

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DO  
LEIAUTE DIMENSIONAL DE COMPONENTES DE PLÁSTICO  
MOLDADOS POR INJEÇÃO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

**WESLEY NOVAES MASCARENHAS**

FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 2002.

**SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DO LEIAUTE  
DIMENSIONAL DE COMPONENTES PLÁSTICOS MOLDADOS POR  
INJEÇÃO**

**WESLEY NOVAES MASCARENHAS**

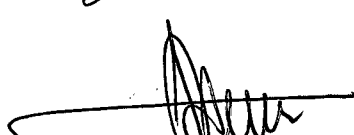
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

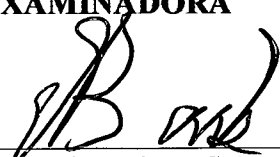
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM  
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

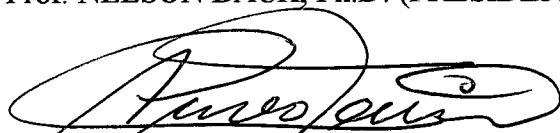
  
\_\_\_\_\_  
Prof. CARLOS HENRIQUE AHRENS, Dr. Eng. - Orientador

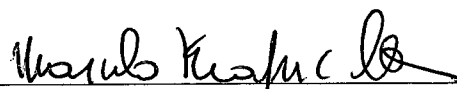
  
\_\_\_\_\_  
Prof. ANDRÉ OGLIARI, Dr. Eng. - Co-orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. JOSÉ ANTÔNIO BELLINIDA CUNHA NETO, Dr.  
Coordenador do CURSO - CPGEM/UFSC

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. NELSON BACK, Ph.D. (PRESIDENTE)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. AUREO CAMPOS FERREIRA, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. MARCELO KRANJC ALVES, Ph.D.



*Este trabalho é dedicado a todos aqueles (familiares e amigos) que de alguma forma contribuiu para a sua realização em especial meus pais, Antônio Paulirio e Yvone Novaes, pelo apoio e confiança depositada durante a sua realização. À minha avó, Edésia Mascarenhas, pela criação passada e as orações realizadas e ao grande homem, Antônio Genelhu (in memoriam), cujo fruto de seus longos anos de trabalho árduo ajudou a tornar este trabalho uma realidade. Onde quer que você esteja neste momento, Muito Obrigado!*

## AGRADECIMENTOS

Trabalhar numa dissertação nos traz muitos sentimentos ao longo da sua elaboração, estes sentimentos são alternados entre motivação e desilusão, perseverança e desilusão, grandeza e pequenez...

Por mais técnico e pretensioso que um trabalho desta natureza possa parecer, sua elaboração, apesar de parecer um trabalho tipicamente solitário, definitivamente não o é. Seria uma grande injustiça dar todo o mérito do seu resultado à apenas aquele que o fez. Certamente, se este trabalho obteve êxito, deveu-se à inestimável e valiosa colaboração e dedicação de muitas pessoas, que merecem ser lembradas aqui.

O maior agradecimento ao nosso **Pai** celestial, fonte de toda força necessária para trilhar o caminho percorrido e para transpor todos os obstáculos encontrados durante a realização deste trabalho.

A contribuição silenciosa e às vezes ativa de quem, tão distante, participou de nossas angústias, ouviu nossas lamúrias e nos deu apoio, compreensão e conforto. Aos **meus pais e familiares** (tios e tias) e à minha irmã **Anna Kelly Novaes** que deram força e sempre mantiveram a esperança de ver este trabalho concretizado.

A atuação orientadora e crítica dos professores **Ahrens** e **André Ogliari**, que sempre estiveram a postos para tirar qualquer dúvida que ousasse impedir a continuidade deste trabalho.

Aquelas pessoas também que pôde pacientemente ouvir minhas angústias e lamúrias. **Alan Oliveira**, que também atende pelos nomes de “Olan”, “Avai” e “José Alan”, foi mais do que um amigo nesta jornada, um irmão. A **Lena** e **Líliam**, que me acolheram e mesmo sem entender muito deste trabalho deram suas opiniões e palavras de conforto que puderam reduzir um pouco meus sofrimentos e preocupações.

A influência crítica de quem deu sua colaboração pessoal. **Armando** que foi, se não o maior, um dos maiores contribuintes deste trabalho, pelas inúmeras e inestimáveis discussões e sugestões dadas. Ao amigo **Cajuhi** que também deu sua inestimável contribuição na forma de valiosas críticas e sugestões. **Fred** que dividiu comigo as frustrações e principalmente o aprendizado adquirido na realização dos estudos de caso deste trabalho. Enfim, agradeço a todos do **Cimject** que fizeram deste um agradável local de trabalho.

Gostaria de agradecer também a duas pessoas que deram sua contribuição, **Lídia** e **Francisca** (Chica) bibliotecárias do SENAI – CETIND de Lauro de Freitas – BA, por terem se colocado à disposição quando precisei realizar uma vasta pesquisa na biblioteca deste centro, sem o qual o êxito deste trabalho poderia ficar comprometido.

Sem esquecer da ajuda financeira dada pela **CAPES** através da concessão de bolsa de pesquisa.

Enfim, gostaria de agradecer a **TODOS** estes e aqueles que não foram citados aqui, mas não foram esquecidos, dedico a esperança de que este trabalho não tenha sido em vão, e de que dele bons frutos venham ser colhidos ou que ele ofereça uma mínima retribuição no que lhe servir para melhorar um pouquinho este mundo em que vivemos.

O meu sincero Muito Obrigado!

“Quanto mais forte for o obstáculo, maior será a glória que poderemos alcançar ao vencê-lo; as dificuldades que se apresentam são para nós os adornos da virtude que triunfa.”

*Molière*

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE DIAGRAMAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>SIGLAS.....</b>	<b>xvii</b>
<b>NOTAÇÃO.....</b>	<b>xviii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xx</b>
<b>TITLE &amp; ABSTRACT.....</b>	<b>xxi</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENFOQUE DO TRABALHO.....	1
1.2. DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO.....	2
1.3. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.4. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO.....	5
<b>2 – PROJETO DE COMPONENTES DE PLÁSTICO MOLDADOS POR INJEÇÃO.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE METODOLOGIAS DE PROJETO.....</b>	<b>6</b>
2.1.1. <i>METODOLOGIAS DE PROJETO DE PRODUTOS.....</i>	6
<b>2.2. DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS DE PLÁSTICO INJETADOS SOB OS PRINCÍPIOS DA ENGENHARIA SIMULTÂNEA.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3. PROJETO MECÂNICO DE UM COMPONENTE DE PLÁSTICO INJETADO.....</b>	<b>24</b>
2.3.1. <i>PROTOTIPAGEM VIRTUAL (MODELAMENTO CAD).....</i>	25
2.3.2. <i>SELEÇÃO DE MATERIAIS.....</i>	27
2.3.3. <i>ANÁLISE ESTRUTURAL.....</i>	30
2.3.4. <i>ANÁLISE REOLÓGICA.....</i>	35
2.3.5. <i>SISTEMAS CAE.....</i>	37
2.3.5.1. <i>Sistemas CAE para Análise Estrutural.....</i>	38
2.3.5.2. <i>Sistemas CAE para Análise de Moldabilidade.....</i>	39
2.3.5.3. <i>Vantagens e Desvantagens dos Sistemas CAE.....</i>	40
2.3.6. <i>POSSÍVEIS EFEITOS CAUSADOS NO COMPONENTE DECORRENTES DA MOLDAGEM POR INJEÇÃO.....</i>	41
<b>3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PLÁSTICOS.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PLÁSTICOS.....</b>	<b>47</b>
3.1.1. <i>PROPRIEDADES MECÂNICAS.....</i>	47
3.1.1.1. <i>Diagrama Tensão-Deformação.....</i>	48
3.1.1.2. <i>Propriedades Compressivas.....</i>	55
3.1.1.3. <i>Propriedades de Flexão.....</i>	55
3.1.1.4. <i>Cisalhamento.....</i>	56

3.1.1.5. Resistência ao Impacto.....	56
3.1.1.6. Dureza, Desgaste e Atrito.....	57
3.1.1.7. Fluência (Creep) Alívio de Tensões.....	58
3.1.1.8. Alívio de Tensões (Stress Relaxation).....	61
3.1.1.9. Fadiga.....	62
3.1.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	63
3.1.2.1. Temperatura de Transição Vítrea (T <sub>g</sub> ).....	64
3.1.2.2. Temperatura de Fusão (T <sub>m</sub> ).....	64
3.1.2.3. Temperatura de Deflexão Sob Carregamento.....	64
3.1.2.4. Coeficiente de Dilatação Térmica.....	65
3.1.2.5. Condutividade Térmica.....	65
3.1.2.6. Calor Específico.....	65
3.1.2.7. Temperatura de Amolecimento Vicat.....	66
3.1.2.8. Índice Relativo de Temperatura.....	66
3.1.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS.....	66
3.1.3.1. Resistividade Volumétrica.....	66
3.1.3.2. Resistividade Superficial.....	67
3.1.3.3. Resistência Dielétrica.....	67
3.1.3.4. Constante Dielétrica.....	67
3.1.3.5. Fator de Dissipação.....	67
3.1.3.6. Resistência ao Arco.....	68
3.1.4. PROPRIEDADES ÓPTICAS.....	68
3.1.4.1. Refração.....	68
3.1.4.2. Transparência.....	69
3.1.4.3. Cor.....	69
3.1.5. PROPRIEDADES ACÚSTICAS.....	69
3.1.6. PROPRIEDADES REOLÓGICAS.....	70
3.1.6.1. Viscosidade.....	70
3.1.6.2. Índice de Fluides.....	70
3.1.6.3. Fluxo Espiral.....	71
3.1.7. OUTRAS PROPRIEDADES.....	71
3.1.7.1. Densidade, Gravidade Específica e Volume Específico.....	71
3.1.7.2. Contração Volumétrica.....	71
3.1.7.3. Flamabilidade.....	73
3.1.7.4. Propriedades Biológicas.....	73

3.1.7.5. Porosidade ou Propriedade de Barreira.....	73
<b>3.2. FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PLÁSTICOS.....</b>	<b>74</b>
3.2.1. PROCESSAMENTO.....	74
- Linhas de Solda.....	74
- Tensões Residuais.....	75
- Orientação Molecular.....	76
3.2.2. REAPROVEITAMENTO DE MATERIAL.....	77
3.2.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	78
3.2.4. EXPOSIÇÃO QUÍMICA.....	78
3.2.5. EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO SOLAR.....	78
<b>4 – ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>80</b>
4.1. GENERALIDADES.....	80
4.2. ESTUDO DE CASO 1.....	80
4.2.1. DEFINIÇÃO DO COMPONENTE 1.....	80
4.2.2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO 1.....	81
4.2.2.1. SELEÇÃO DO MATERIAL.....	81
4.2.2.2. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	99
4.1.3.3. ANÁLISE REOLÓGICA.....	107
4.2. ESTUDO DE CASO 2.....	122
4.2.1. DEFINIÇÃO DO COMPONENTE 2.....	122
4.2.2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO 2.....	123
4.2.2.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	123
4.2.2.2. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	130
4.2.2.3. ANÁLISE REOLÓGICA.....	133
<b>5 – PROPOSTA DE SISTEMÁTICA.....</b>	<b>143</b>
5.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS OU DE UM CONJUNTO RESTRITO DE MATERIAIS.....	143
5.2. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	147
5.3. ANÁLISE REOLÓGICA E TÉRMICA.....	155
<b>6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>165</b>
6.1. ANÁLISE CRÍTICA DA PROPOSTA DE SISTEMÁTICA.....	165
6.2. CONCLUSÕES.....	168
6.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	169
<b>7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>171</b>
<b>ANEXO A – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>179</b>
A.1 – TERLURANHI – 10.....	180
A.2 – APECHT KU 1-9331.....	181
A.3 – POLYSTIROL 585 K.....	182
A.4 – MAKROLON 2205.....	183
<b>ANEXO B – RECOMENDAÇÕES PARA ANÁLISE DE RESULTADOS DO</b>	
<b>MOLDFLOW®</b> .....	<b>184</b>

<b>ANEXO C – GUIA DE POSSÍVEIS PROBLEMAS DE INJEÇÃO.....</b>	<b>189</b>
<b>ANEXO D – QUESTIONÁRIO ESTRUTURADO.....</b>	<b>192</b>
<b>ANEXO E – RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO DE COMPONENTES VISANDO AUMENTO DE RIGIDEZ.....</b>	<b>195</b>
1) Espessura de Parede.....	196
2) Nervuras.....	197
3) Ranhuras em “V” e Corrugação.....	199
4) Suportes Verticais.....	199
5) Reforço Lateral.....	200
6) Raios de Arredondamento.....	201
<b>ANEXO F – CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA DE PROJETO DE COMPONENTES DE PLÁSTICO E COEFICIENTES DE SEGURANÇA.....</b>	<b>202</b>
<b>ANEXO G – RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO DE COMPONENTES DE PLÁSTICO SOB CARREGAMENTO DINÂMICO.....</b>	<b>210</b>
<b>ANEXO H – DESENHOS DETALHADOS DOS COMPONENTES E MOLDES UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>212</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema genérico representativo do processo de obtenção do leiaute final da peça.	4
Figura 2.1: Modelo de consenso para o projeto sistemático de produtos.....	7
Figura 2.2: Método seqüencial de projeto de uma peça de plástico.....	9
Figura 2.3: Ciclo de desenvolvimento de componentes de plástico injetados.....	12
Figura 2.4: Engenharia simultânea no processo de projeto de peças de plástico injetado e do molde de injeção.....	13
Figura 2.5: Proposta de abordagem para o processo de desenvolvimento rápido comparado ao processo tradicional.....	16
Figura 2.6: Representação da abordagem de projeto proposta por BEITER <i>et al</i> [18].....	17
Figura 2.7: Processo de desenvolvimento simultâneo.....	17
Figura 2.8: Influência das modificações sobre os custos de desenvolvimento.....	19
Figura 2.9: Processo de desenvolvimento de um produto plástico segundo STRONG [23].....	21
Figura 2.10: Etapas de projeto preliminar de componentes de plástico injetados segundo DARE [11].....	23
Figura 2.11: Definição da ferramenta CAD baseado nos seus constituintes.....	26
Figura 2.12: Seleção de materiais segundo GE PLASTIC [33].....	30
Figura 2.13: Tipos de análise estrutural.....	32
Figura 2.14: Tipos de elementos finitos.....	33
Figura 2.15: Discretização de uma estrutura em elementos planos.....	35
Figura 2.16: Preenchimento teórico da cavidade.....	37
Figura 2.17: Contrações devido a efeitos de orientação induzida pelo fluxo.....	41
Figura 2.18: Empenamento causado por diferenças existente entre as taxas de retirada de calor.....	42
Figura 2.19: Contrações diferenciadas causadas pelas variações de pressão existentes ao longo do caminho de fluxo.....	42
Figura 2.20: Ilustração do efeito da hesitação.....	43
Figura 2.21: Formação de bolsas de ar.....	43
Figura 2.22: Formação das linhas de solda.....	44
Figura 2.23: Linhas de junta formada a partir de dois pontos de injeção.....	44
Figura 2.24: Efeito de rechupe por contração diferenciada.....	45
Figura 2.25: Ilustração da formação de vazios.....	45
Figura 3.1: Diagrama tensão-deformação generalizado de um plástico.....	49
Figura 3.2: Localização de tensão limite elástico dos materiais poliméricos.....	50
Figura 3.3: Classificação dos diagramas tensão-deformação segundo BERINS [53].....	52
Figura 3.4: Classificação do comportamento mecânico dos materiais poliméricos segundo CHANDA e ROY [61] e TICONA [39].....	52

Figura 3.5: Classificação do comportamento dos materiais poliméricos segundo [57].....	53
Figura 3.6: Diagrama ilustrando o efeito da taxa de deformação e da temperatura sobre o comportamento dos materiais plásticos.....	54
Figura 3.7: Ilustração da ocorrência da fluência.....	58
Figura 3.8: Diagramas representativos das várias formas de representar a fluência.....	59
Figura 3.9: Diagrama típico de um ciclo completo de carregamento e descarregamento de longa duração de um material plástico ilustrando como ocorre o efeito recuperativo...	60
Figura 3.10: Ilustração da ocorrência de alívio de tensões.....	61
Figura 3.11: Ilustração do fenômeno de refração em materiais poliméricos.....	69
Figura 3.12: Ilustração da contração linear.....	72
Figura 3.13: Seção transversal da região de encontro de duas frentes de fluxo produzindo as linhas de solda.....	75
Figura 3.14: Ilustração da existência de duas regiões distintas na região de formação das linhas de solda.....	75
Figura 4.1: Modelo tridimensional do componente do primeiro estudo de caso.....	81
Figura 4.2: Ilustração de uma das partes do prendedor.....	95
Figura 4.3: Modelo de viga aproximada proposta para a região A (Figura 4.2).....	95
Figura 4.4: Modelo tridimensional do componente remodelado (metade).....	99
Figura 4.5: Malha de elementos finitos do componente.....	100
Figura 4.6: Áreas nas quais foram aplicadas as condições de contorno do problema.....	100
Figura 4.7: Tensões principais no componente analisado com <i>Apec HT KU 1-9331</i> .....	101
Figura 4.8: Tensões principais no componente analisado com <i>Terhuran HI-10</i> .....	103
Figura 4.9: Distribuição de tensões principais na análise da montagem ou desmontagem do prendedor.....	105
Figura 4.10: Modelo tridimensional do componente remodelado (metade) e a malha de elementos finitos.....	106
Figura 4.11: Distribuição das tensões principais no componente.....	106
Figura 4.12: Ilustração das dimensões do canal de injeção da bucha.....	109
Figura 4.13: Malha de elementos finitos das cavidades consideradas e os pontos de injeção.....	110
Figura 4.14: Principais gráficos observados na primeira análise de preenchimento.....	112
Figura 4.15: Principais gráficos observados na análise de refrigeração.....	115
Figura 4.16: Principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento.....	116
Figura 4.17: Principais gráficos analisados na segunda análise de recalque.....	120
Figura 4.18: Principais gráficos observados na análise de empenamento.....	122
Figura 4.19: Ilustração da geometria do componente considerado no segundo estudo de caso...	123
Figura 4.20: Comparação das deformações do componente utilizando aço e o <i>Makrolon 2205</i> ..	130
Figura 4.21: Ilustração do componente remodelado.....	131
Figura 4.22: Malha de elementos finitos do componente remodelado.....	131
Figura 4.23: Ilustração da distribuição de deformação no componente.....	132
Figura 4.24: Distribuição das tensões principais no componente.....	132

Figura 4.25: Determinação da melhor região de posicionamento dos pontos de injeção.....	134
Figura 4.26: Principais gráficos observados na primeira análise de preenchimento.....	134
Figura 4.27: Principais gráficos observados na análise de refrigeração.....	137
Figura 4.28: Principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento.....	139
Figura 4.29: Principais gráficos observados na análise de empenamento.....	142
Figura 5.1: Detalhamento da fase de seleção de materiais.....	143
Figura 5.2: Detalhamento da fase de resistência mecânica.....	148
Figura 5.3: Detalhamento da fase de análise de resistência para o reprojeto de um componente de plástico.....	152
Figura 5.4: Detalhamento da fase de análise reológica.....	155
Figura 5.5: Forma mais comum de canais de refrigeração.....	161
Figura 5.6: Recomendações para o diâmetro dos canais de refrigeração, distância entre os canais e a superfície do componente e a distância entre os canais segundo BAYER AG [48].....	162
Figura E.1: Maneiras de variação de espessura de parede.....	196
Figura E.2: Ilustração de duas nervuras seqüentes com suas principais dimensões literais.....	198
Figura E.3: Ilustração da nervura em forma de “X” ou “Z”.....	198
Figura E.4: Ilustração de estruturas ranhuradas (a) e corrugadas (b).....	199
Figura E.5: Ilustração de um suporte vertical com suas principais dimensões literais.....	199
Figura E.6: Ilustração da conexão entre suportes verticais e as paredes do componente.....	200
Figura E.7: Ilustração do reforço lateral ( <i>Gussets</i> ) com suas principais dimensões recomendadas pela GE PLASTIC [22].....	201
Figura E.8: Relação entre raios de arredondamento interno e externo.....	201

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Vantagens competitivas conquistadas com a introdução da engenharia simultânea..	10
Tabela 4.1: Lista das necessidades de projeto do prendedor.....	82
Tabela 4.2: Lista de requisitos de projeto do prendedor.....	84
Tabela 4.3: Lista das especificações de projeto do prendedor.....	84
Tabela 4.4: Respostas extraídas do questionário estruturado utilizado as listas de necessidades, de requisitos e especificações de projeto.....	87
Tabela 4.5: Lista de informações necessárias à seleção do material.....	89
Tabela 4.6: Classificação das informações em requisitos obrigatórios e desejados.....	89
Tabela 4.7: Relação entre as principais classes de materiais termoplásticos e os principais requisitos de projeto.....	91
Tabela 4.8: Relação entre materiais eliminados na primeira seleção eliminatória com a causa da sua eliminação.....	92
Tabela 4.9: Relação entre as classes de materiais, nome comercial dos <i>grades</i> selecionados e seus fabricantes.....	93
Tabela 4.10: Relação entre os materiais e os valores das suas propriedades.....	94
Tabela 4.11: Tensões principais máximas, fornecidas pelo <i>software</i> CAE de análise estrutural e tensão cisalhante admissível segundo critério de Tresca, utilizando <i>Apec HT KU 1-9331</i> .....	102
Tabela 4.12: Recomendações de valores para coeficientes de segurança.....	102
Tabela 4.13: Tensões principais máximas e tensão cisalhante admissível segundo critério de Tresca, <i>Terluran HI-10</i> .....	103
Tabela 4.14: Tensões principais máximas e tensão cisalhante admissível segundo critério de Tresca, utilizando <i>Terluran HI-10</i> .....	105
Tabela 4.15: Tensões principais máximas e tensão cisalhante admissível segundo critério de Tresca, utilizando <i>Terluran HI-10</i> .....	106
Tabela 4.16: Ilustração da massa máxima de um componente injetado para o material utilizado e o volume do componente.....	108
Tabela 4.17: Indicação das dimensões obtidas para os canais de injeção e de distribuição.....	109
Tabela 4.18: Indicação do volume do componente, dos canais e total.....	109
Tabela 4.19: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na primeira análise de preenchimento.....	114
Tabela 4.20: Condições de contorno utilizados na análise de refrigeração.....	114
Tabela 4.21: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na análise de refrigeração...	116
Tabela 4.22: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na segunda análise de preenchimento.....	118
Tabela 4.23: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na segunda análise de recalque.....	121
Tabela 4.24: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na análise de empenamento	121
Tabela 4.25: Respostas extraídas do questionário estruturado utilizado as listas de necessidades, de requisitos e especificações de projeto.....	124
Tabela 4.26: Lista de informações necessárias à seleção do material.....	126

Tabela 4.27: Classificação das informações em requisitos obrigatórios e desejados.....	126
Tabela 4.28: Relação entre as principais classes de materiais termoplásticos e os principais requisitos de projeto.....	127
Tabela 4.29: Relação entre materiais eliminados na primeira seleção eliminatória com a causa da sua eliminação.....	128
Tabela 4.30: Relação entre as classes de materiais, nome comercial do <i>grade</i> selecionado e seu fabricante.....	129
Tabela 4.31: Relação entre o material e os valores das suas propriedades.....	129
Tabela 4.32: Tensões principais máximas e tensão cisalhante admissível segundo critério de Tresca, utilizando Makrolon 2205.....	133
Tabela 4.33: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na primeira análise de preenchimento.....	136
Tabela 4.34: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na análise de refrigeração...	138
Tabela 4.35: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na segunda análise de preenchimento.....	141
Tabela 5.1: Lista de alguns bancos de dados de materiais plásticos.....	146
Tabela 5.2: Recomendações de diâmetros dos canais de refrigeração.....	162
Tabela A.1: Relação das principais propriedades do <i>Terhuran HI-10</i> .....	180
Tabela A.2: Relação das principais propriedades do <i>Apec HT KU 1-9331</i> .....	181
Tabela A.3: Relação das principais propriedades do <i>Polystirol 585 K</i> .....	182
Tabela A.4: Relação das principais propriedades do <i>Makrolon 2205</i> .....	183
Tabela B.1: Recomendações para análise dos gráficos fornecidos pelo módulo de preenchimento e recalque no <i>Moldflow</i> <sup>®</sup> .....	185
Tabela B.2: Recomendações para análise dos gráficos fornecidos pelo módulo de refrigeração no <i>Moldflow</i> <sup>®</sup> .....	187
Tabela B.3: Recomendações para análise dos gráficos fornecidos pelo módulo de empenamento no <i>Moldflow</i> <sup>®</sup> .....	188
Tabela C.1: Possíveis problemas de injeção de peças.....	190
Tabela D.1: Questionário estruturado recomendado para a seleção de materiais.....	193
Tabela E.1: Recomendações de dimensões para projetos de nervuras.....	198
Tabela E.2: Recomendações de dimensões para projetos de um suporte vertical ( <i>Boss</i> ).....	200
Tabela E.3: Recomendações de dimensões para raios de arredondamento.....	201
Tabela F.1: Recomendações de valores para o fator $A_{st}$ .....	204
Tabela F.2: Modos de falha e critérios de resistência de projeto segundo GE PLASTIC [34].....	205
Tabela F.3: Recomendações de valores para o coeficiente de segurança para materiais compostos.....	209

## LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 4.1: Diagrama tensão-deformação isocrônico do <i>Terluran HI-10</i> .....	97
Diagrama 4.2: Diagrama módulo de fluência <i>versus</i> tempo do <i>Terluran HI-10</i> .....	98
Diagrama 4.3: Diagramas ilustrando o perfil de pressão aplicado na primeira e segunda análise de recalque, respectivamente.....	119

## SIGLAS

<b>SIGLA</b>	<b>SIGNIFICADO</b>	<b>TRADUÇÃO</b>
3D	Tridimensional	
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	<i>Computer Aided Desgin</i>	Projeto Assistido por Computador
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>	Engenharia Assistida por Computador
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>	Manufatura Assistida por Computador
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>	Controle Numérico Computadorizado
IGES	<i>Initial Geometric Exchange System</i>	Sistema Inicial de Transferência de Dados Geométricos
MDF	Método das Diferenças Finitas	
MEC	Método dos Elementos de Contorno	
MEF	Método dos Elementos Finitos	
MVF	Método dos Volumes Finitos	
PC	<i>Polycarbonate</i>	Policarbonato
HDPE	<i>Polyethylene High Density</i>	Polietileno de Alta Densidade
LDPE	<i>Polyethylene Low Density</i>	Polietileno de Baixa Densidade
PET	<i>Polyethylene Tereftalato</i>	Polietileno Tereftalato
PP	<i>Polypropilene</i>	Polipropileno
PS	<i>Polystyrene</i>	Poliestireno
PVC	<i>Poly Vynil Chloride</i>	Cloreto de Polivinila
STL	<i>Stereolitography Tessellation Language</i>	Linguagem de estereolitografia
UV	<i>Ultra Violet</i>	Ultra Violeta

## NOTAÇÃO

VARIÁVEL	SIGNIFICADO	Unidades (SI)
$E(t)$	Módulo de fluência do material num tempo $t$ qualquer	MPa
$\sigma$	Tensão no componente	MPa
$\varepsilon(t)$	Deformação apresentada pelo componente num tempo $t$ qualquer	%
$\sigma(t)$	Tensão apresentada pelo componente num tempo $t$ qualquer	MPa
$\varepsilon$	Valor da deformação no ponto extremo da viga	%
$E_{\text{transv}}$	Módulo de elasticidade transversal	MPa
$E_{\text{long}}$	Módulo de elasticidade longitudinal	MPa
$E_{\text{Flexão}}$	Módulo de flexão	MPa
$E_{\text{tração}}$	Módulo de elasticidade obtido do diagrama tensão-deformação em tração	MPa
$E_{\text{comp}}$	Módulo de elasticidade obtido do diagrama tensão-deformação em compressão	MPa
$n$	Índice de refração do material	-
$\gamma$	Ângulo de incidência	°
$\beta$	Ângulo de refração	°
$S_v$	Contração volumétrica do material	%
$S_l$	Contração linear	%
$E_{\text{comp}}$	Módulo de elasticidade do material composto	MPa
$E_r$	Módulo de elasticidade do material composto	MPa
$E_m$	Módulo de elasticidade do material matriz	MPa
$v_r$	Porcentagem em volume de material de reforço	%
$v_m$	Porcentagem em volume de material matriz	%
$\sigma_f$	Tensão na extremidade proveniente da flexão da viga	MPa
$E$	Módulo de elasticidade	MPa
$P$	Força aplicada na extremidade da viga para produzir o deslocamento desejado	N
$I$	Momento de inércia da seção transversal da viga	$m^4$
$L$	Comprimento da viga	m
$y$	Deslocamento causado pela força $P$	m
$h$	Altura da seção transversal da viga	m
$\tau_{\text{Tresca}}$	Tensão de cisalhamento máximo segundo critério de Tresca	MPa
$\tau_{\text{adm}}$	Tensão de cisalhamento admissível	MPa
$\sigma_y$	Tensão limite elástico	MPa
$\sigma_1$	Primeira tensão principal	MPa
$\sigma_2$	Segunda tensão principal	MPa
$\sigma_3$	Terceira tensão principal	MPa
$S$	Coefficiente de segurança	-
$P_{\text{max}}$	Pressão de recalque máxima a ser utilizada	MPa
$F$	Força de fechamento máxima da máquina injetora	t
$A_{\text{proj}}$	Área projetada da cavidade	$cm^2$
$R_1$	Raio de arredondamento interno	mm
$R_2$	Raio de arredondamento externo	mm
$\sigma_{\text{adm}}$	Tensão normal admissível	MPa



$\sigma_{\max}$	Tensão normal máxima	MPa
K	Resistência do material (limite elástico ou tensão de ruptura)	MPa
A	Fator de redução do material	-
$A_T$	Fator de redução de resistência do material devido à ação da temperatura	-
$A_{ST}$	Fator de redução de resistência do material devido à ação de carregamentos de longa duração	-
$A_{\text{din}}$	Fator de redução de resistência do material devido à ação de carregamentos dinâmicos	-
$A_t$	Fator de redução de resistência do material devido à ação do tempo	-
$A_w$	Fator de redução de resistência do material devido à ação da umidade	-
$A_f$	Fator de redução de resistência do material devido à ação da fabricação	-
T	Temperatura	°C
$\sigma_{St}$	Tensão de Sternstein	MPa
$\sigma_{VM}$	Tensão de Von Mises modificada	MPa
$\sigma_{\text{oct}}$	Tensão octaédrica crítica	MPa
$\sigma_{\text{hid}}$	Tensor hidrostático	MPa
$\mu$	Parâmetro que representa a dependência da tensão limite elástico do material sobre o tensor hidrostático	-
$\sigma_{yc}$	Limite de resistência à compressão do material	MPa
$\sigma_{yt}$	Limite de resistência à tração do material	MPa
$\sigma_{\text{cônico}}$	Tensão cônica equivalente	MPa
$\sigma_{\text{parab}}$	Tensão parabólica equivalente	MPa
m	Razão entre o limite de resistência à compressão ( $\sigma_{yc}$ ) e à tração ( $\sigma_{yt}$ )	-
$\sigma_{y\text{long}}$	Resistência do material na direção longitudinal	MPa
$\sigma_{y\text{transv}}$	Resistência do material na direção transversal	MPa
$\tau_y$	Limite de resistência ao cisalhamento do material	MPa
N	Número teórico de cavidades	-
$m_c$	Massa máxima de um componente injetado para o material utilizado	g
V	Volume dos componentes e dos canais de injeção e de distribuição	cm <sup>3</sup>
$\nu$	Coefficiente de Poisson	-
$\alpha$	Coefficiente de dilatação térmica	°C <sup>-1</sup>
$E_{\text{ap}}$	Módulo de elasticidade aparente	MPa
$t_{\text{Resf}}$	Tempo de resfriamento	s
t	Maior espessura do componente	mm
k	Condutividade térmica do material	W/m.°C
$\rho$	Densidade do material fundido	kg/m <sup>3</sup>
$c_p$	Calor específico do material	J/kg.°C
$S_1$	Fator de risco de lesão às pessoas provenientes de uma falha	-
$S_2$	Fator de processamento	-
$S_3$	Precisão dos cálculos	-
$S_4$	Fator de degradação do material	-

## RESUMO

O projeto de um componente de plástico constitui-se em uma tarefa bastante complexa, que em algumas situações requer bastante experiência do projetista, adquirida com anos de trabalho. O que torna complexo o projeto de um componente de plástico, é a susceptibilidade a mudanças de propriedades que os materiais poliméricos apresentam quando submetidos a um determinado ambiente de trabalho. Em vista disto, é necessário que o projetista tenha um bom conhecimento a respeito das propriedades dos materiais poliméricos e do ambiente ao qual o componente estará submetido, já que o material a ser utilizado para fabricá-lo será selecionado em função destas características. Levando em consideração as dificuldades que o projeto de um componente plástico apresenta, principalmente no que se refere à seleção de um material adequado para a aplicação, realização e avaliação dos resultados da análise estrutural e reológica do mesmo, o presente trabalho, inicialmente, adota uma sistemática de projeto, dentre aquelas específicas ao domínio dos componentes de plástico injetados, e apresenta uma proposta de sistemática, na forma de um detalhamento, realizado através de estudos de caso, para estas três fases da metodologia adotada, indicando métodos de avaliação e ferramentas (CAD/CAE) a serem utilizadas que, juntamente com a proposta de sistemática, constitui-se no grande resultado deste trabalho.

## *TITLE & ABSTRACT*

### **“SYSTEMATIZATION OF THE OBTAINMENT PROCESS OF THE DIMENSIONAL LAYOUT OF INJECTION MOLDED PLASTIC PARTS”**

The design of a plastic part constitute itself in a very complex task, which in some situation it calls for a lot of experience of the designer, obtained along years of hard work. What makes a plastic part design to be complex is the susceptibility in changing their properties when submitted in a certain environment. Thus, it's necessary that the designer have a good knowledge about the polymeric material properties, as well as of the environment in which the plastic part will be inserted, since the material to be used to manufacture the part will be selected taking these characteristics into account. Taking the hindrance that the design of a plastic part presents into account, mainly in which refers an appropriate selection of a material to the application as well as the realization and evaluation of the results of their structural and rheological analysis, this study, initially, takes a design methodology, among that belongs to the injected plastic part domain, and presents a proposal of a systematic approach, in the shape of a detailing, carried out through case studies, to that three stages belonging to the taken methodology, appointing evaluation methods and tools (CAD/CAE) to be used, together with the systematic proposed, constitutes itself the most important results of that study.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 . ENFOQUE DO TRABALHO

O estágio atual de desenvolvimento no setor de plásticos vem mostrando a posição alcançada por este tipo de material, na produção de bens de consumo, especialmente os obtidos pelo processo de moldagem por injeção. A indústria da moldagem por injeção vem se desenvolvendo desde meados do século 19, quando a primeira máquina injetora foi patenteada em 1872 pelo americano *John Wesley Hyatt*, composta basicamente por um cilindro aquecido a vapor, um pistão operado hidráulicamente e um bico que descarregava o material plástico fundido no molde. O molde era mantido fechado durante a injeção por uma prensa hidráulica vertical, posicionada próximo ao cilindro [1].

Desde a sua criação, os materiais plásticos têm promovido amplas e variadas oportunidades para as atividades econômicas que dependem de seu processamento. Esta variedade econômica e amplitude respondem pela produção e comercialização de uma vasta quantidade e variedade de produtos.

Os produtos de plástico injetados têm encontrado aplicação nas mais diversas áreas, especialmente nos setores automobilístico, eletroeletrônico, aeronáutico, de embalagens, médico e de peças técnicas de alta qualidade [2], devido a sua grande versatilidade, leveza, segurança e durabilidade. Segundo BLASS [2], os plásticos podem ser conformados numa grande variedade de formas complexas, promovendo soluções de projeto para milhares de aplicações, especialmente nos setores supracitados.

Assim como quaisquer produtos, aqueles fabricados com material plástico também passam por uma série de processos referentes às etapas do seu desenvolvimento, desde a sua concepção até o seu lançamento no mercado. Esses processos estão constantemente sendo aprimorados pelos profissionais envolvidos nos processos de desenvolvimento de produtos. Isto tem sido feito tanto pela otimização da organização do projeto do produto quanto pela utilização de tecnologias que aceleram todo o processo de desenvolvimento do mesmo ou parte dele [3].

No que diz respeito ao projeto de um produto existe várias metodologias que, de certa, forma fornecem uma boa orientação aos projetistas, passo a passo, sobre a melhor maneira de proceder e sobre os melhores recursos que devem ser utilizados na resolução de determinados tipos de problemas de projeto. Metodologias de projeto de produtos propostas por BACK [4], PAHL & BEITZ [5], HUBKA [6] e ULLMAN [7] são tratadas como clássicas para a condução sistemática do projeto de produto.

Um método de trabalho muito difundido e praticado hoje em dia nas empresas que desenvolvem produtos é a **engenharia simultânea** em que se cultiva um ambiente de trabalho fortemente cooperativo e multifuncional. Dentro deste ambiente estão inseridas várias outras sistemáticas de projeto, além daquelas que são aplicadas especificamente ao projeto de peças de plástico moldadas por injeção. OGLIARI [8] apresenta uma síntese das principais abordagens sobre o desenvolvimento de produtos de plástico injetados. Mesmo existindo uma série de metodologias de projeto de produtos ou até mesmo etapas de projeto que podem ser aplicados ao domínio das peças de plástico, ainda não existe uma forma consensual para este domínio, principalmente quando se trata da obtenção do leiaute dimensional das peças no projeto preliminar.

Neste sentido este trabalho procura investigar quais modelos de sistematização melhor se encaixam ao processo de obtenção do leiaute dimensional de uma peça de plástico, quais ferramentas são aplicadas a este processo e em quais etapas inserem-se estas ferramentas.

## **1.2. DELIMITAÇÃO DO CAMPO DE ESTUDO**

Uma das fases do desenvolvimento do produto é o projeto preliminar. É nesta etapa que os projetistas devem determinar o leiaute global do produto, que deve conter os arranjos gerais e compatibilidades espaciais dos elementos da solução escolhida. Além disso, deve conter também o projeto preliminar das formas, bem como a definição dos materiais e dos processos de fabricação. Estas atividades devem ser desenvolvidas e auxiliadas por desenhos em escala, os quais devem passar por uma revisão criteriosa.

A ênfase no projeto preliminar consiste na determinação das estruturas de construção dos componentes e subconjuntos do produto, ou seja, uma elaboração detalhada do princípio de solução selecionada para as funções do produto, requerendo para tal, conhecimento do domínio de aplicação e experiência dos projetistas envolvidos nesta fase.

No domínio dos componentes de plástico injetados percebe-se que não há uma sistemática consensual que possa ser aplicada ao projeto preliminar de uma peça de plástico. O que existe é uma série de metodologias aplicáveis quase que inteiramente ao projeto de sistemas técnicos, conforme as referências citadas anteriormente.

Durante a fase de projeto preliminar de uma peça ou componente de plástico alguns pontos devem ser considerados, tais como, a necessidade de se conhecer o comportamento dos materiais plásticos identificando em quais situações se torna necessária, por exemplo, realizar

uma análise de fluência (*creep*), e se necessário, onde se podem obter informações para tal análise. Considerando também se tratar de uma peça sob carregamento estático ou dinâmico, torna-se necessário efetuar uma análise para verificar a integridade estrutural da peça e a necessidade de reforçá-la para suportar tais esforços.

Como qualquer peça de plástico fabricada pelo processo de injeção, há também a necessidade de se realizar uma análise de moldabilidade para garantir o sucesso do processo de injeção. Segundo KENNEDY [9], esta análise é necessária para garantir que a peça tenha um bom acabamento superficial e para que as tolerâncias dimensionais sejam satisfeitas, uma vez que as condições sob a qual uma peça é moldada tem um efeito significativo sobre a sua qualidade.

A ausência de uma sistemática consensual para a fase de projeto preliminar de peças de plástico injetadas constitui-se uma grande deficiência para os projetistas. Há uma certa dificuldade em partindo-se do leiaute preliminar, ou seja, do modelo geométrico originado da concepção, definir o leiaute dimensional otimizado em que se têm as dimensões definitivas da peça, obtidas mediante as análises mencionadas anteriormente. Segundo GODEC *et al* [10], a prática tem mostrado que metodologias apropriadas precisam ser desenvolvidas, especialmente para projetistas jovens e inexperientes, pois elas deixam claras as definições de todas as fases de dimensionamento de uma peça tanto quanto a sua ordem de realização e a aplicação das ferramentas necessárias. Um método que permite o desenvolvimento de tais metodologias é conhecido como análise sistemática, cujos conceitos podem ser utilizados para descrever qualquer sistema.

Um outro ponto que merece atenção diz respeito à delimitação das etapas de projeto preliminar e detalhado, pois, depois da introdução de sistemas integrados ou não de CAD/CAE/CAM no processo de projeto de produtos, os limites entre estas duas etapas deixaram de ser bem visível e entendido, principalmente no caso de projeto de componentes.

Nem sempre é possível traçar um plano definitivo para o projeto preliminar, pois nele está envolvido um grande número de etapas corretivas nas quais atividades de análise e síntese se alternam e se complementam. No entanto, é possível sugerir sistemáticas gerais para orientar a equipe de projeto a desenvolver a sua tarefa. Neste contexto é que se insere o campo de estudo deste trabalho, procurando definir uma sistemática para o processo de obtenção do leiaute dimensional que possa ser aplicada ao domínio de componentes de plástico moldados por injeção, pois segundo DARE [11], as sistemáticas existentes são normalmente elaboradas com base no sistema técnico e se aplicam a diferentes domínios, sendo que são poucas as considerações feitas com relação ao projeto de componentes. Tendo em mente as

particularidades e os tipos de problemas presentes no projeto de componentes parece claro que este tipo de projeto exige uma abordagem particular daquelas desenvolvidas para atender às necessidades de projetos de sistemas técnicos. E isto explica, de certa forma, a necessidade de uma abordagem que considere as particularidades do projeto de um componente. Portanto, o processo de obtenção do leiaute final pode ser apresentado genericamente pelo esquema ilustrado na Figura 1.1, que se inicia com o modelo geométrico ou leiaute preliminar, ou seja, a peça, na sua melhor concepção, sem suas dimensões definidas e uma classe de material - exemplos de classes de materiais são: aços, ligas de alumínio, termoplásticos, termofixos, etc. A classe de materiais a ser considerada neste trabalho será a dos termoplásticos. Este modelo inicial passa por uma série de etapas referentes ao seu desenvolvimento, seguidos de uma **sistemática**, para obter então as suas dimensões finais, definidas por leiaute dimensional final.



Figura 1.1: Esquema genérico representativo do processo de obtenção do leiaute final da peça

### 1.3. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Tendo em vista as considerações apresentadas no item 1.2, o presente trabalho tem como principal **objetivo estabelecer uma proposta de sistematização do processo de obtenção do leiaute dimensional de peças de plástico moldadas por injeção na etapa de projeto preliminar.**

Para tanto o trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- 1) Desenvolver uma análise crítica das propostas de metodologia para o projeto preliminar de sistemas e componentes e síntese de modelos para a obtenção do leiaute dimensional de peças plásticas;
- 2) Apresentar uma revisão bibliográfica sobre caracterização dos materiais plásticos, discorrendo sobre as principais propriedades dos materiais plásticos e a importância de se considerar tais propriedades no projeto de uma peça de plástico moldada por injeção.
- 3) Realizar estudos de caso para identificar critérios de decisão, normalmente utilizados para análise de resultados nas etapas de simulação de integridade estrutural, de moldabilidade e seleção de materiais, dentro de uma classe previamente definida.
- 4) Detalhar a etapa de projeto preliminar proposta por DARÉ [11] em seu trabalho de mestrado, utilizando sistemas CAD/CAE.

## 1.4. CONTEÚDO DA DISSERTAÇÃO

Para melhor compreender o tema abordado este trabalho foi dividido em 7 capítulos, conforme a descrição a seguir.

No **capítulo 1**, este que se apresenta, é delineado o escopo desta pesquisa. Inicialmente apresentou-se um breve enfoque deste trabalho, que serviu para situar os leitores que o domínio de estudo desta dissertação é a das peças plásticas moldadas por injeção. Na seqüência, foi delimitado o campo de estudo ao projeto preliminar de peças plásticas injetadas, cujo objetivo é definir uma sistemática para tal tarefa.

No **capítulo 2**, é apresentada uma revisão da literatura sobre metodologias de projetos abrangendo tanto às metodologias clássicas quanto àquelas específicas para projeto de peças plásticas injetadas. Neste capítulo faz-se referência também às ferramentas e técnicas utilizadas no projeto de peças de plástico injetadas e aos assuntos referentes a sua fabricação e produção, como: ferramentas aplicadas ao projeto mecânico de peças de plástico e dos possíveis efeitos causados no componente decorrentes da moldagem por injeção.

O **capítulo 3** apresenta aspectos relevantes relacionados com a caracterização dos materiais plásticos, discorrendo a respeito das suas propriedades. O capítulo finaliza-se com a apresentação dos principais fatores que afetam as propriedades dos materiais plásticos.

No **capítulo 4** são apresentados os estudos de caso realizados, assim como seus objetivos específicos, em que as tarefas relativas à seleção de materiais, análise de resistência mecânica e reológica, mencionadas na metodologia proposta por DARÉ [11], foram aplicadas ao projeto de três componentes a fim de definir uma proposta sistemática para o processo de obtenção do leiaute dimensional de peças plásticas injetadas (Figura 1.1). Esta proposta, bem como sua descrição detalhada é apresentada no **capítulo 5**.

Finalmente, o **capítulo 6** apresenta as considerações finais do trabalho na forma de uma análise crítica da proposta apresentada no **capítulo 5**, uma conclusão e, por último, sugestões para realizações de novos trabalhos nesta mesma linha de pesquisa.

A bibliografia consultada e referenciada, bem como as informações específicas utilizadas para a realização deste trabalho são descritas na forma de referências bibliográficas (**capítulo 7**) e Anexos, respectivamente.



## **2. PROJETO DE COMPONENTES DE PLÁSTICO MOLDADOS POR INJEÇÃO**

O processo de moldagem por injeção é um processo com alta taxa de produção, que pode ser utilizado para a fabricação de peças com geometrias complexas, abrangendo uma ampla faixa de tamanhos e materiais. Este processo emergiu como o principal veículo de produção de produtos constituídos de plástico de alta qualidade e alto valor agregado. Talvez pelo fato deste grande sucesso, pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de aumentar os padrões de qualidade das peças produzidas por este processo, bem como reduzir o tempo de desenvolvimento dos produtos [12], buscando adotar para este fim, um processo de projeto sistematizado. Contudo, no domínio dos componentes de plástico moldados por injeção, não há uma sistemática consensual aplicável ao processo projeto, conforme já mencionado no primeiro capítulo. As sistemáticas referenciadas no item 1.1 são aplicáveis quase que exclusivamente ao projeto de sistemas técnicos. As propostas metodológicas existentes aplicáveis ao domínio dos componentes de plástico injetado são caracterizadas pela simultaneidade com que são conduzidas suas etapas, ou seja, estas propostas estão inseridas nos princípios da engenharia simultânea, sendo que algumas delas implementadas computacionalmente.

Neste contexto, a condução do projeto preliminar de uma peça de plástico por qualquer sistemática, prevê simulações numéricas. Incorporam-se dentro deste aspecto a análise estrutural e reológica, em que a primeira servirá para avaliar a integridade estrutural da peça, enquanto que a segunda diz respeito à determinação das condições de injeção a adotar para fabricá-la. Ambas necessitam de um modelo geométrico tridimensional “3D” modelado em um sistema CAD e são realizadas com o auxílio de programas computacionais conhecidos por sistemas CAE.

Aspectos relativos às metodologias genéricas de projeto, ao desenvolvimento de peças de plástico sob a filosofia da engenharia simultânea e ao projeto mecânico de um componente de plástico injetado serão os próximos assuntos a serem discutidos neste trabalho.

### **2.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE METODOLOGIAS DE PROJETO**

#### *2.1.1. METODOLOGIAS GENÉRICAS DE PROJETO DE PRODUTOS*

A literatura especializada em projeto de engenharia menciona diversos modelos para a condução sistemática do processo de desenvolvimento de produtos, orientando os projetistas

sobre a melhor maneira de proceder e quais recursos são empregados em cada fase da metodologia adotada. Os modelos contidos na literatura normalmente apresentam-se na forma de fluxogramas das atividades de projeto, expressando “o que” os projetistas devem fazer desde a identificação do problema até a documentação final do produto [8].

Apesar de existirem várias propostas de metodologias de projeto, cada uma delas com suas particularidades, percebe-se que todas possuem elementos similares. Segundo OGLIARI [1], as diferenças existentes entre as metodologias ocorrem normalmente na terminologia empregada pelos autores e no detalhamento dos processos de projeto. A partir das similaridades entre as metodologias clássicas, pode-se estabelecer um modelo de consenso para o projeto de produtos. Este modelo pode ser visualizado na Figura 2.1.



Figura 2.1: Modelo de consenso para o projeto sistemático de produtos [8]

De acordo com a Figura 2.1, o projeto de produtos inicia-se com as informações de mercado na qual é realizado um levantamento das necessidades dos clientes ficando claro o problema de projeto proposto, tanto sob o aspecto técnico quanto sob o gerencial. Inclui-se nos aspectos técnicos: as necessidades dos clientes, requisitos, especificações e restrições de projeto. Quanto aos aspectos gerenciais, incluem-se: prazos, objetivos, metas, recursos disponíveis, cronograma, etc. Segundo BACK e FORCELLINI [13], as necessidades levantadas nesta etapa fazem parte de um conjunto de informações que expressam de forma qualitativa, subjetiva e até mesmo vago, os desejos dos clientes. Informações nestas condições não permitem uma comunicação precisa, necessária para o desenvolvimento adequado de um produto. Segundo ainda os mesmos autores, para obter uma comunicação precisa durante o desenvolvimento do projeto de um produto, torna-se fundamental que as informações que irão caracterizar o produto estejam de acordo com a linguagem técnica de engenharia. Ou seja, o produto a ser desenvolvido deve ser descrito através de características técnicas possíveis de serem mensurados por algum tipo de sensor. Esta etapa tem sido denominada **projeto informacional** do produto, segundo proposta de FONSECA [14]. Desta etapa origina-se a lista de especificações do produto.

Na fase seguinte, desenvolve-se o **projeto conceitual** do produto, ou seja, o estabelecimento da concepção que melhor atende às especificações de projeto procurando desenvolver alternativas de solução para estas concepções, bem como a uma análise da qualidade e da viabilidade técnica e econômica destas alternativas. A melhor alternativa encontrada para a concepção é caracterizada através de esquemas ou esboços.

Concluída a fase de projeto conceitual do produto, a fase seguinte é a de **projeto preliminar** em que se procura estabelecer os arranjos, principais parâmetros dimensionais e a otimização da concepção estabelecida no projeto conceitual. As atividades típicas desta etapa do processo são: cálculos matemáticos, análises e simulações numéricas, escolha definitiva da melhor solução, definições de dimensões e tolerâncias, otimização dos parâmetros de projeto, seleção de itens padrões, seleção do material, modelamento em sistema CAD, prototipagem e testes funcionais. O resultado é a obtenção do desenho do produto técnica e economicamente aprovados, com arranjos e formas bem definidas, de modo a satisfazer aos requisitos de projeto.

Por último, tem-se o **projeto detalhado** do produto, na qual resulta toda documentação que caracteriza com detalhes as soluções desenvolvidas e que possibilitam a sua realização física [8]. De acordo com DARE [11], nesta fase são adicionados os últimos detalhes, com instruções suficientes para que não restem dúvidas no momento da fabricação, testes de qualidade, montagem, embalagem, expedição e utilização do produto. As cotas são verificadas, as últimas tolerâncias e os níveis de acabamento superficial são definidos. Pode-se fazer também estimativas de custos mais precisas. Como resultado, tem-se toda documentação necessária para que o produto possa ser fabricado, montado, embalado e expedido. Os manuais de operação também podem ser elaborados nesta etapa.

Como foi mencionadas anteriormente, as metodologias clássicas de projeto de produtos normalmente são aplicáveis quase que inteiramente ao projeto de sistemas técnicos em diferentes domínios, sendo que são poucas as considerações feitas com relação ao projeto de componentes. DARE [11] faz algumas considerações quanto à adequação das metodologias genéricas ao projeto de componentes de plástico injetados. Este autor considera que o projeto de componentes deva ser tratado de uma forma particular, justificando o estudo e proposições de metodologias específicas, embora se possa utilizar muitas recomendações e ferramentas propostas pelas metodologias genéricas. O autor ainda apresenta uma síntese das diferenças básicas entre o projeto de sistemas técnicos e projeto de componentes.

Considerando a necessidade de uma abordagem mais específica para o projeto de componentes de plástico injetado, pesquisadores propuseram algumas sistemáticas, sendo que a maioria delas seguem a filosofia imposta pela engenharia simultânea, na qual suas etapas são realizadas simultaneamente. Alguns autores como MALLOY [15], BACK [16], DEFOSSE *et al* [17] e BEITER [18] justificam que a condução do processo de desenvolvimento dentro de um ambiente de engenharia simultânea é fundamental para corresponder as atuais exigências em relação à redução no tempo de desenvolvimento de novos produtos.

## 2.2. DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES DE PLÁSTICO SOB OS PRINCÍPIOS DA ENGENHARIA SIMULTÂNEA

Tradicionalmente, como qualquer produto, aqueles feitos de plástico também eram desenvolvidos utilizando sistemáticas seqüenciais de projeto como pode ser visualizado segundo a Figura 2.2.

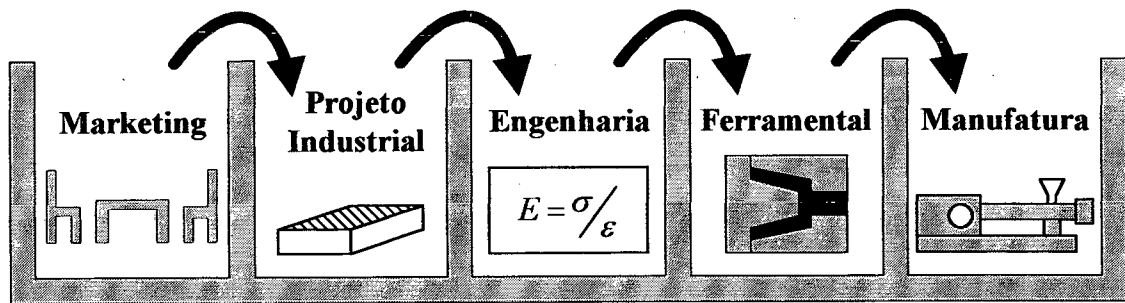


Figura 2.2: Método seqüencial de projeto de uma peça plástica [15]

Hoje em dia, muitas empresas que desenvolvem novos produtos e que seguiam as abordagens seqüenciais de projeto estão migrando para um ambiente de desenvolvimento de produtos, na qual se utilizam sistemáticas em que suas etapas são executadas de forma simultânea. Neste contexto de trabalho, é conhecida por **engenharia simultânea (ES)**, cultiva-se uma filosofia de trabalho fortemente cooperativa e multifuncional.

Citado por OGLIARI [8], Smith considera que o termo engenharia simultânea é aplicado para uma filosofia de cooperação multifuncional no projeto de engenharia, a fim de criar produtos que sejam melhores, mais baratos e introduzidos no mercado mais rapidamente. Sob estes preceitos, os princípios básicos considerados por Smith são:

- as restrições do projeto funcional e da manufatura devem ser tratadas simultaneamente;
- a combinação de pessoas com diferentes experiências, num mesmo grupo, é um modo adequado para considerar diferentes bases de conhecimento;
- os engenheiros projetistas devem manter em mente as preferências dos consumidores durante o processo de projeto e;
- deve-se manter em mente que o tempo para o mercado é um fator determinante para o sucesso do produto.

Segundo SCHÜTZER e SOUZA [19], a engenharia simultânea é uma estratégia industrial que tem permitido as indústrias reduzirem o seu tempo de desenvolvimento de produto, unindo esforços de diversos profissionais e/ou empresas com diferentes especialidades, que trabalham em grupo de forma cooperativa. MALLOY [15] considera que a grande vantagem

da engenharia simultânea é a habilidade de se ter grupos de projeto e desenvolvimento trabalhando em paralelo. A partir destas considerações, MALLOY [15], BACK [16] e SCHÜTZER e SOUZA [19] concordam que o objetivo da engenharia simultânea é reduzir o custo do ciclo de vida do produto, melhorando a qualidade do mesmo, diminuindo o tempo de desenvolvimento do produto e a reduzindo o tempo de sua introdução no mercado, já que este fator é o que determina seu sucesso.

A engenharia simultânea é, portanto, o resultado da integração entre diversos departamentos como: marketing, vendas, projeto do produto, planejamento do processo, produção, montagem, controle de qualidade, etc. Empresas trabalhando dentro desta filosofia já conseguiram algumas vantagens competitivas, como pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Vantagens competitivas conquistadas com a introdução da engenharia simultânea [19]

Tempo de Desenvolvimento	30 – 50 % menor
Mudanças de Engenharia	60 – 95 % menor
Refugos e Retrabalhos	75 % de redução
Defeitos	30 – 85 % menor
Tempo de introdução do Produto no Mercado	20 – 90 % menor
Frequência de Falha de Componentes	60 % menor
Qualidade em Geral	100 – 600 % maior

Na implantação de um ambiente de engenharia simultânea três abordagens são consideradas, que são: a engenharia simultânea com base em equipes multifuncionais, a engenharia simultânea com base na infra-estrutura informatizada e a engenharia simultânea com base em sistemas especialistas. A primeira busca os vários aspectos do ciclo de vida do produto desde as etapas iniciais do projeto através de formação de equipes. A segunda abordagem procura atingir o mesmo objetivo, mas empregando meios de comunicação, redes de informações e softwares conectados em rede. Por último, a terceira abordagem baseia-se no registro e recuperação das informações como forma de compartilhar o conhecimento e integrar as funções ou áreas de conhecimento [8, 11].

A implantação da filosofia de trabalho da engenharia simultânea em uma empresa, por qualquer uma das abordagens comentadas anteriormente não alcançará o seu sucesso se não for cultivado um ambiente extremamente comunicativo entre as equipes multifuncionais. DEFOSSE *et al* [17] consideram que o sucesso da engenharia simultânea depende fortemente da comunicação realizada entre as equipes de trabalho, entre os próprios integrantes das equipes, entre empresas fornecedoras de matéria-prima ou de suporte técnico e até mesmo entre sistemas.

Os autores acreditam que a comunicação realizada frequentemente entre os membros das equipes é essencial para minimizar os riscos de transpor etapas das atividades de projeto.

Independente do nível tecnológico, da complexidade e da abordagem da engenharia simultânea adotada, o ciclo de desenvolvimento de um componente de plástico injetado é muito longo e requer a aplicação de várias áreas do conhecimento técnico. Conforme ilustrado na Figura 2.3, pode-se dividi-lo em três fases distintas: o projeto do componente, o projeto e a fabricação do molde e o projeto do processo de fabricação do componente [20].



Figura 2.3 : Ciclo de desenvolvimento de componentes de plástico injetados [20]

Trata-se, portanto, de um processo de desenvolvimento se justifica a adoção de um ambiente de engenharia simultânea, pois: é um processo intrinsecamente multidisciplinar dividido em três grandes fases distintas e com forte inter-relação; é normalmente executado por mais de uma empresa e ocorre, atualmente, pouca iteração entre as fases e empresas envolvidas [19]. O projeto do processo de fabricação envolve a determinação dos parâmetros de processo e somente é concluído com a fabricação e aprovação do lote piloto.

No domínio específico do projeto de componentes de plástico moldados por injeção, existem várias propostas recentes para o desenvolvimento do processo ilustrado na Figura 2.3. Dentre as mais conhecidas, tem-se: MALLOY [15], BACK [16], DEFOSSE *et al* [17], e BEITER *et al* [18]. Estas propostas como as outras, consideram o projeto de componentes de plástico injetados sob diversos enfoques dentro de um ambiente de engenharia simultânea [20].

É importante salientar que a maioria das propostas não esclarece como ocorre o projeto conceitual do componente. As decisões de projeto e as ferramentas de apoio têm como base apenas a geometria e a moldabilidade do componente, visando um melhor projeto para fabricação. Considerações quanto ao projeto conceitual de componentes de plástico injetado podem ser encontrados em OGLIARI [8].

Segundo DARE [11], as características do segmento de desenvolvimento e produção de componentes de plástico injetados requerem procedimentos de trabalho mais integrado, ao mesmo tempo em que se constitui barreira para a implantação de um ambiente de engenharia simultânea. Dentre estas barreiras pode-se considerar a fragmentação do processo de

desenvolvimento entre as organizações e a multidisciplinaridade do processo de desenvolvimento de componentes de plástico injetados.

Quanto às formas de implantação de um ambiente de engenharia simultânea no setor de desenvolvimento e produção de componentes de plástico injetados, DARE [11] considera o seguinte: implantação da engenharia simultânea com base em equipes, implantação da engenharia simultânea com base em sistemas especialistas e a implantação da engenharia simultânea com base em meios para a comunicação.

As propostas metodológicas apresentadas por MALLOY [15], BACK [16], DEFOSSE *et al* [17] e EASTMAN e SMITH [21] são fundamentadas nos preceitos da engenharia simultânea com base na formação de equipes.

MALLOY [15] sugere uma abordagem paralela de execução das atividades de desenvolvimento de componentes de plástico injetados, como uma alternativa ao tradicional processo seqüencial de desenvolvimento de produtos, como está ilustrado na Figura 2.4.

A principal vantagem de se adotar uma abordagem com execução paralela das atividades, se comparada com a execução convencional, é a redução significativa do tempo de lançamento do produto no mercado. Para isto MALLOY [15] propõe as seguintes etapas associadas ao projeto e fabricação de componentes de plástico, as quais podem ser executadas paralelamente:

- 1) Definição dos requisitos do usuário final;
- 2) Criação de um esquema preliminar do produto;
- 3) Seleção inicial de materiais;
- 4) Projeto do componente de acordo com as propriedades do material;
- 5) Seleção final de materiais;
- 6) Modificações do projeto para a fabricação;
- 7) Prototipagem e;
- 8) Produção.

A aplicação dos sistemas CAD nesta abordagem está inserida na etapa dois, enquanto que os sistemas CAE inserem-se na etapa de projeto do componente de acordo com as propriedades do material.

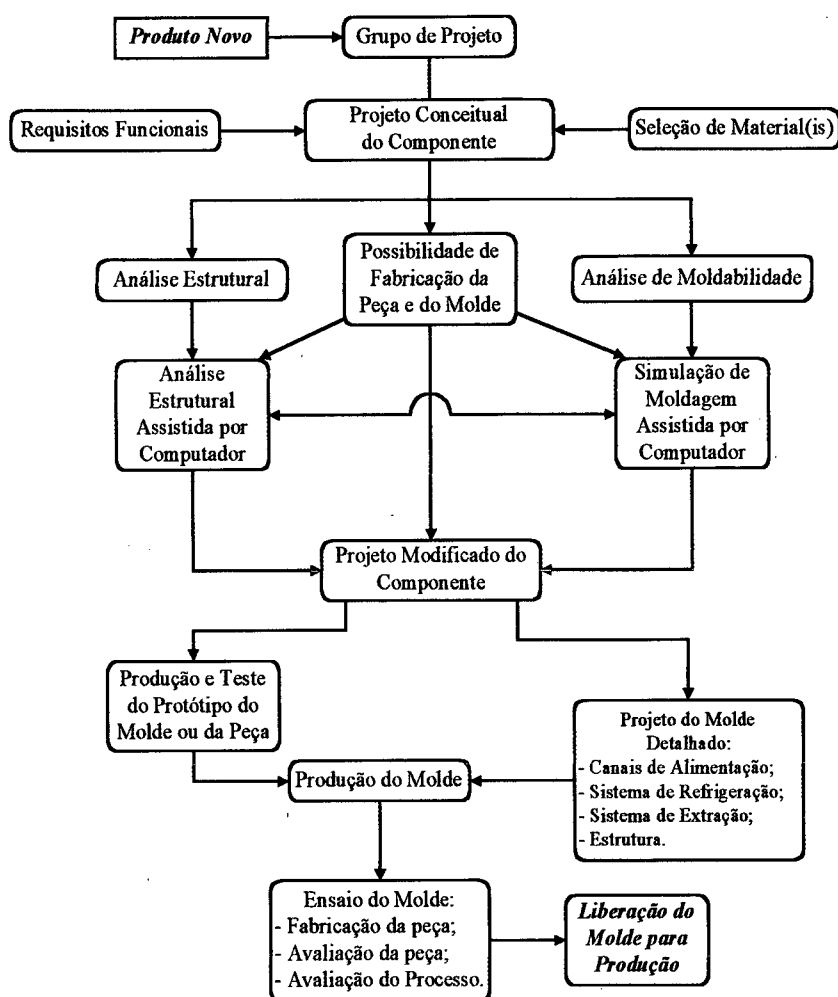


Figura 2.4: Engenharia simultânea no processo de projeto de peças de plástico injetadas e do molde de injeção [15]

DEFOSSE *et al* [17] propõem um procedimento com base nos princípios da engenharia simultânea tendo como objetivo, a redução do ciclo de desenvolvimento de componentes de plástico injetados com geometria complexa. Resumidamente as atividades propostas pelo autor para alcançar seus objetivos são:

### 1) Projeto Preliminar do Componente:

- entendimento do conceito do componente fornecido pelo cliente;
- discussão em equipe sobre o cronograma, métricas de projeto e características gerais do componente;
- comunicação à equipe responsável pela simulação sobre o projeto e o cronograma;
- aproximação da geometria da peça (modelamento CAD);
- seleção e envolvimento do fornecedor de matéria-prima;



- estabelecimento dos requisitos funcionais de projeto;
- seleção de um conjunto de materiais candidatos;
- utilização de ferramentas CAE;
- seleção do fornecedor do molde;
- envio do modelo preliminar e resultados da simulação de moldagem ao fabricante do molde para revisão;
- revisão de projeto e sugestões de alteração por parte do fornecedor do molde e;
- nova simulação da moldagem com as alterações de projeto possivelmente realizadas.

### **2) Projeto Detalhado do Componente:**

- detalhamento do desenho do componente;
- simulação da moldagem com geometria detalhada;
- envio dos desenhos ao fabricante fornecedor do componente para que seja construído o protótipo e;
- envio dos desenhos detalhados ao fabricante do molde.

### **3) Projeto do Molde:**

- elaboração do projeto preliminar do molde;
- revisão e aprovação do projeto preliminar do molde e;
- projeto detalhado do molde.

### **4) Fabricação do Molde:**

- usinagem da cavidade e fabricação de algumas partes do molde;
- sistema de refrigeração;
- sistema de ventilação – saída de gases;
- sistema de extração;
- sistema de alimentação – opção por câmara quente ou convencional;
- acabamento do molde;
- montagem do molde e;
- try out dos moldes.

### **5) Produção do Componente:**

- produção do lote piloto e;
- retrabalhos e aprovação dos componentes.

Os autores apresentam ainda uma tabela ilustrando a simultaneidade entre as atividades de cada etapa.

A proposta metodológica para o desenvolvimento de produtos injetados proposto por BACK [18] enfatiza a redução do tempo de introdução de novos produtos no mercado. Esta proposta é desdobrada em onze fases, que são:

- Projeto informacional do produto;
- Projeto conceitual do produto;
- Projeto preliminar do produto;
- Projeto detalhado do produto;
- Projeto conceitual do molde;
- Projeto preliminar do molde;
- Projeto detalhado do molde;
- Fabricação do molde;
- Testes de avaliação de desempenho do molde na máquina injetora;
- Planejamento/projeto do processo de injeção;
- Processamento após a injeção.

DARÉ [11] apresenta uma tabela que relaciona as etapas de projeto propostas por BACK [16] com os dados de entrada de cada etapa, as ferramentas e métodos utilizados e os dados de saída das respectivas etapas.

Uma abordagem diferente é apresentada por EASTMAN e SMITH [21]. Estes autores consideram que a maneira mais rápida de se desenvolver um componente de plástico injetado inicia-se pela seleção dos fornecedores de suporte técnico e dos membros das equipes multifuncionais. Estas equipes devem ser formadas com representantes das empresas ou unidades responsáveis pelo projeto do componente, projeto e fabricação do molde e a responsável pela injeção da peça. Depois de realizada esta seleção os grupos de projetistas deverão a chegar a um consenso sobre os fatores básicos que influenciam o projeto do componente, podendo então dar início ao projeto do componente e do molde de forma simultânea. A proposta dos autores comparada com a seqüência de atividades adotada por grande parte das empresas do setor é ilustrada na Figura 2.5.

Algumas empresas já atuam desta maneira, apesar de serem poucas devido ao fato de que é difícil para o setor da engenharia e para o setor de compras da empresa, aceitar a idéia de selecionar fornecedores sem ter o projeto definido, sem ter um orçamento, apenas com estimativas de preços [21].

Como pode ser visto segundo a Figura 2.5, EASTMAN e SMITH [21] não evidenciam o conteúdo de cada etapa. No entanto a utilização das ferramentas CAD e CAE estão inseridas na etapa de projeto simultâneo do componente e do molde (Figura 2.5).



Figura 2.5: Proposta de abordagem para o processo de desenvolvimento rápido comparado ao processo tradicional [21]

Dentre as abordagens para o projeto de componentes sob os preceitos da engenharia simultânea com base no auxílio de sistemas especialistas pode-se destacar a proposta de BEITER *et al* [18]. Estes autores consideram que durante a etapa de projeto preliminar são realizadas a seleção do material, a definição da geometria do componente e as implicações sobre os custos de produção. Os autores baseiam-se em trabalhos já publicados sobre seleção de materiais, análise de preenchimento de cavidades e análises de tensões e definem uma abordagem de projeto para o domínio dos componentes de plástico injetados, e a implementam através de um programa computacional que auxilia na escolha do material e da melhor geometria, considerando aspectos funcionais, de produção e econômicos. A Figura 2.6 ilustra de forma esquemática a abordagem de projeto proposta pelos autores.

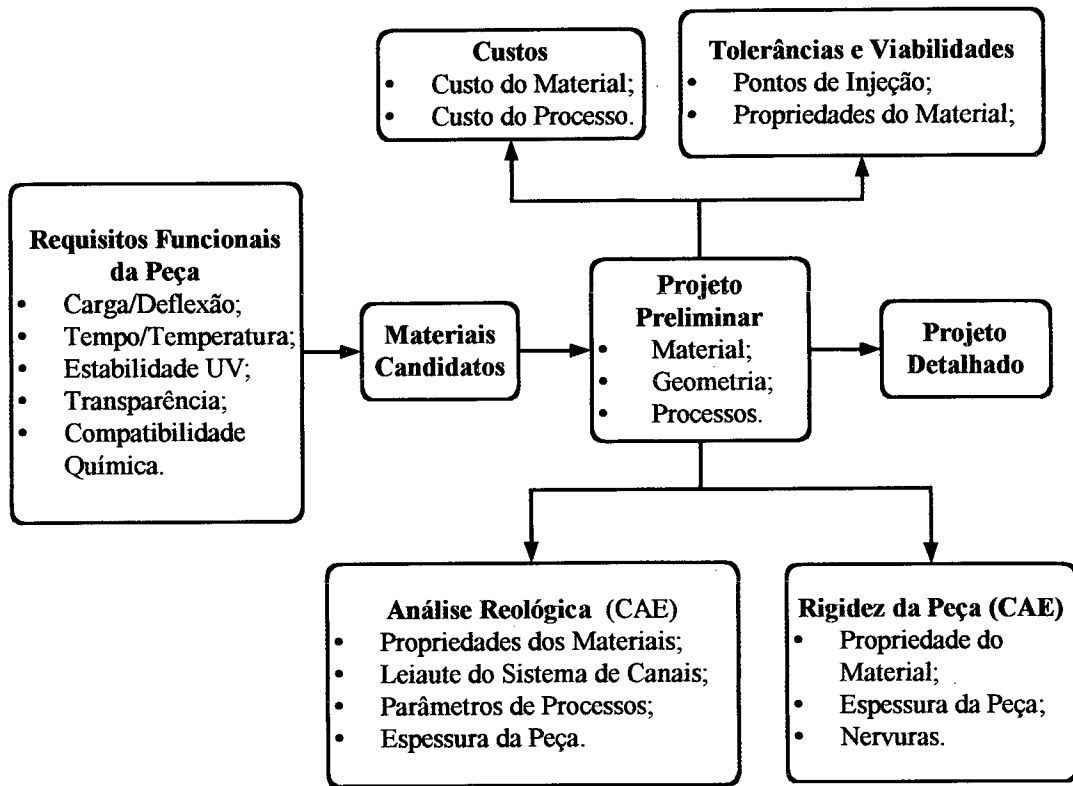


Figura 2.6: Representação da abordagem de projeto proposta por BEITER *et al* [18]

De acordo com a abordagem representada pela Figura 2.6, a análise reológica facilita a obtenção da boa qualidade superficial da peça além da manutenção das suas tolerâncias dimensionais. Peças mais rígidas implicam em uma melhor segurança, pois esta rigidez assegurará que a peça suporte carregamentos a que estará submetida. Outro ponto muito importante é o que diz respeito aos custos de produção. Peças fabricadas com os menores custos possíveis tornam-se mais competitivas no mercado.

DARÉ *et al* [20] também propõem uma sistemática para o projeto de peças de plástico injetadas tendo por base o desenvolvimento integrado do produto onde se consideram os vários parâmetros relacionados com o ciclo de desenvolvimento, desde as etapas iniciais de projeto. A Figura 2.7 representa o fluxo das atividades dentro desta abordagem.

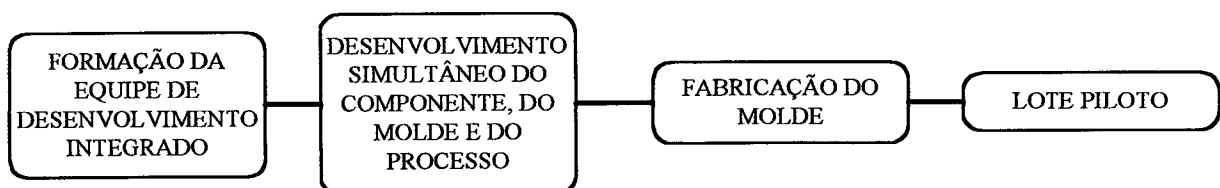


Figura 2.7: Processo de desenvolvimento simultâneo [20]

Propõe-se considerar na etapa de projeto não só o projeto do componente, mas também o desenvolvimento do molde e do processo. Nesta abordagem a primeira atividade passa a ser a formação de equipes multifuncionais, denominadas pelos autores de Equipes de Desenvolvimento Integrado (EDI). Esta equipe deve ser formada por representantes de todo o ciclo de desenvolvimento, além de fornecedores [20]. A seleção de fornecedores deve preceder às atividades de projeto como consideram EASTMAN e SMITH [21].

A GE PLASTIC [22] também apresenta uma sistemática para o projeto de peças de plástico muito semelhante àquela apresentada por MALLOY [15]. A GE PLASTIC [22] considera que durante todo o processo de projeto do componente, aspectos funcionais e relativos ao material selecionado devem ser considerados. Os aspectos funcionais estão relacionados à produção e à montagem do componente. Fatores relativos ao material dizem respeito ao seu desempenho durante a vida útil da peça. Este desempenho, que incluem resistência e fraquezas, deve ser investigado para fornecer o início do processo de projeto. As etapas propostas são:

### **1) Estabelecimento dos requisitos de projeto.**

#### **1.1) Previsão dos possíveis esforços a que o componente estará submetido.**

- Tipos de solicitações;
- Taxa de aplicação dos esforços;
- Duração dos esforços;
- Carregamentos dinâmicos;
- Vibrações e etc.

#### **1.2) Previsão das condições ambientais de utilização do componente.**

- Temperaturas extremas;
- Ambiente quimicamente reativo;
- Radiação ultravioleta.

#### **1.3) Operações secundárias de uso e montagens.**

#### **1.4) Levantamento de custos.**

#### **1.5) Cumprimento de padrões e normas técnicas.**

### **2) Estabelecimento do projeto preliminar**

#### **3) Seleção do material, levando em consideração:**

- Propriedades mecânicas usadas essencialmente para projeto de componentes (limite elástico do material, coeficiente de Poisson, limite de fadiga, coeficiente de dilatação térmica, coeficiente de atrito, condutividade térmica, densidade e coeficiente de contração volumétrica);

- Outras propriedades relevantes (dureza, resistência ao impacto, resistência química, resistência à umidade, resistência à abrasão, ductilidade, flamabilidade e propriedades elétricas).

**4) Modificação do projeto. Se necessário, três aspectos devem ser considerados.**

- Limitações do processo (espessura de parede versus comprimento de fluxo);
- Utilização de componentes de montagem (adesivos, snap-fits) e;
- Custos de modificação e seu impacto sobre os custos do componente.

**5) Utilização de ferramentas CAD/CAE para modelar tridimensionalmente o componente e encontrar as espessuras mínimas estrutural e reológica.**

**6) Construção de um protótipo utilizando as modernas técnicas de prototipagem rápida ou usinagem CNC.**

**7) Realização de teste finais simulando o serviço e a estocagem do componente.**

No que diz respeito aos custos de modificações durante o desenvolvimento de um produto, a Figura 2.8 mostra que quanto mais tarde se fizer modificações no projeto, os custos para desenvolver o produto serão maiores, logo o produto será lançado no mercado com um elevado preço, não se tornando competitivo.

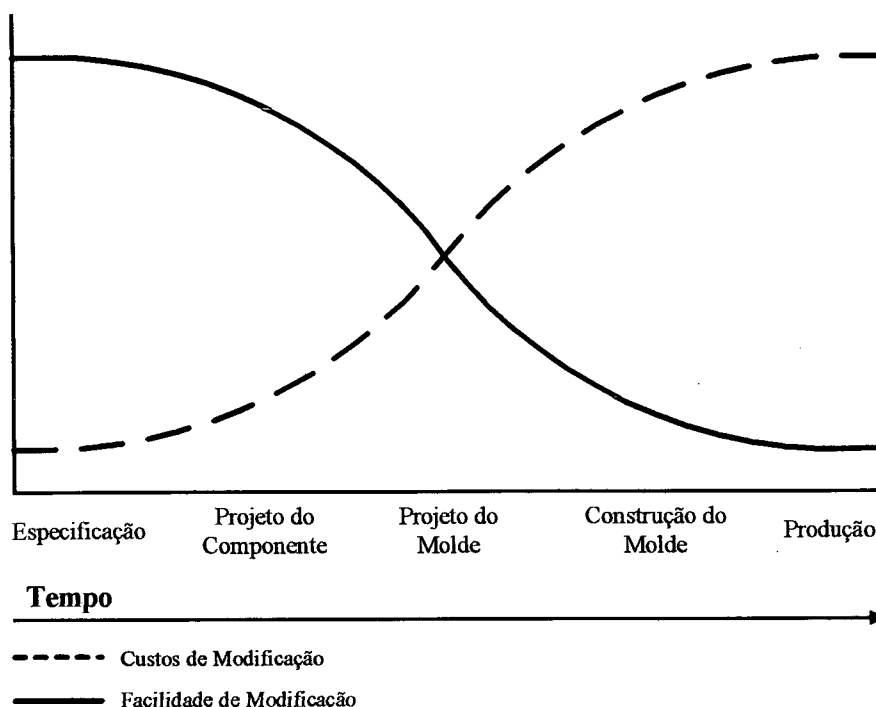


Figura 2.8: Influência das modificações sobre os custos de desenvolvimento [22]

BOLUR [23] também propõe uma abordagem que leva em consideração tanto o projeto do componente plástico quanto do molde. As etapas, propostas por este autor, que podem ser executadas sequencial ou simultaneamente, são:

- 1) Definição dos requisitos de projeto;
- 2) Criação do modelo sólido utilizando sistemas CAD;
- 3) Seleção inicial de materiais;
- 4) Projeto do componente de acordo com o material selecionado utilizando sistemas CAD/CAE.
- 5) Seleção final de materiais;
- 6) Análise de preenchimento da cavidade;
- 7) Modificação do projeto do ponto de vista da manufatura utilizando os resultados da análise do item 6;
- 8) Utilização dos resultados do item 6 para otimizar as dimensões dos canais de injeção e para balancear o fluxo;
- 9) Utilizar bancos de dados para selecionar placas porta moldes e placas para usinagem de macho/cavidades e outros componentes padronizados para o projeto do molde;
- 10) Projeto de gavetas, mecanismos para roscas, etc. utilizando, se necessário, os sistemas CAD;
- 11) Utilização de sistemas CAE para projetar o sistema de refrigeração, a fim de se obter uma temperatura o mais uniforme possível na superfície do molde;
- 12) Incorporar detalhes do sistema de refrigeração no projeto do molde;
- 13) Incorporar o sistema de extração no projeto do molde;
- 14) Obtenção dos modelos de montagem do molde, do componente e da lista de materiais.

STRONG [24], por sua vez, estabelece um conjunto de sete etapas:

- 1) Reconhecimento das necessidades;
- 2) Especificação das funções do componente;
- 3) Geração e avaliação do conceito (projeto conceitual);
- 4) Projeto mecânico do componente;
- 5) Projeto a planejamento do processo de fabricação;
- 6) Produção e verificação do protótipo e;
- 7) Implementação da produção.

Nesta abordagem, propõe que uma abordagem nas quais uma parte das etapas é realizada de forma seqüencial e outra de forma simultânea. A parte realizada seqüencialmente refere-se ao projeto mecânico da peça e ao projeto e planejamento do processo de fabricação, em que é projetado o molde e determinados as condições de processamento. A Figura 2.9 ilustra, de forma esquemática, como as etapas se inter-relacionam.

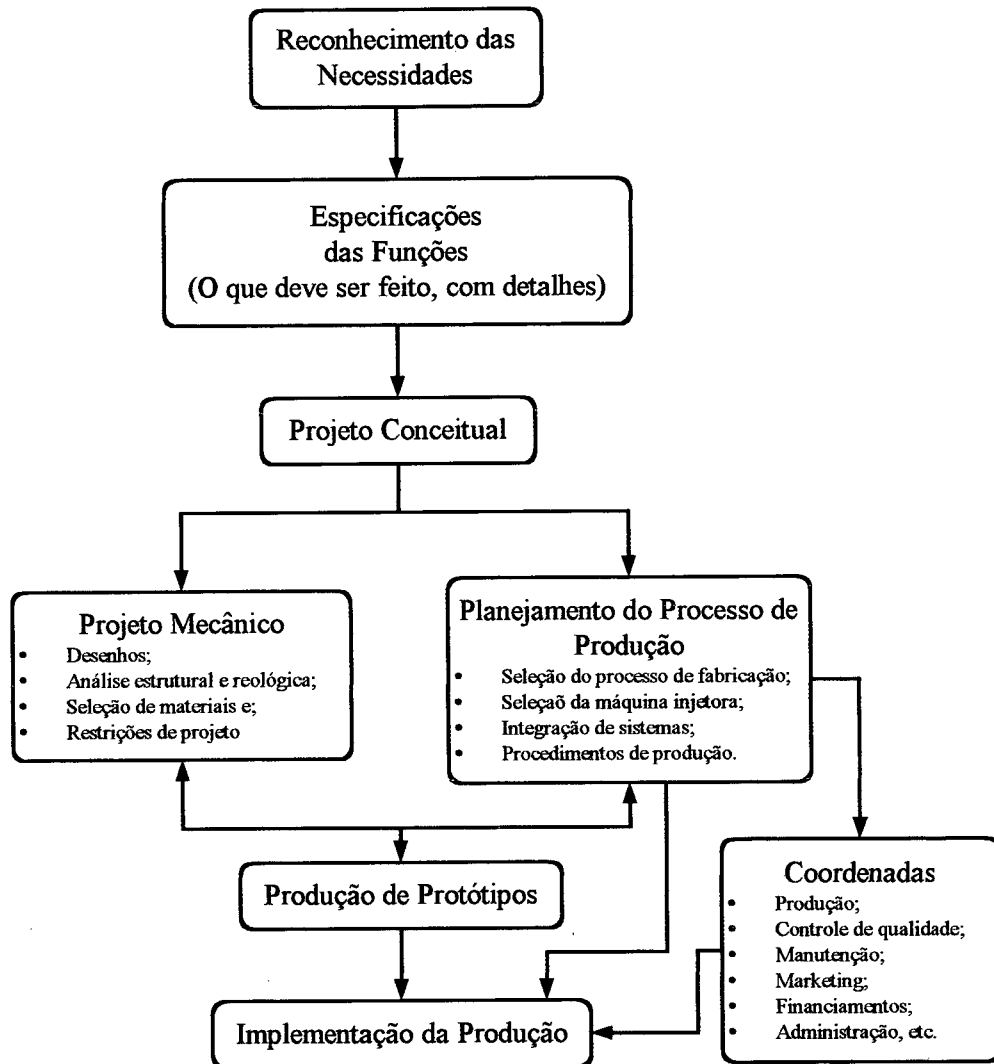


Figura 2.9: Processo de desenvolvimento de um produto plástico segundo STRONG [24]

Segundo STRONG [24], desenvolver o projeto mecânico do componente em paralelo ao projeto do processo de fabricação é a melhor forma de proceder, pois o tempo de desenvolvimento é reduzido, bem como a possibilidade de ocorrer erros. A referência [25] propõe uma sistemática que considera apenas o projeto do componente. As etapas recomendadas são:

- 1) Preparação de uma lista completa de requisitos de projeto;
- 2) Realização de uma seleção inicial de materiais;
- 3) Detalhamento do projeto e realização de uma análise estrutural considerando a viscoelasticidade do material;
- 4) Construção de protótipos, a fim de qualificar o projeto e;
- 5) Realização de testes para avaliar o projeto.

Segundo [25], a lista de requisitos deve conter informações referentes aos requisitos estruturais, fatores ambientais, aparência do componente, montagem, normas técnicas e custos.



Os requisitos estruturais devem ser considerados primeiramente, ou seja, as tolerâncias dimensionais e deflexões permissíveis devem ser definidas e os carregamentos e a vida útil do componente determinado. Os fatores ambientais, como exposição a substâncias químicas ou outro tipo de exposição, como solar e à umidade devem ser considerados em seguida, sendo então sucedido dos requisitos estéticos, de montagem e por fim, econômicos. A preparação da lista de requisitos pode prevenir surpresas indesejáveis no decorrer do projeto.

A seleção inicial de materiais é realizada utilizando a lista de requisitos. Inicialmente uma série de materiais pode ser selecionada a partir dos requisitos listados e depois alguns deles são continuamente eliminados utilizando os requisitos mais específicos.

O passo seguinte é o projeto detalhado do componente, que envolve dois passos. Primeiro, a peça deve ser projetada visando a sua produção, ou seja, a espessura da peça é determinada a fim de fornecer boa rigidez ao componente e não comprometer a qualidade das peças produzidas. Posteriormente, é realizada a análise estrutural do componente, considerando a natureza viscoelástica característica dos materiais poliméricos. Realizada a análise estrutural sucede-se a criação de protótipos e finalmente a realização de testes para avaliar a qualidade do componente.

É possível que esta proposta tenha sido desenvolvida para projetistas com uma certa experiência, pois a mesma não deixa explicitamente clara a indicação da realização de uma análise reológica, em que serão determinados os parâmetros do processo de moldagem. Os autores apenas indicam que ao se utilizar uma certa espessura a qualidade da peça estará garantida, mas uma pergunta permanece: qual espessura utilizar? Esta não é uma pergunta fácil de ser respondida, pois depende da aplicação e só os projetistas mais experientes tem condições de determinar uma espessura sem a necessidade de realizar uma análise reológica.

Já a metodologia proposta por DARÉ [11] possui a desvantagem de ser bem abrangente, pois engloba todas as fases de desenvolvimento de um produto de plástico injetado, indo desde o projeto informacional até o projeto e fabricação do molde do componente, sendo que este último é realizado em paralelo ao projeto preliminar do componente. Trata-se de um modelo de referência que, embora abrangente, possui o inconveniente de não apresentar um maior detalhamento das tarefas da etapa de projeto preliminar do componente, conforme pode ser verificado na Figura 2.10. Seja qual for a metodologia ou sistemática adotada, entre as diversas discutidas até o presente momento, verifica-se que em se tratando da etapa de projeto preliminar há um consenso no sentido de se empregar ferramentas computacionais como CAD e CAE. No modelo de referência proposto por DARÉ [11], esta constatação é referenciada pelas tarefas 1.3.3 a 1.3.6, da Figura 2.10, responsáveis pela determinação das dimensões (leiaute dimensional) do componente. A este conjunto de tarefas é possível denominar de projeto mecânico do componente, assunto a ser discutido mais detalhadamente no item a seguir.

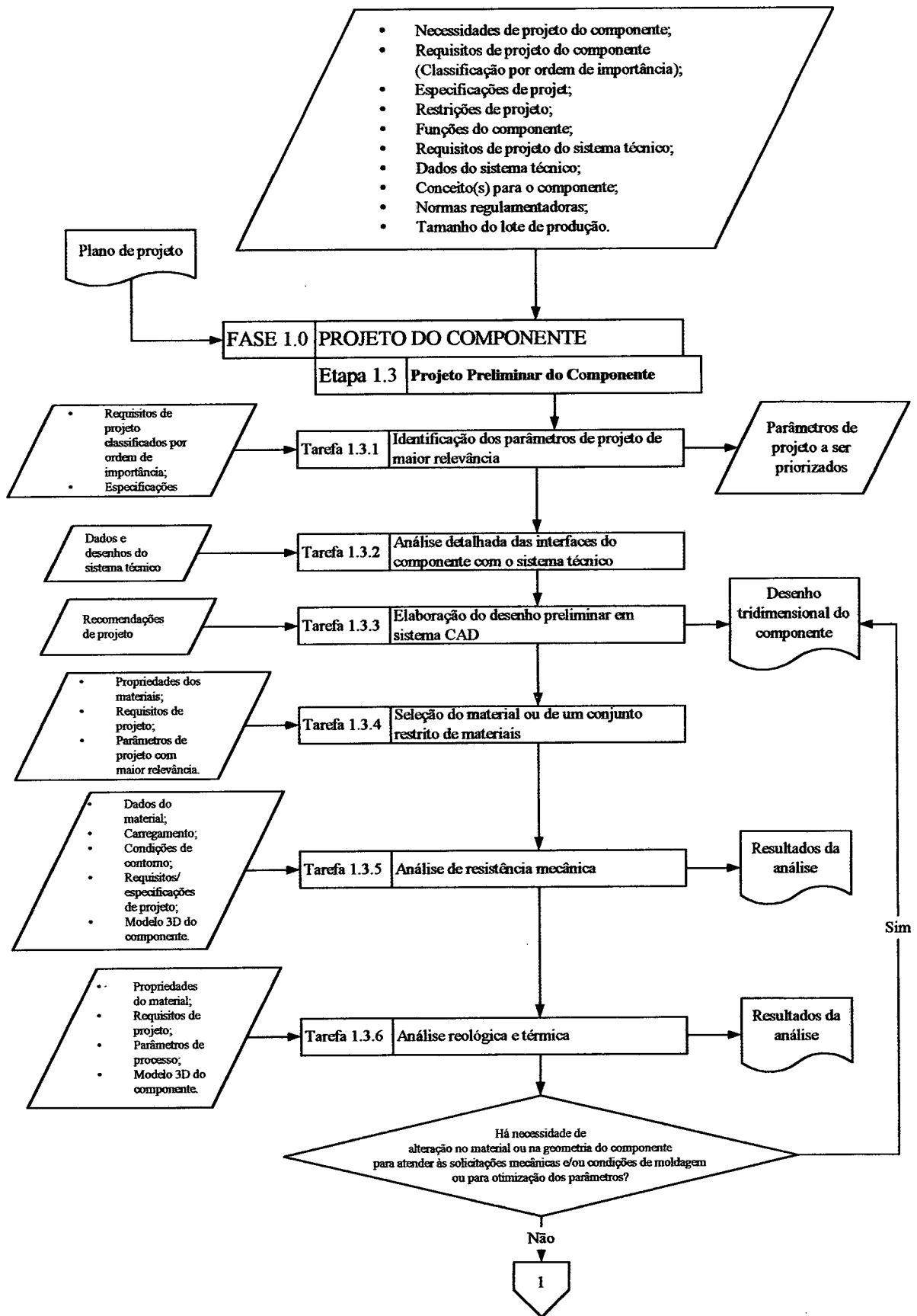


Figura 2.10: Etapa de projeto preliminar de componentes de plástico injetados segundo DARÉ

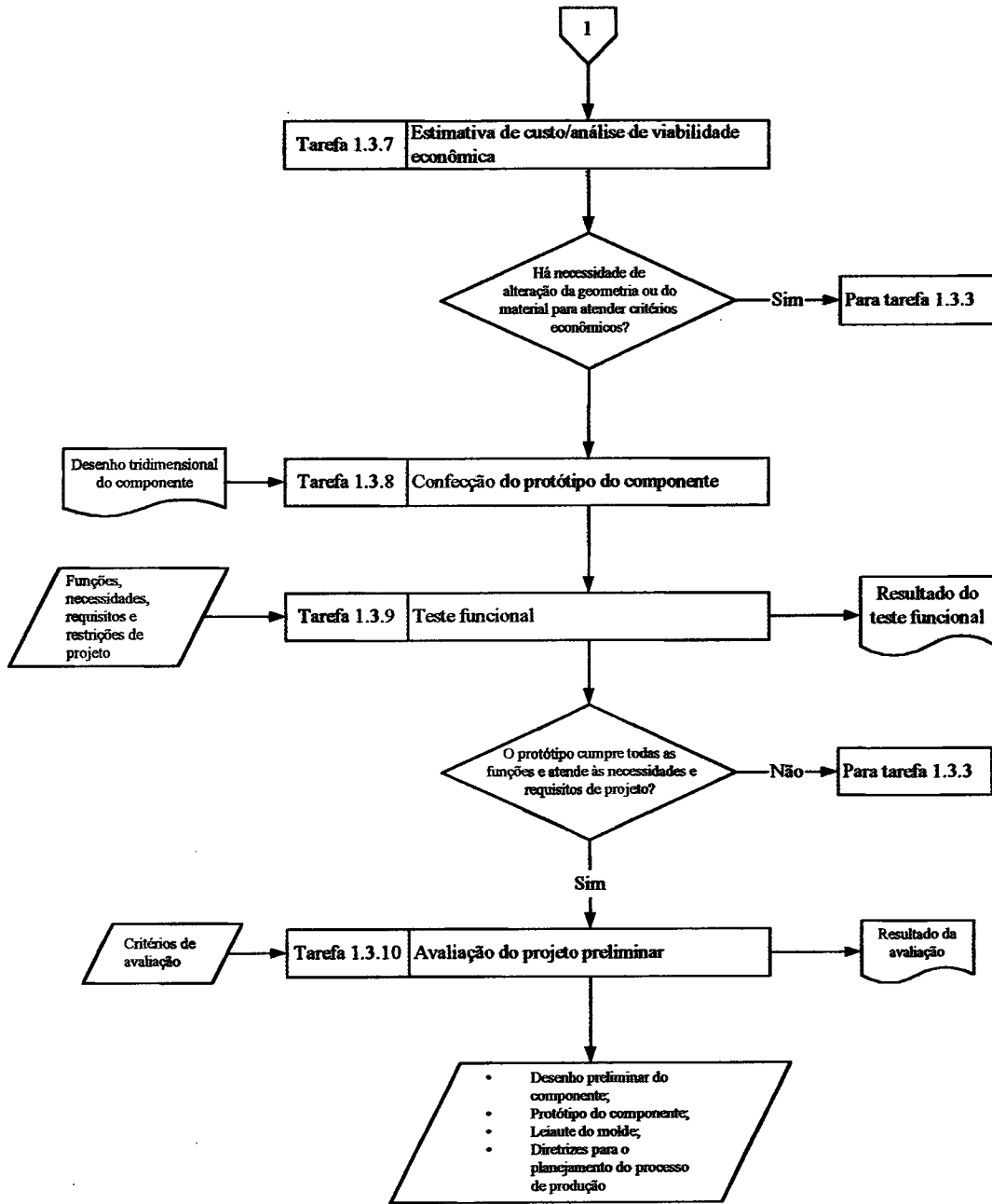


Figura 2.10: Etapa de projeto preliminar de componentes de plástico injetados segundo DARÉ [11] (continuação)

### 2.3. PROJETO MECÂNICO DE UM COMPONENTE DE PLÁSTICO INJETADO

O projeto mecânico de um componente de plástico é influenciado por fatores relativos ao tipo de material, condições de manufaturabilidade e os relacionados ao serviço para o qual o componente foi projetado. É necessário avaliar a confiabilidade estrutural do componente para garantir a sua integridade durante toda a sua vida útil [15]. Em se tratando de uma peça de

plástico, a avaliação da moldabilidade do componente torna-se importante, pois, segundo DARÉ [11], esta avaliação não só evita os problemas que normalmente ocorrem na produção, antecipando e anulando as suas causas, mas também garante a qualidade do componente e o atendimento às especificações de projeto, uma vez que as condições sob a qual uma peça é moldada tem um efeito significativo sobre estas propriedades.

Dentre as atividades de projeto mecânico de um componente de plástico injetado merece destaque o modelamento CAD, a seleção de materiais e a análise estrutural e reológica, realizadas mediante simulações em sistemas CAE. O modelamento CAD, também denominado prototipagem virtual, precede todas as etapas de simulação e análise utilizando ferramentas numérico-computacionais, além de fornecer as primeiras aproximações das dimensões da peça. É importante considerar que o grau de necessidade de realizar atividades de análise estrutural e reológica depende do objeto de projeto e da equipe de desenvolvimento.

### *2.3.1. PROTOTIPAGEM VIRTUAL (MODELAMENTO CAD)*

As definições referentes aos sistemas CAD são as mais variadas, variando também a abordagem que cada autor fornece.

GROOVER [26] fornece uma definição mais geral sobre os sistemas CAD. O autor define CAD como qualquer atividade de projeto que envolve o uso efetivo do computador para criar, modificar ou documentar um projeto de engenharia, pois durante o modelamento de uma peça, por exemplo, todo seu histórico de modelamento fica documentado e armazenado para ser modificado posteriormente quando houver necessidade. Esta característica é conhecida como **modelamento parametrizado**.

ZEID [27] considera que as ferramentas CAD podem ser definidas como uma intersecção de três conjuntos: modelamento geométrico, ferramentas de desenho e imagens gráficas através da tela do computador. Esta definição pode ser mais bem visualizada através da Figura 2.11. Segundo o autor, os conceitos abstraídos desta figura devem ser aplicados de forma cada vez mais inovadora nos processos de projeto.

McMAHON e BROWNE [28] consideram que o objetivo do CAD é aplicar o computador no modelamento e comunicação de projetos. Duas abordagens são consideradas por estes autores, que são:

- a um nível básico, o CAD é utilizado para automatizar ou dar assistência às tarefas de confecção de desenhos (bi ou tridimensionais) e a documentação relativa a estes desenhos;

- a um nível mais avançado, o CAD fornece novas técnicas de modelamento o qual fornece aos projetistas facilidades para dar assistência a todo processo de projeto.

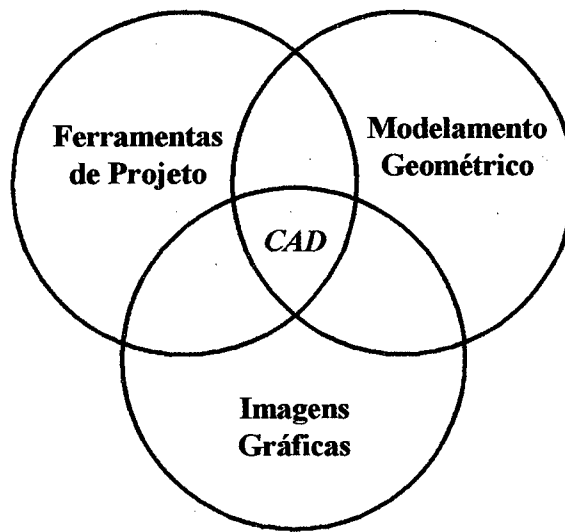


Figura 2.11: Definição da ferramenta CAD baseado nos seus constituintes [27]

O termo CAD vem do inglês *computer aided design* ou, como alguns autores preferem, *computer aided drafting*. Estas duas definições têm deixado espaço para muita discussão.

Segundo ULLMAN *et al* [29], as ferramentas CAD apóiam o processo de projeto mecânico de um componente de quatro maneiras diferentes: como uma avançada ferramenta de desenho 2D e 3D, como uma ferramenta de visualização e animação gráfica, em que os dados de projeto são organizados melhorando a comunicação entre os projetistas e, por fim, como um pré e pós-processador para ferramentas analíticas computadorizadas como análises em sistemas CAE, levantamento de propriedades de massa do componente (massa, volume, centro de gravidade, momentos de inércia, etc.) e outras análises. Para serem utilizados por uma destas maneiras o modelo CAD tem de estar definido (forma e dimensões). Aos sistemas CAD que são utilizados para tais tarefas dá-se o nome de *computer aided drafting*. Os autores consideram que esta é a melhor forma de definir o termo CAD, pois eles acreditam que os sistemas CAD foram desenvolvidos para atender tais aplicações.

HOFFMAN e HAAVISTO [30] consideram as duas definições. Para estes autores, *computer aided design* é uma definição aplicada aos sistemas que utilizam o computador e toda aparelhagem periférica (*mouse*, teclado, monitor de vídeo, etc.) conectados a ele para apenas criar de forma conceitual e aproximada um objeto, ou seja, gerar um modelo sem dimensões ou formas definidas. Quanto a *computer aided drafting*, os autores o definem como sistemas que utilizam o computador e a aparelhagem periférica para modelar um objeto de forma detalhada, dando-o dimensões e formas bem definidas, além de produzir toda documentação necessária para

a continuidade do projeto. Esta documentação inclui desenhos preliminares, lista de materiais e alguns cálculos aproximados, que sejam necessários.

Independente destas definições, os sistemas CAD estão sempre relacionados a uma ferramenta de apoio a projetos de engenharia fazendo uso do computador e de toda sua aparelhagem externa. ZEID [27] considera que além de apoiar projetos de engenharia, os sistemas CAD têm sido criados para estender a sua aplicação para além dos limites dos projetos de engenharia e influenciar no desenvolvimento dos futuros sistemas CAD para melhor servir aos processos de projeto e tornar usual sua utilização em qualquer área fora da engenharia.

O modelamento geométrico realizado em um sistema CAD é a base de todo processo de obtenção do leiaute dimensional de peças de plástico injetadas. É a partir deste modelo que será gerado a malha de elementos finitos e dela se realizará a análise estrutural e reológica.

### 2.3.2. SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção de um material plástico para uma determinada aplicação constitui-se um processo complexo, pois depende de muitos fatores. Embora as características que são importantes na seleção do material dependam da aplicação, é possível determinar uma seqüência de etapas para facilitar a seleção de um material, já que a mesma é de fundamental importância na determinação da qualidade e resistência do produto final.

Para auxiliar a tarefa de seleção de materiais plásticos há algumas sistemáticas que garantem a escolha ótima do material para uma determinada condição de projeto. Há algumas diretrizes básicas que orientam e facilitam a escolha do material e cuja característica é a ordenação dos materiais candidatos segundo algum critério de desempenho específico, e a partir daí esta lista inicial será reduzida por algum processo de eliminação até que um ou mais permaneçam viáveis à aplicação.

BELOFSKY [31] considera que para qualquer classe de material plástico, a sua seleção deva ser baseada prioritariamente nos requisitos funcionais do componente e posteriormente devem ser considerados outros critérios de seleção, nomeado por este autor por **considerações de projeto**, que se constitui de custo do material, facilidade de aquisição e de processamento e conformidade com as normas técnicas. O autor sugere um processo de seleção de materiais dividido em quatro passos. No primeiro passo os materiais candidatos são hierarquizados segundo o atendimento dos requisitos funcionais do componente. Os materiais são dispostos numa tabela e os valores para as suas principais propriedades são relacionados com cada um deles. Através de comparações, identificam-se aqueles que melhor atendem aos requisitos funcionais do componente. A seleção definitiva do melhor material considera outros aspectos

como custo e facilidade de processamento. Dos materiais selecionados, por atenderem os requisitos funcionais, são eliminados primeiramente aqueles com maior custo de aquisição e maior dificuldade de processamento.

Para STRONG [24], a seleção de materiais também se inicia com a definição de um critério para esta tarefa. Este critério envolve a especificação funcional do componente, características estéticas, as restrições impostas ao componente, as conseqüências de uma possível falha, conformidade com normas técnicas e custo. Recomenda-se que o critério esteja bem definido antes de iniciar propriamente a seleção do material. O passo seguinte é a determinação das vantagens e desvantagens que cada classe de materiais poliméricos apresenta. Este passo constitui-se de uma relação preliminar de todas as classes para determinar qual delas pode satisfazer as necessidades de projeto. O terceiro passo constitui-se da seleção da classe de polímeros considerando propriedades associadas à condição do ambiente em que o material vai operar, como absorção de água, resistência ao calor e elétrica, resistência à chama, resistência à radiação solar, etc. Por fim é realizada uma classificação das resinas remanescentes e uma seleção preliminar de uma delas para dar continuidade ao processo de projeto do componente. O autor ainda sugere como alternativa à seleção apresentada anteriormente, uma seleção utilizando uma ferramenta computacional.

Segundo WENDLE [32], a seleção de materiais desenvolve-se basicamente em função da lista de condições que o material deve encontrar para cumprir os requisitos da aplicação. Esta lista é determinada através do seguinte questionário:

Qual é a maior temperatura que o componente estará exposto?

Qual é a temperatura mais baixa que o componente estará exposto?

O material deve ser transparente, opaco ou translúcido?

É necessário que o componente seja resistente à chama?

A qual substância química o componente estará exposto?

O componente suportará cargas dinâmicas?

Quão rígido o componente deve ser a fim de suportar as solicitações?

Uma vez estas sete questões estejam respondidas o projetista tem condições de selecionar uma ou mais classes de materiais poliméricos. Então, pode-se considerar fatores como custo e facilidade de processamento para selecionar o melhor material.

MALLOY [15] propõe um processo no qual são estabelecidos três passos até que o material seja selecionado. Os três passos são:

- a. Seleção preliminar de materiais: a seleção preliminar é realizada com base na comparação entre as propriedades requeridas para o material e um banco de dados de propriedades de vários materiais. Recomenda-se que sejam selecionados de três a seis materiais.
- b. Projetar o componente utilizando os materiais selecionados: uma vez que os materiais candidatos tenham sido selecionados, o componente pode ser projetado conforme as propriedades individuais de cada um deles.
- c. Seleção final de materiais: nesta fase um material é selecionado, mas mantendo os demais ainda disponíveis, caso ocorra algum problema com o primeiro. A escolha deste material pode ser determinada utilizando experiências passadas ou com base em algum critério como o custo do material, custo e facilidade de processamento, qualidade ou tempo do ciclo de injeção.

REES [33] considera que a seleção de materiais deve ser conduzida considerando inicialmente custo dos materiais e a soma de outros custos, como custo do molde, hora de trabalho da máquina injetora, energia elétrica, etc. necessários para processar cada material polimérico. Depois de selecionar alguns materiais através de seus custos o autor recomenda considerar suas propriedades mecânicas e físicas e por último selecionar o material definitivo a partir do processo de moldagem que será utilizado (injeção, sopro, usinagem, etc.). A partir do material selecionado será realizado a análise estrutural do componente utilizando o modelo geométrico tridimensional previamente gerado em um sistema CAD. Aspectos relativos à realização da análise estrutural de um componente serão apresentados no próximo item.

A seleção de materiais proposta pela GE PLASTIC [34] é denominada de **seleção de materiais baseada no projeto do componente**, em que é ilustrado na Figura 2.12. Nesta figura pode-se ver como as variáveis de projeto estão relacionadas, a fim de determinar o material que será utilizado. Na Figura 2.12 verifica-se que o processo de seleção de materiais proposta pela GE PLASTIC [34] é um processo iterativo e complexo, pois envolve praticamente todas as variáveis que estão relacionadas com o desenvolvimento de um componente plástico. O projeto estrutural da peça visa restringir a máxima deflexão no componente utilizando nervuras e uma espessura inicial combinada à rigidez de um material previamente selecionado. A geometria do componente é utilizada para determinar o custo aproximado, a partir do seu volume. O tempo de ciclo é utilizado para determinar o custo da hora de trabalho da máquina injetora. O sistema de custo calculado para selecionar o material constitui-se de uma aproximação utilizada para classificar os materiais que cumprem os requisitos necessários ao componente. Como esta



proposta constitui-se de um processo iterativo, faz-se necessário que o projetista já tenha uma certa experiência em selecionar materiais e projetar de componentes de plástico, a fim de selecionar o material sem perda de tempo.

O material selecionado por qualquer sistemática será utilizado nas análises estrutural e reológica do componente. Estes serão os próximos itens a serem discutidos.

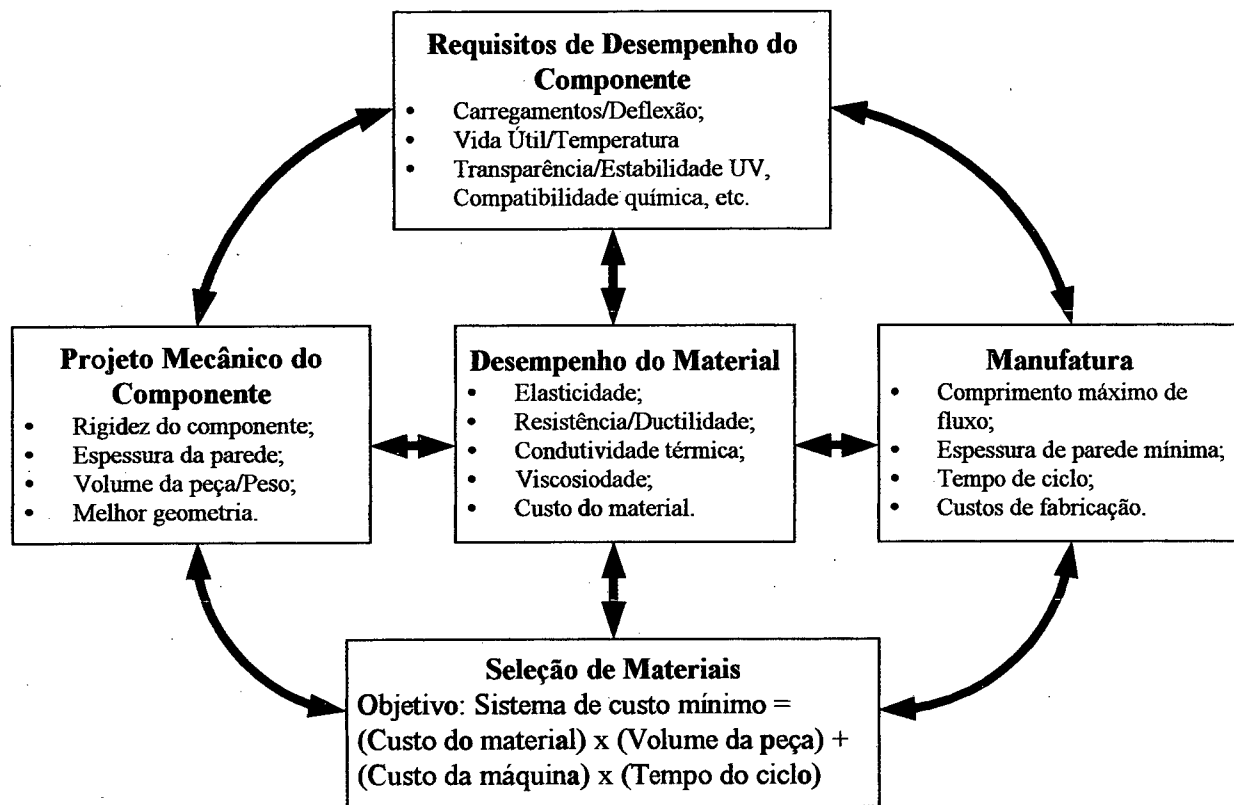


Figura 2.12: Seleção de materiais segundo a GE PLASTIC [34]

### 2.3.3. ANÁLISE ESTRUTURAL

O engenheiro responsável pela resolução de um determinado problema tem a sua disposição, basicamente, três métodos: 1 – analíticos; 2 – numéricos; e 3 – experimentação em laboratórios. Os métodos analíticos são métodos teóricos e objetivam resolver equações diferenciais. Os métodos numéricos têm a capacidade de resolver problemas um tanto complicado apresentando resultados aproximados com grande rapidez [35]. A utilização de métodos numéricos para a solução de problemas da engenharia considerados complexos, em função do volume de dados a serem tratados é hoje uma realidade, graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade de processamento e de grande capacidade de armazenamento de informações.

Dentro do campo dos métodos numéricos quatro deles se destacam: método das diferenças finitas (MDF); método dos elementos finitos (MEF); método dos volumes finitos (MVF); e o método dos elementos de contorno (MEC). O método dos elementos finitos, por exemplo, é uma ferramenta numérico-computacional utilizada para a solução aproximada de equações diferenciais. Desta forma, este método encontrou aplicações em análise estrutural, térmica, de mecânica dos fluidos, eletromagnética, biomédica e muitas outras. Além de estas análises poderem ser realizadas individualmente é possível e até comum a realização de análises seriadas, por exemplo, uma análise térmica seguida de uma análise estrutural na qual se calculam as tensões provenientes dos resultados obtidos das deformações térmicas. A Figura 2.13 mostra esquematicamente como a análise estrutural pode ser subdividida.

O objetivo do projeto estrutural é analisar o componente visando dimensioná-lo de tal forma que o mesmo suporte os prováveis carregamentos a que está submetido durante toda a sua vida útil. Este dimensionamento deve ser feito levando em consideração as propriedades do material utilizado e os requisitos relativos a sua manufaturabilidade.

De acordo com MALLOY [15], o projetista precisará avaliar e especificar um certo número de fatores antes de começar qualquer tipo de análise dimensional. Estes cuidados são tomados para que as características estruturais do componente de plástico sejam todas conhecidas. Inclui-se nestes fatores: geometria do componente, tipo de suporte ou restrições, condições de carregamento, condições ambientais, comportamento do material e propriedades mecânicas e por último, fatores de segurança.

Uma vez os fatores de projeto estejam quantificados, o projetista pode realizar os cálculos necessários, examinar os resultados, alterar o projeto, recalcular, ou seja, realizar quantas iterações forem necessárias até que os resultados desejados sejam obtidos. Se a geometria da peça for simples e apresenta pequenas deformações quando solicitadas, então o projetista pode utilizar as fórmulas clássicas da Resistência dos Materiais ou da Teoria da Elasticidade para quantificar as tensões e deformações provenientes do carregamento a que o componente está submetido. Para peças com geometria mais complexas e pequenas deformações ou peças com não-linearidade geométrica e grandes deformações, faz-se necessário à aplicação dos métodos numéricos. O mais conhecido e mais aplicado em análise estrutural é o método dos elementos finitos.

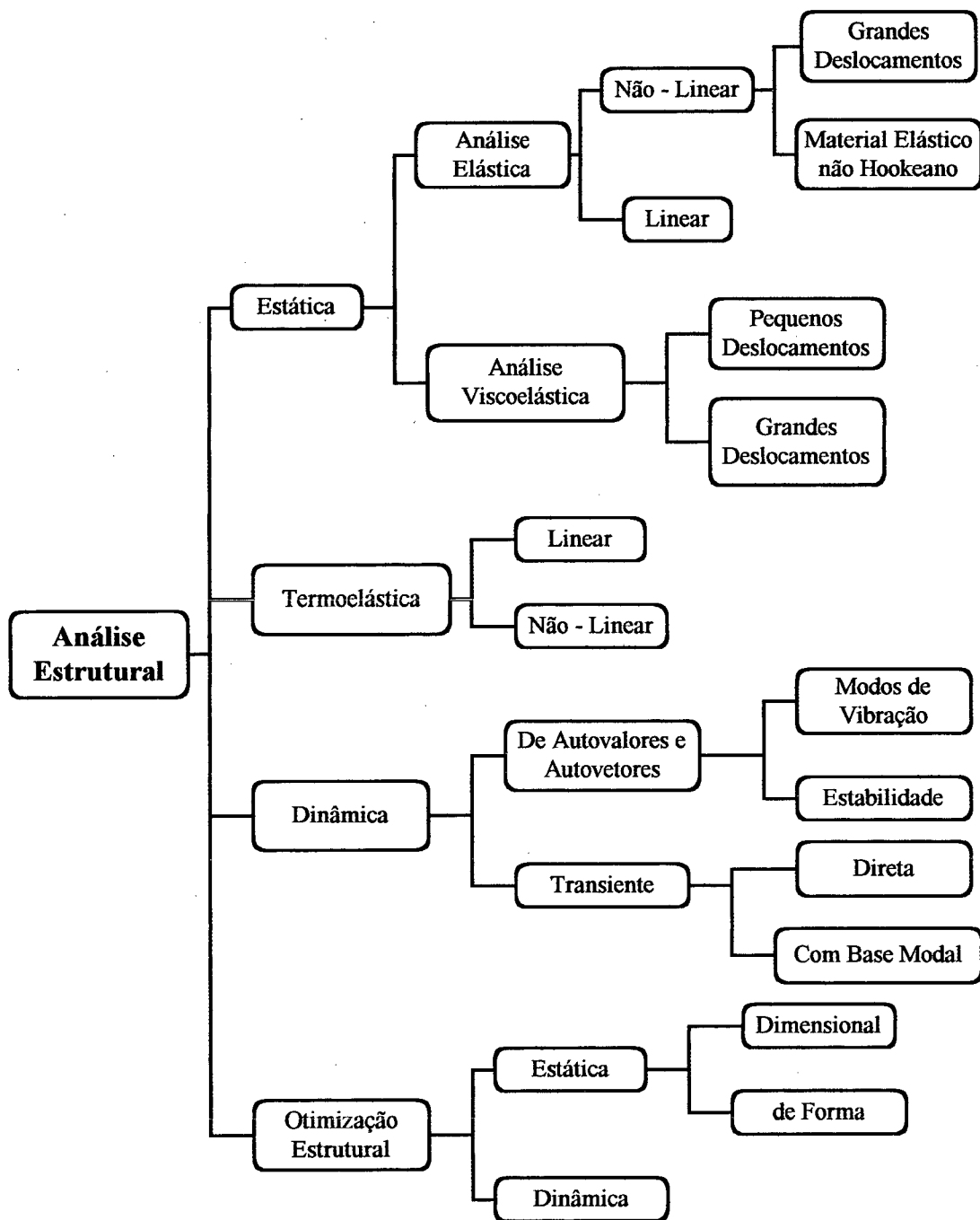


Figura 2.13: Tipos de análise estrutural [36]

De uma forma geral, a análise utilizando o método dos elementos finitos pode ser dividido nos seguintes passos: **modelamento** do domínio a ser estudado, **criação da malha** do domínio, **derivação** das equações, **montagem** das equações, **aplicação das condições de contorno**, **solução** do sistema de equações montadas e **ilustração** dos resultados. O modelamento é o processo em que uma representação do domínio é criada. Geralmente, esta representação é descrita através de um modelo CAD. A criação da malha é o processo em que o domínio considerado é discretizado em pequenas regiões chamadas de elementos, cuja conexão

com os elementos adjacentes são realizados através dos nós. O modelamento e a criação da malha do domínio, geralmente, são conhecidos por **pré-processamento**. Após ter realizado o pré-processamento do domínio o passo seguinte é a geração das equações algébricas derivadas de cada elemento finito da malha. Na seqüência, estas equações são organizadas na forma de um sistema de equações, a fim de determinar uma solução para o domínio como um todo. As condições de contorno são aplicadas às equações, as mesmas são resolvidas utilizando técnicas numéricas e, por último, os resultados são ilustrados [9, 36]. A Figura 2.14 ilustra os tipos de elementos mais utilizados nas análises estruturais e seus respectivos nós, para as três classes de elementos finitos: em (a) os elementos unidimensionais, em (b) os elementos planos ou bidimensionais e em (c) os elementos sólidos ou tridimensionais.

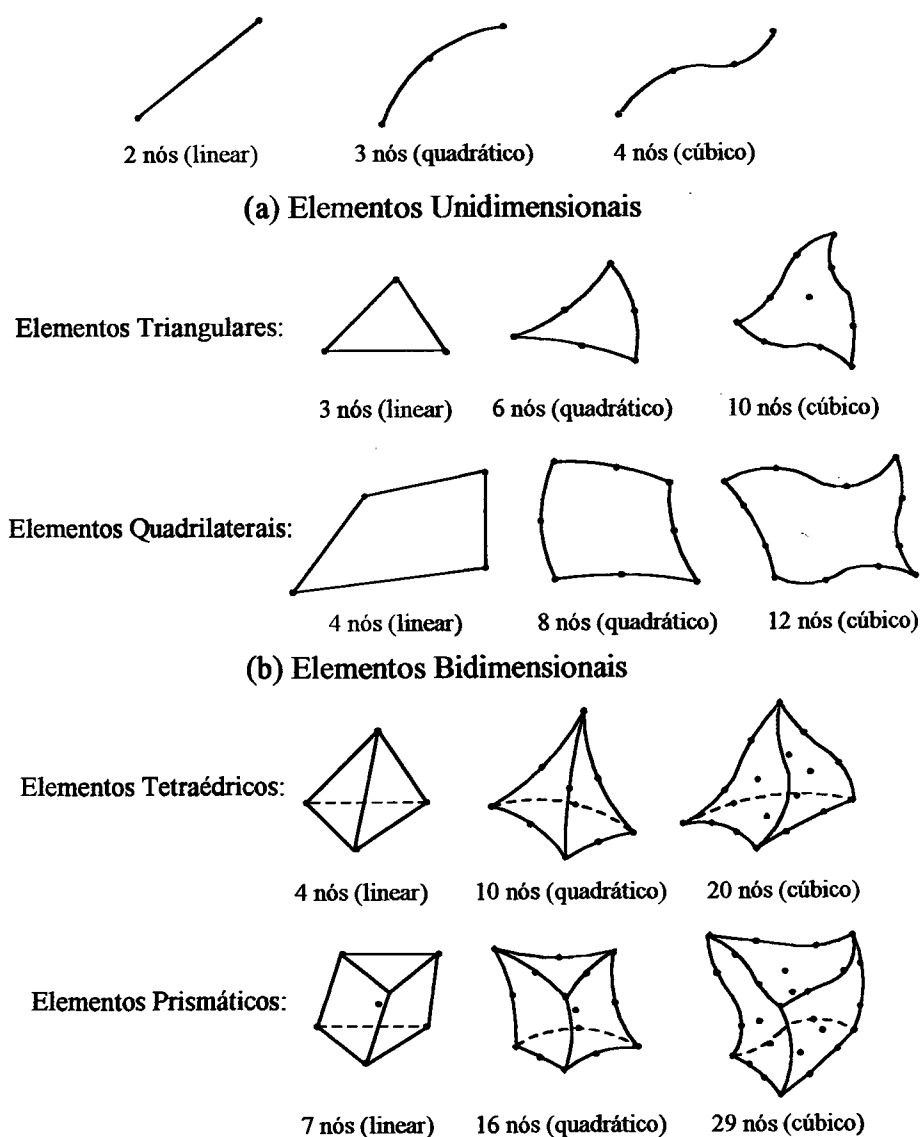


Figura 2.14: Tipos de elementos finitos [27]

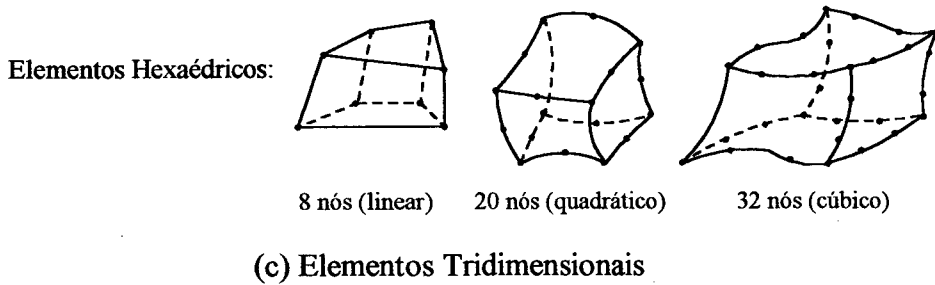


Figura 2.14: Tipos de elementos finitos [27] (continuação)

A Figura 2.15 ilustra em (a) um esboço da estrutura modelada e em (b) a mesma estrutura discretizada, ou seja, subdivida em uma certa quantidade destes elementos finitos escolhidos de acordo com o tipo de análise que será realizada. A depender da quantidade de elementos finitos contidos na malha ou em uma determinada região da estrutura, diz-se que a estrutura ou esta região está muito ou pouco discretizada. O processo de discretização é utilizado para representar o domínio estudado através de valores a serem determinados denominados de graus de liberdade nodais (DOF). O MEF é, portanto, um método numérico computacional utilizado para determinar os valores dos parâmetros nodais (DOF) que posteriormente são utilizados para calcular as grandezas desejadas. No caso de análise estrutural, os DOF geralmente representam seus deslocamentos nodais. Em análises térmicas os graus de liberdade são as temperaturas nodais e para o caso de fluidos os graus de liberdade podem ser pressão ou velocidade do fluido. Outros parâmetros específicos a cada análise como tensões, gradientes de temperatura e pressão são calculados analiticamente a partir dos seus graus de liberdade (deslocamentos nodais, temperaturas nodais, pressão, velocidade, etc.).

Finalizada a etapa de análise estrutural, não significa que o projeto mecânico da peça esteja concluído. A peça é então submetida à análise reológica, a partir da simulação do preenchimento da cavidade do molde que dá forma à peça. Os resultados obtidos mediante esta análise, de certa forma, dependem da geometria da peça. Se houver a necessidade de modificações na geometria para garantir um bom preenchimento, a peça novamente será modelada e nova análise estrutural será realizada para verificar sua nova integridade estrutural e posteriormente realiza-se outra análise reológica, caso seja necessário. Esta iteração é feita até que os resultados desejados, com a geometria da peça, sejam obtidos. Aspectos referentes à análise reológica constarão do próximo item a ser discutido.

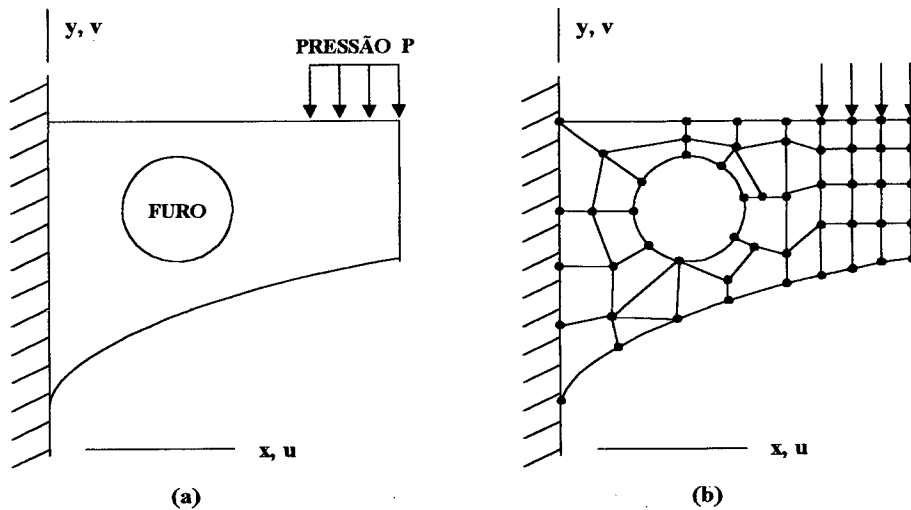


Figura 2.15: Discretização de uma estrutura em elementos planos [37]

#### 2.3.4. ANÁLISE REOLÓGICA

Reologia é o nome dado a ciência que estuda a mecânica dos materiais deformáveis, abrangendo desde os materiais não completamente sólidos até os quase líquidos. No caso particular do processo de moldagem por injeção a análise reológica fornece informações sobre o comportamento do material durante as fases de preenchimento da cavidade e de recalque. Estas informações são obtidas através de programas computacionais, ilustrando o fluxo do material e dos valores quantitativos do processo de injeção (pressão, temperatura, taxa de cisalhamento, tempo de preenchimento, força de fechamento do molde, etc.).

A análise reológica permite a verificação da ocorrência de fluxo desbalanceado, falhas no preenchimento, pontos de temperatura muito elevada, altas taxas de cisalhamento, gradientes de pressão demasiadamente grandes, empenamento, além de mapas de tensões cisalhantes, mapas de distribuição de temperatura, local de formação de linhas de solda, ocorrência de ar aprisionado, dentre outros resultados. Fornece assim, subsídios para a avaliação do comportamento do fluxo de material fundido, defeitos potenciais (empenamentos, rechupes, trincas, etc.), adequação da geometria da peça sob o critério da fácil moldabilidade, determinação de parâmetros de processo e decisão quanto a detalhes construtivos do molde. Os resultados obtidos desta análise são necessários e suficientes para realizar o preenchimento da ficha do processo de injeção, e principalmente a escolha da máquina injetora, para posterior ajustes (temperatura da massa fundida, velocidades de preenchimento e pressão).

Segundo PEIXOTO [38], a utilização de sistemas CAE, para análise do processo de injeção, pode levar, em muitos casos, à redução de custos e, principalmente, do tempo de fabricação de um molde, reduzindo o número de retrabalhos submetido ao molde.

A formulação das leis que descrevem o movimento de um fluido não é fácil de representar matematicamente. As equações básicas que governam o comportamento dos fluidos são a da conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia, todas associadas a uma equação de estado [35].

Para resolver problemas relacionados com a mecânica dos fluidos é necessária a aplicação de métodos numéricos. De acordo com D'AVILA [39], o método numérico mais adequado para resolver tais tipos de problemas é o método dos volumes finitos (MVF). Segundo MALISKA [35], o método dos volumes finitos é um método no qual equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação de massa, quantidade de movimento, entalpia, etc. no volume elementar. Apesar da consideração feita por D'AVILA [39], os programas computacionais utilizados para realizar análises reológica utilizam o método dos elementos finitos (MEF) e o método das diferenças finitas (MDF), como pode ser visto em KENNEDY [9]. O MEF é utilizado para calcular a distribuição de pressão na cavidade e nos canais, enquanto que o MDF é utilizado para determinar a distribuição de temperatura [9]. Elementos uni e bidimensionais são mais utilizados em análise reológica (Figura 2.14). Geralmente, os unidimensionais são utilizados para representar o sistema de canais, enquanto que o bidimensional é mais utilizado para representar a cavidade. As condições de contorno mais utilizados em análise reológica são: temperatura do molde e de injeção.

Atualmente pesquisas têm-se concentrado no desenvolvimento de métodos em volumes finitos, usando malhas semelhantes às usadas em elementos finitos. No panorama atual, observa-se que ambos os métodos (MVF e MEF) estão resolvendo problemas altamente convectivos e em geometrias arbitrárias, mostrando que existe entre eles uma forte semelhança em termos de generalidades [35].

Durante a moldagem da peça por injeção duas fases são completadas, a fase de preenchimento da cavidade, na qual o fluido apenas ocupa todo o volume da cavidade e posteriormente a fase de recalque ou compensação. Estas duas fases são simuladas e analisadas através das ferramentas numérico-computacionais conhecidas por sistemas CAE.

- Fase de Preenchimento

Durante esta fase o parafuso da máquina injetora move-se para frente, sem rotacionar, empurrando o material fundido para dentro do molde. À medida que o material avança e vai entrando em contato com as paredes do canal de injeção e da cavidade do molde uma fina camada se solidifica rapidamente, devido à troca térmica, enquanto o centro do fluxo ainda

mantém-se mole [40, 41]. A Figura 2.16 ilustra bem, teoricamente, o material penetrando na cavidade e a formação de uma fina camada solidificada.

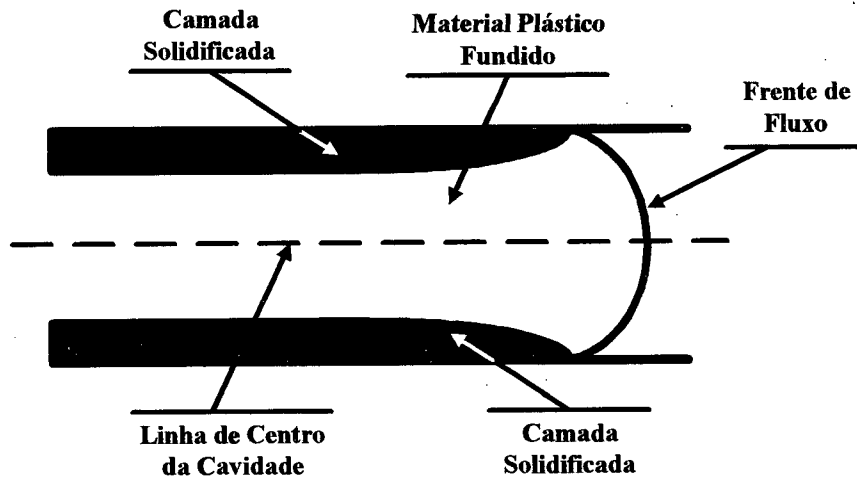


Figura 2.16: Preenchimento teórico da cavidade [9]

- Fase de Recalque ou Compensação

Assim que a cavidade está totalmente preenchida o material continua a resfriar e solidificar-se. Em decorrência deste resfriamento, a peça apresenta uma contração volumétrica. Para compensar esta contração, mais material é empurrado para dentro da cavidade até que o canal de entrada esteja totalmente solidificado. Esta fase é chamada de recalque ou compensação [9, 41].

Em KENNEDY [9] pode-se encontrar as equações básicas que governam as fases de preenchimento e recalque, bem como as condições de contorno e hipóteses simplificadoras que são aplicadas a estas equações.

Depois de concluído e aprovada a análise reológica da peça, a mesma já tem condições de ser fabricada. Os parâmetros de injeção sugeridos na análise podem ser utilizados no ajuste da máquina injetora para fabricar a peça durante o chamado “Ciclo de Moldagem por Injeção” ou apenas “Ciclo de Injeção”.

### 2.3.5. SISTEMAS CAE

Geralmente os sistemas CAE utilizam o método de elementos finitos, em que cada elemento finito da estrutura discretizada é individualmente investigado em relação aos outros elementos vizinhos, e às condições de contorno do problema. Um grande número de equações é gerado e combinado, das quais são determinadas as deflexões e conseqüentemente as tensões na estrutura considerada [22, 42].



De acordo com TRES [43], três passos distintos são necessários para realizar uma análise em sistema CAE. O primeiro passo refere-se ao pré-processamento dos dados. Neste passo, inicialmente é criado um modelo geométrico bi ou tridimensional num sistema CAD ou no próprio sistema CAE. Se o modelo estiver sido criado num sistema CAD o mesmo precisa ser importado para o sistema CAE. Como modelo geométrico disponível é gerada a malha de elementos finitos com um dado grau de refinamento. Na sequência as condições de contorno e o carregamento são aplicados. Entende-se aqui por condições de contorno à representação das restrições e vinculações. O segundo passo refere-se à resolução das equações geradas. O terceiro e último passo consiste da avaliação dos resultados. Este passo requer bastante experiência e conhecimento por parte do projetista. Em comparação aos passos referidos no item 2.3.3, o segundo passo considerado por TRES [43] pode ser subdividido em derivação montagem das equações em um sistema de equações, aplicação das condições de contorno e resolução das equações utilizando técnicas numéricas.

Os modelos geométricos gerados em sistemas CAD são importados para os sistemas CAE através dos arquivos de transferência de dados. Os arquivos mais conhecidos e utilizados são: IGES, STL, PARASOLID, STEP e outros. É necessário que o projetista também tenha um certo conhecimento sobre os arquivos de transferência de dados, pois desta forma, os modelos poderão ser transferidos com mais segurança e confiabilidade.

Dentro do universo dos sistemas CAE utilizados no projeto de componentes plásticos incorporam-se os sistemas utilizados para realizar análises de resistência mecânica e análise de moldabilidade. ANSYS™, MSC/NASTRAN™, Cosmos™, I-DEAS™, CATIA™ e ALGOR™ são alguns exemplos de sistemas CAE utilizados em análises de resistência mecânica de componentes, enquanto que o Moldflow™, é o mais conhecido para realizar análises de moldabilidade. A seguir serão apresentadas as principais características destes dois sistemas CAE, bem como uma breve apresentação a respeito das suas desvantagens.

#### *2.3.5.1. Sistemas CAE para Análise Estrutural*

O método de elementos finitos foi inicialmente aplicado em análises estruturais na indústria aeronáutica, desde então sua utilização alastrou-se para as outras áreas da engenharia, como a indústria automobilística, de construção civil, naval e outras. Embora haja diferenças significativas no modo de aplicação destas ferramentas no projeto de componentes de plástico em relação aos metálicos, mesmo assim constitui-se em uma ferramenta muito útil na realização de análises estruturais de peças de plástico.

Segundo [25], ao se utilizar um sistema CAE no projeto estrutural de um componente de plástico o projetista deve considerar o comportamento viscoelástico destes materiais. Ao se utilizar materiais compostos os módulos de elasticidade longitudinal e transversal devem ser considerados, como ilustra as equações 2.1 e 2.2, respectivamente [25, 45, 50].

$$E_{transv} = \frac{E_r \cdot E_m}{v_r \cdot E_m + v_m \cdot E_r} \quad (2.1)$$

$$E_{long} = E_r \cdot v_r + E_m \cdot v_m \quad (2.2)$$

em que,  $E_{transv}$  é o módulo de elasticidade transversal;

$E_{long}$  é o módulo de elasticidade longitudinal;

$E_r$  é o módulo de elasticidade do material de reforço;

$E_m$  é o módulo de elasticidade do material matriz;

$v_r$  é a porcentagem em volume de material de reforço e;

$v_m$  é a porcentagem em volume de material matriz.

A GE PLASTIC [34] considera que quatro tipos de análise estruturais podem ser realizadas. O projetista deve decidir, a partir das características do problema qual delas realizar. A primeira, e a mais simples é a análise considerando o material como de comportamento elástico-linear. Este método considera que há uma relação entre as deformações e as tensões no componente. Recomenda-se que ao utilizar este tipo de análise as tensões permaneçam abaixo do limite de proporcionalidade do material. O segundo tipo de análise é realizado considerando a não-linearidade do material polimérico. Nesta análise é utilizado um método de solução iterativa, em que a relação tensão-deformação é considerada a partir de uma aproximação multilinear do diagrama tensão-deformação do material. O terceiro tipo é a análise considerando pequenas deformações. Este tipo é geralmente utilizado quando há uma deformação prevista para o componente e esta é menor do que a espessura nominal do componente. Esta é uma análise linear. Por último, a análise considerando grandes deflexões, que é geralmente usada quando as deflexões da peça são bem maiores do que a espessura nominal do componente. Esta análise utiliza uma técnica de soluções iterativa para considerar as mudanças na geometria do componente, bem como o efeito de membrana.

#### 2.3.5.2. Sistemas CAE para Análise de Moldabilidade

São sistemas utilizados para simular o processo de moldagem por injeção do componente e seu principal objetivo é otimizar o projeto do molde buscando obter boa qualidade

nas peças produzidas. Ao utilizar estes sistemas o projetista deve ter ciência de que algumas aproximações estão sendo consideradas no momento de resolver as equações e isto implica em realizar a análise dos resultados de maneira mais criteriosa possível. Segundo KENNEDY [9] e GE PLASTIC [34], as aproximações consideradas são: vazão constante, as propriedades dos materiais são precisas e confiáveis, o fluxo é laminar, a temperatura do molde é uniforme, a textura do molde não é considerada e a pressão de recalque não afeta a fase de preenchimento.

A introdução das informações necessárias à realização de uma análise de moldabilidade pode ser dividida em três categorias básicas. A primeira refere-se à geometria, em que se utiliza a malha de elementos finitos da geometria original do componente. A segunda refere-se às propriedades do material (térmicas e reológicas) que devem ser definidas. As propriedades reológicas são fornecidas através de um modelo matemático em que a viscosidade é fornecida como função da temperatura e da taxa de cisalhamento. As outras propriedades fornecidas são: densidade, condutividade térmica, calor específico e temperatura de solidificação e de *no-flow*<sup>1</sup>. A terceira constitui-se no fornecimento das condições de processamento, que são basicamente: temperatura de injeção, temperatura do molde e tempo de injeção ou pressão de injeção [34].

O tipo de resultados fornecidos pela análise de moldabilidade depende do sistema CAE utilizado. STRONG [24] considera que o resultado mais importante desta análise é aquele que mostra graficamente o padrão de preenchimento da cavidade, pois é através deste padrão que o projetista pode observar problemas como aprisionamento de ar, formação de linhas de solda e solidificação prematura do material. Outros gráficos fornecidos são: distribuição de pressão, temperatura, tensão e taxa de cisalhamento e etc.

### 2.3.5.3. *Vantagens e Desvantagens dos Sistemas CAE*

As principais vantagens que podem ser citadas ao utilizar sistemas CAE no projeto de um componente de plástico são: redução no tempo de desenvolvimento e ganhos de produtividade na produção, uma vez que o número de protótipos necessários para realizar eventuais testes é reduzido, antecipam eventuais problemas que poderiam ocorrer e podem evitar a necessidade de trabalhos posteriores. Embora a análise de elementos finitos seja uma ferramenta poderosa no projeto de componentes de plástico, ainda há alguns pontos que limitam a sua utilização, principalmente na análise de moldabilidade. O método de elementos finitos desenvolvido para este tipo de análise não está tão avançado quanto aquele para análise estrutural está, devido às dificuldades associadas à dinâmica dos fluidos se comparado à estática e à dinâmica associadas aos corpos rígidos. Portanto, os resultados obtidos da análise de

---

<sup>1</sup> *no-flow*: é a temperatura, em que o material plástico efetivamente não flui mais [9].

modalidade não são consistentemente válidos e isto faz com que os resultados provenientes desta análise devam ser criteriosamente analisados.

### 2.3.6. POSSÍVEIS EFEITOS CAUSADOS NO COMPONENTE DECORRENTE DA MOLDAGEM POR INJEÇÃO

O processo de moldagem por injeção é um dos principais processos na área de fabricação de peças de plástico. Cerca de 32% das peças de plástico produzidas no Brasil são fabricadas por este processo devido à capacidade de produzir peças complexas em grandes quantidades e de modo preciso [44]. De acordo com MILLER [45], este processo é mais bem aplicado a produções acima de 50000 peças, aproximadamente. Apesar de seu grande uso, as condições de moldagem de peças por injeção, durante a realização do ciclo de injeção, podem levar ao surgimento de efeitos ou fenômenos comprometendo a estrutura da peça, suas tolerâncias dimensionais ou até mesmo sua aparência. O conhecimento destes efeitos, por parte do projetista pode auxiliá-lo no desenvolvimento da tarefa, como as pertencentes ao projeto preliminar, em especial, nas análises de moldabilidade, realizadas com auxílio de sistemas CAE. Dentre os efeitos ou fenômenos mais relevantes, pode-se citar:

**1) Empenamento:** Este é um dos efeitos mais preocupantes num projeto de uma peça de plástico. Em geral, o empenamento é causado por uma diferença na contração da peça, ou seja, se uma região da peça apresenta um nível de contração diferente de outra região, a peça empenará [41]. Vários fatores estão relacionados com o comportamento complexo e não-uniforme da contração de peças moldadas por injeção, dentre eles incluem-se: comportamento anisotrópico do material devido à orientação induzida pelo fluxo, contração térmica assimétrica devido a um resfriamento inadequado da peça, contração volumétrica não-uniforme e dilatação térmica diferenciada devido ao efeito da geometria da peça. As Figuras 2.17, 2.18 e 2.19 ilustram exemplos de alguns dos fatores mencionados anteriormente.

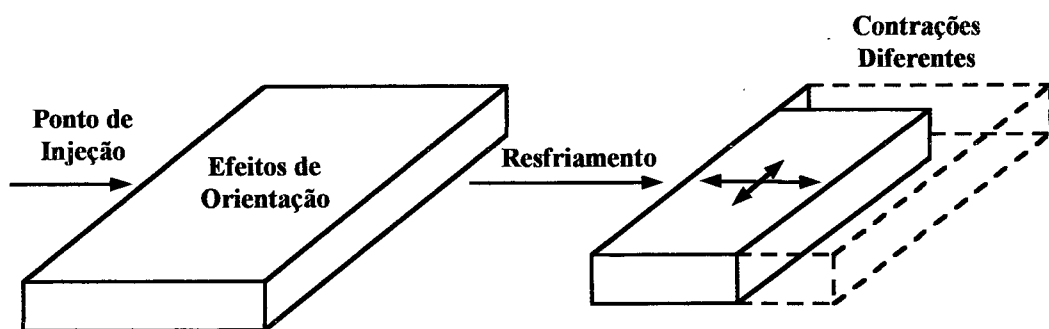


Figura 2.17: Contrações devido a efeitos de orientação induzida pelo fluxo [15, 41]

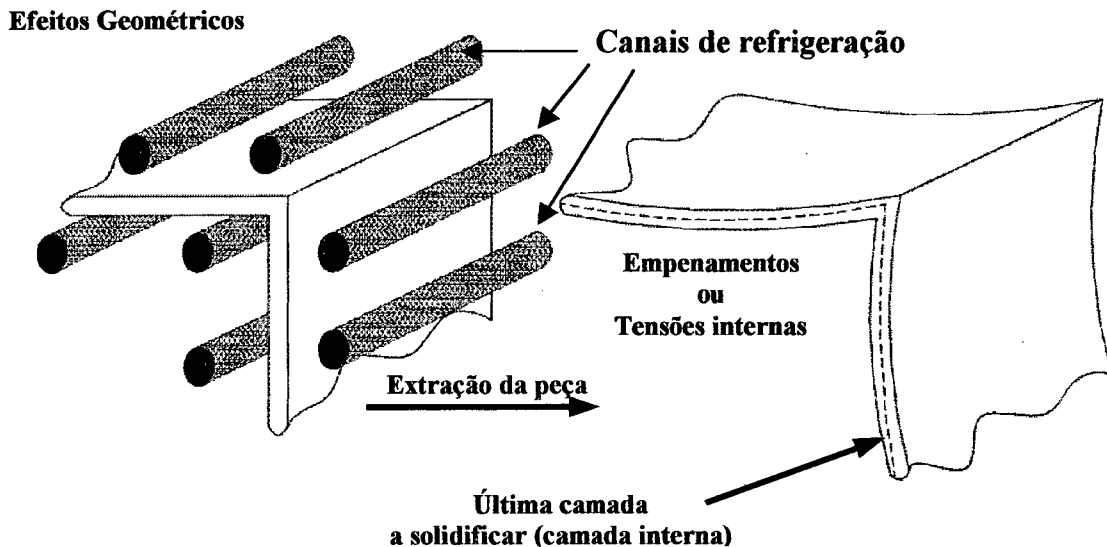


Figura 2.18: Empenamento causado por diferença existente entre as taxas de retirada de calor [15]

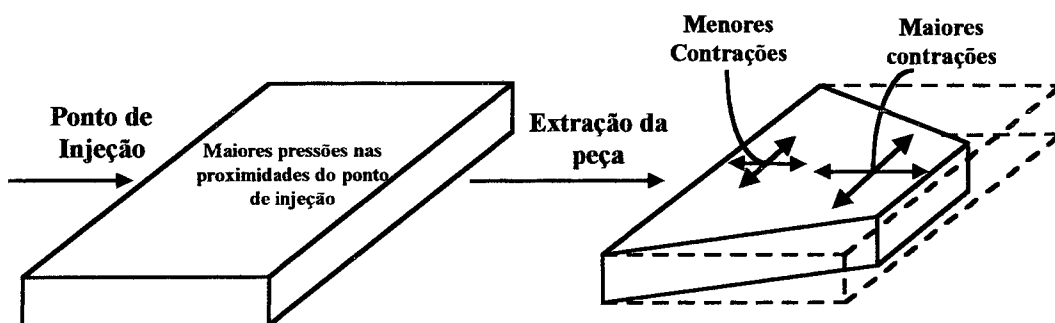


Figura 2.19: Contrações diferenciadas causadas pelas variações de pressão existente ao longo do caminho de fluxo [15]

**2) Efeito de Empacotamento (*Overpack*):** Ao penetrar na cavidade, o material fundido preenche o caminho que exerce menor resistência. Assim, em um molde de uma cavidade, por exemplo, o material plástico preencherá a área de menor resistência primeiro e continuará a compactar esta área até que as outras áreas estejam preenchidas, sendo este efeito característico de problemas causados pelo fluxo desbalanceado. O empacotamento é uma das causas mais comuns de empenamentos de peças [33, 41, 46].

**3) Efeito de Hesitação (*Hesitation*):** Este efeito ocorre quando o material penetra na cavidade e encontra uma área de seção muito fina. A pressão de injeção é insuficiente para preencher esta seção e o material flui pelas seções mais espessas. Enquanto a cavidade vai sendo preenchida o plástico na seção mais fina resfia. Quando as seções mais espessas estiverem preenchidas, a pressão de injeção ficará disponível para preencher as seções mais finas, mas, com o material já

solidificado, esta área não será preenchida [41, 46]. A Figura 2.20 ilustra um esquema do efeito de hesitação.

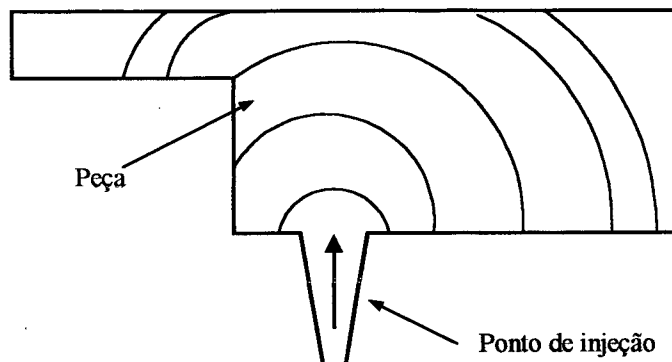


Figura 2.20: Ilustração do efeito da hesitação [46]

**4) Bolsas de Ar:** As bolsas de ar surgem no encontro de mais do que duas frentes de fluxo ou em cantos da cavidade, quando o ar não pode escapar pela linha de abertura do molde (Figura 2.21).

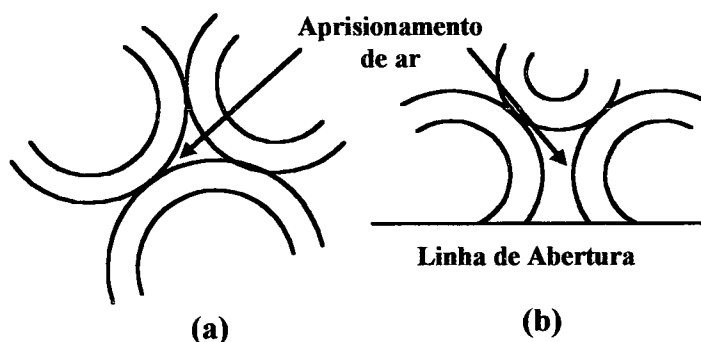


Figura 2.21: Formação de bolsas de ar [47]

A Figura 2.21 ilustra duas situações. Em (a) mostra a situação crítica, na qual o ar fica aprisionado no interior da cavidade. Em (b) ilustra a situação mais favorável, na qual o ar pode escoar através da linha de partição do molde. Na situação mais crítica, em (a), o ar aprisionado pode entrar em combustão e gerar manchas e marcas localizadas na peça, pois o ar é aquecido em decorrência da sua compressão [22].

**5) Linhas de Solda (*Weld Lines*):** As linhas de solda formam-se durante o preenchimento da cavidade quando a frente de fluxo se separa e se encontra posteriormente em uma região da peça. As linhas de solda também podem ser formadas por duas frentes de fluxo que se encontram provenientes de mais de um ponto de injeção. Quanto menor for o ângulo de encontro entre as frentes de fluxo, tanto mais acentuada será a marca da linha de solda e, conseqüentemente,

menor a qualidade mecânica e visual da junção [15, 38, 41, 46]. Segundo MALLOY [15], as linhas de solda tendem a desaparecer para ângulos de encontro das frentes de fluxo entre  $120^\circ$  e  $150^\circ$  dependendo do material. A Figura 2.22 ilustra a formação da linha de solda.

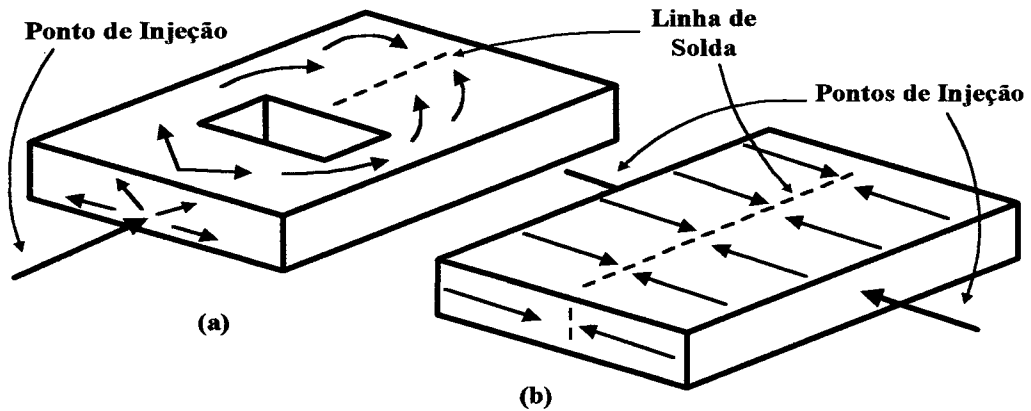


Figura 2.22: Formação das linhas de solda [41, 42]

De acordo com a Figura 2.22, tem-se em (a) o fluxo desviado e posteriormente reencontrado e em (b) o fluxo precedente de dois pontos de injeção. Se não houver possibilidade alguma de eliminar as linhas de solda, recomenda-se mantê-las em regiões da peça onde as tensões provenientes de um carregamento externo sejam baixas [22, 42].

**6) Linhas de Junta (Melt Lines):** São similares às linhas de solda, diferindo apenas na forma de encontro dos fluxos. Nas linhas de juntas os fluxos encontram-se paralelamente, como mostra a Figura 2.23.

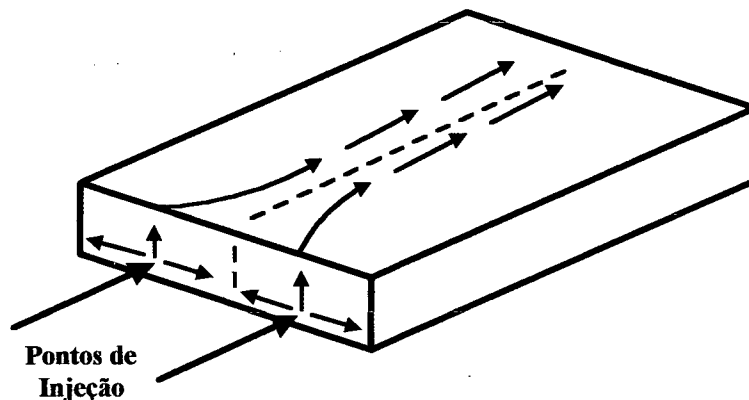


Figura 2.23: Linha de junta formada a partir de dois pontos de injeção [41, 42]

**7) Rechupe (Sink Marks):** É o aprofundamento localizado da superfície da peça onde há variação considerável na espessura de parede, causado pela contração desigual do material

durante o seu resfriamento. Ocorre, muitas vezes, em regiões da peça onde há nervuras [46]. A Figura 2.24 mostra o efeito do rechupe.

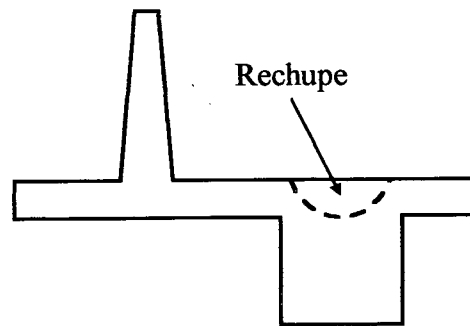


Figura 2.24: Efeito de rechupe por contração diferenciada [41]

A linha tracejada na Figura 2.24 ilustra a contração apresentada pela superfície da peça. Geralmente utiliza-se um acabamento texturizado ou algum logotipo nesta região da superfície da peça para esconder este tipo de defeito [22, 48].

**8) Vazios (Voids):** Podem ser descritos como bolhas de ar que se formam no interior da peça, em que a superfície externa da peça resfria-se e o material contrai-se na direção da espessura criando um buraco no centro da espessura [22, 48, 49]. A Figura 2.25 ilustra como ocorre a formação dos vazios.

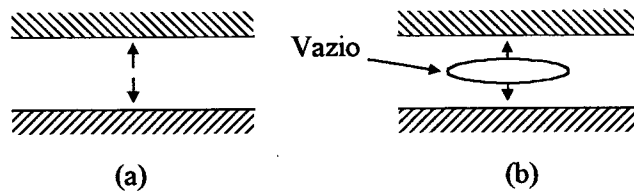


Figura 2.25: Ilustração da formação de vazios [50]

As setas ilustradas na Figura 2.25.a mostram a ocorrência de forças agindo no interior do material provenientes da contração do material. A Figura 2.25.b ilustra a formação do vazio no interior da peça durante o seu resfriamento. Os vazios podem ocorrer devido à umidade contida no material e que não foi removida através de um pré-secamento. Geralmente, aumenta-se a pressão e o tempo de recalque a fim de evitar os vazios [22].

**9) Rebarbas (Flashing):** Geralmente é causado pela deficiência do molde. Outros fatores são: força de injeção maior do que a força de fechamento, sistema de ventilação inadequado, excesso de material e presença de materiais estranhos deixados no molde [49].



**10) Refluxo (*Underflow*):** Este efeito ocorre quando há mais de um ponto de injeção. Segundo *MOLDFLOW* [41] e WHELAN e GOFF [42], quando duas frentes de fluxo encontram-se, estas param e revertem as direções. Quando as frentes de fluxo param, a camada solidificada neste ponto aumenta e logo é fundida novamente devido ao calor gerado pelo atrito das duas frentes de fluxo e voltando a fluir na direção contrária à de preenchimento da cavidade. O refluxo diminui a qualidade superficial e enfraquece estruturalmente a peça. Este problema é prevenido posicionando os pontos de injeção em regiões que façam com que as frentes de fluxo encontrem-se apenas no final do preenchimento.

**11) Caminho Preferencial (*Racetrack*):** Geralmente ocorre em peças que contenham espessuras diferenciadas. Como o fluxo de material injetado tende a fluir por regiões que apresentam menor resistência, o material injetado preencherá a região de maior espessura formando um “caminho preferencial” (*racetrack*) [41].

Boa parte dos efeitos de injeção está relacionada com os parâmetros de injeção adotados. A análise reológica auxilia a identificação prematura destes permitindo assim a sua correção, o que garante a boa qualidade da peça injetada. Defeitos provenientes da umidade contida no material são prevenidos realizando uma secagem antes da moldagem da peça. Na Tabela C.1 do Anexo C são relacionados alguns problemas mais usuais que acontecem durante a moldagem de uma peça com suas prováveis causas e algumas recomendações para sua solução.

Baseado na revisão da literatura sobre projeto de componentes de plástico moldados por injeção apresentada no presente capítulo pôde-se verificar que as metodologias apresentadas possuem pontos bastante comuns, em que se destacam: a utilização de um questionário estruturado a fim de auxiliar a seleção de materiais plásticos e a utilização de sistemas CAD e CAE nas análises estrutural e reológica do componente de plástico. Estes pontos serão utilizados como principais diretrizes para a realização dos estudos de caso no capítulo 4 e, conseqüentemente, para a proposição de uma sistemática de projeto a ser apresentada no capítulo 5. A utilização dos sistemas CAD/CAE na proposta de sistemática auxiliará na redução do tempo de desenvolvimento do componente, bem como na previsão de eventuais problemas estruturais ou reológicos que são propícios de ocorrerem (item 2.3.6) e que comprometem a qualidade do mesmo.

## 3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PLÁSTICOS

Os materiais plásticos sob temperaturas elevadas e/ou sob carregamentos de longa duração, comportam-se diferentemente de outros materiais utilizados na engenharia, como metais, madeiras e cerâmicas. No momento de selecionar um plástico para uma determinada aplicação, é necessário que o projetista tenha um bom conhecimento a respeito das principais propriedades destes materiais, bem como de que forma os mesmos comportam-se térmica e mecanicamente sob diferentes solicitações.

O objetivo deste capítulo é realizar uma discussão a respeito das principais propriedades dos materiais plásticos e dos principais fatores que as afetam, pois se percebe que para alguns projetistas determinadas propriedades não estão bem entendidas. O mau entendimento das propriedades pode conduzir a seleção equivocada de materiais, pois, normalmente, a fase de seleção de materiais é realizada utilizando o conhecimento das principais propriedades aliadas ao conhecimento do ambiente de aplicação do componente.

### 3.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PLÁSTICOS

As propriedades dos materiais plásticos são influenciadas por uma série de fatores, em que se incluem o tipo de material considerado, as condições de processamento utilizado, composição química do material, morfologia e peso molecular. As principais propriedades apresentadas neste item serão: mecânicas, térmicas, elétricas, ópticas, acústicas, reológicas e outras propriedades especiais. Por fim, é reservado um item que ilustrará os principais fatores que afetam as propriedades dos materiais plásticos.

#### 3.1.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Geralmente, as propriedades mecânicas são as mais importantes propriedades num projeto de um componente de plástico, pois quase todas as aplicações requerem um certo grau de solicitação mecânica. O comportamento mecânico dos plásticos é bem diferente dos outros materiais de engenharia e ainda são pouco conhecidos e dominados por duas razões. Primeiro, os plásticos utilizados na engenharia são diversos. Existem no mínimo 70 estruturas básicas diferentes, em que para cada uma delas há quase 100 materiais diferentes de fabricantes diferentes. Além disso, os plásticos podem ser modificados pela utilização de material de

preenchimento, retardantes de chama, estabilizadores e outros que substancialmente alteram as propriedades mecânicas do material. Em segundo, os ensaios realizados através de normas técnicas e que são realizados em condições simples e uniformes não condizem às muitas situações a que o componente poderá estar sujeito [25].

RUBIN [52] afirma que as propriedades mecânicas de um material plástico dependem de três fatores: (a) de sua estrutura molecular, (b) do estado físico, (que inclui a relação do material com sua temperatura de transição vítrea e seu grau de cristalinidade, peso molecular, distribuição do peso molecular e tamanho das cadeias) e por último, (c) das condições sob as quais as propriedades foram medidas.

Segundo BAYER AG [53] e MALLOY [15], as propriedades mecânicas dos materiais plásticos são divididas em dois grupos: propriedades referentes às solicitações de baixa duração e de longa duração. Outros autores não consideram tal distinção. Dentro do grupo das propriedades referentes às solicitações de baixa duração destacam-se: diagrama tensão-deformação, flexão, propriedades compressivas, cisalhamento, impacto, dureza e desgaste do material. Dentre as propriedades de longa duração destacam-se: fluência (*creep*), alívio de tensões (*stress relaxation*), efeito recuperativo (*Recovery*) e fadiga.

Uma importante propriedade dos materiais plásticos é a **viscoelasticidade**. Esta é responsável por outras propriedades, que são específicas destes materiais, como, por exemplo, a fluência e o alívio de tensões. Segundo McCRUM [54] *et al*, MICHAELI [55] e [25], os materiais plásticos são materiais viscoelásticos em qualquer temperatura, isto significa dizer que estes materiais deformam-se elástica e plasticamente sob um carregamento, e esta deformação é função do tempo [55]. Este efeito é devido à reorganização molecular induzida pelo carregamento externo [54]. Por exibirem propriedades viscoelásticas, TRES [43], MICHAELI [55] e BERINS [56] ainda classificam os materiais plásticos como materiais não-lineares ou não-ideais, pois os mesmos não obedecem à lei de Hooke.

#### 3.1.1.1. Diagrama Tensão-Deformação

Um dos diagramas mais utilizados em projeto mecânico de um componente é o diagrama tensão-deformação do material. Este diagrama é muito útil, pois ilustra de forma geral, a resistência e rigidez do material permitindo comparações mais precisas no momento de selecionar um material. Comparado aos diagramas dos materiais metálicos, o diagrama tensão-deformação dos materiais plásticos apresenta propriedades viscoelásticas mais pronunciadas [43]. Segundo BERINS [56], não há uma região linear no diagrama tensão-deformação dos

materiais plásticos como existe no dos metálicos, ou seja, há um desvio da linearidade a partir da origem do diagrama.

Muitos autores ao ilustrarem um diagrama tensão-deformação dos materiais plásticos o ilustram considerando que o mesmo possui uma região de proporcionalidade e conseqüentemente com módulo de elasticidade, tensão de escoamento e limite de proporcionalidade. Esta consideração não está correta, pois os materiais plásticos são viscoelásticos (não-lineares) e não obedecem à lei de Hooke, como já mencionado. A Figura 3.1 ilustra um diagrama tensão-deformação generalizado dos materiais plásticos. Sua forma pode apresentar mudanças que dependem do comportamento do material analisado.

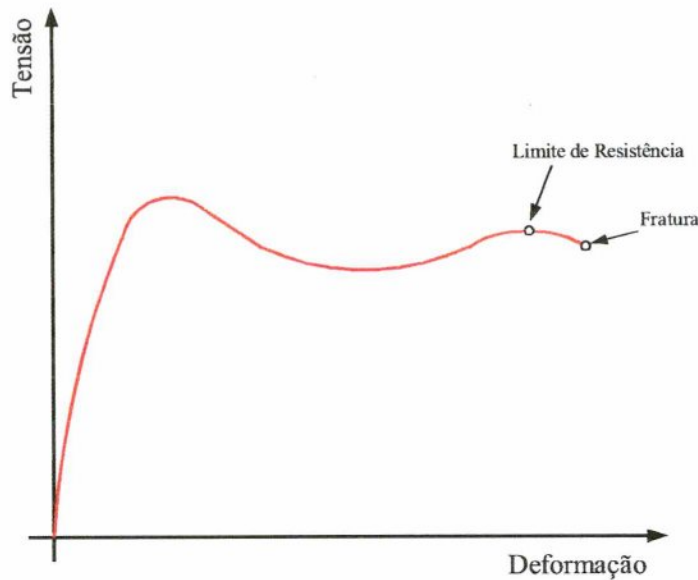


Figura 3.1: Diagrama tensão-deformação generalizado de um plástico [34]

Este diagrama é obtido através de ensaios da tração, realizado segundo a norma ASTM D 638 ou ISO 527. Do diagrama ilustrado na Figura 3.1 pode-se obter o módulo de elasticidade, a tensão limite elástica do material, o alongamento até a fratura e o limite de resistência (tensão de ruptura), entre outras propriedades, as quais são definidas a seguir:

- Tensão limite elástico: representa o ponto no diagrama além do qual causará deformações permanentes no material [15, 48, 57]. Para os materiais metálicos este valor é considerado igual à tensão limite de proporcionalidade. Para os materiais plásticos que não apresentam proporcionalidade, CHANDA e ROY [58] apresentam dois métodos para obtê-lo. O primeiro consiste em traçar uma reta paralela à reta tangente ao diagrama a partir do valor de deformação igual a 0,2 %. O ponto de intersecção representa a tensão limite elástica do material. O segundo método consiste em traçar uma reta partindo da

origem e de inclinação igual a 50 ou 70 % da inclinação da reta tangente ao diagrama que também parte da origem. Estes dois métodos podem ser visualizados através da Figura 3.2.

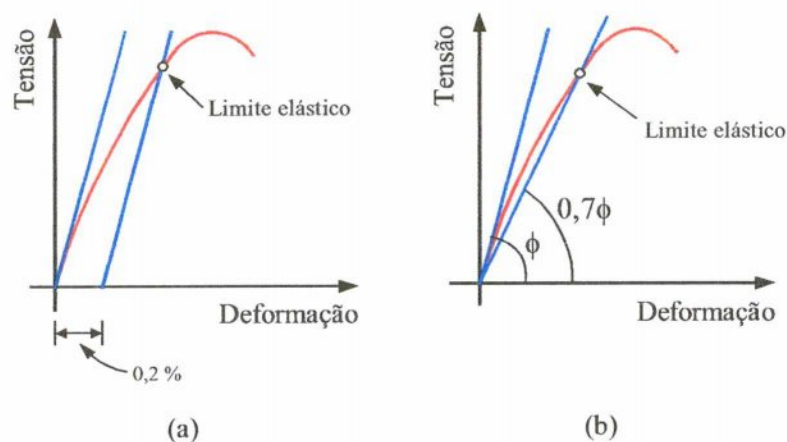


Figura 3.2: Localização da tensão limite elástico dos materiais poliméricos [58]

- Módulo de elasticidade inicial: é a inclinação de uma reta tangente ao diagrama tensão-deformação, partindo da origem. Como os materiais plásticos são não-lineares, a inclinação de uma reta tangente ao diagrama muda, conforme se desloca sobre o diagrama. Desta forma, o módulo de elasticidade, que representa o ângulo de inclinação da região de proporcionalidade do diagrama tensão-deformação, não pode ser aplicado aos materiais viscoelásticos, pois os mesmos não apresentam uma região linear no diagrama. Entretanto, para efeito de cálculos utiliza-se o módulo de elasticidade inicial, pois esta propriedade fornece uma medida da rigidez do material em baixas deformações [15].
- Módulo secante: é a inclinação de uma reta, partindo da origem até qualquer ponto do diagrama [15, 56], sendo então a razão entre a tensão e a deformação em qualquer ponto específico do diagrama [48, 25]. São utilizados em análises com materiais elastômeros ou polímeros dúcteis, ou seja, em aplicações que envolvam grandes deformações [15].
- Limite de resistência do material: corresponde à máxima tensão que um material suportará sem falhar quando submetido a um carregamento [17, 25]. Esta tensão está relacionada à tensão com que o material se rompe e que pode ser sob tração, compressão ou cisalhamento.
- Coefficiente de Poisson: esta propriedade não é extraída do diagrama, é determinada experimentalmente e mede a razão entre a deformação transversal em relação à longitudinal num corpo de prova sob esforço de tração ou de compressão. Segundo BAYER AG [53], o seu valor está compreendido entre 0,35 e 0,42 para os materiais



poliméricos. TICONA [48] recomenda utilizar o valor de 0,35 em aplicações na qual o coeficiente de Poisson do material não é conhecido.

Os materiais plásticos podem ser classificados de acordo com seu comportamento extraído do ensaio de tração e conseqüentemente do seu diagrama tensão-deformação. Segundo RUBIN [52] e TRES [43], os polímeros podem ser classificados como dúcteis ou tenazes e frágeis a uma determinada temperatura. Um material plástico dúctil falha pelo escorregamento relativo de suas moléculas umas sobre as outras. Isto é caracterizado por um grande alongamento antes de ocorrer a falha. Um polímero frágil falha por ação cisalhante e pela quebra das ligações moleculares caracterizado por um baixo alongamento.

MILLER [45] fornece uma classificação semelhante à apresentada anteriormente. O autor considera que os polímeros cristalinos freqüentemente falham com pronunciada ductilidade, como resultado da reorientação molecular durante a deformação. Já a falha de polímeros amorfos é notadamente frágil, com exceção do policarbonato que é um material de boa ductilidade.

Há outros autores que preferem classificar os materiais plásticos a partir da forma com que seu diagrama tensão-deformação apresenta-se. BERINS [56] classifica os polímeros em tipo A, B e C. Os diagramas generalizados característicos destes materiais estão ilustrados na Figura 3.3.

O material do tipo A apresenta um escoamento gradual. No tipo B o material apresenta um escoamento abrupto, enquanto que o material do tipo C rompe-se em baixas deformações apresentando um comportamento similar a de um material frágil. Os pontos 1 e 2 referem-se, respectivamente, ao limite de proporcionalidade e o limite elástico do material.

CHANDA e ROY [58] e TICONA [48] classificam os materiais plásticos segundo seu comportamento mecânico em: **macio e fraco**, **fraco e frágil**, **forte e tenaz** e **duro e forte**. A Figura 3.4 ilustra os diagramas generalizado característicos de cada categoria.

Os diagramas ilustrados nas Figura 3.4.a, 3.4.b, 3.4.c e 3.4.d correspondem, respectivamente aos diagramas característicos de materiais macio e fraco, fraco e frágil, forte e tenaz e duro e forte, segundo classificação de CHANDA e ROY [58] e TICONA [48].

De acordo com RUBIN [52] e [25], os materiais poliméricos podem ser classificados como macio e fraco, macio e tenaz, duro e forte, duro e tenaz e duro e frágil. A Figura 3.5 ilustra os diagramas generalizado característicos de cada categoria.

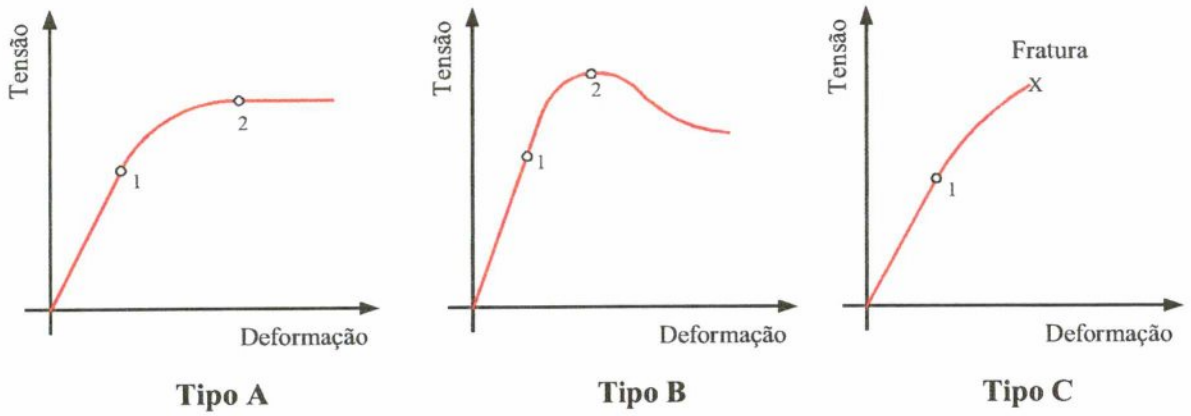


Figura 3.3: Classificação dos diagramas tensão-deformação segundo BERINS [56]

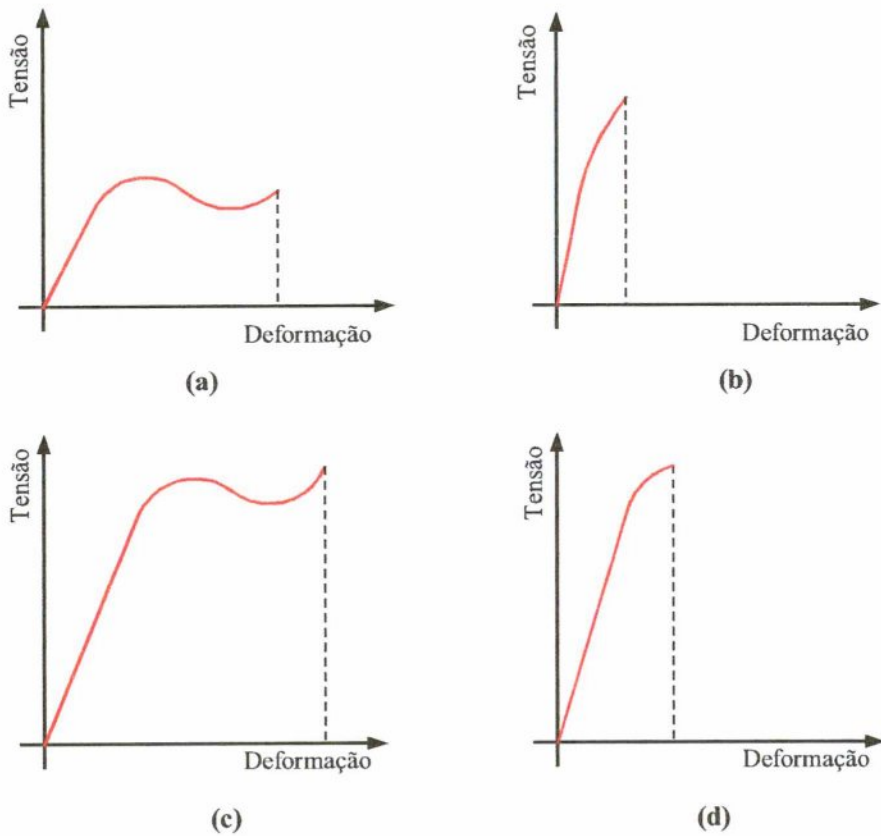


Figura 3.4: Classificação do comportamento mecânico dos materiais plásticos segundo CHANDA e ROY [58] e TICONA [48], em que: (a) macio e fraco; (b) fraco e frágil; (c) forte e tenaz e (d) duro e forte.

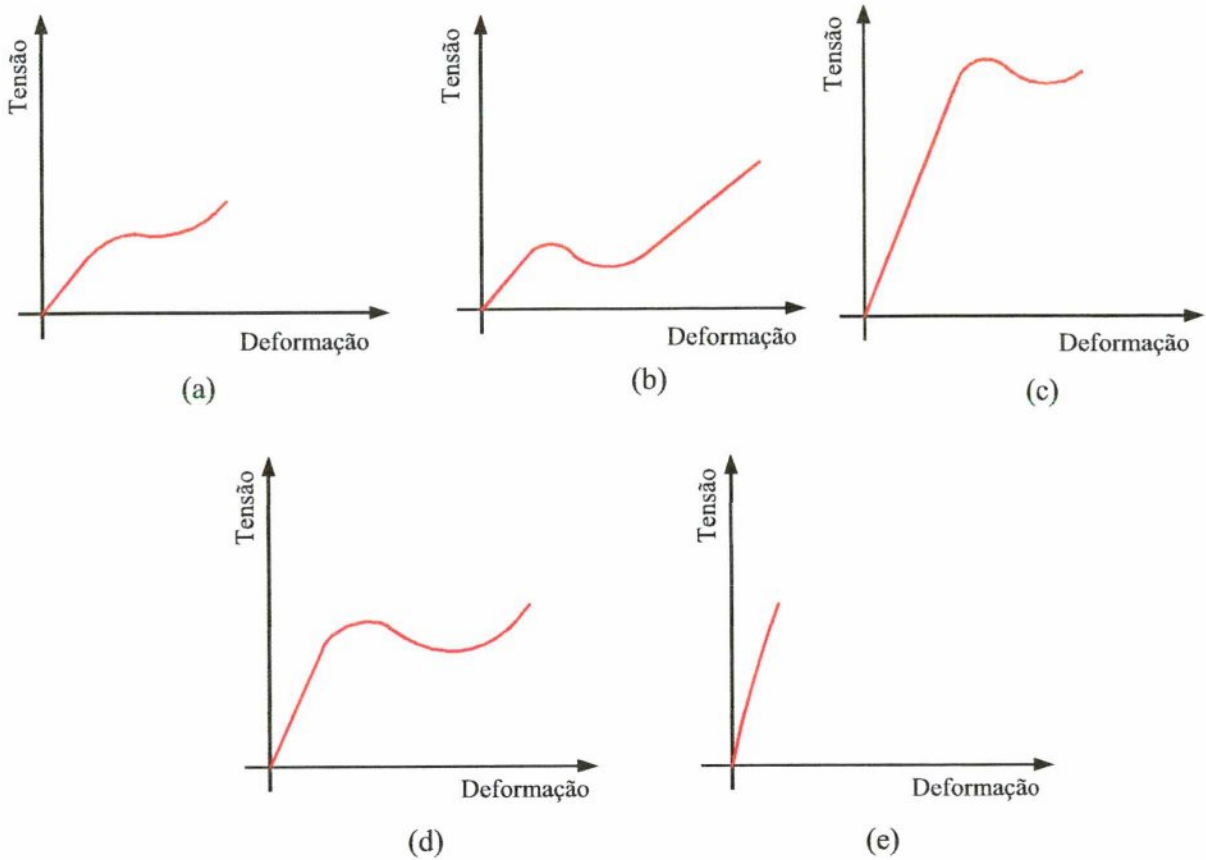


Figura 3.5: Classificação do comportamento mecânico dos materiais plásticos segundo [25], sendo (a) macio e fraco; (b) macio e tenaz; (c) duro e forte; (d) duro e tenaz e (e) duro e frágil

Um material macio e fraco, como os fluoroplásticos, caracteriza-se pelo baixo módulo de elasticidade e moderado alongamento até a ruptura, representado pelo diagrama da Figura 3.5.a. Um material macio e tenaz, como o polietileno apresenta baixo módulo de elasticidade, tensão limite elástico baixa e um alongamento até a ruptura muito grande, como caracteriza a Figura 3.5.b. Os materiais classificados como duro e frágil, como os fenólicos apresentam alto módulo de elasticidade e baixo alongamento até a ruptura, podendo ou não atingir a tensão limite elástico antes da ruptura (Figura 3.5.e). Um material duro e forte, como o poliacetal possui alto módulo de elasticidade e tensão limite elástico, geralmente possui alta resistência à ruptura com baixos alongamentos (Figura 3.5.c). Por último, apresenta-se o diagrama ilustrado pela Figura 3.5.d, que representa um material duro e tenaz, como o policarbonato. Este tipo de material caracteriza-se pelo alto módulo de elasticidade, alta tensão limite elástico, alta resistência à ruptura e alto alongamento até a ruptura [25].

A área sob os diagramas ilustrados nas Figuras 3.4 e 3.5 indica o quão tenaz é o material. A tenacidade refere-se à habilidade que um material tem em absorver energia mecânica



sem fraturar. As Figuras 3.4.c, 3.5.b e 3.5.d são exemplos de diagramas característicos de materiais tenazes.

Percebe-se que não há uma forma consensual para classificar o comportamento mecânico dos materiais plásticos. Recomenda-se que o projetista adote uma destas, que foram apresentadas anteriormente para proceder ao projeto de uma peça de plástico. O conhecimento do comportamento mecânico do material plástico é importante para que o projetista possa selecionar um critério de resistência de projeto no momento de avaliar as tensões durante a fase de análise de resistência mecânica do componente.

Durante os ensaios para determinar o diagrama tensão-deformação do material, a forma com que o carregamento é aplicado e a temperatura com que os ensaios foram realizados exerce forte influência no comportamento do material. A Figura 3.6 ilustra o efeito da taxa de deformação e da temperatura sobre o comportamento do material.

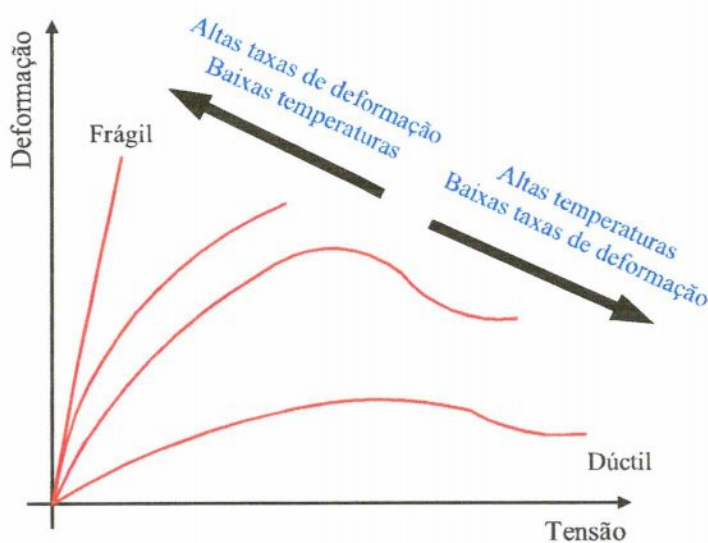


Figura 3.6: Diagrama ilustrando o efeito da taxa de deformação e da temperatura sobre o comportamento dos materiais plásticos [53]

A Figura 3.6 demonstra que a altas taxas de deformação e baixas temperaturas o material tende a um comportamento frágil. Ao se aplicar baixas taxas de deformação combinada a altas temperaturas o material tende a ter um comportamento dúctil. Cuidados nas aplicações de carregamentos devem ser tomados, principalmente durante a realização de ensaios para determinar propriedades dos materiais plásticos, que devem ser realizados segundo normas específicas. Este efeito é conhecido por taxa de carregamento ou *loading rate*.

### 3.1.1.2. Propriedades Compressivas

As propriedades compressivas dos polímeros descrevem o seu comportamento quando o mesmo é submetido a uma carga compressiva uniforme [25, 52]. Estas propriedades são obtidas através de ensaios de compressão segundo a norma ASTM D 695 ou ISO 604.

Sob compressão, um material frágil geralmente comporta-se como um material dúctil, visto que as microtrincas responsáveis pela falha do material no ensaio de tração não aparecem sob compressão. O módulo de elasticidade e a resistência à compressão são duas propriedades obtidas deste ensaio, cujos valores são maiores do que aqueles obtidos no ensaio de tração [25].

Em algumas aplicações é importante que o projetista obtenha os diagramas tensão-deformação do material considerado, obtidos de ensaios de tração e compressão, principalmente em aplicações em que há cargas que produzem esforços de flexão, pois nestas aplicações ambos os tipos de tensões estão atuando. Além disto, há muitos materiais plásticos que são consideravelmente mais resistentes à compressão que à tração [56].

### 3.1.1.3. Propriedades de Flexão

As propriedades de flexão de um material plástico informam o quão este material é resistente aos esforços de flexão. As principais propriedades obtidas através de um ensaio de flexão padronizado pela norma ASTM D 790 ou ISO 178 são o módulo de flexão e a tensão de resistência à flexão [53].

O módulo de flexão, também conhecido como módulo de elasticidade de flexão, é a medida da resistência de um material à deformação causada por um esforço de flexão. A relação entre o módulo de flexão e os módulos de elasticidade obtidos dos diagramas de tração ( $E_{\text{tração}}$ ) e compressão ( $E_{\text{comp}}$ ) é ilustrada através da Equação 3.3 [31, 43].

$$E_{\text{Flexão}} = \frac{4 \cdot E_{\text{tração}} \cdot E_{\text{comp}}}{\left(\sqrt{E_{\text{tração}}} + \sqrt{E_{\text{comp}}}\right)^2} \quad (3.1)$$

em que,  $E_{\text{flexão}}$  é o módulo de flexão;

$E_{\text{tração}}$  é o módulo de elasticidade obtido através do diagrama tensão-deformação em tração;

$E_{\text{comp}}$  é o módulo de elasticidade obtido através do diagrama tensão-deformação em compressão.



TICONA [48] recomenda que se utilize o módulo de flexão nas aplicações, a fim de se obter resultados mais precisos, mas como não é fácil obter tais valores, BAYER AG [48] afirma que o módulo de elasticidade obtido do ensaio de tração pode ser utilizado quando o módulo de flexão não estiver disponível.

A tensão de resistência à flexão é extraída diretamente do diagrama tensão-deformação do material. Para materiais frágeis este valor corresponde à tensão de ruptura. Para materiais dúcteis corresponde à tensão limite elástico [53].

#### *3.1.1.4. Cisalhamento*

A resistência ao cisalhamento e o módulo de cisalhamento (G) são as duas principais propriedades relacionadas ao cisalhamento que devem ser observadas. Estes valores são obtidos através de ensaios, segundo a norma ASTM D 732.

De acordo com a BAYER AG [53], o valor da resistência ao cisalhamento de um material utilizado em análises estruturais de peças que são propícias a falharem por cisalhamento, deve ser utilizado com cautela, pois os ensaios realizados não consideram o efeito da concentração de tensões e do surgimento de tensões residuais na peça.

#### *3.1.1.5. Resistência ao Impacto*

Esta propriedade representa a habilidade do material plástico absorver energia mecânica num curto intervalo de tempo [25]. A resistência ao impacto é medida através dos ensaios Charpy (ISO 179), Izod (ASTM D256, D4812 ou ISO 180), impacto à tração (ASTM D 1822 ou ISO 8256) e outros. Detalhes sobre a realização de cada ensaio destes pode ser mais bem entendido em [53, 25].

A resistência ao impacto geralmente aumenta com o peso molecular do polímero e é fortemente afetada pela temperatura e pela taxa com que o carregamento foi aplicado. Em temperaturas abaixo da transição vítrea o material é frágil e conseqüentemente a resistência ao impacto é baixa. Um material plástico que exhibe extrema ductilidade quando submetido a uma taxa de carregamento baixa pode falhar de um modo semelhante aos materiais frágeis sob um carregamento instantâneo e característico de impacto [25].

Num evento envolvendo impacto entre dois corpos, um impactor e outro alvo, o fator que determina uma análise técnica apropriada é o tempo necessário para que o evento ocorra. Se o tempo de impacto é menor do que o período natural do objeto alvo, então sua massa deve ser levada em consideração na análise. Um exemplo de uma situação desta seria quando o vetor

força de impacto não passar pelo centro de gravidade do objeto alvo, ou seja, haverá uma rotação deste corpo ao redor do seu centro de gravidade. Se por outro lado, o tempo de impacto for maior do que o período natural do objeto alvo, a massa deste pode ser desprezada e um balanço de energia é utilizado para analisar o evento, em que a energia cinética do objeto impactor é igual a energia de deformação total [34]. Vale lembrar que o período natural de um corpo é igual ao inverso da sua frequência natural.

Concentração de tensões devem ser evitadas, a fim de que a resistência ao impacto do componente não seja reduzida. A concentração de tensões é evitada utilizando, no projeto do componente, raios de arredondamento adequados (ver item 5.1.2.1) e posicionando o ponto de injeção e as linhas de solda em regiões que não estejam sujeitas a altas forças de impacto, já que em regiões próximas aos pontos de injeção há altos níveis de concentração de tensões e as linhas de solda possuem baixa resistência devido a baixa difusão do material, agindo como um concentrador de tensões (ver Figura 3.15). BAYER AG [53] recomenda que se utilize nervuras com espaçamento desigual para aumentar a rigidez do componente, bem como a sua frequência natural. Utilizar formas arredondadas nos componentes, a fim de que a energia do impacto seja espalhada por todo o componente e selecionar materiais com boa resistência ao impacto são outras soluções que podem ser utilizadas, a fim de melhorar o desempenho do componente.

#### *3.1.1.6. Dureza, Desgaste e Atrito*

Segundo MICHAELI [55], o termo dureza, geralmente significa a resistência que um corpo impõe a outro ao ser penetrado. Segundo BAYER AG [53], esta informação é utilizada como uma medida da resistência do material. Para materiais plásticos geralmente é utilizada a dureza Shore.

Geralmente, a perda de volume do material quando exposto a uma superfície abrasiva sob carregamento determina a resistência à abrasão do material. O ensaio de transmissão/reflexão da luz (ASTM D 1044) é utilizado para medir o efeito e o grau de desgaste em polímeros transparentes.

O atrito descreve a resistência ao movimento relativo entre dois corpos em contato mútuo. O desgaste ocorre quando as forças de contato tangencial ou normal agindo durante o movimento relativo destrói a superfície de ambos os materiais envolvidos [55].

A BAYER AG [53] ilustra uma tabela contendo a faixa de valores de coeficientes de atrito estático de algumas classes de materiais termoplásticos em contato entre si e com o aço. Estes valores são determinados através de ensaios normalizados pela ASTM D 1894 ou ISO 8295.



## 3.1.1.7. Fluência (Creep)

Uma das mais importantes conseqüências da viscoelasticidade dos materiais plásticos é a deformação que ocorre ao longo do tempo quando um material é submetido a um carregamento constante de longa duração a uma temperatura também constante. Sob estas condições as cadeias poliméricas escorregam umas sobre as outras. Pelo fato destes movimentos serem permanentes apenas uma porção da deformação total pode ser recuperada quando a carga for removida [48]. Desta forma, BERINS [56] define a fluência (*creep*) como sendo a deformação irrecuperável apresentada pelo material, no tempo, sob um carregamento constante. A Figura 3.7 ilustra como este fenômeno ocorre.

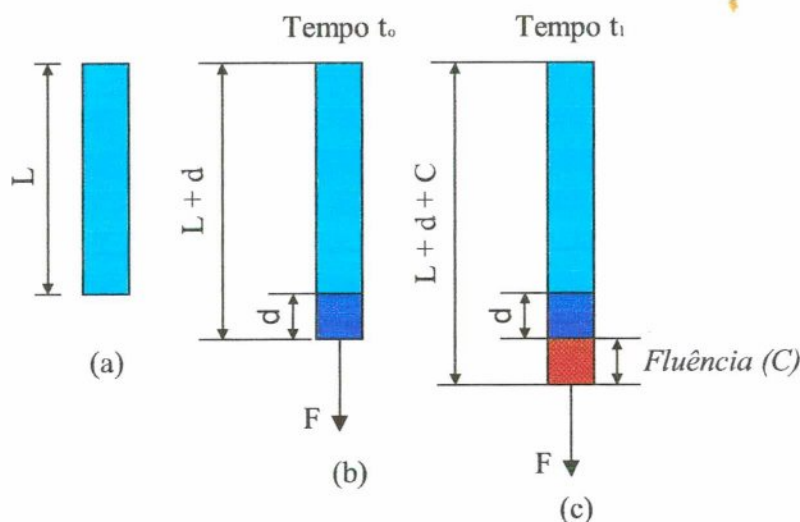


Figura 3.7: Ilustração da ocorrência da fluência [15, 25, 43, 48, 53]

A Figura 3.7.a mostra uma barra de comprimento  $L$ . No tempo  $t_0$ , uma força  $F$  é aplicada na sua extremidade, como ilustra a Figura 3.7.b e a barra deforma-se de um valor igual a  $d$ , apresentando um comprimento  $L+d$ . Num tempo  $t_1$  a barra estará a um comprimento  $L+d+C$ , em que  $C$  corresponde à parcela gerada pela fluência do material em decorrência da sua viscoelasticidade.

Segundo ROSATO e ROSATO [49], fluência significa mudança nas dimensões de um componente de plástico e redução da sua resistência quando o mesmo estiver sujeito a um carregamento constante num tempo prolongado. De acordo com GE PLASTIC [22] e TICONA [48], um componente de plástico pode falhar por fluência através de dois modos. O primeiro acontece quando o componente apresenta deformações excessivas, ou seja, quando a deformação do componente ultrapassa o limite permitido para a sua aplicação. O segundo modo refere-se à fratura do componente, que pode ser dúctil ou frágil.

Os dados referentes à fluência do material são apresentados através de diagramas ilustrando a deformação resultante como uma função do tempo para diferentes níveis de tensões e mesma temperatura [45]. Os principais diagramas comumente utilizados são ilustrados na Figura 3.8.

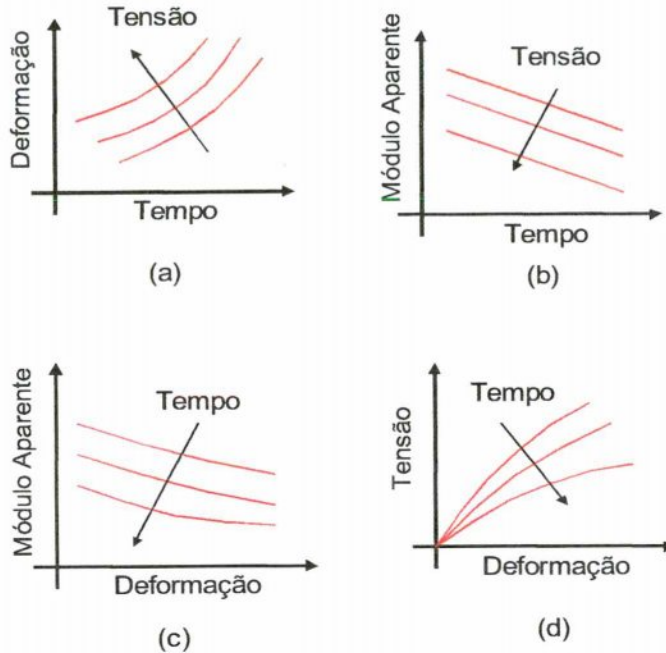


Figura 3.8: Diagramas representativos das várias formas de representar a fluência [25].

Na Figura 3.8.a está ilustrado o diagrama tempo *versus* deformação sob tensões constantes. Na Figura 3.8.b está ilustrado o diagrama tempo *versus* módulo aparente, também sob tensões constantes. As Figuras 3.8.c e 3.8.d ilustram diagramas isocrônicos de deformação *versus* módulo aparente e deformação *versus* tensão, respectivamente. As setas em diagramas deste tipo indicam redução ou aumento de tempo ou tensão.

Durante o projeto de peças de plástico que estejam sob carregamentos de longa duração, as informações fornecidas a partir dos diagramas característicos da fluência (Figura 3.8) devem ser utilizadas para garantir que o componente não falhe ou se deforme excessivamente durante sua vida útil. [15]. O módulo de fluência, ou módulo aparente, é utilizado nestes casos e pode ser determinado diretamente através do diagrama do material semelhante àqueles, ilustrados nas Figuras 3.8.b ou 3.8.c ou através da equação 3.1, em que a tensão e a deformação no tempo são obtidos dos diagramas do material semelhantes àqueles ilustrados nas Figuras 3.8.a e 3.8.d.

$$E(t, T) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)} \quad (3.2)$$

em que,  $E(t, T)$  é o módulo de fluência do material num tempo  $t$  qualquer e numa temperatura  $T$ ;  
 $\sigma$  é a tensão no componente e;  
 $\varepsilon(t)$  é a deformação apresentada pelo componente num tempo  $t$  qualquer.

Segundo GE PLASTIC [22] e STRONG [24] a deformação resultante de um componente sob a ação da fluência é fortemente dependente da magnitude do carregamento aplicado, do tempo de aplicação do carregamento e da temperatura. Aumentando qualquer um destes parâmetros produzirá maiores deformações.

Propriedades do material plástico que retardam os movimentos moleculares reduzirão a ação da fluência, como por exemplo, a cristalinidade e as ligações cruzadas. Alto peso molecular também reduz a ação da fluência [24]. Materiais termoplásticos reforçados e termofixos também possuem alta resistência à fluência [31, 49].

Depois que o carregamento de longa duração for removido do componente de plástico, o mesmo não retornará às suas dimensões originais em consequência da viscoelasticidade. Apenas uma parte delas são recuperadas. Este fenômeno é denominado **efeito recuperativo** (*Recovery*), também conhecido por efeito de memória. A Figura 3.9 ilustra como este fenômeno acontece.

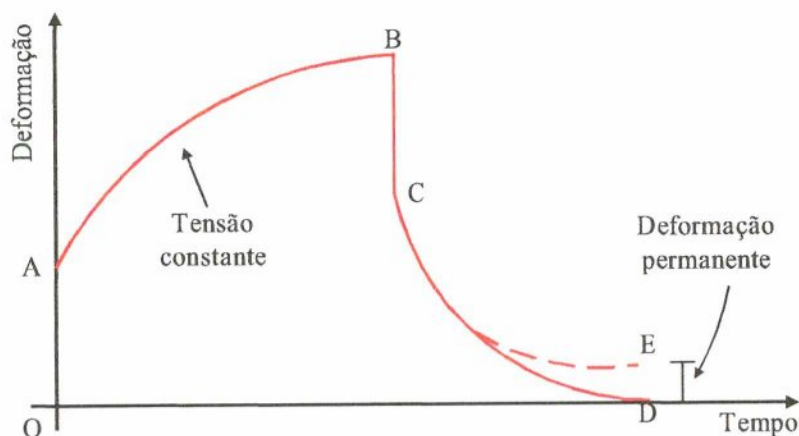


Figura 3.9: Diagrama típico de um ciclo completo de carregamento e descarregamento de longa duração de um material plástico ilustrando como ocorre o efeito recuperativo [2, 22, 53]

Na Figura 3.9 está ilustrado um diagrama de deformação *versus* tempo. Ao aplicar uma carga sobre um corpo de prova o mesmo apresenta uma deformação inicial, representada na Figura 3.9 pelo ponto A. Ao longo do tempo o material flui sob tensão constante (fluência) causando uma deformação maior alcançando o ponto B. Quando a carga é removida a deformação cai imediatamente até o ponto C. A partir deste ponto, se fosse possível uma total recuperação das dimensões da peça, a mesma retornaria à sua forma original, representado pelo



ponto D. Como os materiais plásticos são materiais viscoelásticos os mesmos produzem também deformações permanentes e isto faz com que a sua forma original não seja retomada desviando-se então para o ponto E. O trecho OA é igual ao BC. De acordo com a GE PLASTIC [22], o efeito recuperativo depende do tipo de material, do carregamento aplicado, da temperatura e do tempo de aplicação da carga.

### 3.1.1.8. Relaxação das Tensões (Stress Relaxation)

O alívio de tensões, ou *stress relaxation*, é também outro fenômeno viscoelástico. Segundo GE PLASTIC [22], TRES [43], BAYER AG [53] e BERINS [56], este fenômeno é definido como um gradual decréscimo na tensão sob uma deformação e temperatura constantes. O grau de alívio de tensões também depende de vários fatores como duração do carregamento, temperatura e o tipo de tensão e deformação [53]. A Figura 3.10 ilustra como este fenômeno ocorre.

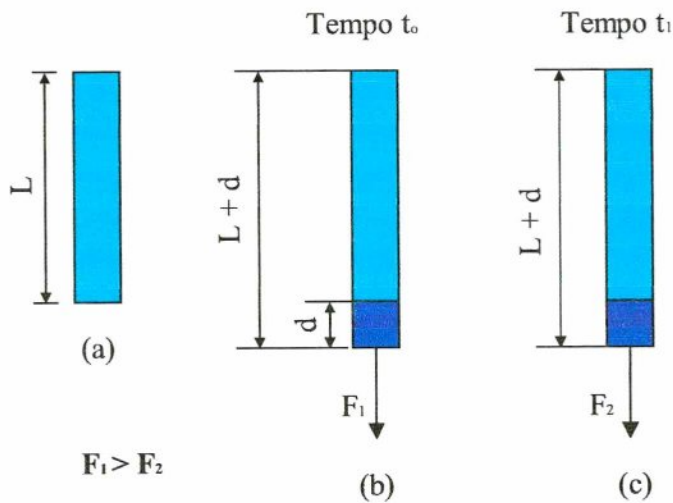


Figura 3.10: Ilustração da ocorrência de alívio de tensões [15, 25, 43, 48, 25]

A Figura 3.10.a ilustra uma barra de comprimento  $L$  e fabricada em material plástico. A Figura 3.10.b ilustra a mesma barra num tempo  $t_0$  sendo tracionada por uma força  $F_1$  produzindo, assim um alongamento  $d$  e conseqüentemente uma deformação  $d/L$ . Para manter o mesmo alongamento e deformação ao longo do tempo uma força ( $F_2$ ) menor que  $F_1$  será necessária (Figura 3.10.c).

Quando um componente de plástico encontra-se livre de carregamentos externos, suas cadeias moleculares encontram-se num estado emaranhado. Quando um carregamento externo é aplicado estas cadeias se esticam. As moléculas do componente de plástico que tenham apresentado uma deformação constante no tempo tendem a retomar o seu estado emaranhado



inicial. O movimento de retorno das cadeias moleculares reduz as tensões internas produzindo, assim, o seu relaxamento e conseqüentemente o fenômeno de alívio de tensões [45].

O projetista deve considerar este fenômeno ao projetar componentes que estejam sob deformação constante durante um prolongado período de tempo utilizando para isto os diagramas característicos. Estes diagramas são gerados através de ensaios, em que é aplicada uma deformação constante em um corpo de prova e medida a redução gradual da tensão do corpo de prova no tempo. Para os projetistas estes diagramas são raramente disponibilizados, devido à complexidade que se constitui a aparelhagem necessária para realizar tais ensaios, tornando sua realização economicamente inviável. Geralmente são utilizados os diagramas de fluência para determinar o módulo de alívio de tensões, que é determinado pela equação 3.3.

$$E(t, T) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

em que,  $E(t, T)$  é o módulo de alívio de tensões num tempo  $t$  qualquer e numa temperatura  $T$ ;

$\sigma(t)$  é a tensão apresentada pelo componente num tempo  $t$  qualquer e;

$\varepsilon$  é a deformação apresentada pelo componente.

As normas utilizadas para obter os diagramas de fluência e de alívio de tensões são a ASTM D 2990 ou a ISO 899. Mais informação a respeito destas propriedades, bem como informações a respeito dos modelos matemáticos que descrevem estas propriedades podem ser encontrados em FINDLEY *at al* [59] e [25].

### 3.1.1.9. Fadiga

As informações a respeito da resistência à fadiga de um material são necessárias quando as peças estarão submetidas a cargas cíclicas, como dentes de engrenagens, *snap-fits*, etc. Os componentes sob carregamentos cíclicos perdem gradualmente a sua resistência devido a um acúmulo de estragos, como rompimento das cadeias moleculares, mudança da cristalinidade e aparecimento e desenvolvimento de microtrincas provenientes dos esforços cíclicos. Se a fadiga é um fator significativo no projeto, o componente estará susceptível à falha com tensões abaixo do limite elástico do material [15, 25].

A tensão limite de resistência à fadiga, que segundo YOUNG [57] é a maior tensão alternada que um material consegue suportar durante um determinado número de ciclos sem falhar, é a principal propriedade obtida através do ensaio de fadiga. Os dados obtidos do ensaio são apresentados através de um diagrama conhecido como **diagrama S-N**, em que são

relacionados a tensão e a quantidade de ciclos até a ruptura. Este diagrama apenas fornece ao projetista uma idéia de como o material se comporta sob carregamentos cíclicos [48, 34].

Pelo fato dos materiais plásticos serem viscoelásticos e sensíveis à mudança de propriedades devido à variação de temperatura, a resistência à fadiga de um material é significativamente afetada pela frequência e amplitude do carregamento utilizado no ensaio, geometria do corpo de prova e principalmente pela temperatura que pode causar a falha térmica. Este tipo de falha é atribuído ao aumento de calor resultante do carregamento cíclico, que não é dissipado em consequência da baixa condutividade térmica destes materiais [15, 25, 48].

Além da falha térmica, ocorre também a falha mecânica que envolve duas fases: a formação da trinca e a consequente propagação da mesma. Geralmente, as trincas são formadas na superfície da peça, pois é nesta região que se localizam as maiores tensões de tração provenientes de um carregamento cíclico de flexão [25]. Para os propósitos de projeto de componentes de plástico, MALLOY [15] recomenda que os ensaios sejam realizados utilizando corpos de prova moldados por injeção, para que as tensões residuais sejam consideradas, e em condições que sejam representativas daquelas associadas com as de utilização do componente.

Ao projetar componentes sob carregamento cíclico, MALLOY [15] recomenda as seguintes orientações:

- a) Manter as tensões no componente sempre baixas;
- b) Reduzir a frequência do carregamento, quando possível;
- c) Melhorar a transferência de calor do componente, utilizando nervuras, que funcionarão como aletas, evitando peças muito espessas para não acumular calor e refrigerando o componente com circulação forçada de ar, quando possível. Estes cuidados ajudam a evitar a falha térmica;
- d) Utilizar materiais plásticos com alta condutividade térmica;
- e) Utilizar materiais resistentes à altas temperaturas e;
- f) Utilizar materiais que tenham boa auto lubrificação superficial.

### *3.1.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS*

Os materiais plásticos são muito sensíveis à mudança de temperatura. Suas propriedades mecânicas, elétricas e químicas são influenciadas pela variação de temperatura. O efeito da mudança de temperatura sobre as propriedades destes materiais nem sempre é consistente. Altas temperaturas podem afetar bastante algumas propriedades mecânicas dos polímeros, reduzindo os níveis de tensões e alterando os de deformações num componente sob esforços, fazendo com que suas dimensões sejam alteradas. Os materiais plásticos conhecidos por ter boa estabilidade



dimensional são aqueles com baixo coeficiente de dilatação térmica e boa resistência à fluência sob uma faixa de temperaturas associada com a de aplicação. As altas temperaturas podem ainda acentuar bastante as propriedades elétricas de alguns plásticos. Desta forma, é necessário que o projetista conheça os níveis de temperatura aos quais o componente estará submetido para selecionar um material adequado [48, 55]. A seguir são apresentadas as principais propriedades térmicas dos materiais plásticos.

#### *3.1.2.1. Temperatura de Transição Vítrea ( $T_g$ )*

Segundo [25], a temperatura de transição vítrea é a temperatura na qual o polímero apresenta uma significativa mudança nas suas propriedades causadas pelo deslizamento das cadeias moleculares. Abaixo da temperatura de transição vítrea, o material é frágil e vítreo, enquanto que acima desta temperatura o material é tenaz, no caso de se ter um termoplástico semicristalino ou possuir um comportamento viscoso, no caso de um termoplástico amorfo [43, 48]. Recomenda-se que a temperatura de aplicação de um material amorfo esteja sempre limitada a temperaturas abaixo da de transição vítrea do material, uma vez que esta temperatura, para estes materiais, apresenta valores maiores que a temperatura ambiente [25].

#### *3.1.2.2. Temperatura de Fusão ( $T_m$ )*

Em alguns materiais plásticos há uma certa organização das cadeias moleculares quando o material encontra-se no estado sólido. Segundo McCRUM *et al* [54] e MICHAELI [55] e TICONA [48], a temperatura de fusão é a temperatura acima da qual ocorre uma desorganização tal das cadeias moleculares que o material passa a fluir.

Os polímeros amorfos não apresentam uma temperatura de fusão bem definida, mas sim uma faixa de temperaturas. Já os polímeros semicristalinos apresentam temperatura de fusão bem definida [43, 52]. Por este fato, esta propriedade é também conhecida como temperatura de fusão cristalina. Esta propriedade é bastante utilizada nos processos de moldagem e em alguns processos de montagem de componentes.

#### *3.1.2.3. Temperatura de Deflexão Sob Carregamento*

É a temperatura na qual um corpo de prova sob uma carga deflexiva deforma-se de 0,254 mm [48]. Esta propriedade distingue materiais que perdem sua rigidez sob uma certa faixa de temperatura daqueles que são capazes de mantê-la sob elevadas temperaturas e solicitações [43]. A partir desta propriedade o projetista pode selecionar um material adequado para ser

utilizado em altas temperaturas. O ensaio para obter esta temperatura segundo a norma ASTM D 648.

#### 3.1.2.4. Coeficiente de Dilatação Térmica

Quando qualquer material é aquecido há um aumento na sua vibração e movimento de rotação molecular e um conseqüente aumento na distância entre os átomos, resultando num aumento de volume. A propriedade do material que determina o quanto seu volume aumentará é conhecida como coeficiente de dilatação térmica, sendo o percentual de redução do volume conhecido por contração [53, 52]. A unidade desta propriedade é  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Segundo TRES [43], os polímeros expande-se e contrai-se de 5 a 10 vezes mais do que os metais. Esta propriedade pode ser diminuída utilizando materiais de reforço, como fibra de vidro ou de carbono. Desta forma, recomenda-se a utilização de materiais reforçados em aplicações que haja montagem entre componentes de plástico e metálico, pois com a utilização de materiais de reforço a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica deste dois materiais é reduzida. Os ensaios para se obter esta propriedade são realizados através da norma ASTM E 831.

#### 3.1.2.5. Condutividade Térmica

A condutividade térmica representa a taxa com que o calor é transferido por condução através de uma área de um dado material quando houver um gradiente de temperatura na direção perpendicular a esta área, ou seja, esta propriedade mede a habilidade do material para conduzir energia térmica [43, 52, 53].

Os materiais plásticos apresentam condutividade térmica baixa, comparados aos metais. Desta forma, esta propriedade é importante quando se necessita projetar um componente de plástico que funcione como um isolante térmico, assim um material de menor condutividade térmica será selecionado. A ASTM C 518 ou ISO 2581 normalizam o ensaio para obtenção desta propriedade. Sua unidade é  $\text{W/K}\cdot\text{m}$ .

#### 3.1.2.6. Calor Específico

Também conhecido como capacidade térmica de um material, é definido como sendo a quantidade de calor necessária para elevar de  $1^{\circ}\text{C}$  a temperatura de uma massa de 1 grama [25, 52, 53]. O calor específico de um material plástico determina a quantidade de calor necessária para fundir o material e, portanto, a quantidade de calor que deve ser removida até que se alcance a temperatura de extração do componente. Esta propriedade é bastante utilizada nos projetos de moldes de injeção para calcular a perda de calor devido a condução entre a massa plástica



fundida e o sistema de refrigeração do molde durante a análise de preenchimento e recalque e para determinar o aumento de temperatura devido ao cisalhamento provenientes do preenchimento da cavidade. Em geral, o calor específico dos materiais plásticos é maior do que o dos metais [9]. A unidade desta propriedade é KJ/Kg°C.

#### *3.1.2.7. Temperatura de Amolecimento Vicat*

É a temperatura, medida em graus Celcius (°C), na qual uma agulha de ponta plana de 1 mm<sup>2</sup> penetra num corpo de prova de 1 mm de espessura, sob um carregamento específico. Este ensaio (ASTM D 1525 ou ISO 306) indica a habilidade de um material suportar cargas de baixa duração quando o mesmo estiver sob elevadas temperaturas [34].

#### *3.1.2.8. Índice Relativo de Temperatura*

Quando um material plástico é exposto à temperaturas elevadas suas propriedades mecânicas e elétricas são afetadas pelo desgaste térmico. O índice relativo de temperatura indica o valor da temperatura acima da qual o desgaste térmico causa a perda de certas propriedades críticas, como resistência dielétrica, resistência à tração e ao impacto [53]. Esta propriedade é útil no momento de selecionar materiais, pois compara a duração com que os materiais plásticos mantêm as suas propriedades sob elevadas temperaturas.

### *3.1.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS*

Os materiais plásticos possuem propriedades isolantes elétricas que os fazem ser ideais para muitas aplicações elétricas e eletrônicas, mas estes materiais não são isolantes elétricos perfeitos. Sob algumas condições, os polímeros podem conduzir corrente elétrica tanto pelo interior do material quanto pela sua superfície [25]. As principais propriedades elétricas apresentadas neste item serão: resistividade volumétrica, resistividade superficial, resistência dielétrica, constante dielétrica, fator de dissipação e resistência ao arco.

#### *3.1.3.1. Resistividade Volumétrica*

É a medida da resistência à passagem de corrente elétrica através do polímero. É uma propriedade utilizada para comparar os materiais que podem ser utilizados como isolantes elétricos [25, 53]. Os ensaios para obter esta propriedade são realizados através das normas ASTM D 257 ou IEC 93.

### *3.1.3.2. Resistividade Superficial*

Esta propriedade indica a habilidade de um material plástico conduzir a corrente elétrica através da sua superfície [25, 48, 53]. Esta informação é importante para selecionar materiais cuja aplicação requirite a não condução de corrente elétrica através da superfície do componente [48]. Os ensaios são realizados através das normas ASTM D 257 ou IEC 93.

### *3.1.3.3. Resistência Dielétrica*

Quando um material isolante elétrico está sujeito a um aumento gradativo de voltagem, o mesmo falhará permitindo a passagem de corrente elétrica. A voltagem alcançada ligeiramente antes da falha dividida pela espessura do corpo de prova é conhecida como resistência dielétrica do material. Temperatura, espessura do componente, taxa de aumento de voltagem e duração do ensaio são fatores que afetam esta propriedade. Contaminação do material ou vazios internos podem causar a falha prematura do componente. Os ensaios são realizados através da norma ASTM D 149 ou IEC 243.

### *3.1.3.4. Constante Dielétrica*

Quando um campo elétrico é aplicado a um material isolante elétrico, suas moléculas apolares tornam-se polarizadas por indução e as moléculas polares por polarização de orientação. Se este campo for invertido, a polarização das moléculas também se inverte. A facilidade com que um material pode ser polarizado é indicada pela permissividade do material. A razão entre a permissividade do material e do vácuo é chamada de constante dielétrica do material. Esta propriedade é importante quando materiais plásticos são utilizados como materiais dielétricos em aplicações com altas frequências [48]. Segundo BAYER AG [53], esta propriedade varia com a temperatura, espessura do componente, frequência e níveis de mistura no material, incluindo água. Os ensaios são realizados através das normas ASTM D 150 ou IEC 150.

### *3.1.3.5. Fator de Dissipação*

Esta propriedade mede a tendência do material plástico dissipar calor quando submetido a um campo elétrico alternado [25, 53]. Esta propriedade é importante quando se aplicam os materiais plásticos em equipamentos que funcionem sob altas frequências, como radares e fornos de microondas. Geralmente, o fator de dissipação de um material plástico aumenta com o aumento da temperatura, principalmente depois da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), para termoplásticos semicristalinos [25, 48].



### 3.1.3.6. Resistência ao Arco

Se um arco elétrico é aplicado sobre a superfície de um material isolante, o material pode desenvolver um caminho condutivo. A resistência ao arco mede o tempo, em segundos, para o caminho condutivo se desenvolver sobre a superfície do corpo de prova [25, 34, 48, 53].

Um material com valor de resistência ao arco elevado possui aplicações elétricas onde há a possibilidade de se desenvolver um caminho condutivo no componente, como interruptores de luz, componente de sistemas de ignição de automóveis e aparelhos que trabalhem sob altas voltagens [53, 48]. As normas técnicas utilizadas para obter estas propriedades são a ASTM D 495 e UL 746 A.

### 3.1.4. PROPRIEDADES ÓPTICAS

Segundo MICHAELI [55], as propriedades ópticas de um material polimérico estão relacionados ao seu comportamento sob a ação da luz, mais precisamente sob a ação da porção visível do espectro da luz, bem como as regiões ultravioleta e infravermelha. As principais propriedades ópticas normalmente de interesse do projetista são: o índice de refração, transparência e cor.

#### 3.1.4.1. Refração

A capacidade que um material polimérico tem de refratar mais ou menos a luz incidente é medida através do seu índice de refração. Esta propriedade é utilizada também para selecionar materiais para aplicações que sejam necessárias pouca dispersão de luz que incide sobre o componente. O índice de refração é determinado através da lei de Snell, ilustrada através da Equação 3.4 [53, 55].

$$n = \frac{\text{sen } \gamma}{\text{sen } \beta} \quad (3.4)$$

em que,  $n$  é o índice de refração do material e;

$\gamma$  e  $\beta$  são os ângulos de incidência e refração, respectivamente como estão ilustrados na Figura 3.11.

Segundo MICHAELI [55], o índice de refração de qualquer material depende da frequência da luz incidente. Utilizam-se as normas ASTM D 542 ou ISO 489 para realizar ensaios e obter os valores de índice de refração para os materiais poliméricos

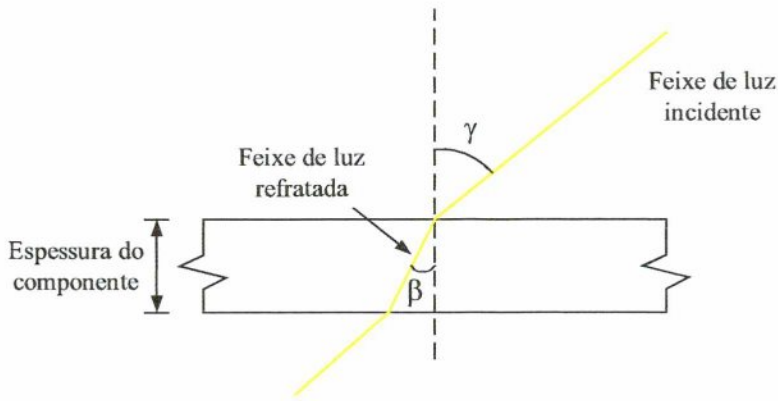


Figura 3.11: Ilustração do fenômeno de refração em materiais poliméricos

#### 3.1.4.2. Transparência

De acordo com MICHAELI [55], transparência, turbidez e claridade são termos inter-relacionados. Se uma imagem transmitida por um sistema óptico apresenta distorções, então significa que há uma redução na **claridade**. A dispersão óptica com perda severa de contraste é o resultado da **turbidez**. A **transparência** é a razão entre a intensidade de luz transmitida (não refletida) e a intensidade de luz incidente [48, 53, 55]. Turbidez e claridade reduzida indicam irregularidades na superfície do material, como sujeiras, defeitos superficiais, rugosidade superficial muito grande, etc. Efeitos térmicos e ambientais, como degradação por radiação solar, umidade e variações de temperatura podem causar mudanças na transparência do material [55]. Normalmente, os termoplásticos amorfos são transparentes, enquanto que os semicristalinos são opacos. Estas propriedades são obtidas através de ensaios normalizados pela ASTM D 1003.

#### 3.1.4.3. Cor

A depender do tipo de polímero e do efeito óptico que se deseja corantes solúveis são adicionados a fim de dar cor ao material. De acordo com MICHAELI [55], a cor é uma impressão conduzida pelo olho humano e é o resultado da reflexão, transmissão e absorção da luz emitida por alguma fonte de luz. A sua percepção depende de três fatores: a qualidade da iluminação incidente sobre o objeto, propriedades ópticas do objeto iluminado e sensibilidade do olho humano.

#### 3.1.5. PROPRIEDADES ACÚSTICAS

Segundo MICHAELI [55], o comportamento acústico dos materiais poliméricos está diretamente relacionado ao seu comportamento elástico-dinâmico. Um material polimérico



muito utilizado em aplicações que requeiram isolamento sonoro é a espuma, a qual é formada por pequenas células. Quando uma onda sonora incide sobre este material esta onda entra nas suas células e perde energia através do atrito entre as moléculas de ar contidos entre as células e através da deformação das paredes do material fazendo com que o som seja absorvido. No caso de amortecimento de vibrações, os materiais mais utilizados são os elastômeros, como a borracha. Geralmente estes materiais são utilizados em máquinas amortecendo suas vibrações, a fim de não permitir sua transmissão para o barramento da máquina.

### *3.1.6. PROPRIEDADES REOLÓGICAS*

Estas propriedades dos polímeros são medidas através de aparelhos conhecidos como reômetros ou através de outros aparelhos similares a este. Os ensaios realizados para obter as propriedades reológicas dos materiais poliméricos são realizados com baixas taxas de cisalhamento o que não condiz com aquelas produzidas durante a moldagem por injeção de um componente de plástico. Desta forma, os valores destas propriedades devem ser utilizados com certa cautela. As principais propriedades reológicas dos materiais plásticos apresentados neste item são: viscosidade, índice de fluidez e fluxo em espiral.

#### *3.1.6.1. Viscosidade*

Segundo BAYER AG [53] e MICHAELI [55], a viscosidade é a medida da resistência interna do material a uma força constante durante o escoamento do mesmo. Do ponto de vista químico e molecular, a viscosidade de um material é função do comportamento das cadeias moleculares e da resistência das ligações entre elas, ou seja, é função da energia requerida para causar movimento relativo entre as cadeias moleculares adjacentes [22].

Segundo GE PLASTIC [22], a viscosidade de um material plástico é função da sua temperatura e da quantidade presente de material de preenchimento ou de aditivos. Tanto o aumento da temperatura, quanto a presença de materiais de preenchimento e aditivos tendem a reduzir a viscosidade. O peso molecular do material também influencia, uma vez que polímeros com peso molecular elevado, geralmente, possuem viscosidade alta.

#### *3.1.6.2. Índice de Fluidez*

Segundo MALLOY [15], o índice de fluidez de um material fornece uma indicação grosseira da capacidade de processamento de um polímero, pois o mesmo não descreve completamente o comportamento fluido-viscoso do material. No entanto, há uma certa relação

direta entre viscosidade e índice de fluidez. BAYER AG [53] afirma que índices de fluidez altos indicam baixa resistência ao escoamento e conseqüentemente baixa viscosidade. Os ensaios são realizados através das normas ASTM D 1238 ou ISO 1133.

### *3.1.6.3. Fluxo Espiral*

O ensaio de fluxo espiral mede normalmente a distância que o polímero percorre ao longo de um canal em forma de espiral, a fim de determinar a capacidade de moldagem da resina [53]. Este ensaio é importante, pois é através dele que se pode comparar as propriedades reológicas dos materiais, além de ajudar o projetista a decidir sobre a melhor localização do ponto de injeção da peça, especialmente em peças com espessura de parede constante [15].

### *3.1.7. OUTRAS PROPRIEDADES*

Outras propriedades apresentadas neste item e que, a depender do tipo de aplicação, também são importantes no momento de selecionar um material são: densidade, gravidade específica, volume específico, contração volumétrica e flamabilidade. Propriedades biológicas e de barreira de alguns materiais poliméricos, são também relevantes em certas aplicações, como será discutido a seguir.

#### *3.1.7.1. Densidade, Gravidade Específica e Volume Específico*

A densidade é a medida da massa por unidade de volume expresso em gramas por centímetros cúbicos, enquanto que a gravidade específica de um material é a sua densidade dividida pela densidade da água. Ambos são utilizados para determinar o peso e os custos de um componente [25, 43, 48, 53].

O volume específico é o recíproco da densidade e pode ser utilizado em seu lugar para determinar também o peso de um componente e seus custos. Para a determinação dos custos de um componente é necessário conhecer o preço do material, que geralmente é expresso em unidade monetária por quilo ou centímetros cúbicos.

#### *3.1.7.2. Contração Volumétrica*

A contração volumétrica de um material é a razão entre o volume da peça imediatamente após a sua solidificação no molde e seu volume após alcançar a temperatura ambiente [25, 43, 48]. Para a maioria das aplicações esta propriedade é determinada a partir do coeficiente de contração linear do material, a partir da Equação 3.5.

$$S_v = 1 - (1 - S_l)^3 \quad (3.5)$$

em que,  $S_v$  é contração volumétrica do material e;

$S_l$  é a contração linear.

A contração linear é determinada experimentalmente pela moldagem de peças e depois calculada através da relação entre a dimensão do molde e a dimensão da peça depois de resfriada. A Figura 3.12 ilustra as dimensões que são necessárias para determinar a contração linear do material. Geralmente, a contração linear é expressa em cm/cm ou %.

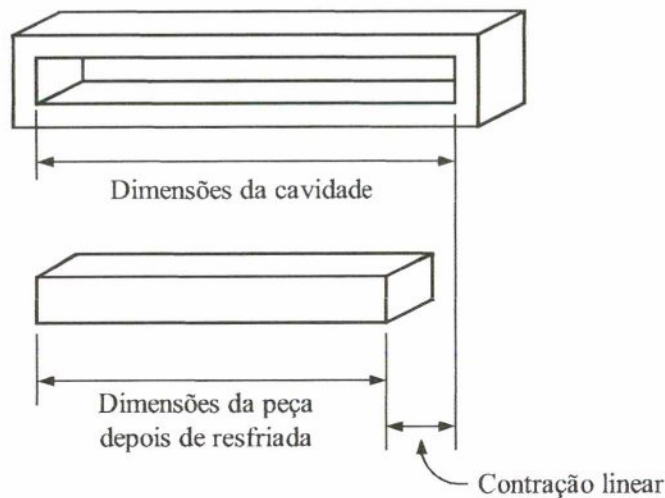


Figura 3.12: Ilustração da contração linear [15]

Na Figura 3.12 ilustra-se a cavidade com suas dimensões e a peça com suas dimensões finais reduzidas. Esta redução nas dimensões, que acarreta numa redução de volume é causada pela contração térmica devido à variação de temperatura que a peça está submetida. Segundo CRACKNELL e DYSON [50], este é o principal motivo pelo qual, peças moldadas apresentam contração depois de extraídas do molde. Os empenamentos apresentados são causados principalmente pela contração volumétrica diferenciada. Para reduzi-las BERINS [56] recomenda que se reduza a espessura do componente, aumente a pressão de injeção e de recalque, aumente-se a velocidade de injeção, aumente ligeiramente a temperatura de injeção, diminua a temperatura do molde, melhore a distribuição do peso molecular através da orientação molecular ou aumente as dimensões do ponto de injeção. Estas recomendações podem ser utilizadas individualmente ou em conjunto. Isto dependerá do componente considerado.



### 3.1.7.3. *Flamabilidade*

Segundo RUBIN [52], a flamabilidade de um material está relacionada a duas propriedades distintas: ignição e queima. A ignição refere-se à facilidade e as condições sob a qual um material começa a produzir chama, enquanto que a queima refere-se à taxa com que a chama se propaga, que quantidade de calor é produzida na queima, que quantidade de fumaça é produzida e que tipo de produtos são produzidos nela. Esta propriedade é muito importante durante a seleção de materiais para componentes cujas aplicações são propícias à produção de fogo, como os componentes elétricos, ou depois que o fogo tiver sido produzido, há possibilidade de propagação pondo em risco vidas humanas, como é o caso de lugares confinados como interior de aeronaves. Neste caso, recomenda-se selecionar um material que seja auto-extinguível [48]. A introdução de material de preenchimento ou reforço no material termoplástico matriz ajuda a melhorar a resistência à chama do mesmo. Os ensaios de flamabilidade são realizados através da norma ASTM D 635.

### 3.1.7.4. *Propriedades Biológicas*

De acordo com RUBIN [52], a maioria dos polímeros é resistente a bactérias e fungos, sendo que as exceções a esta regra são os materiais termofixos. A resistência a microorganismos deve ser considerada no momento de selecionar um material para confeccionar tubos, material de construção ou componentes para uso militar, etc. A fim de aumentar a resistência aos microorganismos e retardar a sua degradação biológica são utilizados produtos conhecidos como bioestabilizadores [52, 55]. Os dados relativos à degradação biológica são fornecidos pelos fabricantes de materiais plásticos. Recomenda-se que os fabricantes dos materiais sejam consultados no momento de selecionar um material para um componente que estará sujeito à degradação biológica.

### 3.1.7.5. *Porosidade ou Propriedade de Barreira*

Esta propriedade refere-se à quão distante é o espaço entre as macromoléculas do polímero. A alta permeabilidade a gases, motivada pela grande distância molecular, confere aos materiais uma baixa densidade que se constitui uma grande vantagem, em certas aplicações. Este acentuado espaçamento entre as moléculas faz com que a difusão de gases através de alguns plásticos seja alta. A principal desvantagem desta propriedade é quanto a aplicação destes materiais em embalagens, principalmente como embalagens de bebidas. Um material bastante utilizado para isto é o PET, que dentre os materiais termoplásticos possui elevada propriedade de

barreira, sendo bastante utilizado em recipientes para armazenar líquidos gaseificados, como refrigerantes. Esta permeabilidade, contudo, pode ser muito favorável em certos casos, como em membranas poliméricas para remoção de sal da água do mar, muito utilizado em aparelhos desalinizadores [60, 61].

## **3.2. FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PLÁSTICOS**

### *3.2.1. PROCESSAMENTO*

O processamento impróprio de um material plástico pode afetar significativamente algumas das suas propriedades mecânicas, como reduzir a resistência ao impacto ou o limite de resistência à fratura. Se o material é impropriamente processado, o desempenho mecânico do componente pode ser significativamente diferente daqueles valores publicados através dos ensaios padronizados ou contidos em banco de dados de materiais [53]. Basicamente o processamento pode afetar as propriedades do componente através de três mecanismos: pela formação de linhas de solda, surgimento de tensões residuais e pela orientação molecular [25].

#### - Linhas de Solda

Com foi definido no item 2.3.6, as linhas de solda são regiões da peça onde duas ou mais frentes de fluxo encontram-se e estas representam um dos mais significantes problemas com o projeto estrutural de peças plásticas devido a ser uma área de provável falha do componente durante o serviço. A Figura 3.13 ilustra como as duas frentes de fluxo se encontram na referida região produzindo a linha de solda.

A integridade da região de ocorrência das linhas de solda é afetada pelos seguintes parâmetros [25]:

- Tipo de material plástico;
- Espessura da peça;
- Existência ou não de material de preenchimento ou de reforço e;
- Condições de processos utilizados (temperatura do molde e de injeção, etc).

A razão pela qual as linhas de solda reduzem a resistência da peça é que durante o preenchimento da cavidade a frente de fluxo tende a arrastar consigo ar, lubrificantes e outras partículas para a área de formação das linhas de solda. Estas partículas e substâncias estranhas



são introduzidas na junção fazendo com que o material plástico não se difunda completamente favorecendo assim, a queda de resistência mecânica do componente. Em função disto, na região de junção das frentes de fluxo, duas regiões distintas são formadas. Conforme ilustra a Figura 3.14, em que uma região há boa difusão do material plástico e em outra a difusão é ruim. O grau de difusão do material é máximo no centro da peça e diminui conforme se avança em direção à superfície da peça. ROSATO e ROSATO [49] recomendam que, por segurança, as tensões admissíveis de trabalho na peça sejam mantidas em pelo menos 15 % da tensão admissível do material.

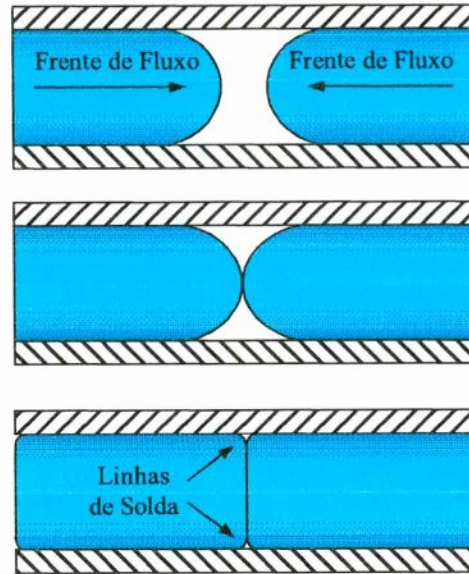


Figura 3.13: Seção transversal da região de encontro de duas frentes de fluxo produzindo as linhas de solda [15, 43]

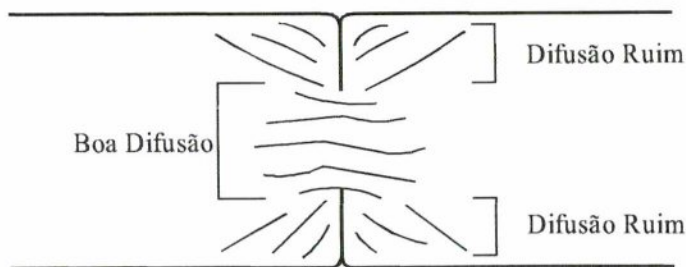


Figura 3.14: Ilustração da existência de duas regiões distintas na região de formação das linhas de solda [17]

#### - Tensões Residuais

Níveis diferentes de tensões residuais estão presentes em todos os componentes de plástico moldadas. Em geral, altos níveis de tensões residuais podem afetar certas propriedades

mecânicas, tanto quanto a resistência química e a estabilidade dimensional de um componente plástico. As tensões residuais são causadas por um ou mais dos seguintes fatores [22, 53]:

- Alta pressão de moldagem;
- Temperatura do molde muito baixa;
- Presença de cantos vivos no componente;
- Material com alta viscosidade;
- Presença de insertos de metal no molde com temperatura baixa e;
- Resfriamento muito rápido.

Altos níveis de tensões residuais podem resultar em [22]:

- Falta de claridade óptica;
- Aceleração de ataques químicos;
- Empenamentos;
- Perda das tolerâncias dimensionais;
- Dificuldade de se realizar pinturas sobre a superfície do componente e;
- Redução da resistência ao impacto.

Segundo MILLER [45], a distribuição de tensões residuais numa peça pode trazer benefícios ou não. A superfície da peça que esteja sob tensões residuais de compressão tende a ter melhor resistência à fadiga, já que falhas por fadiga são comumente causadas por tensões superficiais de tração. A tenacidade é melhorada e estas tensões compressivas reduzem o efeito maléfico dos elementos causadores de concentração de tensões, como entalhes, ranhuras, cantos vivos, etc. Desta forma, geralmente é desejável introduzir tensões residuais no componente intencionalmente. Peças plásticas usinadas apresentam tensões residuais muito diferentes daquelas apresentadas nos processos de moldagem [25].

#### - Orientação Molecular

O termo orientação molecular refere-se ao alinhamento dos segmentos moleculares na direção do fluxo [56]. O grau de orientação resultante obtido depois que o componente estiver solidificado depende da natureza do polímero e da taxa de cisalhamento produzido na moldagem, da sua espessura e das variáveis de processo como velocidade de injeção, temperatura do molde, temperatura de injeção e pressão de recalque [50, 53].



BERINS [56] e [25] afirmam que peças plásticas possuem uma maior resistência mecânica na direção em que as moléculas foram orientadas, já perpendiculares a esta direção a resistência é menor. BERINS [56] ainda afirma que as contrações volumétricas serão maiores na mesma direção da orientação do que perpendicular a ela, pois a contração volumétrica é resultado de dois fatores: um decréscimo de volume devido à variação de temperatura e um relaxamento das cadeias moleculares causado pelas ligações entre os átomos de carbono.

A espessura da peça também influi na orientação molecular, pois as mesmas funcionam como uma região de restrição do avanço do fluxo. Desta forma, as fibras próximas à superfície externa solidificam na direção do fluxo, pois as altas taxas de cisalhamento próximas a esta superfície as orientam nesta direção. Quando a espessura aumenta, este efeito é reduzido em decorrência do decréscimo das tensões de cisalhamento que ocorre quando se avança do centro em direção à superfície da peça [25].

Fatores como temperatura do molde e de injeção, taxa de resfriamento e pressão de injeção afetam o grau de orientação molecular. Altas temperaturas de injeção e do molde, taxa de resfriamento baixo e baixas pressões de injeção ajudam a diminuir o grau de orientação molecular, pois estes fatores, de certa forma, ajudam a aumentar a mobilidade das cadeias moleculares diminuindo assim, o grau de orientação das mesmas [56].

### 3.2.2. REAPROVEITAMENTO DE MATERIAL

As sobras de material plástico produzidas durante o processo de moldagem por injeção – canal de injeção e de distribuição, peças rejeitadas, rebarbas, etc. – podem ser reutilizadas [25, 53]. O material reaproveitado é cortado em pequenos pedaços e misturado com material virgem para produzirem mais peças. Fabricantes de materiais plásticos sugerem que seja utilizado de 10 a 15 % do material refugado sem perda significativa das propriedades. Com materiais reforçados com fibra de carbono ou de vidro esta quantidade pode chegar a 50 %. Segundo [25], em alguns materiais sem reforço pode-se reutilizar até 70 % de material refugado da produção.

No entanto, o material reaproveitado interfere nas propriedades mecânicas do material virgem, porque aquele material, por já ter sido utilizado antes, apresenta um nível considerável de degradação térmica proveniente do processo de moldagem. Ao realizar a mistura o material virgem adquire um desgaste inicial proveniente do material misturado. Pensando nisto é que se recomenda utilizar certas quantidades de material reciclado, a fim de que as peças produzidas não tenham uma perda muito significativa de suas propriedades mecânicas.



### 3.2.3. ABSORÇÃO DE ÁGUA

De acordo com TRES [43], a absorção de água refere-se ao aumento em porcentagem de peso do material devido à absorção de umidade. Os materiais plásticos tanto podem ser absorventes (higroscópicos) quanto não absorventes. A água absorvida pelo material polimérico pode degradar quimicamente um material com ou sem preenchimento reduzindo o seu peso molecular através da hidrólise, resultando em perdas principalmente nas propriedades físicas e elétricas. Inicialmente a hidrólise reduz a tenacidade e conseqüentemente a resistência da peça. As propriedades dos materiais reforçados com fibra de vidro podem também ser afetados pela água absorvida, que degrada a união entre o material matriz e a fibra de vidro [25, 43].

No projeto de peças que estejam em contato prolongado com umidade e passiva a intempéries, BAYER AG [53] recomenda que se verifique os dados do material selecionado no que se refere à sua capacidade de absorver umidades e à sua degradação hidrolítica.

### 3.2.4. EXPOSIÇÃO QUÍMICA

A resistência a ataques químicos é determinada primeiramente pela composição química do material plástico, seguido pela concentração química, temperatura, tempo de contato e nível de tensões residuais na peça [53, 55]. Segundo TICONA [48] e MICHAELI [55], algumas substâncias químicas podem atacar diretamente as cadeias poliméricas do material diminuindo progressivamente o peso molecular do polímero, reduzindo assim a sua dureza, resistência mecânica do material e mudando suas propriedades físicas e elétricas. O grau de redução ou mudança das propriedades depende da polaridade do material polimérico e do tipo de substância química, por exemplo:

- Polímeros não-polares, como PS, PE e PIB dilatam-se ou dissolvem-se sob a ação de solventes não-polares, como gasolina e benzeno, enquanto que aqueles materiais são resistentes a solventes polares, como água e álcool.
- Polímeros contendo grupos polares, como as poliamidas são resistentes a substâncias químicas não-polares. Estes materiais dilatam-se ou dissolvem-se sob a ação de solventes polares.

### 3.2.5. EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO SOLAR

Muitas aplicações de materiais plásticos necessitam que o material suporte a exposição da radiação solar quando utilizado em ambientes abertos, pois a radiação solar constitui-se no elemento ambiental mais prejudicial à integridade estrutural dos componentes plásticos. Segundo

[25], a radiação ultravioleta (UV) é o principal responsável pela maioria dos estragos causados aos componentes de plástico sob a sua exposição.

A maioria das frequências naturais das ligações químicas existentes nos polímeros corresponde às frequências que ocorrem na faixa ultravioleta da luz solar. Uma vez que estas ligações sejam excitadas vários processos degradativos, como quebra das cadeias poliméricas, podem ocorrer. A superfície da peça é a primeira e a parte mais danificada, pois os raios UV conseguem apenas penetrar em pequenas profundidades quando é então absorvido. Como os raios são absorvidos por uma pequena parte da peça e a exposição à luz solar é contínua, a superfície da peça fica sobrecarregada resultando na sua degradação.

A taxa de degradação do material depende da temperatura, uma vez que as menores frequências do espectro solar podem acelerar a degradação pelo aquecimento do material. A baixas temperaturas pode ocorrer a fragilização e contração do material, sendo que ambos também aceleram o processo degradativo. A degradação de um material polimérico também pode ser acelerado por outros elementos, como água, partículas transportadas pelo vento e elementos produzidos pelo homem, como poluentes [25].

Conforme já mencionado, ao desenvolver o projeto de um componente de plástico, recomenda-se que o projetista tenha pleno conhecimento do ambiente no qual o componente será utilizado, a fim de selecionar um material adequado para a sua aplicação. Este conhecimento é realizado através de questionamentos que informem ao projetista se, por exemplo, o componente será utilizado ao ar livre em contato com a luz solar e a umidade ou se o componente estará em contato com algum produto químico, pois as propriedades dos materiais plásticos são muito sensíveis as condições do ambiente. As informações a respeito dos materiais podem ser obtidas através de banco de dados ou mesmo através de seus fabricantes. Estas recomendações são as diretrizes básicas, que serão utilizadas na realização dos estudos de caso no capítulo 4 e na proposta de sistemática no capítulo 5.

## 4. ESTUDOS DE CASO

### 4.1. GENERALIDADES

Visando atingir o objetivo do trabalho foram realizados dois estudos de casos, procurando aplicar a metodologia proposta por DARE [11] visando detalhar as tarefas de seleção de materiais, análise de resistência mecânica e análise reológica citadas na referida metodologia e representadas no fluxograma da Figura 2.10.

Para o primeiro estudo de caso foi considerado uma situação de projeto de um novo componente, enquanto que para o segundo foi selecionado um componente já disponível no mercado, porém fabricado em material metálico. O objetivo deste estudo foi reprojeter o componente para se inserir na metodologia proposta por DARE [11] tarefas e recomendações que devem ser levadas em consideração ao se aplicar esta metodologia ao reprojeto de um componente. No primeiro estudo de caso, considerou-se que as fases de projeto informacional e conceitual, já tenham sido realizadas. O sistema CAD utilizado no modelamento dos componentes foi o *Solidworks 2001*<sup>®</sup>. As análises de resistência mecânica e reológica foram realizadas através dos sistemas CAE *ANSYS 5.7*<sup>®</sup> e *Moldflow Plastic Insight 2.0*<sup>®</sup>, respectivamente.

### 4.2. ESTUDO DE CASO 1

#### 4.2.1. DEFINIÇÃO DO COMPONENTE 1

O primeiro estudo de caso constituiu-se de um prendedor de papel utilizado em escritórios. Este componente é formado por duas partes. A Figura 4.1.c ilustra o prendedor montado e as Figuras 4.1.a e 4.1.b ilustram as duas partes que compõem o prendedor. Suas principais dimensões podem ser visualizadas nos Anexos H.1 e H.2.



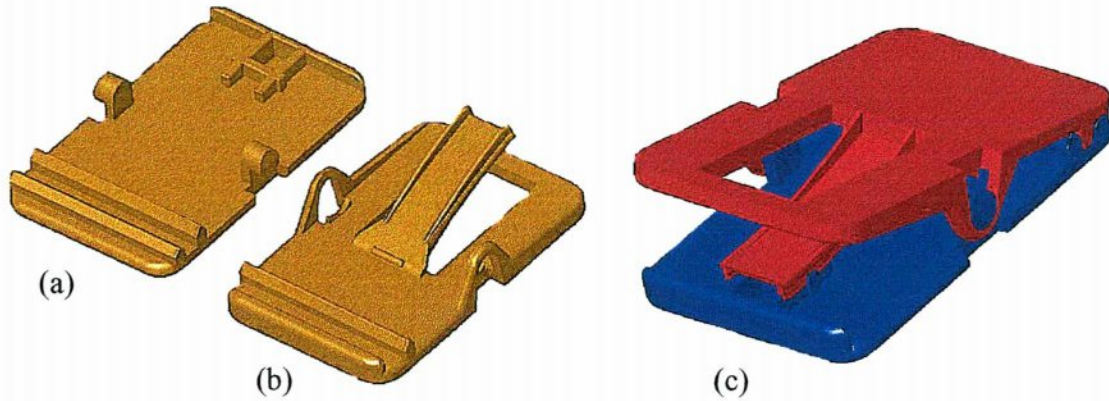


Figura 4.1: Modelo tridimensional do componente do primeiro estudo de caso

#### 4.2.2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO I

##### 4.2.2.1. SELEÇÃO DO MATERIAL

Como neste estudo foi considerado um componente como sendo novo no mercado, o primeiro passo realizado, a fim de selecionar o material termoplástico mais adequado foi recuperar as listas de necessidades, dos requisitos e das especificações de projeto do componente elaboradas na etapa de projeto informacional do mesmo. Neste estudo foram consideradas as listas apresentadas nas Tabela 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente.

Com base nas listas de necessidades e requisitos de projeto do componente, verificou-se a necessidade de responder a um questionário estruturado em que foram consideradas questões relativas às propriedades necessárias ao material, às condições de utilização do componente, aos processos de fabricação e aos custos e fatores econômicos. Este questionário, bem como as respostas obtidas podem ser visualizadas através da Tabela 4.4.

O questionário foi utilizado como um instrumento de obtenção das características do componente por recomendações de vários autores, mesmo havendo a existência das listas de necessidade, requisitos e especificações de projeto. WENDLE [32], BERINS [56], ROSATO e ROSATO [49], [25], REES [33], EZRIN [62] e BRYDSON [63] são alguns autores que sugerem um questionário estruturado para ser respondido, a fim de obter todas as informações referentes às características do produto e, principalmente para realizar a seleção de materiais. O questionário sugerido neste trabalho foi estruturado a partir de questões sugeridas pelos autores citados anteriormente. As respostas foram obtidas das listas citadas anteriormente e ilustradas através das Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Os grupos ilustrados nas Tabelas 4.1 e 4.2, assim foram considerados segundo indicação de DARÉ [11], em seu trabalho de mestrado.

Tabela 4.1: Lista de necessidades de projeto do prendedor

GRUPOS		NECESSIDADES DE PROJETO DO PRENDEDOR
Conjunto montado	Geometria	Geometria do componente simples
		Fácil montagem
	Qualidade	Bom acabamento superficial
		Evitar rebarbas
		Componente com pouco empenamento
	Custo	Menor custo possível
	Resistência	Resistência à fadiga e ao impacto
		Boa rigidez
		Resistência ao relaxamento das tensões ( <i>stress relaxation</i> )
		Não ser higroscópico
Moldagem por injeção	Material termoplástico	Fácil aquisição
		Fácil processamento
	Molde	Aço P20

Tabela 4.1: Listas de necessidades de projeto do prendedor (continuação)

GRUPOS		NECESSIDADES DE PROJETO DO PRENDEDOR
<b>Operação</b>	Uso	Suportar carregamentos cíclicos
		Suporta alívio de tensões
		Suportar eventuais quedas (impactos)
<b>Descarte</b>		Minimizar impacto ambiental



Tabela 4.2: Lista de requisitos de projeto do prendedor

GRUPOS	REQUISITOS DE PROJETO DOS COMPONENTES
<b>Requisitos geométricos do componente</b>	Espessura de parede constante
	Raios de arredondamento
<b>Requisitos de desempenho</b>	Deformação máxima permissível de 13,8 mm
	Resistir à umidade
	Vida útil de cinco anos
	Resistir a eventuais quedas (impactos)
<b>Requisitos econômicos</b>	Custo do material baixo - ~ R\$ 1,50/kg de material
	Custo do molde baixo - ~ R\$ 70.000,00
	Custo do processo baixo - ~ R\$ 5.000,00/mês
<b>Requisitos de processo</b>	Volume de produção: 10000/mês

Tabela 4.3: Listas das especificações de projeto do prendedor

REQUISITOS DE PROJETO		VALOR	SAÍDA DESEJADA	SAÍDA INDESEJADA
1	Número de <i>features</i>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor número de <i>features</i> possível;</li> <li>- Propiciar facilidade de injeção;</li> <li>- Propiciar redução do custo do molde, em função da facilidade de acabamento e da complexidade do mesmo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peças mais complexas, implicando na possibilidade de gavetas no molde;</li> <li>- Dificuldade de preenchimento.</li> </ul>
2	Custo do molde		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor custo;</li> <li>- Redução dos custos da peça.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inviabilização do projeto.</li> </ul>
3	Número de nervuras		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor número possível;</li> <li>- Propiciar facilidade de injeção;</li> <li>- Propiciar redução de custo no molde, em função da facilidade de acabamento e da complexidade do mesmo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peças mais complexas, implicando na possibilidade de gavetas no molde;</li> <li>- Dificuldade de preenchimento.</li> </ul>
4	Dimensões		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adequado para a fabricação do molde;</li> <li>- Adequado para o sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incompatíveis com a injetora (capacidade, distância entre colunas);</li> <li>- Incompatível com o sistema.</li> </ul>
5	Volume de produção	10000 peças/mês	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar o mesmo molde para produzir todas as peças.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fabricação de um novo molde para completar a produção.</li> </ul>
6	Tolerância de forma	$\pm 1,0^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Componente com mínimo empenamento;</li> <li>- Boa funcionalidade;</li> <li>- Fácil montagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Empenamento acima do tolerado;</li> <li>- Difícil montagem;</li> <li>- Problemas funcionais.</li> </ul>
7	Confiabilidade	1/10000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sem falhas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar quebra do componente antes de completar a sua vida útil.</li> </ul>
8	Vida útil	5 anos		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gastos com reposição</li> </ul>
9	Tolerância dimensional	$\pm 0,5$ mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compatível com o sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impossibilidade de montagem.</li> </ul>



Tabela 4.3: Listas das especificações de projeto do prendedor (continuação)

REQUISITOS DE PROJETO		VALOR	SAÍDA DESEJADA	SAÍDA INDESEJADA
10	Rugosidade	Conforme acabamento do molde	- Boa qualidade superficial.	- Alta rugosidade, comprometendo a qualidade superficial.
11	Massa injetada	33,00 g	- Preenchimento total do componente	- Falhas no preenchimento
12	Custo do material	R\$ 1,50/ kg	- Material de baixo custo	
13	Espessura da parede do componente	3,0 mm	- Fácil injeção; - Resistência mecânica	- Dificuldade de injeção
14	Tempo de montagem		- Fácil montagem	- Tempo elevado de montagem
15	Índice de fluidez	> 10 g/10 min	- Fácil moldagem; - Preenchimento total das peças.	- Geometria muito complexa exigindo índice de fluidez elevado.
16	Resistir ao calor	20 °C – 30 °C	- Manter propriedades mecânicas	- Alteração das propriedades mecânica

Tabela 4.4: Respostas extraídas do questionário estruturado utilizando as listas de necessidade, requisitos e especificações de projeto

CLASSES	SUBCLASSES	PERGUNTAS	RESPOSTAS
<b>Relativas às propriedades necessárias ao material</b>	Elétricas	O componente será utilizado como isolante elétrico?	Não será utilizado como isolante elétrico
		Quais os níveis de voltagem próximos do componente?	Não se aplica
	Ópticas	O componente será transparente, translúcido ou opaco?	Deseja-se que o componente seja opaco
		O componente será colorido?	Não sofrerá pintura
	Acústicas	O componente será utilizado como isolante sonoro?	Não será utilizado como isolante sonoro
	<b>Relativo às condições de utilização do componente</b>	Mecânicas	Sob quais carregamentos (estático, dinâmico ou cíclico) o componente estará submetido?
Qual a magnitude dos carregamentos ou deslocamentos prescritos no componente?			O componente sofrerá um deslocamento prescrito de 13,8 mm.
A relação carregamento versus tempo é significativa?			Sim, é significativa.
O componente deve ser resistente a impactos?			Sim, o componente deve resistir a eventuais quedas.
Qual a máxima deflexão tolerada durante a vida útil do componente?			A máxima deflexão será igual à de trabalho, 13,8 mm.
As tolerâncias dimensionais são importantes? Qual faixa deve ser mantida?			Não são muito importantes, mas deseja-se que empenamentos decorrentes do processo de fabricação sejam os mínimos possíveis.
O peso do componente é relevante? Qual deve ser o seu peso máximo?			Não é relevante
A resistência ao desgaste deve ser considerada?			Não é relevante



Tabela 4.4: Respostas extraídas do questionário estruturado utilizando as listas de necessidade, requisitos e especificações de projeto (cont.)

CLASSES	SUBCLASSES	PERGUNTAS	RESPOSTAS
<b>Relativo às condições de utilização do componente</b>	Ambientais Químicas	O componente estará submetido a algum ambiente quimicamente reativo? Qual?	O componente não estará submetido a ambientes quimicamente reativos
		Qual a maior e a menor temperatura em que o componente estará submetido?	Menor temperatura: 20 °C; Maior temperatura: 30 °C
		Por quanto tempo o componente ficará exposto a esta variação de temperatura?	Durante toda a sua vida útil que é de cinco anos
		O componente ficará exposto às intempéries?	Não ficará exposto às intempéries
		Qual o nível de umidade do ambiente de aplicação do componente?	Nível de umidade máxima de 80 %
		O componente ficará exposto à luz solar?	Sim, o componente poderá sofrer contato com a radiação solar.
		O componente sofrerá algum tipo de manutenção durante toda a sua vida útil? Que tipo de produto será utilizado para isto?	Não será realizada manutenção
		Qual a vida útil esperada para o componente no ambiente?	Espera-se uma vida útil de cinco anos
		A resistência à chama é importante?	Não é importante
<b>Relativo aos processos de fabricação</b>	Tipo de processo de fabricação	O componente será montado? Por qual método?	Será montado. Montagem simples
		Haverá necessidade de acabamento superficial ou de revestimento da superfície do componente depois de fabricado?	Não haverá necessidade de acabamento superficial ou de revestimento da superfície
<b>Relativo aos custos e fatores econômicos</b>		Já existe algum componente no mercado?	Ainda não há tal componente no mercado
		Qual seu custo? O reprojeto reduzirá seus custos?	Não se aplica

As informações contidas na Tabela 4.4 foram analisadas e uma lista de informações necessárias à seleção do material foi produzida. Esta lista pode ser visualizada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Lista de informações necessárias à seleção do material

LISTA DE INFORMAÇÕES
a) Deseja-se que seja um material opaco
b) Boa resistência à fadiga
c) Boa resistência ao relaxamento das tensões ( <i>stress relaxation</i> )
d) Não seja higroscópico
e) Boa resistência a impactos
f) Boa resistência à radiação solar
g) Custo baixo
h) Tenha boa estabilidade dimensional
i) Seja de fácil processamento

O passo seguinte foi classificar as informações contidas na Tabela 4.5, mediante algum critério, em requisitos obrigatórios e desejáveis ao material termoplástico. Classificando-os em ordem de importância. Esta classificação pode ser visualizada através da Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Classificação das informações em obrigatórios e desejáveis

OBRIGATÓRIOS
Fácil processamento
Boa resistência à fadiga
Boa resistência ao alívio de tensões ( <i>stress relaxation</i> )
Boa estabilidade dimensional
Seja pouco higroscópico
Boa resistência a impactos
DESEJÁVEIS
Custo baixo
Boa resistência à radiação solar
Seja opaco

Dentre as literaturas consultadas nenhuma delas recomendava ou sugeria um critério para classificar as informações contidas na Tabela 4.5 em obrigatórios e desejáveis. Entre os



muitos critérios possíveis neste estudo considerou-se que os requisitos classificados como obrigatórios na Tabela 4.6 foram assim classificados porque estão relacionados ao funcionamento adequado do componente e à sua manufacturabilidade, ou seja, são requisitos imprescindíveis para obter-se boa qualidade nas peças produzidas e para que o componente funcione durante toda vida útil sem apresentar problemas. Os classificados como desejáveis foram aqueles que não exercem influência direta sobre a manufacturabilidade, estando relacionados a requisitos estéticos ou mesmo a situações prováveis de acontecer, como é o caso da resistência à radiação solar. Ao considerar este requisito está se considerando que o prendedor poderá ou não estar em contato com a luz solar. O projetista tem total autonomia para tomar um critério que melhor lhe adegue.

Depois de realizada a classificação dos requisitos de projeto em obrigatórios e desejáveis, foi organizada uma tabela relacionando as principais classes de materiais termoplásticos existentes com os requisitos obrigatórios e desejáveis na mesma ordem da classificação ilustrada na Tabela 4.6. Para cada relação foi designado um grau de qualidade que expressa adequadamente a disposição do material a cada requisito relacionado. A Tabela 4.7 ilustra as relações com seus respectivos graus de qualidade. A referida tabela, foi construída através da consulta a fontes de dados. As fontes mais utilizadas foram: WENDLE [32], BELOFSKY [31], JUVINALL e MARSHEK [64] e o portal da TANGRAM [65]. Nestas fontes, os autores trazem uma breve descrição das principais características e limitações das principais classes de materiais termoplásticos. Assim, o grau de qualidade atribuído a cada relação da Tabela 4.7 foi baseado nas descrições contidas nestas fontes. Se o projetista não dispuser das fontes referenciadas anteriormente, outras que estejam ao seu alcance podem ser consultadas ou ele ainda pode utilizar o seu conhecimento em materiais termoplásticos para organizar tal tabela.

Os passos que sucederam a organização da Tabela 4.7 foram: eliminar as classes de materiais cujo desempenho em todos os requisitos obrigatórios não eram satisfatórios e organizar uma tabela relacionando os materiais eliminados com a causa da sua eliminação e por fim listar as classes remanescentes. Desta forma, estes passos ficaram caracterizados como uma primeira seleção preliminar de materiais. A Tabela 4.8 ilustra as classes de materiais termoplásticos eliminados da primeira etapa de seleção com suas respectivas causas.

Tabela 4.7: Relação entre as principais classes de materiais termoplásticos e os principais requisitos de projeto

	Processamento	Resistência à fadiga	Resistência ao <i>Stress Relaxation</i>	Custo	Estabilidade dimensional	Higroscopia	Resistência a impactos	Resistência à radiação solar	Transparência
<b>ABS</b>	Fácil	Boa	Boa	Moderado	Boa	Moderado	Boa	Baixa	Opaco
<b>ACETAL (POM)</b>	Fácil	Boa	Boa	Moderado	Boa	Moderado	Boa	Baixa	Opaco
<b>ACRÍLICOS</b>	Difícil				Boa	Moderado		Boa	Transparente
<b>CELULÓSICOS</b>	Difícil	Baixa		Baixo	Baixa				Transparente
<b>NYLON 6</b>		Boa	Boa	Baixo	Baixa	Moderado	Baixa	Boa	Opaco
<b>NYLON 6/6</b>		Boa	Boa	Baixo	Baixa	Moderado	Baixa	Boa	Opaco
<b>NYLON 11</b>		Boa	Boa	Moderado	Baixa	Alto	Boa	Boa	Opaco
<b>NYLON 12</b>		Boa	Boa	Moderado	Baixa	Alto	Boa	Boa	Opaco
<b>LDPE</b>	Fácil	Baixa	Baixa	Baixo	Baixa	Baixo	Baixa	Baixa	Opaco
<b>HDPE</b>	Fácil	Baixa	Baixa	Baixo	Baixa	Baixo	Baixa	Baixa	Opaco
<b>PC</b>	Fácil	Boa	Boa	Moderado	Boa	Baixo	Boa	Boa	Transparente
<b>PET</b>	Fácil			Moderado	Boa	Baixo		Boa	Transparente
<b>PP</b>	Fácil	Baixa	Baixa	Baixo	Boa	Baixo	Baixa	Baixa	Opaco
<b>PS</b>	Fácil	Baixa	Boa	Baixo	Boa	Baixo		Baixa	
<b>PVC</b>	Fácil	Baixa	Boa	Baixo	Boa	Baixo	Baixa	Boa	Opaco

FONTE: BELOFSKY [31], WENDLE [32], JUVINALL e MARSHEK [64] e TANGRAM [65]



Tabela 4.8: Relação entre materiais eliminados na primeira seleção eliminatória com a causa da sua eliminação

CLASSES DE MATERIAIS	CAUSA DA ELIMINAÇÃO
<b>ACRÍLICOS</b>	Processamento difícil.
<b>CELULÓSICOS</b>	Processamento difícil, baixa resistência à fadiga e baixa estabilidade dimensional.
<b>NYLON 6, 6/6</b>	Baixa estabilidade dimensional, alta higroscopia e baixa resistência ao impacto.
<b>NYLON 11 e 12</b>	Baixa estabilidade dimensional.
<b>HDPE/LDPE</b>	Baixa resistência à fadiga, baixa resistência ao relaxamento das tensões ( <i>stress relaxation</i> ), baixa estabilidade dimensional e baixa resistência ao impacto.
<b>PET</b>	Sem informações sobre resistência à fadiga, alívio de tensões e resistência ao impacto nas referências consultadas.
<b>PP</b>	Baixa resistência à fadiga, baixa resistência ao relaxamento das tensões ( <i>stress relaxation</i> ) e baixa resistência ao impacto.
<b>PS</b>	Baixa resistência à fadiga.
<b>PVC</b>	Baixa resistência à fadiga e baixa resistência ao impacto.

Os materiais remanescentes da primeira seleção eliminatória foram: ABS, ACETAL (POM) e Policarbonato (PC).

No passo seguinte, que ficou caracterizado como segunda seleção eliminatória, verificou-se a necessidade de selecionar alguns materiais comerciais de cada um daqueles remanescentes da primeira seleção eliminatória, pois o que se conhece por PC, ABS, POM, PP, etc são famílias de materiais termoplásticos. Como dentro destas famílias há dezenas de materiais conhecidos por *grades*<sup>1</sup> e não faz sentido selecionar todos eles. Decidiu-se, então, por adotar algum critério para selecionar um ou mais *grades* das famílias ABS, ACETAL, POM e PC. Como os autores das literaturas consultados não recomendavam qualquer tipo de critério para realizar tal seleção, decidiu-se, então, pelo seguinte critério: adotar um banco de dados de materiais termoplásticos e nele verificar qual das classes remanescentes, listada anteriormente, seus fabricantes disponibilizaram os diagramas tensão-deformação e os diagramas de fluência de seus *grades* na temperatura de utilização do componente e por fim, eliminar as classes de materiais cujos fabricantes não disponibilizaram os referidos diagramas no banco de dados adotado.

<sup>1</sup> *grades*: Termo originado do inglês que significa grau. No contexto de materiais plásticos, o termo significa um tipo específico de material comercial [66].



O diagrama tensão-deformação é necessário para que o projetista conheça o comportamento do material adotado, se o mesmo é dúctil ou frágil. Mediante esta classificação o projetista selecionará um critério de projeto adequado. É, também, deste diagrama que será extraído o valor da tensão limite elástico do material. Já os diagramas de fluência serão necessários quando o componente a ser projetado estiver sob um carregamento de longa duração. Neste caso, o módulo de elasticidade será extraído destes diagramas. Para isto é necessário definir uma vida útil para o componente. Estas informações serão úteis durante a realização da análise de resistência mecânica do mesmo.

O banco de dados adotado foi o CAMPUS 4.1<sup>®</sup> [67] por ser um dos mais completos que existe. Dispõe de materiais termoplásticos fabricados pelos principais fabricantes do mundo e é considerado uma excelente referência no processo de seleção de materiais termoplásticos. Dos materiais remanescentes da primeira seleção eliminatória, apenas o ACETAL foi eliminado, pois nenhum de seus fabricantes disponibilizaram os diagramas referidos anteriormente, logo os materiais remanescentes da segunda seleção eliminatória são: Policarbonato e ABS.

Das classes de materiais remanescentes (PC e ABS) foram selecionados um ou mais *grades* no banco de dados. Esta seleção foi realizada considerando, primeiro que os materiais candidatos possuíssem os diagramas de fluência e de tensão-deformação, segundo que fossem específicos para aplicações em materiais para escritórios e por último que possuíssem índice de fluidez elevado, pois quanto mais elevado este valor mais fácil será a injeção do material na cavidade. A Tabela 4.9 ilustra os *grades* selecionados e seus respectivos fabricantes.

Tabela 4.9: Relação entre as classes de materiais, nome comercial dos *grades* selecionados e seus fabricantes

CLASSES	NOME COMERCIAL	FABRICANTE
ABS	<i>Terluran HI 10</i>	BASF AG
Policarbonato (PC)	<i>Apec HT KU 1-9331</i>	BAYER AG

A partir da seleção de materiais e do conhecimento de seus diagramas, uma tabela relacionando estes materiais (*grades* selecionados) com sua tensão limite elástico ( $\sigma_y$ ), módulo de elasticidade aparente (módulo de fluência) ( $E_{ap}$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), densidade ( $\rho$ ) e coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ) foi organizada. Os valores das principais propriedades fornecidos pelo banco de dados CAMPUS<sup>®</sup> [67] podem ser obtidos das tabelas contidas no Anexo A. Como o componente será projetado para suportar um carregamento cíclico e para resistir ao alívio de tensões (*stress relaxation*), então há a necessidade de utilizar o módulo de elasticidade aparente ao invés do módulo de elasticidade extraído do diagrama tensão-

deformação. O carregamento será considerado cíclico, pois está se considerando a situação mais crítica em que um usuário pode utilizar o componente de forma inadequada, como por exemplo, distraidamente o usuário pode pressionar o componente várias vezes seguidas, constituindo-se, então, no momento mais crítico.

Como o componente será utilizado para prender papeis, então o mesmo ficará, por um intervalo de tempo, sob um esforço constante. Esta situação caracteriza o fenômeno de alívio de tensões (ver item 3.1.1.8), logo é necessário que um material com boa resistência ao alívio de tensões seja selecionado e que este fenômeno seja considerado no momento de dimensionar o componente. Esta caracterização é realizada utilizando o módulo de elasticidade aparente extraído do diagrama de fluência do material, ao invés do módulo de elasticidade extraído do diagrama tensão-deformação do mesmo. A Tabela 4.10 ilustra os valores das propriedades referidas anteriormente.

Tabela 4.10: Relação entre os materiais e os valores das suas propriedades

MATERIAL	$\sigma_y$ (MPa)	$E_{ap}$ (MPa)	$\nu$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ ( $\times 10^{-4}$ °C)
<i>Terluran HI 10 (ABS)</i>	38	437	0,38	1020	0,95
<i>Apec HT KU 1-9331 (PC)</i>	65	1140	0,37	1180	0,7

Os valores da tensão limite elástico, densidade e coeficiente de dilatação térmica foram obtidos diretamente do banco de dados, ou seja, não foi necessário consultar qualquer diagrama. Para obtenção do valor do módulo de elasticidade aparente foi necessário consultar dois diagramas de fluência, o diagrama tensão-deformação isocrônico e depois o diagrama módulo de fluência-tempo. Foi necessária a utilização destes dois diagramas em função da necessidade de considerar o efeito do alívio de tensões.

A fim de obter o valor do módulo de elasticidade aparente, inicialmente foi proposto um modelo aproximado para a região A, ilustrada na Figura 4.2, para então calcular o valor de deformação a ser utilizado no diagrama tensão-deformação isocrônico do material. O modelo mais adequado para esta aplicação foi o de viga engastada na sua extremidade tendo o mesmo comprimento e a mesma área transversal da região A. Estas dimensões são ilustradas na Figura 4.3. Nesta figura, a parte pontilhada ilustra a viga deslocada de 13,8 mm, que é o valor máximo de deformação da ponta da região A, permitido pelo projeto (ver Tabela 4.4), para promover abertura suficiente para prender os papeis.



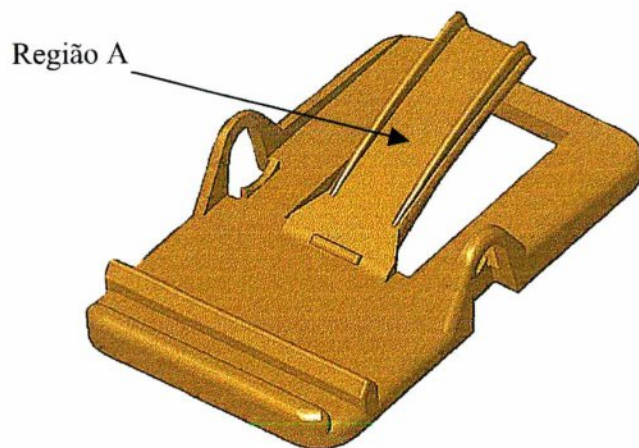


Figura 4.2: Ilustração de uma das partes do prendedor

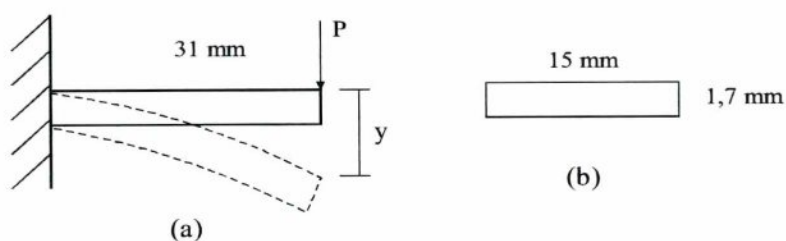


Figura 4.3: Modelo de viga aproximada proposta para a região A (Figura 4.2), sendo que (a) vista lateral da viga e (b) seção transversal da viga

O nível de deformação foi determinado através da Equação 4.1, proveniente da manipulação das Equações 4.2, 4.3 e 4.4.

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot y \cdot h}{2 \cdot L^2} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4.2)$$

$$\sigma = \frac{P \cdot L \cdot h}{2 \cdot I} \quad (4.3)$$

$$y = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (4.4)$$

em que,  $\varepsilon$  é o valor da deformação no ponto extremo da viga;

$\sigma$  é a tensão na extremidade proveniente da flexão da viga;

$E$  é o módulo de elasticidade;

$P$  é a força aplicada na extremidade da viga para produzir o deslocamento desejado;

$I$  é o momento de inércia da seção transversal da viga;

$L$  é o comprimento da viga;

$y$  é o deslocamento causado pela força  $P$ ; e

$h$  é a altura da seção transversal da viga.

Sendo que da Figura 4.3 tem-se:

$$y = 13,8 \text{ mm};$$

$$h = 1,7 \text{ mm};$$

$$L = 31 \text{ mm}.$$

O valor da deformação ( $\varepsilon$ ) encontrado foi de 3,66 %. Este valor foi aplicado ao diagrama isocrônico tensão-deformação dos materiais da Tabela 4.10 para obter o valor da tensão correspondente ao nível de deformação calculado anteriormente para um tempo correspondente à vida útil do componente que é de 5 anos, aproximadamente 10000 horas (valor obtido das tabelas 4.3 e 4.4).

Assim, para o *Terluran HI 10*, o valor encontrado foi aproximadamente 15,6 MPa (Diagrama 4.1). Para o *Apec HT KU 1-9331* foi encontrado o valor de 38 MPa.

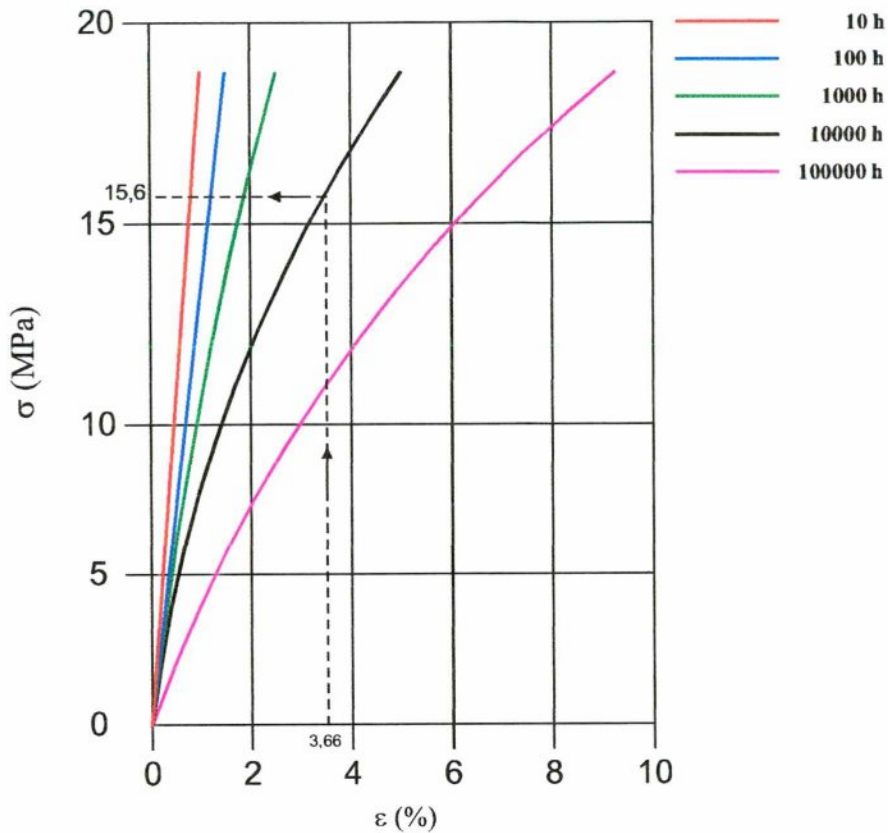


Diagrama 4.1: Diagrama tensão-deformação isocrônico do *Terluran HI 10* [67]

Utilizando o diagrama módulo de fluência versus tempo foi definido o módulo de elasticidade aparente ( $E_{ap}$ ) de cada material. O Diagrama 4.2 ilustra o valor encontrado para o *Terluran HI 10* à temperatura de 23 °C. Como não há uma curva correspondendo ao valor de tensão 15,6 MPa, foi considerada a curva cujo valor fosse ligeiramente acima deste, ou seja, a curva correspondente a 16,6 MPa. Os valores encontrados para o *Terluran HI 10* e o *Apec HT KU 1-9331* estão ilustrados na Tabela 4.10.

Os valores da densidade ( $\rho$ ), coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ) e a tensão limite elástico ( $\sigma_y$ ) de cada material foram extraídos do banco de dados do *CAMPUS*<sup>®</sup> [67], enquanto que o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) foi extraído do banco de dados do *Moldflow Plastic Insight 2.0*<sup>®</sup>, conhecido por *Material Management*<sup>®</sup> [69]. Concluída a fase de seleção de materiais, os dados contidos na Tabela 4.10 foram utilizados na fase seguinte, que é a de análise de resistência mecânica, descritas a seguir.



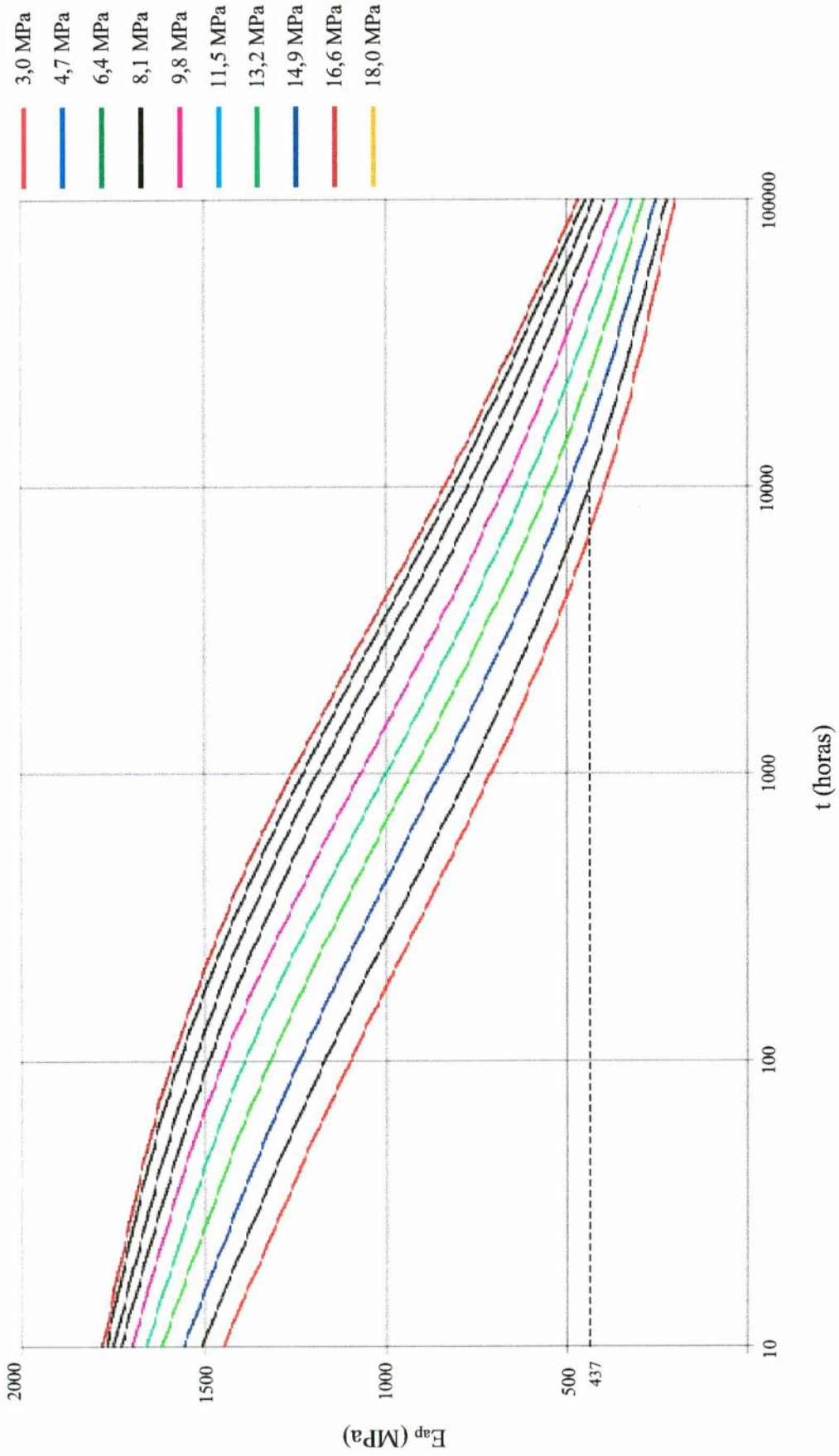


Diagrama 4.2: Diagrama módulo de fluência versus tempo do *Terturan HI 10* [67]

#### 4.2.2.2. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

O primeiro passo realizado nesta fase constituiu em decidir qual das duas partes do componente deve ser analisado inicialmente. Neste caso, tornou-se necessário analisar a parte do modelo mostrada na Figura 4.1.b, no sentido de obter o valor da carga que atua sobre a parte do modelo ilustrado na Figura 4.1.a.

Antes de iniciar a análise propriamente dita, parte da geometria do componente foi remodelada a fim de simplificá-lo, sem prejuízo à análise estrutural. Como o componente pode ser dividido a partir de um plano de simetria, este artifício foi utilizado considerando no remodelamento apenas sua metade, como ilustrado na Figura 4.4.

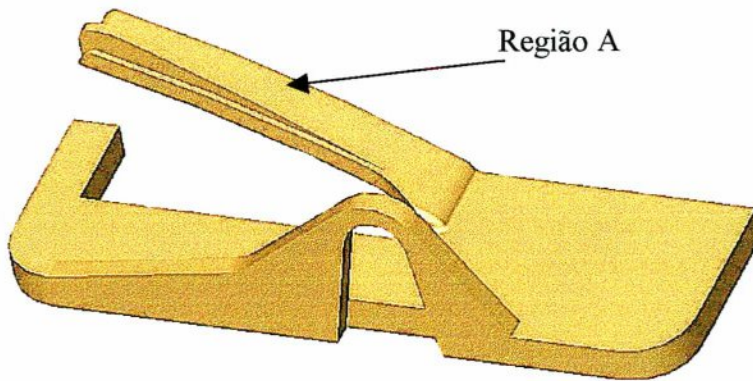


Figura 4.4: Modelo tridimensional do componente remodelado (metade)

Em função dos sistemas CAD e CAE utilizados (*Solidworks 2001*<sup>®</sup> e *ANSYS 5.7*<sup>®</sup>, respectivamente) não serem integrados, houve a necessidade de criar um arquivo de transferência de dados no formato *IGES* para posteriormente transferi-lo do CAD para o sistema CAE.

Para a realização propriamente dita da análise de resistência mecânica, utilizando o *software* de CAE, inicialmente foi selecionado o tipo de elemento finito mais apropriado. Como se trata de um componente que será moldado por injeção e a principal característica deste processo é a fabricação de peças com geometrias complexas, o usual é utilizar um elemento sólido ou tridimensional. Dentre estes se procurou selecionar um que possuísse o maior número de nós possível e que fornecesse uma boa relação custo computacional benefício na forma dos resultados. Depois de algumas consultas a escolha recaiu no *Solid95*, que é um elemento que possui 20 nós.

Definido o elemento finito procedeu-se a seleção de um dos materiais contidos na Tabela 4.10 informando suas propriedades ao sistema CAE. O critério seguido neste estudo de caso foi selecionar aquele material que tivesse o maior módulo de elasticidade aparente, pois um deslocamento prescrito será imposto à região A (Figura 4.4) como condição de contorno e com



isto deseja-se que as tensões provenientes deste deslocamento sejam satisfatórias. O outro material, que possui uma rigidez ligeiramente menor produziria tensões mais baixas, com a mesma geometria. Assim, menores espessuras poderiam ser utilizadas. O primeiro material utilizado foi o *Apec HT KU 1-9331* (PC).

Fornecidas as propriedades do material ao sistema CAE sucedeu-se a criação da malha de elementos finitos com um refinamento que produzisse um rápido processamento e descrevesse o modelo do componente satisfatoriamente. Neste caso foi considerada satisfatória uma malha não muito refinada e nem muita grosseira a fim de que o tempo de processamento fosse curto. A Figura 4.5 ilustra a malha obtida, enquanto que a Figura 4.6 ilustra as áreas nas quais foram aplicadas as condições de contorno (deslocamento prescrito, vinculação e simetria).

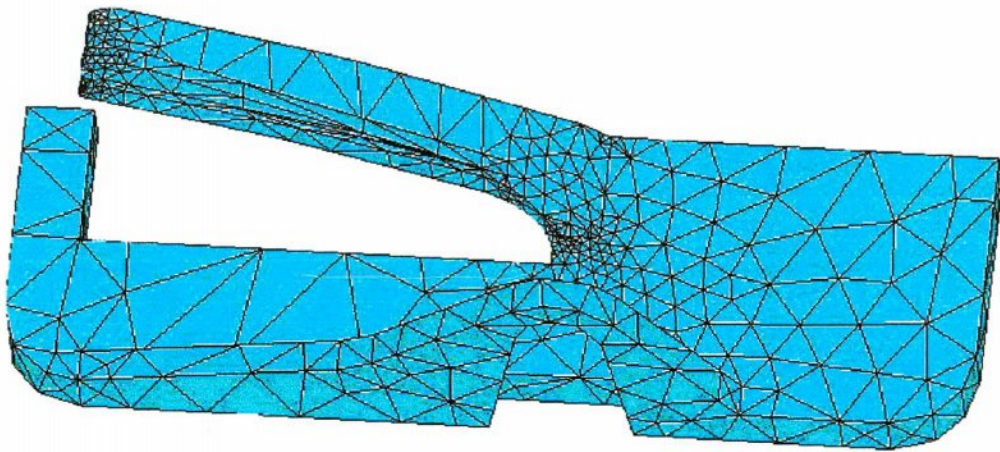


Figura 4.5: Malha de elementos finitos do componente

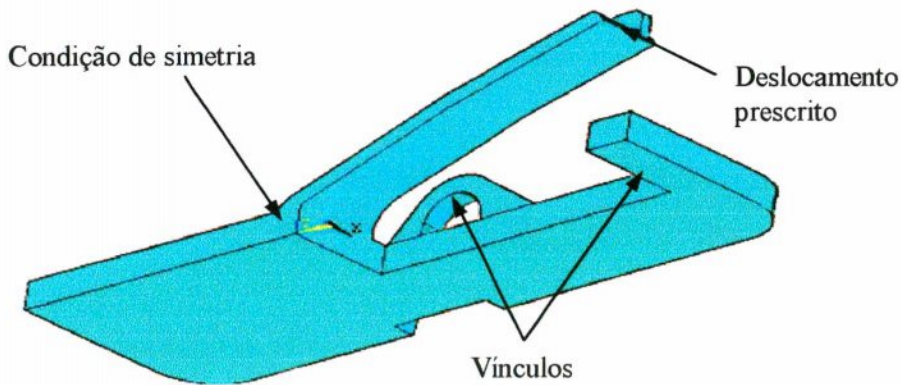


Figura 4.6: Áreas nas quais foram aplicadas as condições de contorno do problema

Na região indicada da Figura 4.6 foi aplicado um deslocamento prescrito de 13,8 mm que é o deslocamento de trabalho, ou seja, o deslocamento necessário para o usuário abrir o prendedor o suficiente a fim de introduzir os papéis. A condição de simetria simula a existência da outra metade do componente. As áreas vinculadas simulam a existência da parte inferior do

prendedor (Figura 4.1.b) e o dedo do operador no momento da sua utilização. A execução da análise sucedeu a aplicação das condições de contorno. Como o deslocamento prescrito é superior à espessura da peça (3,0 mm) foi, então, necessário realizar uma análise não-linear (grandes deslocamentos). Como as tolerâncias dimensionais do componente não foram considerados de importância fundamental no desenvolvimento deste projeto, pois se trata de um prendedor sem tolerâncias apertadas, foram avaliadas inicialmente as tensões principais. A Figura 4.7 ilustra os resultados fornecidos pelo *software* CAE para as tensões principais no componente analisado inicialmente com o material *Apec HT KU 1-9331* (PC).

Observando o diagrama tensão-deformação deste material percebe-se que o mesmo se deforma bastante antes de ocorrer a sua fratura, semelhante aos gráficos das Figuras 3.3 (Tipo B), 3.4.c e 3.5.c. Logo se pode considerá-lo como um material dúctil. TICONA [48] e GE PLASTIC [34] sugerem que se utilize para materiais termoplásticos dúcteis o critério de Tresca. Este critério será utilizado pelo fato de ser simples, pois como será discutido no Anexo F, há outros critérios que podem ser utilizados, mas estes necessitam de outras propriedades do material que não são fáceis de obter, logo o critério de Tresca apresenta-se como o mais adequado para este estudo. Este critério é ilustrado pela Equação 4.5.

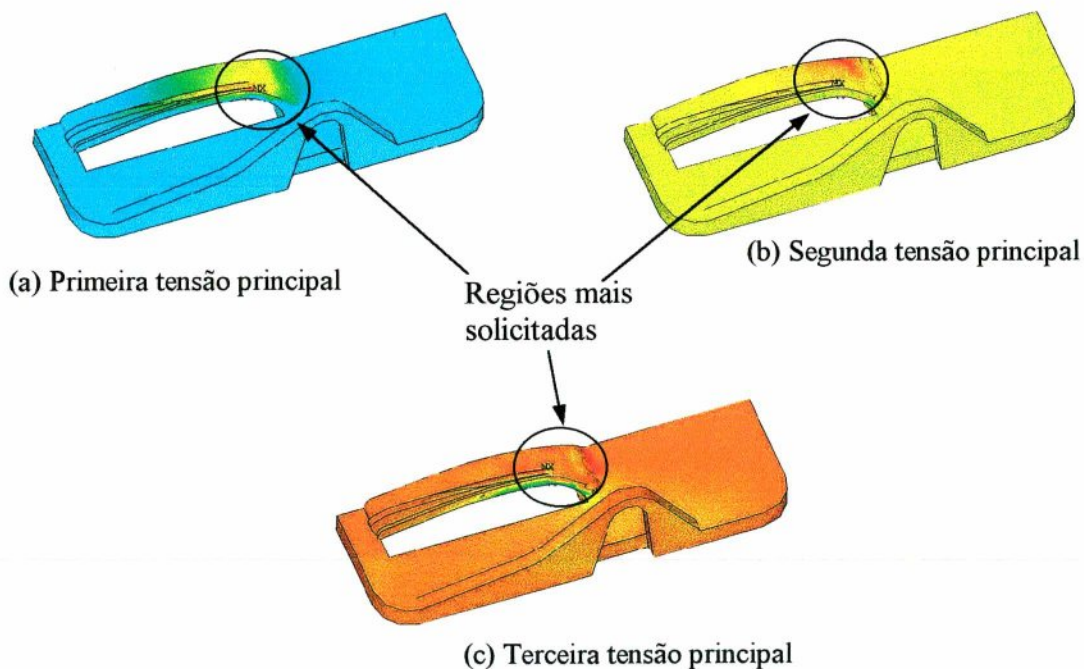


Figura 4.7: Tensões principais no componente analisado com *Apec HT KU 1-9331*

$$\tau_{Tresca} = \left| \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \right| \quad (4.5)$$

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_y}{2 \cdot S'} \quad (4.6)$$



em que,  $\tau_{Tresca}$  é a tensão máxima segundo critério de Tresca;

$\sigma_1$  é a primeira tensão principal;

$\sigma_3$  é a terceira tensão principal;

$\sigma_y$  é a tensão limite elástico do material e;

$S'$  é o coeficiente de segurança.

A Tabela 4.11 apresenta os valores para três pontos onde as tensões principais foram máximas (valores em negrito), bem como o valor da tensão de cisalhamento máxima segundo o critério de Tresca (Equação 4.5). O *ANSYS 5.7<sup>®</sup>* considera que as tensões principais com sinal positivo são as tensões máximas, enquanto que as de sinal negativo são mínimas. O projetista deve saber que na verdade estas tensões são de tração e compressão, respectivamente.

Tabela 4.11: Tensões principais máximas, fornecidas pelo *software* CAE de análise estrutural e tensão cisalhante máxima segundo critério de Tresca, utilizando o *Apec HT KU 1-9331*

$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{Tresca}$ (MPa)
<b>49,41</b>	0,72	0,17	24,62
-7,85	<b>-16,78</b>	-37,96	15,05
-0,21	-10,48	<b>-41,04</b>	20,42

Utilizando a Tabela 4.12 adotou-se um coeficiente de segurança igual a 2, pois está tratando-se de um componente de plástico sob esforço cíclico e com este coeficiente aumenta-se a margem de segurança. Desta forma, para o *Apec HT KU 1-9331* a tensão admissível determinada pela Equação 4.6 é igual a 16,25 MPa. Comparando este valor com aqueles da Tabela 4.11 percebe-se que o mesmo está muito abaixo da maior valor de tensão admissível ( $\tau_{adm}$ ) (24,62 MPa), logo se deve esperar uma falha por escoamento.

Tabela 4.12: Recomendações de valores para o coeficiente de segurança [15, 31, 48]

Tipo de Carregamento	A Falha não Representa Riscos	A Falha Representa Riscos
Intermitente	2 a 4	4 a 10
Contínuo	4 a 10	10 a 20

Há duas alternativas que podem ser utilizadas na tentativa de reduzir os valores das tensões apresentadas na Tabela 4.11. A primeira seria o remodelamento do componente reduzindo a sua espessura e a segunda seria a utilização de outro material. A região do componente na qual se observaram tensões elevadas foi uma região complexa para modelar no sistema CAD, pois o mesmo se constituía de variação de seção transversal com a utilização de raios de arredondamento. Acredita-se que as dificuldades encontradas na importação do modelo



para o sistema CAE e a conseqüente criação da malha de elementos finitos foram causadas, justamente por esta variação de geometria combinada aos raios de arredondamento utilizados. Desta forma, a fim de evitar novas dificuldades que pudessem consumir mais tempo, optou-se por manter a mesma geometria e utilizar o outro material disponível, que era o *Terluran HI-10*, já que se devia manter a espessura do componente constante, segundo as especificações de projeto.

Os passos realizados utilizando o *Terluran HI-10* foram os mesmos àqueles realizados utilizando o *Apec HT KU 1-9331*, ou seja, as propriedades do novo material foram fornecidas (Tabela 4.10), as mesmas condições de contorno foram utilizadas, uma nova simulação foi executada e por fim os resultados foram analisados. A Figura 4.8 ilustra as tensões principais no componente analisado com *Terluran HI-10*, enquanto que a Tabela 4.13 apresenta os valores para três pontos onde as tensões principais foram máximas e o valor da tensão de cisalhamento máxima segundo critério de Tresca (Equação 4.5).

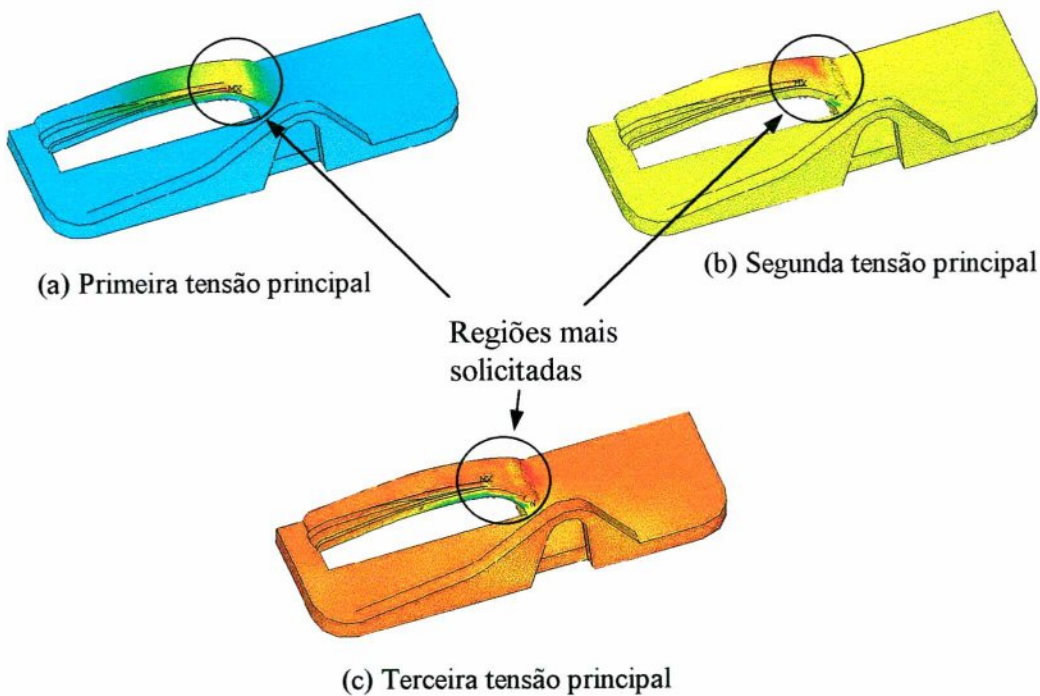


Figura 4.8: Tensões principais no componente analisado com *Terluran HI-10*

Tabela 4.13: Tensões principais máximas e tensão cisalhante máxima segundo critério de Tresca, utilizando o *Terluran HI-10*

$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{Tresca}$ (MPa)
<b>18,99</b>	0,30	0,07	9,46
-3,13	<b>-6,69</b>	-14,63	5,75
-0,08	-4,14	<b>-15,77</b>	7,92

Utilizando novamente um coeficiente de segurança igual a 2 (Tabela 4.12), a tensão admissível para o *Terluran HI-10* determinada pela Equação 4.6 é igual a 9,50 MPa. Comparando este valor com as tensões cisalhantes admissíveis da Tabela 4.12 observa-se que a este valor está ligeiramente acima do maior valor tabelado (9,46 MPa), indicando que desta forma não haverá falha por escoamento. A partir das comparações realizadas anteriormente conclui-se que a análise utilizando o *Terluran HI-10* obteve melhor desempenho. Portanto se optou por eliminar o *Apec HT KU I-9331* e considerar apenas o *Terluran HI-10*.

Durante a montagem e eventual desmontagem das partes do prendedor, será necessário deslocar a parte lateral da mesma. Esta situação também foi analisada, pois ao se proceder a montagem do prendedor um deslocamento é fornecido à sua parte lateral e tensões são geradas. Desta forma, estas tensões foram avaliadas a fim de mantê-las dentro de um limite aceitável. A mesma malha de elementos finitos foi novamente utilizada. O material utilizado foi o *Terluran HI-10*, sendo que o deslocamento foi prescrito como sendo de 4,5mm, que é o deslocamento necessário para mover a parte lateral do prendedor para realizar a montagem/desmontagem do mesmo. A Figura 4.9 ilustra a distribuição de tensões principais no componente, enquanto que a Tabela 4.14 apresenta os valores para três pontos onde as tensões principais foram máximas (valores em negrito), bem como as tensões de Tresca determinadas pela Equação 4.5.

Utilizando novamente um coeficiente de segurança igual a dois, a tensão admissível para o *Terluran HI-10* (material considerado) determinada pela Equação 4.6 é igual a 9,50 Mpa. Comparando este valor com as tensões cisalhantes admissíveis da Tabela 4.14 observa-se que este valor está abaixo do maior valor tabelado (19,10 MPa), desta forma espera-se uma falha por escoamento. A redução das tensões principais para valores seguros pode ser realizada com a utilização de raios de arredondamento adequados, pois o componente foi analisado sem a aplicação destes raios. Um valor adequado de raio de arredondamento pode ser visualizado no Anexo E.



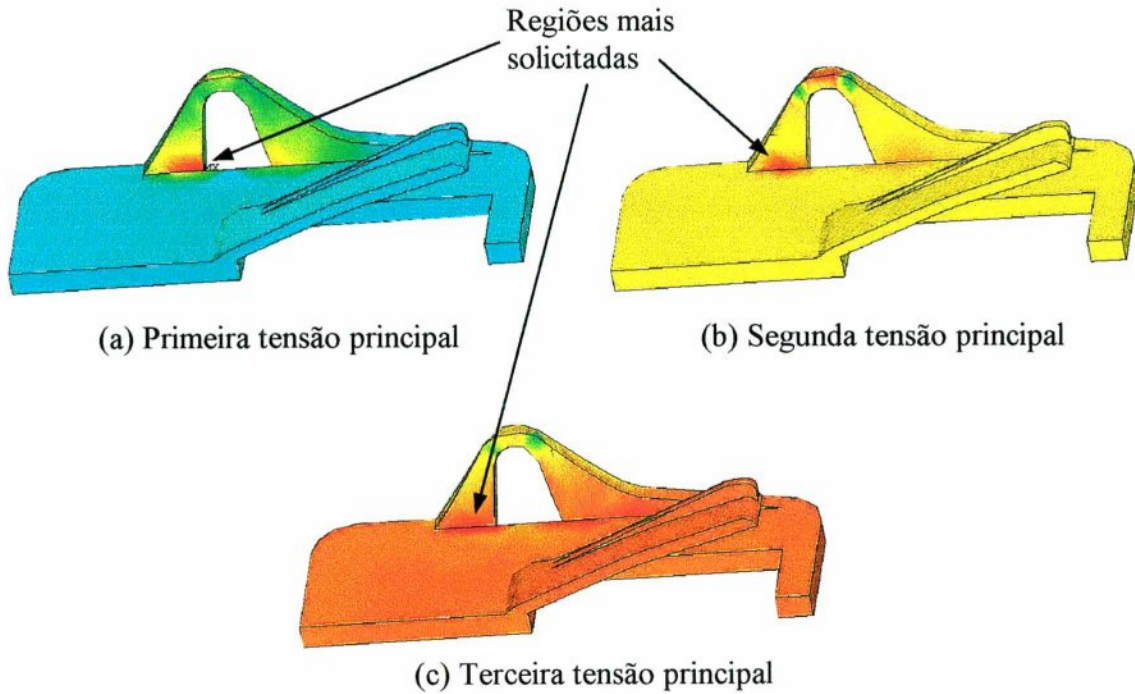


Figura 4.9: Distribuição de tensões principais na análise da montagem ou desmontagem do prendedor

Tabela 4.14: Tensões principais máximas e tensão cisalhante máxima segundo critério de Tresca, utilizando o *Terluran HI-10*

$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{Tresca}$ (MPa)
<b>23,095</b>	8,5015	3,918	9,459
-1,2915	<b>-22,061</b>	-38,298	18,5033
-1,169	-19,44	<b>-39,371</b>	19,1010

A segunda parte do componente (Figura 4.1.a) passou pelo mesmo processo de análise do primeiro, em que foi realizado o seu remodelamento, extraindo-lhes partes sem efeito estrutural e dividindo-o em duas partes simétricas, como ilustra a Figura 4.10.a. Foi criado um arquivo *IGES* de transferência de dados e importado para o sistema CAE *ANSYS 5.7*<sup>®</sup> seguido da criação da malha de elementos finitos, como ilustra a Figura 4.10.b. A importação do modelo ocorreu sem problemas.

Após a criação da malha de elementos finitos foi fornecida a propriedade do material, sendo utilizado o *Terluran HI-10* e aplicado às condições de contorno do problema. A linha indicada na Figura 4.6 como região de aplicação do deslocamento prescrito contém 15 nós. O *ANSYS 5.7*<sup>®</sup> forneceu a força necessária, em cada nó desta linha, para deslocá-la de 13,8 mm. Estas forças foram utilizadas como condição de carregamento nesta parte do componente (Figura

4.10.b). Depois de aplicado o carregamento e as condições de vinculação a simulação foi executada. Posteriormente foi adotado o mesmo procedimento de análise dos resultados descritos anteriormente, iniciando com a análise dos valores das tensões principais. A Figura 4.11 ilustra a distribuição das tensões principais no componente. A Tabela 4.15 apresenta os valores para três pontos onde as tensões principais foram máximas (valores em negrito), bem como as tensões de Tresca, em cada nó determinada pela Equação 4.5.

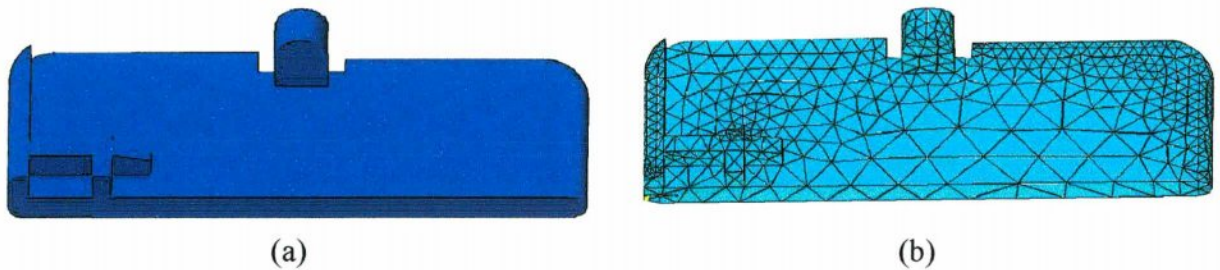


Figura 4.10: Modelo tridimensional do componente remodelado (metade) e a malha de elementos finitos

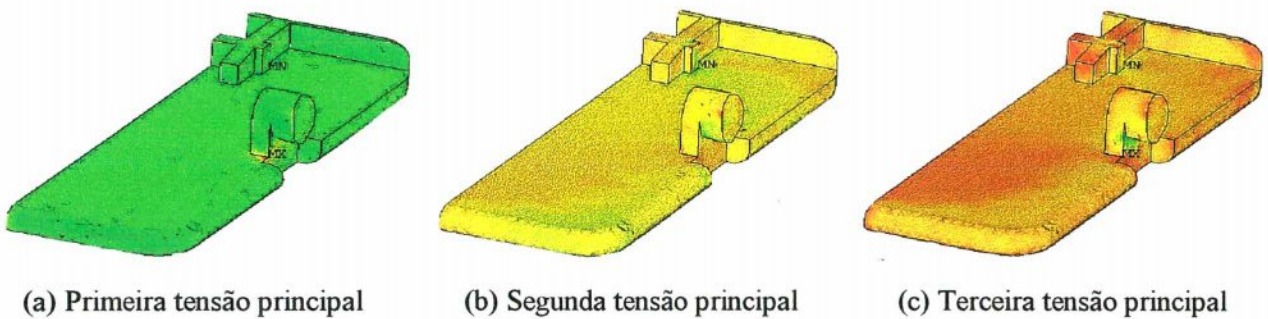


Figura 4.11: Distribuição das tensões principais no componente

Tabela 4.15: Tensões principais máximas e tensão cisalhante máxima segundo critério de Tresca, utilizando o *Terluran HI-10*

$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{Tresca}$ (MPa)
<b>1,31</b>	0,28	0,07	1,24
-1,11	<b>-1,73</b>	<b>-3,01</b>	1,9

A tensão admissível para o *Terluran HI-10* determinada pela Equação 4.6 e utilizando um coeficiente de segurança igual a 2 é igual a 9,50 MPa. Comparando este valor com as tensões cisalhantes admissíveis da Tabela 4.14 observa-se que este valor está acima do maior valor tabelado, significando, desta forma não haver falha por escoamento, segundo o critério adotado. Concluída a análise de resistência mecânica do componente, a tarefa seguinte foi a realização da análise reológica do mesmo, descrita no item seguinte.



## 4.2.2.3. ANÁLISE REOLÓGICA

O passo realizado para iniciar a análise reológica do componente foi transferir para o *software* utilizado na análise reológica o modelo tridimensional do componente resultante da análise de resistência mecânica realizada com o material *Terluran HI-10*. Em seguida foi definido o número e o leiaute das cavidades a ser utilizado e as dimensões do molde. O tipo de sistema de injeção a ser considerado na moldagem, se canal quente ou frio, foi realizado na seqüência. Esta etapa de determinação do número de cavidades do molde e das dimensões dos canais depende de muitos fatores e requer uma certa experiência por parte do projetista para defini-la. Segundo PÖSTSCH e MICHAELI [40] e MENGES e MOHREN [47] o número de cavidades é determinado por critérios técnicos e econômicos. Inclui-se aos critérios técnicos o tamanho de cada cavidade e as dimensões máximas do molde, a máquina injetora disponível e a demanda definida no início do projeto do componente. Aos critérios econômicos incluem-se o prazo de entrega do lote e o custo de produção do componente.

O número de cavidade foi, então, determinado através da Equação 4.7 [68], em que o valor de 0,8 é um coeficiente de segurança utilizado para reduzir a capacidade da máquina disponível.

$$N = \frac{0,8 \cdot m_c}{\rho \cdot V} \quad (4.7)$$

em que, N é o número teórico de cavidades;

$m_c$  é a massa máxima de um componente injetado para o material utilizado, em g;

$\rho$  é densidade do material em  $g/cm^3$  e;

V é o volume dos componentes e dos canais de injeção e de distribuição, em  $cm^3$ .

Neste estudo de caso a máquina injetora considerada foi a *ALLROUNDER 270/320 S* da *ARBURG™* com força de fechamento máxima de 51 toneladas e pressão máxima de 161 MPa, disponível no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina. O valor de “m” é fornecido pelo fabricante da máquina injetora e depende do diâmetro da rosca de injeção. Neste estudo o material utilizado foi o ABS (*Terluran HI-10*) e o diâmetro da rosca considerado foi de 35mm. A Tabela 4.16 ilustra o valor de “m” obtido da tabela do fornecido pelo fabricante da máquina injetora considerada e o volume dos componentes. A densidade do material (·) pode ser visualizada na Tabela A.1 (Anexo A). O valor da massa máxima do componente injetado para o material utilizado foi obtido do manual da máquina injetora considerada neste estudo [68].



Tabela 4.16: Ilustração da massa máxima de um componente injetado para o material utilizado e o volume do componente

Massa máxima injetada de um componente para o material utilizado ( <i>Terluran HI-10</i> )	Volume do componente
91g	14,5cm <sup>3</sup>

Aplicando os valores da Tabela 4.16 e o da densidade do material ( $\rho$ ) à Equação 4.7, tem-se que o número teórico de cavidades (N) é de 5. Isto significa que com esta máquina injetora há a possibilidade de se produzir em cada ciclo, aproximadamente, 5 prendedores, logo o molde terá 10 cavidades, sendo que 5 são para cada parte que compõem o prendedor. O volume dos canais não foi considerado, porque já foi definido que será utilizado canal de injeção quente. Deve-se ter em mente que o número de cavidades (N) depende também de outros fatores, os quais foram discutidos anteriormente, mas neste estudo de caso foi considerando apenas a sua dependência com a máquina injetora através da massa máxima injetada de um componente (m).

Depois de determinado o número e o leiaute das cavidades o passo seguinte foi a determinar as dimensões aproximadas do molde, do leiaute e das dimensões dos canais de refrigeração. O molde foi dimensionado levando em consideração o leiaute das cavidades. Organizando as cavidades em uma certa disposição chegou-se a conclusão que o molde necessário deveria ter dimensões, aproximadas de 150 mm x 100 mm x 70 mm, e segundo o catálogo da POLIMOLD [70] o molde mais próximo foi o da Série 15.15. As dimensões do molde, bem como o leiaute e as dimensões dos canais de refrigeração, que foram dimensionados através da indicação da BAYER AG [53] (ver Figura 5.11), podem ser visualizados no Anexo H.3.

Depois de determinada o número de cavidades do molde e as dimensões aproximadas do molde e dos canais de refrigeração, o passo seguinte foi determinar o sistema de injeção (canal quente ou frio) a ser utilizado. Esta determinação foi realizada considerando o volume dos canais e comparando com o volume do componente, verificando se a diferença entre os volumes é discrepante, não justificando, assim, a utilização de um sistema de injeção frio, por exemplo.

As dimensões dos canais de distribuição da massa fundida e de injeção foram determinadas através das Equações 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 indicadas por MENGES e MOHREN [47], enquanto que seu leiaute foi definido segundo recomendações da BAYER AG [53].

$$D = t + 1,5 \quad (4.8)$$

$$d_i \geq t + 1,5 \text{ mm} \quad (4.9)$$

$$d_A \geq d_B + 1 \text{ mm} \quad (4.10)$$

$$L = \frac{d_i - d_A}{2 \cdot \text{tg } \alpha} \tag{4.11}$$

em que, D é o diâmetro dos canais de distribuição da massa plástica fundida;  
 t é a espessura da peça em milímetros;  
 d<sub>i</sub> é o diâmetro da parte inferior do canal de injeção;  
 d<sub>A</sub> é o diâmetro da parte superior do canal de injeção;  
 d<sub>B</sub> é o diâmetro do bico de injeção da máquina injetora;  
 L é o comprimento do canal de injeção da bucha e;  
 α é metade do ângulo de abertura do canal de injeção e varia de 1° a 2°.

Estas variáveis podem ser visualizadas na Figura 4.12.

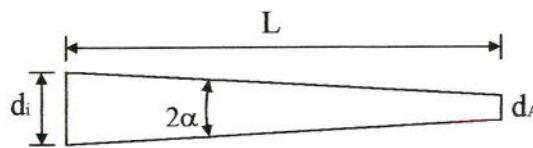


Figura 4.12: Ilustração das dimensões do canal de injeção da bucha

O diâmetro do bico de injeção da máquina injetora considerada (d<sub>B</sub>) é de 3,4 mm. A espessura do componente (t) é de 3,0 mm. A Tabela 4.17 ilustra os valores obtidos das Equações 4.8 a 4.11 e utilizando α igual a 1°.

Tabela 4.17: Indicação das dimensões obtidas para os canais de injeção e de distribuição

Diâmetro dos canais de distribuição (D)	Diâmetro da parte inferior do canal de injeção (d <sub>i</sub> )	Diâmetro da parte superior de canal de injeção (d <sub>A</sub> )	Comprimento do canal de injeção (L)
4,5mm	4,5mm	4,4mm	3,0mm

O comprimento do canal (L) ilustrado na Tabela 4.17 foi muito pequeno. Não existem buchas de injeção com tal comprimento, logo se optou por aumentar esta dimensão aumentando o diâmetro inferior do canal (d<sub>i</sub>) para 6,5mm e mantendo o diâmetro da parte superior do canal de injeção com o mesmo valor (Tabela 4.17). Desta forma, o novo comprimento do canal (L) foi de, aproximadamente, 60mm. Determinado as dimensões dos canais o passo seguinte foi a determinação do volume do componente e dos canais de injeção na bucha e de distribuição. A Tabela 4.18 ilustra os valores destes volumes.

Tabela 4.18: Indicação do volume do componente, dos canais e total

Volume do componente	Volume dos canais	Volume total
14478mm <sup>3</sup>	3630mm <sup>3</sup>	18108mm <sup>3</sup>

Da Tabela 4.17 percebe-se que o volume dos canais representa, aproximadamente, 25% do volume dos componentes, ou seja, ao utilizar o sistema de canais frio, 25% do volume de



material injetado estará sendo perdido, pois este material não é reaproveitado, já que o mesmo apresenta um certo grau de degradação térmica. Em vista disto, optou-se por utilizar um sistema de canais quentes, a fim de promover uma economia de material injetado.

Foi visto anteriormente que há a possibilidade de se produzir 5 prendedores em cada ciclo, ao todo 10 cavidades. Este seria o valor de cavidade utilizado para realizar a análise reológica do prendedor no *Moldflow*<sup>®</sup>, mas para efeito didático apenas duas cavidades foram simuladas, pois para 10 cavidades a análise seria muito demorada e requeria bastante espaço de memória para realizar os cálculos necessários. Assim, foi efetuada a criação de um arquivo de transferência de dados *STL*, a partir do modelo tridimensional de cada metade do prendedor. Este arquivo foi utilizado por ser mais simples e pelo fato de o *Moldflow*<sup>®</sup> importa-lo com maior facilidade. Criado o arquivo de transferência o passo seguinte foi a realização da análise de preenchimento (*fill*), em que inicialmente criou-se a malha de elementos finitos do modelo com um refinamento adequado, posicionou-se o ponto de injeção, o material foi selecionado no banco de dados do *Moldflow*<sup>®</sup>, os parâmetros de processo e o tempo de preenchimento foram fornecidos como condições de contorno e a análise foi executada. A localização dos pontos de injeção foi determinada através da realização da análise que leva o próprio nome. A melhor localização para os pontos de injeção pode ser visualizada através da Figura 4.13, bem como a malha de elementos finitos das duas cavidades.

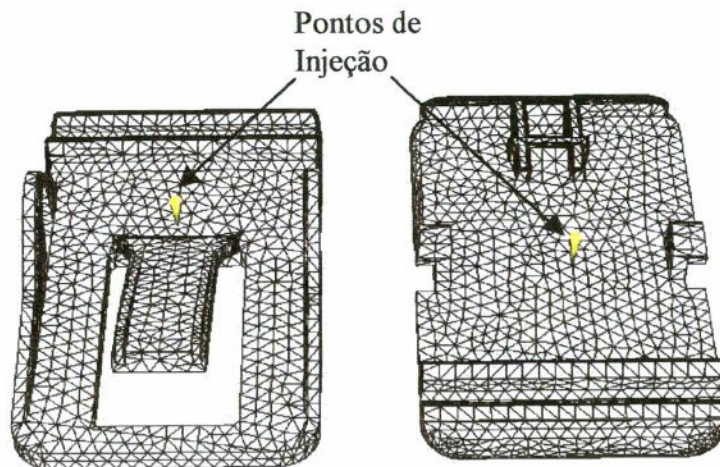


Figura 4.13: Malha de elementos finitos das cavidades consideradas e os pontos de injeção

Os parâmetros de processo fornecidos foram as temperaturas do molde e de injeção. Para cada material o fabricante fornece uma faixa de temperaturas a ser utilizada e sugere ainda que se utilize uma temperatura média. Para o material em questão (*Terluran HI-10*) as temperaturas utilizadas foram 60 °C e 255 °C para o molde e injeção, respectivamente. O *Moldflow*<sup>®</sup> já deixa estes valores ajustados automaticamente, logo não foi necessário fornecê-los. O tempo de preenchimento (*fill time*) foi determinado a partir da indicação fornecida pela C-MOLD [35], que

se sugere que o tempo de preenchimento pode ser considerado como sendo um décimo (1/10) a um quinto (1/5) do tempo de resfriamento, determinado pela Equação 4.12.

$$t_{resf} = \frac{t^2 \cdot \rho \cdot c_p}{4 \cdot k} \quad (4.12)$$

em que,  $t_{resf}$  é o tempo de resfriamento, em segundos;

$t$  é a maior espessura do componente, em milímetros;

$k$  é a condutividade térmica do material, em  $W/m \cdot ^\circ C$ ;

$\rho$  é a densidade do material fundido, em  $kg/m^3$ ;

$c_p$  é o calor específico do material, em  $J/kg \cdot ^\circ C$ .

As propriedades do material considerado (*Terluran HI-10*) extraídos do *Material Management*<sup>®</sup> do *Moldflow Plastic Insight 2.0*<sup>®</sup> [69] são:

$$k = 0,2 \text{ W/m} \cdot ^\circ C;$$

$$\rho = 901 \text{ kg/m}^3;$$

$$c_p = 2089,6 \text{ J/kg} \cdot ^\circ C.$$

Substituindo estes valores na equação 4.12, obtém-se um tempo de resfriamento igual a 21,2 segundos. Como recomendado anteriormente, o tempo de preenchimento a ser considerado é de um décimo a um quinto deste valor, logo o tempo de preenchimento será de 2,12 s a 4,24 s. Utilizou-se, então, o tempo de 2,12 s e os resultados da primeira análise de preenchimento podem ser visualizados através dos gráficos na Figura 4.14 e da Tabela 4.19, em que são ilustrados os valores máximos e mínimos dos principais gráficos observados na primeira análise de preenchimento.

Observando os resultados apresentados na Figura 4.14 e na Tabela 4.19 pode-se concluir que os mesmos foram satisfatórios, uma vez que a distribuição da taxa e da tensão de cisalhamento sobre a peça ficou bastante uniforme e com valores mínimos (Tabela 4.15) abaixo daqueles indicados pelo fabricante do material, que é de 50000 1/s e 0,3 MPa, respectivamente. As diferenças entre os valores máximos e mínimos de temperatura e temperatura instantânea ficaram dentro dos valores recomendados, ou seja, 1<sup>°</sup>C a 3<sup>°</sup>C, recomendado pelo *MOLDFLOW*<sup>®</sup> [72]. Já o gráfico de tempo de preenchimento (Figura 4.14.d) mostra que a cavidade foi totalmente preenchida, necessitando uma pressão máxima de aproximadamente 6,52 MPa, menor do que a pressão máxima disponível pela máquina injetora considerada (161 MPa). Verificou-se também que a força de fechamento máxima (2,57 t) ficou bem abaixo da disponível pela máquina (51 toneladas).



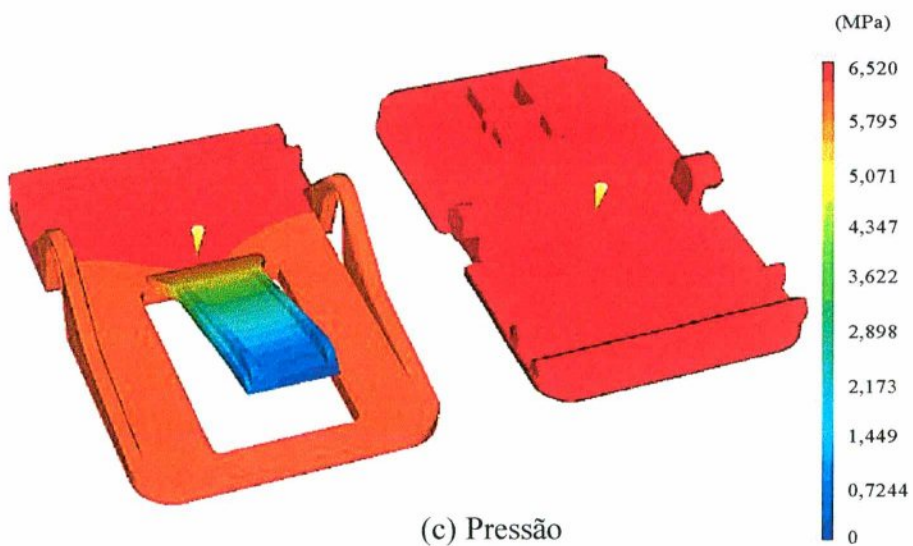
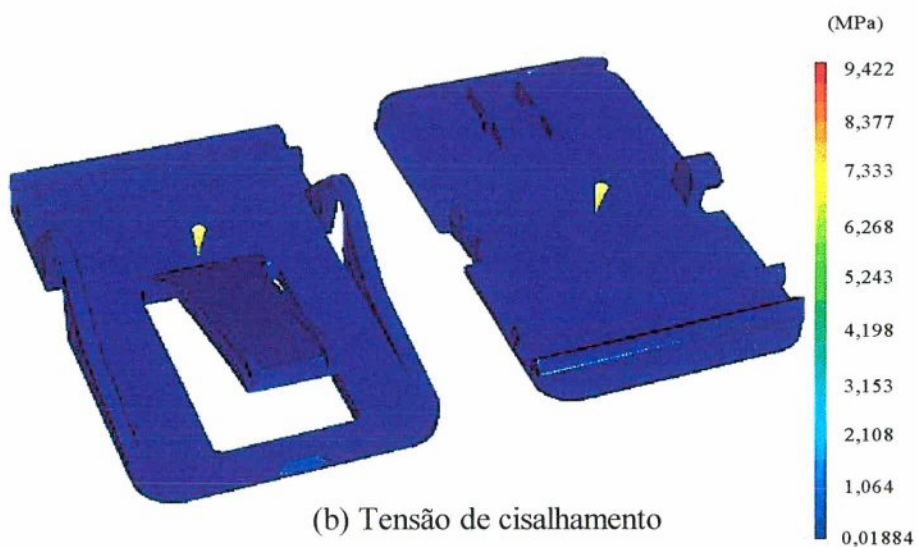
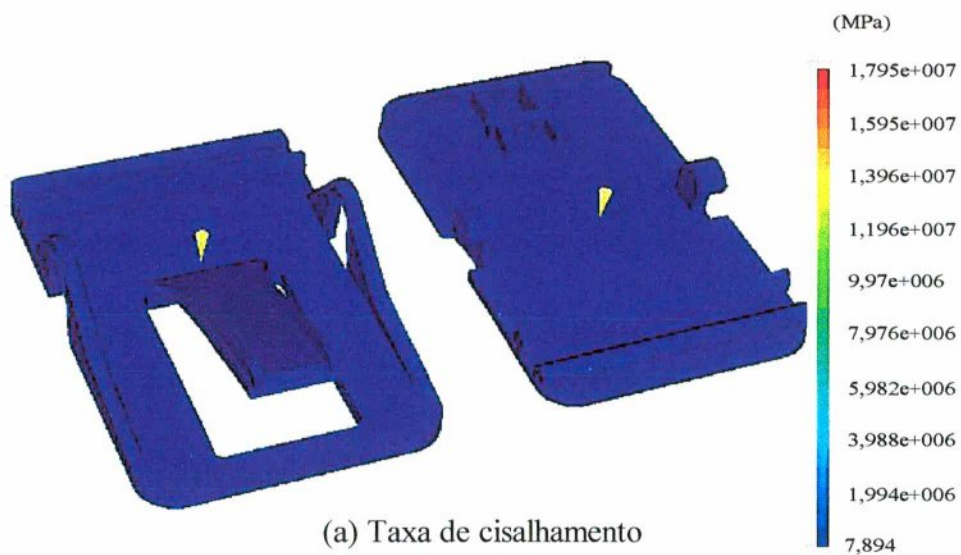


Figura 4.14: Principais gráficos observados na primeira análise de preenchimento



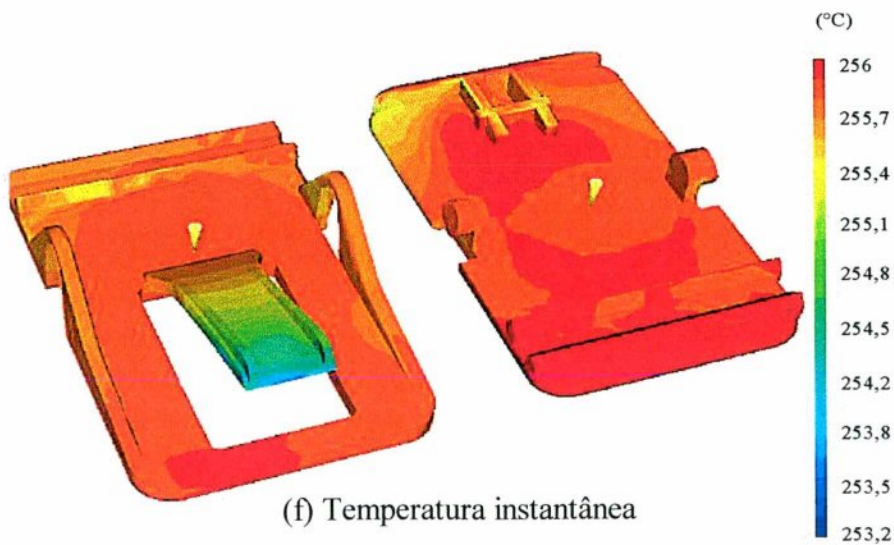
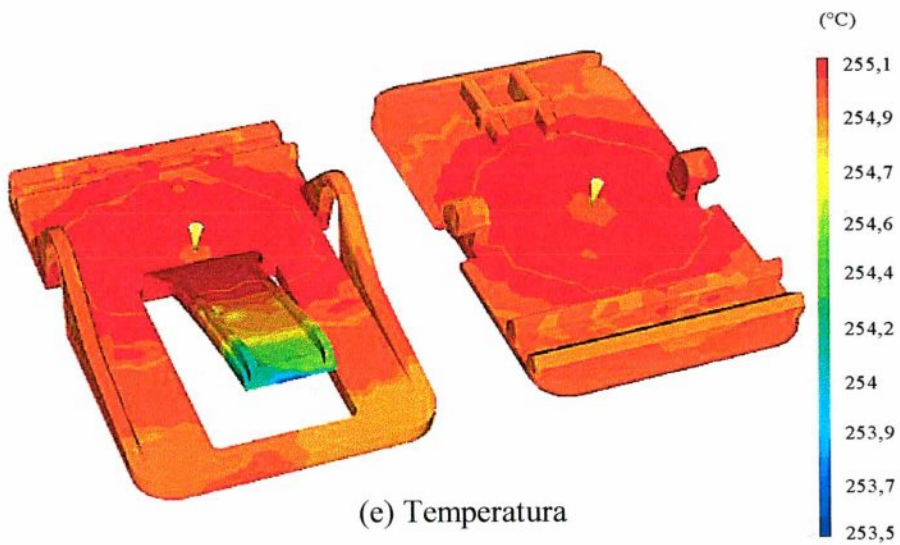
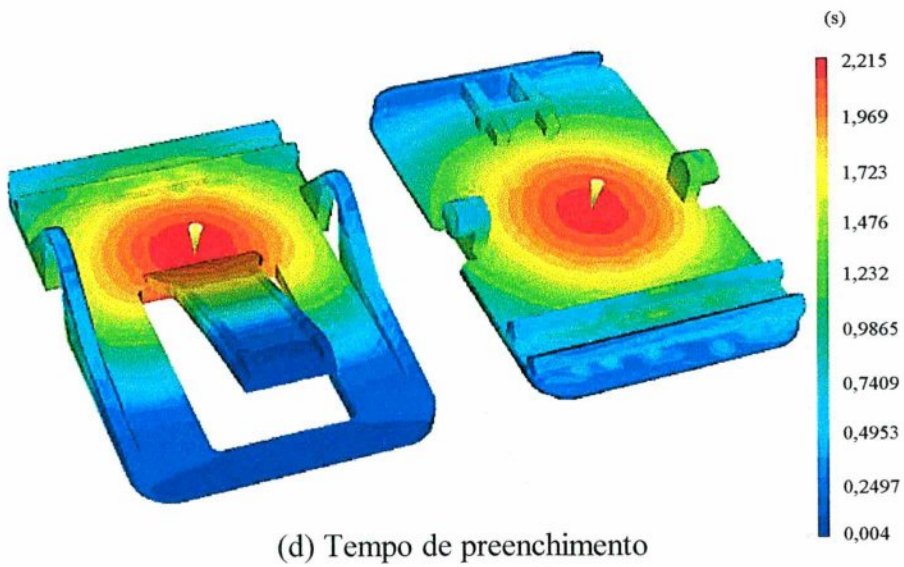


Figura 4.14: Principais gráficos observados na primeira análise de preenchimento (continuação)

Tabela 4.19: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na primeira análise de preenchimento

	Taxa de cisalhamento (1/s)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Pressão (MPa)	Tempo de preenchimento (s)	Temperatura (°C)	Temperatura instantânea (°C)
Máximo	$1,8 \times 10^7$	9,42	6,52	2,24	255,1	256,0
Mínimo	7,9	0,02	0	0,004	253,5	253,2

Utilizando as dimensões do molde determinadas anteriormente, o molde e os canais de refrigeração foram modelados no ambiente de modelamento do *Moldflow*<sup>®</sup>. Concluído este modelamento sucedeu-se a criação da malha de elementos finitos do molde e dos canais. Para iniciar uma análise de refrigeração é preciso fornecer informações ao sistema CAE relativas ao material utilizado para o molde. O material indicado foi o Aço P20 por ser aquele utilizado pela POLIMOLD [70] em seus moldes. Após o posicionamento adequado do componente na placa do molde foi necessário fornecer outros dados como tempo de recalque e tempo para abertura do molde e conseqüente extração da peça. O tempo de recalque utilizado foi igual ao tempo de resfriamento máximo, sendo considerado o valor de 10 s. O tempo de abertura do molde foi considerado como sendo de três segundos, que é o tempo médio gasto pelas máquinas para abrir o molde e extrair a peça.

Para realizar uma análise de refrigeração, uma série de parâmetros deve ser informada como: temperatura de entrada do fluido refrigerante, o tipo de fluido refrigerante e o número de Reynolds. Estes parâmetros constituem-se as condições de contorno do problema. A Tabela 4.20 ilustra os valores utilizados.

Tabela 4.20: Condições de contorno utilizados na análise de refrigeração

Temperatura de entrada do fluido (°C)	Tipo de fluido refrigerante	Número de Reynolds
20	Água	10000

Fornecido estes dados o passo seguinte foi executar a análise de refrigeração com conseqüente análise dos resultados apresentados pelo *software*. A Figura 4.15 ilustra os principais resultados analisados, enquanto que a Tabela 4.21 ilustra os valores máximos e mínimos dos principais gráficos observados.



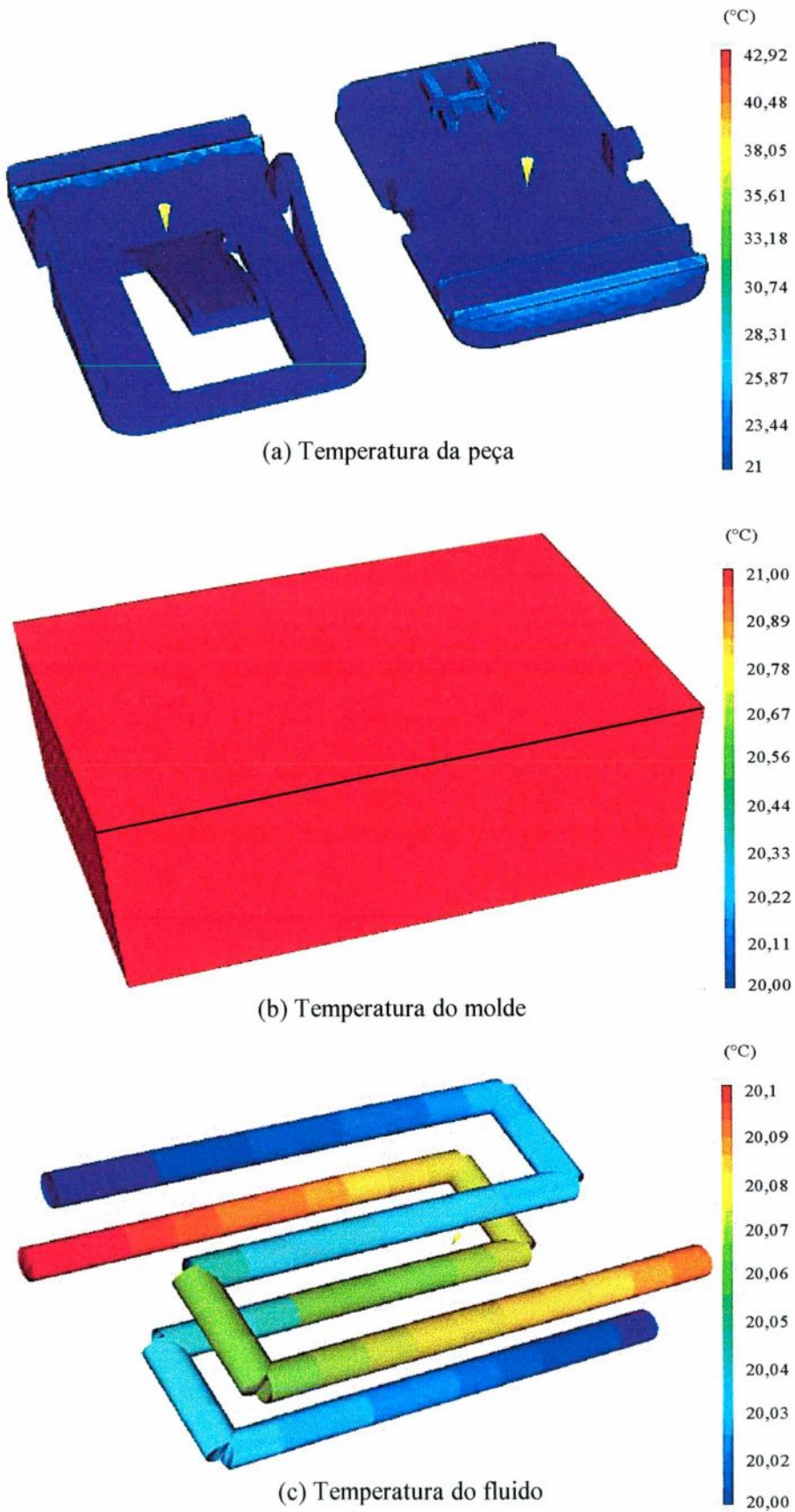


Figura 4.15: Principais gráficos observados na análise de refrigeração

Tabela 4.21: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na análise de refrigeração

	Temperatura da peça	Temperatura do molde	Temperatura do fluido
Máximo	43,0	24,0	20,1
Mínimo	21,0	15,0	20,0

Os resultados obtidos da análise de refrigeração foram considerados satisfatórios, pois como pode ser visualizada na Figura 4.15 a temperatura do molde ficou bastante uniforme e em torno de 21°C, como é recomendado. A variação de temperatura apresentada pelo fluido refrigerante também ficou dentro da faixa recomendada que, segundo *MOLDFLOW*<sup>®</sup> [71] é de 2°C, aproximadamente (ver Anexo B) e a temperatura máxima da peça (Tabela 4.16) apresentou-se abaixo da temperatura de extração do material, que é de 99°C, segundo recomendações do fabricante do material.

Na seqüência, uma nova análise de preenchimento foi realizada, para verificar se os parâmetros de processo e o tempo de preenchimento utilizado seriam necessários para preencher totalmente a cavidade e se a localização dos pontos de injeção eram os mais adequados. Esta segunda análise de preenchimento é mais realista, pois considera a refrigeração do molde. A Figura 4.16 ilustra os principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento. Nenhum parâmetro de processo foi alterado. A Tabela 4.22 ilustra os valores máximos e mínimos dos principais gráficos observados.

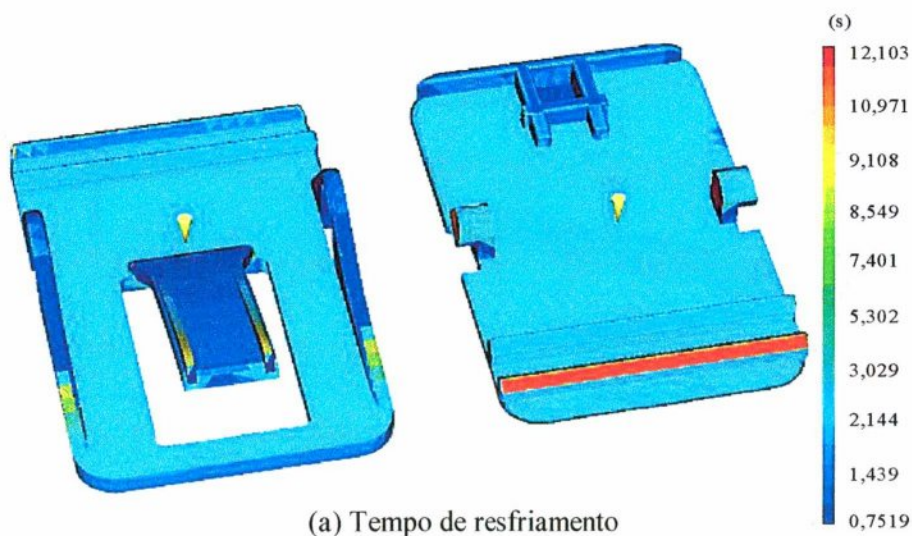


Figura 4.16: Principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento



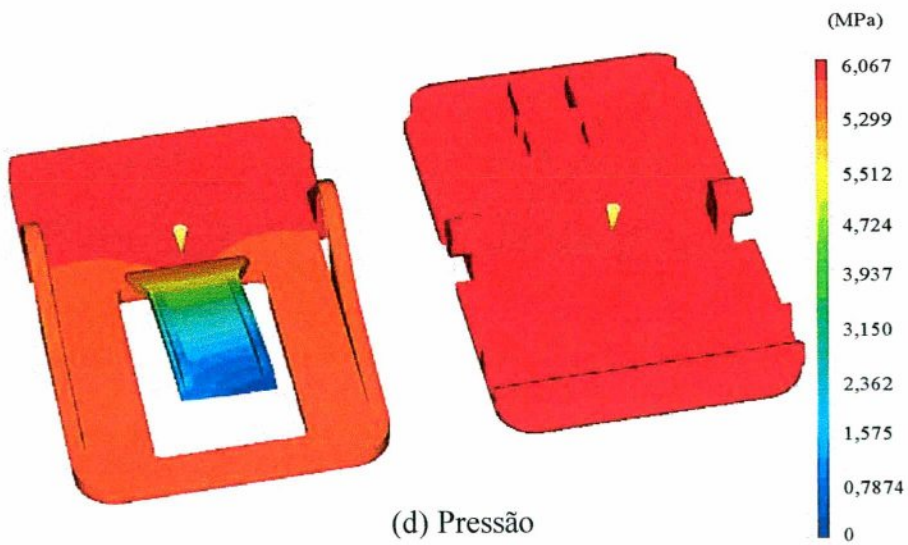
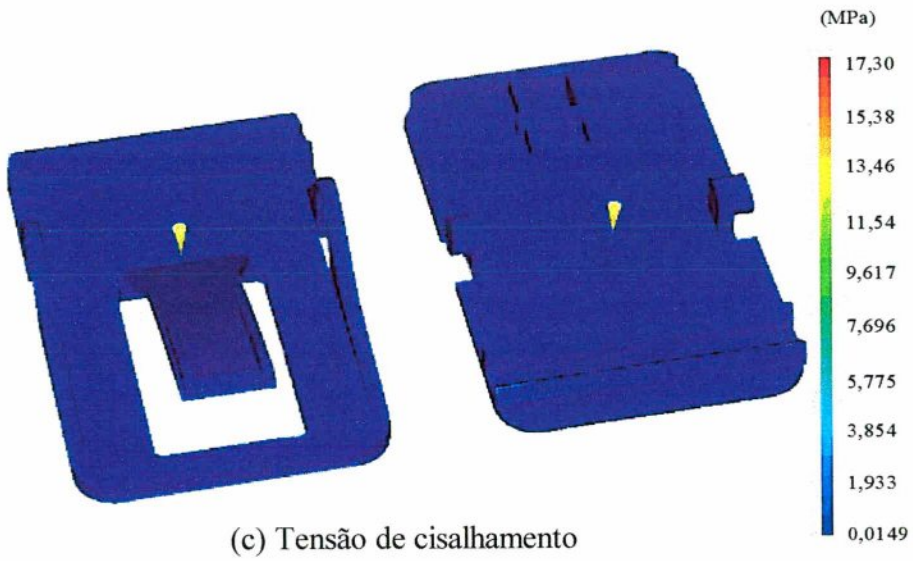
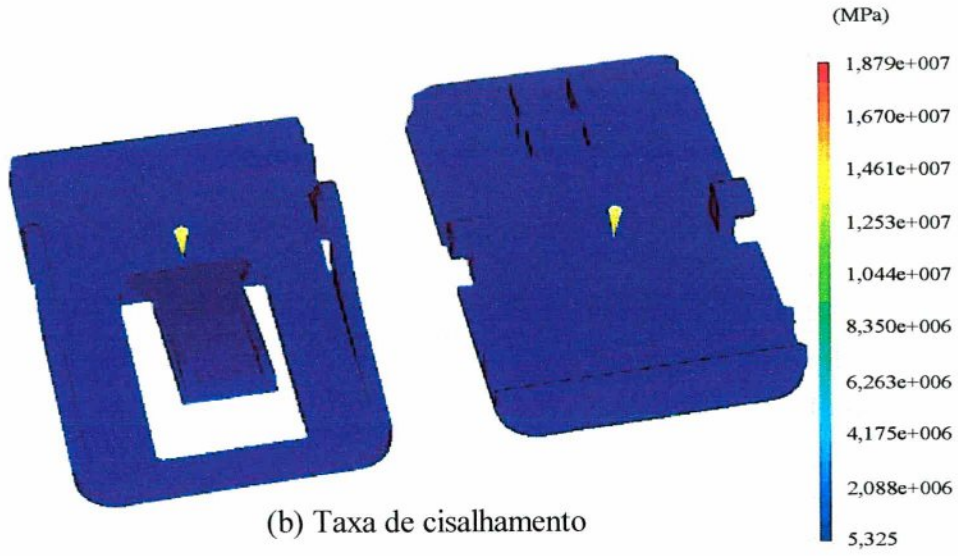


Figura 4.16: Principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento (continuação)

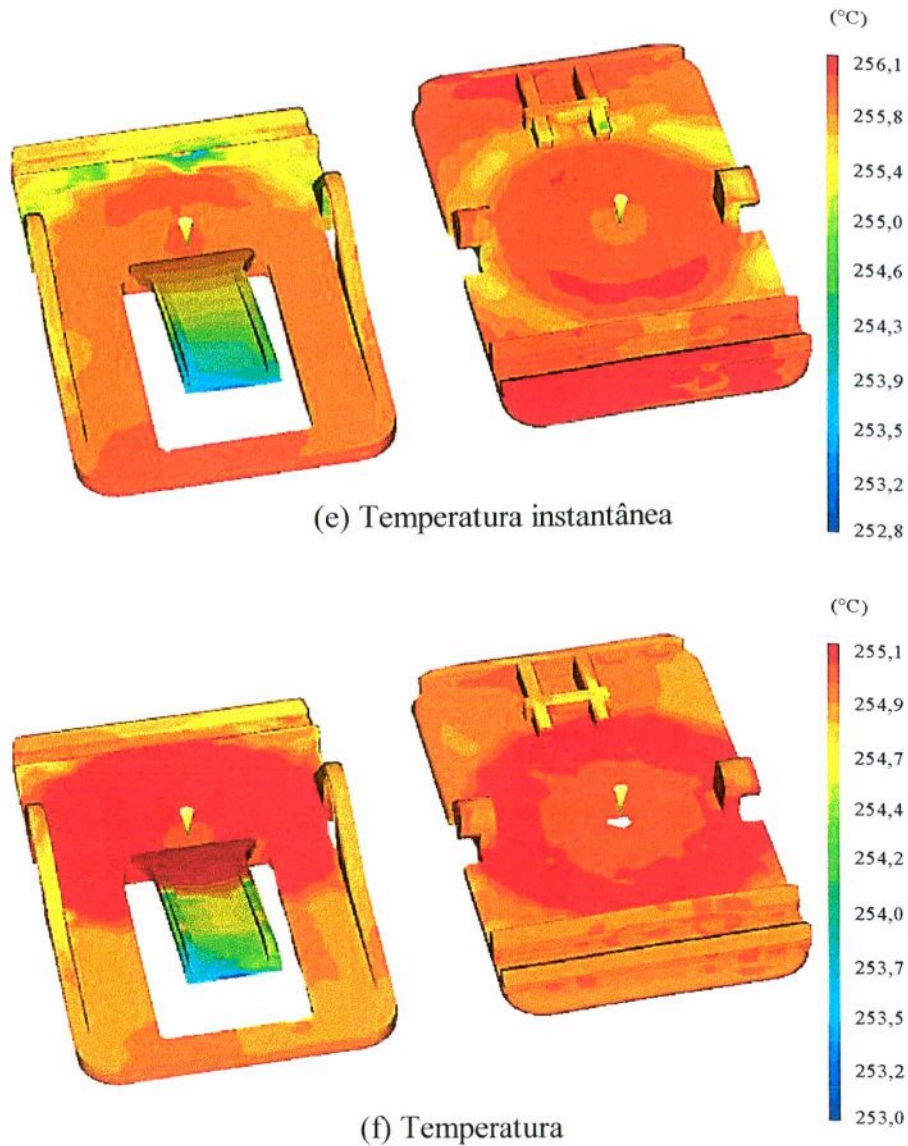


Figura 4.16: Principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento (continuação)

Tabela 4.22: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na segunda análise de preenchimento

	Tempo de resfriamento (s)	Taxa de cisalhamento (1/s)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Temperatura instantânea (°C)
Máximo	12,1	$1,9 \times 10^7$	17,3	6,1	255,1	256,1
Mínimo	0,752	5,33	0,011	0	253	252,8

Os resultados da segunda análise de preenchimento também se apresentaram bons. O tempo de resfriamento apresentou valores elevados em alguns pontos da peça, mas para resfriar a maior parte dela é necessário aproximadamente 12,1 segundos (Tabela 4.22). A taxa e a tensão de cisalhamento apresentaram-se uniformes e com valores abaixo daquele indicado pelo fabricante do material (50000 1/s e 0,3 MPa, respectivamente). As diferenças entre os valores



máximos e mínimos da temperatura e da temperatura instantânea foram pequenas, 2,1 °C e 3,3 °C, respectivamente. As linhas de solda que se apresentaram não comprometem a qualidade superficial da peça, bem como a sua integridade estrutural, pois as mesmas se encontram em regiões da peças cuja temperatura está na faixa recomendada (ver Anexo B).

O passo seguinte foi a realização da análise de recalque (*packing*). Duas análises foram realizadas, uma considerando um perfil constante de pressão e outra considerando uma parte com pressão constante e outra com pressão decrescente para promover uma contração mais uniforme. Nos dois casos a pressão utilizada foi a pressão máxima proveniente da segunda análise de preenchimento, ou seja, 6,1 MPa (Tabela 4.22). Os perfis de pressão utilizados na primeira e segunda análise de recalque estão ilustrados nos Diagrama 4.3.a e 4.3.b.

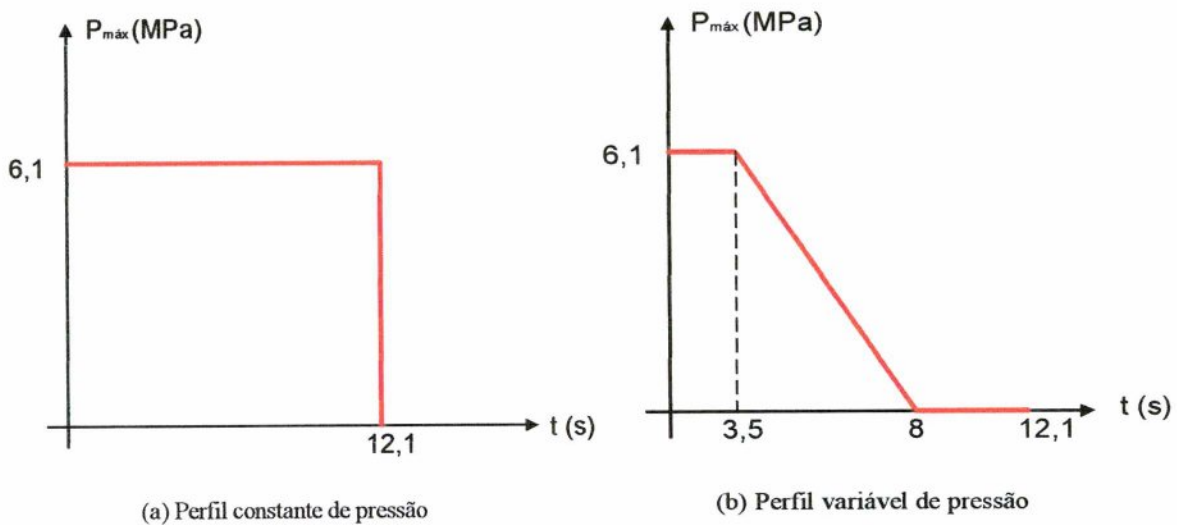


Diagrama 4.3: Diagramas ilustrando o perfil de pressão aplicado na primeira e segunda análise de recalque, respectivamente

O tempo de recalque utilizado nas duas análises foi de 12,1 segundos, que foi obtido do gráfico de tempo de resfriamento da segunda análise de preenchimento (ver Tabela 4.22).

No Diagrama 4.3.b a pressão máxima (6,1 MPa) mantém-se durante 3,5 segundos e depois decresce até zero durante 4,5 segundos, quando se tem o canal de injeção solidificado e não há mais injeção de material na cavidade. O tempo restante (até 12,1 segundos) é o tempo em que o componente permanece no molde até que o mesmo alcance uma temperatura na qual possa ser extraído. As equações utilizadas para calcular os tempos ilustrados no Diagrama 4.3.b podem ser obtidas através da função de ajuda (*Help*) do *MOLDFLOW*<sup>®</sup> [71]. Este *software* sugere a realização de uma análise de recalque com perfil decrescente (Diagrama 4.3) para que a pressão de recalque seja uniforme evitando que a peça se contraia muito produzindo empenamentos indesejáveis. A Figura 4.17 ilustra os principais gráficos observados desta segunda análise de recalque, enquanto que a Tabela 4.23 apresenta os valores máximos e mínimos dos principais gráficos observados.

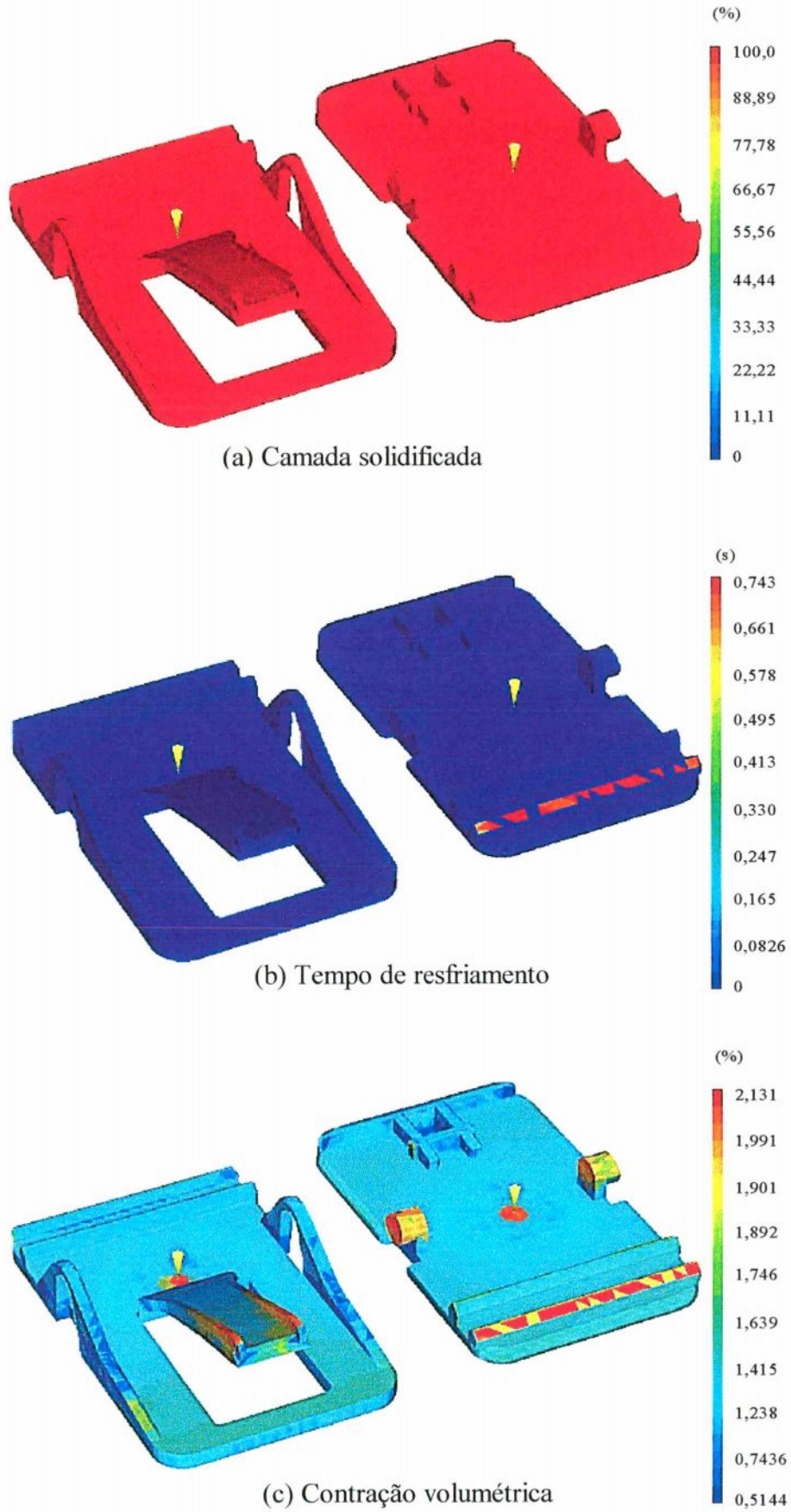


Figura 4.17: Principais gráficos observados na segunda análise de recalque



Tabela 4.23: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na segunda análise de recalque

	Camada Solidificada (%)	Tempo de resfriamento (s)	Contração volumétrica (%)
Máximo	100	0,74	2,13
Mínimo	0	0	0,51

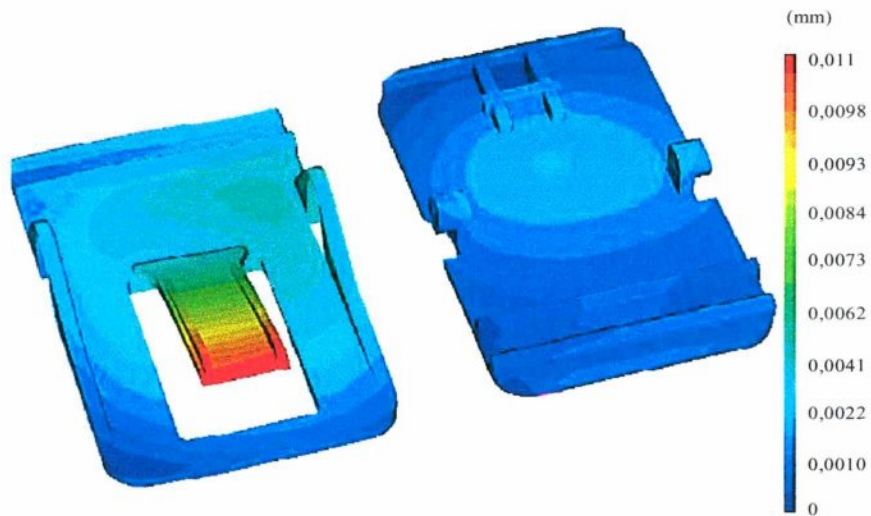
Na Figura 4.17.a e na Tabela 4.23 observa-se que a maior parte da paca encontra-se solidificada, apenas algumas partes necessitam de um tempo extra para solidificar-se totalmente, ou seja, apenas 0,74 segundo. A Figura 4.17.c ilustra que a peça possui uma certa variação de contração volumétrica, mas esta variação é baixa de modo que os empenamentos fiquem dentro de valores aceitáveis. Os valores mínimo e máximo ocorrem em regiões isoladas.

Os empenamentos foram verificados através da análise que leva o próprio nome, realizado após a análise de recalque. A Figura 4.18 ilustra os gráficos observados nesta análise e a Tabela 4.24 ilustra os valores máximos e mínimos dos principais gráficos observados. A Figura 4.18.a ilustra a deflexão proveniente do resfriamento, indicando se o sistema de resfriamento está bem projetado ou não e a Figura 4.19.b ilustra a deflexão proveniente da contração volumétrica.

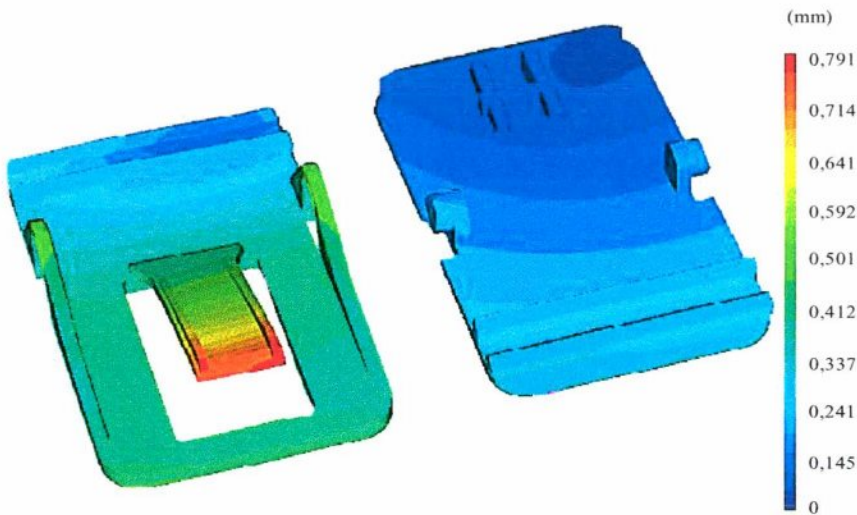
A deflexão máxima ilustrada na Figura 4.18.a foi, aproximadamente 0,01 mm enquanto que a ilustrada na Figura 4.18.b foi, aproximadamente 0,79 mm, ambos na região indicada da Figura 4.18. Estes valores devem ser comparados ao valor da tolerância especificada. Neste componente as tolerâncias dimensionais não são tão importantes, pois para desempenhar as suas funções satisfatoriamente não é necessário baixas tolerâncias e depois, observando bem a Figura 4.18, as deflexões máximas acontecem na extremidade da Região A (ver Figura 4.2), onde acontece o contato entre as duas partes do componente não comprometendo a funcionalidade do conjunto. Para diminuir mais ainda as deflexões e tornar o componente dimensionalmente mais estável, há a possibilidade de se utilizar materiais compostos. Desta forma, tem-se então concluído a análise reológica do componente. Suas dimensões finais podem ser visualizadas nos Anexos H.1 e H.2.

Tabela 4.24: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na análise de empenamento

	Empenamento proveniente do sistema de refrigeração (mm)	Empenamento proveniente da contração volumétrica (mm)
Máximo	0,01	0,79
Mínimo	0	0



(a) Empenamento proveniente do sistema de refrigeração



(b) Empenamento proveniente da contração volumétrica

Figura 4.18: Principais gráficos observados na análise de empenamento

## 4.2. ESTUDO DE CASO 2

### 4.2.1. DEFINIÇÃO DO COMPONENTE 2

Para o segundo estudo de caso foi selecionado um componente já disponível no mercado e fabricado pelo processo de fundição com aço-carbono SAE/AISI 1020 cujo módulo de elasticidade é de 210 GPa e a tensão limite elástico é de 207 MPa. Na Figura 4.19 pode ser visualizada a geometria do componente e no Anexo H.4 pode ser visualizado o desenho detalhado contendo suas dimensões originais.

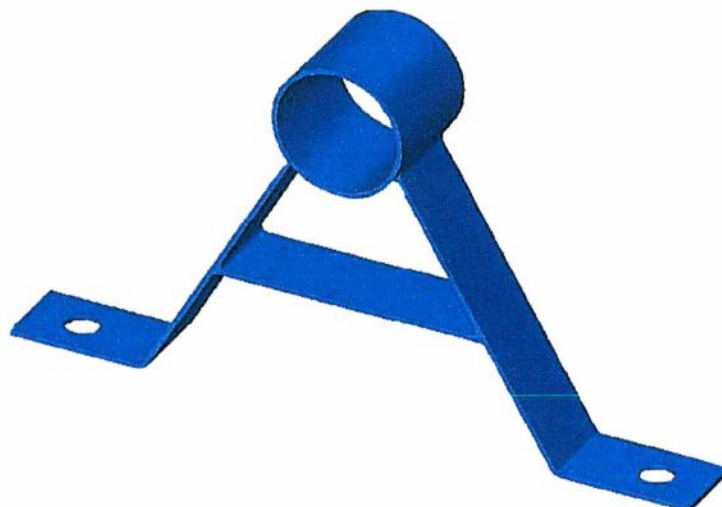


Figura 4.19: Ilustração da geometria do componente considerado no segundo estudo de caso

#### 4.2.2. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO 2

##### 4.2.2.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS

A fim de selecionar o material termoplástico mais adequado foram respondidas as questões do questionário estruturado, ilustrado na Tabela D.1 (Anexo D). Na Tabela 4.25 são apresentadas as questões e respostas obtidas. Na prática, este questionário deve ser respondido pelo solicitante do projeto (cliente). Neste estudo de caso as respostas dadas representam suposições.



Tabela 4.25: Respostas extraídas do questionário estruturado utilizando as listas de necessidade, requisitos e especificações de projeto

CLASSES	SUBCLASSES	PERGUNTAS	RESPOSTAS
<b>Relativas às propriedades necessárias ao material</b>	Elétricas	O componente será utilizado como isolante elétrico?	Não será utilizado como isolante elétrico.
		Quais os níveis de voltagem próximos do componente?	Não se aplica
	Ópticas	O componente será transparente, translúcido ou opaco?	Deseja-se que o componente seja opaco
		O componente será colorido?	Deseja-se que possa ser pintado.
	Acústicas	O componente será utilizado como isolante sonoro?	Não será utilizado como isolante sonoro
<b>Relativo às condições de utilização do componente</b>	Mecânicas	Sob quais carregamentos (estático, dinâmico ou cíclico) o componente estará submetido?	O componente estará submetido a um carregamento estático.
		Qual a magnitude dos carregamentos ou deslocamentos prescritos no componente?	O componente suportará uma carga máxima de 10 kg.
		A relação carregamento versus tempo é significativa?	Sim, é significativa.
		O componente deve ser resistente a impactos?	Sim, o componente deve resistir a eventuais quedas.
		Qual a máxima deflexão tolerada durante a vida útil do componente?	A máxima deflexão será igual à determinada pela faixa de tolerância.
		As tolerâncias dimensionais são importantes? Qual faixa deve ser mantida?	Devem ser mantidas no intervalo de $\pm 0,2$ mm no furo.
		O peso do componente é relevante? Qual deve ser o seu peso máximo?	Não é relevante
		A resistência ao desgaste deve ser considerada?	Não é relevante



Tabela 4.25: Respostas extraídas do questionário estruturado utilizando as listas de necessidade, requisitos e especificações de projeto (cont.)

CLASSES	SUBCLASSES	PERGUNTAS	RESPOSTAS
<b>Relativo às condições de utilização do componente</b>	Ambientais Químicas	O componente estará submetido a algum ambiente quimicamente reativo? Qual?	O componente não estará submetido a ambientes quimicamente reativos
		Qual a maior e a menor temperatura em que o componente estará submetido?	Menor temperatura: 15 °C; Maior temperatura: 30 °C
		Por quanto tempo o componente ficará exposto a esta variação de temperatura?	Durante toda a sua vida útil que é de cinco anos
		O componente ficará exposto às intempéries?	Sim, ficará exposto às intempéries.
		Qual o nível de umidade do ambiente de aplicação do componente?	Nível de umidade máxima de 80 %
		O componente ficará exposto à luz solar?	Sim, o componente estará em contato com a radiação solar.
		O componente sofrerá algum tipo de manutenção durante toda a sua vida útil? Que tipo de produto será utilizado para isto?	Não será realizada manutenção
		Qual a vida útil esperada para o componente no ambiente?	Espera-se uma vida útil de cinco anos
		A resistência à chama é importante?	Não é importante
<b>Relativo aos processos de fabricação</b>	Tipo de processo de fabricação	O componente será montado? Por qual método?	Serão utilizados parafusos
		Haverá necessidade de acabamento superficial ou de revestimento da superfície do componente depois de fabricado?	O componente não será revestido, apenas pintado se necessário.
<b>Relativo aos custos e fatores econômicos</b>		Já existe algum componente no mercado?	Existe um fabricado em Aço SAE 1020
		Qual seu custo? O reprojeto reduzirá seus custos?	Sim, o reprojeto reduzirá os seus custos

As respostas obtidas do questionário foram analisadas e uma lista de informações necessárias à seleção do material foi produzida. Esta lista pode ser visualizada na Tabela 4.26.

Tabela 4.26: Lista de informações necessárias à seleção do material

LISTA DE INFORMAÇÕES
a) Deseja-se que seja um material opaco
b) Boa resistência à fluência ( <i>creep</i> )
c) Não seja higroscópico
d) Deseja-se que tenha boa resistência a impactos
e) Boa resistência à radiação solar
f) Custo baixo
g) Tenha boa estabilidade dimensional
h) Seja de fácil processamento
i) Possa ser colorido facilmente

Para classificar as informações contidas na Tabela 4.26 foi adotado o mesmo critério de dividir as informações em: obrigatórios e desejáveis. Esta classificação pode ser visualizada através da Tabela 4.27.

Tabela 4.27: Classificação das informações em obrigatórios e desejáveis

OBRIGATÓRIOS
Fácil processamento
Boa estabilidade dimensional
Suporte à fluência ( <i>creep</i> )
Resistente à radiação solar
Seja pouco higroscópico
DESEJÁVEIS
Baixo custo
Suporte impacto
Seja opaco
Possa ser colorido facilmente

O passo seguinte foi o mesmo realizado no primeiro estudo de caso. A Tabela 4.28 ilustra a relação das principais classes de materiais termoplásticos com as informações contidas na Tabela 4.27 através de um grau de qualidade adequado.



Tabela 4.28: Relação entre as principais classes de materiais termoplásticos e os principais requisitos de projeto

	Processamento	Estabilidade dimensional	Resistência à fluência	Resistência à radiação solar	Higroscopia	Custo	Resistência a impactos	Transparência	Facilidade de pintura
<b>ABS</b>	Fácil	Boa	Boa	Baixa	Moderado	Moderado	Boa	Opaco	Fácil
<b>ACETAL (POM)</b>	Fácil	Boa	Boa	Baixa	Moderado	Moderado	Boa	Opaco	
<b>ACRÍLICOS</b>	Difícil	Boa		Boa	Moderado			Transparente	Fácil
<b>CELULÓSICOS</b>	Difícil	Baixa	Baixa			Baixo		Transparente	
<b>NYLON 6</b>		Baixa	Boa	Boa	Moderado	Baixo	Baixa	Opaco	Fácil
<b>NYLON 6/6</b>		Baixa	Boa	Boa	Moderado	Baixo	Baixa	Opaco	Fácil
<b>NYLON 11</b>		Baixa	Boa	Boa	Alto	Moderado	Boa	Opaco	Fácil
<b>NYLON 12</b>		Baixa	Boa	Boa	Alto	Moderado	Boa	Opaco	Fácil
<b>LDPE</b>	Fácil	Baixa	Baixa	Baixa	Baixo	Baixo	Baixa	Opaco	Fácil
<b>HDPE</b>	Fácil	Baixa	Baixa	Baixa	Baixo	Baixo	Baixa	Opaco	Fácil
<b>PC</b>	Fácil	Boa	Boa	Boa	Baixo	Moderado	Boa	Transparente	Fácil
<b>PET</b>	Fácil	Boa		Boa	Baixo	Moderado		Transparente	
<b>PP</b>	Fácil	Boa	Baixa	Baixa	Baixo	Baixo	Baixa	Opaco	Fácil
<b>PS</b>	Fácil	Boa	Boa	Baixa	Baixo	Baixo			Fácil
<b>PVC</b>	Fácil	Boa	Boa	Boa	Baixo	Baixo	Baixa	Opaco	Fácil

FONTE: BELOFSKY [31], WENDLE [32], JUVINALL e MARSHEK [64] e TANGRAM [65]

Os passos que sucederam a organização da Tabela 4.28 foi a eliminação das classes de materiais termoplástico cujo desempenho em todos os requisitos obrigatórios não foram satisfatórios. Na seqüência uma tabela relacionando os materiais eliminados com a causa da sua eliminação foi organizada (Tabela 4.29). Por fim, os materiais remanescentes foram listados. Desta forma, estes passos ficaram caracterizados como uma primeira seleção eliminatória de classes de materiais termoplástico. Os materiais remanescentes foram: Policarbonato (PC) e o Cloreto de Polivinila (PVC).

Tabela 4.29: Relação entre materiais eliminados na primeira seleção eliminatória com a causa da sua eliminação

CLASSES DE MATERIAIS	CAUSA DA ELIMINAÇÃO
<b>ABS e ACETAL (POM)</b>	Possuem baixa resistência à radiação solar
<b>ACRÍLICOS</b>	Processamento difícil e carência de informações
<b>CELULÓSICOS</b>	Baixa resistência estabilidade dimensional
<b>NYLON 6, 6/6</b>	Estabilidade dimensional baixa e alta higroscopia
<b>NYLON 11 e 12</b>	Estabilidade dimensional baixa
<b>HDPE/LDPE</b>	Baixa estabilidade dimensional e à fluência ( <i>creep</i> )
<b>PET</b>	Transparente
<b>PP</b>	Baixa resistência à fluência
<b>PS</b>	Baixa resistência à radiação solar

O passo seguinte, que ficou caracterizado como seleção de *grades*, constituiu-se em adotar um banco de dados de materiais termoplásticos e nele verificar qual das classes remanescente, listada anteriormente, seus fabricantes disponibilizaram os diagramas tensão-deformação e os diagramas de fluência de seus *grades* na temperatura de aplicação do componente e por fim, eliminar as classes de materiais cujos fabricantes não disponibilizaram os referidos diagramas no banco de dados adotado.

Mais uma vez foi adotado o banco de dados do CAMPUS 4.1<sup>®</sup> [67]. Dos materiais remanescentes da primeira seleção eliminatória apenas o PVC foi eliminado, pois nenhum de seus fabricantes disponibilizaram os diagramas referidos anteriormente, logo o material remanescente da segunda seleção eliminatória foi listado, tem-se então: Policarbonato (PC).

Da classe de material remanescente (PC) foi selecionado um *grade* no banco de dados. Esta seleção foi realizada considerando, primeiro que os materiais candidatos possuíssem os diagramas de fluência e de tensão-deformação e por último que possuíssem índice de fluidez



elevado. A Tabela 4.30 ilustra o *grade* selecionado e seu respectivo fabricante. As principais propriedades destes materiais podem ser visto na Tabela A.4 (Anexo A).

Tabela 4.30: Relação entre a classe de material, nome comercial do *grade* selecionado e seu fabricante

CLASSE	NOME COMERCIAL	FABRICANTE
<b>Policarbonato (PC)</b>	<i>Makrolon 2205</i>	BAYER AG

Adquiridos os materiais e seus diagramas, uma tabela relacionando estes materiais com sua tensão limite elástico ( $\sigma_y$ ), módulo de elasticidade aparente (módulo de fluência) ( $E_{ap}$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), densidade ( $\rho$ ) e coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ) de cada material (*grade* selecionado). O componente será projetado para suportar um carregamento estático e para resistir à fluência (*creep*), desta forma há a necessidade de se utilizar o módulo de elasticidade aparente ao invés do módulo de elasticidade extraído do diagrama-tensão deformação. A Tabela 4.31 ilustra os valores das propriedades referidas anteriormente.

Tabela 4.31: Relação entre o material e os valores das suas propriedades

MATERIAL	$\sigma_y$ (MPa)	$E_{ap}$ (MPa)	$\nu$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ ( $\times 10^{-4}$ °C)
<b><i>Makrolon 2205 (PC)</i></b>	65	881	0,37	1200	0,6

Os valores da tensão limite elástico, densidade e coeficiente de dilatação térmica foram obtidos diretamente do banco de dados, ou seja, não foi necessário consultar qualquer diagrama (ilustrados no Anexo A). Para obtenção do valor do módulo de elasticidade aparente foi necessário consultar apenas o diagrama de módulo de fluência-tempo. Antes de consultar tal diagrama foi necessário calcular uma tensão admissível utilizando a tensão limite elástico de cada material e um coeficiente de segurança adequado. A tensão admissível foi obtida dividindo-se apenas a tensão limite elástico do material pelo coeficiente de segurança. O coeficiente de segurança aplicado foi igual a quatro (Tabela 4.12), desta forma obteve-se uma tensão admissível para o *Makrolon 2205* igual a 16,25 MPa.

Com estes valores o diagrama módulo de fluência-tempo à temperatura de 60°C foi consultado da mesma forma como foi feito no primeiro estudo de caso. Tem-se assim, concluída a fase de seleção de materiais. Os dados contidos na Tabela 4.31 foram utilizados na fase seguinte, que é a de análise de resistência mecânica, descrita a seguir.

## 4.2.2.2. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

O primeiro passo realizado na análise de resistência mecânica foi a elaboração do modelo tridimensional do componente. Como o componente considerado possui geometria simples não foi necessário extrair-lhe partes que não prejudicasse a realização desta análise, como realizado no primeiro estudo de caso. Desta forma, foram realizadas, inicialmente, duas análises. A primeira utilizando o aço e a segunda utilizando o material selecionado (Tabela 4.31), a fim de comparar os resultados e propor outra geometria para o componente para torna-lo mais rígido. As duas análises, então, foram realizadas com a criação de um arquivo de transferência de dados, importação deste arquivo para o sistema CAE adotado, seleção do elemento finito mais apropriado (*Solid95*), criação da malha, informação das propriedades do material, aplicação das condições de contorno, execução da análise e avaliação dos resultados. A Figura 4.20 ilustra as deformações totais nas duas análises realizadas.

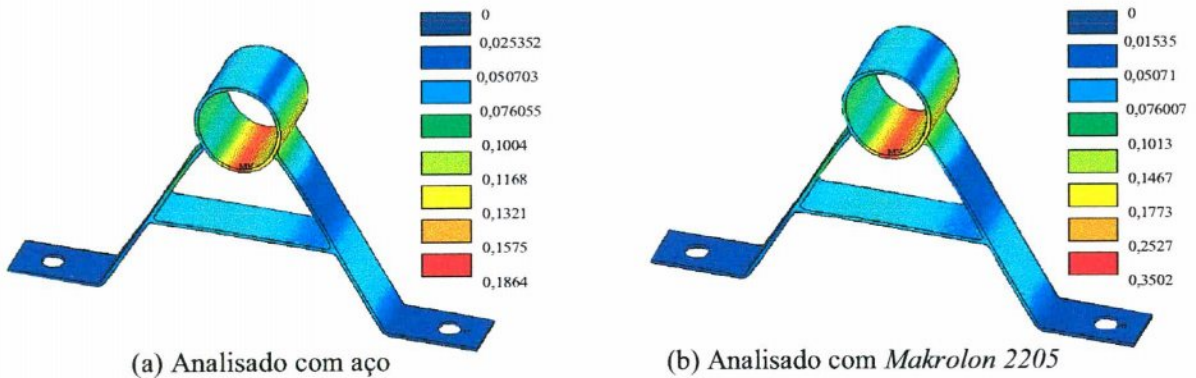


Figura 4.20: Comparação dos deslocamentos do componente utilizando o aço e o *Makrolon 2205*

Observa-se na Figura 4.20 que o componente simulado com o material *Makrolon 2205* deformou-se além do permitido (0,2 mm), logo há necessidade de alterar sua geometria, a fim de torna-lo mais rígido. O ângulo de abertura das “pernas” foi mudado de 60° para 40°, a fim de obter melhor sustentação da carga. Foi modelada também uma nervura central com 3,0 mm de espessura para agir como um reforço e para facilitar o escoamento do material no momento da sua injeção. A Figura 4.21 ilustra o componente depois de remodelado, enquanto que no Anexo H.5 pode ser visualizada suas dimensões, com maiores detalhes.

Concluído o remodelamento do componente os passos seguintes foram a criação de um arquivo de transferência de dados (IGES) e sua importação para o sistema CAE utilizado. Nenhuma informação foi perdida durante a importação.

Como a importação do modelo ocorreu sem problemas o passo seguinte foi a realização da análise de resistência mecânica, em que inicialmente um elemento finito foi selecionado.



Neste exemplo utilizou-se novamente o *Solid95*. Definido o elemento finito as propriedades do *Makrolon 2205* foram fornecidas. As propriedades utilizadas foram o módulo de elasticidade aparente ( $E_{ap}$ ), densidade ( $\rho$ ) e o coeficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ ). A densidade foi utilizada para levar em consideração o peso próprio do componente e o coeficiente de dilatação térmica para levar em consideração as deformações provenientes da diferença de temperatura. Assim que as propriedades do material foram fornecidas o passo realizado na seqüência foi a criação da malha de elementos finitos com seu respectivo refinamento. Não houve problemas na criação da malha. A Figura 4.22 ilustra a malha do componente considerado.

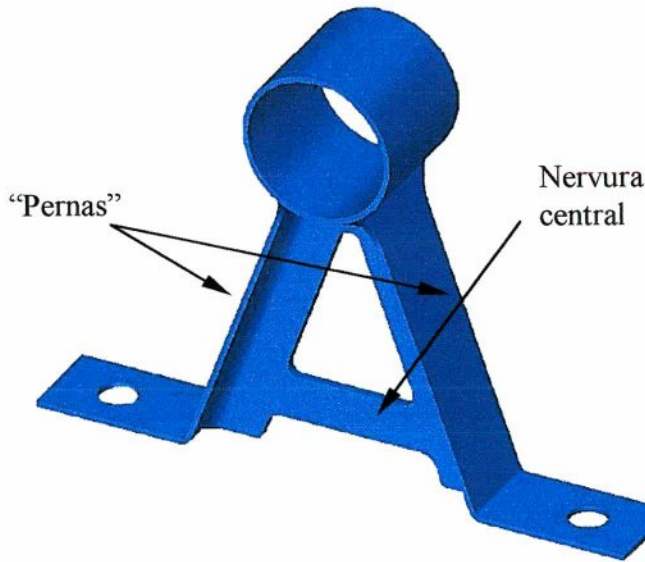


Figura 4.21: Ilustração do componente remodelado

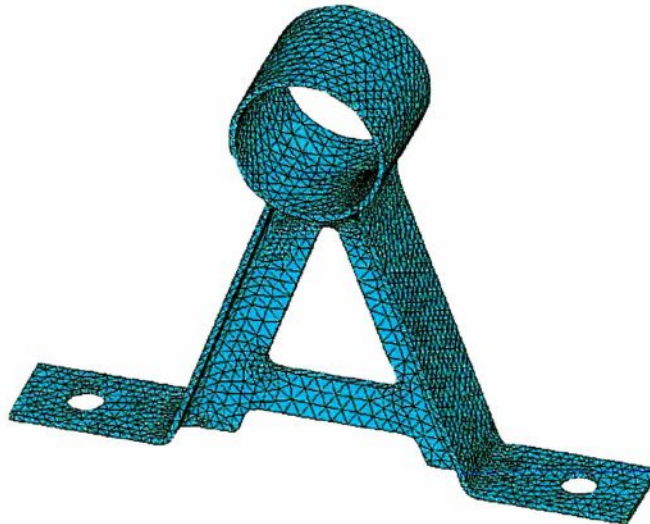


Figura 4.22: Malha de elementos finitos do componente remodelado

Depois de gerada a malha, as condições de contorno do problema foram aplicadas, ou seja, as condições de carregamento e de vinculação. A carga foi considerada como distribuída

sobre uma área, enquanto que os vínculos foram aplicados nas áreas inferiores da base e numa área interior ao furo, simulando a presença de um parafuso. A execução da simulação foi a tarefa final da análise. Inicialmente avaliou-se a deformação do componente, já que suas dimensões devem ser mantidas dentro da faixa especificada pela tolerância. Se suas dimensões não estiverem dentro do especificado não faz sentido avaliar as tensões principais, logo a avaliação das deformações é primordial. Tomou-se o cuidado de mantê-las dentro da tolerância especificada que era de 0,2 mm. O gráfico ilustrando o componente deformado pode ser visualizado na Figura 4.23.

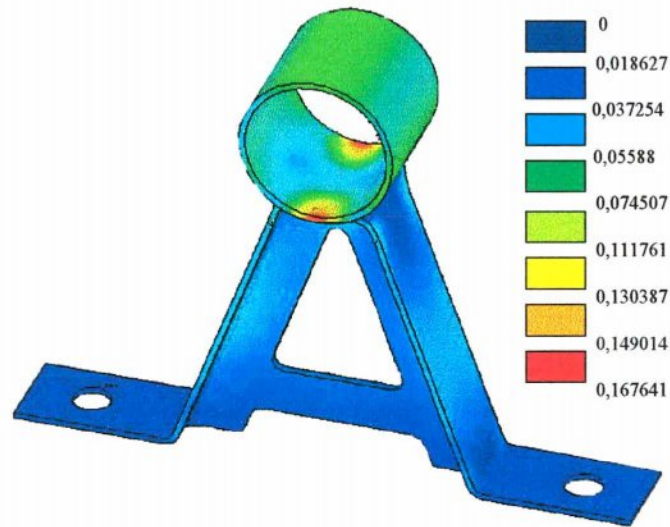


Figura 4.23: Ilustração da distribuição de deslocamentos nodais no componente

Através da Figura 4.23 percebe-se que as deformações ficaram muito abaixo do permitido (0,2 mm). Isto implicaria na possibilidade de diminuir a espessura do componente, mas optou-se por mantê-la a fim de evitar problemas relacionados à moldagem por injeção da peça, já que o componente possui uma espessura de 2,0mm. Desta forma, as tensões foram avaliadas. A Figura 4.24 ilustra a distribuição das tensões principais no componente.

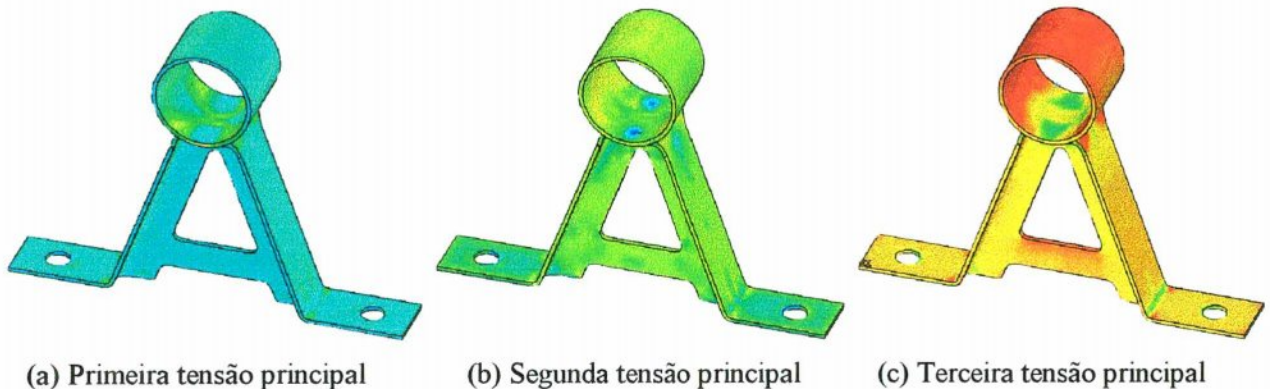


Figura 4.24: Distribuição das tensões principais no componente



A Tabela 4.32 apresenta os valores para três pontos no componente onde as tensões principais são máximas (valores em negrito). A tensão de cisalhamento máxima segundo o critério de Tresca foi determinada utilizando a Equação 4.5.

Tabela 4.32: Tensões principais máximas e tensão cisalhante máxima segundo critério de Tresca, utilizando o *Makrolon 2205*

$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\tau_{Tresca}$ (MPa)
<b>3,1271</b>	0,2162	-0,0627	1,5949
-2,4096	<b>-2,4112</b>	-2,4399	0,0152
-0,3089	-1,7947	<b>-3,8255</b>	1,7583

Utilizando um coeficiente de segurança igual a 4 (ver Tabela 4.12) e a Equação 4.6 a tensão admissível para o *Makrolon 2205*, é igual a 8,125 MPa. A maior das tensões admissíveis ilustradas na Tabela 4.32 é de aproximadamente igual 1,76 MPa e é menor do que 8,125 MPa, logo não haverá falha por escoamento, segundo o critério adotado. Tem-se então a fase de análise de resistência mecânica do componente concluída. A tarefa realizada na seqüência foi a análise reológica utilizando a geometria originada da análise de resistência mecânica.

#### 4.2.2.3. ANÁLISE REOLÓGICA

As tarefas iniciais da análise reológica para o componente considerado foram idênticas às realizadas nos estudos de caso anteriores, em que se obteve o modelo tridimensional do componente, determinou-se o número e o leiaute das cavidades, as dimensões aproximadas do molde e dos canais de refrigeração e o tipo de canal de injeção. O número de cavidade através da Equação 4.7. O número encontrado foi de 2 cavidades. O tipo de canal de injeção foi determinado a partir da análise de material que seria perdido ao se utilizar um sistema de canais frio, utilizo-se as Equações 4.8 a 4.11 para realizar esta tarefa. A mesma avaliação realizada no primeiro estudo de caso foi feita e concluiu-se que o sistema de canais quente seria mais adequado, promovendo, assim, uma economia de material.

Os passos seguintes foram a criação do arquivo de transferência de dados *STL* do componente, importação do mesmo para o *Moldflow*<sup>®</sup>, multiplicação das cavidades (duas) e a realização da análise para determinar a melhor região na qual serão posicionados os pontos de injeção. A Figura 4.25 ilustra o resultado desta análise.

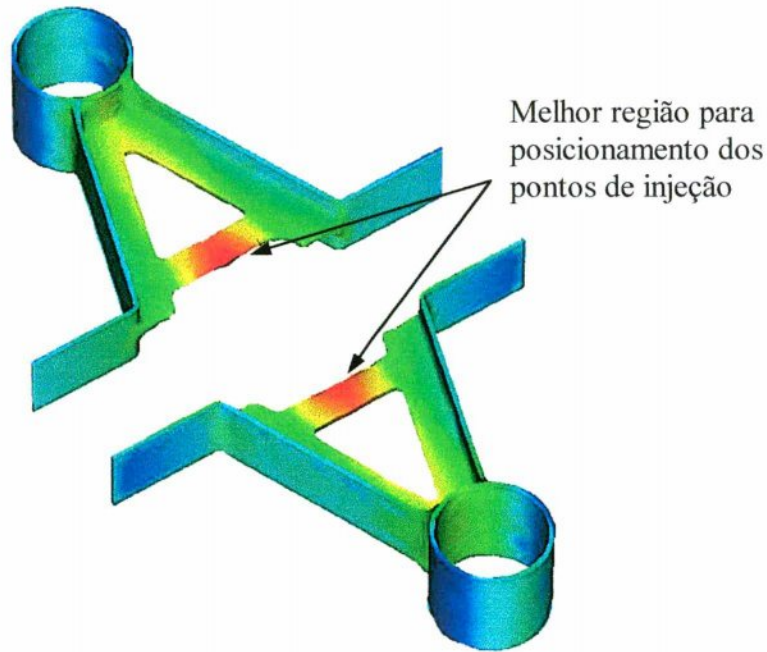
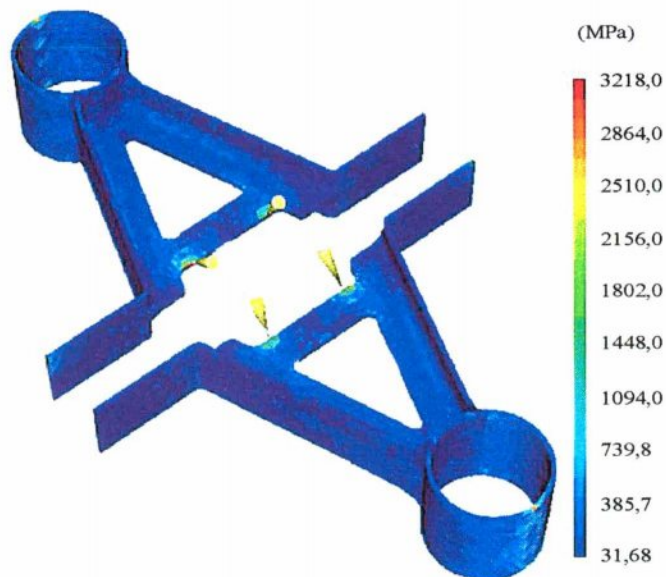


Figura 4.25: Determinação da melhor região de posicionamento dos pontos de injeção

Concluído a análise para determinar a melhor região de posicionamento dos pontos de injeção foi realizado a primeira análise de preenchimento, os passos realizados neste estudo de caso foram os mesmo dos estudos de caso anterior. As temperaturas do molde e de injeção utilizadas foram, respectivamente 120 °C e 300 °C e o tempo de injeção foi calculado utilizando a Equação 4.12, as propriedades térmicas do material e a recomendação da C-MOLD [71]. A análise foi executada e posteriormente os resultados foram verificados. Os principais gráficos observados nesta primeira análise são visualizados na Figura 4.26, enquanto que a Tabela 4.33 ilustra os valores máximos e mínimos destes gráficos.



(a) Taxa de cisalhamento

Figura 4.26: Principais gráficos observados na primeira análise de preenchimento

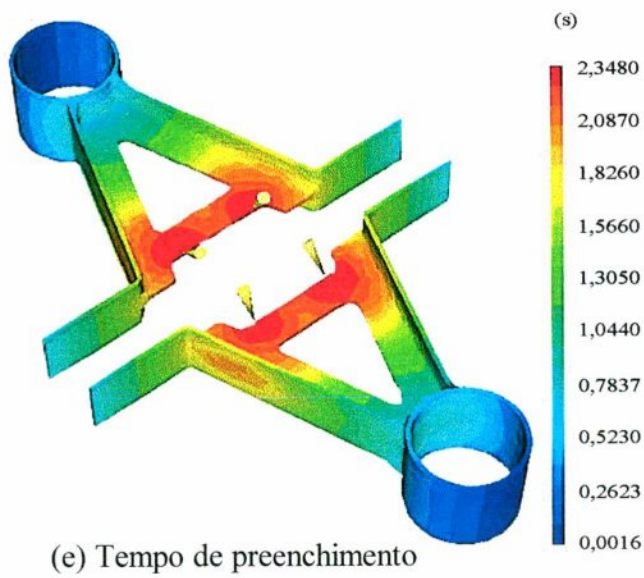
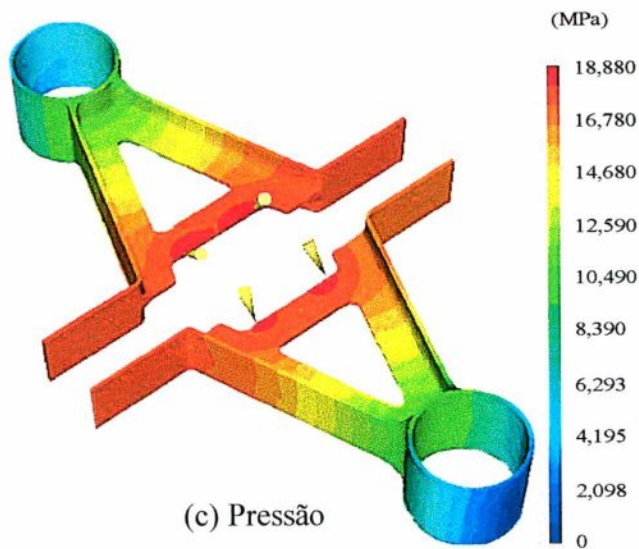
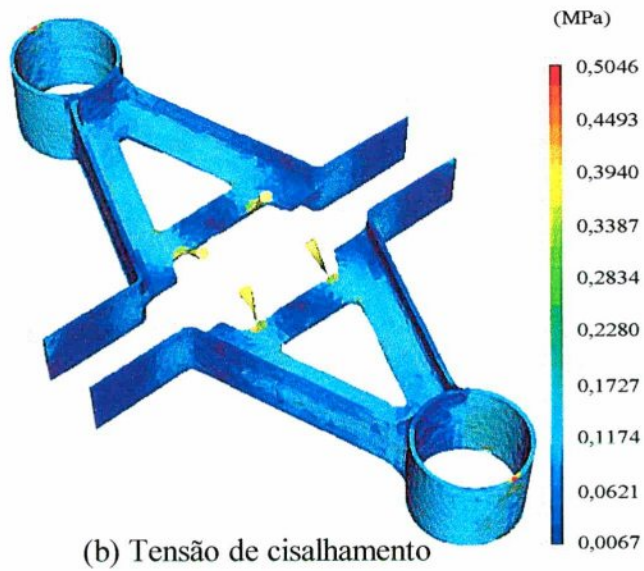


Figura 4.26: Principais gráficos observados na primeira análise de preenchimento (continuação)



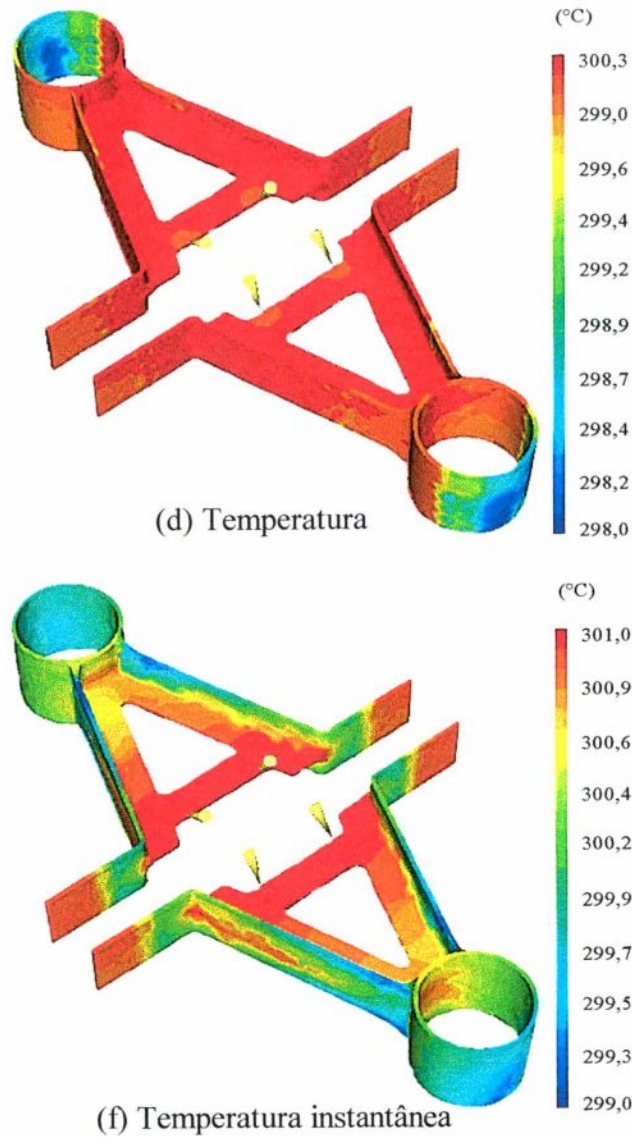


Figura 4.26: Principais gráficos observados na primeira análise de preenchimento (continuação)

Tabela 4.33: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na primeira análise de preenchimento

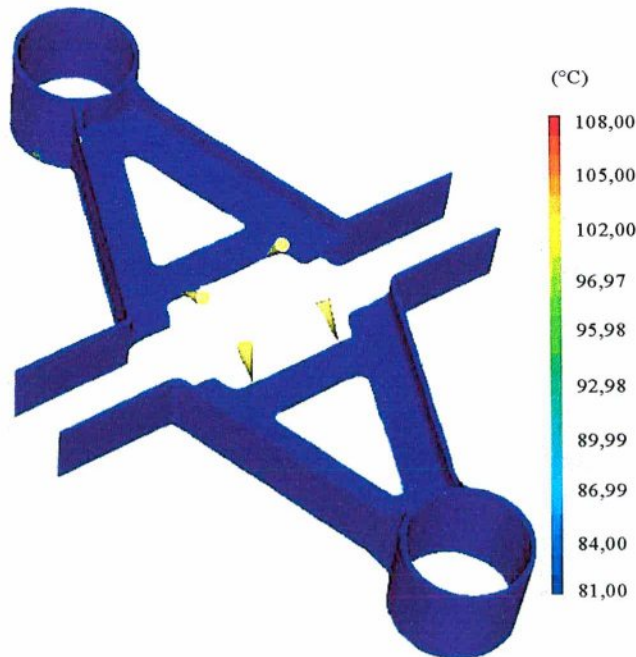
	Taxa de cisalhamento (1/s)	Tempo de preenchimento (s)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Temperatura instantânea (°C)
Máximo	3218	2,348	0,5	18,88	300,3	301
Mínimo	31,68	0,0016	0,007	0	298,0	299

Verificou-se que com o tempo de preenchimento fornecido a cavidade preenche completamente, caso contrário o gráfico de tempo de resfriamento ilustraria uma parte branca indicando que a mesma não foi preenchida. A diferença entre os valores máximos e mínimos de temperatura e da temperatura instantânea ficou dentro do intervalo recomendado pelo



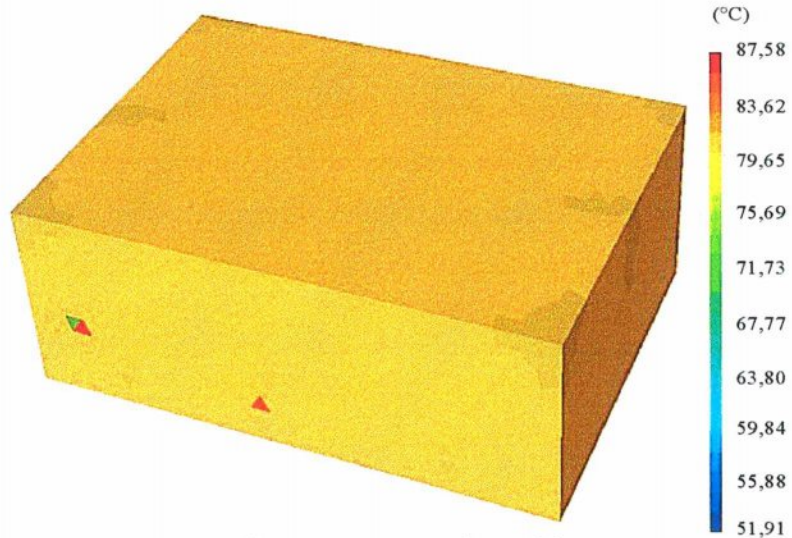
*MOLDFLOW*<sup>®</sup> [72], que é de 1°C a 3°C. A pressão necessária para preencher a cavidade foi de aproximadamente 19 MPa, menor do que a disponível pela máquina injetora considerada. A taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento sobre a peça ficaram abaixo do valor permitido para o material que é de 40000 1/s e 0,5 MPa, respectivamente. Desta forma, não corre o risco de degradação do material e conseqüente enfraquecimento da peça.

A análise realizada na seqüência foi a de refrigeração. Nesta análise determinou-se as dimensões do molde e o leiaute e as dimensões dos canais de refrigeração, assim o molde foi, então modelado. Considerando as dimensões das cavidades e a distância entre elas, foi necessário um molde 300mm x 436mm x 158mm. A partir destas dimensões pode-se especificar um molde utilizando o catálogo da POLIMOLD [50]. O molde cujas dimensões se aproxima daquelas anteriores é o da série 30.45. Suas dimensões mais detalhadas podem ser visualizadas através do Anexo H.6. Foi utilizado óleo como fluido refrigerante a 80 °C e o número de Reynolds utilizado foi de 10000. A simulação foi então executada e em seguida seus resultados foram analisados. Os principais gráficos observados na análise de refrigeração podem ser visualizados na Figura 4.42 e a Tabela 4.37 ilustra os valores máximos e mínimos destes gráficos.

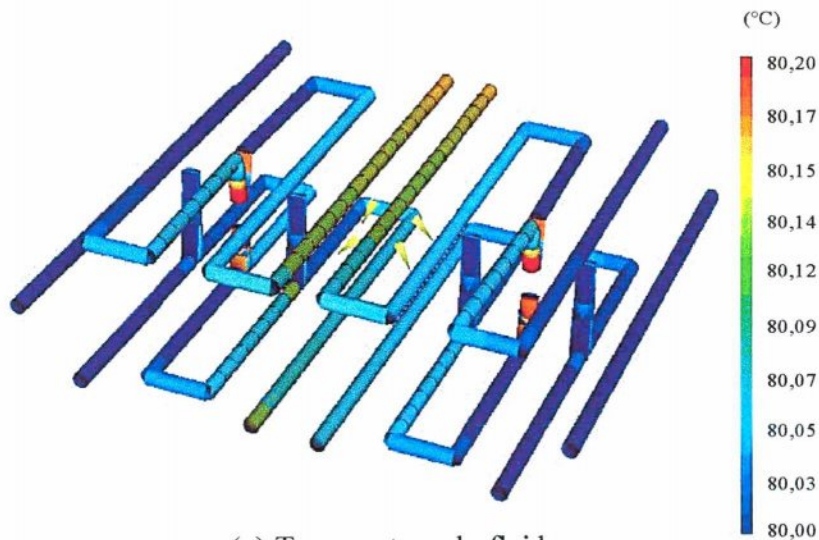


(a) Temperatura do componente

Figura 4.27: Principais gráficos observados na análise de refrigeração



(b) Temperatura do molde



(c) Temperatura do fluido

Figura 4.27: Principais gráficos observados na análise de refrigeração (continuação)

Tabela 4.34: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na análise de refrigeração

	Temperatura da peça (°C)	Temperatura do molde (°C)	Temperatura do fluido (°C)
Máximo	108	87,58	80,2
Mínimo	81	51,91	80,0

Os resultados obtidos da análise anterior foram satisfatórios, pois ficaram dentro da faixa recomendada. A temperatura do molde ficou bastante uniforme, como pode ser visto na Figura 4.27.b e a temperatura do componente no final do ciclo também ficou bastante uniforme e abaixo da sua temperatura de extração que é de 130 °C. Depois de concluído a análise de refrigeração foi a vez de realizar a segunda análise de preenchimento, a qual considera a refrigeração do molde. Os principais gráficos observados nesta análise podem ser visualizados na Figura 4.28, bem como os valores máximos e mínimos destes gráficos na Tabela 4.35.



Apenas o resultado de tensão de cisalhamento excedeu um pouco o valor recomendado pelo fabricante do material (0,5 MPa). O valor máximo apresentado ocorreu em pontos isolados no final do preenchimento, não comprometendo a qualidade da peça, já que a maior parte dela apresenta-se sob valores abaixo do recomendado. O tempo de resfriamento foi de 10,2 segundos, ou seja, um tempo razoavelmente baixo, se comparado com o tempo total de ciclo, indicando um tempo de ciclo também baixo. A taxa de cisalhamento ficou muito abaixo daquele recomendado pelo fabricante (50000 1/s), seu valor máximo foi de 3504 1/s ocorrendo em pontos isolados. A pressão necessária para preencher a cavidade foi de 23,92 MPa, abaixo do disponível pela máquina injetora considerada. As linhas de solda, que são ilustradas no gráfico de temperatura (Figura 4.28.e), ocorreram em regiões do componente cuja temperatura está acima do recomendado pelo *MOLDFLOW*<sup>®</sup> [72] (ver Tabela B.1) e que há pouca solitação. As variações de temperatura ficaram dentro do intervalo recomendado (ver Tabela B.1).

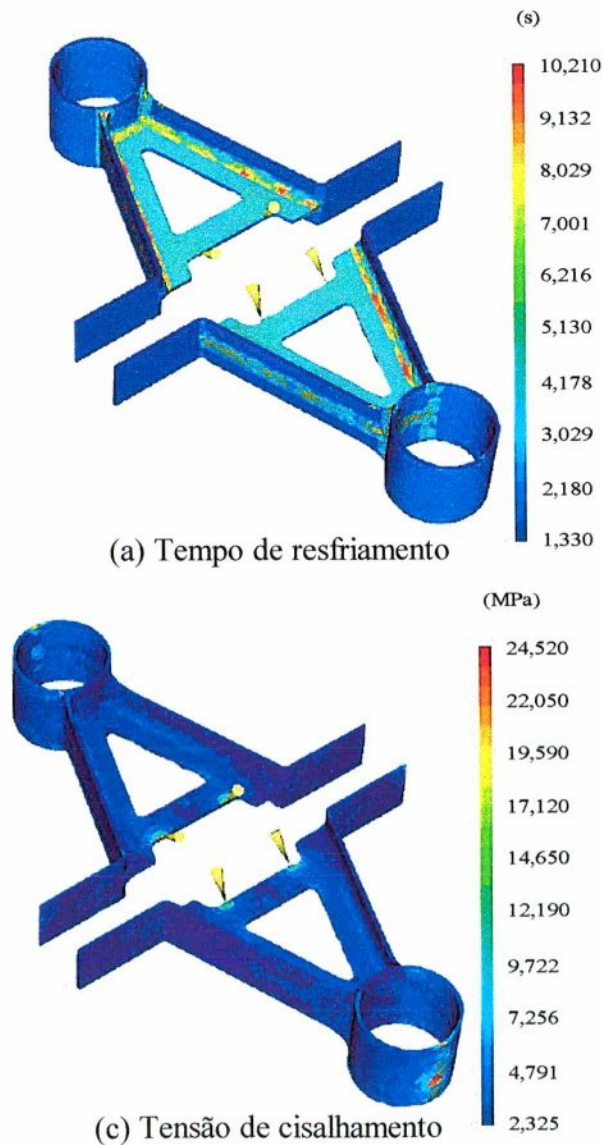


Figura 4.28: Principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento

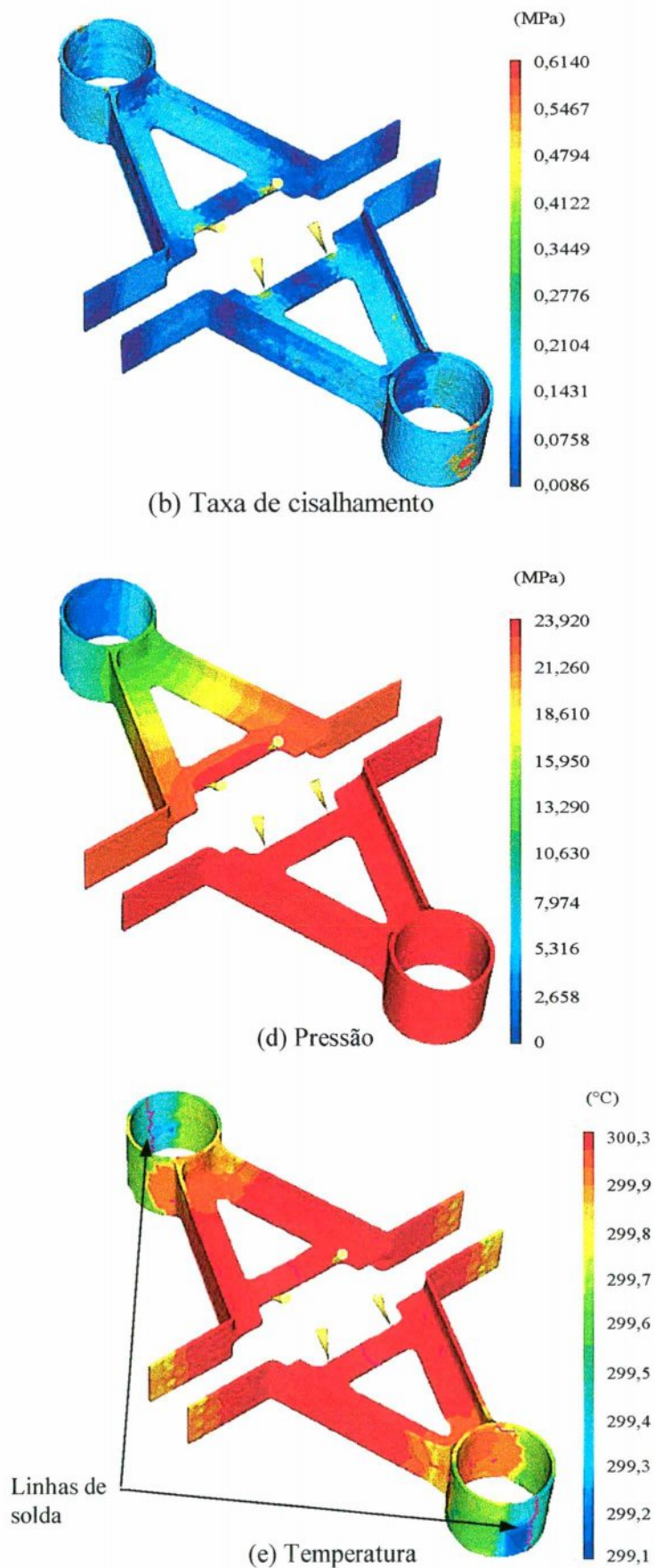


Figura 4.28: Principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento (continuação)



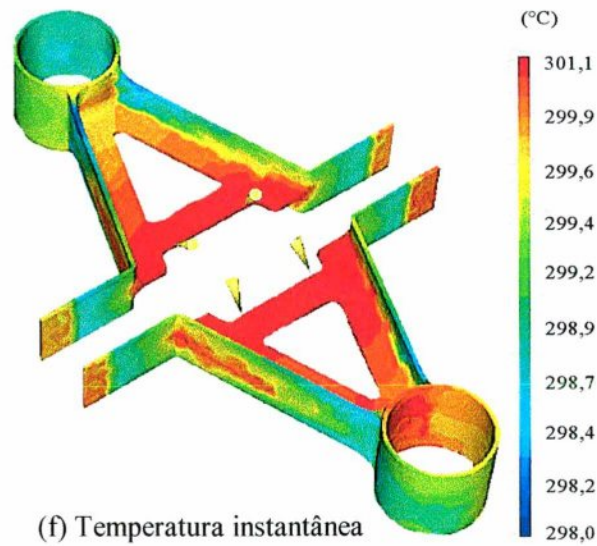


Figura 4.28: Principais gráficos observados na segunda análise de preenchimento (continuação)

Tabela 4.35: Valores máximos e mínimos dos gráficos observados na segunda análise de preenchimento

	Tempo de resfriamento (s)	Taxa de cisalhamento (1/s)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	Temperatura instantânea (°C)
Máximo	10,2	3504	0,61	23,92	300,3	301,1
Mínimo	1,33	22,55	0,008	0	299,1	298

Na seqüência foi realizada a primeira análise de recalque em que se utilizou um perfil de recalque uniforme. O tempo utilizado nesta análise foi aquele extraído do gráfico de tempo de resfriamento, ou seja, 10,2 segundos. A partir dos resultados desta análise outra foi realizada, desta vez utilizando um perfil variável de pressão. A pressão de recalque utilizada foi a máxima proveniente da análise de preenchimento, ou seja, 24 MPa e os tempos utilizados na segunda análise foram calculados segundo recomendações da função de ajuda (*help*) do *MOLDFLOW*<sup>®</sup> [72].

Duas análises de empenamento foram realizadas, uma considerando os resultados da primeira análise de recalque e a outra da segunda análise. As deflexões provenientes do sistema de refrigeração das duas análises de empenamento ficaram muito baixas, seu valor máximo foi de aproximadamente 0,03 mm em ambas. Já o empenamento proveniente da contração volumétrica apresentou valores máximos de 0,5 mm na primeira análise e 0,98 mm na segunda. Ambas mantiveram as deflexões na região do furo dentro da tolerância. A Figura 4.29 ilustra os gráficos observados na primeira análise de empenamento. Desta forma, tem-se concluída o projeto reológico do mesmo. O desenho definitivo detalhado do componente e originado desta análise pode ser visualizado no Anexo H.5.

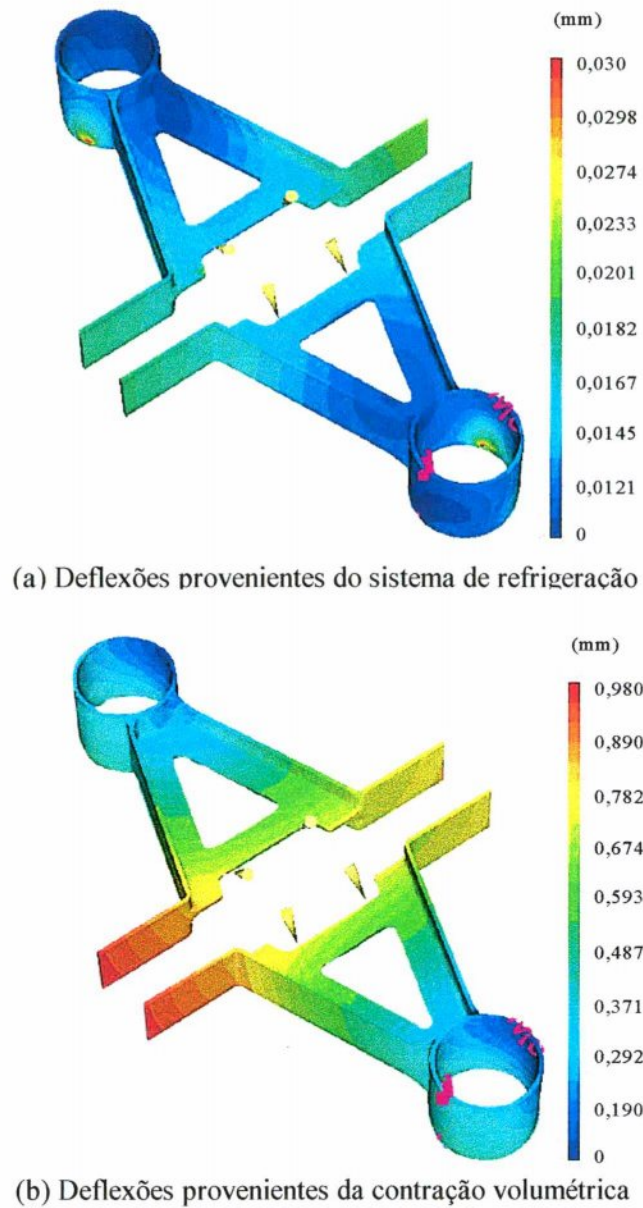


Figura 4.29: Principais gráficos observados na primeira análise de empenamento

Com os gráficos obtidos na Figura 4.29 tem-se concluído o segundo e último estudo de caso. O capítulo seqüente refere-se à apresentação da sistemática originada dos estudos de caso realizados anteriormente, em que se levou em consideração as diretrizes e decisões tomadas.

## 5. PROPOSTA DE SISTEMÁTICA

Baseado na revisão bibliográfica realizada sobre metodologias de projeto (capítulo 2), caracterização dos materiais plásticos apresentados no capítulo 3 e nos estudos de caso realizados no capítulo 4, o presente capítulo tem como principal objetivo apresentar uma proposta de detalhamento das fases de seleção de materiais ou de um conjunto restrito de materiais, análise de resistência mecânica e reológica da sistemática proposta por DARÉ [11]. Esta proposição visa contribuir para auxiliar os projetistas de componentes de plástico injetado na obtenção do leiaute dimensional de um componente plástico injetado. Com a apresentação desta proposta, pretende-se estabelecer uma referência para os responsáveis pelo planejamento e condução do projeto preliminar de um componente de plástico, principalmente àqueles envolvidos diretamente com a realização das tarefas detalhadas na proposta.

### 5.1. SELEÇÃO DE MATERIAIS OU DE UM CONJUNTO RESTRITO DE MATERIAIS

A Figura 5.1 ilustra o detalhamento proposto para a fase de seleção de materiais, a partir dos estudos de caso realizados no capítulo 4.

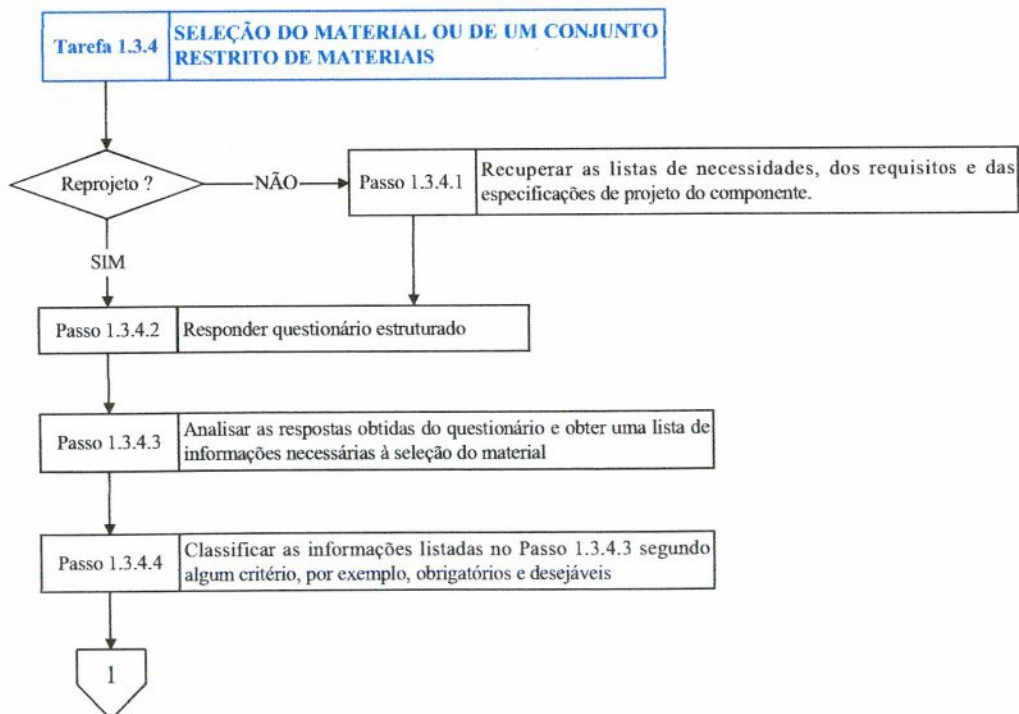


Figura 5.1: Detalhamento da fase de seleção de materiais



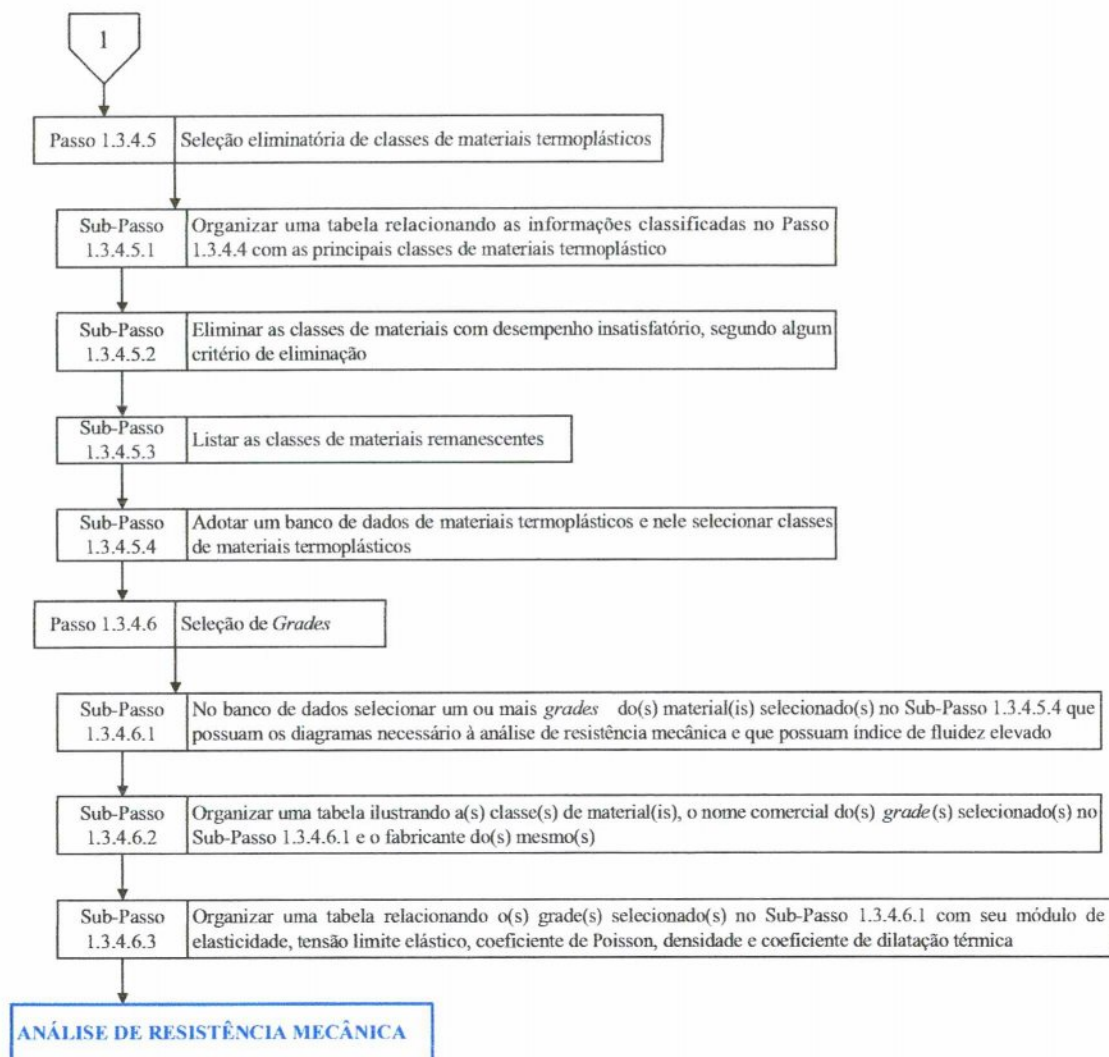


Figura 5.1: Detalhamento da fase de seleção de materiais (continuação)

Inicialmente propõe-se que seja avaliado se o componente considerado constitui-se de um reprojeto ou não, ou seja, se o mesmo já é fabricado em outro material e agora se pretende fabricá-lo em material termoplástico. Não se constituindo de um reprojeto, o projetista precisará obter todas as informações contidas nas listas relativas às necessidades, requisitos e especificações de projeto do componente (Passo 1.3.4.1), as quais foram instrumentos de trabalho em tarefas anteriores. Obtido tais listas, o passo seguinte consiste em responder um questionário estruturado (Passo 1.3.4.2), cujas respostas deverão permitir gerar uma lista de informações dedicadas para realizar uma primeira seleção de materiais. Uma sugestão das principais questões que usualmente devem compor este questionário podem ser visualizadas no Anexo D (Tabela D.1). Caso o componente se constitua de um reprojeto, as listas de informações a respeito das necessidades, requisitos e especificações, podem ou não estar disponíveis. Neste caso, o questionário estruturado deverá ser respondido (Passo 1.3.4.2) com o auxílio do



solicitante do reprojeto (cliente), a fim de que a equipe de projeto obtenha todas as informações necessárias para selecionar o material mais adequado.

As questões contidas no questionário estruturado proposto na Tabela D.1 constitui-se de uma coletânea de questões propostas por WENDLE [32], BERINS [56], ROSATO e ROSATO [49], [25], REES [33], EZRIN [62] e BRYDSON [63], a fim de obter típicas informações referentes às características do produto e, principalmente para realizar a seleção de materiais.

Tendo respondido o questionário, o projetista deverá analisar suas respostas (Passo 1.3.4.3) e criar uma lista de informações, representativas das características que o material deverá possuir para atender as necessidades de projeto e em seguida estas mesmas informações devem ser classificadas. Sugere-se como critério classificar estas informações em obrigatórias e desejáveis (Passo 1.3.4.4). Nos estudos de caso realizados no capítulo quatro este foi o critério utilizado. As obrigatórias foram aquelas informações imprescindíveis à obtenção de componentes com boa qualidade e para que o mesmo possa desempenhar suas funções satisfatoriamente durante sua vida útil sem apresentar problemas. Aquelas classificadas como desejáveis são relacionados a situações prováveis de acontecer, sem comprometer a funcionalidade do componente. Outros critérios podem ser utilizados, fica a cargo do projetista definir aquele mais adequado para sua aplicação, de acordo com sua experiência.

Após ter realizado a classificação das informações referida no Passo 1.3.4.4, propõe-se que no passo seguinte seja realizada uma seleção eliminatória das várias classes de materiais termoplástico existentes (Passo 1.3.4.5), conforme recomendado por BELOFSKY [31] e STRONG [24]. Neste passo alguns sub-passos devem ser realizados, a fim de selecionar um conjunto inicial de materiais. Inicialmente recomenda-se que seja organizada uma tabela relacionando as informações classificadas no Passo 1.3.4.4 com as principais classes de materiais termoplásticos (Sub-Passo 1.3.4.5.1), segundo experiência da equipe de projeto ou mediante coleta de informações provenientes de catálogos ou banco de dados de materiais plásticos. Neste momento, a equipe de projeto deve designar para cada relação (classes de materiais termoplásticos *versus* informações classificadas no Passo 1.3.4.4) um valor numérico ou um grau de qualidade que possa descrever a relação considerada. Exemplos de graus de qualidade que podem ser consideradas são: boa, difícil, transparente, opaco, elevado, baixo, etc. A atividade seguinte (Sub-Passo 1.3.4.5.2) é a eliminação das classes de materiais, segundo algum critério definido pelo projetista. Um critério normalmente recomendado consiste em atribuir graus de importância ou um valor numérico para cada informação listada no Passo 1.3.4.4, que facilitará a comparação e decisão entre os materiais relacionados. Nos estudos de caso do capítulo quatro foi adotado o critério de somente selecionar os materiais que atenderam todas as informações



consideradas como obrigatórias. Com base na tabela comparativa organizada no Sub-Passo 1.3.4.5.1, finalmente os materiais remanescentes são listados (Sub-Passo 1.3.4.5.3).

Na seqüência, um banco de dados de materiais termoplástico deve ser adotado (Sub-Passo 1.3.4.5.4). Geralmente, os bancos de dados de materiais termoplásticos contêm os principais fabricantes e seus respectivos materiais, fornecendo ainda as principais propriedades e diagramas dos mesmos. O projetista, então, verificará para quais das classes de materiais listadas no Sub-Passo 1.3.4.5.3 o banco de dados disponibiliza *grades* com os diagramas tensão-deformação, módulo secante e os diagramas de fluência. Posteriormente, são eliminadas aquelas classes que não atenderam ao Sub-Passo 1.3.4.5.4 e os remanescentes listados. A Tabela 5.1 ilustra as principais fontes que podem ser utilizadas para obter propriedades de materiais plásticos. Ao final do Passo 1.3.4.5 tem-se uma primeira aproximação em direção à seleção da(s) melhor(es) classe(s) de material(is), na forma de um conjunto inicial de materiais termoplásticos.

Tabela 5.1: Lista de alguns bancos de dados de materiais plásticos [15]

EMPRESA	BANCO DE DADOS	MATERIAIS
<i>ASM International</i>	Mat.DB	Mais de 8.000 materiais plásticos e outros materiais.
<i>BASF Corp.</i>	CAMPUS	Materiais da <i>BASF</i>
<i>D.A.T.A. Business Publishing</i>	Banco de dados D.A.T.A	Mais de 10.000 materiais termoplásticos, termofixos e elastômeros
<i>Dow Plastics</i>	<i>591 Ways to Succeed</i>	Materiais da <i>Dow</i>
<i>GE Plastics</i>	<i>Engineering Design Database (EDD)</i>	Materiais termoplásticos da <i>GE</i>
<i>Hoescht Celanese Corp.</i>	<i>Fast Focus</i>	Materiais da <i>Hoescht</i>
<i>IDES, Inc.</i>	<i>Prospector</i>	Mais de 10.000 materiais termoplásticos, termofixos e elastômeros
<i>Information Indexing, Inc.</i>	<i>CenBase Materials</i>	Mais de 10.000 materiais plásticos e outros.
<i>LNP Engineering</i>	<i>EPOS</i>	Materiais Produzidos pela <i>LNP</i>
<i>McGraw Hill Inc. / Polydata</i>	<i>DataPlas</i>	7.000 materiais termoplásticos
<i>Miles</i>	CAMPUS	Materiais da <i>Miles</i>
<i>Plaspec</i>	<i>Plaspec</i>	Mais de 10.000 materiais termoplásticos, termofixos e elastômeros
<i>Plastic Design Library</i>	<i>Chemical Compatibility and ESCR</i>	Mais de 60 classes de materiais plásticos.
<i>Prime Alliance</i>	<i>Prime Alliance Database</i>	Mais de 700 materiais da: <i>BASF, Miles, Mobil, Monsanto, etc.</i>
<i>Rapra Technology Ltd.</i>	<i>Plascams</i>	Contém materiais genéricos

Os materiais remanescentes da primeira seleção eliminatória passarão por uma outra seleção, em que serão selecionados alguns *grades* das classes dos materiais remanescentes (Passo 1.3.4.6), a qual é realizada mediante três sub-passos.

No banco de dados adotado no Sub-Passo 1.3.4.5.4, um ou mais *grades* da(s) classe(s) listada(s) no mesmo sub-passo deve(m) ser selecionado(s), constituindo-se assim no Sub-Passo 1.3.4.6.1. Deve-se selecionar aqueles que possuam os diagramas necessários à análise de resistência mecânica do componente na temperatura de aplicação do mesmo e que possuam índice de fluidez elevado, a fim de facilitar a injeção do material na cavidade. Os diagramas mais utilizados são: diagramas de fluência, diagrama de módulo secante (ver item 3.1.1.1) e o diagrama tensão-deformação. Em seguida, recomenda-se organizar uma tabela ilustrando as classes de materiais, fabricante e o nome comercial dos materiais selecionados no Sub-Passo 1.3.4.6.1 (Sub-Passo 1.3.4.6.2). Finalmente, a seleção de materiais é concluída com a organização de outra tabela em que são relacionados os materiais selecionados no Passo 1.3.4.6.1 com seu módulo de elasticidade (aparente ou inicial, ver item 3.1.1.1), tensão limite elástico, coeficiente de Poisson, densidade e coeficiente de dilatação térmica e outras propriedades que sejam necessárias, como por exemplo coeficiente de atrito (Sub-Passo 1.3.4.6.3).

No caso de um componente sob carregamento de longa duração o módulo de elasticidade a ser ilustrado na tabela é o módulo de fluência no tempo relativo ao de vida útil do componente e é extraído diretamente do diagrama módulo de fluência-tempo. No caso de carregamento de baixa duração utiliza-se o módulo de elasticidade inicial, extraído do diagrama tensão-deformação (ver item 3.1.1.1). Para carregamentos de baixa duração, mas que possuam grandes deformações, o módulo de elasticidade utilizado será o módulo secante, extraído do diagrama de módulo secante (ver item 3.1.1.1). Geralmente, no próprio banco de dados o fabricante já fornece diretamente a tensão limite elástico do material. Caso não esteja fornecido diretamente a mesma pode ser obtida através do diagrama tensão-deformação segundo as recomendações descritas no item 3.1.1.1 e na Figura 3.2. A densidade e o coeficiente de dilatação térmica são fornecidos diretamente pelo fabricante no banco de dados.

Os dados referentes às propriedades dos materiais e contidos na tabela construída no Passo 1.3.4.6.3 serão utilizados na atividade seguinte, que é a de análise de resistência mecânica do componente, a qual será discutida no próximo item.

## 5.2. ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

A Figura 5.2 ilustra o detalhamento proposto para a fase de análise de resistência mecânica, a partir dos estudos de caso realizados no capítulo 4.



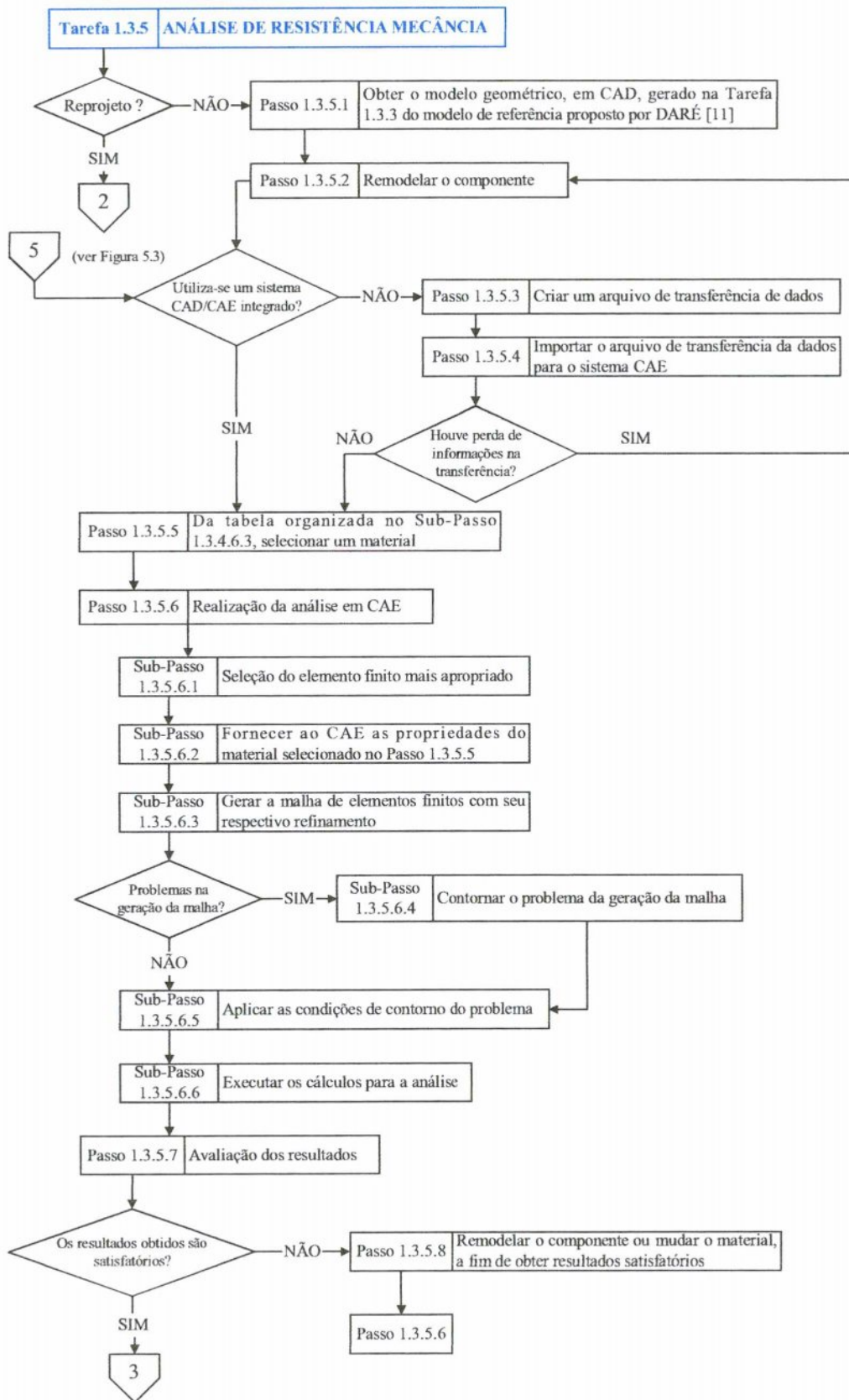


Figura 5.2: Detalhamento da fase de resistência mecânica



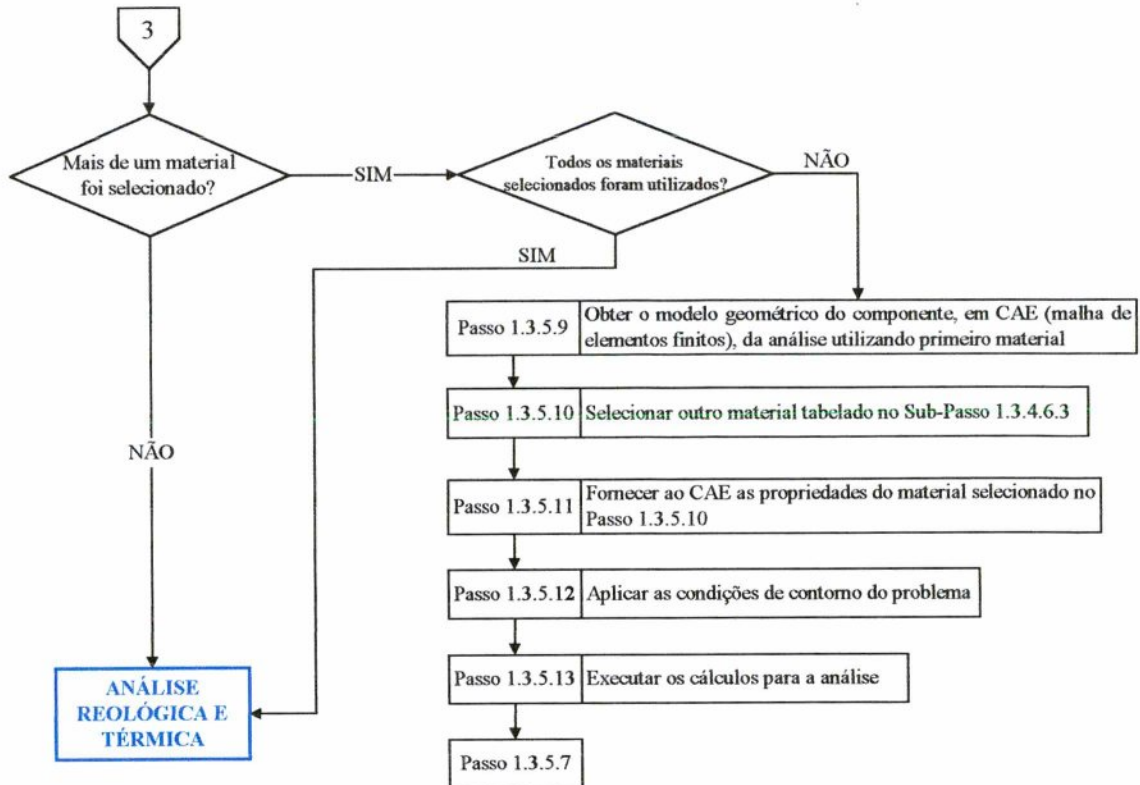


Figura 5.2: Detalhamento da fase de resistência mecânica (continuação)

Segundo a proposta de sistemática apresentada neste trabalho, a análise de resistência mecânica do componente inicia-se avaliando se o componente considerado constitui-se de um reprojeto ou não. O caso de um reprojeto será discutido mais detalhadamente posteriormente. Se não se constituir de um reprojeto, o projetista deve obter o modelo tridimensional que foi gerado na Tarefa 1.3.3 da metodologia proposta por DARÉ [11] (Passo 1.3.5.1). Este último modelo deverá passar por um remodelamento, em que será aplicada uma espessura inicial determinada pelo projetista e será desconsiderado partes do componente que tenham pouco ou nenhum efeito sobre a sua resistência mecânica (Passo 1.3.5.2). Sugere-se a extração destas partes para que os eventuais problemas referentes à importação do modelo tridimensional para o sistema CAE e à criação da malha de elementos finitos sejam minimizados. Sugere-se considerar a simetria do componente, caso o mesmo possa ser dividido através de um plano de simetria. Desta forma, o tempo computacional gasto para executar os cálculos da análise é reduzido. Isto foi considerado na realização do primeiro estudo de caso apresentado no capítulo 4.

Se a análise de resistência mecânica for realizada num sistema CAE que seja integrado ao CAD utilizado para elaborar o modelo tridimensional, então assim que o modelo já estiver sido estabelecido o projetista pode realizar a análise propriamente dita. Caso não se esteja utilizando um sistema integrado CAD/CAE, é necessário criar um arquivo de transferência de dados (Passo 1.3.5.3) - IGES, STL, PARASOLID, etc. - para importar o modelo tridimensional

(Passo 1.3.5.4) oriundo do Passo 1.3.5.2. Ao se realizar a importação do arquivo de transferência de dados, erros na forma de perda da geometria do modelo são propícias de acontecer. Geralmente, remodela-se o componente extraindo-lhes algumas partes e novamente processa-se a importação. Em um sistema integrado CAD/CAE, esta possibilidade não existe constituindo-se então uma grande vantagem sobre os sistemas não integrados.

Obtido sucesso na importação do modelo, a análise pode ser realizada, iniciando com a seleção de um daqueles materiais tabelados no Sub-Passo 1.3.4.6.3 (Passo 1.3.5.5) e finalmente realizando a análise de resistência mecânica propriamente dita (Passo 1.3.5.6). Neste passo, inicialmente, são selecionados os elementos finitos mais apropriados (Sub-Passo 1.3.5.6.1), em seguida as propriedades do material selecionado no Passo 1.3.5.5 é fornecido ao sistema CAE utilizado (Sub-Passo 1.3.5.6.2), a malha de elementos finitos é criada (Sub-Passo 1.3.5.6.3), as condições de contorno são aplicadas (Sub-Passo 1.3.5.6.4) e finalmente os cálculos para a análise são executados (Sub-Passo 1.3.5.6.6). Geralmente acontecem problemas na geração da malha de elementos finitos, como superposição de elementos, razão de aspecto muito elevado, etc. Se algum problema acontecer o projetista deverá contorná-lo (Sub-Passo 1.3.5.6.4), por exemplo apagando elementos superpostos ou refinando mais a malha.

A seleção do elemento finito deve ser realizada considerando a geometria do componente e o tipo de análise a ser realizada (linear, não-linear, elastoplástica, etc.). É necessário também que o projetista possua um certo conhecimento a respeito deste método matemático, a fim de poder selecionar o elemento mais adequado. A seleção do material pode ser realizada segundo algum critério e dependerá da experiência do projetista. Um critério que foi utilizado nos estudos de caso foi considerar primeiro o de menor módulo de elasticidade, pois as deformações e tensões obtidas com os outros cujo módulo de elasticidade é maior do que o primeiro utilizando a mesma geometria será menor, logo menores espessuras podem ser utilizadas. O refinamento da malha também requer uma certa experiência. O projetista deve avaliar a geometria do componente e verificar possíveis pontos de concentração de tensões e nestas regiões aumentar mais o refinamento da malha. Problemas na geração da malha também podem ocorrer. Neste caso uma solução é a redução do grau de refinamento ou remodelamento do componente, em que lhe é extraído partes sem efeito estrutural. As condições de contorno são outra parte muito importante da análise, as mesmas devem representar fielmente as condições de vinculação e de carregamento a que o componente estará submetido.

Assim que os cálculos de resistência mecânica tiverem sido realizados (Sub-Passo 1.3.5.6.6), o passo seguinte refere-se à avaliação dos resultados (Passo 1.3.5.7). Neste caso, o projetista avaliará as tensões e as deformações apresentadas. As deformações são avaliadas



levando em consideração as tolerâncias dimensionais que o componente deve manter quando submetido aos esforços mecânicos. Quanto às tensões provenientes destes esforços são avaliados segundo algum critério de resistência adotado. Para realizar a avaliação das tensões principais, sugere-se que o projetista siga as seguintes atividades:

- a) Selecionar um critério de resistência de projeto;
- b) Adotar um coeficiente de segurança e calcular uma tensão admissível determinada pelo critério adotado;
- c) Organizar uma tabela ilustrando os pontos de tensões principais máximas e a tensão do critério em cada ponto e;
- d) Comparar o maior valor das tensões do critério tabelado em (c) com o valor da tensão calculada em (b)

Se a tensão calculada na atividade (b) for menor do que a máxima determinada na atividade (c) haverá a possibilidade de falha do componente, logo o projetista pode optar por reforçar o componente ou mudar o material utilizado. Recomenda-se que o projetista avalie as possibilidades (Passo 1.3.5.8), pois há casos em que apenas a mudança de material não resolve o problema. Um exemplo disto é a realização de uma análise linear, em que as tensões não dependem do material utilizado, apenas da geometria do componente. Neste caso, o mais recomendado seria mudar a geometria do componente, reforçando-o. Recomendações a respeito de utilização de elementos estruturais, utilizados como elementos de reforço em um componente de plástico, a respeito dos critérios de resistência de projeto recomendadas para o projeto de componentes de plástico, coeficientes de segurança a serem utilizados e a respeito de projeto de componentes sob carregamentos dinâmicos são apresentados nos Anexos E, F e G.

Caso a rigidez de um componente plástico necessite ser modificada o projetista pode alterar a espessura do componente ou incluindo elementos estruturais, como nervuras, estrutura corrugada e sulcada em “V” e suportes laterais (*Gussets*), em que se mantém a espessura do componente (ver Anexo E). Havendo o remodelamento do componente ou mudança do material nova análise deve ser realizada (Passo 1.3.5.6).

Verificado que os resultados obtidos foram satisfatórios, tem-se então concluída a análise estrutural do componente. Caso mais de um material tenha sido selecionado no Sub-Passo 1.3.4.6.1, nova análise estrutural deve ser realizada, em que, inicialmente é considerado o modelo geométrico criado no sistema CAE referente à primeira análise (Passo 1.3.5.9). Desta forma não é necessário importar novamente o modelo. Outro material tabelado no Sub-Passo 1.3.4.6.3 é selecionado (Passo 1.3.5.10), suas propriedades são fornecidas ao sistema CAE

utilizado (Passo 1.3.5.11), os cálculos para a análise são executados (Passo 1.3.5.13) e posteriormente os resultados são avaliados da mesma forma como foi descrito anteriormente (Passo 1.3.5.7). Deve-se realizar a análise estrutural com todos os materiais tabelados no Sub-Passo 1.3.4.6.3.

No caso de um reprojeito, o detalhamento a ser seguido é basicamente similar àquele ilustrado na Figura 5.2. A Figura 5.3 ilustra o detalhamento considerando um reprojeito de um componente.

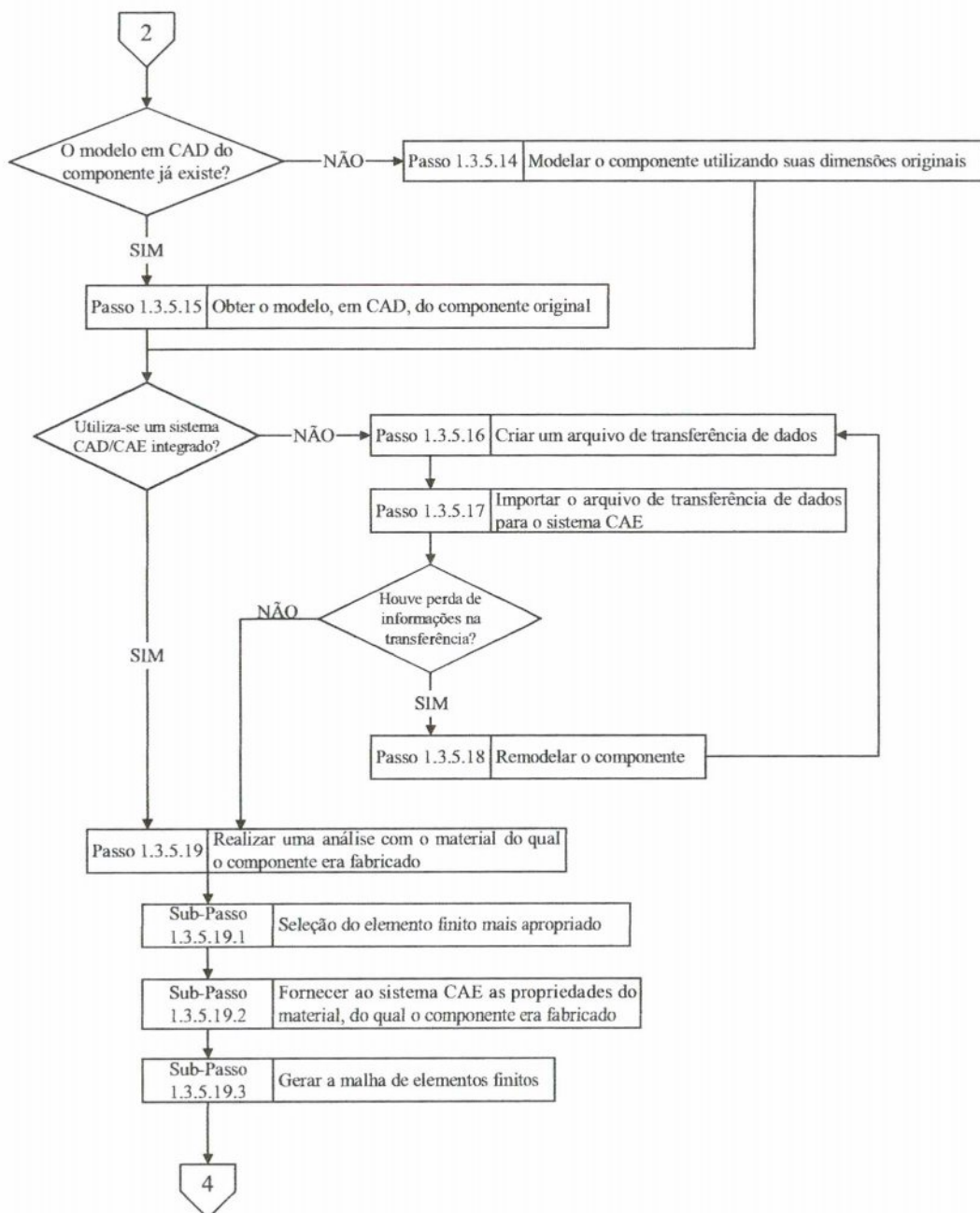


Figura 5.3: Detalhamento da fase de análise de resistência para o reprojeito de um componente de plástico



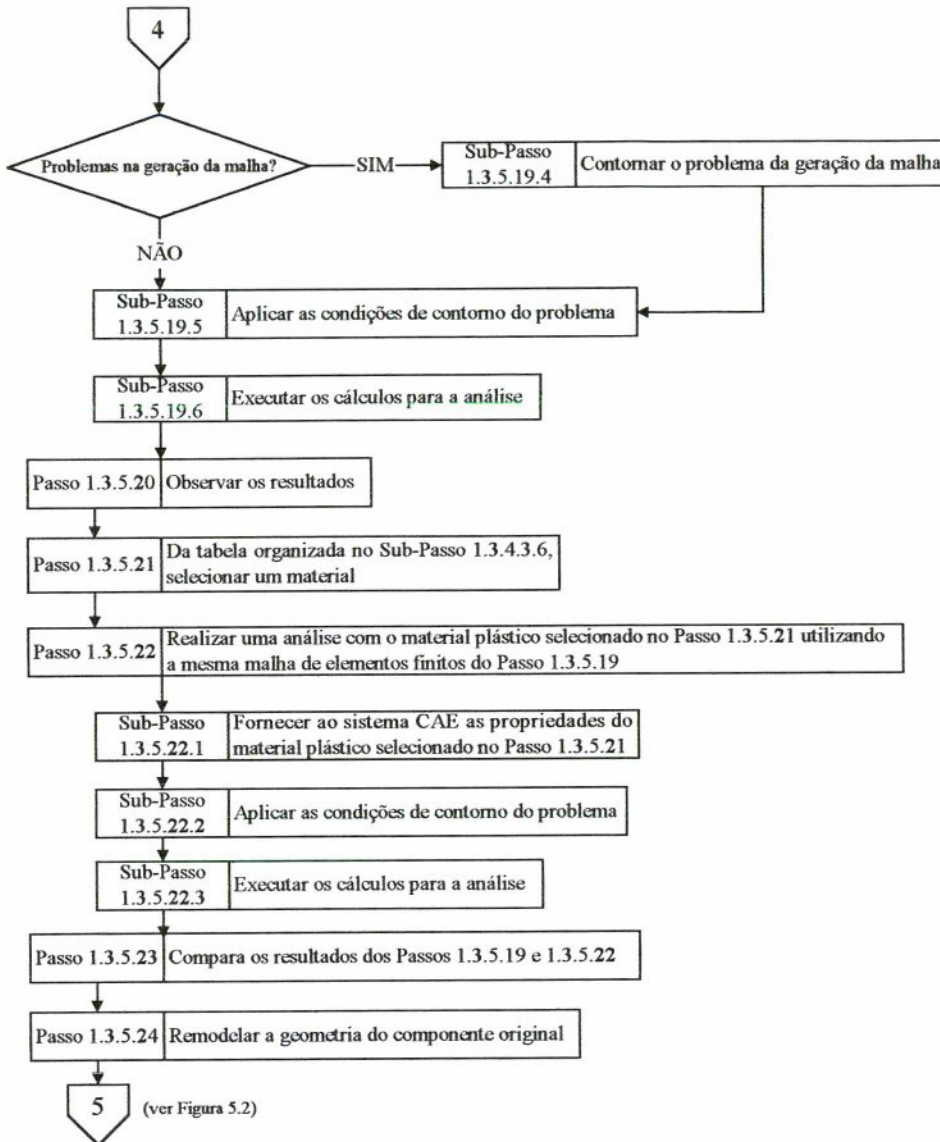


Figura 5.3: Detalhamento da fase de análise de resistência para o reprojeito de um componente de plástico (continuação)

Para iniciar o reprojeito de um componente que era fabricado em outro material, que não termoplástico, inicia com a informação se já existe ou não o modelo geométrico, em CAD, do componente com suas dimensões originais. Se este modelo já existe, então o projetista deve obtê-lo (Passo 1.3.5.15) e posteriormente processar a transferência do mesmo, caso os sistemas CAD e CAE não sejam integrados, para o sistema CAE adotado através da utilização de algum arquivo de transferência de dados, verificando se houve alguma perda de informações referentes à geometria do componente (Passos 1.3.5.16, 1.3.5.17 e 1.3.5.18). Caso o modelo geométrico do componente com suas dimensões originais não exista, então há a necessidade de criá-lo (Passo 1.3.5.14) e transferi-lo para o sistema CAE através de algum arquivo de transferência de dados, como ilustra os Passos 1.3.5.16, 1.3.5.17 e 1.3.5.18, verificando se houve perda de informações referente à sua geometria.

Havendo realizado a transferência do modelo geométrico do componente para o sistema CAE adotado, a proposta de sistemática recomenda que o projetista realize uma análise de resistência mecânica utilizando o material do qual o componente era fabricado anteriormente (Passo 1.3.5.19). Para realizar este passo alguns sub-passos devem ser realizados. Primeiramente, deve-se selecionar o elemento finito mais apropriado (Sub-Passo 1.3.5.19.1), segundo recomendações feitas anteriormente. Na seqüência, a propriedade do material é fornecida ao sistema CAE (Sub-Passo 1.3.5.19.2) e a malha de elementos finitos é gerada (Sub-Passo 1.3.5.19.3). Se for verificado algum problema na geração da malha, que comprometa os resultados, então o projetista deve procurar contornar estes problemas (Sub-Passo 1.3.5.19.4). Na seqüência as condições de contorno do problema são aplicadas (Sub-Passo 1.3.5.19.5), os cálculos são executados (Sub-Passo 1.3.5.19.6) e os resultados são observados (Passo 1.3.5.20).

Em seguida a proposta de sistemática (Figura 5.3) recomenda que uma análise de resistência mecânica com um dos materiais plásticos tabelados no Sub-Passo 1.3.4.6.3 seja realizada. O modelo geométrico do componente utilizado nesta análise é aquele modelado no Passo 1.3.5.14 ou aquele obtido no Passo 1.3.5.15. Para isto, é necessário que um material plástico seja selecionado (Passo 1.3.5.21). Para se realizar esta seleção algum critério deve ser seguido pelo projetista. Um critério que pode ser utilizado é o de se considerar, inicialmente, o material com maior ou menor elasticidade, a depender do tipo de análise a ser realizada. Este critério foi utilizado no primeiro estudo de caso do capítulo 4. A seleção de algum critério é realizada em função da experiência do projetista.

Como o modelo geométrico a ser utilizado é o mesmo da análise anterior, em que se utilizou o material original do qual o componente era fabricado, então, segundo o Sub-Passo 1.3.5.19.3 a malha de elementos finitos do mesmo já foi gerada. Desta forma, não há mais a necessidade de transferi-lo para o sistema CAE através dos arquivos de transferência de dados, pois esta malha pode ser aproveitada, como propõe o Passo 1.3.5.22. Assim, o projetista deve apenas fornecer as propriedades do material selecionado no Passo 1.3.5.21, ao sistema CAE (Sub-Passo 1.3.5.22.1), aplicar as condições de contorno do problema (Sub-Passo 1.3.5.22.2) e em seguida executar os cálculos (Sub-Passo 1.3.5.22.3). Assim que os cálculos tiverem sido concluídos os resultados dos Passos 1.3.5.19 e 1.3.5.22 são comparados (Passo 1.3.5.23). Esta comparação deve ser realizada para que o projetista tenha um ponto de referência de como o componente utilizando material plástico se comporta em relação ao material original, para então propor um remodelamento sobre a geometria original do componente a fim de que o mesmo suporte os carregamentos mantendo as tolerâncias dimensionais e a segurança. Isto é determinado pelo Passo 1.3.5.24.



Com o componente possuindo uma nova geometria a sistemática apresentada na Figura 5.3 propõe que se realize agora os passos ilustrados na Figura 5.2. Começando com a importação do modelo geométrico para o sistema CAE, caso este não seja integrado ao sistema CAD utilizado no modelamento.

Agora todos os materiais plásticos selecionados e tabelados no Sub-Passo 1.3.4.6.3 serão utilizados. Ao final da análise estrutural com todos os materiais tem-se então algumas combinações, que se compõe da geometria do componente mais o material utilizado. O número de combinações será proporcional ao número de materiais tabelados no Sub-Passo 1.3.4.6.3. A tarefa a ser realizada na seqüência é a análise reológica do componente, a qual é apresentada no item seguinte.

### 5.3. ANÁLISE REOLÓGICA E TÉRMICA

A seqüência de realização das análises de preenchimento, refrigeração, novo preenchimento, recalque, novo recalque e empenamento foram determinada pela filosofia de análise proposta pelo *Moldflow*<sup>®</sup>, em que se segue a seqüência do ciclo de injeção do componente e os resultados de uma das análises realizadas são utilizados na análise subsequente. A Figura 5.4 ilustra o detalhamento proposto para a fase de análise reológica e térmica de um componente de plástico. Esta tarefa é denominada de reológica e térmica porque se realiza análise de preenchimento de cavidade, em que se verifica o comportamento do material durante a sua injeção na cavidade e porque se verifica a eficiência da troca de calor do material plástico fundido com o sistema de refrigeração do molde.

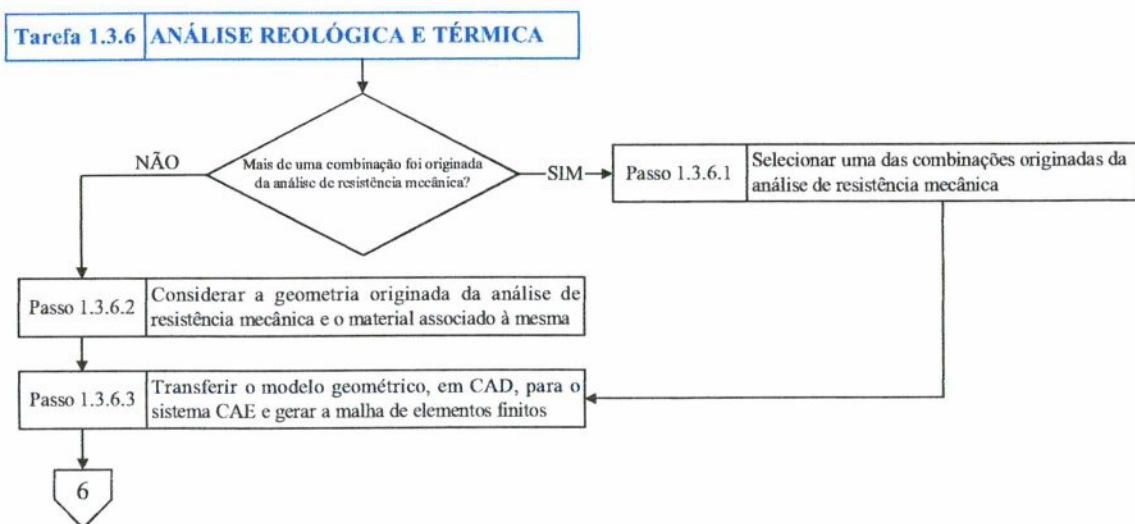


Figura 5.4: Detalhamento da fase de análise reológica

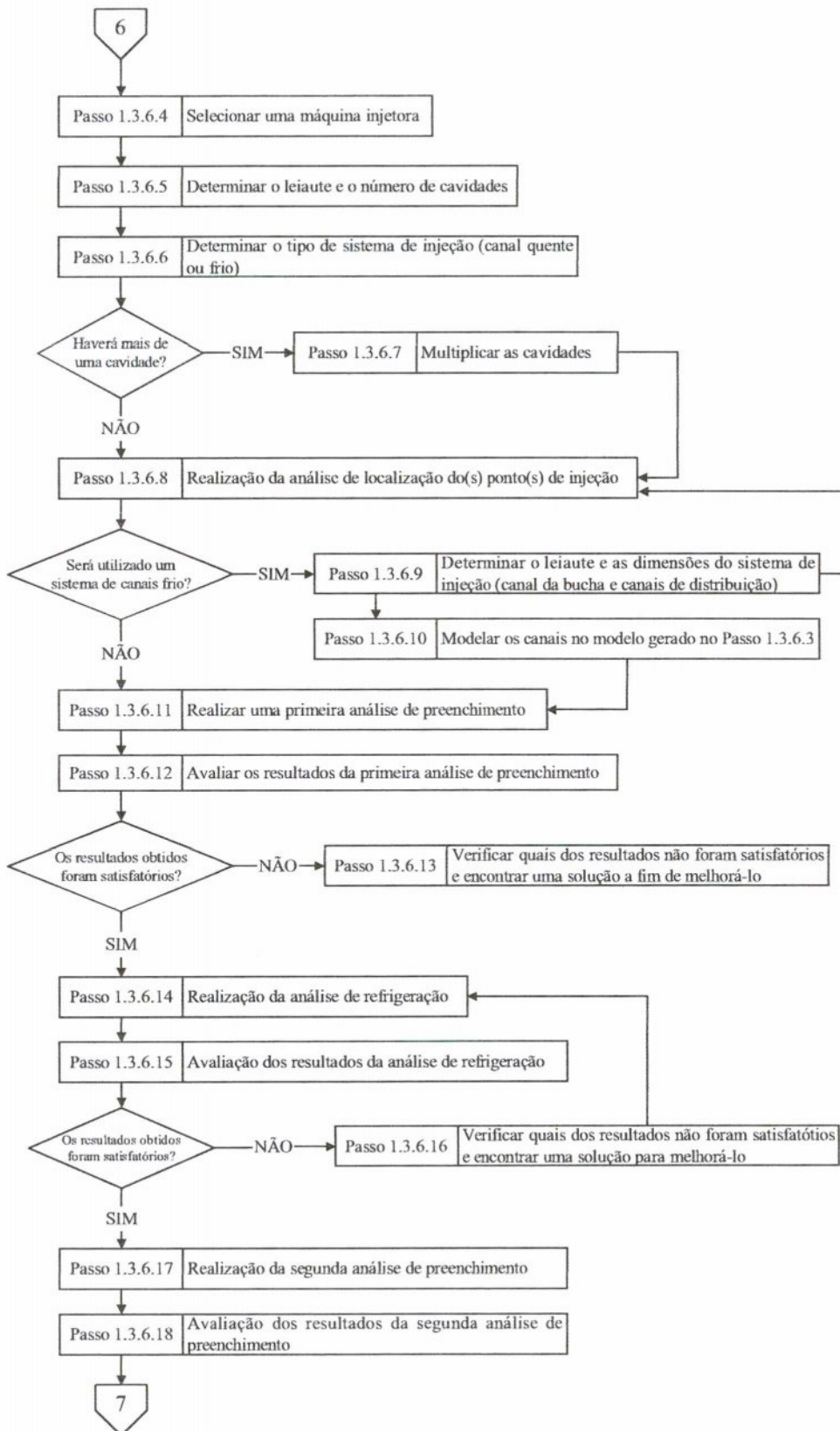


Figura 5.4: Detalhamento da fase de análise reológica (continuação)



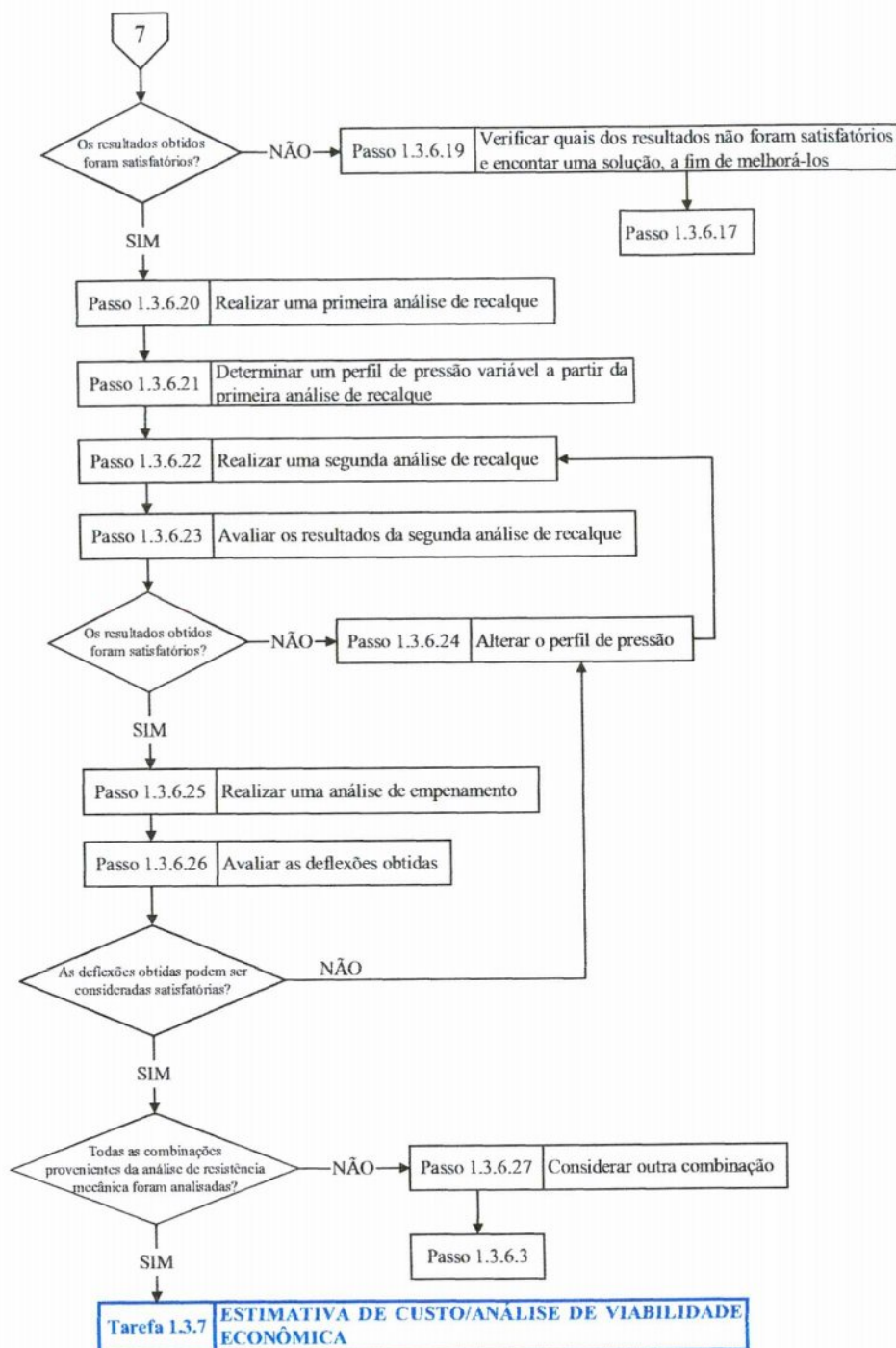


Figura 5.4: Detalhamento da fase de análise reológica (continuação)

Se mais de uma combinação foi originada da análise de resistência mecânica, propõe-se inicialmente considerar uma delas (Passo 1.3.6.1) e posteriormente transferi-lo para o sistema CAE através de um arquivo de transferência de dados (Passo 1.3.6.3). A seleção de uma das combinações é realizada através de algum critério definido pelo projetista. A combinação pode ser selecionada considerando as propriedades reológicas do material, como por exemplo, o índice de fluidez, que está diretamente relacionado à facilidade de injeção. Outra propriedade que pode

ser considerada é o coeficiente de contração volumétrica. A definição de algum critério dependerá da particularidade do projeto. No caso de apenas uma combinação ter sido originada da análise de resistência mecânica, então o modelo é considerado (Passo 1.3.6.2) e posteriormente transferido para o sistema CAE como propõe o Passo 1.3.6.3. Ao utilizar o *Moldflow*<sup>®</sup> geralmente utiliza-se o STL, por ser de fácil transferência, mas o IGES pode ser utilizado também

Na seqüência, uma máquina injetora deve ser selecionada (Passo 1.3.6.4) para que suas características (força de fechamento, pressão de injeção, etc.) sejam utilizadas nas análises. Geralmente, a máquina injetora já é definida pelo próprio cliente. Se este for o caso, o projetista deve apenas obter suas características. Com a máquina injetora definida o leiaute e o número de cavidades do molde pode ser determinado (Passo 1.3.6.5). O número de cavidades é determinado por uma série de fatores, como: o tamanho das cavidades, as dimensões da placa de fixação do molde na injetora, a demanda, custo de produção, capacidade de injeção da máquina considerada, etc. A Equação 4.7 pode ser utilizada para determinar o número teórico de cavidades do molde, para isto é necessário que o projetista saiba qual a capacidade de injeção máxima da máquina para o material utilizado. Este é um dos vários meios utilizados para se determinar o número de cavidades. A experiência do projetista é muito importante também neste momento.

Após ter determinado o número de cavidades do molde propõe-se determinar o tipo de sistema de injeção a ser utilizado para injetar o componente, se sistema de canais frio ou quente (Passo 1.3.6.6). Não existe um procedimento estruturado que possa ser utilizado para determinar qual tipo de canal deve ser utilizado. Esta seleção depende muito da experiência do projetista e, geralmente, é definida em parceria com o cliente, considerando as vantagens e desvantagens que cada sistema possui e fatores como qualidade que se pretende obter nas peças produzidas e fatores econômicos. Um critério que pode ser utilizado é aquele aplicado nos estudos de caso do capítulo quatro, em que se comparou os volumes do componente com o de um possível sistema de canais frio e desta comparação verificou-se a quantidade de material que seria perdido (canais) com o que era realmente aproveitado na injeção do componente. Em seguida, foi realizada uma análise de localização do ponto de injeção (Passo 1.3.6.8) para verificar qual a região mais propícia para posicionar o(s) pontos(s) de injeção. Para isto as cavidades devem ser multiplicadas (Passo 1.3.6.7), caso tenha sido determinada mais de uma cavidade.

Se o canal a ser utilizado for frio, então há a necessidade de determinar o leiaute e as dimensões dos canais de injeção e de distribuição do material e na seqüência modelá-los no componente. Estes são dois passos propostos pela sistemática e identificados como Passos



1.3.6.9 e 1.3.6.10. As dimensões dos canais podem ser determinadas conforme PÖSTSCH e MACHAELI [40], MENGES e MOHREN [47], BAYER AG [53] dentre outros autores. Recomenda-se que os canais de injeção e de distribuição sejam modelados no próprio *Moldflow*<sup>®</sup>, pois como pode ser visto em KENNEDY [9], há uma distinção entre as equações e o elemento finito utilizado para a cavidade e os canais, ou seja, para cada uma destas entidades há um conjunto de equações e um elemento finito apropriado para representá-lo. Se os canais forem modelados no sistema CAD junto ao componente e importados para o *Moldflow*<sup>®</sup>, o mesmo reconhecerá tudo como sendo uma cavidade, não fornecendo a representação matemática correta para cada parte. Isto pode implicar em erros nos resultados. Para a cavidade o *Moldflow*<sup>®</sup> utiliza elementos bi (componentes pouco espessos) ou tridimensionais (componentes muito espessos), enquanto que para os canais é utilizado elemento unidimensional.

Caso o projetista tenha definido o tipo de sistema de injeção fazendo a comparação entre os volumes do componente e de um possível sistema de canais frio, referida anteriormente e utilizada nos estudos de caso, então não há necessidade de realizar o Passo 1.3.6.9, pois para fazer tal comparação já se definiram as possíveis dimensões dos canais e o leiaute. Logo, o projetista precisará apenas modelar os canais, como propõe o Passo 1.3.6.10.

Após a realização da análise de posicionamento do ponto de injeção e o modelamento ou não dos canais é realizado a primeira análise de preenchimento (Passo 1.3.6.11), através dos seguintes passos:

- 1) Posicionar o ponto de injeção;
- 2) Selecionar no banco de dados do *Moldflow*<sup>®</sup> o material considerado;
- 3) Fornecer a temperatura do molde e de injeção;
- 4) Fornecimento do tempo de injeção e;
- 5) Execução dos cálculos para análise.

O posicionamento do ponto de injeção é um fator muito importante no projeto de um componente, pois a ocorrência de problemas que comprometerão a qualidade do mesmo pode ser evitado com o posicionamento ótimo do ponto de injeção. Em geral, deve-se posicioná-lo em um local que forneça um fluxo balanceado, comprimento de fluxo menor possível, a fim de evitar queda de pressão elevada, forneça orientação molecular uniforme e boa distribuição de pressão na cavidade [22, 62]. Em componentes que tenham espessura variável, MALLOY [15] e REES [33] recomendam que se posicione o ponto de injeção na região de maior espessura, pois as partes mais espessas necessitam de uma pressão de recalque maior para compensar as contrações. Se o ponto de injeção for posicionado na parte menos espessa haverá uma

porcentagem de camada solidificada nesta parte que dificultará o recalque da região mais espessa, resultando em problemas [15]. SEOW e LAM [73] desenvolveram uma formulação matemática em que se procura otimizar a espessura do componente, a fim de obter um fluxo balanceado na cavidade. Para ajudar na decisão de posicionamento do ponto de injeção o projetista pode utilizar a análise que leva o próprio nome (Passo 1.3.6.8). O projetista tem total liberdade de criticar os resultados desta análise posicionar os pontos de injeção em outra região, caso seja conveniente.

Os parâmetros de processo fornecidos – temperatura do molde e de injeção – são valores recomendados pelo fabricante do material. O fabricante fornece uma faixa de temperatura e uma temperatura média como sugestão. Segundo GE PLASTC [22], o nível de orientação molecular possui uma relação direta com o tempo de injeção. Quanto maior a velocidade com que o material é injetado mais orientado as moléculas ficam, logo o tempo de injeção fornecido não deve ser tão grande a ponto de elevar o tempo de ciclo, nem tão baixo a ponto de causar muita orientação molecular. C-MOLD [71] sugere que o tempo de injeção utilizado na análise seja de um décimo (1/10) a um quinto (1/5) do tempo de resfriamento, que é determinado pela Equação 4.12 [15, 71].

Segundo proposta da sistemática (Figura 5.4), o passo que sucede a primeira análise de preenchimento (Passo 1.3.6.11) é a de avaliação dos resultados (Passo 1.3.6.12), em que se deve seguir as recomendações do próprio *Moldflow*<sup>®</sup> [72]. A Tabela B.1 contém algumas recomendações para os principais resultados fornecidos pelo *Moldflow*<sup>®</sup> para a análise de preenchimento. Esta primeira análise é recomendada no intuito de verificar se os parâmetros de processo considerados e a localização do(s) ponto(s) de injeção são adequados e suficientes para preencherem a cavidade e fornecer resultados satisfatórios, ou seja, que estejam dentro do recomendado (ver Tabela B.5 no Anexo B). Se foram verificados resultados fora dos recomendados (Passo 1.3.6.13) deve-se verificar qual deles forneceu tais resultados e encontrar uma solução. Dentre estas soluções pode-se considerar:

- a) Remodelar o canal de injeção, no caso de canal frio ou posicionar o ponto de injeção em outra região, no caso de canal quente;
- b) Alterar algum dos parâmetros de processo – temperatura de injeção ou do molde;
- c) Alterar o tempo de injeção;
- d) Refinar mais a malha de elementos finitos;
- e) Alterar a espessura do componente; etc.

Se houve a necessidade de remodelar o componente alterando a sua espessura, fica a critério do projetista realizar ou não uma nova análise de resistência mecânica. Se os resultados



obtidos não apresentaram qualquer problema a análise de refrigeração (Passo 1.3.6.14) pode ser realizada através das seguintes atividades:

- a) Determinação inicial das dimensões do molde e dos canais de refrigeração;
- b) Modelamento tridimensional do molde e dos canais de refrigeração utilizando as dimensões anteriores;
- c) Geração da malha de elementos finitos do molde;
- d) Fornecimento do material do molde, como primeira condição de contorno;
- e) Salvar a condição de contorno;
- f) Posicionar o componente dentro do molde e;
- g) Fornecimento do tempo de injeção utilizado, tempo de recalque e o tempo de abertura do molde e extração do componente;
- h) Fornecimento das outras condições de contorno: temperatura de entrada do fluido refrigerante no circuito, fluido refrigerante utilizado e número de Reynolds ou vazão do fluido nos canais e;
- i) Execução da análise de refrigeração.

As dimensões aproximadas do molde podem ser determinadas através das dimensões das cavidades e do seu leiaute, em que é considerado uma determinada distância lateral a partir da extremidade do componente. Esta distância mais as dimensões da cavidade determinam as dimensões do molde. Geralmente, estas dimensões são determinadas através de catálogos. Um exemplo é o catálogo da POLIMOLD [70]. Os canais de refrigeração são inicialmente determinados através de cálculos analíticos ou a partir de recomendações das literaturas técnicas e dependem da geometria do componente. MYLLA [74] apresenta uma solução analítica para o dimensionamento de um sistema de refrigeração (diâmetro e comprimento dos canais) de um molde e demonstra sua eficiência através da realização de estudos de caso. A Figura 5.5 ilustra a forma mais usual de canais de refrigeração.

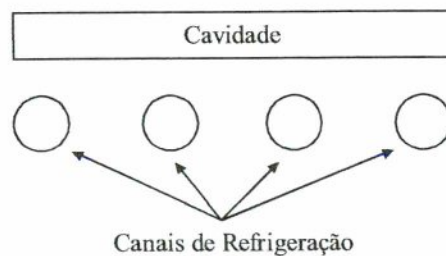


Figura 5.5: Forma mais comum de canais de refrigeração [74]

Algumas literaturas técnicas fornecem valores mais usuais para os diâmetros dos canais de resfriamento, que são selecionados levando em conta a espessura da peça a ser resfriada. A Tabela 5.2 ilustra alguns valores que são recomendados apenas para o diâmetro dos canais em função da espessura do componente, enquanto que a Figura 5.6 ilustra, de forma mais completa valores recomendados para o diâmetro dos canais e distância entre os canais e a peça e entre si.

Tabela 5.2: Recomendações de diâmetros dos canais de refrigeração [74]

Espessura do Componente	Diâmetros do Canal
Até 2 mm	8 a 10 mm
2 a 4 mm	10 a 12 mm
4 a 6 mm	12 a 15 mm

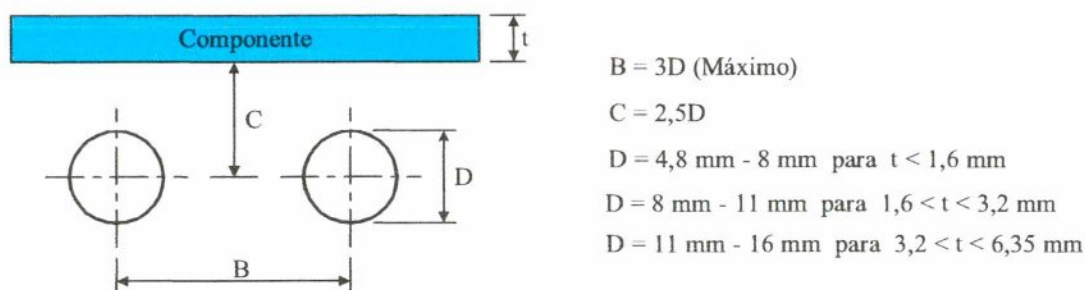


Figura 5.6: Recomendações para os diâmetros dos canais de refrigeração, distância entre os canais e a superfície do componente e distância entre os canais segundo BAYER AG [53]

Depois de realizados as demais atividades apresentadas anteriormente a análise é executada e posteriormente avaliada (Passo 1.3.6.15). Novamente, a avaliação deve ser conduzida através das recomendações do *Moldflow*<sup>®</sup>. Na Tabela B.3 do Anexo B pode-se encontrar algumas recomendações para a avaliação dos principais gráficos da análise de refrigeração. Se os resultados apresentaram-se insatisfatórios (Passo 1.3.6.16) providências devem ser tomadas, na forma de alteração dos parâmetros fornecidos (temperatura do fluido, tipo de fluido, etc.) ou na forma de modificação do leiaute dos canais de refrigeração ou dimensões dos mesmos (diâmetros e comprimento). Estas são alguns pontos que devem ser observados, cabe ao projetista verificar outras causas, as quais depende das particularidades de cada projeto.

Na seqüência é realizada a segunda análise de preenchimento (Passo 1.3.6.17). Ao contrário da primeira análise de preenchimento, a segunda leva em consideração a influência do sistema de refrigeração do molde, ou seja, é uma análise mais realista. Nesta segunda análise não é necessário fornecer mais algum parâmetro, pois o mesmo já aproveita aqueles fornecidos na primeira análise (Passo 1.3.6.11). É necessário apenas ordenar a execução da análise e



posteriormente avaliar os resultados (Passo 1.3.6.18). Esta avaliação também deve seguir as recomendações do *Moldflow*<sup>®</sup> [72]. A Tabela B.1 do Anexo B ilustra algumas recomendações dos principais gráficos ilustrados. Ao verificar resultados insatisfatórios, uma solução deve ser encontrada, a fim de melhorá-lo (Passo 1.3.6.19) e novamente esta análise é executada. Pode-se considerar como possíveis soluções para o problema verificado aquelas apresentadas anteriormente para a primeira análise ou uma apresentada para a análise de refrigeração, já que seu efeito sobre os resultados de preenchimento da cavidade está sendo considerado.

Concluído a segunda análise de preenchimento, a seguinte é a primeira análise de recalque (Passo 1.3.6.20) em que um perfil de pressão constante é aplicado. A pressão a ser aplicada é a máxima proveniente da análise de preenchimento. O tempo de recalque é extraído do gráfico de tempo de resfriamento (*Cooling Time*) da segunda análise de preenchimento. Dos resultados obtidos desta primeira análise de recalque um novo perfil é determinado (Passo 1.3.6.21), desta vez determina-se um perfil de recalque variável. Na função de ajuda (*Help*) do *MOLDFLOW*<sup>®</sup> [72] pode ser visualizado a forma com que este perfil variável é determinado. Na seqüência a segunda análise de recalque é realizada (Passo 1.3.6.22) e posteriormente seus resultados são avaliados (Passo 1.3.6.23). Caso os resultados apresentem-se insatisfatórios um novo perfil de pressão é determinado (Passo 1.3.6.24) e uma nova análise é realizada. A avaliação desta análise deve seguir as recomendações encontradas na função de ajuda (*Help*) do *MOLDFLOW*<sup>®</sup> [72]. Tendo obtido resultados satisfatórios o passo seguinte é a realização da análise de empenamento (Passo 1.3.6.25), em que as deflexões provenientes do processo de injeção são verificadas.

A análise de empenamento utiliza os resultados da análise anterior (recalque) para determinar as deflexões causadas pela contração volumétrica diferenciada. Nesta análise o projetista deve apenas selecionar o tipo de análise – pequenas ou grandes deformações, flambagem, etc. Posteriormente as deflexões resultantes são avaliadas (Passo 1.3.6.26), verificando se as mesmas encontram-se dentro das tolerâncias dimensionais especificadas. Caso as deflexões apresentadas sejam superiores à tolerância recomenda-se realizar uma nova análise de recalque com outro perfil de pressão.

Se existir mais de uma combinação, originada da análise de resistência mecânica, novas análises reológicas devem ser realizadas com as mesmas até que todas tenham sido analisadas, quando se tem então a análise reológica do componente concluída. Ao final desta fase o projetista tem o componente dimensionado para atender os requisitos relativos à resistência mecânica e os de moldabilidade, como pode ser observado na Figura 1.1. Mais de uma combinação (material mais geometria do componente) pode originar a seleção de uma delas

poderá ser realizada na fase seguinte que se refere à estimativa de custos e análise de viabilidade econômica, na qual se verificarão custos mais precisos dos materiais selecionados e do componente, quantidade de fornecedores de matéria-prima e etc. O detalhamento desta tarefa está fora do escopo deste trabalho.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de dissertação apresenta-se, em síntese, na forma de uma proposta de sistemática para o processo de obtenção do leiaute dimensional de peças plásticas moldadas por injeção, a qual foi obtida através da realização de estudos de caso. Como toda proposta de sistemática, à apresentada neste trabalho não se constitui uma proposta perfeita, que solucionará todos os problemas de projeto. Desta forma, o capítulo 6, este que se apresenta, tem como objetivo apresentar as considerações finais do trabalho, inicialmente na forma de uma análise crítica da sistemática proposta no capítulo 5, seguido de uma breve conclusão do trabalho e concluído com algumas recomendações para realização de trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa.

### 6.1. ANÁLISE CRÍTICA DA PROPOSTA DE SISTEMÁTICA

A proposta de sistemática apresentada no capítulo 5 mostra-se bastante adequada para ser utilizada no projeto de componentes de plástico, pois a mesma foi originada a partir de estudos de caso, em que muitas necessidades e dificuldades pelas quais os projetistas passam durante o projeto de um componente de plástico foram verificadas e consideradas ou contornadas a partir de alguma decisão tomada e incorporada à sistemática.

A seleção de qualquer tipo material para o projeto de um componente, seja de plástico ou metálico, não é uma tarefa muito simples. Basicamente, a seleção de materiais termoplásticos pode ser realizada através de três formas ou através da união delas: a partir de experiências passadas, mediante consulta a fabricantes de materiais ou através de alguma sistemática previamente adotada. A utilização da experiência do projetista em projetos anteriores constitui-se na forma mais rápida de seleção de materiais, pois o projetista indicará qual melhor material a ser utilizado conhecendo apenas as particularidades da aplicação e associando-a a alguma experiência anterior. A segunda forma também considera as particularidades do projeto, neste caso as mesmas são discutidas com o próprio um fabricante de material termoplástico, a fim de se determinar um material adequado. Esta segunda forma é mais recomendada na realização de projetos que requeiram uma alta confiabilidade por parte do material, como é o caso de peças de automóveis. A terceira forma utiliza uma sistemática existente.

Como foi visto no capítulo dois, há muitas propostas de sistemática recomendadas para se selecionar um material termoplástico, cada uma delas com suas particularidades. A sistemática

apresentada neste trabalho (Figura 5.1) constitui-se de uma proposta que foi originada a partir de recomendações utilizadas pelos autores das sistemáticas já existentes e das necessidades encontradas na realização dos estudos de caso, na forma de tomadas de decisões. O intuito aqui foi, considerar alguns elementos similares de cada sistemática apresentada unidas às necessidades que cada estudo de caso exigia, um exemplo disto é a inclusão dos Passos 1.3.4.1 e 1.3.4.2, em que o primeiro passo refere-se à obtenção das listas de necessidades, requisitos e especificações de projeto do componente, na forma de um resgate, e o segundo passo propõe que o projetista responda a um questionário estruturado. O Passo 1.3.4.2 é um elemento similar a praticamente todas as sistemáticas apresentadas, pois o mesmo constitui-se de uma forma adequada para obter informações mais específicas a respeito de alguns requisitos que só são cumpridos com a seleção de um material cujas propriedades são compatíveis a estas necessidades.

Mesmo tendo adquirido as listas de necessidades, dos requisitos e especificações de projeto, recomenda-se que o questionário estruturado (Passo 1.3.4.2) seja respondido, pois neste caso o mesmo funcionará como um instrumento de seleção, fazendo com que as informações contidas nestas listas, que são características das propriedades dos materiais termoplásticos sejam separadas e fiquem mais claras, facilitando a seleção do material.

É importante salientar que nesta fase de seleção de materiais o projetista tome algumas decisões na forma da adoção de algum critério que lhe seja mais conveniente. Isto depende bastante do seu conhecimento. Tais critérios podem ser adotados ao realizar os Passos 1.3.4.4 e no Sub-Passo 1.3.4.5.2.

O detalhamento proposto para a análise de resistência mecânica (Figura 5.2) não foi originado de outras sistemáticas existentes, mas sim a partir das necessidades verificadas durante o desenvolvimento dos estudos de caso aliada à forma com que esta análise é realizada nos sistemas CAE. As propostas de sistemática existentes não descrevem detalhadamente o conteúdo desta fase, seus autores as deixam de forma subjetiva e apenas indicam a necessidade de se realizar tal análise, fornecendo, às vezes, as informações necessárias para a realização desta análise. Desta forma, a proposta apresentada neste trabalho constitui-se de uma proposta cujo detalhamento apresentado, normalmente, não é verificado nas principais sistemáticas de projeto de componentes de plástico existentes. Ao utilizar esta proposta o projetista também deve tomar decisões na forma de adoção de algum critério ou na realização ou não de alguns passos.

O caso de um reprojeto foi tratado a parte, como está ilustrado na Figura 5.3, pois há alguns passos preliminares que devem ser realizados, que são distintos do caso em que apenas o projeto de um componente novo no mercado está sendo considerado (Figura 5.2). Estes passos



referem-se à análise comparativa utilizando o material inicial e um material plástico. Mediante esta análise o projetista pode propor mudanças na geometria original do componente, a fim de que o mesmo suporte os carregamentos mantendo as tolerâncias dimensionais e a segurança.

A proposta de detalhamento apresentada para a fase de análise reológica do componente (Figura 5.10) também se constitui de uma proposta que, normalmente, não é verificado nas principais sistemáticas de projeto de componentes de plástico existentes, ou seja, com o grau de detalhamento que é apresentado. Como acontece com a fase de análise de resistência mecânica, as metodologias de projeto não a detalham, as mesmas indicam, de forma subjetiva, que esta análise deve ser realizada. O detalhamento proposto para os Passos 1.3.6.7 a 1.3.6.26 seguiu a forma com que esta análise é realizada no sistema CAE comercial utilizado (*Moldflow Plastic Insight 2.0*<sup>®</sup>). Os passos iniciais (1.3.6.1 a 1.3.6.6) foram propostos a partir das necessidades observadas durante a realização dos estudos de caso. Estes passos também dependem das particularidades de cada componente, mas, de uma forma geral, a primeira análise de preenchimento (Passo 1.3.6.8) é precedida por estas atividades. Como foi recomendado no capítulo 5, as avaliações das análises devem ser realizadas através das recomendações contidas na opção de ajuda (*Help*) do *Moldflow*<sup>®</sup> [72], e devem ser obedecidas o tanto quanto possível. Nesta análise não há outra forma de realizá-la, senão pela maneira como está sendo proposta, pois os resultados de uma análise são utilizados na seguinte. Nesta tarefa não há uma distinção entre reprojetado ou não, ou seja, não há passos específicos para cada uma destas situações, pois, independente da situação, no final da análise de resistência mecânica um ou mais modelos serão originados, todos eles combinados a um material e os mesmos serão analisados reológica e termicamente.

Muitas são as sistemáticas de projetos de componentes de plástico propostos, mas, como foi observado no capítulo 2, nenhuma delas apresenta-se tão detalhada como se apresenta a proposta neste trabalho. Há uma certa dúvida se seus autores considerem que os passos a serem seguidos em cada análise dependem muito das particularidades que cada projeto tem. Mas isto não é fator limitante para que um trabalho como este seja desenvolvido, pois boa parte das atividades realizada durante o projeto de um componente de plástico é comum a qualquer situação e isto pôde ser demonstrado neste trabalho através da realização de dois estudos de caso, sendo que deles foram extraídos os passos propostos pela sistemática.

## 6.2. CONCLUSÕES

Durante a realização deste trabalho percebeu-se que o processo de moldagem por injeção é um processo muito complexo, pois envolve muitas variáveis, as quais estão relacionadas entre si. Isto foi percebido durante a realização das análises reológicas dos estudos de caso. No capítulo 5, comentou-se sobre algumas recomendações que poderiam ser consideradas, a fim de obter resultados satisfatórios caso os resultados da análise de preenchimento, por exemplo, não se apresentassem adequados. A modificação da temperatura do molde ou de injeção pode alterar o tempo de ciclo. Se a espessura do componente for aumentada, a pressão de injeção diminui, mas em compensação a orientação molecular, a contração volumétrica e o tempo de ciclo aumentam, o contrário pode acontecer. Estes são exemplos que ilustram o quanto o processo de moldagem por injeção é complexa. Portanto, o conhecimento do projetista, adquirido em muito tempo de atividade na área é extremamente relevante para que se obtenha bons resultados e conseqüentemente componentes com boa qualidade.

Foi verificado também que o conhecimento das propriedades dos materiais plásticos por parte do projetista é um fator decisivo no projeto de um componente de plástico, pois como foi apresentado no terceiro capítulo, as propriedades dos materiais plásticos e conseqüentemente a resistência do componente são fortemente influenciadas pelos fatores ambientais ao qual o componente vai operar, logo além de se conhecer bem o ambiente de aplicação do componente, recomenda-se que se tenha um bom conhecimento a respeito das propriedades dos materiais plásticos, a fim de selecionar um material adequado para a aplicação.

A análise de resistência mecânica de um componente tanto pode ser realizada utilizando um sistema CAE, quanto as equações analíticas da Resistência dos Materiais. Ao utilizar estas equações o projetista deve estar ciente de que erros estão sendo cometidos, pois as equações analíticas foram desenvolvidas considerando que o material obedece a lei de proporcionalidade de Hooke. Os materiais poliméricos são materiais viscoelásticos e conseqüentemente não obedecem a esta lei. Logo, a utilização dos sistemas CAE no projeto estrutural de um componente de plástico é mais adequado, pois através dele pode-se realizar análises mais precisas utilizando as propriedades viscoelásticas do material, as quais seriam um tanto complicado de se realizar utilizando as equações analíticas.

Os critérios de resistência de projeto são outro ponto em que o projetista deve ter muito cuidado, pois é um assunto que tem sido insistentemente discutido nas principais literaturas de projetos de componentes de plástico. A seleção de um critério não adequado pode conduzir a componentes super ou subdimensionados, pois os materiais plásticos, devido à sua estrutura morfológica, são mais ou menos sensíveis aos esforços de compressão, desta forma a influência



do tensor hidrostático deve ser considerado no momento de selecionar um critério de resistência de projeto. Assim, conclui-se que a utilização do critério de Von Mises, que é o critério bastante utilizado em projetos de componentes metálicos, pode conduzir a erros. Portanto, é recomendado que se utilize critérios que considere o tensor hidrostático, como é o caso do critério de Drucker-Prager, cônico, parabólico e outros, principalmente em situações em que há deformações relativamente grandes, em que a resistência à compressão dos materiais plásticos é maior do que à tração.

Um ponto bastante importante e que foi verificado durante a realização das análises reológicas dos componentes no capítulo de estudos de caso foi a existência de duas entidades, que possuem descrição matemática diferentes. Uma é conhecida por cavidade e a outra por sistema de canais de injeção, que compreende o canal de injeção na bucha e os canais de distribuição. A descrição matemática para cada uma delas é diferente da outra, bem como o elemento finito utilizado para representá-las. O projetista deve estar atento para estas distinções, havendo a possibilidade de obter erros nos resultados. Um estudo mais detalhado, talvez na forma de um artigo, para verificar qual o erro percentual é obtido ao se considerar os canais como cavidade, ou seja, atribuir o mesmo elemento finito, que é atribuído à cavidade, aos canais.

Os objetivos traçados no item 1.3 foram satisfatoriamente alcançados. Durante a busca destes objetivos verificou-se que o projeto preliminar de um componente de plástico é uma tarefa complexa e árdua, havendo momentos em que a experiência do projetista deve ser aplicada.

Em função dos resultados obtidos através da realização dos estudos de caso, este trabalho comprovou ser possível o desenvolvimento de uma sistemática para o processo de obtenção do leiaute dimensional de peças plásticas moldadas por injeção, mesmo contrariando o fato de que cada projeto possui atividades e decisões que são peculiares da própria situação e mesmo que os principais pesquisadores não apresentam uma sistemática com um nível de detalhamento que foi proposto neste trabalho. Desta forma, a sistemática proposta mostra-se adequada e útil, pois também oferece subsídios conceituais para melhor definir os caminhos e diretrizes para a realização do projeto preliminar de um componente de plástico.

### **6.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Este trabalho pode servir de base para o desenvolvimento de novas pesquisas na área de projeto preliminar de componentes de plástico moldados por injeção utilizando as ferramentas CAD/CAE. Algumas sugestões são apresentadas a seguir:

- Desenvolver um trabalho sobre tipos de falhas de componentes de plástico e prevenções. SHAH [75] e, principalmente EZRIN [62], podem ser considerados como referências base para este tipo de trabalho.
- Propor uma sistemática para a análise de falha de um componente de plástico, em que serão determinadas as causas da falha do componente e proposta uma solução de projeto para estas causas. NORTON [76] e GE PLASTIC [34] são referências que podem servir de base para um trabalho desta natureza. No primeiro há uma proposta de sistemática para a análise de fratura de componentes metálicos que pode ser avaliada no sentido de adaptá-la ao domínio dos componentes de plástico e no segundo há uma outra proposta que é específica para o domínio do projeto dos componentes de plástico injetados.
- Realizar um trabalho que apresente recomendações de projeto para componentes de material termofixo, pois estes materiais cada vez mais têm sido empregados para fabricar componentes sob esforços (componentes estruturais). Um exemplo disto é a utilização de peças nos carros da Fórmula 1, as quais tem sido produzido por estereolitografia. Os componentes produzidos por este processo são de materiais termofixos.
- Avaliar mais detalhadamente a sistemática proposta no presente trabalho, aplicando-a em estudos de caso utilizando os conceitos da engenharia simultânea.
- Propor um detalhamento das outras etapas propostas por DARÉ [16], como por exemplo: seleção e confecção de protótipos, como podem ser realizados os testes funcionais, etc.
- Propor uma sistemática para o caso de um projeto de um componente para aplicações elétricas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHABOT JR., J. F.; MALLOY, R. A.. *A history of thermoplastic injection molding. Part I: the birth of an industry. Journal of Injection Molding Technology, March 1997, vol. 1, n° 1. p. 1 – 9.*
- [2] BLASS, A.. **Processamento de polímeros**, 2° edição, 313 p., Editora da UFSC, 1998, Florianópolis, SC, Brasil.
- [3] OLIVEIRA, A.; MASCARENHAS, W.; AHRENS, C. H.. **Tecnologia STL e suas aplicações**. Trabalho do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica – CPGEM/UFSC, Agosto/2000, Florianópolis, SC, Brasil.
- [4] BACK, N.. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1983. 389 p..
- [5] PAHL, G.; BEITZ, W.. *Engineering Design: a systematic approach. 2° ed.. Great Britain: Springer-Verlag London Limited, 1996. xxx + 544 p..*
- [6] HUBKA, V.; EDER, E. W.. *Design science: introduction to needs, scope and organization of engineering knowledge. 2° ed. Great Britain: Spring-Verlag London Limited, 1996. 251 p..*
- [7] ULLMAN, D. G.. *The mechanical design process. Singapore: McGraw – Hill Book Co., 1992. 337 p..*
- [8] OGLIARI, A.. **Sistematização da concepção de produtos auxiliados por computador com aplicações no domínio de componentes de plástico injetados**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1999. xix + 349 p..
- [9] KENNEDY, P.. *Flow analysis of injection molds. Munich, Vienna, New York: Hanser, 1995. xv + 237 p..*



- [10] GODEC, D.; CATIC, I.; RUJNIC-SOKELE, M. *Systemic Models for Calculations of Moulds for Injection Moulding of Thermoplastics*. *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE – DESIGN 2000*. Dubrovnik, May – 2000.
- [11] DARÉ, G.. **Proposta de um Modelo de Referência para o Desenvolvimento Integrado de Componentes de Plástico Injetados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2001. xiii + 219 p..
- [12] KAZMER, D. O.; SPEIGHT, R. G.. *Polymer injection Molding Technology for the next millennium: A vision to the future*. *Journal of Injection Molding Technology*, June 1997, vol. 1, n° 2.
- [13] BACK, N.; FORCELLINI, F. A.. **Projeto de produtos**. Apostila do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica – CPGEM/UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.
- [14] FONSECA, A. J. H.. **Sistematização do processo de elaboração das especificações de projeto de produtos industriais e suas implementação computacional**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1998.
- [15] MALLOY, R. A.. *Plastic part design for injection molding: an introduction*. Munich; Vienna; New York: Hanser, 1994. xii + 460 p..
- [16] BACK, N.. **Metodologia de Desenvolvimento Rápido de Produtos de Injeção**. Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos – NEDIP. Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. 1998.
- [17] DEFOSSE, S. F.; PHATAK, G. A.; TYLER, D.T.. *Concurrent Engineering with Computer – Aided Design and Manufacturing Tools to Reduce “Time to Market” for Plastic Parts*. Disponível na Internet. <http://www.lexmark.com\pte\paper-01.html>.
- [18] BEITER, K. A.; CARDINAL, J. M.; ISHII, KOS. *Design for injection molding: Balancing Mechanical Requirements, Manufacturing Costs and Material Selection*. Disponível na Internet. <http://mml-mac-9.stanford.edu/MMLWebDoc/research/papers/1995/papers95.html>.

- [19] SCHÜTZER, K.; SOUZA, N. L. DE. **Implantação do “Digital Mockup” na indústria automobilística: conquistando vantagens competitivas**. In: Anais do 1º Congresso Brasileiro de Desenvolvimento de Produtos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Agosto 1999, pp. 305 – 314. Disponível na Internet. [www.unimep.br/femp/scpm/1999\\_7.pdf](http://www.unimep.br/femp/scpm/1999_7.pdf).
- [20] DARÉ, G.; BACK, N.; AHRENS, C. H.; OGLIARI, A. **Desenvolvimento Integrado de Produtos: uma Referência para o projeto de Componentes de Plástico Injetados**. In: II Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produtos – CBGDP, 2000. São Carlos, Brasil.
- [21] EASTMAN, D. A.; SMITH, P. G.. *Low-tech Tools Speed Plastic Parts*. *Machine Design*, August, 1996. pp. 40-46.
- [22] GE PLASTIC. *Design Guide*. Disponível na Internet. [www.geplastic.com](http://www.geplastic.com).
- [23] BOLUR, P. C.. *Technological tools for part design, mould design and fabrication of mould*. Disponível na Internet. <http://pcbolor.tripod.com/technotools3.html>.
- [24] STRONG, A. B.. *Plastics: material and processing*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, NY, USA, 1995. xii + 675 p..
- [25] *Engineered Materials Handbook: Engineering Plastic, Volume 2*. ASM International™, Ohio, USA, 1997. 883 p..
- [26] GROOVER, M. P.. *Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA. xxi + 808 p., 1987.
- [27] ZEID, I.. *CAD/CAM: Theory and Practice*. McGraw Hill, Inc., New York, USA. xxvi + 1052 p.. 1991.
- [28] McMAHON, C.; BROWNE, J.. *CAD/CAM: Principles, Practice and Manufacturing Management*. 2º ed.. Addison – Wesley, Harlow, England. xxii + 665 p., 1998.
- [29] ULLMAN, D. G.; WOOD, S.; CRAIG, D.. *The Importance of Drawing in the Mechanical Design Process*. *Computer & Graphics*, vol. 14, No. 2, pp. 263-274, 1990.



- [30] HOFFMAN, E. G.; HAAVISTO, M. A.. *Fundamentals of Tool Design*. 2<sup>o</sup> ed.. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, USA. 720 p.. 1984.
- [31] BELOFSKY, H.. *Product design and process engineering*. Carl Hanser Verlag, Munchen, Germany, 1995. xvi + 631 p..
- [32] WENDLE, B. C.. *What every engineer should know about developing plastic products*. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 1991. vi + 185 p..
- [33] REES, H.. *Understanding Product Design for Injection Moulding*. Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1996. xii + 116 p..
- [34] GE PLASTIC. *Design guide*.
- [35] MALISKA, C. R.. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., xv + 424 p., 1995, Rio de Janeiro, Brasil.
- [36] RIBEIRO JR., A. SÁ; DOS SANTOS, G. J. B.. **Curso de introdução ao método dos elementos finitos: Aplicação a engenharia estrutural**. Salvador, 1998. Universidade Federal da Bahia, vi + 186 p..
- [37] BOLUR, P. C.. *Technological tools for part design, mould design and fabrication of mould*. Disponível na Internet. <http://pcbolor.tripod.com/technotools3.html>.
- [38] PEIXOTO, F. L.. **Considerações Quanto ao uso de Técnicas para Análise de Fluxo em Cavidades de Moldes de Injeção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1999. xviii + 141 p..
- [39] D'ÁVILA, A. M.. **Processo de moldagem por injeção de polímeros semicristalinos – Caracterização e simulação assistida por computador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1997. xviii + 110 p..
- [40] PÖSTSCH, G.; MICHAELI, W.. *Injection Molding: an introduction*. Munich; Vienna; New York: Hanser, 1995. x + 195 p..



- [41] Catálogo da *MoldFlow*. *MoldFlow Design Principles*. *MoldFlow Pty Ltd., Victoria, Australia*.
- [42] WHELAN, A.; GOFF, J. P.. *Developments in Injection Moulding – 3*. *Elsevier Applied Science Publishers LTD, Barking, England, 1985. x + 324 p.*
- [43] TRES, P. A.. *Designing plastic parts for assembly, 3<sup>rd</sup> Edition*. *Carl Hanser Verlag, Munchen, Germany, 1998. xxii + 258 p.*
- [44] **Seminário de materiais e Engenharia de produção mecânica, PUC – PR 2000.**  
Disponível na Internet. <http://members.tripod.com.br/sememtita/principal.htm>.
- [45] MILLER, E.. *Introduction to Plastic and Composites: Mechanical Properties and Engineering Applications*. *Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA, 1996. viii + 434p.*
- [46] DIHLMANN, C.. **Simulação e análise do preenchimento de cavidades em moldes para injeção de termoplásticos utilizando método manual e tecnologia CAE/CAD.**  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1993. xiv + 153 p..
- [47] MENGES, G.; MOHREN, P.. *How to Make Injection Molds, 2<sup>a</sup> ed.*. *Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1993. xviii + 540 p.*
- [48] Manual da TICONA. *Designing with plastic*. Disponível na Internet. [www.ticona.com](http://www.ticona.com).
- [49] ROSATO, D. V.; ROSATO, D. V.. *Injection moulding handbook*. *Van Nostrandamus Reinhold, Inc., New York, NY, USA, 1986. xx + 899 p.*
- [50] CRACKNELL, P. S.; DYSON, R. W.. *Handbook of thermoplastics injection mould design*. *Chapman & Hall, Glasgow, Scotland, 1993. xii + 132 p.*
- [51] ROSATO, D. V.. *Designing with reinforced composites: technology, performance, economics*. *Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1997. xiv + 401 p.*
- [52] RUBIN, I. I.. *Injection moulding: theory and practice*. *John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, USA, 1992. xiv + 657 p.*

- [53] **Manual da BAYER AG.** Disponível na internet.  
<http://www.plastics.bayer.com/AG/AE/index.jsp>.
- [54] McCURM, N. G.; BUCKLEY, C. P.; BUCKNALL, C. B.. *Principles of polymer engineering*. Oxford University Press, Inc., Oxford, NY, USA, 1994. xii + 391 p..
- [55] MICHAELI, W.. *Plastics processing: an introduction*. Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1995. x + 211 p..
- [56] BERINS, M. L.. *Plastics engineering handbook of the society of the plastic industry, Inc., 5<sup>th</sup> Edition*. Chapman & Hall, New York, NY, USA, 1991. xvi + 869 p..
- [57] YOUNG, W. C.. *Roark's formulas for stress and strain, 6<sup>th</sup> Edition*. McGraw-Hill, Inc., Singapore, Singapore, 1989. xiv + 763 p..
- [58] CHANDA, M.; ROY, S. K.. *Plastics technology handbook*. Marcel Dekker, Inc., New York, NY, USA, 1987.
- [59] FINDLEY, W. N.; LAI, J. S.; ONARAN, K.. *Creep and relaxation of non linear viscoelastic materials*. Dover Publications, Inc., New York, NY, USA, 1989. xii + 371 p..
- [60] GORNI, A. A.. **Introdução aos Plásticos.** Disponível na Internet.  
<http://gorni.hpg.com.br/intropol.htm>.
- [61] MICHAELI, W.; KAUFMANN, H.; GREIF, H.; VOSSEBÜRGER, F. J.. *Training in Plastic Technology*. Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1995. xiv + 178p..
- [62] EZRIN, M.. *Plastic Failure Guide: Cause and Prevention*. Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1996. xxi + 473 p..
- [63] BRYDSON, J. A.. *Plastic Materials, 6<sup>th</sup> Edition*. Butterworth-Heinemann, Oxford, Great Britain, 1995. xxvii + 896 p..
- [64] JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M.. *Fundamentals of machine component design, 2<sup>nd</sup> Edition*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1991. xxvi + 804 p..
- [65] **Portal da TANGRAM.** [www.tangram.uk.com](http://www.tangram.uk.com).

- [66] SANTANA, R. R. **Sistema Computacional de Apoio ao Projeto de Componentes de Plástico Injetados, via Internet**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1998. xv + 81 p..
- [67] **Banco de Dados CAMPUS<sup>®</sup>**
- [68] **Manual da máquina injetora ALLROUNDER 270/320 S da ARBURG<sup>™</sup>**. Disponível no laboratório Cimject da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- [69] **Material Management<sup>®</sup>**. Banco de dados do *Moldflow<sup>®</sup>*.
- [70] **Catálogo da POLIMOLD**. Disponível no laboratório Cimject da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- [71] **C-Mold Reference Manual**. Manual de Orientação ao Usuário do Programa de Simulação C-Mold, desenvolvido por Advanced CAE Technology, Inc.. Disponível na Internet. [http://www.scude.scu.edu/cmdoc/rm\\_doc/04\\_process\\_modeling.html#32019](http://www.scude.scu.edu/cmdoc/rm_doc/04_process_modeling.html#32019). Novembro, 2000.
- [72] **Função de ajuda (Help) do Moldflow Plastic Insight 2.0<sup>®</sup>**.
- [73] SEOW, L. W.; LAM, Y. C.. *Optimizing Flow in Plastic Injection Moulding*. *Journal of Material Processing Technology, Volume 77, 1997, p. 333 – 341*.
- [74] MYLLA, A. Y. F.. **Influencia do resfriamento na qualidade de peças termoplásticas moldadas por injeção, com estudo de caso em sistemas CAE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1998. xiv + 106 p..
- [75] SHAH, V.. *Handbook of Plastic Testing Technology*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1994. xviii + 493 p..
- [76] NORTON, R. L.. *Machine Design: an integrated approach*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, NY, USA, 1998. xxii + 1048 p..
- [77] **Possíveis Problemas de Injeção**. Disponível na Internet. <http://www.technyl.com.br/produtos/problemas.htm#top>.



- [78] RAO, N. S.. *Designing Formulas for Plastic Engineer*. Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1991. viii + 135 p..
- [79] EHRENSTEIN, G. W.; ERHARD, G.. *Designing with Plastic: A Report on the State of the art*. Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 1984. 135 p..
- [80] ROYLANCE, D.. *Yield and Plastic Flow*. Disponível na Internet. <http://web.mit.edu/course/3/3.11/www/modules/yield.pdf>.
- [81] McKENNA, G. B.; GUSLER, G. M.. *The Craze Initiation Response of a Polystyrene and a Styrene-Acrylonitrile Copolymer During Physical Aging*. Disponível na Internet. <http://www.che.ttu.edu/faculty/mackenna/publications/pes-gusler%20craze.pdf>.
- [82] BONTEN, C.; SCHMACHTENBERG, E.; YAZICI, N. M.. *Designing injection moulded parts with FEM*. *Kunststoffe Plast Europe*, volume 90, N° 11, September 2000, pp. 35 – 38.

**ANEXO A**

---

**PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS  
ESTUDOS DE CASOS**

Os materiais utilizados nos estudos de caso foram: *Terluran HI 10*, *Apec HT KU 1-9331*, *Polystyrol 585 K* e *Makrolon 2205*. Suas principais propriedades utilizadas nos estudos de caso são apresentadas na Tabelas A.1 a A.4, bem como algumas informações a respeito das suas características.

### A.1 – TERLURAN HI-10

O *Terluran HI-10* é um material da família do ABS e fabricado pela Basf AG<sup>®</sup> recomendado para fabricar peça através do processo de moldagem por injeção. Possui alta tenacidade e fácil escoamento. A Tabela A.1 ilustra as principais propriedades do *Terluran HI-10*.

Tabela A.1: Relação das principais propriedades do *Terluran HI-10*

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Módulo de elasticidade	1900 Mpa
Tensão limite elástico	38 Mpa
Deformação até o escoamento	2,8 %
Deformação nominal até a fratura	9,0 %
Coefficiente de Poisson	0,38
PROPRIEDADES REOLÓGICAS	
Índice de fluidez	9 cm <sup>3</sup> /10 min
Taxa de cisalhamento admissível	50.000 1/s
Tensão de cisalhamento admissível	0,3 Mpa
Temperatura de extração	99 °C
PROPRIEDADES TÉRMICAS	
Coefficiente de dilatação térmica	0,95 x 10 <sup>-4</sup> °C <sup>-1</sup>
Temperatura de fusão	220 °C
PROPRIEDADE FÍSICA	
Densidade	1020 kg/m <sup>3</sup>
PROCESSAMENTO	
Temperatura mínima para o molde	40 °C
Temperatura máxima para o molde	80 °C
Temperatura sugerida para o molde	60 °C
Temperatura de injeção mínima	235 °C
Temperatura de injeção máxima	275 °C
Temperatura de injeção sugerida	255 °C

FONTE: Banco de dados do CAMPUS<sup>®</sup> [67] e do *Moldflow*<sup>®</sup> [69].



## A.2 – APEC HT KU 1-9331

O *Apec HT KU 1-9331* é um material da família do policarbonato e fabricado pela Bayer AG<sup>®</sup> [48]. A Tabela A.2 ilustra as principais propriedades do *Apec HT KU 1-9331*.

Tabela A.2: Relação das principais propriedades do *Apec HT KU 1-9331*

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Módulo de elasticidade	2300 MPa
Tensão limite elástico	65 MPa
Deformação até o escoamento	7 %
Deformação nominal até a fratura	> 50 %
Coefficiente de Poisson	0,37
PROPRIEDADES REOLÓGICAS	
Índice de fluidez	25 cm <sup>3</sup> /10 min
Taxa de cisalhamento admissível	40.000 1/s
Tensão de cisalhamento admissível	0,5 Mpa
Temperatura de extração	142 °C
PROPRIEDADES TÉRMICAS	
Coefficiente de dilatação térmica	0,7 x 10 <sup>-4</sup> °C <sup>-1</sup>
Temperatura de fusão	330 °C
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Densidade	1180 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	0,4 %
Absorção de umidade	0,2 %
PROCESSAMENTO	
Temperatura mínima para o molde	80 °C
Temperatura máxima para o molde	120 °C
Temperatura sugerida para o molde	100 °C
Temperatura de injeção mínima	300 °C
Temperatura de injeção máxima	340 °C
Temperatura de injeção sugerida	320 °C

FONTE: Banco de dados do CAMPUS<sup>®</sup> [67] e do *Moldflow*<sup>®</sup> [69].

**A.3 – POLYSTYROL 585 K**

O *Polystyrol 585 K* é um material da família do poliestireno e fabricado pela Basf AG<sup>®</sup>. É um material que possui alta cristalinidade, boa resistência ao impacto e é utilizado na fabricação de produtos domésticos. A Tabela A.3 apresenta suas principais propriedades utilizadas.

Tabela A.3: Relação das principais propriedades do *Polystyrol 585 K*

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Módulo de elasticidade	1900 MPa
Tensão limite elástico	32 MPa
Deformação até o escoamento	1.9 %
Deformação nominal até a fratura	25 %
Coefficiente de Poisson	0,35
PROPRIEDADES REOLÓGICAS	
Índice de fluidez	5 cm <sup>3</sup> /10 min
Taxa de cisalhamento admissível	40.000 1/s
Tensão de cisalhamento admissível	0,25 Mpa
Temperatura de extração	89 °C
PROPRIEDADES TÉRMICAS	
Coefficiente de dilatação térmica	1,0 x 10 <sup>-4</sup> °C <sup>-1</sup>
Temperatura de fusão	200 °C
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Densidade	1050 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	0,1 %
Absorção de umidade	0,1 %
PROCESSAMENTO	
Temperatura mínima para o molde	20 °C
Temperatura máxima para o molde	70 °C
Temperatura sugerida para o molde	450 °C
Temperatura de injeção mínima	215 °C
Temperatura de injeção máxima	255 °C
Temperatura de injeção sugerida	235 °C

FONTE: Banco de dados do CAMPUS<sup>®</sup> [67] e do *Moldflow*<sup>®</sup> [69].



#### A.4 – MAKROLON 2205

O *Makrolon 2205* é um material da família do Policarbonato fabricado pela Bayer AG<sup>®</sup>. Sua designação ISO é: Termoplástico ISO 7391 – PC, MR, 46-24-9 utilizado no processo de moldagem por injeção. É um material transparente e facilmente injetável. É bastante utilizado na fabricação de peças com pequena espessura de parede. A Tabela A.4 ilustra as principais propriedades do *Makrolon 2205*.

Tabela A.4: Relação das principais propriedades do *Makrolon 2205*

PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Módulo de elasticidade	2400 MPa
Tensão limite elástico	65 MPa
Deformação até o escoamento	6,0 %
Deformação nominal até a fratura	> 50 %
Coefficiente de Poisson	0,37
PROPRIEDADES REOLÓGICAS	
Índice de fluidez	36 cm <sup>3</sup> /10 min
Taxa de cisalhamento admissível	40000 1/s
Tensão de cisalhamento admissível	0,5 MPa
Temperatura de extração	130 °C
PROPRIEDADES TÉRMICAS	
Coefficiente de dilatação térmica	0,6 x 10 <sup>-4</sup> °C
Temperatura de fusão	300 °C
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Densidade	1200 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	0,3 %
Absorção de umidade	0,12 %
PROCESSAMENTO	
Temperatura mínima para o molde	80 °C
Temperatura máxima para o molde	120 °C
Temperatura sugerida para o molde	100 °C
Temperatura de injeção mínima	300 °C
Temperatura de injeção máxima	340 °C
Temperatura de injeção sugerida	320 °C

FONTE: Banco de dados do CAMPUS<sup>®</sup> [67] e do *Moldflow*<sup>®</sup> [69].



**ANEXO B**

---

**RECOMENDAÇÕES PARA ANÁLISES DE  
RESULTADOS DO *MOLDFLOW*<sup>®</sup>**

Tabela B.1: Recomendações para a avaliação dos gráficos fornecidos pela análise de preenchimento e recalque no *Moldflow*<sup>®</sup>

GRÁFICO	DEFINIÇÃO	PROBLEMAS QUE PODEM SER VERIFICADOS ATRAVÉS DOS GRÁFICOS	RECOMENDAÇÕES
<i>Frozen Layer</i> (Porcentagem de Camada Solidificada)	Ilustra a porcentagem de camada que se solidificou no final do preenchimento.	Permite verificar a parte da peça que se resfria lenta ou rapidamente.	Recomenda-se que se tenha pelo menos 80% da peça solidificada no momento da extração.
<i>Cooling Time</i> (Tempo de Resfriamento)	É o tempo necessário, depois de concluído o preenchimento da cavidade, para a peça alcançar a temperatura de extração do material.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ciclo muito longo;</li> <li>- Temperatura do molde ou de injeção altas;</li> <li>- Efeito de hesitação.</li> </ul>	Recomendam-se baixos tempos de resfriamento, a fim de não produzir ciclos muito longos.
<i>Bulk Shear/Bulk Stress</i> (Taxa/Tensão de Cisalhamento)	Representam, respectivamente, a distribuição da taxa e da tensão de cisalhamento através da espessura da peça.	Permite verificar se a velocidade de injeção está muito alta ou baixa.	Recomenda-se que o valor máximo ilustrado no gráfico seja menor do que o recomendado para o material.
<i>Pressure</i> (Pressão)	Ilustra a distribuição de pressão através da frente de fluxo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efeito de hesitação;</li> <li>- Overpacking;</li> <li>- Racetrack.</li> </ul>	A pressão máxima de injeção não deve exceder a pressão máxima disponível na máquina injetora considerada.
<i>Temperature</i> (Temperatura)	Ilustra a distribuição de temperatura sobre a peça no final do preenchimento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pontos muito quentes indicando calor gerado por cisalhamento;</li> <li>- Pontos frios indicando hesitação.</li> </ul>	Recomenda-se manter a distribuição de temperatura uniforme. Para análises rápidas a variação de temperatura não deve ser maior que 20 °C, enquanto que para análises mais refinadas esta variação deve ser de 1°C ou 2 °C.

FONTE: *Help do Moldflow*<sup>®</sup> [72]



Tabela B.1: Recomendações para a avaliação dos gráficos fornecidos pela análise de preenchimento e recalque no *Moldflow*<sup>®</sup> (Continuação)

GRÁFICO	DEFINIÇÃO	PROBLEMAS QUE PODEM SER VERIFICADOS ATRAVÉS DOS GRÁFICOS	RECOMENDAÇÕES
<i>Fill Time</i> (Tempo de Preenchimento)	Fornecer a posição da frente de fluxo em intervalos de tempo regulares durante o preenchimento da cavidade.	- Efeito de hesitação; - Fluxo desbalanceado; - <i>Racetrack</i> .	Recomenda-se manter um fluxo balanceado posicionando o ponto de injeção numa região adequada.
<i>Instan. Temperature</i> (Temperatura Instantânea)	Ilustra a distribuição da temperatura nodal.	- Pontos muito quentes indicando calor gerado por cisalhamento; - Pontos frios indicando hesitação.	Mesmas recomendações do gráfico de Temperatura.
<i>Air Traps</i> (Aprisionamento de Ar)	Ilustra pontos prováveis de aprisionamento de ar em decorrência do encontro de duas ou mais frentes de fluxo.	- Marca de queimadura na peça; - Preenchimento incompleto.	Recomenda-se que estes pontos estejam em regiões da peça que facilite sua remoção.
<i>Weld Lines</i> (Linhas de Solda)	Ilustra a região de encontro de duas ou mais frentes de fluxo.	- Problemas estruturais; - Defeitos visuais;	Se não for possível evita-las, recomenda-se que as mesmas estejam em regiões pouco solicitadas ou que a temperatura nesta região não seja menor do que 1°C a 2 °C a menos da temperatura de injeção.
<i>Volumetric Shrinkage</i> (Contração Volumétrica)	Ilustra a contração volumétrica de cada elemento como uma porcentagem do volume original da peça.	- <i>Sink marks</i> (Rechupe).	- Deve ser uniforme em toda a peça, a fim de minimizar os empenamentos; - Deve ser menor do que o recomendado para o material.

FONTE: *Help do Moldflow*<sup>®</sup> [72]



Tabela B.2: Recomendações para avaliação dos gráficos fornecidos pela análise de refrigeração no *Moldflow*<sup>®</sup>

GRÁFICO	DEFINIÇÃO	PROBLEMAS QUE PODEM SER VERIFICADOS ATRAVÉS DOS GRÁFICOS	RECOMENDAÇÕES
<i>Top Temperature</i> (Temperatura da Peça)	Ilustra a temperatura da peça no final do ciclo.	Localiza pontos com temperatura elevada ou baixa.	Recomenda-se manter esta temperatura no mínimo 5 °C abaixo da temperatura de entrada do fluido.
<i>Temperature Top</i> (Interface Peça/Molde)	Ilustra a distribuição de temperatura média da interface fluido/molde durante o ciclo.	Determina pontos quentes ao longo do circuito de refrigeração.	Mesmas recomendações do gráfico de Temperatura.
<i>Temperature Top</i> (Temperatura do Molde)	Ilustra a distribuição de temperatura do molde.	- Verifica se o circuito de refrigeração está trabalhando eficientemente; - Determina pontos quentes no molde.	Recomenda-se manter a temperatura uniforme.
<i>Reynolds Number</i> (Número de Reynolds)	Ilustra o número de Reynolds do fluido no circuito de refrigeração.		Deve ser maior do que 4000 para garantir um fluxo turbulento. O número ideal é 10000.
<i>Flow Rate</i> (Vazão)	Ilustra a vazão de fluido necessária para refrigerar o molde.		- Deve ser constante em cada circuito; - A soma das vazões de cada circuito deve ser menor do que a capacidade da bomba utilizada.
<i>Coolant Temp.</i> (Temperatura do Fluido Refrigerante)	Ilustra a distribuição de temperatura do fluido no circuito de refrigeração.		Recomenda-se que a diferença entre a temperatura de entrada e de saída em cada circuito seja no máximo igual a 2 °C e em todos os circuitos seja no máximo igual a 4°C.

FONTE: *Help do Moldflow*<sup>®</sup> [72]

Tabela B.3: Recomendações para avaliação dos gráficos fornecidos pela análise de empenamento no *Moldflow*<sup>®</sup>

GRÁFICO	DEFINIÇÃO	PROBLEMAS QUE PODEM SER VERIFICADOS ATRAVÉS DOS GRÁFICOS	RECOMENDAÇÕES
<i>Deflection: Cooling System</i>	Ilustra as deflexões provenientes do sistema de refrigeração.	Empenamentos fora da faixa de tolerância especificada.	Recomenda-se manter as deflexões dentro da tolerância.
<i>Deflection: Differential Shrinkage</i>	Ilustra as deflexões causadas pela contração volumétrica diferenciada.	Empenamentos fora da faixa de tolerância especificada.	Recomenda-se manter as deflexões dentro da tolerância.
<i>Deflection: Molecular Orientation</i>	Ilustra as deflexões provenientes da orientação molecular.	Empenamentos fora da faixa de tolerância especificada.	Recomenda-se manter as deflexões dentro da tolerância.

FONTE: *Help do Moldflow*<sup>®</sup> [72]

**ANEXO C**

---

**GUIA DE POSSÍVEIS PROBLEMAS DE INJEÇÃO**



Tabela C.1: Possíveis problemas de injeção de peças [24, 34, 77]

DEFEITO	PROVÁVEIS CAUSAS	PROVÁVEIS SOLUÇÕES
Peça quebradiça	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umidade alta do material;</li> <li>- Degradação térmica;</li> <li>- Plastificação insuficiente;</li> <li>- Contaminação do material;</li> <li>- Taxa de preenchimento;</li> <li>- Temperatura do molde e de injeção;</li> <li>- Peça sem raios de arredondamento e espessura variada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Secagem do material;</li> <li>- Utilizar temperaturas recomendadas pelo fabricante do material;</li> <li>- Evitar cantos vivos e variação brusca da espessura;</li> </ul>
Peça incompleta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material com alta viscosidade;</li> <li>- Alta queda de pressão na cavidade;</li> <li>- Aprisionamento de gases;</li> <li>- Condições de injeção inadequadas;</li> <li>- Material insuficiente</li> <li>- Baixa velocidade de injeção;</li> <li>- Projeto inadequado dos canais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar material mais fluido ou aumentar mais a temperatura ou velocidade de injeção;</li> <li>- Melhorar o projeto do sistema de ventilação;</li> <li>- Dimensionar canais com diâmetros mais adequados;</li> <li>- Aumentar a pressão de injeção e recalque.</li> </ul>
Peças com rebarbas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material muito fluido;</li> <li>- Excesso de material;</li> <li>- Força de fechamento baixa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar força de fechamento;</li> <li>- Reduzir temperatura do molde e de injeção;</li> <li>- Reduzir a velocidade de injeção.</li> </ul>
Rechupe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantidade insuficiente de material;</li> <li>- Baixa pressão de recalque;</li> <li>- Projeto dos canais inadequado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar o diâmetro dos canais;</li> <li>- Aumentar o tempo e a pressão de recalque;</li> <li>- Aumentar o tempo de refrigeração.</li> </ul>
Empenamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contração diferenciada da peça;</li> <li>- Temperatura de extração acima do recomendado;</li> <li>- Controle de temperatura inadequado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uniformização das temperaturas na peça;</li> <li>- Aumento da temperatura de injeção;</li> <li>- Reduzir a temperatura do molde;</li> <li>- Sistema de refrigeração inadequado;</li> <li>- Pinos extratores.</li> </ul>
Linhas de solda	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material com alta viscosidade;</li> <li>- Materiais estranhos no molde;</li> <li>- Sistema de ventilação ineficiente;</li> <li>- Posicionamento inadequado dos pontos de injeção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar material mais fluido;</li> <li>- Aumentar a temperatura de injeção e do molde;</li> <li>- Reposicionar os pontos de injeção.</li> </ul>
Pontos de queima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprisionamento de gases;</li> <li>- Temperatura de injeção alta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhorar o projeto do sistema de ventilação;</li> <li>- Reduzir a velocidade de injeção;</li> <li>- Reduzir o tempo de injeção.</li> </ul>

Riscos na superfície	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umidade do material alta;</li> <li>- Degradação térmica;</li> <li>- Baixa homogeneização do material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Secagem do material;</li> <li>- Reduzir o tempo do ciclo.</li> </ul>
Variação de cor	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Degradação por oxidação;</li> <li>- Plastificação inadequada;</li> <li>- Presença de umidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Secagem do material;</li> </ul>
Contração excessiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhorar os parâmetros de injeção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduzir a temperatura do molde e de injeção;</li> <li>- Aumentar a pressão e o tempo de recalque</li> </ul>
Superfície fosca	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material contaminado;</li> <li>- Problemas na temperatura de plastificação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar a temperatura do molde e do material;</li> <li>- Aumentar a velocidade de injeção;</li> <li>- Verificar a presença de materiais estranhos</li> </ul>
Jatos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desenho do ponto de injeção inadequado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modificar as dimensões do ponto de injeção.</li> </ul>
Ciclos muito longos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material com baixa cristalização;</li> <li>- Baixa troca térmica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduzir o diâmetro do ponto de injeção;</li> <li>- Diminuir a temperatura do molde;</li> <li>- Verificar o rendimento do sistema de refrigeração.</li> </ul>
Bolhas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta umidade;</li> <li>- Baixa plastificação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Secagem do material;</li> <li>- Diminuir a rotação da rosca.</li> </ul>
Problemas com a extração da peça	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A peça permanece no molde.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar a velocidade de extração;</li> <li>- Aumentar o tempo de resfriamento;</li> <li>- Eliminar aspereza e pontos de retenção do molde.</li> </ul>
Linhas de fluxo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura do molde muito baixa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumentar a velocidade de injeção</li> </ul>

**ANEXO D**

---

**QUESTIONÁRIO ESTRUTURADO**



Tabela D.1: Questionário estruturado recomendado para a fase de seleção de materiais

CLASSES	SUBCLASSES	PERGUNTAS
<b>Relativas às propriedades necessárias ao material</b>	Elétricas	O componente será utilizado como isolante elétrico?
		Quais os níveis de voltagem próximos do componente?
	Ópticas	O componente será transparente, translúcido ou opaco?
		O componente será colorido?
	Acústicas	O componente será utilizado como isolante sonoro?
	<b>Relativo às condições de utilização do componente</b>	Mecânicas
Qual a magnitude dos carregamentos ou deslocamentos prescritos no componente?		
A relação carregamento versus tempo é significativa?		
O componente deve ser resistente a impactos?		
Qual a máxima deflexão tolerada durante a vida útil do componente?		
As tolerâncias dimensionais são importantes? Qual faixa deve ser mantida?		
O peso do componente é relevante? Qual deve ser o seu peso máximo?		
A resistência ao desgaste deve ser considerada?		

Tabela D.1: Questionário estruturado recomendado para a fase de seleção de materiais (continuação)

CLASSES	SUBCLASSES	PERGUNTAS
<p><b>Relativo às condições de utilização do componente</b></p>	<p>Ambientais Químicas</p>	<p>O componente estará submetido a algum ambiente quimicamente reativo? Qual?</p>
		<p>Qual a maior e a menor temperatura em que o componente estará submetido?</p>
		<p>Por quanto tempo o componente ficará exposto a esta variação de temperatura?</p>
		<p>O componente ficará exposto às intempéries?</p>
		<p>Qual o nível de umidade do ambiente de aplicação do componente?</p>
		<p>O componente ficará exposto à luz solar?</p>
		<p>O componente sofrerá algum tipo de manutenção durante toda a sua vida útil? Que tipo de produto será utilizado para isto?</p>
		<p>Qual a vida útil esperada para o componente no ambiente?</p>
		<p>A resistência à chama é importante?</p>
<p><b>Relativo aos processos de fabricação</b></p>	<p>Tipo de processo de fabricação</p>	<p>O componente será montado? Por qual método?</p>
<p><b>Relativo aos custos e fatores econômicos</b></p>		<p>Já existe algum componente no mercado?</p>
		<p>Qual seu custo? O reprojeto reduzirá seus custos?</p>

**ANEXO E**

---

**RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO DE  
COMPONENTES DE PLÁSTICO VISANDO AUMENTO  
DE RIGIDEZ**



A fim de aumentar mais a capacidade de suportar carregamentos ou a rigidez de um componente plástico, um melhoramento nas propriedades ou na geometria do componente faz-se necessário. Às vezes, a mudança de material é adequada, mas geralmente não é uma solução muito prática ou econômica. Alteração da geometria do componente através da alteração do momento de inércia do mesmo é a solução mais recomendada, no caso de haver apenas um material previamente selecionado [48]. Os elementos estruturais mais utilizados para aumentar a rigidez de um componente são: espessura de parede (*wall thickness*), nervuras, ranhuras em “V” e corrugações, suportes verticais (*bosses*), reforços laterais (*Gussets*) e os raios de arredondamento (*Fillets*).

- 1) **Espessura de parede (*wall thickness*):** a espessura de um componente deve ser a mais uniforme possível, a fim de minimizar as tensões residuais, evitar contrações volumétricas diferenciadas, evitar a formação de vazios (*voids*) e rechupe. A uniformidade da espessura contribui também para a economia de material e conseqüentemente da produção [56, 49, 62]. Caso seja necessário variar a espessura de parede do componente, esta variação deve ser gradual, a fim de evitar mudanças bruscas de temperatura durante a solidificação e, conseqüentemente, evitar contrações muito elevadas. A Figura E.1 ilustra a maneira incorreta de se realizar a transição entre as espessuras e algumas mais adequadas. Raios de arredondamento adequados podem ser visualizados na Tabela E.1.

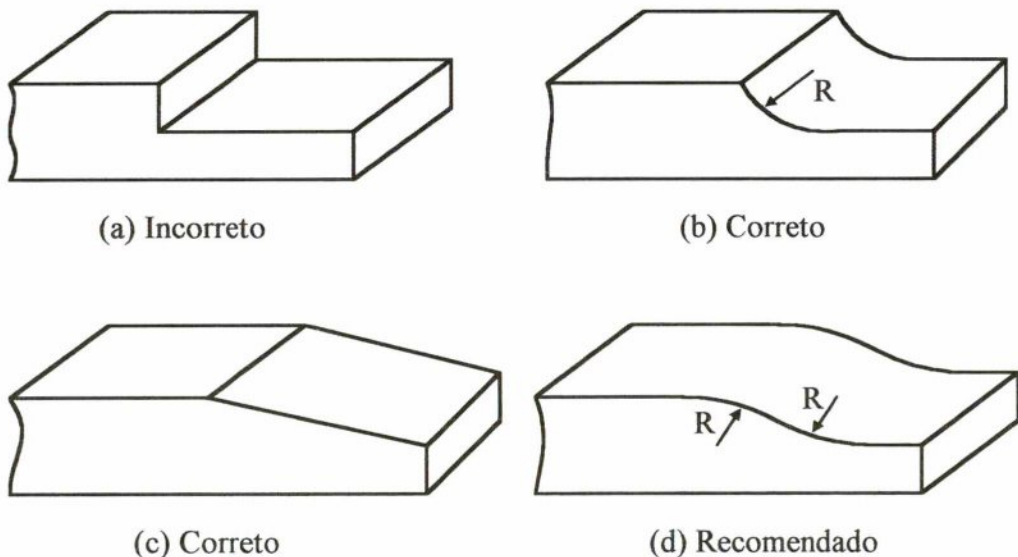


Figura E.1: Maneiras de variação de espessura de parede [22, 33, 53]

Segundo TICONA [48], a espessura de parede de um componente plástico pode ser determinado através de uma das cinco maneiras apresentadas a seguir. Pela primeira maneira, o projetista pode determinar a espessura de parede através de recomendações de fabricantes ou *handbooks*. Em TICONA [48], BERINS [56] e [25] há uma tabela em que são relacionadas as principais classes de materiais termoplásticos com uma faixa de espessura recomendada para cada um deles. BERINS [56] ainda ilustra uma tabela relacionando as principais classes de termofixos a uma faixa de temperatura recomendada. A espessura também pode ser determinada pelos requisitos estruturais, em que será realizada uma análise de resistência mecânica, através de iterações da espessura até que se consiga um valor adequado. As tabelas comentadas anteriormente servem como uma consulta para determinar um valor inicial. Outro meio para determinar a espessura de um componente é mais utilizado em situações na qual o componente será utilizado como um isolante elétrico, térmico ou sonoro, pois a habilidade de isolamento de um componente está diretamente relacionada à sua espessura.

A quarta maneira a ser considerada é através da resposta a possíveis impactos, pois a habilidade que um componente tem de absorver impactos sem falhar depende das propriedades do material e da sua geometria. Aumentando-se a espessura do componente, geralmente há uma melhora na sua resistência ao impacto, mas há um limite, pois ao aumentar a espessura do componente demasiadamente pode torná-lo tão rígido que o mesmo não deflexionará o suficiente para distribuir a energia mecânica do impacto. Por último a espessura pode ser determinada através de normas técnicas [48]. Em geral, componentes de plástico devem ser projetados com o mínimo de espessura que lhe forneça condições de cumprir com todos os requisitos especificados. Esta espessura resulta em economia de material e alto nível de produção devido à rápida transferência de calor para o sistema de refrigeração [56].

- 2) **Nervuras (*ribs*):** as nervuras são elementos estruturais utilizados para aumentar a rigidez e a resistência de um componente plástico sem a necessidade de aumentar a espessura do mesmo [48, 50, 53, 56,]. O uso apropriado das nervuras, geralmente previne empenamentos durante o resfriamento do componente e, em alguns casos, facilita o fluxo de material durante o preenchimento da cavidade, mas seu uso deve ser criterioso, pois as nervuras podem causar problemas, como concentrações de tensões e rechupes (*sink marks*) [53, 58]. A Figura E.2 ilustra a seção transversal de duas nervuras com suas dimensões literais e a Tabela E.1 ilustra as principais recomendações de alguns autores



para estas dimensões. Na Figura E.2, “t” representa a espessura de parede do componente.

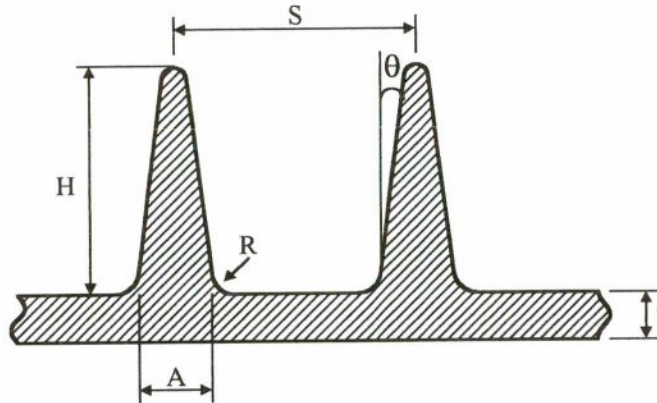


Figura E.2: Ilustração de duas nervuras seqüentes com suas principais dimensões literais [22, 53]

Tabela E.1: Recomendações de dimensões para projetos de nervuras

	TICONA [48]	REES [33]	CRACKNELL [50]	BERINS [56]	ROSATO E ROSATO [49]	MALLOY [15]	GE PLASTIC [22]
Espessura (A)	0,5t	0,5t	0,33t a 0,5t	0,5t	1,5t	0,4t a 0,4t	0,5t
Altura (H)	1,5t a 5t	2t	3t a 5t	1,5t	3t + 0,85	2,5t a 3t	3t
Raio (R)	0,125 mm		0,2 mm	0,125 mm	0,65 a 1 mm	0,25t a 0,4t	0,25t a 0,4t
Ângulo (θ)	0,5°			2,0°	0,25°	0,5° a 1,5°	0,5°

TICONA [48], MALLOY [15], BAYER AG [53] e [25] recomendam que a distancia entre nervuras seqüentes (S), seja no mínimo igual ao dobro da espessura da peça (2t). MALLOY [15] ainda considera que nervuras dispostas na forma de “X” ou “Z”, como ilustra a Figura E.3, fornece melhor rigidez a componentes sob esforço de torção, já que os mesmos melhoram a resistência à deformação angular.

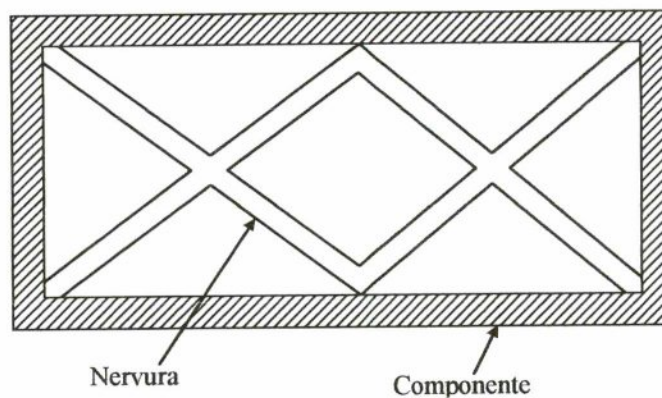


Figura E.3: Ilustração da nervura em forma de “X” ou “Z” [15]



- 3) **Ranuras em “V” e Corrugação:** estes elementos estruturais, geralmente são utilizados em componentes em que se necessita de um aumento de rigidez do mesmo. A Figura E.4 ilustra um exemplo destes dois elementos com dois momentos fletores,  $M_1$  e  $M_2$ , aplicados.

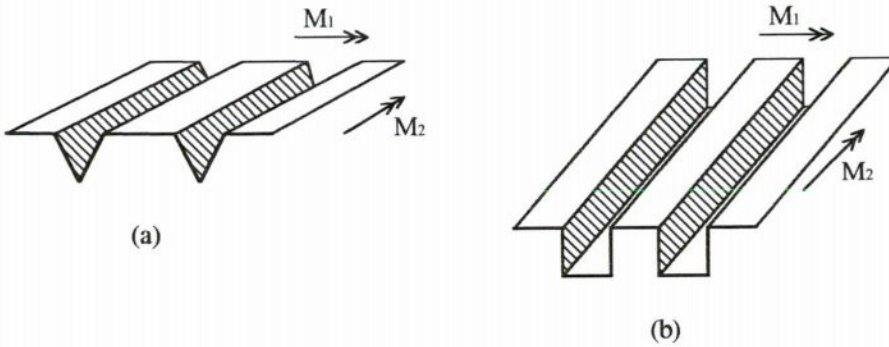


Figura E.4: Ilustração de estruturas ranhuradas (a) e corrugadas (b) [22]

A eficiência máxima das duas estruturas ilustradas na Figura E.3 é obtida quando a sua direção for perpendicular à direção do momento fletor aplicado. Nesta figura, as estruturas demonstram boa rigidez ao momento fletor  $M_1$ , enquanto que ao  $M_2$ , as mesmas demonstram pouca eficiência.

- 4) **Suportes Verticais (Bosses):** São protusões verticais utilizados como suporte de insertos ou como suporte guia para realizar montagens e devem ser projetados a fim de evitar problemas, como rechupe ou concentrações de tensão [48, 50, 53, 56]. A Figura E.5 ilustra um suporte vertical com suas dimensões literais, enquanto que a Tabela E.2 ilustra as principais recomendações de alguns autores para estas dimensões.

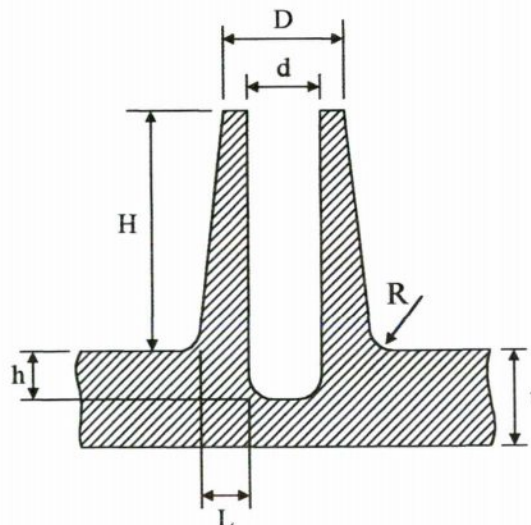


Figura E.5: Ilustração de um suporte vertical com suas principais dimensões literais [22, 56]

Tabela E.2: Recomendações de dimensões para projetos de um suporte vertical (*Boss*)

	BAYER AG [53]	BERINS [56]	GE PLASTIC [22]
Diâmetro externo (D)	2d a 2,4d	2d	2d
Altura (H)		2,5d	
Espessura (L)		0,6t	> 0,6t
Raio (R)	0,4 mm	0,8 a 1,6 mm	0,25t
Rebaixo (h)	0,3t		0

Geralmente, estes elementos são utilizados próximos à parede do componente. BAYER AG [53] recomenda que os suportes verticais (*Bosses*) não sejam fundidos à parede do componente, a fim de evitar que se formem regiões muito espessas e conseqüentemente a formação de problemas como rechupes ou vazios (*Voids*). A Figura E.6 ilustra duas situações.

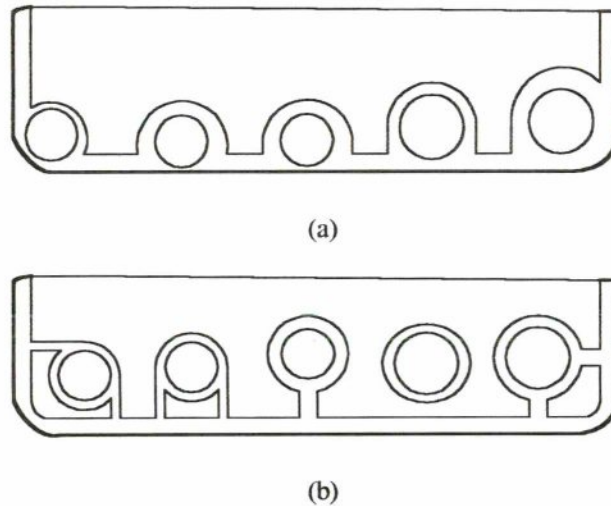


Figura E.6: Ilustração da conexão entre suportes verticais e as paredes do componente [15, 53]

Na Figura E.6.a ilustra-se a maneira incorreta de se posicionar um suporte vertical. Esta deve ser evitada. Na Figura E.6.b é ilustrado a maneira mais correta, em que são incorporadas algumas nervuras, a fim de fornecer rigidez suficiente. TICONA [48] sugere que a espessura da nervura seja igual à metade da espessura do componente.

5) **Reforço Lateral (*Gussets*):** São elementos estruturais semelhantes às nervuras e bastante utilizados para dar suporte a estruturas, como suportes verticais (*Bosses*), às paredes do componente e às nervuras. A Figura E.6 ilustra um reforço lateral com suas dimensões segundo indicação da GE PLASTIC [22]. Na Figura E.7.a é ilustrado os reforços laterais aplicados a uma parede lateral, enquanto que a Figura E.7.b ilustra a sua aplicação no reforço de um suporte vertical (*Boss*).

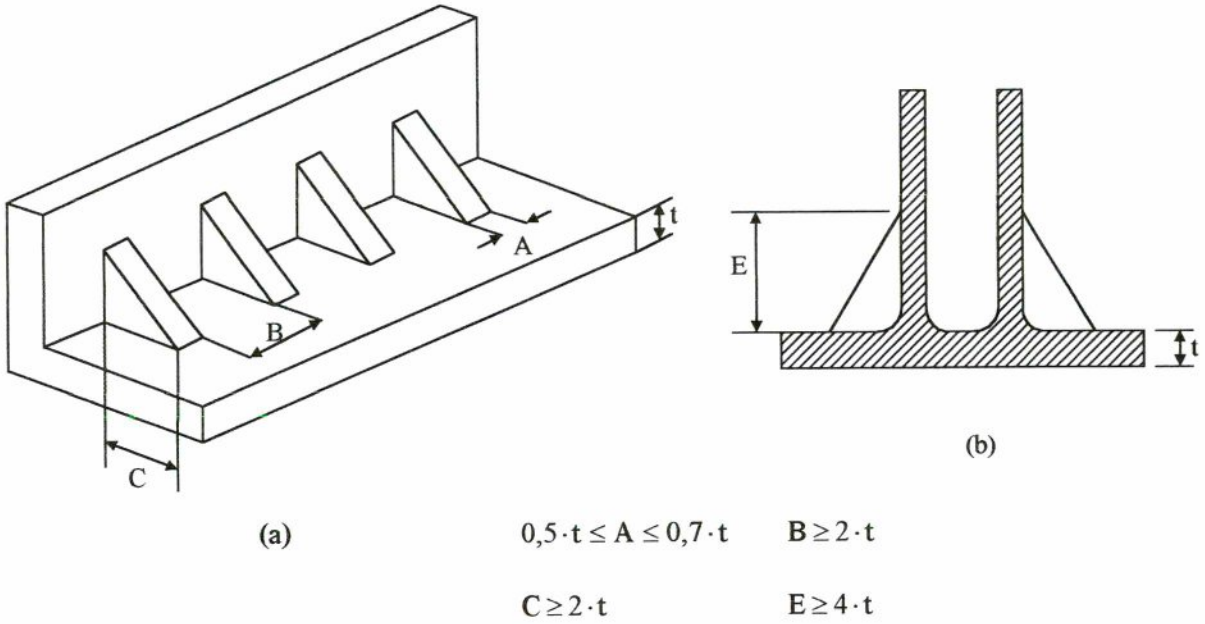


Figura E.7: Ilustração do reforço lateral (*Gusset*) com suas principais dimensões recomendadas pela GE PLASTIC [22]

- 6) **Raios de Arredondamento (*Fillets*):** cantos vivos em peças plásticas, certamente são os maiores contribuintes de falhas de peças. A aplicação de raios de arredondamento reduz as concentrações de tensões e ajuda a aumentar o desempenho mecânico do componente. Os raios de arredondamento também ajudam a facilitar o escoamento do material pela cavidade e devem sempre ser utilizados [56]. A Figura E.8 ilustra um raio de arredondamento enquanto que a Tabela E.3 ilustra alguns valores recomendados.

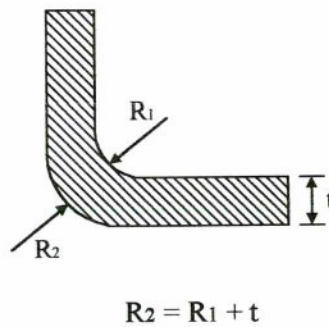


Figura E.8: Relação entre raios de arredondamento interno e externo [49]

Tabela E.3: Recomendações de dimensões para raios de arredondamento

	BERINS [56]	MALLOY [16]	ROSATO E ROSATO [49]	CRACKNELL [50]
Raio ( $R_1$ )	0,5 a 0,8 mm	0,4 mm	0,5 mm	$t/2$

O raio externo ( $R_2$ ) é determinado segundo a equação ilustrada na Figura E.8.



**ANEXO F**

---

**CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA DE PROJETO DE  
COMPONENTES DE PLÁSTICO E COEFICIENTES DE  
SEGURANÇA**

A determinação de um modo de falha é o primeiro e mais importante passo a ser considerado no projeto estrutural de um componente plástico. O modo de falha será influenciado pelo tipo de carregamento, pela resposta do material a este carregamento, da geometria do componente e das restrições impostas. Na engenharia, a falha de um componente pode ser definida como a ocorrência de qualquer evento considerado inaceitável que comprometa a integridade estrutural do componente [34]. A fim de retardar ao máximo uma possível falha de um componente o projetista deve fazer uso dos critérios de resistência de projeto (Von Mises, Tresca, tensão normal máxima, cônico, parabólico, deformação máxima, etc.) e do coeficiente de segurança. Os critérios mais recomendados para projeto de peças plásticas serão apresentados neste item.

Segundo RAO [78] e EHRENSTEIN e ERHARD [79], a tensão admissível para um determinado material é dado pela Equação F.1 e deve ser maior ou igual à tensão normal máxima que ocorre no componente, como ilustra a Equação F.2.

$$\sigma_{adm} = \frac{K}{S' \cdot A} \quad (\text{F.1})$$

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{m\acute{a}x} \quad (\text{F.2})$$

em que,  $K$  é a resistência do material (limite elástico ou tensão de ruptura);

$S'$  é o coeficiente de segurança;

$\sigma_{m\acute{a}x}$  é tensão normal máxima que age no componente e;

$A$  é o fator de redução do material que determina o grau ao qual a resistência do material ( $k$ ) deve ser reduzida, a fim de que se considere o efeito da temperatura, carregamento dinâmico, fatores associados com os processos de fabricação, possíveis ataques químicos, etc sobre a resistência do material. Este fator é dado pela Equação F.3.

$$A = A_T \cdot A_{ST} \cdot A_{din} \cdot A_t \cdot A_W \cdot A_f \quad (\text{F.3})$$

em que,  $A_T$  é o fator que considera a redução de resistência do material devido à ação da temperatura, e é dado pela Equação F.4.

$$A_T = \frac{1}{1 - k \cdot (T - 20)} \quad (\text{F.4})$$

Na Equação F.4,  $T$  é a temperatura de aplicação em graus Celsius e  $k$  depende do material. Alguns valores de  $k$  são ilustrados a seguir. O limite de aplicabilidade da Equação F.4 deve ser:  $20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C}$ .

Nylon 6 = 0,0125

Nylon 6/6 = 0,0112

PBT = 0,0095

Nylon reforçado com fibra de vidro = 0,0071

POM = 0,0082

ABS = 0,0117

-  $A_{ST}$  representa o decréscimo de resistência do material quando submetido a carregamentos de longa duração, ou seja, sob a ação do *creep*. A Tabela F.1 ilustra os valores recomendados para este fator.

Tabela F.1: Recomendações de valores para o fator  $A_{ST}$

TEMPO	Horas	Semanas	Meses	Anos
$A_{ST}$	1,3	1,6	1,7	2,0

-  $A_{din}$  é o fator que considera o decréscimo de resistência causado por carregamentos dinâmicos. Os valores utilizados para este fator variam de 1,3 a 1,7.

-  $A_t$  é o fator que leva em consideração a redução da resistência do material causado pelo tempo. Este fator depende das condições e do tempo de utilização e deve ser determinado experimentalmente.

-  $A_w$  é o fator que considera a redução de resistência do material pela umidade absorvida. Este fator é determinado pela Equação F.5, em que  $f$  é a porcentagem em água misturada e deve ser menor do que 3%.

$$A_w = \frac{1}{1 - 0,22 \cdot f} \quad (F.5)$$

-  $A_f$  leva em consideração a influência da fabricação. Recomenda-se utilizar 1,25.

A quantidade de fatores de redução (A) pode ser estendida ao quantos for necessária, esta quantidade depende da análise e considerações que estão sendo feitas.

TICONA [48] sugere a utilização do critério de Tresca ou cisalhamento máximo como critério de resistência de projeto de peças plásticas. A GE PLASTIC [34] recomenda que o critério de resistência seja selecionado segundo o comportamento mecânico do material combinado a um provável modo de falha e o tipo de carregamento. A Tabela F.2 ilustra as recomendações segundo GE PLASTIC [34].



Tabela F.2: Modos de falha e critérios de resistência de projeto segundo GE PLASTIC [34]

Comportamento do Material	Carregamento	Modo de Falha	Tipo de Análise	Critério
<b>Dúctil</b>	Monotônico, estático ou com baixas taxas de deformações	Deflexão excessiva	Deformação Elástica - Pequenas deformações; - Grandes deformações	Deformação máxima
	Monotônico, estático ou com baixas taxas de deformações	Escoamento	Deformação Inelástica: - Grandes deformações	Von Mises; Tresca.
<b>Frágil</b>	Monotônico, estático ou com baixas taxas de deformações	Fratura	Elástico linear	Tensão normal máxima Deformação máxima
<b>Dúctil</b>	Impacto	Desgaste dúctil	Grandes deformações	Deformação máxima
<b>Frágil</b>	Impacto	Fratura	Elástico linear	Tensão normal máxima; Critério de Sternstein
<b>Dúctil</b>	Cargas Cíclicas	Fratura	Elástico linear	Tensão normal máxima
<b>Frágil</b>	Cargas Cíclicas	Fratura	Elástico linear	Tensão normal máxima

O critério de Sternstein ilustrado no Tabela F.2 é determinado através da Equação F.6 [80, 81].

$$\sigma_{st} = |\sigma_1 - \sigma_3| = A(T) + \frac{B(T)}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (\text{F.6})$$

em que,  $\sigma_{st}$  é a tensão de Sternstein;

A e B são parâmetros do material que dependem da temperatura e;

$\sigma_1$  e  $\sigma_3$  são a primeira e a terceira tensão principal, respectivamente.

A tensão de Sternstein ( $\sigma_{st}$ ) deve ser maior ou igual a uma tensão admissível, na qual é calculada utilizando a tensão limite elástico ou de ruptura do material e um coeficiente de segurança apropriado.

Como está ilustrado na Tabela F.2, o critério de Von Mises geralmente é empregado no projeto de peças plásticas. Segundo EHRENSTEIN e ERHARD [79], sua utilização pode conduzir a componentes super ou subdimensionados, pois este critério foi desenvolvido para ser utilizado em projeto de componentes metálicos e não considera a ação do componente hidrostática do tensor tensão.

Os limites elásticos dos materiais metálicos sob tração e compressão são similares e dados experimentais têm demonstrado que esta propriedade não é afetada pelo tensor hidrostático. Desta forma, para os metais a componente hidrostática do tensor tensão não aparece no critério de Von Mises, que é o mais utilizado como critério para projetos de peças metálicas. Em contraste com estes materiais, os materiais poliméricos demonstram tensão limite elástico mais alto em compressão que em tração. Além disto, testes realizados demonstraram que a tensão limite elástico do material polimérico varia com a tensão hidrostática. Em EHRENSTEIN e ERHARD [79] há um gráfico ilustrando este fato. Ou seja, os materiais poliméricos são muito sensíveis ao tensor hidrostático do que o dos metais. Assim, para adequar o critério de Von Mises ao projeto de peças plásticas estes autores sugerem incluir a componente do tensor hidrostático no mesmo [25, 45, 79, 80, 82]. A Equação F.7 ilustra o critério de Von Mises modificado com a introdução da componente hidrostática.

$$\sigma'_{VM} = \sigma'_{oct} \pm \mu \cdot \sigma_{hid} \quad (F.7)$$

em que,  $\sigma'_{VM}$  é a tensão de Von Mises modificada;

$\sigma'_{oct}$  é tensão octaédrica crítica determinada pela Equação F.8;

$\sigma_{hid}$  é o tensor hidrostático determinado pela Equação F.9 e;

$\mu$  é o parâmetro que representa a dependência da tensão limite elástico do material sobre o tensor hidrostático. Este parâmetro é determinado pela Equação F.10.

$$\sigma'_{oct} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{\sigma_{yc} \cdot \sigma_{yt}}{(\sigma_{yc} + \sigma_{yt})} \quad (F.8)$$

$$\sigma_{hid} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (F.9)$$

$$\mu = \frac{\sqrt{2} \cdot (\sigma_{yc} - \sigma_{yt})}{(\sigma_{yc} + \sigma_{yt})} \quad (F.10)$$

em que,  $\sigma_{yc}$  e  $\sigma_{yt}$  são o limite de resistência à compressão e à tração do material, respectivamente e;

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são a primeira, segunda e terceira tensões principais, respectivamente.

O critério ilustrado na Equação F.7 é também conhecido como critério de Drucker-Prager. A demonstração do desenvolvimento das equações F.8, F.9 e F.10 pode ser visualizada em MILLER [45].



BONTEN *et al* [82], RAO [78] e EHRENSTEIN e ERHARD [79] consideram que os critérios cônicos e parabólicos são mais adequados para projetos de componentes plásticos. Estes critérios são ilustrados pelas Equações F.11 e F.12 e também são conhecidos como critério de Drucker-Prager.

$$\sigma_{\text{cônico}} = \frac{m-1}{2m} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \frac{m+1}{2\sqrt{2m}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (\text{F.11})$$

$$\sigma_{\text{parab}} = \frac{m-1}{2m} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \sqrt{\left(\frac{m-1}{2m}\right)^2 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{2m} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (\text{F.12})$$

em que,  $\sigma_{\text{cônico}}$  é a tensão cônica equivalente;

$\sigma_{\text{parab}}$  é a tensão parabólica equivalente;

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são a primeira, segunda e terceira tensões principais, respectivamente e;

$m$  é a razão entre o limite de resistência à compressão ( $\sigma_{yc}$ ) e à tração ( $\sigma_{yt}$ ) do material.

A vantagem de utilizar o critério cônico ou parabólico é que não é necessário conhecer o comportamento do material, ou seja, para qualquer tipo de material termoplástico, mas tem a desvantagem de ser necessário conhecer a resistência à compressão do material, que nem sempre é fácil de se obter. Esta propriedade deve ser obtida diretamente do fabricante do material quando a mesma não estiver disponível nos bancos de dados.

Em tratando-se de materiais compostos, MILLER [45] considera que a falha destes materiais ocorre no material matriz devido a um carregamento transversal, pela fratura das fibras sob tensão ou por micro-flambagem das mesmas devido a esforços de compressão ou devido à separação da interface fibras-matriz devido a cisalhamentos. Desta forma, recomenda-se a utilização do critério de Tsai-Hill, o qual é visualizado através da Equação F.13. A falha ocorrerá se a parte esquerda da Equação F.13 exceder a unidade.

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{y\text{long}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{y\text{transv}}}\right)^2 + \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{(\sigma_{y\text{long}})^2} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{\tau_y^2} = 1 \quad (\text{F.13})$$

em que,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são a primeira e segunda tensão principal, respectivamente;

$\sigma_{y\text{long}}$  e  $\sigma_{y\text{transv}}$  são a resistência do material na direção longitudinal e transversal, respectivamente e;

$\tau_y$  é o limite de resistência ao cisalhamento do material.



A utilização de coeficientes de segurança em projetos de engenharia, utilizando quase todos os materiais é uma prática muito comum, e com os materiais plásticos não é diferente. É de responsabilidade do projetista antecipar que o componente nem sempre será fabricado ou utilizado como planejado. Segundo GE PLASTIC [22], há vários motivos pelos quais um componente pode perder suas propriedades durante sua vida útil. Algumas delas estão além do controle do projetista e incluem:

- a) Exposição a substâncias químicas;
- b) Processamento inadequado, como secagem insuficiente ou aquecimento excessivo do material;
- c) Desgaste do molde resultando em modificações das dimensões do componente;
- d) O componente é utilizado em temperaturas acima do máximo esperado;
- e) O componente é utilizado de forma inadequada e;
- f) Há tensões residuais excessivas.

Geralmente, quanto maior o risco de falha, maior é o fator de segurança a ser utilizado. Em algumas empresas os coeficientes de segurança são determinados através de normas técnicas. MALLOY [15] considera que o coeficiente de segurança (S) pode ser determinado através da Equação F.14.

$$S = \frac{1}{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4} \quad (\text{F.14})$$

em que,  $S_1$  representa o risco de lesão às pessoas provenientes de uma falha

Não há risco = 1,0

Há possibilidade de lesões = 0,7

Provável ocorrência de Lesões = 0,5

$S_2$  representa o fator de processamento

Material virgem = 1,0

Fibras orientadas na direção das tensões máximas = 0,8

Fibras orientadas na direção perpendicular das tensões máximas = 0,5

Orientação aleatória = 0,7

Orientação desconhecida = 0,5

$S_3$  representa a precisão dos cálculos

Utilização de sistemas CAE = 1,0

Cálculos Analíticos = 0,75

Estimativas = 0,5

$S_4$  representa a degradação do material

Deve ser menor que 1,0

Para materiais compostos a Tabela F.4 ilustra algumas recomendações para coeficientes de segurança.

Tabela F.4: Recomendações de valores de coeficientes de segurança para materiais compostos [51]

Tipo de Carregamento	Coefficiente de Segurança
Estático de baixa duração	2
Estático de longa duração	4
Cíclico	5
Impacto	8

**ANEXO G**

---

**RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO DE  
COMPONENTES DE PLÁSTICO SOB  
CARREGAMENTO DINÂMICO**



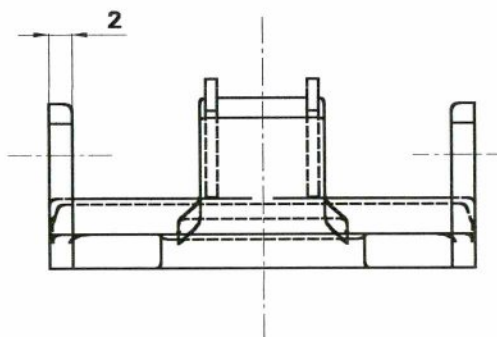
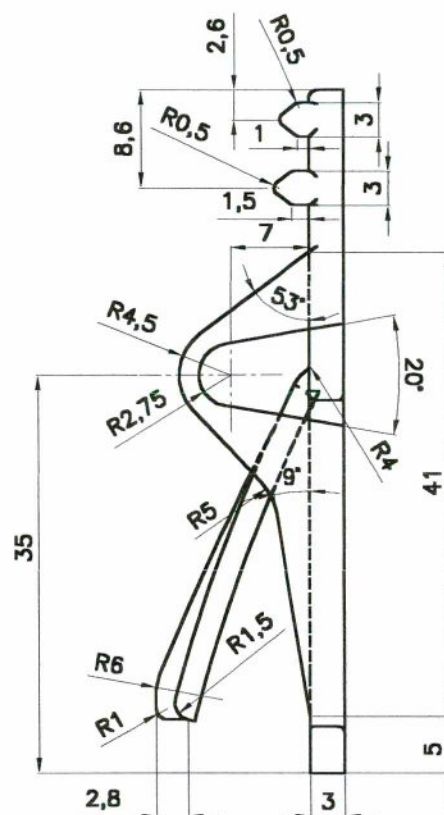
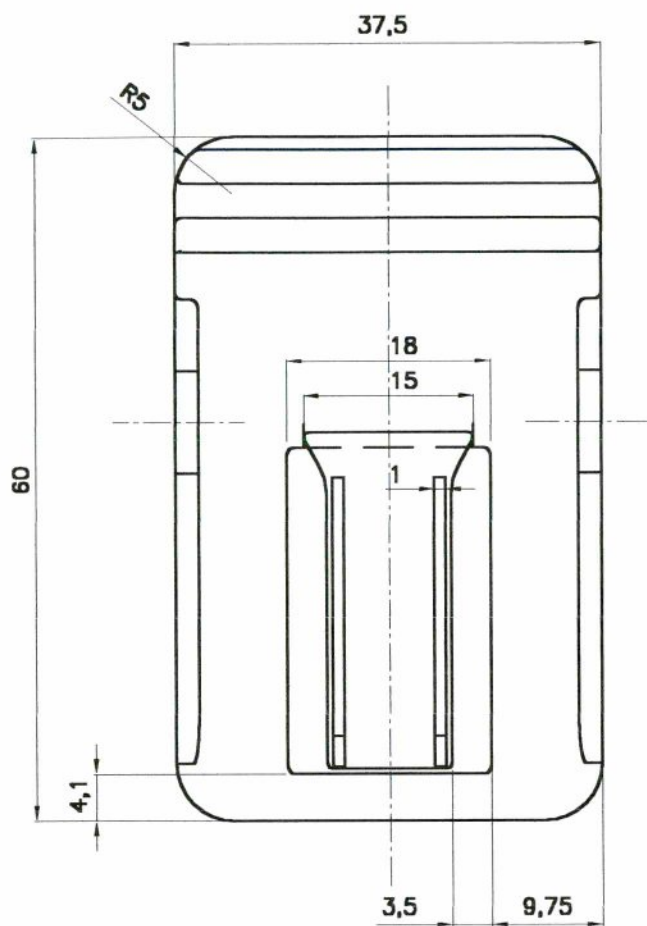
Segundo BAYER AG [53], ao grupo dos carregamentos dinâmicos constitui-se o carregamento cíclico e o de impacto. EZRIN [62] recomenda as seguintes orientações para serem consideradas no projeto de um componente sob fadiga ou impacto:

- 1) Determinar as solicitações estáticas presentes no componente, além das cargas dinâmicas;
- 2) Determinar a magnitude e a duração das cargas dinâmicas. Se possível, um diagrama relacionando o carregamento e o tempo deve ser construído para obter a frequência de aplicação da carga;
- 3) Em elementos de máquinas, geralmente tem-se componentes em movimentos. Isto indica que o componente está sendo acelerado periodicamente e que carregamentos inerciais estão sendo aplicados ao componente através das acelerações. A magnitude das tensões geradas por estas forças devem ser calculadas e adicionadas às tensões provenientes de carregamentos externos. Há casos em que as forças inerciais são muito importantes, se as mesmas forem desprezadas falha prematura do componente pode ocorrer;
- 4) Quando um componente plástico é dinamicamente carregado, boa parte da energia mecânica é transformada em calor, pelo efeito da histerese. Desta forma, neste tipo de projeto as propriedades térmicas como capacidade térmica, condutividade térmica, etc. devem ser consideradas no momento da seleção do material mais adequado;
- 5) Determinar o nível de risco que uma eventual falha do componente pode ocasionar ao sistema ao qual o mesmo está inserido ou às pessoas que o utilizem. A determinação prévia do modo de falha do componente e o perigo associado a esta falha deve ser avaliado para determinar o critério de projeto adequado, para, então, garantir a segurança do sistema e de seu usuário.
- 6) Determinar o efeito do ambiente sobre o desempenho do componente, pois a dissipação de calor é um fator crítico em aplicações com carregamentos dinâmicos, em vista disso é essencial que as características térmicas do ambiente sejam determinadas tão preciso quanto possível. O efeito de outros fatores ambientais sobre a degradação das propriedades físicas deveria ser considerado, a fim de determinar a vida útil do componente sob carregamento dinâmico;
- 7) O efeito resultante da fadiga deve ser determinado. Em geral, este é o fator limitante da vida útil do componente, a fim de que se evite maiores estragos ao sistema devido ao enfraquecimento do componente mediante a seu aquecimento pelo carregamento dinâmico e degradação ambiental do material;
- 8) Realizar testes para avaliar o desempenho do componente sob o carregamento dinâmico e o efeito do processamento sobre a qualidade do mesmo.

**ANEXO H**

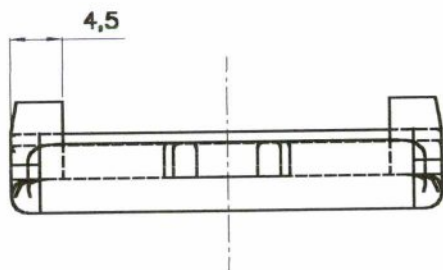
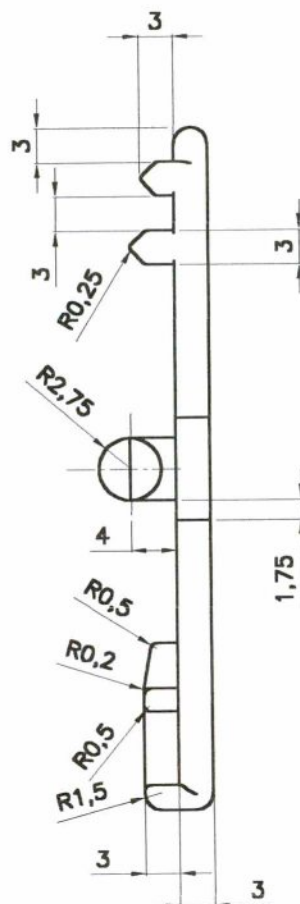
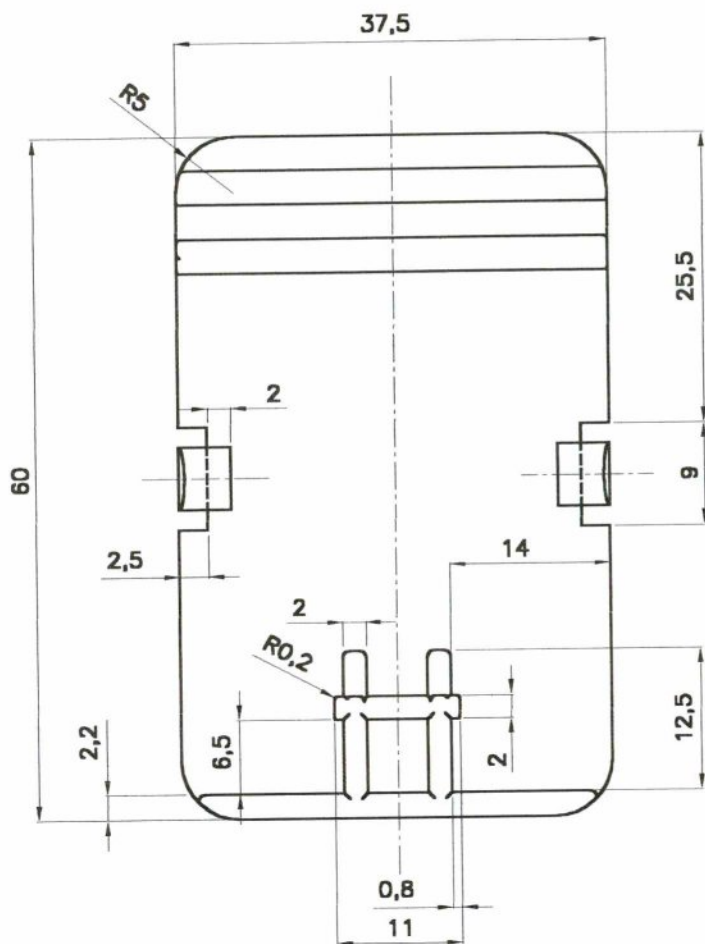
---

**DESENHOS DETALHADOS DOS COMPONENTES E  
DOS MOLDES UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE CASO**

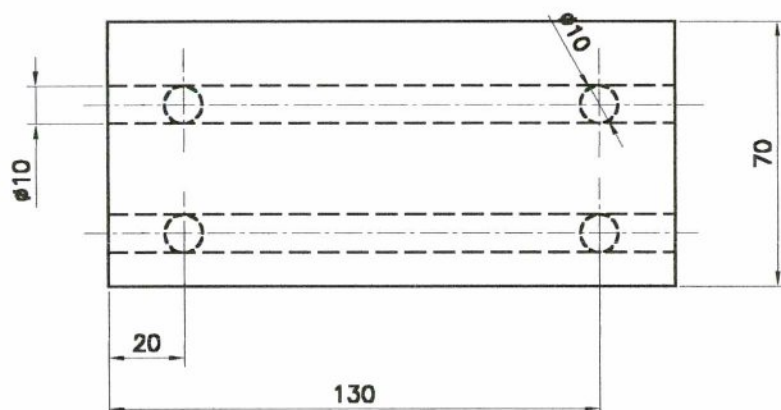
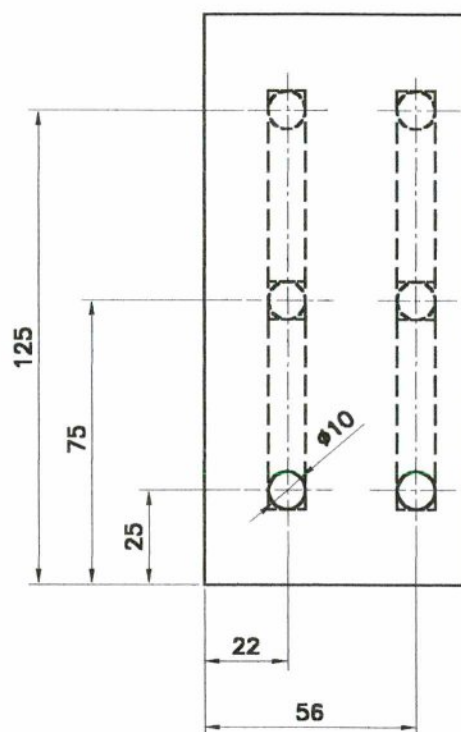
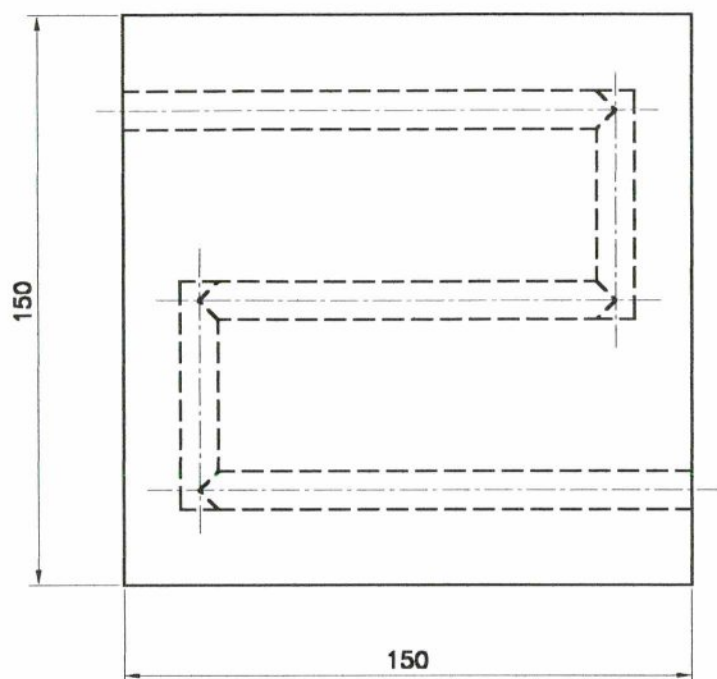


Item/Ref	Quantidade	Título/Nome, designação, material, dimensão etc	Artigo No./Referencia		
Projetado por WESLEY	Verificado por WESLEY	Aprovado por - Data WESLEY - 04/05/02	Nome Arquivo PRENDEDOR_1	Data 04/05/02	Escala 1,5:1
<b>CIMJECT</b>			ANEXO H.1		
			PRENDEDOR 1	Edição 1	Página 213

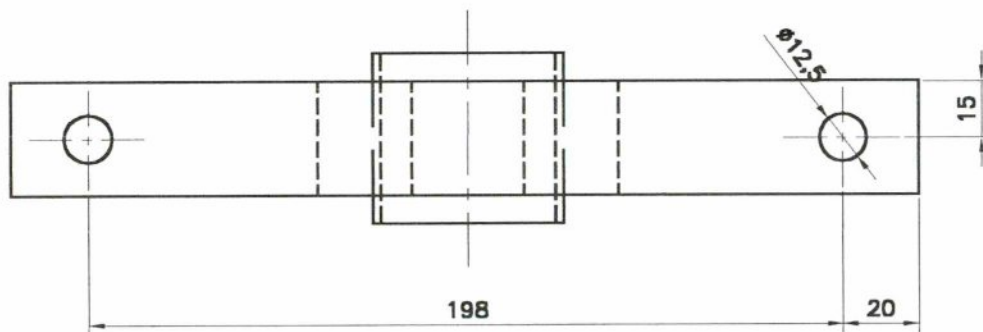
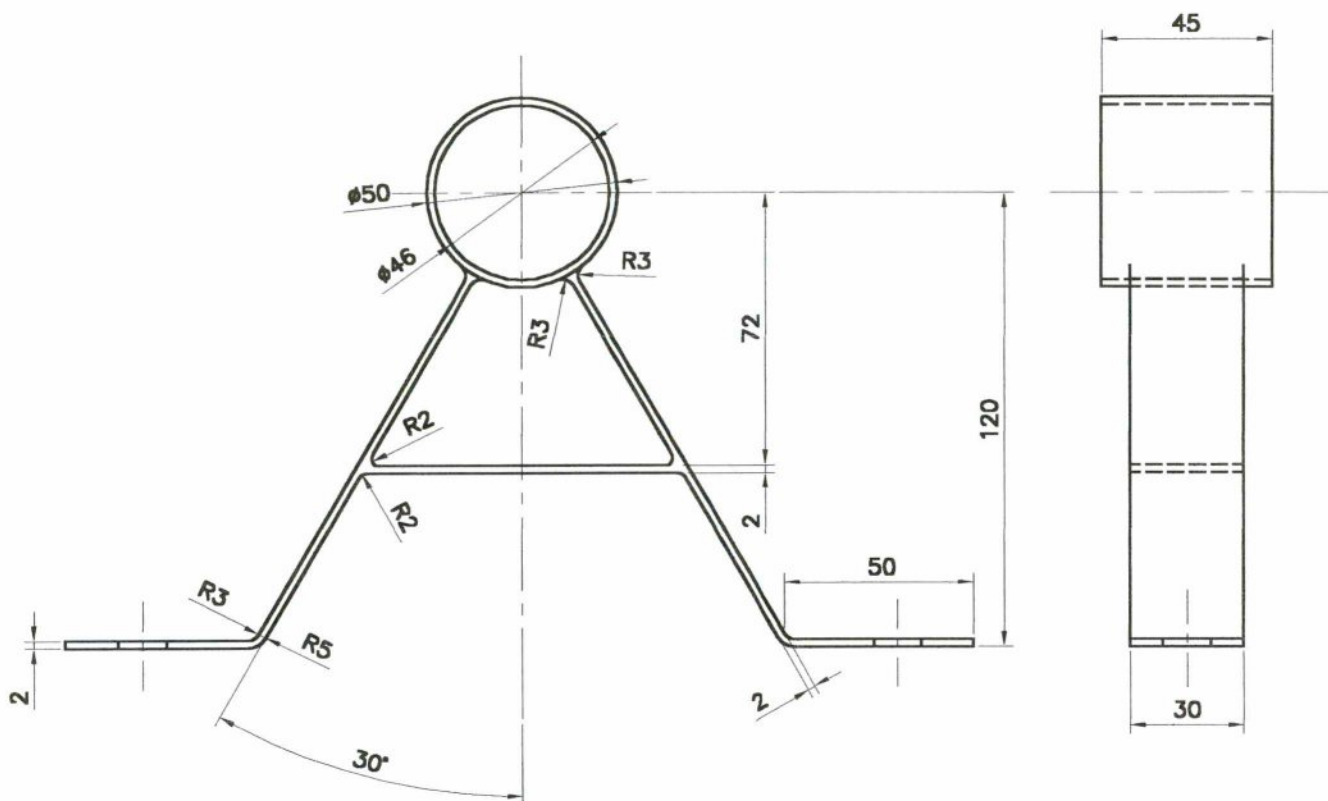




Item/Ref	Quantidade	Título/Nome, designação, material, dimensão etc	Artigo No./Referencia			
Projetado por WESLEY	Verificado por WESLEY	Aprovado por - Data WESLEY - 04/05/02	Nome Arquivo PRENDEDOR_2	Data 04/05/02	Escala 1,5:1	
<b>CIMJECT</b>			ANEXO H.2			
			PRENDEDOR 2		Edição 1	Página 214

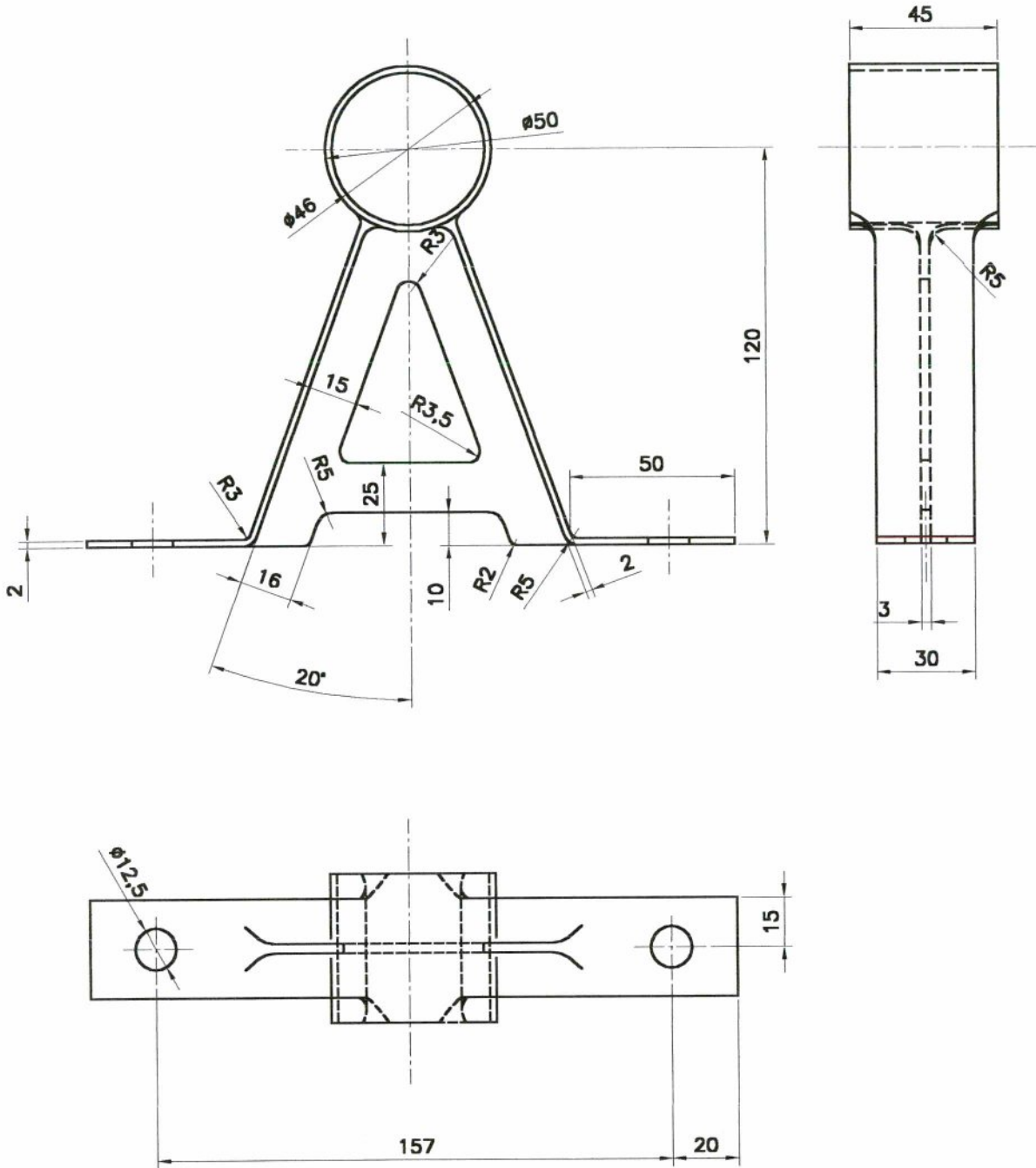


01	01	Molde, Aço P20, 150x150x70 mm			
Item/Ref	Quantidade	Título/Nome, designação, material, dimensão etc			Artigo No./Referencia
Projetado por WESLEY		Verificado por WESLEY	Aprovado por - Data WESLEY - 05/05/02	Nome Arquivo MOLDE	Data 05/05/02
<b>CIMJECT</b>		ANEXO H.3			
		MOLDE PREDEDOR		Edição 1	Página 215

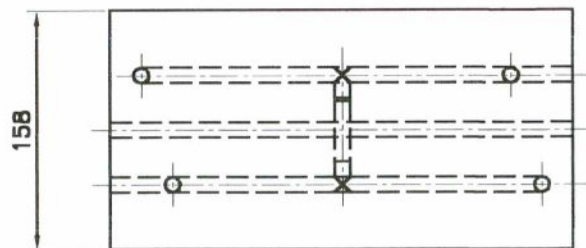
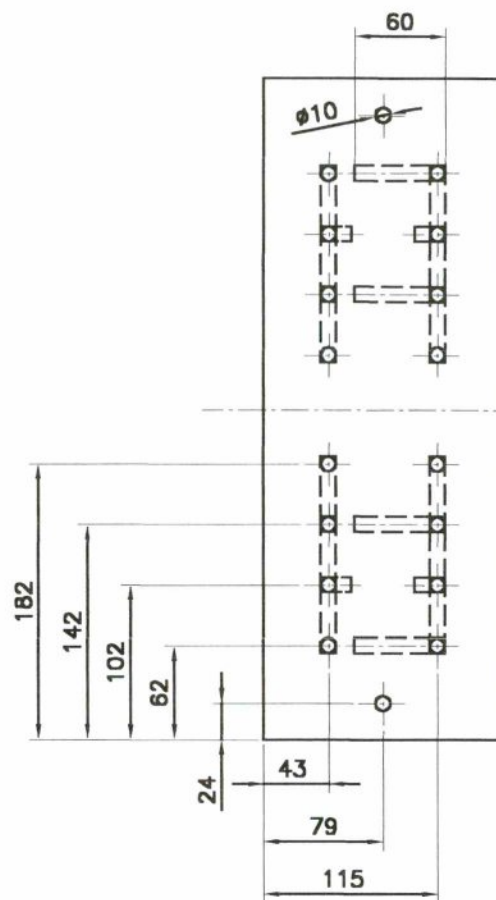
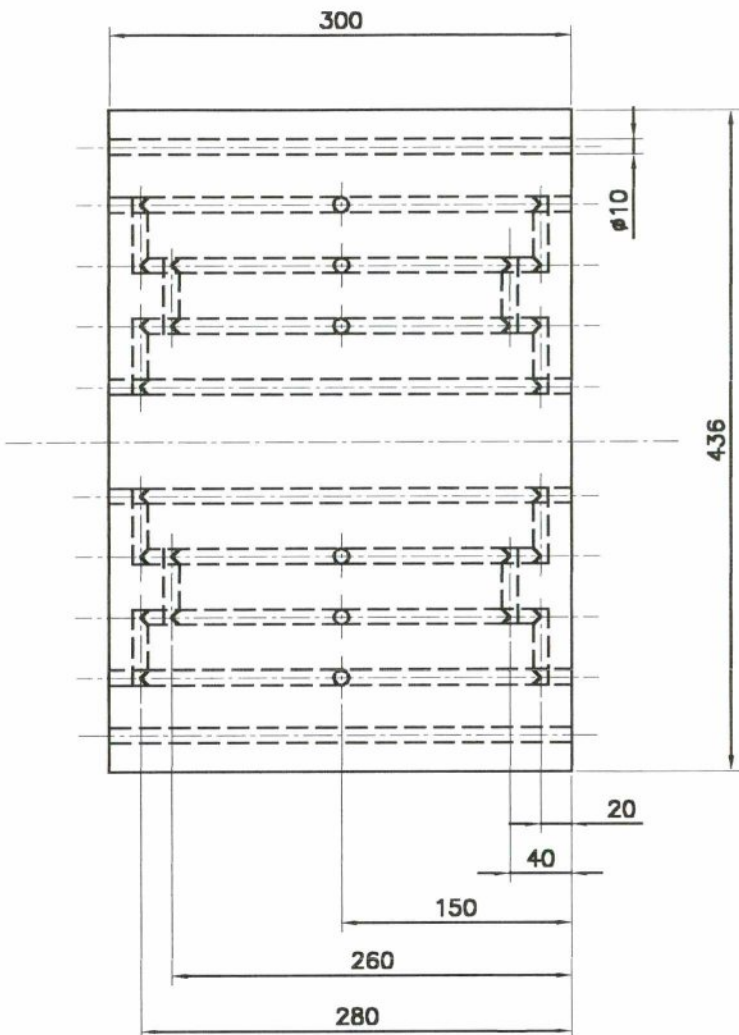


Item/Ref.	Quantidade	Título/Nome, designação, material, dimensão etc	Artigo No./Referencia		
Projetado por WESLEY	Verificado por WESLEY	Aprovado por - Data WESLEY - 05/05/02	Nome Arquivo APOIO	Data 05/05/02	Escala 1:2
<b>CIMJECT</b>			ANEXO H.4		
			APOIO ORIGINAL	Edição 1	Página 216





Item/Ref	Quantidade	Título/Nome, designação, material, dimensão etc	Artigo No./Referencia		
Projetado por WESLEY	Verificado por WESLEY	Aprovado por - Data WESLEY - 05/05/02	Nome Arquivo ANG_RED_NER	Data 05/05/02	Escala 1:2
<b>CIMJECT</b>			ANEXO H.5		
			APOIO ANGULO REDUZIDO	Edição 1	Página 217



01	01	Molde, Aço P20, 436x300x158 mm			
Item/Ref	Quantidade	Título/Nome, designação, material, dimensão etc			Artigo No./Referência
Projetado por WESLEY	Verificado por WESLEY	Aprovado por - Data WESLEY - 05/05/02	Nome Arquivo MOLDE	Data 05/05/02	Escala 1:5
<b>CIMJECT</b>			ANEXO H.6		
			MOLDE APOIO	Edição 1	Página 218