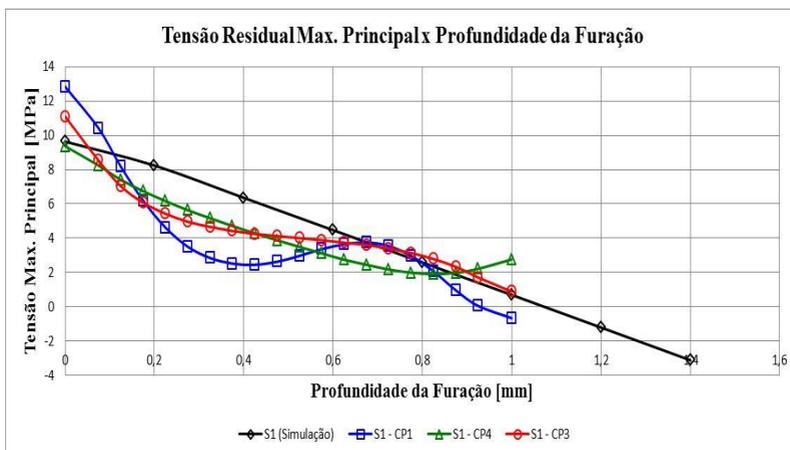


Figura 51 – Comparativo entre valores tensão residual Max. Principal obtidos experimentalmente, com os valores tensão Max. Principal retirados diretamente do modelo de elementos finitos.

Embora existam pequenas diferenças entre o resultado teórico e o resultado experimental, julga-se que o procedimento estabelecido para instrumentação dos corpos de prova, bem como o processo de execução do furo sego para determinação das tensões residuais é robusto e capaz de fornecer resultados confiáveis mesmo em materiais poliméricos.

5. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO NA TENSÃO RESIDUAL E COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPONENTE PLÁSTICO

Para avaliar a influência dos parâmetros de injeção na tensão residual e no desempenho mecânico de componentes plásticos, se estabeleceu, por meio da técnica de DOE, um conjunto de experimentos, nos quais alguns parâmetros do processo de injeção são sistematicamente modificados de modo a gerar alterações nas tensões internas das amostras. Estas tensões residuais são, então, determinadas pelo método do furo cego e posteriormente comparadas com os valores de tensão residual obtidos por meio da simulação do processo de injeção.

Como estudo de caso foi empregado o componente denominado Prateleira Congelador, Figura 52. Esta peça foi escolhida, pois irá auxiliar no desenvolvimento de uma nova prateleira congelador com formas semelhantes.



Figura 52 – Imagem do componente Prateleira Congelador.

A peça em questão é manufaturada pelo processo de injeção em poliestireno cristal – GPPS *Styron688G*, cujas propriedades mecânicas podem ser visualizadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do Styron 688G.

Módulo de <i>Young</i> E [MPa]	Coefficiente de <i>Poisson</i> ν
3168,3	0,367

5.1. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO E OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

Com o auxílio do especialista de injeção de materiais termoplásticos da companhia foram selecionados, dos parâmetros apresentados no capítulo 3.2 que podem influenciar na injeção, cinco fatores que poderiam influenciar nas tensões residuais do componente, os quais se encontram listados abaixo:

- **Velocidade de avanço do fuso ou perfil de injeção:** quanto maior for seu valor, maior será a velocidade de escoamento do material pela cavidade, conseqüentemente, maior a taxa de cisalhamento, favorecendo a dissipação viscosa, o que modifica a temperatura da massa;

- **Pressão recalque ou perfil de recalque:** o recalque regula a pressão no interior da cavidade;

- **Temperatura do cilindro de aquecimento ou temperatura de plastificação:** regula a temperatura de massa, o que também altera a viscosidade da massa, vide Figura 53.

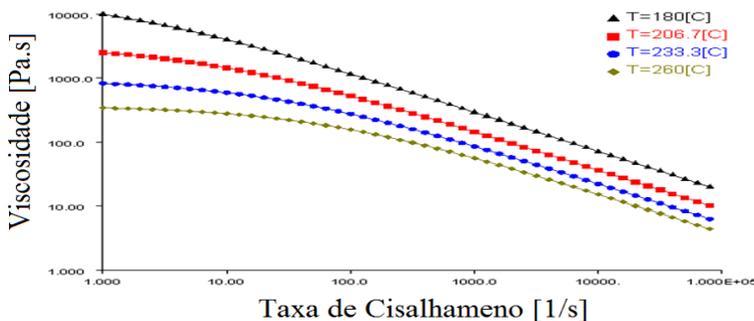


Figura 53 – Viscosidade do material em função da taxa de cisalhamento para diferentes temperaturas de processamento, cortesia Autodesk Simulation Moldflow.

• **Temperatura do fluido de resfriamento do molde ou temperatura do molde:** ajusta a temperatura das paredes da cavidade do molde, influenciando a taxa de resfriamento do termoplástico no interior da cavidade, além de afetar a espessura da camada congelada;

• **Tempo de Recalque:** define o período que a pressão de recalque ficará atuando sobre o material no interior da cavidade. Este fator, associado a pressão de recalque, garante que não exista contra fluxo de material da cavidade para o fuso.

Este cinco fatores arranjados utilizando a técnica de DOE de modo a promover um experimento $2_{V}^{5-1} = 16$ tratamentos, conforme pode ser verificado na matriz experimental, Figura 54.

Máquina	1															
Temperatura da Massa	+1								-1							
Perfil de Velocidade do Fuso	+1				-1				+1				-1			
Perfil de Recalque	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
Tempo de Recalque p/ Patamar	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
Temperatura do Molde	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1

Figura 54 – Matriz do experimento $2_{V}^{5-1} = 16$, representada na forma de árvore de amostragem.

Avaliando esta proposição de experimento com o técnico de processo, responsável pela operação da injetora, uma modificação se fez necessária devido à inexistência de controlador de temperatura da água de refrigeração, desta forma impossibilitando o controle da temperatura do molde. Devido a este imprevisto, o experimento teve de ser replanejado ficando assim, um DOE $2_{Full}^{4-0} = 16$ conforme a matriz experimental representada na Tabela 8.

Tabela 8 – Matriz experimental do DOE realizado.

Amostras	Tratamentos	Pattern	A - Temperatura Plásticação	B - Perfil de Injeção	C - Perfil de Recalque	D - Tempo de Recalque por Patamar
9	1	+---	255	1	-1	0,5
10	2	++++	255	-1	1	3
1	3	----+	235	1	-1	3
2	4	--+-	235	1	1	0,5
11	5	+++	255	-1	-1	3
3	6	----+	235	-1	1	3
12	7	++++	255	1	1	3
4	8	---+	235	-1	1	0,5
5	9	+---	235	-1	-1	0,5
6	10	--+-	235	1	1	3
7	11	+++	235	-1	-1	3
13	12	++++	255	-1	1	0,5
14	13	+---	255	-1	-1	0,5
15	14	----+	255	1	-1	3
8	15	----+	235	1	-1	0,5
16	16	+---	255	1	1	0,5

Na Tabela 8 é possível observar os níveis dos fatores A e D e os índices “+1” e “-1” dos fatores B e C que são demonstrados nas Figura 55 e Figura 56, respectivamente.

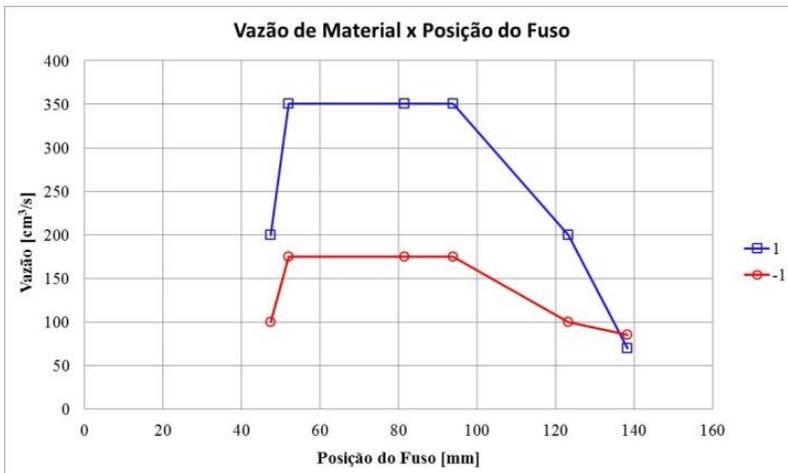


Figura 55 – Níveis “+1” e “-1” do perfil de injeção.

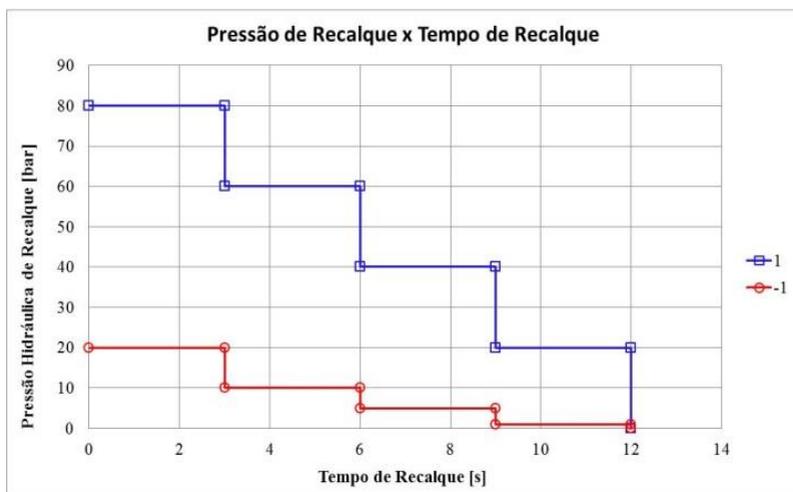


Figura 56 – Níveis “+1” e “-1” do perfil de recalque, representado para tempo de recalque 3s.

A manufatura dos componentes se procedeu na sequencia indicada na coluna Amostras da Tabela 8 em uma máquina Romi 600R com controlador Controlmaster 8, Figura 57, no qual os parâmetros de injeção especificados para cada tratamento foram configurados. Duas amostras de cada tratamento foram coletadas, após o segundo ciclo de injeção ter sido completado, assim garantindo que as alterações implementadas no painel de controle estivessem em vigor.

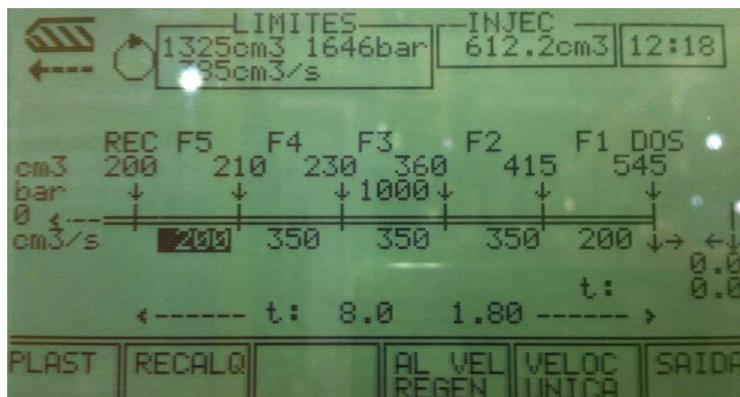


Figura 57 – Painel de Controlmaster 8, na tela de configuração do perfil de injeção.

O perfil de injeção informado no painel de controle da injetora, Figura 57, se dá por meio de uma relação entre vazão e volume de material no interior do fusão. Já na Figura 55, esta relação, por meio de uma conversão que leva em conta diâmetro do fusão da injetora, 75mm, é explicitada como vazão em função da posição do fusão. Isto se faz necessário para que os dados possam ser empregados no software de simulação de injeção.

5.2. DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Para determinação das tensões residuais empregou-se o método estabelecido no Capítulo 4, seção 4.3. As amostras foram devidamente preparadas e as rosetas do tipo B modelo K-RY61-1.5/120R da HBM, cujos *gages factor* se encontram na Tabela 9 e a correlação destes com a roseta pode ser vista na Figura 58.

Tabela 9 – *Gage Factor* para os três extensômetros da roseta.

Extensômetro	<i>Gage Factor</i>
E1	1,87
E2	1,89
E3	1,87

O posicionamento da roseta, Figura 59, foi definido de modo a evitar que o equipamento de furo cego fosse posicionado sobre a peça, o o que poderia influenciar nos resultados, uma vez que o peso do aparato iria promover tensões na peça devido a este esforço externo.

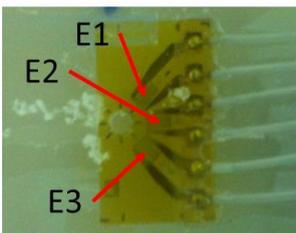


Figura 58 – Especificação dos extensômetros para correlação com Tabela 9.

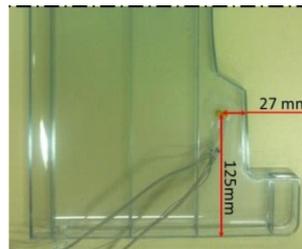


Figura 59 – Posição da roseta na peça.

Após o equipamento de *hole-drilling* Restan MTS-3000 ser posicionado, o procedimento de furação se seguiu com avanços incrementais de 0,2mm, com intervalos de 30s cada, para a aquisição das deformações desenvolvidas, até atingir a profundidade de 1,0mm, conforme demonstrado na Figura 60.

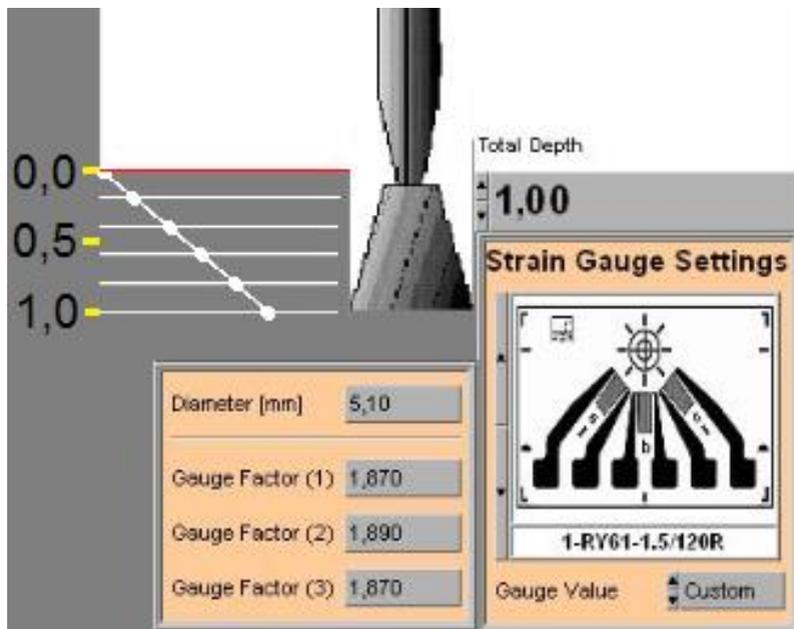


Figura 60 – Tela de configuração do experimento no *software* RSM.

A obtenção das deformações registradas pelos *strain gages* da roseta efetuou-se por meio do equipamento HBM-Plus, sendo que para a configuração do circuito elétrico dos extensômetros empregou-se $\frac{1}{4}$ de ponte de Wheatstone alimentada com 1,25V, assim como no experimento do Capítulo 4, seção 4.3. A Figura 61, mostra a tela de configuração do extensômetro 2 da roseta, indicando o *gage factor* e a tensão de alimentação da ponte de Wheatstone.

Figura 61 – Tela de configuração dos extensômetro no *software* de aquisição de dados.

A tensão de alimentação dos extensômetros de 1,25V utilizada, visou minimizar o efeito *Joule* proporcionado pelos extensômetros, uma vez que o emprego de 2,5V leva ao aquecimento da peça e comprometimento dos resultados.

As deformações obtidas durante os testes foram processadas pelo software Eval, que acompanha o equipamento do furo cego, gerando como saída os níveis de tensão residual dos componentes. As tensões residuais em função da profundidade do furo das amostras 1 a 8 podem ser visualizadas na Figura 62.

Avaliando as curvas apresentadas no gráfico da Figura 62, é possível visualizar uma grande variação dos níveis de tensão residual na superfície das amostras. Isto está relacionado com as maiores taxa de cisalhamento e gradientes térmicos encontrados nestas regiões, além da presença de diferentes estruturas morfológicas, conforme ilustrado na Figura 6.

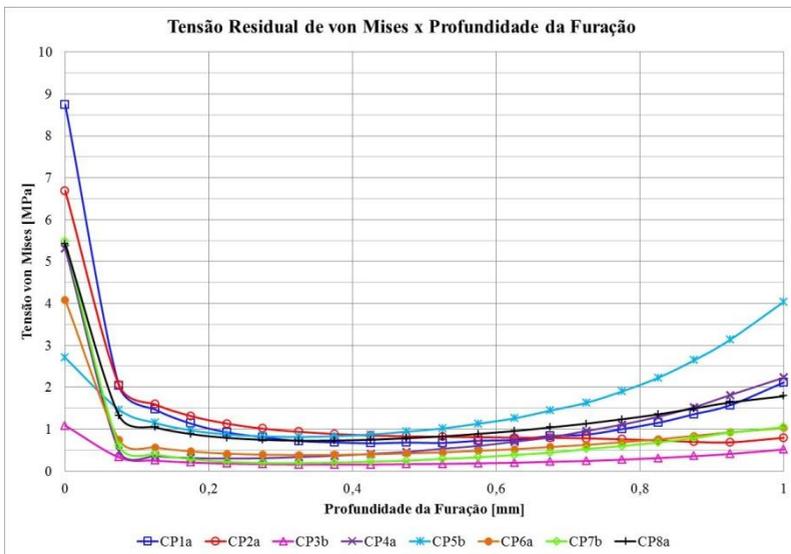


Figura 62 – Tensão residual equivalente de *von Mises* de oito amostras.

5.3.SIMULAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Em projetos de desenvolvimento de componentes plásticos injetados, na grande maioria das vezes, testes físicos com protótipos não são representativos, devido diferenças de materiais, processos de manufatura, entre outros. Em razão disto, se recorre às ferramentas computacionais para prever seu desempenho, desta forma reduzindo tempo e custo de desenvolvimento do produto. Contudo, antes de se fazer uso indiscriminado destas ferramentas é necessário verificar seus resultados se refletem nas peças física finais.

Pensando nisto, os mesmos tratamentos realizados fisicamente foram simulados em um software de simulação de injeção, Autodesk Moldflow.

O modelo de elementos finitos ou também chamado de modelo virtual, Figura 63, contempla a prateleira modelada em casca média com suas respectivas propriedades de espessura, canais e bicos de injeção e circuitos de refrigeração, além de levar em conta todos os parâmetros de injeção descritos no Capítulo 5, seção 5.1.

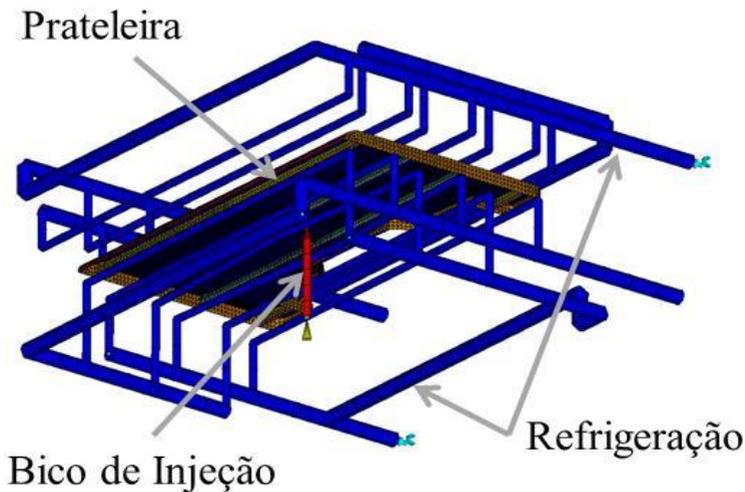


Figura 63 – Modelo de elementos finitos para simulação de injeção.

Como respostas do modelo injeção em elementos finitos, tem-se diversos parâmetros que podem auxiliar, tanto o desenvolvimento do componente, como a manufatura do mesmo. Contudo, no presente trabalho se está interessado no gradiente de tensões residuais decorrentes do processo de manufatura do componente, como pode ser visto Figura 64 e Apêndice B.

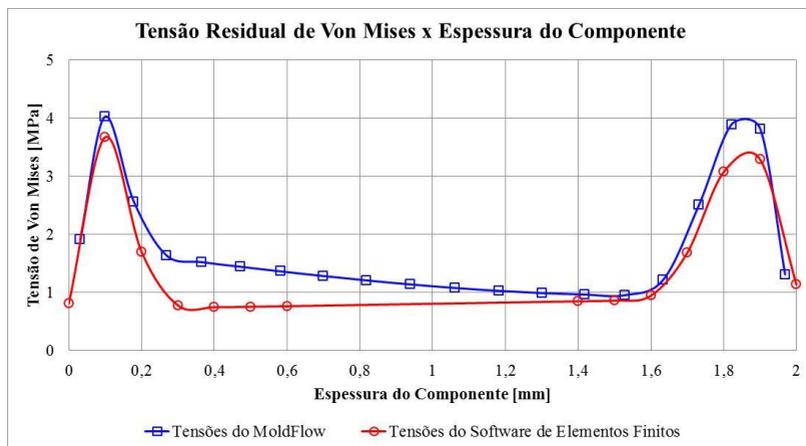


Figura 64 – Distribuição de tensão residual equivalente de *von Mises* ao longo da espessura do elemento 7939 da amostra 1.

A Figura 64 mostra duas curvas, a azul proveniente do Moldflow, e a vermelha que é o resultado da importação dos dados da simulação do Moldflow em um software comercial de simulação estrutural. As pequenas diferenças registradas são provenientes do processo de conversão dos dados de um software para outro, o que é realizado por meio de um algoritmo fechado.

Ao empregar-se as tensões residuais no modelo de simulação estrutural, como condições iniciais, estas irão interagir de forma benéfica ou maléfica com as tensões decorrentes dos carregamentos externos.

A Figura 65 e a Figura 66 permitem visualizar o efeito das tensões residuais em componente plástico quando associadas às tensões decorrentes do carregamento. Nestas imagens é possível verificar que para um mesmo carregamento, existe uma diferença nos níveis de tensão

equivalente de *von Mises* de 4 MPa, diferença esta decorrente das tensões residuais.

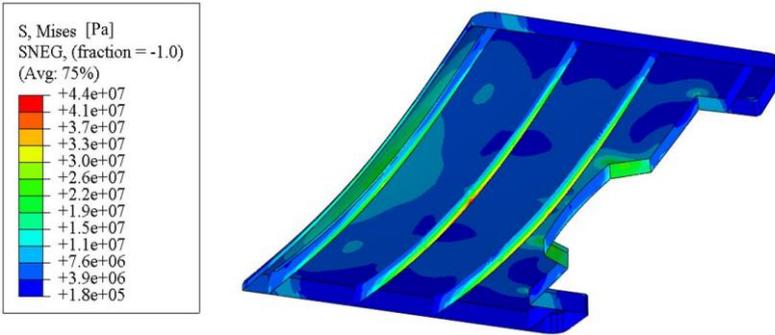


Figura 65 – Distribuição de tensão equivalente de *von Mises* presente na prateleira devido ao carregamento externo, sem condição inicial de tensão residual.

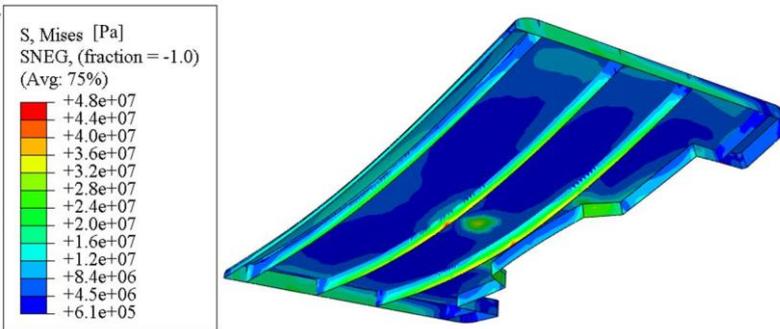


Figura 66 – Distribuição de tensão equivalente de *von Mises* presente na prateleira devido ao carregamento externo, considerando condição inicial de tensão residual.

Na Figura 67 que mostra comparação entre as amostras 1 e 6 com as amostras 15 e 12, as quais se diferenciam somente pela temperatura de plastificação, é possível observar apenas pequenas diferenças nos valores de tensão residual ao longo da espessura. Este fato, que também se repete para as demais amostras, mostra um forte indício de que o fator temperatura de plastificação pouco influenciará nos valores tensões residuais.

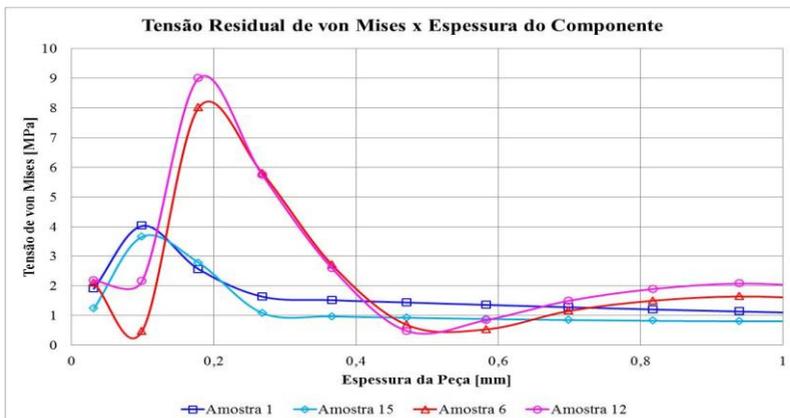


Figura 67 – Gráfico comparativo dos níveis tensões residuais das amostras 1 e 6 com as amostras 15 e 12, que diferem entre si somente pela temperatura de plastificação.

A característica predominante das curvas presentes na Figura 67, provenientes das simulações de elementos finitos, é a presença de tensões residuais com magnitudes reduzidas, em uma pequena faixa de espessura próxima a superfície, que se elevam atingido seu ápice em espessuras entre 0,1 e 0,2mm, e à medida que se segue para o núcleo da peça, descrecem adquirindo magnitudes semelhantes às verificadas na superfície.

A forma característica das curvas do gráfico da Figura 67 se mostram muito mais adequada às teorias de processo de injeção, elucidadas na seção 3.2 do Capítulo 3, do que as curvas de tensão residual experimental presentes no gráfico da Figura 62.

As teorias demonstram que durante o preenchimento da cavidade, a camada congelada, região próxima às paredes do molde, apresenta tensões de cisalhamento semelhantes ao núcleo e bastante inferiores a da região de transição. Pode-se então inferir que os maiores níveis de tensão residual coincidem com a camada de transição, onde também são encontrados as maiores taxas de cisalhamento durante a injeção, conforme indicado na Figura 6.

5.4. CORRELAÇÃO VIRTUAL EXPERIMENTAL

Comparando os níveis de tensões residuais obtidos experimentalmente com os obtidos pelas simulações numéricas, verifica-se um ponto importante com relação aos experimentos.

Este ponto é relacionado à Figura 68, a qual apresenta curvas com os níveis de tensões residuais virtual provenientes do *software* Moldflow, com os níveis registrados no experimento para a amostra 1, e se aplica a todas das amostras.

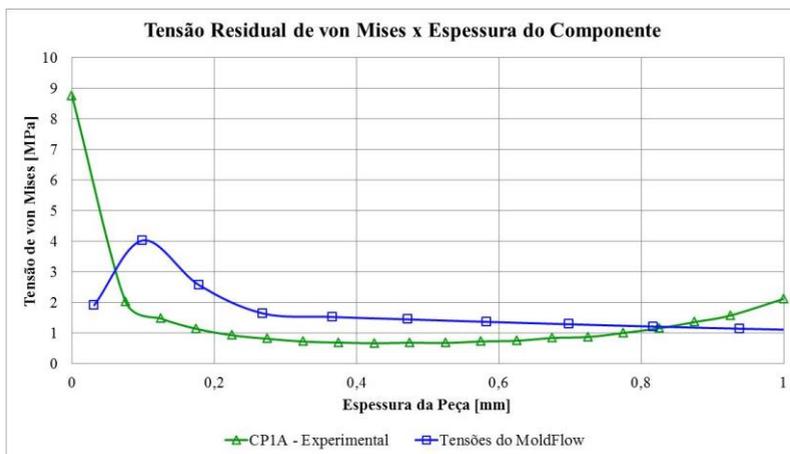


Figura 68 – Comparação dos níveis das tensões residuais virtuais e experimental para a Amostra 1.

Avaliando detalhadamente a curva verde, observa-se que ela se ajusta bem as curvas virtuais para grandes profundidades, acima de 0,3mm, onde as tensões apresentam pouca variação. Contudo, para regiões mais próximas à superfície, onde há um gradiente de tensões residuais mais elevado, a curva experimental se descola das curvas virtuais.

Este fato descrito acima, está diretamente relacionado aos incrementos de furação empregados no experimento. Uma vez que empregou-se incrementos de furação constantes e iguais à 0,2mm, o primeiro avanço da fresa foi da superfície até a profundidade de 0,2mm.

Assim as variações presentes dentro deste intervalo não são captadas pelo equipamento de medição.

Além disto, o software Eval, o qual realiza o cálculo das tensões residuais a partir das deformações lidas pelos extensômetros, emprega polinômios interpoladores para fornecer um maior número de resultados de tensões residuais ao longo da espessura. Associando isso à falta de discretização na região onde existe um gradiente severo de tensões, faz com que os polinômios não se ajustem corretamente.

Este problema não foi muito evidenciado no experimento com condições controladas, descrito na seção 4.3 do capítulo 4, pois o gradiente de tensões residuais presentes foi praticamente linear ao longo da espessura.

5.5. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO EXPERIMENTO

Avaliando estatisticamente os resultados de tensão residual virtual, cujos dados se encontram no Apêndia C, verificou-se que a temperatura de plastificação não é um fator significativo para as tensões residuais, conforme pode ser observado nos gráficos de efeitos principais e de probabilidade normal, que são apresentados nas Figura 69 e Figura70, respectivamente.

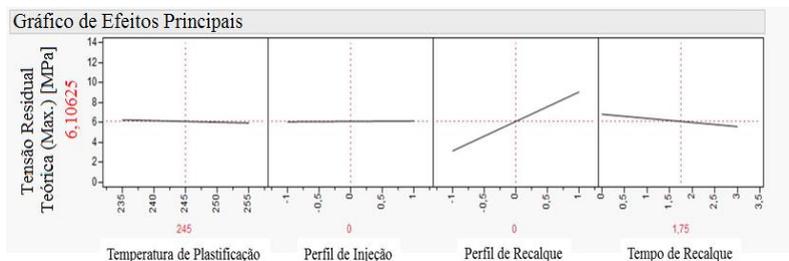


Figura 69 – Gráfico de efeitos principais

Esta informação obtida por meio da análise estatística dos valores das tensões residuais provenientes do modelo de elementos finitos, foi de grande valia para simplificar os procedimentos experimentais. O conhecimento de que o fator temperatura de plastificação não influencia nas tensões residuais, permitiu determinar, sem perda de resolução do experimento, as tensões residuais experimentais somente das amostras

da temperatura de plastificação de 235°C, assim diminuindo tempo de execução e custo dos experimentos.

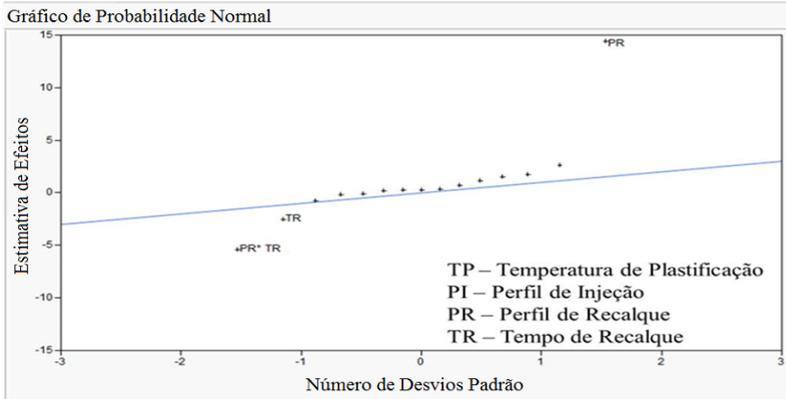


Figura70 – *Nomal Plot* mostrando fatores significativos para tensão residual virtual.

Embora os valores de tensão residual equivalente de *von Mises* experimental e virtual não tenham apresentado uma boa correlação na superfície da peça, da avaliação estatística dos resultados experimentais, como é demonstrado na Figura 71, observa-se que a interação entre perfil de recalque e tempo de recalque é o único fator significativo. Este mesmo fator aparece como segundo fator mais significativo na avaliação estatística das tensões residuais simuladas, assim demonstrando uma boa correlação entre dados numérico-experimentais.

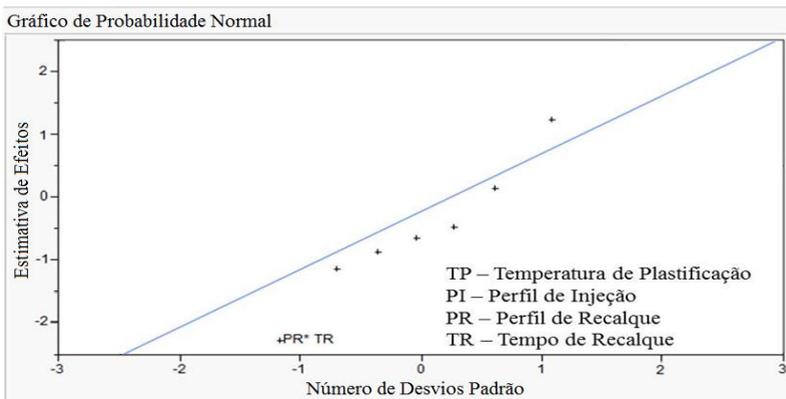


Figura 71 – *Nomal Plot* mostrando fatores significativos do experimento físico.

Avaliando o gráfico de probabilidade normal, apresentado na Figura 69, verifica-se que o perfil de recalque é o parâmetro que mais contribui para tensão residual teórica, o que está diretamente associado a compactação molecular devido à ação de pressão de recalque.

O outro fator que se destaca é a interação entre o tempo e o perfil de recalque, o qual é o fator predominante para as tensões residuais experimentais e o segundo mais relevante para as tensões residuais teóricas, conforme mostrado nos gráficos de interação de efeitos representados na Figura 72 e Figura 73.

Esta interação mostra que para perfis de recalque baixo, associado a um pequeno tempo de aplicação, conforme amostra 5, promove pouca compactação molecular. Isto é bom pelo lado de tensões residuais, uma vez que elas serão de baixa magnitude. Porém pode produzir peças menores que o dimensional desejado. Já para uma aplicação por tempo elevado existe uma melhor compactação molecular. Contudo, a pressão é insuficiente para fazer com que as moléculas encontrem uma configuração bastante estável, apresentando assim tensões residuais elevadas, conforme identificado na amostra 1. Por outro lado, para perfil de recalque mais elevado sempre ocorrerá compactação das macromoléculas poliméricas. No entanto, quando se tem pouco tempo em cada patamar estas macromoléculas não tem tempo suficiente para se organizarem, promovendo assim tensões residuais mais elevadas, caso evidenciano na amostra 4. Por fim, provendo um tempo adequado de recalque com um perfil de recalque com pressões mais elevadas, as moléculas poliméricas se arranjam de um modo mais estável reduzindo as tensões internas do componente, conforme amostra 6.

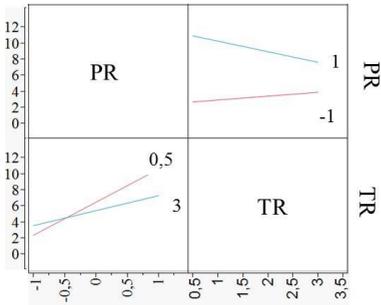


Figura 72 – Gráfico de interação de efeitos para tensões residuais simuladas.

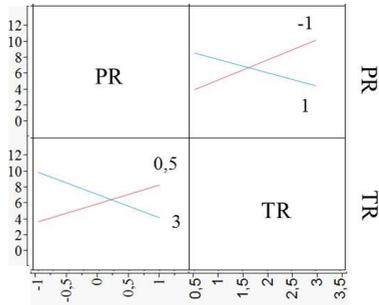


Figura 73 – Gráfico de interação de efeitos para tensões residuais experimentais.

Ainda como saída da análise estatística dos experimentos virtuais e físicos, tem-se as equações lineares que permitem prever os níveis de tensão residual, para a posição geométrica onde foi acoplada a roseta, em função dos parâmetros dos fatores significativos. Abaixo são apresentadas as equações para previsão dos níveis de tensão residual experimental (11) e para os níveis de tensão residual simuladas (12).

$$TRe [MPa] = -0,424 * PR + 0,11 * TR - 1,11 * PR * TR + 4,97 \quad (11)$$

$$TRv[MPa] = 2,95 * PR - 0,412 * TR - 0,89 * PR * TR + 6,83 \quad (12)$$

6. CONCLUSÃO

A estratégia empregada para o cumprimento dos objetivos estabelecidos no presente trabalho, avaliar a influência dos parâmetros do processo de injeção de polímeros nas tensões residuais e as suas consequências no comportamento mecânico de componentes termoplásticos, possibilitou a compreensão sobre os fenômenos físicos envolvidos, assim como a importância em considerar o efeito de pré-tensão nas simulações estruturais. Conclui-se que as tensões residuais representam aspecto significativo para o desenvolvimento de estruturas em material polimérico e, por estarem atreladas às condições de processamento, o estudo envolvendo tais parâmetros se mostrou fundamental.

Por representarem importantes dados de entrada nos estudos desenvolvidos, a devida caracterização de propriedades reológicas e mecânicas do material se mostra essencial para a correta utilização de ferramentas computacionais para avaliação do processo de fabricação e o comportamento mecânico da peça. Por meio de *softwares* comerciais de Método de Elementos Finitos, foi possível simular virtualmente o processo de injeção de polímeros, obter as tensões residuais após o resfriamento da peça e, finalmente, avaliar a resposta da estrutura mediante a carregamentos mecânicos.

A técnica do furo cego, utilizada para a avaliação experimental das tensões residuais ao longo da espessura da peça, apesar de ser embasada em conceitos da mecânica dos sólidos e equações de Kirsch, emprega em sua formulação matemática constantes de ajuste empíricas obtidas em estudos com materiais metálicos, tipicamente isotrópicos. Já no caso de materiais termoplásticos, sabe-se que o alinhamento das macromoléculas do polímero durante o seu processamento pode induzir certo grau de anisotropia. Assim, pôde-se notar que o emprego deste método em materiais termoplásticos é relativamente novo, dada a dificuldade para a obtenção de referências bibliográficas.

De um modo geral, não obstante a compreensão de tais limitações do método, foram obtidos resultados experimentais e numéricos condizentes no que se referem aos níveis de tensão residual nos corpos de prova produzidos. Nota-se ainda, que os parâmetros de avanço de furação tem grande influência nos resultados das tensões residuais obtidos experimentalmente, pois o método não capta as variações de tensão residual dentro do incremento de furação, captando somente

tensão residual decorrente da remoção do material entre a posição inicial da furação.

A metodologia descrita pela técnica de Delineamento de Experimentos permitiu a avaliação estatística dos fatores e a determinação dos fatores mais relevantes para a variável-resposta investigada. Assim, por meio de experimentos estatisticamente balanceados, se estabeleceu os parâmetros de injeção: tempo de recalque, perfil de recalque e a interação tempo de recalque com perfil de recalque como fatores mais relevantes para as tensões residuais da peça injetada em estudo. Portanto, por meio da técnica de DOE pode-se estabelecer a combinação de fatores que promovam características ideais do processo de moldagem por injeção: altas taxas de produtividade, aliadas à redução de tensões residuais e ao atendimento das especificações dimensionais. Destaca-se ainda o uso racional dos equipamentos e recursos laboratoriais, uma vez que o devido planejamento dos experimentos permitiu o aprendizado e a obtenção de conclusões a partir de um número reduzido de experimentos.

Uma vez que as peças apresentam distribuição de tensão residual, cuja previsão é possibilitada apenas com a avaliação dos efeitos dos processos de fabricação, a sua incorporação como dados de entrada em análises estruturais pode ser um aspecto fundamental para a correta avaliação da estrutura. Para tanto, torna-se necessário o acoplamento de ferramentas de simulação numérica para a inclusão da pré-tensão gerada na peça, conforme exemplificado na seção 5.3 do Capítulo 5. Esta abordagem aprimora o nível de detalhamento da análise estrutural, pois considera efeitos tipicamente desprezados no projeto mecânico de estruturas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hammes, D. P., *Modelo de Viscoelasticidade Ortotrópica: Estudo de Caso de Uma Peça em Plástico Injetado com Inserto de Fibras de Vidro*. Florianópolis: Dissertação de Mestrado 132p. UFSC, 2009.
- [2] Mylla, A. Y. F., *Influência do resfriamento na qualidade de peças termoplásticas moldadas por injeção, com estudo de caso em sistemas CAE*. Florianópolis: Dissertação de Mestrado 106p. UFSC, 1998.
- [3] Cardozo, D., *Three Models of the 3D Filling Simulation for Injection Molding: A Brief Review*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008, **27**, 1963 – 1974.
- [4] Viana, J.C., Cunha, A.M., Billon, N., *The thermomechanical environment and the microstructure of an injection moulded polypropylene copolymer*. Polymer, 2002, **43**, 4185-4196.
- [5] Michaeli, W., Greif, H., Kaufmann, H., Vossebürger, F. J., *Tecnologia dos Plásticos*. 1ª Ed., São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1995.
- [6] Birley, A. W., Batchelor, J., Haworth, B., *Physics of Plastics*. Munich: Hanser Gardner, 1991.
- [7] Cavalheiro, A. Z., *Influência dos parâmetros de moldagem na estrutura e propriedades de peças de paredes espessas e finas de polipropileno isostático injetadas em moldes-protótipo fabricados por vazamento de resina EPÓXI*. Florianópolis: Tese de Doutorado 246p. UFSC, 2007.

- [8] Viana, J. C., *Development of the skin layer in injection moulding phenomenological model*. Polymer, 2004, **45**, 993-1005.
- [9] Pontes, A.J., Oliveira, M.J., Pouzada, A.S., *Studies on the influence of the holding pressure on the orientation and shrinkage of injection molded parts*. Proceedings of 60th annual meeting of the Society of Plastics Engineers. San Francisco, 2002.
- [10] Callister, W., *Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução*. 7^a Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2008.
- [11] Dally, J. W., Riley, F. W., *Experimental Stress Analysis*. 3^a Ed., Singapore, McGraw-Hill Book Co., 1991.
- [12] Kim, C.H.K.; Youn, J.R., *Determination of residual stresses in injection-moulded flat plate: Simulation and experiments*. Polymer Testing, 2007, **26**, 862-868.
- [13] Maxwell, A. S., Turnbull A., *Measurement of residual stress in engineering plastics using the hole-drilling technique*. Polymer Testing, 2003, **22**, 231-233.
- [14] Turnbull A., Maxwell, A. S., Pillai, S., *Residual stress in polymers – evaluation of measurement techniques*. Journal of Materials Science, 1999, **34**, 451-459.
- [15] ASTM Standard E837-08, *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. 2008.
- [16] Schajer, G. S., *Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements*. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 1981, **103**, 157-163.

- [17] Schajer, G. S., Yang, L. *Residual-Stress Measurement in Orthotropic Materials Using the Hole-Drilling Method*. Experimental Mechanics, 1994, **34**: 324-333.
- [18] Schajer, G. S., *Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. Part I and Part II*. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 1988, **110**, 338-349.
- [19] Rodrigues, L. D., *Medição de Tensões Residuais em Tubos Visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados*. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.
- [20] Montgomery, Douglas C., *Design and Analysis of Experiments*. 5ªEd, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [21] Amaral, D., *DOE–Design of Experiments - Conceitos Básicos*. www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag.../DOE.html
- [22] Ramm, Axel J., *Procedimento de Calibração e Otimização Estrutural para um Gabinete de Refrigerador*. Florianópolis: Dissertação de Mestrado, UFSC, 2007.

APÊNDICE A – TABELAS COM AS CONSTANTES DAS MATRIZES \bar{a} E \bar{b} PARA ROSETA DE TIPO B DE 1/16IN COM FURO DE 2,0MM

Tabela 10 – Matriz \bar{a} de Calibração do Método do Furo Cego.

Matriz de Calibração do Método do Furo Cego - Constantes a_{jk} para Roseta Tipo B de 1/16 in com furo de 2,0mm																				
Hole Depth [mm]	Stress Depth [mm]																			
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0,05	-0,00726																			
0,10	-0,00878	-0,00766																		
0,15	-0,01013	-0,00909	-0,00788																	
0,20	-0,01133	-0,01037	-0,00924	-0,00793																
0,25	-0,01237	-0,01149	-0,01043	-0,00921	-0,00781															
0,30	-0,01325	-0,01245	-0,01147	-0,01033	-0,00901	-0,00751														
0,35	-0,01397	-0,01325	-0,01235	-0,01129	-0,01004	-0,00863	-0,00704													
0,40	-0,01471	-0,01388	-0,01297	-0,01214	-0,01088	-0,00956	-0,00811	-0,00654												
0,45	-0,01533	-0,0145	-0,0136	-0,01268	-0,01161	-0,01039	-0,00904	-0,00758	-0,00599											
0,50	-0,01587	-0,01504	-0,01414	-0,01313	-0,01217	-0,01105	-0,00981	-0,00845	-0,00696	-0,00536										
0,55	-0,01634	-0,0155	-0,0146	-0,01367	-0,01257	-0,01147	-0,01046	-0,00909	-0,00774	-0,00633	-0,00486									
0,60	-0,01672	-0,01589	-0,015	-0,01406	-0,01299	-0,0119	-0,01082	-0,00964	-0,00839	-0,00708	-0,00572	-0,0043								
0,65	-0,01705	-0,01621	-0,01532	-0,01441	-0,01332	-0,01225	-0,01118	-0,00997	-0,00892	-0,00764	-0,00637	-0,00509	-0,00379							
0,70	-0,01735	-0,01651	-0,01561	-0,01468	-0,01362	-0,01255	-0,01148	-0,01031	-0,00921	-0,0081	-0,00691	-0,00571	-0,0045	-0,00327						
0,75	-0,01759	-0,01675	-0,01586	-0,01493	-0,01387	-0,0128	-0,01174	-0,01059	-0,00945	-0,0084	-0,0073	-0,00619	-0,00506	-0,00392	-0,00277					
0,80	-0,01781	-0,01697	-0,01607	-0,01515	-0,01408	-0,01302	-0,01196	-0,0108	-0,00974	-0,0086	-0,00753	-0,00655	-0,00549	-0,00443	-0,00339	-0,00234				
0,85	-0,01799	-0,01715	-0,01625	-0,01533	-0,01426	-0,0132	-0,01213	-0,01099	-0,00992	-0,00881	-0,00775	-0,00674	-0,00581	-0,00484	-0,00387	-0,00291	-0,00195			
0,90	-0,01814	-0,0173	-0,0164	-0,0155	-0,01441	-0,01334	-0,01229	-0,01114	-0,01008	-0,00897	-0,00793	-0,00695	-0,00598	-0,00514	-0,00423	-0,00333	-0,00246	-0,00162		
0,95	-0,01829	-0,01744	-0,01654	-0,01561	-0,01454	-0,01347	-0,01242	-0,01129	-0,01021	-0,00912	-0,00809	-0,0071	-0,00617	-0,00528	-0,00449	-0,00366	-0,00285	-0,00207	-0,00131	
1,00	-0,01843	-0,01757	-0,01666	-0,01573	-0,01465	-0,01358	-0,01253	-0,0114	-0,01035	-0,00925	-0,00822	-0,00724	-0,00632	-0,00541	-0,00466	-0,00389	-0,00314	-0,00242	-0,00172	-0,00104

Tabela 11 – Matriz \bar{b} de Calibração do Método do Furo Cego.

Matriz de Calibração do Método do Furo Cego - Constantes b_{jk} para Roseta Tipo B de 1/16 in com furo de 2,0mm																				
Hole Depth [mm]	Stress Depth [mm]																			
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0,05	-0,01417																			
0,10	-0,01653	-0,01516																		
0,15	-0,01866	-0,01746	-0,01585																	
0,20	-0,02055	-0,01953	-0,01810	-0,01624																
0,25	-0,02222	-0,02138	-0,02012	-0,01844	-0,01634															
0,30	-0,02365	-0,02299	-0,02190	-0,02040	-0,01848	-0,01614														
0,35	-0,02485	-0,02437	-0,02346	-0,02214	-0,02039	-0,01823	-0,01564													
0,40	-0,02610	-0,02547	-0,02459	-0,02375	-0,02195	-0,01997	-0,01769	-0,01510												
0,45	-0,02715	-0,02656	-0,02571	-0,02479	-0,02331	-0,02154	-0,01947	-0,01709	-0,01440											
0,50	-0,02806	-0,02750	-0,02670	-0,02561	-0,02440	-0,02283	-0,02097	-0,01879	-0,01631	-0,01353										
0,55	-0,02888	-0,02833	-0,02755	-0,02664	-0,02517	-0,02365	-0,02225	-0,02008	-0,01787	-0,01546	-0,01285									
0,60	-0,02958	-0,02906	-0,02830	-0,02740	-0,02598	-0,02450	-0,02298	-0,02119	-0,01919	-0,01699	-0,01460	-0,01202								
0,65	-0,03019	-0,02968	-0,02894	-0,02808	-0,02666	-0,02521	-0,02370	-0,02186	-0,02030	-0,01816	-0,01596	-0,01367	-0,01126							
0,70	-0,03072	-0,03023	-0,02950	-0,02864	-0,02727	-0,02584	-0,02435	-0,02257	-0,02089	-0,01910	-0,01710	-0,01499	-0,01278	-0,01046						
0,75	-0,03116	-0,03068	-0,02998	-0,02914	-0,02778	-0,02638	-0,02491	-0,02316	-0,02139	-0,01976	-0,01795	-0,01603	-0,01401	-0,01188	-0,00964					
0,80	-0,03158	-0,03108	-0,03038	-0,02956	-0,02822	-0,02684	-0,02539	-0,02366	-0,02202	-0,02022	-0,01846	-0,01685	-0,01493	-0,01299	-0,01100	-0,00895				
0,85	-0,03192	-0,03143	-0,03073	-0,02990	-0,02859	-0,02723	-0,02580	-0,02410	-0,02247	-0,02071	-0,01899	-0,01729	-0,01567	-0,01390	-0,01207	-0,01019	-0,00825			
0,90	-0,03221	-0,03173	-0,03104	-0,03022	-0,02891	-0,02756	-0,02616	-0,02444	-0,02287	-0,02112	-0,01942	-0,01779	-0,01608	-0,01459	-0,01288	-0,01115	-0,00940	-0,00762		
0,95	-0,03247	-0,03200	-0,03131	-0,03048	-0,02919	-0,02785	-0,02645	-0,02475	-0,02317	-0,02146	-0,01979	-0,01817	-0,01650	-0,01493	-0,01349	-0,01191	-0,01030	-0,00866	-0,00700	
1,00	-0,03268	-0,03222	-0,03154	-0,03074	-0,02944	-0,02810	-0,02671	-0,02501	-0,02342	-0,02173	-0,02008	-0,01848	-0,01684	-0,01521	-0,01389	-0,01245	-0,01098	-0,00948	-0,00796	-0,00641

APÊNDICE B – GRÁFICO COM DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO RESIDUAL EQUIVALENTE DE *VON MISES* AO LONGO DA ESPESSURA DO ELEMENTO 7939 DE TODAS AMOSTRAS DE ELEMENTOS FINITOS

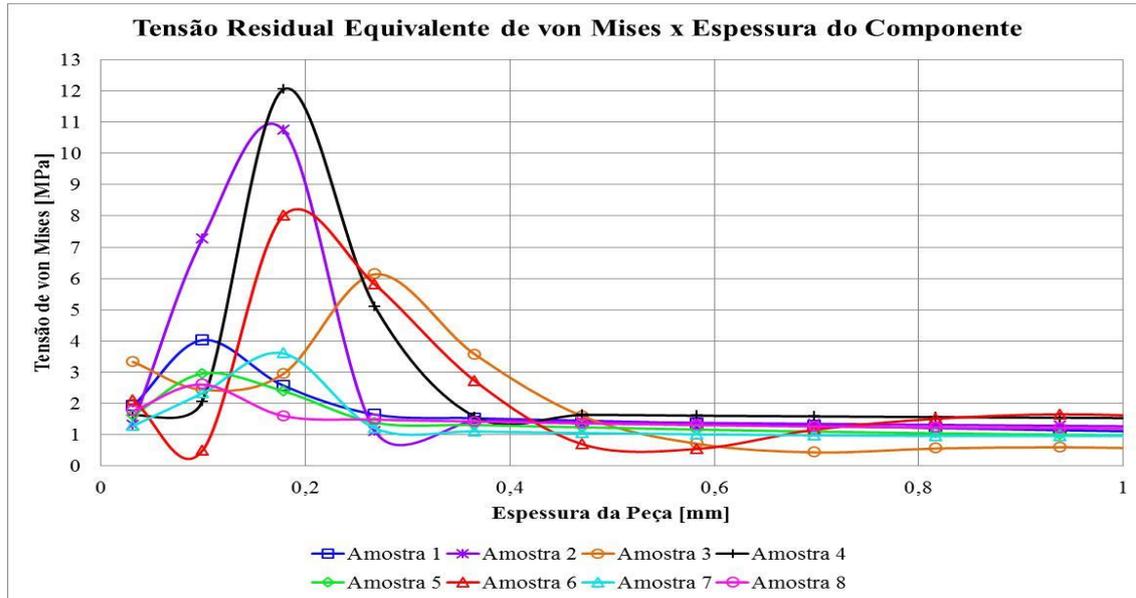


Figura 74 – Distribuição de tensão residual equivalente de *von Mises* ao longo da espessura do elemento 7939 das amostras 1 a 8.

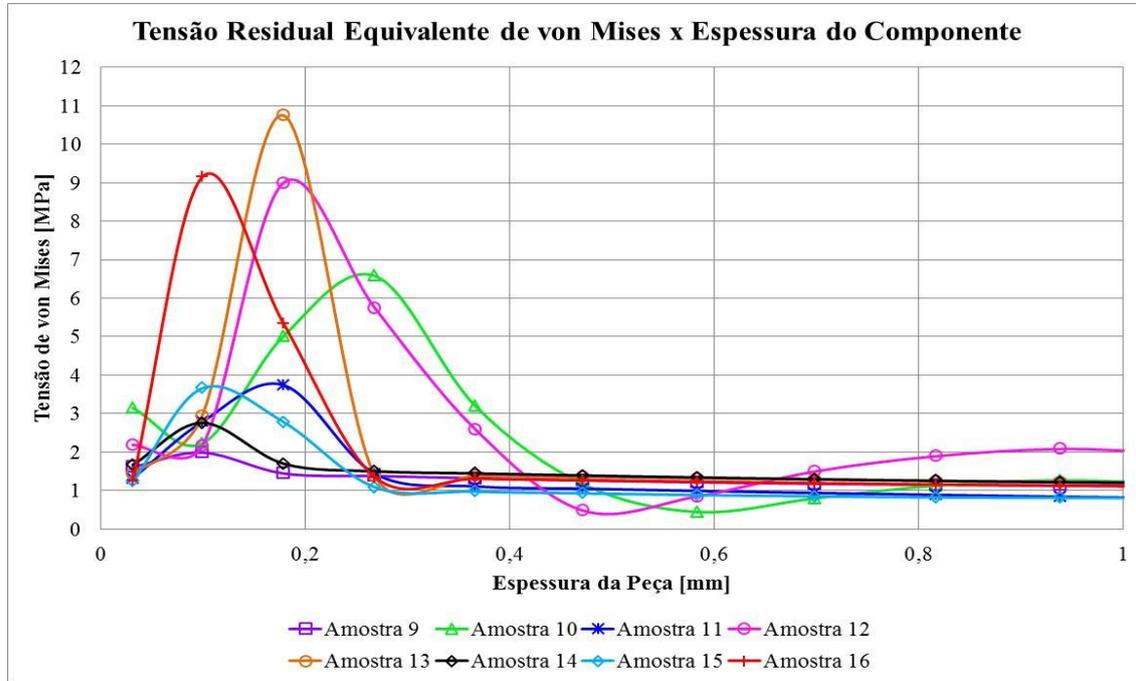


Figura 75 – Distribuição de tensão residual equivalente de *von Mises* ao longo da espessura do elemento 7939 das amostras 9 a 16.

APÊNDICE C – MATRIZ DE EXPERIMENTOS COM RESULTADOS PARA TENSÃO RESIDUAL TEÓRICA MÁXIMA DO ELEMENTO 7939 DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Runs	Tratamentos	Pattern	Temperatura Plastificação	Perfil de Injeção	Perfil de Recalque	Tempo de Recalque por Patamar	Tensão Residual Teórico (Max.)
9	1	+---	255	1	-1	0,5	1,98
10	2	++++	255	-1	1	3	6,58
1	3	---+	235	1	-1	3	4,02
2	4	--+-	235	1	1	0,5	10,75
11	5	+++	255	-1	-1	3	3,74
3	6	-+++	235	-1	1	3	6,13
12	7	+++	255	1	1	3	9,00
4	8	-+-	235	-1	1	0,5	12,05
5	9	+---	235	-1	-1	0,5	2,94
6	10	---+	235	1	1	3	8,01
7	11	-+-	235	-1	-1	3	3,60
13	12	++-	255	-1	1	0,5	10,75
14	13	++-	255	-1	-1	0,5	2,75
15	14	+++	255	1	-1	3	3,65
8	15	----	235	1	-1	0,5	2,60
16	16	+-+	255	1	1	0,5	9,15

APÊNDICE D – MATRIZ DE EXPERIMENTOS COM RESULTADOS PARA TENSÃO RESIDUAL EXPERIMENTAL MÁXIMA

Runs	Tratamentos	Pattern	Temperatura Plastificação	Perfil de Injeção	Perfil de Recalque	Tempo de Recalque por Patamar	Tensão Residual Prático (Max.)
1	3	---+	235	1	-1	3	8,74
2	4	---+	235	1	1	0,5	6,68
3	6	+++	235	-1	1	3	2,89
4	8	++-	235	-1	1	0,5	5,31
5	9	+--	235	-1	-1	0,5	2,70
6	10	---+	235	1	1	3	4,07
7	11	+++	235	-1	-1	3	5,48
8	15	----	235	1	-1	0,5	5,42