

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

**APLICAÇÃO DO PROCESSO DE SOBREENJEÇÃO EM INSERTOS DE
TERMOPLÁSTICO UTILIZANDO MOLDES DE FABRICAÇÃO RÁPIDA**

Tese submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO LUÍS PEIXOTO

FLORIANÓPOLIS, Agosto de 2009

APLICAÇÃO DO PROCESSO DE SOBREENJEÇÃO EM INSERTOS DE
TERMOPLÁSTICO EM MOLDES DE FABRICAÇÃO RÁPIDA PELA TÉCNICA DE
VAZAMENTO DE RESINA EPÓXI

FERNANDO LUÍS PEIXOTO

esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

CARLOS HENRIQUE AHRENS, Dr. Eng. - Orientador

GEAN VITOR SALMORIA, Dr. Ing. – Co-Orientador

EDUARDO ALBERTO FRANCELLO, D.Sc.- Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

CARLOS HENRIQUE AHRENS, Dr. Eng^o - UFSC/Presidente

PROF JONAS DE CARVALHO, Ph. D. – USP – S CARLOS/Relator

PROFESSOR NERI VOLPATO, Ph. D. - UTFPR

PROFESSOR GUILHERME MARIS DE OLIVEIRA BARRA, Dr - UFSC

PROFESSOR PAULO ANTÔNIO PEREIRA WENDHAUSEN, Dr. UFSC

DEDICATÓRIA

À Deus acima de todas as coisas

**À minha Mãe, que em todos os momentos
de sua vida não poupou esforços para me apoiar e
impedir que eu desistisse de concretizar
todos os desafios aos quais me propus a realizar**

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores, professores Carlos Ahrens e Gean Salmoria, pela orientação, incentivo e apoio para a realização deste trabalho.

Ao grande amigo Lelo por estar sempre pronto para ajudar, aconselhar e dividir frustrações, mas também por ter um ótimo senso de humor e aturar o amigo no dia-a-dia. Aos grandes amigos do Cimject Priscila, Paggi, Eduardo, Everson, Fernandinho, Aldren, André Germanovix, André Bueno, Anderson, Andrei, Caio, Clauber, Cristiano, Diovani, , Foggiatto, Fred, Guto Malandrão, Humberto, Janaína, João, Kurt, Lafratta, Mathias, Michel, Pedro, Pereira,, Pacheco, Fala-mansa, pelo companheirismo, dedicação e tornar trabalho em equipe uma atividade prazerosa.

Ao grande amigo Bork, que muito me auxiliou tanto na finalização de meu mestrado quanto de meu doutorado.

Aos amigos e colegas do CEFET-RS, que entenderam a situação em que eu me encontrava e me apoiaram na conclusão do doutorado.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	v
LISTA DE TABELAS	xv
TERMINOLOGIA	xviii
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
Capítulo 1	22
Introdução.....	22
1 Introdução.....	23
1.1 Contextualização e Tema da Pesquisa	23
1.2 Justificativas e Motivações para o Trabalho	24
1.3 Objetivos	26
1.4 Estruturação do Trabalho de Doutorado	27
2 Revisão Bibliográfica	29
2.1 Fundamentos Teóricos sobre Processo de Moldagem por Injeção	29
2.1.1 Escoamento do Polímero na Cavidade do Molde.....	30
2.1.2 Variáveis de Controle do Processo de Injeção	32
2.1.3 Índices Termomecânicos do Processo de Injeção.....	34
2.2 Processamento de Peças de Paredes Finas	36
2.2.1 Definição de Peças de Paredes Finas.....	36
2.2.2 Características Relativas ao Preenchimento de Moldes de Paredes Finas	37
2.3 Principais Critérios de Projeto que Afetam o Preenchimento dos Moldes e as Propriedades dos Componentes Injetados	39
2.3.1 Número e Posicionamento dos Pontos de Injeção	39
2.3.2 Especificação do Material Polimérico	43
2.4 Processos de Acabamento e Decoração de Peças Injetadas.....	45
2.4.1 Principais Processos de Moldagem com mais de um Componente.....	49
2.5 Fabricação e Utilização de Moldes pela Técnica de Vazamento de Resina Epóxi na Moldagem por Sobreinjeção.....	54
2.6 Princípios Gerais sobre a Adesão entre Polímeros	60
2.6.1 Principais Mecanismos de Adesão	60
2.6.2 Investigações sobre adesão	64

2.7	Considerações Finais.....	66
3	Materiais e Métodos	69
3.1	Experimentos Preliminares	69
3.1.1	Moldagem de Polímeros Transparentes em um Molde de Parede Fina Fabricado por Vazamento de Resina Epóxi.....	69
3.1.2	Sobreinjeção de um Inseto de Termoplástico.....	70
3.1.3	Encapsulamento de um Inseto de Termoplástico Através do Processo de Sobreinjeção.....	71
3.2	Experimentos Específicos	72
3.2.1	Identificação dos Focos para os Experimentos Específicos	72
3.2.2	Metodologia experimental Adotada	74
3.2.3	Polímeros Utilizados nas Investigações.....	76
3.2.4	Projeto e Fabricação dos Moldes e Corpos de Prova	80
3.2.5	Simulação do Processo de Sobreinjeção em um Software CAE Comercial e Cálculo dos Índices Térmicos.....	86
3.2.6	Planejamento Experimental para os Ensaios de Moldagem por Sobreinjeção.....	89
3.2.7	Ensaios de Moldagem por Sobreinjeção.....	96
3.2.8	Ensaios Mecânicos dos Corpos de Prova Produzidos por Sobreinjeção	98
4	Resultados e Discussões.....	101
4.1	Influência das Variáveis de Processo nos Parâmetros do Escoamento no Processo de Sobreinjeção dos Insetos de ABS	101
4.1.1	Resultados e Discussões Referentes às Simulações do Experimento Screening.....	102
4.1.2	Resultados e Discussões Referentes às Simulações do Experimento Fatorial PC/ABS	112
4.1.3	Resultados e Discussões Referentes às Simulações do Experimento Fatorial SAN/ABS ...	119
4.2	Investigação dos Efeitos das Macrovariáveis de Processamento sobre a Força de Adesão entre os Insetos de ABS e os Componentes Sobreinjetados.....	126
4.2.1	- Investigação da Influência das Macrovariáveis do Processo na Adesão por Meio de Ensaios de Tração dos Corpos de Prova Obtidos Segundo o Procedimento Experimental Screening....	127
4.2.2	- Investigação da Influência das Macrovariáveis do Processo na Adesão por Meio de Ensaios de Tração dos Corpos de Prova Obtidos Segundo o Experimento Fatorial Completo PC/ABS	133

4.2.3 - Investigação da Influência das Macrovariáveis do Processo na Adesão por Meio de Ensaios de Tração dos Corpos de Prova Obtidos Segundo o Experimento Fatorial Completo SAN/ABS	143
4.2.4 Ensaios Dinâmicos-Mecânicos de Corpos de Prova Produzidos por Sobreinjeção	151
4.3 Correlação entre os Parâmetros do Escoamento do Polímero Obtidos por meio da Simulação do Processo de Sobreinjeção e as Forças de Adesão Obtidas nos Ensaios de Tração.	160
4.3.1 Correlação entre os Parâmetros das Simulações no Moldflow e as Forças de Adesão Obtidas nos Ensaios de Tração para o Experimento Fatorial PC/ABS.....	161
4.3.2 Correlação entre os Parâmetros das Simulações no Moldflow e as Forças de Adesão Obtidas nos Ensaios de Tração para o Experimento Fatorial SAN/ABS.....	165
5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	169
5.1 Contribuição científica do trabalho.....	174
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	174
6 Referências Bibliográficas.....	176
Anexo	181

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perfil de velocidades do escoamento do polímero fundido dentro de um molde de injeção visto em um corte transversal (MICHAELI, 1995).	30
Figura 2.2 - Vista em corte das representações gráficas dos perfis de velocidade, temperatura e taxa de cisalhamento durante o escoamento do polímero em um molde de injeção (MICHAELI, 1995).	32
Figura 2.3 – Comportamento da pressão de injeção com a variação do tempo de injeção. Adaptado de ADVANCED CAE TECHNOLOGY (1997).	38
Figura 2.4 – Ilustração da formação de linhas de solda em função do posicionamento do ponto de injeção no preenchimento de uma peça. Adaptado de MALLOY (1994).	41
Figura 2.5 – Esquema exemplificando a formação de uma linha de solda em uma peça injetada. Adaptado de MALLOY (1994).	42
Figura 2.6 - Exemplo de uma linha de solda visível em uma peça injetada (fonte Basf plastics).	42
Figura 2.7 – Curvas de fluxo em uma espiral. À esquerda, são apresentadas as curvas de máximo comprimento de fluxo atingido como função da espessura de parede e das condições de processamento, e à direita, como função da pressão de injeção. Adaptado de MALLOY (1995).	45
Figura 2.8 - Processos de acabamento necessários para uma posterior decoração da peça injetada Adaptado de Rosato (1995).	45
Figura 2.9 - Classificação segundo Johannaber e Michaeli (2004) dos processos especiais de injeção com mais de um componente dentro da cavidade.	47
Figura 2.10 - Exemplos de componentes fabricados pela técnica de injeção sobre insertos metálicos e não metálicos.	50
Figura 2.11 - Exemplo de aplicação do processo de injeção sobre insertos de plástico, onde é realizada a união de duas metades por uma junta injetada. Adaptado de Braun e Enewoldsen (1999).	51
Figura 2.12 - Exemplo de aplicação do processo de In Mold Decoration na indústria automotiva. Adaptado de Braun e Enewoldsen (1999).	52
Figura 2.13 - Exemplos de produtos da linha de eletrônicos produzidos pelo processo IMD. Adaptado de © Carl Hanser Verlag, München. 2003 e © General Electric Company 1997-2004.	53

Figura 2.14 Representação esquemática do processo de estereolitografia.	55
Figura 2.15 Seqüência esquemática do processo de fabricação de moldes pelo vazamento de resina epóxi (SABINO NETTO 2008).	56
Figura 2.16 - Desenho esquemático do processo de adesão por união mecânica entre substrato (inserto) e polímero sobreinjetado (adaptado de PACKHAM, 2005).	61
Figura 2.17 - Figura esquemática do processo de adesão por atração eletrostática entre as cadeias de polímeros unidos por sobreinjeção, onde δ^+ e δ^- representam as cargas positivas e negativas que produzem a atração entre as cadeias poliméricas dos componentes a serem unidos (adaptado de PACKHAM, 2005).	62
Figura 2.18 - Figura esquemática representando o processo de adesão por meio de forças de Van der Waals entre as cadeias do polímero sobre-injetado e o substrato ou inserto (adaptado de PACKHAM, 2005).	62
Figura 2.19 - Figura esquemática mostrando o processo de adesão por quimiossorção entre substrato (inserto) e adesivo (componente sobre-injetado no contexto deste trabalho) – (adaptado de PACKHAM, 2005).	63
Figura 2.20 - Desenho esquemático representativo do processo de interdifusão entre dois polímeros diferentes que possuem afinidade química (adaptado de PACKHAM, 2005).	64
Figura 3.1 - Comportamento da viscosidade cisalhante do Lustran ABS 301M FC.	76
Figura 3.2 - Comportamento da viscosidade cisalhante do <i>Durolon</i> HFR1700(Lexan ex1).	78
Figura 3.3 - Comportamento da viscosidade cisalhante do <i>Luran SAN 358N</i>	80
Figura 3.4 - Geometria utilizada para o ensaio de adesão entre polímeros (WOOL 2005).	81
Figura 3.5 – Modelos geométricos em CAD do inserto em ABS (a), utilizado no processo de sobreinjeção, e do corpo de prova para ensaio de tração (b), obtido após a moldagem do componente sobreinjetado.	82
Figura 3.6 - Representação esquemática bidimensional do corpo de prova para ensaios de tração. .	82
Figura 3.7 - Desenho esquemático do molde para o processo de sobreinjeção dos insertos de ABS (modificar para incluir o projeto segundo a descrição anterior).	83
Figura 3.8 - Representação esquemática bidimensional do inserto destinado a moldagem por sobreinjeção dos corpos de prova para ensaios dinâmicos-mecânicos.	84
Figura 3.9 - Representação esquemática bidimensional do corpo de prova para ensaios dinâmico-mecânicos.	84

Figura 3.10 - Modelo computacional em CAD representativo da geometria utilizada para os ensaios dinâmico-mecânicos de fadiga e flexão, onde (b) representa o inserto de ABS e (a) a camada sobreinjetada em PC ou SAN.....	85
Figura 3.11 - Desenho esquemático em 2D do molde utilizado para a sobre-injeção dos corpos de prova para os ensaios em DMA.....	85
Figura 3.12 – Relação de dependência das macrovariáveis de controle do processo de injeção das variáveis de controle da máquina injetora, propriedades do polímero, do fluido de arrefecimento e do molde.	90
Tabela 3.10 - Níveis dos fatores para o delineamento do experimento fatorial SAN/ABS.	95
Figura 4.1 - Diagrama de Pareto para a determinação das macrovariáveis estatisticamente significativas sobre a variação da temperatura de massa do polímero obtida nas simulações (T_b), referente ao experimento screening.....	104
Figura 4.2 - Diagrama de Pareto para a determinação das macrovariáveis estatisticamente significativas sobre a variação da temperatura da pele obtida na simulação do preenchimento (T_s), referente ao experimento screening.....	104
Figura 4.3 - Diagrama de Pareto para a determinação das macrovariáveis estatisticamente significativas sobre a variação da temperatura da interface (T_i) entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato obtido nas simulações, referentes ao experimento screening.....	105
Figura 4.4 - Diagrama de Pareto para a determinação das macrovariáveis estatisticamente significativas sobre a variação da área de “amolecimento” (<i>remelt</i> - A_{remelt}) do inserto de ABS, decorrente do processo de sobreinjeção, obtidas nas simulações em Moldflow segundo o experimento screening.	105
Figura 4.5 - Gráfico dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação da temperatura de massa do polímero obtida nas simulações (T_b), referente ao experimento screening.	106
Figura 4.6 - Gráfico dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação da temperatura da pele (T_s) do polímero obtida nas simulações, referente ao experimento screening.	106
Figura 4.7 - Gráfico dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação da temperatura na interface (T_i) entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato, obtida por meio das simulações, referente ao experimento screening.....	107

- Figura 4.8 - Gráfico dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação da área de “amolecimento” (A_{remelt}) do inserto de ABS, decorrente do processo de sobreinjeção com policarbonato, obtida nas simulações de acordo com o procedimento experimental screening. 107
- Figura 4.9 - Resultados da simulação do componente produzido por sobreinjeção mostrando em (a) a distribuição de temperatura ao longo da espessura da peça, e efeitos do aquecimento por dissipação viscosa, e em (b) a temperatura de massa resultante ao fim do preenchimento da cavidade. 109
- Figura 4.10 - Diagrama de Pareto (a) para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráfico dos efeitos das variáveis (b) relativos aos resultados dos índices térmicos calculados a partir das condições de moldagem para o procedimento experimental screening. 111
- Figura 4.11 - Diagramas de Pareto (a) para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráficos dos efeitos das variáveis de processamento (b) sobre as temperaturas de massa (T_b) obtidas nas simulações referentes ao experimento fatorial PC/ABS. 114
- Figura 4.12 - Diagramas de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas (a) e gráficos dos efeitos das variáveis (b) de processamento sobre as temperaturas da pele (T_s) obtidas nas simulações referentes ao experimento fatorial PC/ABS. 115
- Figura 4.13 - Diagramas de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas (a) e gráficos dos efeitos das variáveis (b) de processamento sobre as temperaturas da interface (T_i), entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato, obtidas por meio das simulações referentes ao experimento fatorial PC/ABS. 116
- Figura 4.14 - Diagramas de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas (a) e gráficos dos efeitos das variáveis (b) de processamento sobre as dimensões das áreas de “amolecimento” (A_{remelt}), obtidas nas simulações referentes ao experimento fatorial PC/ABS. 117
- Figura 4.15 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas nos resultados dos índices térmicos do núcleo calculados a partir das condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental fatorial completo PC/ABS. 118
- Figura 4.16 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráficos dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação a temperatura de massa (T_b), referentes ao experimento fatorial SAN/ABS. 121

- Figura 4.17 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas sobre e gráficos dos efeitos das macrovariáveis de processamento a variação a temperatura da pele (T_s), referentes ao experimento fatorial SAN/ABS..... 122
- Figura 4.18 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráficos dos efeitos das macrovariáveis de processamento, sobre a variação a temperatura da interface (T_i), referentes ao experimento fatorial SAN/ABS..... 123
- Figura 4.19 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráficos dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação das dimensões da área de “amolecimento” (A_{remelt}), referentes ao experimento fatorial SAN/ABS..... 124
- Figura 4.20 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas nos resultados dos índices térmicos calculados a partir das condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental fatorial completo SAN/ABS. 125
- Figura 4.21 - Valores médios randomizados dos ensaios de tração segundo as condições experimentais determinadas no experimento *Screening*..... 130
- Figura 4.22 - Diagrama de Pareto (a) e gráfico dos efeitos dos parâmetros (b) para a determinação das variáveis estatisticamente significativas sobre os resultados das forças de adesão obtidas por meio de ensaio de tração a partir das condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental *screening*..... 130
- Figura 4.23 - Diagrama de Pareto (a) para a análise dos efeitos das variáveis de processo sobre o *módulo de elasticidade* e gráfico dos efeitos principais (b) para a correlação entre as variáveis analisadas e os módulos de elasticidade calculados a partir dos resultados dos ensaios de tração referentes ao procedimento experimental *screening*. 1321
- Figura 4.24 - Valores médios dos ensaios de tração para as vinte e duas condições experimentais relativo ao experimento fatorial completo PC/ABS. 136
- Figura 4.25 - Diagrama de Pareto (a) e gráficos dos efeitos principais (b) referentes às variáveis que exercem efeitos estatisticamente significativos sobre os valores das forças de tração médias dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração para o experimento fatorial completo PC/ABS..... 1357
- Figura 4.26 - Diagrama de Pareto (a) e gráficos dos efeitos principais (b) referentes às variáveis que exercem efeitos estatisticamente significativos sobre os valores dos módulos de elasticidade à tração dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração para o experimento fatorial completo PC/ABS. 1368
- Figura 4.27 - Estrutura morfológica do acrilonitrila butadieno estireno SPERLING (2006). 139

Figura 4.28 - Superfície de resposta estimada para o comportamento da força de adesão em função das variáveis investigadas no experimento fatorial PC/ABS.	140
Figura 4.29 - Valores médios dos ensaios de tração para as vinte e duas condições experimentais relativo ao experimento fatorial completo SAN/ABS.	145
Figura 4.30 - Diagrama de Pareto (a) e gráfico dos efeitos principais (b) das variáveis para a determinação dos fatores estatisticamente significativos nos resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova produzidos com as condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental fatorial completo SAN/ABS.	145
Figura 4.31 - Diagrama de Pareto e gráfico dos efeitos das variáveis para a determinação dos fatores estatisticamente significativos nos resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova produzidos com as condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental fatorial completo SAN/ABS.	147
Figura 4.32 - Superfície de resposta estimada para o comportamento da força de adesão em função das variáveis investigadas no experimento fatorial SAN/ABS.	148
Figura 4.33 - Corpo de prova para a realização dos ensaios de flexão e fadiga em equipamento para ensaios dinâmico mecânicos.	152
Figura 4.34 - Curva de tensão deformação resultante do primeiro ensaio de flexão em DMA do corpo de prova da Figura 4.33, produzido por sobreinjeção com estireno acrilonitrila, com temperatura do fundido de 240 °C.	152
Figura 4.35 - Curva de tensão deformação resultante do segundo ensaio de flexão em DMA do corpo de prova da Figura 4.33, produzido por sobreinjeção com estireno acrilonitrila, com temperatura do fundido de 240 °C.	1534
Figura 4.36 - Curva de tensão deformação resultante do primeiro ensaio de flexão em DMA para o corpo de prova da Figura 4.33, produzido por sobreinjeção com estireno acrilonitrila com temperatura do fundido de 260 °C.	155
Figura 4.37 - Corpos de prova submetidos a ensaio de tensão versus deformação em DMA (temperatura de processamento 240 °C).	1556
Figura 4.38 - Corpos de prova submetidos a ensaio de tensão versus deformação em DMA (temperatura de processamento 260 °C).	1567
Figura 4.39 - Curvas de ensaio de fadiga (tensão versus tempo) realizadas em corpos de prova produzidos por sobre-injeção com temperatura de 240 °C em equipamento de DMA; em (a) com amplitude do movimento de 2mm e em (b) com amplitude de 1 mm.	157

- Figura 4.40 - Curvas de ensaio de fadiga (tensão versus tempo) realizadas em corpos de prova produzidos por sobre-injeção com temperatura de 260 °C em equipamento de DMA; em (a) com amplitude do movimento de 2mm e em (b) com amplitude de 1 mm. 158
- Figura 4.41 - Corpos de prova submetidos a ensaio de fadiga em equipamento de DMA (temperatura de processamento de 240 °C, amplitude do deslocamento 2mm e frequência do ensaio de 10Hz). 159
- Figura 4.42 - Corpos de prova submetidos a ensaio de fadiga em equipamento de DMA (temperatura de processamento de 260 °C, amplitude do deslocamento 2mm e frequência do ensaio de 10Hz). 159
- Figura 4.43 - Corpos de prova submetidos a ensaio de fadiga em equipamento de DMA (temperatura de processamento de 240 °C, amplitude do deslocamento 1mm e frequência do ensaio de 10Hz). 160
- Figura 4.44 - Corpo de prova submetido a ensaio de fadiga em equipamento de DMA (temperatura de processamento de 260 °C, amplitude do deslocamento 1 mm e frequência do ensaio de 10Hz). 160

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Efeito das variáveis de controle no processo de injeção e no componente injetado (Adaptado de MICHAELI, 1995).....	33
Tabela 2.2 - Comparação de propriedades mecânicas entre peças injetadas em moldes metálicos e não metálicos. Apresenta-se o valor percentual da propriedade para peça injetada em SL ou VR em relação à injetada em metal. Os resultados assinalados foram pouco discutidos ou não explicados (CAVALHEIRO, 2004).....	57
Tabela 3.1 - Propriedades do <i>Lustran ABS M301 FC</i> (Fonte BAYER PLASTICS, 2007).....	77
Tabela 3.2- Propriedades e Condições de Processamento para <i>Durolon HFR 1700</i> (Fonte UNIGEL PLÁSTICOS, 2007).....	78
Tabela 3.3 - Propriedades e Condições de Processamento para o <i>Luran SAN 358N</i> (Fonte BASF - THE CHEMICAL COMPANY, 2007).....	79
Tabela 3.4 - Propriedades da resina epóxi RenCast 436 para os cálculos do coeficiente de transferência de calor h_{p-m}	88
Tabela 3.5. Coeficientes de transferência de calor usados como entrada no Moldflow.....	88
Tabela 3.6. Parâmetros de injeção para simulação dos ensaios de moldagem no Moldflow.....	89
Tabela 3.7 - Níveis das variáveis de controle de máquina para o processo de sobreinjeção com o Policarbonato.	92
Tabela 3.8 - Delineamento experimental para as condições de moldagem por sobreinjeção para o procedimento <i>screening</i>	93
Tabela 3.9 - Níveis dos fatores para o delineamento do experimento fatorial PC/ABS.....	94
Tabela 3.10 - Níveis dos fatores para o delineamento do experimento fatorial SAN/ABS	95
Tabela 3.11 - Condições para o experimento fatorial completo PC+ABS.	95
Tabela 3.12 - Condições para o experimento fatorial completo SAN+ABS.....	96
Tabela 4.1- Dados resultantes das simulações em Moldflow e índices térmicos calculados referentes ao procedimento experimental <i>screening</i>	103
Tabela 4.2- Dados resultantes das simulações em Moldflow e índices térmicos calculados referentes ao experimento fatorial completo PC+ABS.	113

Tabela 4.3- Dados resultantes das simulações em Moldflow e índices térmicos calculados referentes ao experimento fatorial completo SAN+ABS.	120
Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova referentes ao procedimento experimental <i>screening</i>	128
Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova referentes ao procedimento experimental fatorial completo PC+ABS.	134
Tabela 4.6 – Resumo da análise de variância mediante a utilização do <i>software</i> Statgraphics Centurion.	137
Tabela 4.7 - Resposta otimizada para o comportamento da força de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados de PC.	140
Tabela 4.8 - Coeficientes de regressão para força de adesão.	141
Tabela 4.9 - Comparação entre as médias das forças de adesão e os resultados estimados pela equação 4.1 de ajuste para a força de adesão para o par PC+ABS.	142
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova referentes ao procedimento experimental fatorial completo SAN+ABS.	143
Tabela 4.12 - Resumo da análise de variância para a força de adesão referente ao experimento fatorial SAN+ABS.	148
Tabela 4.13 - Resposta otimizada para o comportamento da força de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados de SAN.	149
Tabela 4.14 - Coeficientes de regressão para Força de adesão.	149
Tabela 4.15 - Comparação entre os valores médios das forças de adesão medidas nos ensaios de tração com os valores obtidos por meio dos cálculos segundo o modelo obtido por meio da análise de regressão dos dados experimentais.	150
Figura 4.37 - Curva de tensão deformação resultante do segundo ensaio de flexão em DMA para o corpo de prova da Figura 4.33, produzido por sobreinjeção com estireno acrilonitrila com temperatura do fundido de 260 °C.	154
Um resumo dos dados obtidos nos ensaios de tensão versus deformação encontra-se na tabela 4.16 onde é possível realizar uma verificação dos fatos expostos acima.	154

Tabela 4.16 - Resumo das propriedades mecânicas medidas no ensaio de flexão realizado em equipamento de DMA para os corpos de prova produzidos com temperatura de processamento de 240 e 260 °C..... 155

Tabela 4.17 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow e as variáveis de processo de sobreinjeção obtida no *software* Satatgraphics Centurion..... 162

Tabela 4.18 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow obtida no *software* Satatgraphics Centurion. 163

Tabela 4.19 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow obtida no software Satatgraphics Centurion. 164

Tabela 4.19 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow obtida no software Satatgraphics Centurion. 166

Tabela 4.20 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow obtida no software Satatgraphics Centurion. 167

TERMINOLOGIA

CAD – Computer Aided Design (projeto auxiliado por computador).

CAE – Computer Aided Engineering (engenharia auxiliada por computador).

SL – Stereolithography (estereolitografia).

LED – Light Emitter Diode (diodo emissor de luz).

DMA – Dynamical Mechanical Analysis (análise dinâmico-mecânica).

PDA – Personal Digital Assistant.

PEAD – Polietileno de alta densidade.

ABS – Copolímero acrilonitrilo butadieno estireno.

PET – Polietileno tereftalato.

PP – Polipropileno.

PC – Policarbonato.

SAN – Copolímero Estireno acrilonitrilo.

TPE – Thermoplastic Rubber (borracha termoplástica).

VRE – Vazamento de Resinas Epóxi

SIMBOLOGIA

- Y_C - Índice térmico do núcleo da peça injetada
 τ_{Ys} - Índice termomecânico da pele da peça injetada
 T_b - Temperatura de massa do polímero fundido no processo de injeção
 T_c - Temperatura de cristalização do polímero
 T_i - Temperatura da região de interface polímero molde
 b - Efusividade térmica
 b_{pol} - Efusividade térmica do polímero
 b_{mold} - Efusividade térmica do material do molde
 T_{pol} - Temperatura do polímero
 T_{mold} - Temperatura do molde
 τ_w - Tensão de cisalhamento máxima no escoamento do polímero
 Y_s - Índice térmico para a temperatura da pele T_s
 $\theta_{S/T}$ - razão entre a espessura da pele e da amostra
 A, B, C, b e c - Constantes de ajuste da equação de propriedades mecânicas
 δ^+ e δ^- - Cargas elétricas surgidas na superfície de adesão entre dois materiais
 L, M, H - Níveis dos fatores nos projetos dos experimentos
 P_i - Pressão de injeção
 b_m - Efusividade térmica do material do molde
 C_{pm} - Calor específico do material do molde
 k_m - Condutividade térmica do material do molde
 ρ_m - densidade do material do molde
 h_{p-m} - Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o polímero e o molde
 t_c - tempo para a cristalização
 T_F - Temperatura do fundido na equação de ajuste para a força de adesão
 T_M - Temperatura do molde na equação de ajuste para a força de adesão
 V_i - Velocidade de injeção na equação de ajuste para a força de adesão
 P_{rec} - Pressão de recalque
 T_{rec} - tempo de recalque
 A_{remelt} - Área de amolecimento do inserto sobreinjetado
 F_A - Força de adesão obtida nos ensaios de tração entre inserto e componente sobreinjetado

RESUMO

O crescimento das necessidades do mercado consumidor por produtos que apresentem inovações tecnológicas tem motivado o setor produtivo na busca por novos produtos e processos. Contudo, inovações tecnológicas exigem, geralmente, um estágio de investigações na busca por soluções que visem uma produção mais econômica e com melhor qualidade. Por este motivo vários pesquisadores têm buscado investigar estes novos processos produtivos, tais como o *in mold labeling*, *insert mold*, injeção com baixas pressões e, em especial, o processo de sobreinjeção. Muitas pesquisas têm sido conduzidas principalmente no que se refere ao entendimento da correlação entre as condições de processamento e as propriedades de adesão das peças sobreinjetadas, mediante seu processamento em ferramentas de produção, o que pode ser observado durante a realização deste trabalho. Foi evidenciada, contudo, uma lacuna a respeito de investigações realizadas sobre o processo de sobreinjeção em moldes fabricados por vazamento de resina epóxi, os quais se configuram como uma importante ferramenta no desenvolvimento de processos e produtos ainda na fase de projeto conceitual. Portanto, devido à importância fundamental do tema, verificou-se que era imprescindível a realização de pesquisas que visassem suprir a esta lacuna. Este trabalho teve como objetivo principal, portanto, a realização de investigações do processo de sobreinjeção em moldes produzidos por vazamento de resina epóxi. Para tanto, foram realizados experimentos para a caracterização do efeito das variáveis de processo na força de adesão entre os componentes de corpos de prova produzidos por sobreinjeção, nos quais as condições experimentais seguiram um delineamento estatístico obtido com o *software* Statgraphics Centurion. Procurou-se também, por meio de simulações em computador no *software* Moldflow®, avaliar os efeitos das variáveis de processamento nos resultados de análises do processo de sobreinjeção e correlacioná-los com os resultados dos ensaios de caracterização da força de adesão. Por último os resultados são avaliados mediante o uso do *software* Statgraphics Centurion, onde os efeitos das variáveis são estudados segundo seu significado estatístico. Os resultados obtidos indicaram um aumento da força de adesão com o aumento da temperatura do polímero e do molde sem a ocorrência de alterações significativas com a variação da velocidade de injeção, enquanto a correlação entre os índices térmicos e os dados dos ensaios mecânicos indicou a possibilidade da utilização do *software* Moldflow® em investigações do processo de adesão ainda na fase do produto, possibilitando a modificação e melhoria da qualidade do mesmo.

ABSTRACT

The constant growing of the consumer market needs for innovative and high technological products has driven the industrial sector in a search for new products and processes. However, technological innovations usually require a period of research, questing for solutions in order to produce a more economical and better quality product. Accordingly, many researchers have been investigating processes such as in mold labeling, insert molding and low pressure injection molding, with particular interest on the over molding process. Many studies have been conducted especially regarding to the understanding of the correlation between the processing conditions and the over molded parts properties, obtained in production tools, which could be observed during this work. It was evident, however, a lack with respect to investigations on the over molding process in molds manufactured by epoxy resin casting, which is nowadays considered as an important tool when applied to the product development processes, particularly at their conceptual design phase. Therefore, due to the importance of this subject it was found essential to conduct this research. Consequently, the main objective of this work was to conduct investigations on the over molding process carried out in molds produced by epoxy resin casting. Thus, experiments were performed to characterize the effect of process variables in the adhesion force between the components of specimens produced by over molding, in which the experimental conditions followed a statistical design obtained with the Statgraphics Centurion statistics software. Also it was intended, by means of computer simulations in the Moldflow ® software, to assess the effects of processing variables on the results of analysis of the over molding process and correlate them to the results obtained in the mechanical tests. Finally the results were evaluated using the Statgraphics Centurion statistics software, where the effects of variables were studied according to their statistical significance. The results indicated an increase in the adhesion force rising the polymer and mold temperatures, while no significant effect was observed when changes in injection speed was performed, while the correlation between thermal index and mechanical test data indicated the possibility of CAE simulation softwares to be used in investigations of the adhesion process at the product design phase, allowing the modification and improvement of the products still at the conceptual design phase.

Capítulo 1

Introdução

1 Introdução

1.1 Contextualização e Tema da Pesquisa

Durante muito tempo os produtos foram concebidos tendo como um dos principais requisitos o de possuírem grande durabilidade, refletindo a cultura do mercado consumidor deste período. Contudo, as mudanças impostas por um mercado consumidor, cada vez mais exigente, têm forçado o setor industrial a buscar alternativas que atendam a novos requisitos impostos pelos consumidores. Isso pode ser constatado em parte, pela sucessiva redução da vida útil dos produtos que são lançados no mercado, como resultado de um processo de freqüente mudança dos costumes e gostos correntes dos consumidores em constante procura por produtos com inovações tecnológicas, *design* atualizado e por preços mais acessíveis (SABINO NETTO, 2003). Citam-se como exemplos os segmentos da indústria como o de eletroeletrônicos e automotivos, onde é constatado que o ciclo de vida dos produtos, desde seu lançamento até o descarte, vem sendo constantemente reduzido, o que representa o reflexo dessa mudança cultural que vem ocorrendo.

Em decorrência dessa situação, DARÉ (2001) e SABINO NETTO (2003), relataram o crescimento do desenvolvimento de produtos voltados para pequenos grupos de consumidores, os quais possuem exigências muito específicas. Nesse contexto encontram-se principalmente produtos com componentes obtidos pelo processo de moldagem por injeção, que apresenta como uma de suas principais características a produção de peças com grande liberdade de formas. Os componentes injetados mostram-se como soluções geralmente economicamente viáveis, eficientes e com possibilidades de receberem acabamentos decorativos.

A aplicação de efeitos decorativos às peças injetadas vem sendo introduzida pelo setor do plástico como forma de diferenciar e agregar valor aos componentes injetados como já haviam evidenciado em suas pesquisas BRAUN e ENEWOLDSEN (1999). Acabamentos como pintura, metalização ou técnicas mais recentes conhecidas por sobreinjeção ou *in mold decoration*, que incorporam o acabamento decorativo ao produto durante o processo de moldagem, vem se destacando no setor de injeção.

Em função da constante busca pela redução dos custos, melhora na qualidade e redução dos tempos de produção de uma peça injetada, um dos focos que vem despontando como de interesse para a indústria do plástico, segundo CAVALHEIRO (2007), é a moldagem por injeção de peças com paredes finas (TWIM - *Thin Wall Injection Molding*). Tais produtos permitem uma

significativa redução nos tempos de ciclo de moldagem, bem como uma redução na massa juntamente com uma redução do espaço ocupado e do tamanho (*space-saving products*) dos produtos finais, o que vem ao encontro das necessidades impostas pelo mercado consumidor de produtos mais leves, baratos e ergonômicos.

Os relatos de sucesso na introdução no mercado de produtos com as características mencionadas mostram que o desenvolvimento de novos produtos é realizado principalmente por meio de técnicas tradicionais de projeto e fabricação de moldes em materiais metálicos.

Contudo, pesquisas realizadas por DARÉ (2001) e SACHELLI (2007) evidenciaram que, o desenvolvimento de novos produtos, quando realizado por técnicas convencionais, apresenta um tempo relativamente longo, podendo durar, de acordo com SABINO NETTO (2003), até seis meses. Dessa forma, e especialmente em decorrência da competição acirrada do mercado, vem crescendo entre as empresas do setor do plástico o uso de metodologias de auxílio ao desenvolvimento de projetos e ferramentas que reduzam este tempo, bem como, garantam a qualidade do produto a ser lançado. Nesse contexto inserem-se as tecnologias de prototipagem rápida e fabricação rápida de moldes por técnicas de vazamento de resinas epóxi, tema desta pesquisa de doutoramento, que visam permitir a avaliação dos conceitos gerados para os produtos, mesmo antes da construção da ferramenta de produção em material metálico.

1.2 Justificativas e Motivações para o Trabalho

Em decorrência do crescente interesse por peças injetadas com características estéticas diferenciadoras e de maior valor agregado, mais especificamente as que envolvem o acabamento do produto injetado concomitantemente à moldagem, pesquisadores vêm sendo motivados a realizarem investigações sobre o assunto. Este fato se verifica especialmente no que se refere ao processo de moldagem sobre insertos ou sobreinjeção, em uma tentativa de compreender melhor o assunto ou na busca da melhoria da qualidade das peças e do próprio processo produtivo.

O levantamento bibliográfico realizado neste trabalho acerca do assunto revelou, contudo, que as referidas investigações acerca do processo de sobreinjeção limitam-se ao estudo dos efeitos das condições de processamento na união e na força de adesão entre polímeros mais rígidos e polímeros flexíveis (geralmente entre poliolefinas e elastômeros termoplásticos) conduzidas em ferramentas metálicas fabricadas em aço. Além disso, os resultados obtidos nessas investigações

mostram geralmente tendências da influência das variáveis do processo de sobreinjeção sobre a força de adesão entre os polímeros já mencionados, como os apresentados por CANDAL *et al.* (2008), HUDACEK (2007) e CARELLA *et al.* (2002).

Entretanto, nenhuma das investigações mencionadas abordou os casos específicos tratados neste trabalho (adesão entre polímeros ditos “rígidos”) e, tampouco, da forma aqui apresentada (mediante um delineamento e análise estatística dos resultados dos ensaios). Apenas CARELLA (2002) adotou uma abordagem mediante o tratamento estatístico dos dados dos ensaios de adesão (*peeling tests*), porém, também empregando este tratamento ao processo de sobreinjeção entre polímeros termoplásticos rígidos e flexíveis.

Adicionalmente, constatou-se por meio desta revisão da literatura, à inexistência de investigações que empregassem moldes produzidos pela técnica de vazamento de resina epóxi (VRE) ao estudo do processo de sobreinjeção, seja na avaliação prévia de uma ferramenta de produção para este processo, ainda nos estágios de projeto da mesma, seja na investigação dos efeitos dos parâmetros de moldagem na adesão entre os polímeros unidos por intermédio do mesmo.

Portanto, de acordo com o exposto, são apresentadas como justificativas e motivações para realização das investigações conduzidas neste trabalho os seguintes aspectos:

- A importância que os produtos produzidos pelo processo de sobreinjeção vêm assumindo em diversos segmentos da indústria;
- O conseqüente crescimento do interesse por parte dos pesquisadores na investigação do processo de sobreinjeção em moldes de aço, tendo, estas pesquisas, como enfoque principal o entendimento dos efeitos das variáveis do processo de sobreinjeção na adesão entre os polímeros que compõem o produto final;
- A importância fundamental do emprego de moldes fabricados por VRE na avaliação prévia do processamento e dos moldes empregados a novos produtos e, em especial, ao processo de sobreinjeção;
- A lacuna no que se refere a investigações sobre o processo de sobreinjeção e a avaliação da influência das condições de processamento na adesão entre os componentes de produtos sobreinjetados, realizadas em moldes fabricados pelo vazamento de resina epóxi (VRE).

Tais aspectos demonstram a relevância do tema tornando, portanto, fundamental sua investigação, visando especialmente o conhecimento do comportamento da adesão entre os polímeros em produtos sobreinjetados, quando os mesmos forem obtidos em moldes de epóxi, os

quais possuem propriedades físicas bastante diversas daqueles onde as pesquisas correntes vêm sendo conduzidas.

1.3 Objetivos

Em consequência do apresentado anteriormente, este trabalho tem por objetivo geral a investigação do processo de moldagem por sobreinjeção em moldes obtidos pela técnica de vazamento de um material compósito à base de uma resina epóxi com carga metálica de alumínio (VRE), buscando estabelecer correlações entre os parâmetros de processamento e as características de adesão entre os componentes de um corpo de prova produzido por sobreinjeção.

Visando o cumprimento do referido objetivo geral, torna-se necessário o estabelecimento e cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- Apresentar critérios de seleção de materiais termoplásticos a serem utilizados como insertos e revestimentos decorativos sobreinjetados, baseados em características físico-químicas (reológicas, mecânicas, eletromagnéticas, químicas e térmicas), tais como, índice de fluidez, transparência, tenacidade e afinidade química.
- Investigar a influência das macrovariáveis de processo (temperatura do fundido, temperatura do molde, velocidade de injeção, tempo e pressão de recalque) nas características da força de adesão entre os componentes de um corpo de prova obtido por sobreinjeção, através do estudo da influência destas variáveis por meio de métodos estatísticos.
- Avaliar qualitativamente o comportamento da moldagem por injeção em moldes produzidos pela técnica de VRE visando à identificação de eventuais dificuldades, vantagens e limitações relativas à moldagem sobre insertos termoplásticos (sobreinjeção) na prática.
- Investigar os efeitos dos parâmetros de escoamento do polímero dentro da cavidade do molde no processo de sobreinjeção de insertos termoplásticos, mediante a utilização de um *software* CAE comercial, procurando-se estabelecer correlações destes parâmetros com as características das forças de adesão entre os componentes dos corpos de prova produzidos.
- Correlacionar as informações oriundas da análise dos efeitos das macrovariáveis do processo sobre a força de adesão entre os componentes dos corpos de prova sobreinjetados, aos resultados da avaliação da influência dos parâmetros de escoamento do polímero, determinadas mediante o emprego de um *software* CAE comercial, sobre a referida força de adesão.

- Indicar recomendações referentes às propriedades dos termoplásticos e ao projeto de moldes, importantes para o êxito do processo de sobreinjeção, que visem facilitar a obtenção de peças sobreinjetadas com melhor qualidade em moldes fabricados com materiais compósitos.

1.4 Estruturação do Trabalho de Doutorado

Visando uma melhor compreensão do tema abordado o presente trabalho está organizado em cinco capítulos

Desta forma, no capítulo 1 é realizada uma breve introdução ao tema abordado, procurando-se contextualizar o problema a ser investigado, descrever as motivações, o foco e os objetivos a serem alcançados.

No capítulo 2, é realizada, através de um levantamento da bibliografia, uma síntese dos conceitos e do embasamento teórico relativos aos processos e tecnologias envolvidos na presente investigação, como o processo de moldagem por injeção, seus conceitos e fundamentação teórica, os principais processos de acabamento e decoração de peças injetadas com enfoque principal no processo de sobre-injeção, os aspectos teóricos envolvidos no processo de adesão entre polímeros, bem como, uma breve descrição nos métodos de prototipagem rápida e fabricação rápida utilizados nesta pesquisa.

Em seguida, no capítulo 3, são apresentados os materiais e os métodos empregados nos estudos realizados, bem como os insumos necessários à sua realização.

No capítulo 4 é realizada a exposição dos resultados alcançados nos experimentos conduzidos, bem como, a análise e discussão dos dados apresentados por estes experimentos.

Finalizando, apresenta-se no capítulo 5 as conclusões finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2 Revisão Bibliográfica

Visando o auxílio e a facilitação da compreensão do tema abordado nesta tese, serão apresentados neste capítulo os principais conceitos relacionados aos assuntos pertinentes às investigações realizadas, de forma a atuarem como um embasamento teórico para os leitores do trabalho.

Portanto, serão abordados na sequência os fundamentos teóricos e as principais considerações sobre o processo de injeção, enfocando principalmente nos fenômenos que ocorrem durante o fluxo do polímero bem como nos efeitos das variáveis de controle do processo sobre o escoamento. Posteriormente serão abordados os principais processos de acabamento de peças injetadas, dando-se ênfase aos processos decorativos que ocorrem concomitantemente ao processo de moldagem, como o que ocorre no processo de sobreinjeção. Após esta seção serão tratados os fundamentos sobre o fenômeno da adesão entre polímeros, abordando-se os principais métodos de adesão, com ênfase especial ao processo de adesão por interdifusão, com a introdução do estado da arte das teorias sobre o mecanismo pelo qual a mesma se processa. Por último, será apresentada uma pequena síntese sobre o processo de fabricação rápida pelo vazamento de resina epóxi, utilizado no presente trabalho como método para a obtenção das ferramentas para a realização dos ensaios de moldagem dos corpos de prova.

2.1 Fundamentos Teóricos sobre Processo de Moldagem por Injeção

Com o objetivo de introduzir os conceitos a serem abordados principalmente na seção destinada à análise dos resultados, mas, sem a intenção de realizar um relato mais abrangente sobre o processo, o qual é realizado em ROSATO (1994), esta seção apresenta os conceitos mais pertinentes às discussões estabelecidas no capítulo 4 desta tese, servindo, portanto, como uma referência teórica que possibilite sua pronta compreensão.

São apresentadas, portanto, as bases conceituais e teóricas sobre o processo de moldagem por injeção, assim como são descritos os fenômenos físicos que ocorrem durante o fluxo do polímero dentro de um molde, mostrando-se também os efeitos das macrovariáveis do processo sobre o escoamento do polímero fundido.

2.1.1 Escoamento do Polímero na Cavidade do Molde

Segundo MICHAELI (1995) durante o fluxo dentro da cavidade do molde, o polímero é sujeito simultaneamente aos efeitos associados ao seu escoamento (cisalhamento e aquecimento) e a um processo de resfriamento devido à perda de calor para as paredes da cavidade. A Figura 2.1 apresenta a seção transversal, ao longo da espessura da peça, do perfil do escoamento do material plástico dentro da cavidade do molde. Nessa Figura é possível observar os perfis de velocidades de duas regiões distintas do escoamento, sendo um perfil da região que se encontra antes da frente de fluxo, e outro que se encontra na frente de fluxo. Nas regiões que se encontram antes da frente de fluxo, pode-se observar a formação de uma camada, junto às paredes do molde, designada de camada solidificada, devido ao resfriamento provocado pelas paredes da cavidade. Nesta região, após a solidificação do material, nenhum fluxo adicional pode ser verificado. Entre as duas camadas solidificadas encontra-se o núcleo fundido do material, que continua fluindo.

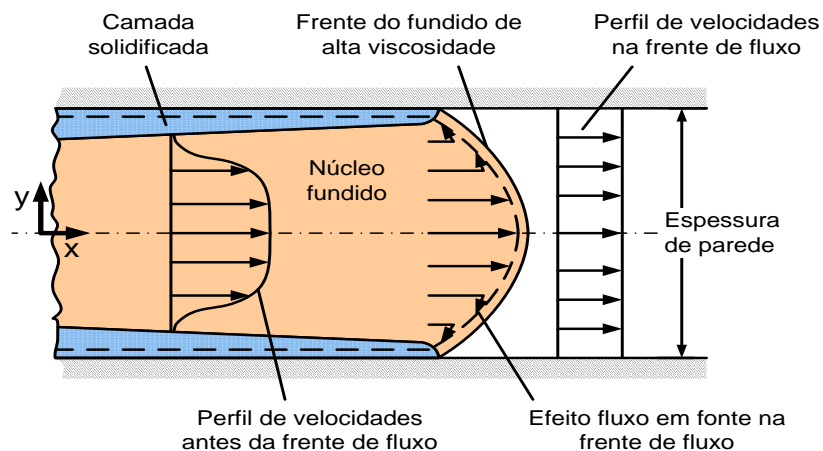


Figura 2.1 - Perfil de velocidades do escoamento do polímero fundido dentro de um molde de injeção visto em um corte transversal (MICHAELI, 1995).

O maior gradiente de velocidades (taxa de cisalhamento), encontrado na zona de escoamento, localiza-se nas vizinhanças da camada solidificada. Contudo, em virtude das altas viscosidades encontradas nessa região, este gradiente de velocidades máximo não se encontra exatamente adjacente a camada solidificada. Nessa região de maior gradiente de velocidade, o fundido é sujeito a um fluxo cisalhante bastante pronunciado, o que causa a orientação das moléculas do polímero ou de fibras de reforço na direção principal do fluxo. Por esta razão, a máxima orientação encontrada localiza-se logo imediatamente abaixo da superfície do moldado.

Em virtude da redução da espessura da seção onde ocorre o fluxo do material, devido à solidificação do polímero junto às paredes da cavidade, a velocidade máxima encontrada nesta região é consideravelmente maior da aquela encontrada na frente de fluxo. Conseqüentemente, as partículas do fundido ao atingirem a frente de fluxo desaceleram o que leva a um fluxo perpendicular à parede do molde nesta região, sendo este fenômeno chamado de "fluxo em fonte" ou em "chafariz" (Figura 2.1). Devido à formação do fluxo em fonte, a frente do fluxo do polímero, que também se resfria devido o seu contato com o ar existente dentro da cavidade (ocasionando assim um aumento em sua viscosidade), sofre um estiramento (fluxo elongacional ou extensional), entrando em contato em seguida com as paredes frias da cavidade do molde. O contato deste polímero com as paredes do molde provoca sua solidificação quase que instantaneamente. Desta forma, o estiramento do polímero na frente de fluxo é uma fonte adicional de orientação molecular e das fibras de reforço na superfície da peça. Essa é a razão porque o preenchimento da cavidade, com uma velocidade de avanço da frente de fluxo constante, leva a uma orientação das moléculas na superfície (em contato com a as paredes do molde) mais uniforme e a uma melhor qualidade superficial da peça.

Contudo, como já referido anteriormente, o fluxo dominante no processo de preenchimento de moldes de injeção é o fluxo cisalhante. A Figura 2.2 mostra os resultados de perfis de velocidade, taxa de cisalhamento e temperatura em dois pontos ao longo da peça. Pode-se observar que o perfil de temperatura tem dois máximos em pontos próximos da parede da cavidade. O aumento de temperatura causado pelo efeito da dissipação viscosa causa uma alteração local contrária à tendência que o material possui para o seu resfriamento. A temperatura máxima encontra-se na região de máxima taxa de cisalhamento, onde a influência da dissipação viscosa é maior. Pode-se facilmente deduzir que a existência de um pico de temperatura resultante da dissipação viscosa é dependente da vazão volumétrica com a qual o material escoar. Pode-se notar também que a temperatura máxima aumenta com o tempo, ocorrendo também o deslocamento da região de sua ocorrência para o centro do canal onde ocorre o escoamento. Este efeito é resultado da redução da seção livre para o escoamento do polímero, que por sua vez é causada pelo crescimento da espessura da camada solidificada.

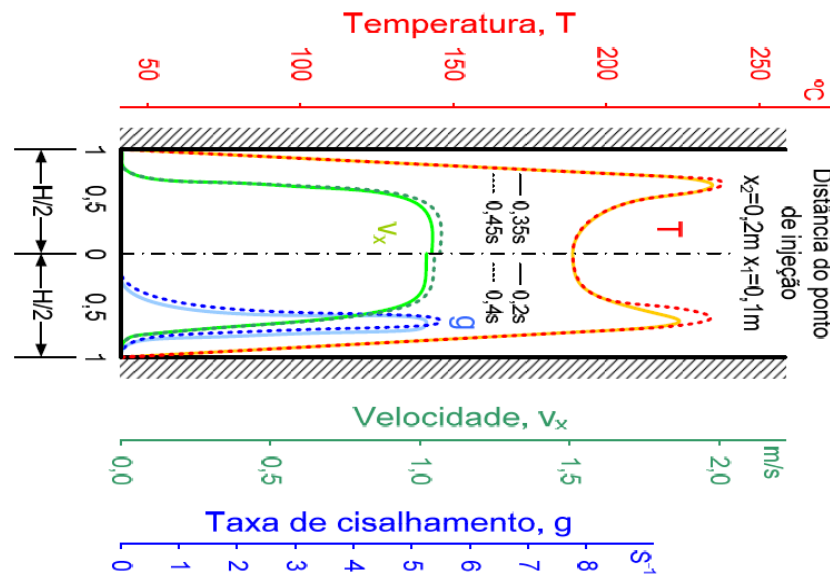


Figura 2.2 - Vista em corte das representações gráficas dos perfis de velocidade, temperatura e taxa de cisalhamento durante o escoamento do polímero em um molde de injeção (MICHAELI, 1995).

2.1.2 Variáveis de Controle do Processo de Injeção

Segundo CAVALHEIRO (2006) as variáveis de controle do processo são aquelas que alteram as características da matéria-prima, ou propriedades ditas internas, como orientação e relaxação molecular, parâmetros microestruturais (morfologia), nível de compactação das regiões amorfas, nível de tensões residuais e estrutura química (por degradação ou reticulação). Cada uma das três etapas de um processo de transformação é controlada por um conjunto de variáveis de processo.

São os valores adequados, uniformes e ciclicamente repetidos (apesar das influências externas) das variáveis de controle de que garantem a qualidade e a repetibilidade das propriedades ditas externas, como dimensões, massa, propriedades mecânicas, propriedades óticas, propriedades elétricas, propriedades de barreira, acabamento superficial, além do surgimento de defeitos, como rechupes, empenamentos, bolhas, etc.

Um conjunto de apenas quatro variáveis controla o processo de injeção:

Temperatura de massa: é a temperatura do material durante o processo; pode-se assumir a temperatura do material quando o mesmo entra na cavidade como referência.

Taxa de resfriamento: é a velocidade com a qual o material perde calor; isso modifica, por exemplo, o grau de cristalinidade e/ou o tamanho dos cristais do material, tendo efeitos importantes nas propriedades dimensionais, mecânicas e óticas do moldado.

Pressão na cavidade: é a pressão do material no interior da cavidade; costuma-se assumir como referência a pressão máxima atingida durante a moldagem; essa variável controla a quantidade de material injetado no molde e, por consequência, a massa e a precisão dimensional das peças, além de influir em tensões residuais e empenamento.

Velocidade de escoamento: é a velocidade com a qual o material flui pela cavidade durante o preenchimento; está fortemente associada à taxa de cisalhamento e, por isso, tem efeitos sobre temperatura de massa, orientação molecular, degradação e tensões residuais.

A tabela 2.1 apresenta um resumo dos efeitos produzidos pela alteração de cada uma das variáveis de controle sobre o processo de injeção e o componente injetado.

Tabela 2.1 - Efeito das variáveis de controle no processo de injeção e no componente injetado (Adaptado de MICHAELI, 1995).

Variável de controle	Efeito sobre a variável	Pressão de injeção	Camada solidificada	Temperatura do polímero na cavidade	Contração	Orientação molecular
Temperatura de Massa	↑	diminui	diminui	aumenta	aumenta	diminui
	↓	aumenta	aumenta	diminui	diminui	aumenta
Velocidade de escoamento	↑	aumenta	diminui	aumenta	diminui	aumenta
	↓	diminui	aumenta	diminui	aumenta	diminui
Taxa de resfriamento	↑	aumenta	aumenta	Geralmente diminui	diminui	aumenta
	↓	diminui	diminui	Geralmente aumenta	aumenta	diminui
Pressão na cavidade	↑	aumenta	aumenta	Sem efeito	diminui	aumenta
	↓	diminui	diminui	Sem efeito	aumenta	diminui

É importante ressaltar que essas variáveis atuam durante todo o processo de moldagem e resfriamento, e podem ter valores diferenciados conforme o local da cavidade analisado. Por

exemplo, a taxa de resfriamento do material em contato com a parede da cavidade do molde é muito maior do que a do material que está no centro da espessura da cavidade, distante da parede do molde. Além disso, a taxa de resfriamento varia de região para região da cavidade devido à heterogeneidade da temperatura da superfície do molde.

2.1.3 Índices Termomecânicos do Processo de Injeção

A moldagem por injeção é caracterizada por grandes gradientes de temperatura e altos níveis de tensão, com suas respectivas variações de intensidade tanto através da espessura como ao longo do caminho de fluxo. Esse ambiente termomecânico está associado às propriedades do material, à geometria da cavidade, ao projeto do molde (sobretudo aos sistemas de alimentação e resfriamento, mas no caso específico desse trabalho, também ao material do molde) e aos equipamentos e seus respectivos parâmetros operacionais (VIANA *et al.*, 2002).

WRIGHT *et al.* (1988) e VIANA *et al.* (2004) traçaram conclusões semelhantes quanto à dificuldade de se estabelecer relações processo-estrutura-propriedades específicas: “as mudanças nos parâmetros de moldagem, combinadas ou específicas, agem simultaneamente sobre o grau de cristalinidade, espessura de lamela, orientação molecular e tamanho de esferulitos, não permitindo o isolamento das respectivas relações”. WRIGHT *et al.* (1988) ainda comentaram que pequenas variações nos parâmetros de moldagem podem provocar grandes alterações morfológicas, sem que o grau de cristalinidade seja afetado de forma proporcional.

Deste modo, VIANA *et al.* (2004) preconizam uma forma alternativa de se estudar e prever os efeitos do processo sobre a estrutura e as propriedades e definem dois índices que agrupam as variáveis de processo, caracterizam o ambiente termomecânico e representam mais diretamente a fenomenologia que afeta o desenvolvimento da microestrutura:

- **índice térmico do núcleo Y_c** , que relaciona o grau de superaquecimento (diferença entre a temperatura local e a temperatura de cristalização) e a taxa de resfriamento, refletindo o balanço térmico do processo e as condições de cristalização do núcleo da peça;

- **índice termomecânico da pele τ_{Y_s}** , medida indireta do balanço entre orientação molecular decorrente do fluxo e relaxação da orientação após o fluxo, ou seja, da orientação molecular final da pele² (camada superficial da peça).

O índice térmico do núcleo é dado pela equação 2.1:

$$Y_C = \frac{T_b - T_c}{T_b - T_i} \quad \text{eq. 2.1}$$

onde:

T_b - é a temperatura média ponderada pela velocidade de escoamento (*bulk temperature*) através da espessura da peça no ponto analisado;

T_c - é a temperatura de cristalização e T_i é a temperatura na interface polímero-molde.

T_i , por sua vez, é dada pela equação 2.2:

$$T_i = \frac{b_{pol}T_{pol} + b_{mold}T_{mold}}{b_{pol} + b_{mold}} \quad \text{eq. 2.2}$$

onde:

b - é a efusividade térmica³;

T - é a temperatura;

pol e $mold$ - referem-se, respectivamente, aos índices ao polímero e molde.

O índice termomecânico é definido pela equação 2.3:

$$\tau_{Y_s} = \frac{\tau_w}{e^{Y_s}} \quad \text{eq. 2.3}$$

onde:

τ_w - é a máxima tensão de cisalhamento desenvolvida na região analisada;

Y_s - é um índice térmico equivalente a Y_c , mas que considera a temperatura média da pele T_s ao invés de T_b .

² As definições de “pele” e “núcleo” podem ser encontradas em CAVALHEIRO (2006).

³ ver definição de efusividade térmica em CAVALHEIRO (2006) equação 6.1.

Os valores de T_s , T_b e τ_w são estimados por meio de simulação do processo de moldagem por injeção em *softwares* comerciais de análise por elementos finitos (FEA). O valor de T_c pode ser obtido experimentalmente ou tomado da ficha técnica do material.

Ponderando os índices termomecânicos pelas espessuras relativas da pele e do núcleo, VIANA *et al.* (2004) propuseram um modelo que relaciona o processamento às propriedades mecânicas de tração. Um exemplo do modelo é mostrado pela equação 2.4:

$$\text{Propriedade mecânica} = A + B[(1-\theta_{S/T}) * Y_c]^b + C(\theta_{S/T} * \tau_{Y_s})^c \quad \text{eq. 2.4}$$

onde:

$\theta_{S/T}$ - é a razão entre a espessura da pele e a espessura total da amostra;

A , B , C , b e c - são constantes de ajuste do modelo, determinadas experimentalmente e dependentes da propriedade mecânica em questão e da velocidade de estiramento usada no ensaio.

2.2 Processamento de Peças de Paredes Finas

Conforme YAO E KIM (2003), uma das tendências gerais no desenvolvimento de produtos é a redução de peso e tamanho. Com isso, a espessura dos componentes plásticos injetados tem sido reduzida frequentemente para valores em torno de 1 mm, em contraste com as espessuras típicas de 2 a 3 mm, e tornou-se importante investigar os efeitos das variáveis de controle do processo sobre propriedades mecânicas e problemas como empenamento, contração e linhas de solda.

2.2.1 Definição de Peças de Paredes Finas

Segundo CHEN *et al.* (2001), em termos gerais, o processo de injeção é considerado como moldagem de paredes finas quando a peça tem espessura menor do que 1,5 mm e/ou a razão entre comprimento do caminho de fluxo e espessura é maior do que 100. Trabalhando com modelos para simulação em CAE, MALONEY E POSLINSKI (1998) mostraram que o processo adquire características de “parede fina” quando essa razão atinge 150:1. Já para TANTAKOM E SCHOTT (1998) e COXE *et al.* (2000), peças de parede fina são aquelas com espessura inferior a 1mm e área superficial mínima de 50 cm².

A revisão da literatura mostra que não há uma definição padronizada das características que levam uma peça injetada a ser considerada de “paredes finas”. Aparentemente, faz mais sentido pensar-se na dificuldade de preenchimento da cavidade do que propriamente na espessura da peça, havendo, portanto, espessuras críticas diferentes para cada material.

2.2.2 Características Relativas ao Preenchimento de Moldes de Paredes Finas

A janela de processo na injeção de peças com paredes finas, em comparação com o processo convencional, é fortemente restringida pelo rápido resfriamento do material durante o processo. Conforme afirmado por YAO e KIM (2003), nas condições usuais de processo, a espessura da camada solidificada independe da espessura nominal da cavidade. Assim, em peças de parede fina, há pouco espaço livre para o escoamento do material fazendo com que pressões de injeção muito altas sejam necessárias para que o material fundido consiga preencher a cavidade.

COXE *et al.* (2000) afirmam que essa característica costuma exigir o emprego de máquinas injetoras com um porte desproporcional ao tamanho da peça ou com sistemas hidráulicos especiais, muitas vezes exigindo acumuladores hidráulicos. Além do custo, CHEN *et al.* (2000) explicam que essa solução prejudica a repetibilidade do processo, pois a precisão da movimentação do parafuso plastificador é comprometida pela instabilidade da pressão gerada pelo acumulador.

Segundo MALONEY e POSLINSKI (1998) e YAO e KIM (2003), fornecedores de matéria-prima desenvolveram *grades*⁴ ditos de “alto escoamento” para os principais polímeros comerciais, de modo a facilitar o preenchimento da cavidade. O autor salienta, entretanto, que nem sempre esses materiais satisfazem os requisitos do produto, pois as modificações no peso molecular (PM) e distribuição de peso molecular (DPM) ou incorporação de plastificantes, que aumentam o índice de fluidez desses materiais, também resultam em menores módulos de elasticidade e flexão.

Em relação aos parâmetros de moldagem, a recomendação geral é utilização de maiores temperaturas para o material e o molde, além do emprego de tempos de injeção que minimizem a pressão de preenchimento da cavidade, como indicado na Figura 2.3. Porém, segundo MALONEY e POSLINSKI (1998), HAYDEN *et al.* (1999) e HUANG e TAI (2001) a alta taxa de cisalhamento imposta pelo escoamento rápido numa cavidade delgada aliada a temperaturas no limite superior da

⁴Termo que designa um polímero específico, dentro de uma determinada família de polímeros, produzido por um fabricante.

faixa de processamento, prejudica a qualidade das peças injetadas, pois favorecem degradação e surgimento de tensões residuais significativas.

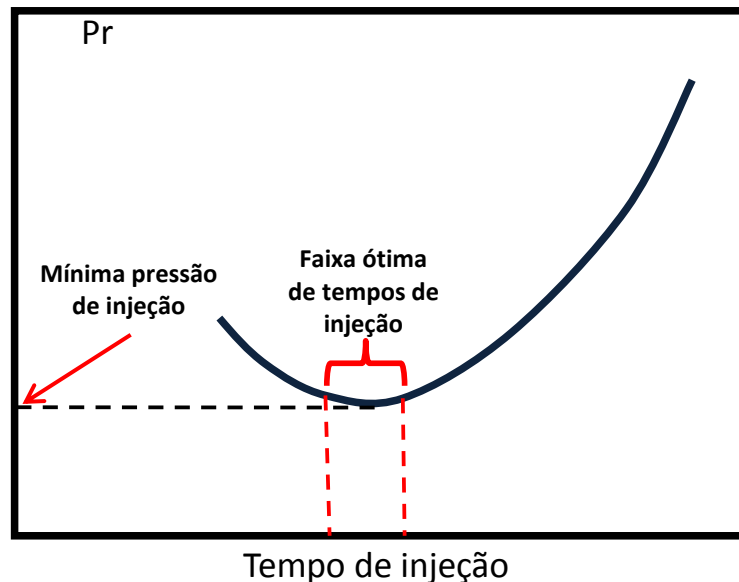


Figura 2.3 – Comportamento da pressão de injeção com a variação do tempo de injeção (Adaptado de ADVANCED CAE TECHNOLOGY, 1997).

Alguns autores, contudo, afirmam que a otimização da velocidade e/ou tempo de injeção são de fundamental importância para a minimização da pressão necessária para o preenchimento da cavidade. A curva, apresentada na Figura 2.3, mostra este comportamento da pressão de injeção com a variação da velocidade de injeção (ADVANCED CAE TECHNOLOGY, 1997).

TANTAKOM e SCHOTT (1998) estudaram o efeito de parâmetros de moldagem na massa de plaquetas com espessura 1 mm e comprimento 140 mm, injetadas em *grades* de PC e ABS especiais para paredes finas

YU *et al.* (2000), ao contrário do entendimento geral, sustentam que velocidades de injeção altas melhoram a distribuição de tensões residuais. Os autores também afirmam que a moldagem de paredes finas admite o uso de temperaturas mais baixas para o material, uma vez que a viscosidade é fortemente reduzida pela alta taxa de cisalhamento característica do processo.

CHEN *et al.* (2001) injetaram peças de PC com espessuras de 2,5, 1,0 e 0,8 mm, com a presença de linhas de solda nas mesmas, verificando o efeito das condições de processamento na tensão residual induzida nas peças, bem como nas características de resistência à tração das linhas de solda originadas.

COXE *et al.* (2000) procuraram estabelecer uma janela de processo para peças com 0,5, 1,0 e 3,0mm de espessura produzidas com um *grade* comercial de poliestireno sindiotático (sPS) carregado com 30% de fibra-de-vidro.

HUANG e TAI (2001) usaram um CAE comercial para simular o processo de injeção da blenda PC/ABS (material amorfo) em cavidade com forma de plaqueta e 1 mm de espessura investigando numericamente, por meio de um arranjo ortogonal de Taguchi, a influência de cinco fatores (pressão de recalque, temperatura do material, tempo de recalque, espessura da entrada e velocidade de injeção) no empenamento das peças injetadas.

LIAO *et al.* (2001) verificaram a influência de quatro parâmetros na contração e empenamento de carcaças de aparelhos para telefonia celular em PC/ABS com 1,3 mm de espessura.

YAO e KIM (2003) simularam em aplicativos CAE uma condição de processamento em que a parede do molde se mantém acima da temperatura de escoamento do material injetado, para intencionalmente prevenir a formação da camada solidificada e reduzir a pressão necessária ao preenchimento na moldagem de peças com paredes finas.

2.3 Principais Critérios de Projeto que Afetam o Preenchimento dos Moldes e as Propriedades dos Componentes Injetados

Autores como ROSATO (1994), MENGES e MOHREN (1993), REES (2001) estabeleceram em seus trabalhos inúmeros critérios de auxílio ao projeto de produtos e moldes, visando a melhoria da qualidade das peças injetadas, bem como, o desempenho em serviço dos moldes de injeção. A seguir são descritos os principais critérios de projeto relativos ao estudo desenvolvido nesta tese, com o objetivo de auxiliar e facilitar a compreensão das discussões realizadas em capítulo posterior.

2.3.1 Número e Posicionamento dos Pontos de Injeção

Segundo MALLOY (1994), uma das decisões mais importantes associadas ao preenchimento do molde é a determinação da geometria, número, e localização dos pontos de injeção, podendo, esta decisão, exercer uma influência decisiva sobre a qualidade da peça injetada. A solução adotada terá influência sobre as fases de preenchimento e recalque do processo de moldagem e exercerá uma

forte influência sobre as dimensões finais da peça, bem como em seu aspecto e desempenho funcional.

O número, a posição e as geometrias adotadas para os pontos de injeção, podem influenciar a qualidade da peça de muitas maneiras, provocando alterações nos seguintes aspectos:

- Pressão de injeção necessária e distribuição de pressão na cavidade;
- Perfil de preenchimento da cavidade;
- Qualidade e localização da linha de solda;
- Grau e direção da orientação molecular;
- Tolerâncias dimensionais;
- Formação de defeitos como rechupes, vazios, ar aprisionado e falta de preenchimento;
- Tensões residuais;
- Empenamento da peça.

Uma das principais variáveis do processo de injeção influenciada pelo número, geometria e posições adotadas para os pontos de injeção é pressão necessária para o preenchimento da(s) cavidade(s) do molde.

Desta forma, o correto posicionamento dos pontos de injeção pode levar a um efetivo controle da pressão de injeção, de forma que o material preencha o molde uniformemente, e que a queda de pressão na cavidade não seja excessiva (ROSATO, 1995). Isso deve ser levado em consideração especialmente no projeto de moldes para peças de paredes finas, onde as pressões de injeção são, normalmente, muito mais elevadas.

Na Figura 2.4 são apresentadas duas possíveis soluções para o número e o posicionamento dos pontos de injeção em uma peça em forma de uma placa plana e retangular.

Além de melhorar a uniformidade⁵ do preenchimento, a adição de mais um ponto de injeção produz uma significativa redução da pressão necessária para o preenchimento do molde, devido a uma diminuição do comprimento do caminho de fluxo percorrido pelo polímero dentro da cavidade, tornando-se uma solução de projeto fundamental no caso de peças de paredes finas. Contudo, uma desvantagem da utilização de mais de um ponto de injeção é a formação de linhas de solda na peça injetada. Pode ser observado na Figura 2.4 (peça b) que a utilização de três pontos de injeção, apesar

⁵ A uniformidade no preenchimento de um molde trata-se da diferença entre os tempos de preenchimento entre regiões distintas de uma peça. Um preenchimento ideal é aquele em que todas as regiões de uma peça injetada são preenchidas simultaneamente. No caso da Figura 2.4, a adição de mais um ponto de injeção diminui o tempo entre a chegada do polímero à lateral da cavidade e o momento em que as frentes de fluxo se encontram melhorando, portanto, a uniformidade do preenchimento.

dos benefícios produzidos e já mencionados anteriormente, produz a formação de duas linhas de solda no produto. Esse resultado pode, em determinadas situações, ser inaceitável, principalmente com peças com características estéticas, tais como as produzidas pela indústria automotiva e de eletroeletrônicos.

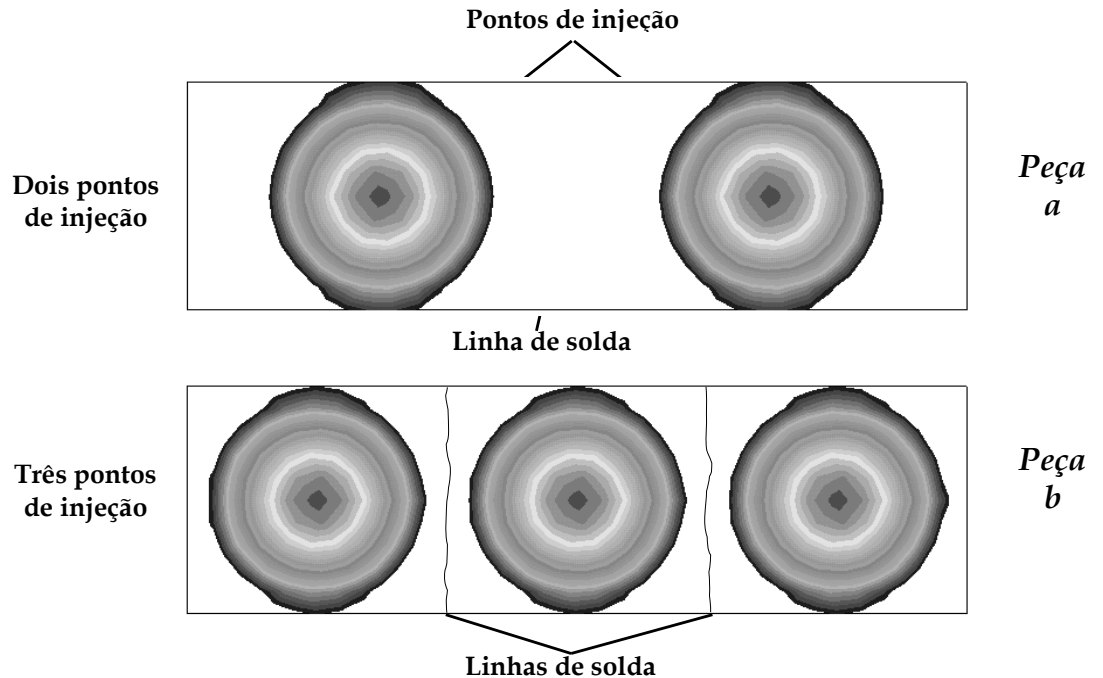


Figura 2.4 – Ilustração da formação de linhas de solda em função do posicionamento do ponto de injeção no preenchimento de uma peça. Adaptado de MALLOY (1994).

Desta forma, os projetistas do molde e do produto devem trabalhar de forma integrada para que uma solução que atenda a esses requisitos, mesmo que conflitantes, seja encontrada.

Apesar de uma linha de solda não ser considerada como um elemento de projeto de um componente injetado, tal como sua espessura de parede, variações de espessura e localização dos pontos de injeção, o seu surgimento e posicionamento em uma peça injetada afetam o desempenho em serviço da mesma. Por este motivo, MALLOY (1994) dispensa uma considerável atenção ao seu tratamento. Tal tratamento será aqui também brevemente descrito, devido justamente a sua importância no comportamento de componentes, principalmente naqueles considerados nesta investigação.

Pode-se observar nos exemplos apresentados na figura 2.4, que uma determinada solução de projeto pode levar a certos benefícios para um determinado aspecto do processo de preenchimento de um molde, como foi o caso da redução da pressão de injeção, em decorrência do aumento do número de pontos de injeção, o que é fundamental em peças de parede fina, contudo, aspectos

negativos também podem ser originados, tal como as linhas de solda observadas no exemplo da Figura 2.5.

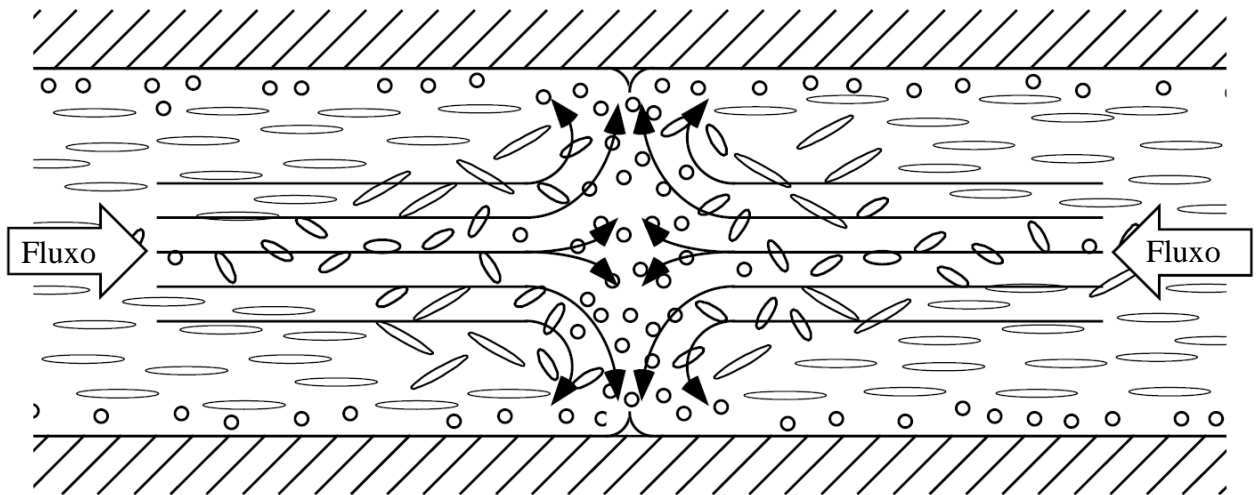


Figura 2.5 – Esquema exemplificando a formação de uma linha de solda em uma peça injetada.
Adaptado de MALLOY (1994).

As linhas de solda formam-se durante o processo de preenchimento do molde quando a frente de fluxo do polímero se separa e se une novamente em alguma outra região. A separação da frente de fluxo pode ser causada por obstruções, variações de espessura na cavidade ou em moldes que possuem múltiplos pontos de injeção.

As linhas de solda assemelham-se a trincas na superfície da peça, sendo freqüentemente visíveis a olho nu (Figura 2.6).

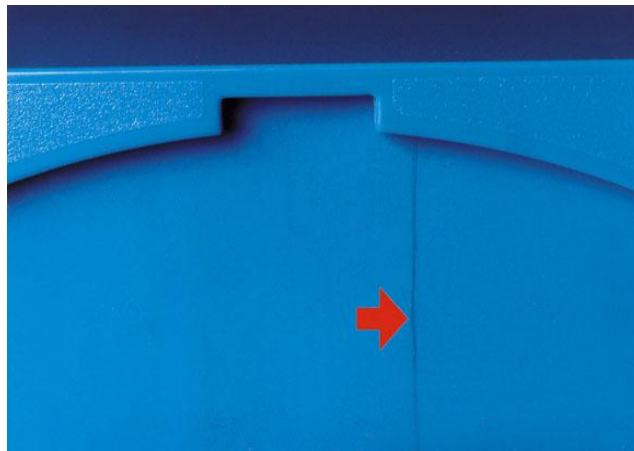


Figura 2.6 - Exemplo de uma linha de solda visível em uma peça injetada (fonte Basf plastics, 1995).

Um dos efeitos mais importantes, com relação à formação da linha de solda, é a resistência mecânica apresentada pela região onde ocorre o seu aparecimento, que pode ser significativamente menor do que em regiões onde esta não ocorre (MALLOY, 1994).

Contudo, no contexto do processamento de peças de paredes finas, assim como a sua principal linha de aplicação (eletroeletrônicos principalmente), uma das principais conseqüências da formação de uma linha de solda diz respeito ao comprometimento da aparência do produto injetado, já que uma das principais tendências de aplicação destes produtos está em setores que exigem os acabamentos das superfícies com alta qualidade.

Uma das formas mais eficientes de minimizar o efeito de uma linha de solda é o de posicioná-la em locais que não sejam críticos em termos de estética e desempenho estrutural do produto. O projetista pode variar a geometria, a espessura de parede e a disposição dos pontos de injeção, com o objetivo de posicionar as linhas de solda apropriadamente (MOLDFLOW®, 2004).

Pode-se também conseguir uma melhoria do desempenho e da aparência das linhas de solda, através de ajustes nas condições de processamento, tal como a temperatura do material.

Qualquer variável que aumente a temperatura e a pressão, no plano de encontro das frentes de fluxo, exercerá, provavelmente, um efeito positivo sobre o desempenho da linha de solda, pelo fato de promover um emaranhamento das moléculas através da interface da solda. O aumento da temperatura do polímero produz um aumento de sua mobilidade, facilitando a difusão de suas moléculas entre as frentes de fluxo na região de formação da solda. Este fato, associado a maiores pressões, resulta em uma linha de solda com melhores propriedades.

Segundo MALLOY (1995) uma forma alternativa para aumentar a resistência da linha de solda seria através do aumento do número de pontos de injeção na peça. Esta técnica tem como resultado o aumento do número de linhas de solda, contudo, em virtude da diminuição dos comprimentos dos caminhos de fluxo até estas regiões, são obtidas maiores temperaturas com um conseqüente aumento da resistência das linhas de solda formadas, devido à facilidade de uma maior fusão entre as duas frentes de fluxo (Figura 2.4 b).

2.3.2 Especificação do Material Polimérico

Uma das etapas mais importantes do desenvolvimento de um novo produto é a seleção do material com o qual o mesmo será fabricado. Esta etapa é de extrema importância para a qualidade

do produto, determinando também a facilidade de processamento do componente injetado, sendo extremamente importante especialmente para o processamento de peças de paredes finas.

Um dos critérios para a seleção de um polímero é a sua processabilidade, a qual pode ser medida através do fluxo em moldes em forma de serpentina, onde o material é injetado dentro de uma cavidade em forma de uma longa espiral, usando várias condições de moldagem. Tais informações são, normalmente, geradas pelos fabricantes de termoplásticos (MALLOY, 1995), sendo divulgadas de várias formas como em páginas na Internet ou folhas de dados de processamento de cada polímero.

O máximo comprimento de fluxo que é alcançado experimentalmente é determinado como função da espessura da cavidade e das condições de injeção utilizadas. As variáveis de processo, que são tipicamente avaliadas, incluem temperatura do material, temperatura do molde, pressão e velocidade de injeção. Os dados experimentais são comumente apresentados como mostra a Figura 2.7. Os resultados desses ensaios auxiliam o projetista na comparação da processabilidade dos diversos polímeros, bem como na escolha da posição dos pontos de injeção.

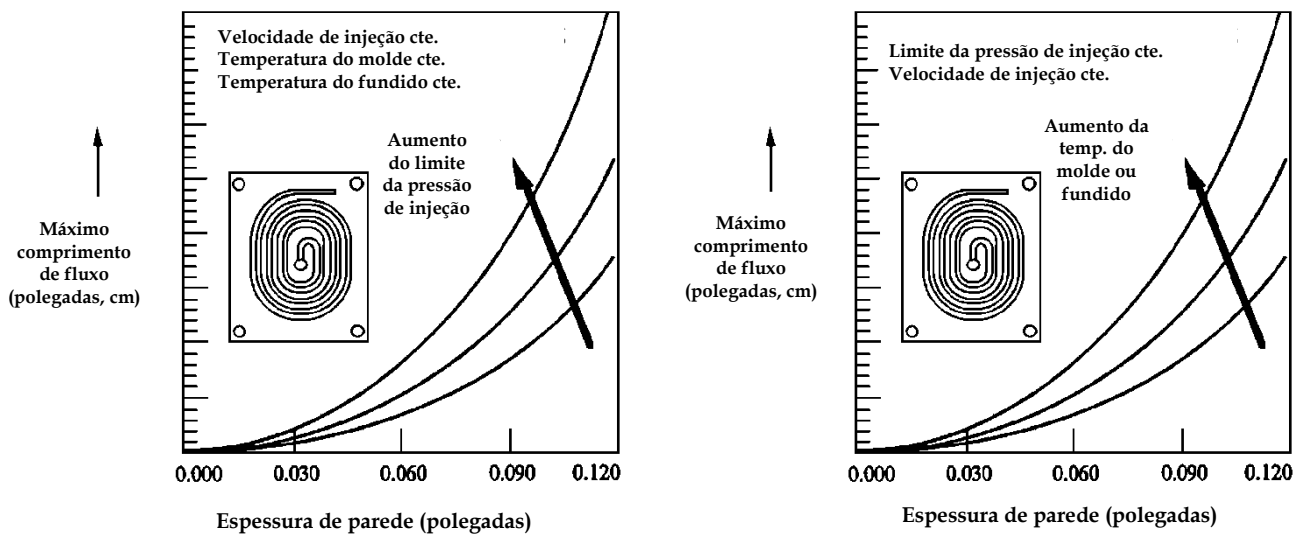


Figura 2.7 – Curvas de fluxo em uma espiral. À esquerda, são apresentadas as curvas de máximo comprimento de fluxo atingido como função da espessura de parede e das condições de processamento, e à direita, como função da pressão de injeção (Adaptado de MALLOY, 1995).

Outro critério utilizado para a seleção do termoplástico a ser empregado é através de seu índice de fluidez. Particularmente no caso de peças de paredes finas, procura-se selecionar *grades* com maiores índices de fluidez por apresentarem melhor processabilidade, atingindo maiores comprimentos de fluxo durante o preenchimento. Contudo, a seleção do polímero baseada em seu

índice de fluidez deve ser empregada apenas nas fases iniciais do projeto, ou na determinação de um grupo de possíveis polímeros a serem utilizados como material para a fabricação do componente em questão. Isto se deve ao fato do ensaio de índice de fluidez ser realizado a baixas taxas de cisalhamento (região do platô newtoniano), não representando adequadamente o comportamento do polímero durante o processo de injeção (BIRLEY, 1991).

Tais informações são importantes no processo de injeção em moldes de paredes finas, principalmente na seleção dos polímeros a serem injetados, já que fornecem informações valiosas a respeito do comprimento máximo que o polímero pode percorrer dentro da cavidade deste tipo de geometria (MENGES e MOHREN, 2001).

2.4 Processos de Acabamento e Decoração de Peças Injetadas

Mesmo que o processo de injeção tenha como uma de suas características, e também como uma de suas principais vantagens, a produção de peças que, na maioria das vezes, não necessitem de processos extensos de acabamento, existem muitas situações na qual o produto injetado requer uma operação ou operações, de acabamento, que o deixem pronto para seu uso final.

Alguns produtos necessitam, devido à presença de marcas em sua superfície (inerentes ao processo de injeção), sofrer um processo de pintura. Em outros casos, os produtos passam por operações de rebarbação para que sejam eliminados vestígios de pontos de injeção ou rebarbas formadas pela penetração do polímero nas linhas de fechamento do molde. A Figura 2.8 exemplifica algumas das diferentes formas de acabamento utilizadas em componentes injetados (ROSATO, 1995).

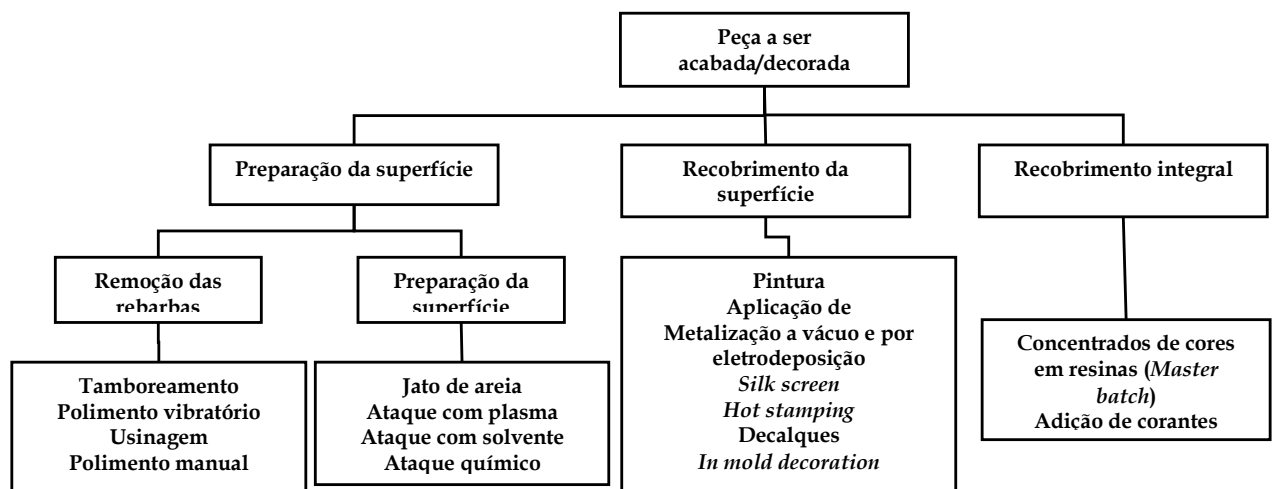


Figura 2.8 - Processos de acabamento necessários para uma posterior decoração da peça injetada (Adaptado de ROSATO, 1995).

Desta forma, os produtos injetados podem requerer processos adicionais que visem conferir alguma característica, estética e/ou funcional, final à peça moldada, obtendo-se um produto acabado pronto para ser utilizado.

De maneira análoga, muitos produtos obtidos por outros processos de transformação, necessitam de operações secundárias após a moldagem a fim de obter-se um produto final pronto para ser entregue ao mercado consumidor, ou para ser levado a uma etapa posterior de sua cadeia produtiva.

Tais processos de acabamento podem ser classificados comercialmente, em uma primeira abordagem, de acordo com a simultaneidade ou não com o processo de moldagem, sendo os principais deles:

a) Processos não simultâneos à moldagem

- Usinagem
- Soldagem
- Colagem
- Metalização
- Pintura
- *Silk screen*

b) Processos simultâneos à moldagem:

- Sobreinjeção
- *In Molding Decoration* (IMD)
- *Sheet Molding*
- Injeção Multi-componentes
- *In Mold Labeling* (IML)
- Injeção sobre Insertos

Atualmente os processos simultâneos à moldagem por injeção, também classificados como processos de injeção com mais de um componente (JOHANNABER e MICHAELI, 2004), demonstram um grande potencial no acabamento de peças injetadas, justamente por permitirem que a aplicação do acabamento seja realizada durante o processo de injeção, bem como pela maior flexibilidade nas possíveis variações dos acabamentos que podem ser empregados.

Para que se tenha uma melhor compreensão sobre o tema abordado, torna-se necessária a apresentação de algumas classificações dos processos de injeção com mais de um componente,

descrevendo-se também os principais processos utilizados em nível industrial na atualidade, os quais também fazem parte do contexto deste trabalho.

Constatou-se, por intermédio do levantamento bibliográfico, a inexistência de um consenso quanto às definições e classificações dos processos de injeção com mais de um componente (termo geral que também abrange os processos de decoração durante a moldagem). Serão apresentadas aqui, portanto, duas destas classificações com o objetivo de se buscar um maior esclarecimento a respeito deste tema.

JOHANNABER e MICHAELI (2004) realizaram uma classificação (Figura 2.9) tendo como base os processos especiais de injeção que se baseiam na moldagem com mais de um componente.

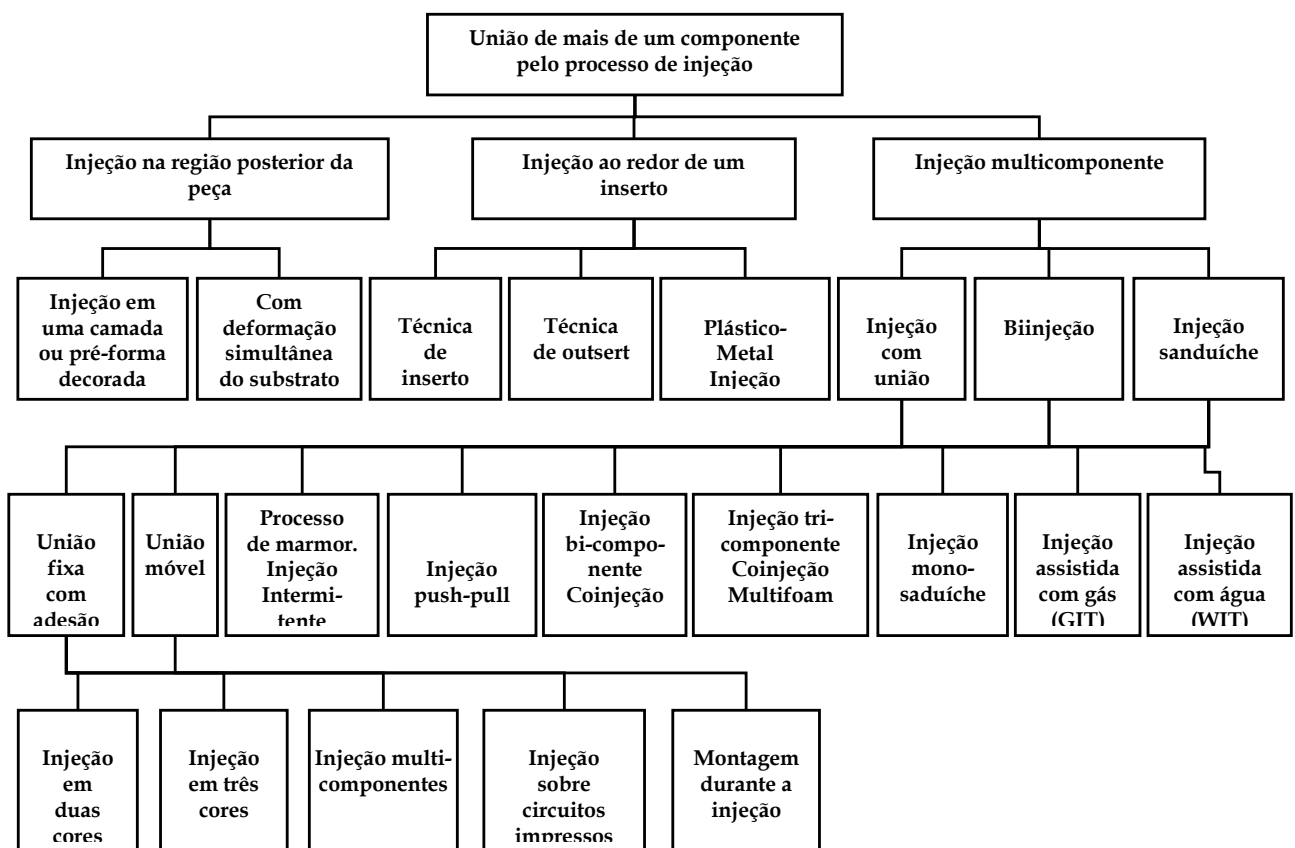


Figura 2.9 - Classificação segundo JOHANNABER e MICHAELI (2004) dos processos especiais de injeção com mais de um componente dentro da cavidade.

Tal classificação tem a vantagem de contemplar todos os processos especiais com mais de um componente, contudo, separa processos que possuem princípios físicos semelhantes em diferentes designações, criando uma especificação excessiva na denominação dos mesmos. Como

exemplo pode-se citar a injeção sobre uma camada ou pré-forma decorada, que possui os mesmos requisitos e princípios que a injeção sobre insertos, ou seja, a injeção sobre ou ao redor de um componente previamente posicionado dentro da cavidade.

A Figura 2.9 apresenta de forma resumida esta classificação. Uma visão completa desta classificação pode ser vista na referência citada anteriormente.

Segundo TURNG (2001) os processos especiais de moldagem por injeção com mais de um componente, objetivo principal deste trabalho, podem ser classificados da seguinte maneira:

1 - Segundo a incorporação de materiais adicionais:

a - Adicionando ou injetando termoplásticos adicionais

- Co-injeção
- Injeção multicomponente (sobre-injeção)
- Injeção lamelar ou microcamada

b - Injeção ao redor ou dentro de componentes metálicos

- Injeção sobre insertos (técnicas *insert* ou *outsert*)
- Injeção sobre núcleo perdido

c - Injeção de um gás dentro do polímero

- Injeção assistida a gás

d - Injeção de um fluido ou água dentro do polímero

- Injeção assistida por um gás liquefeito
- Injeção assistida a água

e - Injeção de um gás dentro de uma mistura de pós cerâmicos ou metálicos com um polímero

- Injeção de pó assistida a gás

f - Injeção sobre tecidos de fibras de reforço dentro da cavidade

- Moldagem por transferência de termofixos
- Moldagem por Injeção Reativa (RIM) estrutural

g - Incorporação de filmes, lâminas metálicas, tecidos ou laminados a serem injetados em suas regiões posteriores

- *In mold decoration* (IMD) e *in mold lamination* (IML)
- Injeção à baixa pressão

Nesta classificação, apesar de também contemplar todos os processos com mais de um componente, o autor prefere, da mesma forma, classificar processos com os mesmos princípios

físicos sob diferentes ramos classificatórios. Foram omitidos aqui os itens restantes desta classificação por não pertencerem ao contexto deste trabalho, sendo possível observá-los na íntegra na referência supracitada.

Existem ainda classificações que enquadram a maioria dos processos descritos anteriormente como moldagem sobre insertos, considerando que os componentes são insertos a serem posicionados na cavidade do molde, independentemente de sua natureza, sobre os quais será injetado o polímero de recobrimento. Contudo, esta classificação não contempla os casos em que mais de um polímero, geralmente dois, são injetados simultaneamente na cavidade, nem os processos auxiliados por fluidos como na injeção assistida a gás e injeção assistida à água.

Observa-se, a partir do que foi exposto acima, que não existe um acordo sobre a forma de classificação dos processos especiais de injeção, dos quais fazem parte aqueles que envolvem a produção de componentes decorados, o que tem como conseqüências uma falta de padronização na nomenclatura e a possíveis problemas no entendimento do assunto. Porém, no presente trabalho será adotada a classificação que trata os componentes inseridos na cavidade como “insertos” sendo esses processos tratados como sobreinjeção dentro do contexto aqui abordado.

2.4.1 Principais Processos de Moldagem com mais de um Componente

Um dos principais e mais antigos processos de moldagem por injeção envolvendo mais de um componente é a injeção sobre insertos, que apresenta como vantagens a união em uma única etapa do polímero injetado com a componente que é colocado na cavidade (inserto), sem a necessidade de uma operação ou linha para montagem dos dois componentes.

Embora isso seja verdade, a evolução dos materiais utilizados na moldagem por injeção tornou possível de diversas maneiras a aplicação da tecnologia de moldagem sobre insertos.

No princípio os insertos compreendiam apenas peças simples tais como pinos ou buchas com roscas. Atualmente, qualquer componente posicionado dentro da cavidade que possa suportar o processo de injeção pode ser considerado como sendo um inserto, segundo a classificação citada anteriormente (Figura 2.9).

Na maioria dos casos, os insertos são fabricados em materiais tais como cobre, bronze ou aço, e usualmente na forma de peças estampadas, usinadas, etc. Também itens como peças fabricadas em material cerâmico, fundidas ou mesmo componentes injetados são freqüentemente utilizados como insertos (Figura 2.10).

O processo segue praticamente as mesmas etapas observadas na moldagem por injeção convencional, utilizando também os mesmos materiais empregados nesse processo. Contudo, na moldagem sobre insertos, o componente utilizado como inserto é posicionado dentro do molde antes que o polímero seja injetado na cavidade. Após ser colocado o molde é fechado e o polímero é injetado sobre o inserto. Desta forma o inserto é envolvido pelo polímero permitindo uma melhor união entre estes dois componentes.



Figura 2.10 - Exemplos de componentes fabricados pela técnica de injeção sobre insertos metálicos e não metálicos (Fonte LEECH INDUSTRIES INC, 2008)

Outra diferença entre a moldagem por injeção convencional e a moldagem com insertos é, geralmente, a necessidade de utilizar, no lugar de uma máquina com unidade de fechamento horizontal, uma máquina com a unidade de fechamento vertical, por facilitar a fixação do inserto.

Como resultado da aplicação desta tecnologia obtém-se, geralmente, uma redução nas dimensões e custos do produto final (produto híbrido – plástico e metal), acompanhada de uma melhora na sua qualidade.

Como desvantagem do processo pode ser citado o custo para implementação deste tipo de tecnologia, sendo mais vantajosa para a produção de peças mais complexas, as quais exigiriam muito tempo de montagem caso os componentes fossem produzidos separadamente.

Outra desvantagem do processo é a necessidade do inserto resistir a esforços durante o processo de injeção (injeção do polímero sobre o inserto). Como as pressões e temperaturas aplicadas dentro da cavidade normalmente são elevadas, o inserto deve suportá-las sem sofrer deformações. Contudo, em algumas situações, principalmente quando são utilizados insertos de materiais poliméricos, os esforços podem ser críticos e produzir deformações no mesmo dificultando o uso destes materiais. Contudo, a aplicação de certas soluções de projeto podem permitir a

moldagem sobre estes componentes, sem que os mesmos sofram qualquer tipo de deformação por ação de calor e pressão.

Outro processo largamente utilizado hoje em dia, em diversos setores produtivos, é a sobre-injeção (*overmolding*), onde um polímero é injetado sobre uma peça de plástico, previamente fabricada.

Uma das principais aplicações industriais é a injeção de borrachas termoplásticas (TPR's) sobre polímeros mais rígidos como poliamidas (PA) e poliacetais (POM). O objetivo é propiciar características de “maciez” ao toque do produto produzido, a combinação de materiais com características diferentes, bem como a produção de efeitos decorativos.

Uma possível aplicação da sobre-injeção é a união de componentes injetados na forma de duas metades. Neste caso, as duas metades, previamente injetadas, são posicionadas dentro de outro molde, feito para acomodar as duas peças ao mesmo tempo, e o polímero utilizado para unir os componentes é injetado como se observa na Figura 2.11.

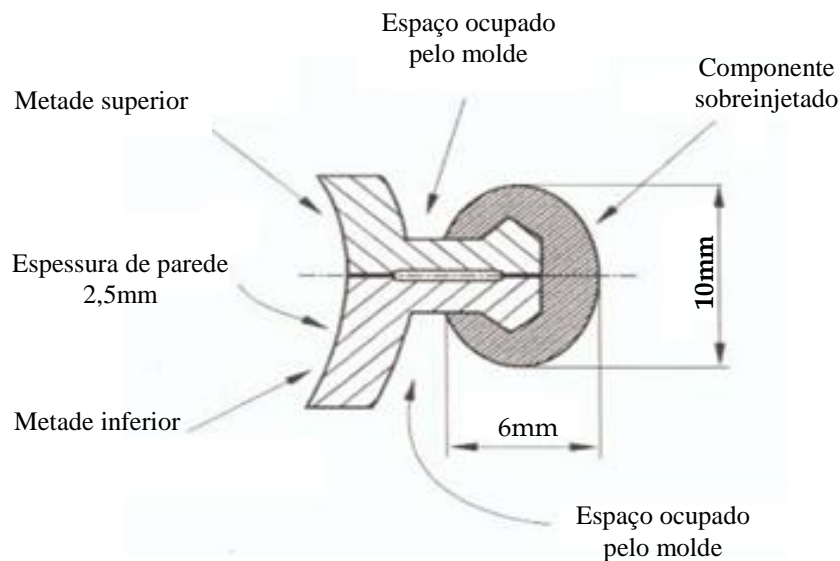


Figura 2.11 - Exemplo de aplicação do processo de injeção sobre insertos de plástico, onde é realizada a união de duas metades por uma junta injetada (Adaptado de Braun e Enewoldsen, 1999).

A grande vantagem deste processo é a eliminação de processos mais complexos e dispendiosos para a união dos dois componentes tais como moldagem com núcleo perdido (VANDRESEN, 2003) ou a soldagem das partes (realizada posteriormente a moldagem das duas metades). Uma das dificuldades encontradas é quando à limitação dos materiais que podem ser empregados, já que existe a necessidade de afinidade química, que pode ser estimada pelo

coeficiente de Hildebrand (BAIJAL, 1982), entre o par de polímeros, para que ocorra adesão entre os mesmos.

Outro processo de grande relevância atualmente é o conhecido como *In Mold Decoration* ou simplesmente IMD. Em termos gerais o termo IMD refere-se a qualquer tecnologia capaz de aplicar tecidos, lâminas metálicas, gráficos etc, sobre uma peça, durante o processo de moldagem da mesma. Como exemplo da aplicação desta tecnologia pode ser citado o painel de controle de condicionadores de ar de automóveis. Nestes painéis podem, normalmente, existir textos ou símbolos, produzidos em diversas cores ou padronagens imitando, por exemplo, madeira. Os gráficos ou textos podem também ser transparentes, permitindo a sua iluminação por LED's colocados por trás dos mesmos, ou então o console ser decorado com filmes que combinem com a cor do resto do veículo (Figura 2.12).

Em sua forma mais simples, este processo envolve o posicionamento de um filme plano dentro de um molde de injeção, sendo o polímero injetado sobre este filme, havendo a adesão entre o mesmo e o polímero injetado. Em sua forma mais avançada, este processo utiliza um filme ou chapa, que deve permitir sua termoformação, a qual tem previamente decorada a superfície que ficará em contato com o polímero injetado, podendo a sua outra superfície receber uma texturização. O filme ou chapa é então termoformado, obtendo, assim, a forma da cavidade do molde de injeção, sendo posteriormente inserido no mesmo para que seja realizado o processo de injeção. Desta forma, o filme forma sobre o material injetado uma camada que pode ter como funções a decoração, proteção ou mesmo texturização da peça injetada. A Figura a seguir mostra um processo típico de decoração através de *in mold decoration*.



Figura 2.12 - Exemplo de aplicação do processo de In Mold Decoration na indústria automotiva (Adaptado de Braun e Enewoldsen, 1999).

Uma das principais aplicações do processo de *in mold decoration* é na indústria automotiva, porém também são encontrados exemplos como na indústria de telecomunicações, informática e eletroeletrônica (Figura 2.13).

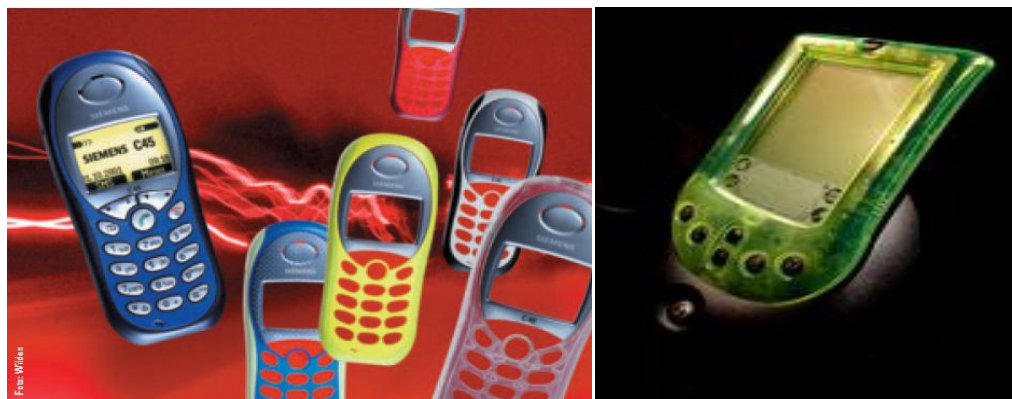


Figura 2.13 - Exemplos de produtos da linha de eletrônicos produzidos pelo processo IMD (Adaptado de © CARL HANSER VERLAG, 2003 e © GENERAL ELECTRIC COMPANY, 1997-2004).

VARMA e VENKATQASURAMY (2003), realizaram estudos relativos à sobreinjeção de uma camada de elastômero termoplástico (TPE) sobre materiais poliméricos rígidos como polietileno de alta densidade, polipropileno, policarbonato, polimetacrilato de metila, poliestireno de alto impacto e polioxidofenileno, avaliando as combinações específicas entre diferentes tipos de TPE's e os polímeros referidos anteriormente, bem como a influência exercida pela máquina injetora, condições de processamento utilizadas e o projeto do molde e do produto.

ROUSE (2002) investigou a sobreinjeção de peças da linha automotiva, fabricadas com polímeros mais rígidos, com elastômeros termoplásticos discutindo sobre suas principais aplicações, vantagens e limitações dentro deste setor.

GEDEON e MARTIN (2000) investigaram, por meio de projeto de experimento, os fatores que influenciam na adesão entre elastômeros termoplásticos e poliamida 6.6 com fibra de vidro e polibutileno tereftalato com fibra de vidro. Fatores como temperatura do fundido, do molde, taxa de cisalhamento e posição do ponto de injeção foram avaliados.

SEPE (2000) avaliou os efeitos da presença de contaminantes em polímeros na adesão resultante entre os mesmos e elastômeros termoplásticos.

JANSEN *et al.* (2001) estudaram o aparecimento de trincas e a falha de produtos fabricados por sobre-injeção indicando os agentes prováveis causadores das trincas. Os autores também

realizaram uma revisão sobre ensaios que podem ser utilizados para a caracterização estrutural de componentes produzidos por sobreinjeção.

TCHALAMOV e CUNHA (2003) investigaram, utilizando projeto de experimentos, a influência da interface entre PP/PEAD de componentes sobre-injetados no comportamento mecânico das amostras, observando também as características microestruturais da interface.

LEAVERSUCH (2004), avaliou a união mecânica entre chapas metálicas estampadas e uma camada sobre-injetada de PA 6 e PA 6.6 reforçados com fibra de vidro.

TURNG (2001) realizou uma revisão sobre novos processos de moldagem por injeção, tais como injeção sobre núcleo perdido, moldagem por injeção compressão, *in-mold decoration/lamination*, injeção assistida por gás, injeção a baixa pressão, utilizando polímeros como blendas PC/ABS e PET (polietileno tereftalato), avaliando suas potencialidades e aplicabilidades relativas ao projeto do produto e do molde, benefícios econômicos e qualidade das peças produzidas.

UMAMAHESWARAN e TRUESDAIL (2001) investigaram a substituição da pintura, e outros processos de decoração, de componentes injetados de veículos automotores por filmes termoformados e sobreinjetados, avaliando os benefícios econômicos e ambientais desta nova solução.

2.5 Fabricação e Utilização de Moldes pela Técnica de Vazamento de Resina Epóxi na Moldagem por Sobreinjeção

O vazamento de resinas reforçadas é considerado por JACOBS como o processo mais utilizado para fabricação rápida de moldes destinados a produção de uma série intermediária de peças. Como se trata de um processo indireto, a fabricação do molde necessita de um modelo que pode ser produzido por diferentes maneiras. Dentre os processos existentes, deve-se dar preferência ao que proporcione maior precisão, estabilidade dimensional e facilidade no acabamento superficial do modelo como forma de se obter um melhor acabamento e facilidade de fabricação do molde produzido. Segundo LAFRATTA (2004), com o surgimento e a difusão dos processos de prototipagem rápida, o interesse por este processo se intensificou, pois tornaram possível a rápida produção de modelos complexos com melhor qualidade.

A Prototipagem Rápida, por sua vez, consiste em vários processos de manufatura pelos quais um modelo físico de uma peça é confeccionado diretamente a partir de dados de um modelo criado em um sistema CAD 3D ou obtidos a partir de um sistema digitalizador tridimensional.

No processo de estereolitografia (Figura 2.14), um feixe laser incide sobre uma cuba contendo um polímero fotossensível, descrevendo trajetórias que correspondem a fatias do protótipo a ser construído. Em uma plataforma acoplada a um elevador, sobre a qual as camadas são construídas, é baixada ao término da construção de cada camada do protótipo, permitindo assim que uma nova camada seja construída e unida à anterior. Ao término do processo a plataforma é erguida e o modelo pode ser retirado e submetido a processos posteriores de acabamento.

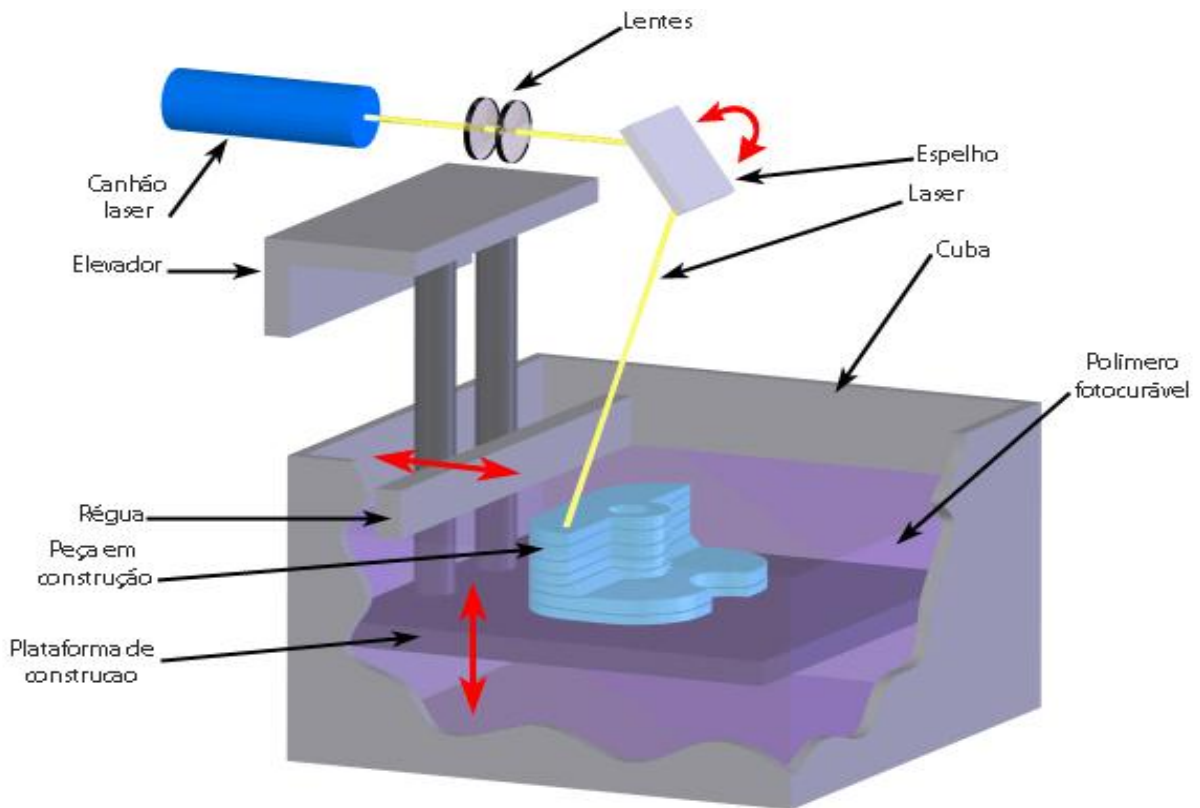


Figura 2.14 Representação esquemática do processo de estereolitografia (Fonte CUSTOMPART.NET, 2009)

O modelo assim obtido é posicionado sobre uma base cuja forma corresponderá a superfície de fechamento do molde a ser fabricado. Em seguida, sobre a mesma base, deve ser fixada uma moldura que corresponderá ao tamanho disponível do porta-moldes. Posteriormente é vazada sobre o modelo a resina epóxi, aguardando-se o tempo necessário para sua cura, o que ocorre, normalmente, em aproximadamente de 24 horas (Figura 2.15). O processo descrito permite a obtenção de uma das metades do molde, devendo ser repetido, mediante a inversão do molde primeiramente obtido e

vazamento da resina sobre seu lado oposto para a obtenção da outra metade, como indicado na Figura 2.15.

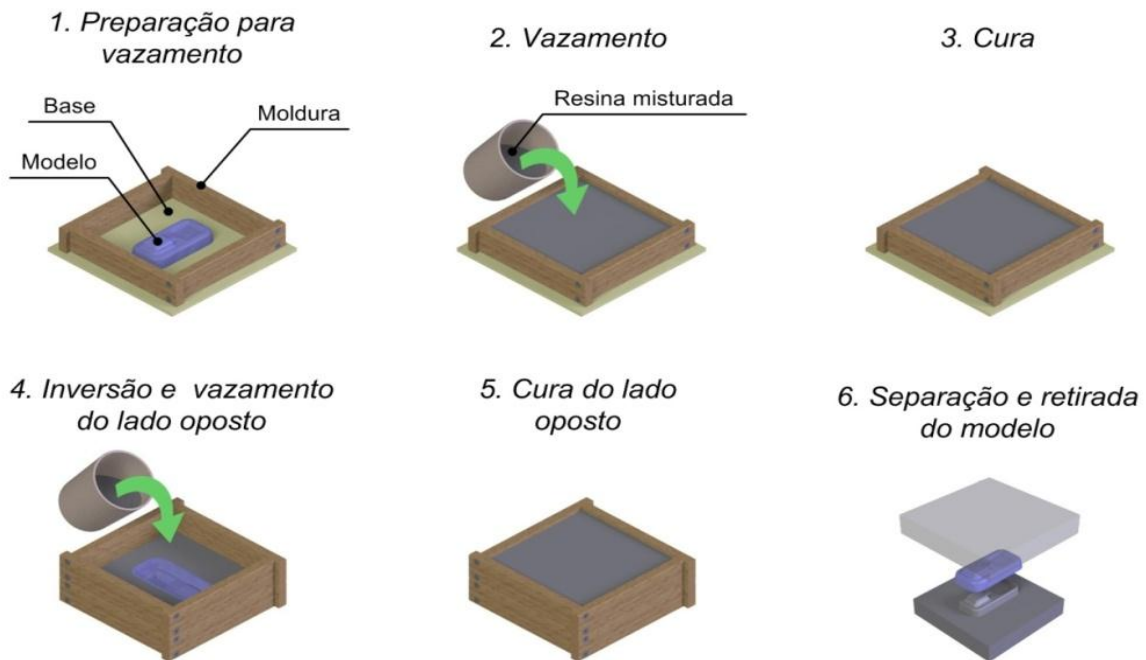


Figura 2.15 Sequência esquemática do processo de fabricação de moldes pelo vazamento de resina epóxi (Fonte SABINO NETTO, 2008).

Após a cura dos moldes obtidos, realiza-se uma etapa de pós-cura térmica para completar a cura da resina e, desta maneira, aumentar a resistência mecânica do molde (SABINO NETTO 2008, VILLAMIZAR 2005), sendo necessária, normalmente, uma etapa posterior de usinagem, composta de faceamento da região inferior do molde (por onde a resina é vazada) e, em alguns casos, o fresamento de canais de alimentação e a furação para a passagem de pinos extratores, para que o molde atenda as dimensões do porta moldes onde será instalado e os requisitos necessários ao processo de injeção.

Desta forma, as tecnologias de fabricação rápida vêm sendo aplicadas à obtenção de ferramentas para o processo de injeção, com as quais é possível a produção de pequenos a médios lotes do componente que está sendo desenvolvido. O emprego de moldes ou ferramentas rápidas, portanto, permite que as peças produzidas possam ser avaliadas quanto ao seu desempenho mecânico e/ou estético, possibilitando também a investigação do próprio processo de injeção. O uso de moldes rápidos permite, assim, realizar uma investigação do projeto do componente que se deseja produzir por meio de sua processabilidade.

Diversos estudos já foram realizados em moldes fabricados por vazamento de resina epóxi, buscando investigar principalmente os tipos e causas de falhas ocorridas durante o processo de injeção, bem como sua eficiência no processo de transferência de calor entre a peça injetada e o sistema de resfriamento do molde. Um foco de investigação que desperta grande interesse é o que avalia a possibilidade de aplicação industrial desta tecnologia de fabricação de moldes, sendo, contudo, necessário investigar as propriedades das peças injetadas nestas ferramentas.

Em se tratando de ferramental rápido produzido por estereolitografia e vazamento de resina epóxi, as pesquisas estão focadas principalmente na avaliação das propriedades mecânicas e dimensionais das peças através de comparações com as mesmas peças injetadas em moldes de aço.

A tabela 2.2 sintetiza os resultados dos principais trabalhos produzidos até o presente momento.

Tabela 2.2 - Comparação de propriedades mecânicas entre peças injetadas em moldes metálicos e não metálicos. Apresenta-se o valor percentual da propriedade para peça injetada em SL ou VR em relação à injetada em metal. Os resultados assinalados foram pouco discutidos ou não explicados (CAVALHEIRO, 2004).

material injetado	molde	autor	tração			flexão		impacto
			resistência escoamento* ruptura **	alonga-mento (ruptura)	módulo	alonga-mento (ruptura)	módulo	resistência (Izod)
semicristalinos	PA	VR	Dusel <i>et. al.</i> , 1998	125 %*	55%			
	PA 6/6	SL	Polosky <i>et. al.</i> , 1998	88 %*	65%	100 %		93,5 %
	PEAD	SL	Polosky <i>et. al.</i> , 1998	106 %*	29%	151 %		76,5 %
	PP	SL	Jayanthi <i>et al.</i> , 1997	100%**				
	POM	SL	Jayanthi <i>et al.</i> , 1997	100 %**	114,5 %	86 %		
	sPS	VR	Dawson e Muzzy, 1999	90 %**	85 %	100%	131 %	142 %
amorfos	aPS	VR	Dawson e Muzzy, 1999	89 %**	86 %	100%	124 %	156 %
	PSAI	SL	Polosky <i>et. al.</i> , 1998	94 %*	16%	135 %		65,5 %
	PC	SL	Polosky <i>et. al.</i> , 1998	102 %*	20%	140 %		126%
	PC FV	SL	Polosky <i>et. al.</i> , 1998	111%*	93%	125 %		113 %
	PC FV	SL	Damle, 1998	90 %*				90%*

Legenda:			
	maior influência da cristalinidade	30%	valor percentual da propriedade para peça injetada em SL ou VR em relação à injetada em metal
	maior influência da relaxação da orientação molecular		
	influência da orientação molecular	SL	moldes produzidos por estereolitografia
	modificação do tamanho de fissura intrínseco	VR	moldes produzidos por vazamento de resina
	influência das menores tensões residuais		resultados não explicados ou pouco discutidos

Segundo CAVALHEIRO (2004), protótipos podem ser usados de várias maneiras e em diferentes etapas do processo de desenvolvimento do produto, exigindo características apenas estéticas, parcialmente funcionais, plenamente funcionais ou necessitando da reprodução integral do produto final.

Em relação às propriedades mecânicas, DUSEL *et al.* (1998) afirmam que se o protótipo deve ser idêntico, então deve ser injetado em metal. HARRIS e DICKENS (2003) recomendam o emprego de plásticos amorfos em preferência aos semicristalinos, pois suas propriedades são menos dependentes da taxa de resfriamento e os resultados seriam peças com propriedades mais próximas das injetadas em aço. Porém, Salmória *et al.* (2008) mostraram que a moldagem de IPP em ferramentas fabricadas em materiais metálicos e compósitos permitiram a obtenção de corpos de prova com propriedades mecânicas bastante próximas para as duas técnicas.

LI *et al.* (2000) concordam com a posição de DUSEL *et al.* (1998), mas apontam três aplicações potenciais para moldes SL: 1) protótipos e peças finais com baixo volume de produção; 2) peças com propriedades mecânicas dependentes de resfriamento lento; 3) necessidade do ajuste do processamento antes da construção do molde definitivo. HOPKINSON e DICKENS (2000) também sustentam que os moldes SL podem ser usados com sucesso quando se pode tirar proveito da baixa condutividade térmica. Pela menor exigência de pressões de injeção, os autores acreditam que um novo campo de aplicação seria aberto com o emprego de moldes SL na moldagem de peças com caminho de fluxo longo em injetoras de pequeno porte. Exemplificando essas considerações, HARRIS (2000) injetou, com relativo sucesso, poliéter-éter-cetona (PEEK), um material que necessita de resfriamento lento para obtenção das propriedades ideais. Os inserts SL eliminaram os custos de aquecimento dos moldes de aço e reduziram a pressão de injeção.

No contexto da moldagem por injeção, os inserts SL têm sido investigados praticamente apenas no processamento de termoplásticos em moldes de duas placas. Fora desse contexto, destacam-se os trabalhos de HEMRICK *et al.* (2001) e BEAL (2002), que usaram moldes SL na injeção de pó metálico, e de FERREIRA e VANDRESEN (2000), que os avaliaram no processo de injeção com núcleo perdido.

VILLAMIZAR (2005) e JESUS (2006) investigaram o processo de fabricação e o comportamento térmico e mecânico dos moldes compósitos fabricados através da técnica de vazamento de resina epóxi com cargas de alumínio e aço, no processo de injeção de termoplásticos semicristalinos como o IPP, PET e PA66.

PARADIS (1998) descreveu as vantagens e limitações da injeção de peças em ABS e Policarbonato quando comparadas a injeção das mesmas peças em moldes usinados em alumínio. O autor observou no trabalho a relação custo/benefício das duas formas fabricação dos insertos verificando uma redução de custos e tempos na produção de moldes pelo processo de vazamento de resina epóxi.

MICHAELI e LINDNER (2000) investigaram as propriedades morfológicas e mecânicas de peças injetadas em moldes construídos por diferentes técnicas de fabricação rápida (vazamento de resina epóxi, spray de metal fundido, SLS, processo Keltool investment casting), comparando os resultados obtidos com peças injetadas em moldes de aço.

CHUNG et al (2003) investigaram a influência de diferentes cargas metálicas (alumínio em pó, pó de ferro fundido e fibras de alumínio) no comportamento de moldes fabricados pela técnica de vazamento de resina epóxi, bem como a mudança de comportamento do molde com a variação do percentual de carga metálica, no caso do emprego de alumínio em pó.

POLOSKY et al (1999) avaliaram a utilização de moldes rápidos, fabricados pela técnica de vazamento, na injeção de poliestireno de alto impacto, polietileno de alta densidade, policarbonato, policarbonato reforçado com fibra de vidro e poliamida 6.6, comparando os resultados com moldes de produção, tendo como critérios de comparação precisão dimensional, durabilidade dos moldes e condutividade dos moldes.

DAWSON E MUZZY (2001) estudaram a aplicação de compósitos de resina epóxi com cargas de alumínio, cerâmicas e fibras de carbono em moldes fabricados por vazamento. Os resultados mostraram um melhor comportamento dos moldes quanto à condutividade térmica e sua temperatura de transição vítrea quando comparados a moldes tradicionais de epóxi sem carga e moldes em resinas SL.

RAMOS *et al.* (2003) estudaram o desempenho térmico (para diferentes configurações de sistemas de resfriamento) de moldes híbridos com insertos fabricados em epóxi, comparando os resultados obtidos com simulações em computador utilizando o software C-MOLD.

Pode ser observado, portanto, que até o momento as investigações que vêm sendo conduzidas limitam-se a uns poucos aspectos referentes às tecnologias de fabricação rápida de moldes. Não tendo sido encontradas, por exemplo, trabalhos que visassem à investigação do emprego de moldes produzidos por vazamento à injeção de peças com mais de um componente.

2.6 Princípios Gerais sobre a Adesão entre Polímeros

Como foi visto no capítulo anterior, na maioria dos processos de decoração de peças injetadas está envolvido o problema de adesão entre componente injetado e a camada decorativa. Devido à complexidade do tema, serão descritos neste capítulo, os principais mecanismos de união e adesão, com o objetivo de esclarecer uma das principais questões envolvidas neste trabalho.

2.6.1 Principais Mecanismos de Adesão

Há anos vêm sendo investigados os mecanismos de adesão, tendo sido propostas várias teorias em uma tentativa de explicar este fenômeno. Contudo, nenhuma teoria por si só, é capaz de explicar completamente o que ocorre nos processos de adesão. A ligação que ocorre entre um adesivo e um objeto ou uma superfície pode ser considerada como uma soma de forças de origem mecânica, física e química que se sobrepõem e influenciam umas nas outras. Apesar de não haver um único mecanismo de adesão, pode-se distinguir e explicar o que ocorre em cada um deles, durante o processo de adesão. Assim, distingue-se entre forças de origem mecânica (*mechanical interlocking*), que são produzidas pela ancoragem do adesivo em poros ou rugosidades existentes nas superfícies consideradas; forças de origem eletrostática, as quais se referem à diferença entre as eletronegatividades dos materiais que serão unidos, sendo os outros mecanismos de adesão de natureza intermolecular e química, que ocorrem nas interfaces de sistemas heterogêneos. Este mecanismo de adesão química é explicado, no caso de forças intermoleculares, pela teoria da adsorção, e no caso de interações químicas pela teoria de quimissorção ou adsorção química. Os processos que controlam a adesão entre tipos similares de termoplásticos e sistemas homogêneos são explicados com a teoria da difusão (POCIUS, 2002).

Adesão por União ou Ancoragem Mecânica (Mechanical Interlocking)

A teoria de adesão por união mecânica (Figura 2.16) estabelece que uma boa adesão ocorre quando um adesivo (ou no caso do presente trabalho o polímero injetado) penetra nos poros e irregularidades existentes na superfície de um substrato. O adesivo deve não apenas molhar o substrato, como também possuir propriedades reológicas que permitam a sua penetração nos poros em um tempo relativamente curto (antes de ocorrer o “endurecimento” do mesmo). Esta teoria,

contudo, oferece explicações para poucas situações tais como, a união entre elastômeros e têxteis e elastômeros e papéis. No entanto, como pode ser observada na prática uma boa adesão entre superfícies com baixa rugosidade e sem poros superficiais, torna-se evidente que, apesar da união mecânica auxiliar no processo de adesão, ela não pode ser considerada como uma justificativa genérica para os mecanismos de adesão.



Figura 2.16 - Desenho esquemático do processo de adesão por união mecânica entre substrato (inserto) e polímero sobreinjetado (Adaptado de PACKHAM, 2005).

Alguns tratamentos quando aplicados sobre as superfícies a serem unidas tendem a aumentar a força de adesão. Estes Tratamentos (especialmente quando aplicados a superfícies de componentes plásticos) resultam em um aumento da rugosidade, o que pode aumentar a eficiência e a durabilidade da união devido ao aumento da ancoragem mecânica ou *mechanical interlocking*. Além de produzir uma interferência mecânica, o aumento do nível de adesão, devido à rugosidade, também pode resultar de outros fatores como o aumento da área de contato entre adesivo e a superfície, aumento da cinética de molhamento e do aumento da deformação plástica do adesivo.

Adesão por Atração Eletrostática

A teoria da adesão atração por eletrostática (Figura 2.17) baseia-se na diferença de eletronegatividades existente entre os componentes que serão unidos. A força de adesão é atribuída à transferência de elétrons através da interface criando cargas negativas e positivas que se atraem. Por exemplo, quando um polímero é posto em contato com uma superfície metálica, elétrons são transferidos do metal para o polímero, criando uma atração eletrostática entre os mesmos. A teoria

da atração eletrostática diz que estas forças na interface entre os componentes é que são responsáveis pela adesão ou resistência à separação entre o adesivo e o substrato (POCIUS, 2002).

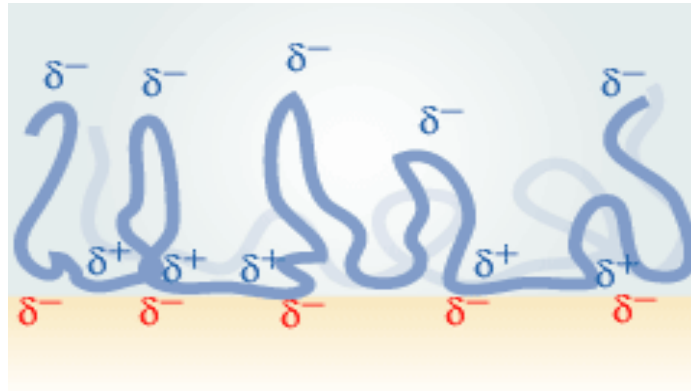


Figura 2.17 - Figura esquemática do processo de adesão por atração eletrostática entre as cadeias de polímeros unidos por sobreinjeção, onde δ^+ e δ^- representam as cargas positivas e negativas que produzem a atração entre as cadeias poliméricas dos componentes a serem unidos (Adaptado de PACKHAM, 2005).

Adesão por Adsorção

A teoria da adesão por adsorção (Figura 2.18) estabelece que a adesão seja resultante de um contato íntimo entre dois materiais, e envolve forças que se desenvolvem entre os átomos nas duas superfícies. Sendo considerado como o principal mecanismo de adesão. O tipo mais comum de forças superficiais que se formam na interface entre o adesivo e o substrato são as forças de Van der Waals. Além disso, interações ácido-base e pontes de hidrogênio, geralmente consideradas como um tipo de interação ácido-base, podem também contribuir para a força de adesão (POCIUS, 2002).



Figura 2.18 - Figura esquemática representando o processo de adesão por meio de forças de Van der Waals entre as cadeias do polímero sobre-injetado e o substrato ou inserto (Adaptado de PACKHAM, 2005).

Adesão por Quimissorção ou Adsorção Química

O mecanismo de adesão química (Figura 2.19) sugere que ligações químicas primárias podem se formar em uma interface. Ligações químicas são fortes e podem contribuir significativamente para a adesão em alguns casos.

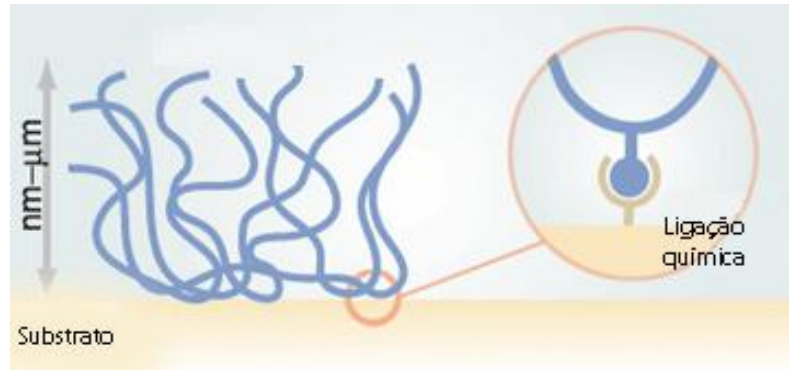


Figura 2.19 - Figura esquemática mostrando o processo de adesão por quimissorção entre substrato (inserto) e adesivo (componente sobreinjetado no contexto deste trabalho) – (Adaptado de PACKHAM, 2005).

Por exemplo, forças químicas primárias possuem energias entre 60-1100 kJ/mol, o que é consideravelmente maior do que as energias de ligação de forças secundárias (0,08 – 5kJ/mol). Deve-se mencionar também que são utilizados agentes de acoplamento e promovedores de adesão para auxiliar na adesão por meio de reações químicas (PHILLIP, 2002 e PACKHAM, 2005).

Adesão por Interdifusão

A teoria da adesão por difusão (Figura 2.20) atribui à adesão em materiais poliméricos à interpenetração das cadeias do polímero na interface dos dois componentes, ou seja, a mútua difusão das cadeias poliméricas através da interface dos mesmos (POCIUS, 2002 e PACKHAM 2005). Esta teoria requer que ambos adesivo e substrato sejam poliméricos, e que sejam capazes de movimento e ao mesmo tempo mutuamente compatíveis e miscíveis. Para descrever o fenômeno de autodifusão dos polímeros várias teorias foram propostas, tais como, acoplamento por entrelaçamento, cooperatividade, e a teoria da reptação (PACKHAM 2005). O modelo de “reptação” vem sendo

aplicado em investigações relativas ao estudo da adesão e soldagem de polímeros como indicado por SEIFFERT (2008) e JABBARI et al (2005).

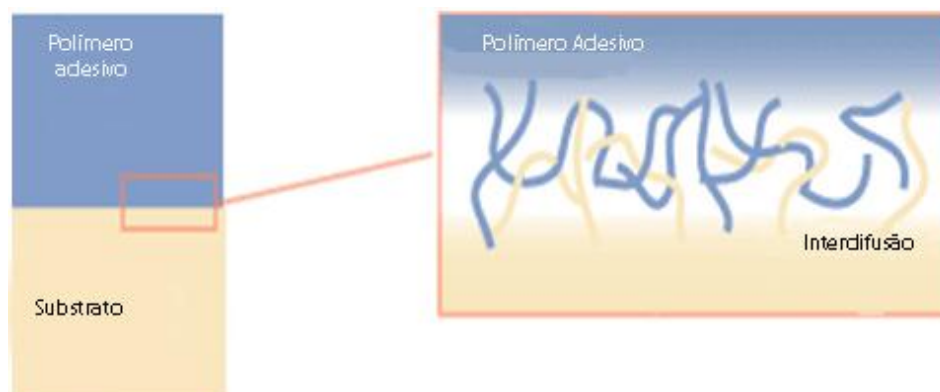


Figura 2.20 - Desenho esquemático representativo do processo de interdifusão entre dois polímeros diferentes que possuem afinidade química (adaptado de PACKHAM, 2005).

Parâmetros como o tempo de contato, temperatura, peso molecular dos polímeros e estado físico (sólido ou líquido) influenciam no processo de adesão (MI et al, 1996). A polaridade dos polímeros, geralmente, aumenta a força de adesão. Evidências demonstram que o fenômeno da interdifusão ocorre em polímeros móveis e compatíveis e podem promover a adesão intrínseca ou auto-adesão (JULIAC *et al.*, 2002 e JABBARI *et al.*, 1994). A teoria da difusão, contudo, encontra uma aplicação limitada quando os polímeros envolvidos não são solúveis ou o movimento das cadeias é restringido por sua estrutura com um grande número de ligações cruzadas, por sua estrutura cristalina ou quando estão abaixo de sua temperatura de transição vítrea (JABLONSKI et al – 2002, CHIEH et al 2005).

2.6.2 Investigações sobre adesão

Como referido anteriormente, muitos investigadores têm sido motivados a realizarem estudos sobre o comportamento na interface entre materiais poliméricos, com especial interesse nos mecanismos de interdifusão e adesão entre os mesmos.

Pesquisas como a de JONES (1997), que investigou o uso de compatibilizantes reativos no processo de modificação da natureza da interface entre polímeros não miscíveis, demonstraram que

a utilização de copolímeros blocados modificou substancialmente as propriedades das interfaces, levando, freqüentemente, a melhoras na adesão entre os polímeros.

HAIRE *et al.* (1999) realizaram investigações a respeito da aplicação de um modelo computacional ao estudo de parâmetros moleculares nas vizinhanças de diferentes tipos de superfícies e também ao processo de soldagem de polímeros, onde a adesão entre as duas superfícies adjacentes é alcançada pela interpenetração das cadeias que cruzam as referidas superfícies. O estudo também demonstrou que a modelagem do processo de soldagem levou ao parâmetro intrínseco tempo de soldagem t_w , que é o tempo necessário desde o início do contato entre as superfícies até o momento onde a conformação de uma cadeia polimérica em particular é indistinta em relação às de suas redondezas, em decorrência do processo de interdifusão, na região onde anteriormente localizava-se a fronteira entre os polímeros a serem soldados.

LAUKE *et al.* (2000) avaliaram a possibilidade de extensão da aplicação do método do trabalho essencial de fratura, utilizado na determinação da tenacidade da fratura em polímeros, blendas e polímeros carregados na determinação do trabalho de fratura na interface entre o polipropileno e a blenda de poliamida e polipropileno modificado. Em seus estudos foi determinado que o conceito do trabalho essencial de fratura é apropriado na determinação da tenacidade da fratura na interface entre dois polímeros, onde pelo menos um dos polímeros possui uma grande plasticidade.

MI *et al.* (1996) avaliaram a resistência desenvolvida na auto-adesão em corpos de prova de ABS submetidos ao processo de soldagem por placa aquecida (*hot plate*). Foi detectado que o processo de auto-adesão aumentou como aumento do tempo e da temperatura de contato, e seu desenvolvimento em temperaturas na faixa de 180 a 260°C seguiu a teoria baseada no modelo de reptação aplicado ao processo de interdifusão na interface entre polímeros amorfos.

GUO *et al.* (2004), avaliaram a modificação do modelo baseado na difusão e na teoria da energia livre de Flory-Huggins pela consideração da espessura de difusão na interface em função do tempo de contato na estimativa da resistência de linhas de solda resultantes na moldagem por injeção de polímeros amorfos e blendas. O modelo decorrente desta modificação foi aplicado, desta forma, à estimativa da resistência de linhas de solda entre o poliestireno (PS) e o poli(metilmacrilato) (PMMA) e a blendas de PS/PMMA. Verificou-se por meio desta investigação que o modelo proposto em função da temperatura e do tempo de contato obteve uma boa correlação com os resultados experimentais.

CHIEH *et al.* (2005) desenvolveram um modelo utilizado para descrever o comportamento na interface de polímeros semicristalinos. Nestes sistemas, existe uma concorrência entre os processos de interdifusão e cristalização. Por meio de suas investigações foi verificado que para baixas temperaturas a taxa de cristalização é maior, e os cristais existentes nas regiões próximas à interface obstruem a interdifusão dos polímeros. Por outro lado, a altas temperaturas, a taxa de cristalização é muito menor, e o processo de interdifusão torna-se dominante. As estimativas obtidas por meio das simulações foram então comparadas à região da interface por meio de microscopia eletrônica de pequeno ângulo e espalhamento de raios X, em um sistema composto por polietileno e polipropileno isotático, demonstrando uma correlação satisfatória entre ambos.

2.7 Considerações Finais

As informações apresentadas no levantamento bibliográfico realizado neste trabalho demonstraram que, no âmbito da moldagem por injeção, os pesquisadores vêm sendo motivados a estudarem formas alternativas e, por vezes mais inovadoras, deste processo, como é o caso da moldagem por sobreinjeção. Nesta linha de pesquisa, o enfoque principal tem sido as investigações sobre a influência das variáveis de processamento, ou macrovariáveis, segundo CAVALHEIRO (2006), na adesão entre os materiais utilizados para a produção de componentes sobreinjetados.

No entanto, os trabalhos realizados até o momento utilizaram como ferramenta para o processamento apenas moldes produzidos em materiais metálicos por técnicas convencionais de produção. Tais ferramentas, apesar de grande durabilidade, melhor acabamento superficial e precisão dimensional, não possuem a flexibilidade necessária para a alteração de geometrias ou mesmo rapidez na fabricação de um novo molde. Estas características são especialmente requeridas na fase de desenvolvimento de um novo produto e principais atributos de moldes fabricados pela técnica de VRE, além de serem ferramentas com um custo de fabricação muitas vezes maior do que os moldes fabricados por vazamento de resinas epóxi.

Neste contexto, o emprego de moldes produzidos pela técnica de vazamento de resina epóxi (VRE) assume grande importância, assim como as pesquisas e trabalhos que investiguem a sua utilização para a produção de componentes produzidos por sobreinjeção.

Diversos trabalhos, já realizados, discorrem sobre o emprego de moldes produzidos por VRE ao processo convencional de moldagem por injeção como os realizados por SABINO NETTO [2008], CAVALHEIRO [2006], VILLAMIZAR [2005], JESUS [2005], porém, apesar de sua já

constatada importância na moldagem por injeção, não foram evidenciadas investigações sobre o seu emprego na avaliação do processo de sobreinjeção, ficando evidente a lacuna existente a respeito deste tema.

Conclui-se, portanto, que motivado pela importância da realização de investigações e compreensão da técnica de processamento por sobreinjeção, especialmente no que tange à influência das macrovariáveis de processamento e do fluxo do material dentro da cavidade na adesão entre os polímeros, principalmente quando realizadas em moldes produzidos pelo vazamento de resinas epóxi, aqui utilizados devido sua importância no contexto do desenvolvimento de novos produtos, justifica-se a relevância do tema, bem como, as investigações propostas e realizadas nesta tese.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3 Materiais e Métodos

Em decorrência do exposto nos capítulos anteriores e como forma de identificar os pontos mais importantes a serem investigados sobre o assunto, o presente capítulo relata o procedimento experimental utilizado nas investigações aqui realizadas, descrevendo de forma detalhada a abordagem metodológica empregada, a estruturação cronológica das atividades experimentais, os polímeros selecionados para os estudos juntamente com os critérios de seleção para sua utilização, a descrição das características de projeto e fabricação dos moldes para sobreinjeção e seus materiais, bem como a metodologia de planejamento dos experimentos, simulação e análise do escoamento em computador, ensaios de moldagem e procedimentos para caracterização de propriedades dos corpos de prova sobreinjetados.

3.1 Experimentos Preliminares

De acordo com a revisão bibliográfica, a moldagem em ferramentas não metálicas, como os fabricados por vazamento de resina epóxi, podem apresentar diferentes tipos de comportamentos e falhas durante o processo de escoamento do polímero na cavidade do molde. Em decorrência da inexistência de relatos de estudos anteriores que evidenciassem o emprego destes moldes para aplicações na moldagem por sobreinjeção foram desenvolvidos três experimentos preliminares cuja descrição detalhada encontra-se no apêndice desta tese. A seguir é feita uma breve descrição dos objetivos e conclusões dos experimentos preliminares,.

3.1.1 Moldagem de Polímeros Transparentes em um Molde de Parede Fina Fabricado por Vazamento de Resina Epóxi

Este experimento teve por objetivo geral avaliar as características do escoamento de três polímeros (policarbonato, estireno acrilonitrila e polipropileno), selecionados devido sua elevada transparência, tenacidade, e no caso do policarbonato e do ABS, sua afinidade química com insertos estirênicos como ABS (acrilonitrila butadieno estireno) e HIPS (poliestireno de alto impacto) em um molde de paredes finas, fabricado por meio de vazamento de resina epóxi. Esta avaliação prévia foi considerada importante, uma vez que, na sobreinjeção de insertos de termoplástico, com polímeros

transparentes, um elevado grau de transparência da camada sobreinjetada é desejável, e atingido como consequência também de um fácil escoamento do mesmo na cavidade do molde.

Por meio de uma análise qualitativa da viabilidade de moldagem dos polímeros mencionados e de um estudo da aplicação da simulação em computador, utilizando o *software* CAE comercial *Moldflow*®, na avaliação do escoamento destes polímeros, bem como a estimativa das condições de processamento necessárias para a sua moldagem nos referidos moldes, as seguintes conclusões principais foram estabelecidas:

- Observou-se a possibilidade de injeção do estireno acrilonitrilae do polipropileno em molde de parede fina, com o polímero preenchendo integralmente a cavidade. Encontrou-se, no entanto, dificuldades no preenchimento (produção de uma cavidade completamente preenchida) durante a moldagem das peças em policarbonato em virtude de sua alta viscosidade (estimada pelo seu índice de fluidez de acordo com
- As simulações no *software* CAE indicaram a possibilidade de preenchimento completo da cavidade para todos os polímeros, sendo as pressões envolvidas na moldagem do policarbonato ($P_i \approx 151$ MPa) aproximadamente três vezes o valor necessário para a moldagem do estireno acrilonitrila ($P_i \approx 55$ MPa) e cinco vezes a pressão necessária para o preenchimento com o polipropileno acrilonitrila ($P_i \approx 35$ MPa), utilizando os valores médios de suas faixas de temperatura de processamento e o mesmo tempo de injeção ($t_i = 0,3$ s).
- Devido às pressões elevadas, encontradas no processamento dos polímeros ABS e PC, foi encontrada uma alteração na espessura de parede nas peças produzidas nestes materiais, além do preenchimento incompleto verificado com o policarbonato, indicando uma deformação do molde de epóxi, fenômeno não verificado com o polipropileno.

3.1.2 Sobreinjeção de um Inseto de Termoplástico

Este segundo experimento teve como objetivo avaliar o processo de sobreinjeção de um inseto de acrilonitrila butadieno estireno em moldes fabricados por vazamento, por meio da inspeção visual da peça produzida, da avaliação qualitativa das características de adesão entre o termoplástico de recobrimento e o inseto termoplástico, e da simulação das condições de moldagem para o processo de sobreinjeção em um *software* CAE comercial *Moldflow*®.

As principais conclusões obtidas com base neste experimento são descritas a seguir:

- Foi observada uma boa adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados em PC. Uma adesão inferior entre o SAN sobreinjetado em insertos de ABS foi observada, o que ficou evidenciado pelo descolamento dos componentes sobreinjetados dos insertos de ABS.
- Evidenciou-se também uma diminuição da adesão entre os componentes sobreinjetados (em PC e SAN) com o inserto de ABS ao longo do caminho de fluxo, observando-se um descolamento entre os mesmos nas regiões mais distantes do ponto de injeção, sem ter sido verificada qualquer variação significativa nas condições de preenchimento (principalmente na temperatura de massa do fundido – *Bulk Temperature* ou T_b) da cavidade nas simulações realizados no *software* CAE comercial *Moldflow*©.
- Tanto o processo de sobreinjeção com PC quanto com SAN causaram danos por amolecimento aos insertos de ABS, especialmente nas vizinhanças do ponto de injeção, em decorrência das maiores solicitações produzidas pelo fluxo do polímero nessa região, devido aos efeitos combinados de altas temperaturas e pressões encontradas nesta região.
- Verificou-se, em virtude do recobrimento ter sido realizado em apenas um dos lados, o empenamento das peças sobreinjetadas, decorrente da contração do revestimento produzido por sobreinjeção em relação aos insertos de ABS.

3.1.3 Encapsulamento de um Inseto de Termoplástico Através do Processo de Sobreinjeção

Outra variante do processo de sobreinjeção, aqui avaliada de forma preliminar, foi o encapsulamento de um inseto de termoplástico, ou seja, o componente de termoplástico utilizado como inseto tem toda sua região de interesse recoberta, com exceção de suportes de fixação no molde, pelo polímero sobreinjetado. O principal objetivo deste experimento foi o de avaliar o processo de sobreinjeção, com recobrimento integral de um inseto de termoplástico, através de aspectos como processabilidade dos materiais de recobrimento, transparência, deformações do inseto e a possibilidade de união mecânica entre o componente sobreinjetado e o inseto de termoplástico.

Para atender a estes objetivos foi investigado não apenas o emprego de polímeros com afinidade química entre si (PC+ABS e SAN+ABS), como também o de polímeros sem afinidade química (PP+ABS), observando-se a possibilidade de união mecânica e encapsulamento pelo componente sobreinjetado do inseto de ABS, como referido anteriormente.

Outra característica também investigada neste experimento preliminar foi a sobreinjeção de um inserto de ABS metalizado, como forma de simular um acabamento decorativo sobre o inserto. Dada a limitação do número de insertos metalizados, apenas estireno acrilonitrila (SAN) foi utilizado para o processo de sobreinjeção devido as suas características de melhor processabilidade e transparência, quando comparadas às do policarbonato.

As principais conclusões deste experimento foram:

- Obteve-se uma boa transparência da camada de recobrimento, permitindo a visualização de eventuais decorações que forem feitas sobre a peça sobreinjetada.
- Observou-se a ocorrência de deformações do inserto sobreinjetado, em decorrência das altas temperaturas e pressões impostas ao inserto durante a etapa de injeção.
- Apesar de não haver afinidade química entre os pares PP e ABS, observou-se um resultado muito semelhante deste caso quando comparado aos pares PC+ABS e SAN+ABS, o que evidenciou a possibilidade da utilização da união mecânica para insertos encapsulados.
- A transparência da camada sobreinjetada, bem como a aparência do produto final, mostrou-se pouco dependentes da compatibilidade química entre os pares de materiais do inserto e da camada sobreinjetada.
- Não foi observado o empenamento do componente após o processo de sobreinjeção, mostrando o bom resultado do encapsulamento do inserto.
- A sobreinjeção do inserto metalizado com estireno acrilonitrila (SAN) apresentou falhas devido ao arrancamento da metalização em virtude dos esforços, mecânicos e térmicos, atuantes sobre esta camada durante o processo de encapsulamento.

3.2 Experimentos Específicos

3.2.1 Identificação dos Focos para os Experimentos Específicos

Com base nas informações apresentadas na seção referente ao embasamento teórico deste trabalho, e nas conclusões advindas das investigações preliminares, foram identificados dois focos principais expostos a seguir, selecionados para o desenvolvimento de uma investigação mais aprofundada nesta tese:

- Necessidade de avaliar os aspectos relativos ao escoamento dos polímeros policarbonato e estireno acrilonitrila, buscando estimar os índices térmicos decorrentes do processamento dos mesmos, por meio de análises de fluxo em um *software* CAE comercial. Tais necessidades foram verificadas devidas às deformações observadas nas peças de paredes finas, resultantes do processamento em moldes de epóxi, as altas pressões envolvidas neste processo com os polímeros utilizados no trabalho e das deformações, em virtude do amolecimento, impostas aos insertos sobreinjetados;
- Necessidade de avaliar as características de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados em policarbonato e estireno acrilonitrila de acordo com a variação das condições do processo de sobreinjeção, por meio da correlação de suas macrovariáveis com a força de adesão entre o inserto e o componente sobreinjetado.

Com base nestes dois focos de investigação foram então desenvolvidos os seguintes experimentos específicos de moldagem e caracterização de corpos de prova visando o estudo e esclarecimento dos pontos evidenciados por meio da revisão da literatura e dos experimentos preliminares:

- Investigar a influência das variáveis do processo (temperatura do fundido, temperatura do molde, velocidade de injeção, tempo e pressão de recalque) na força de adesão (medida por meio de ensaios de tração) resultante entre os componentes de um corpo de prova produzido por meio da sobreinjeção de insertos de acrilonitrila butadieno estireno com polímeros transparentes (policarbonato e estireno acrilonitrila).

Para a investigação desta influência, as variáveis de processamento listadas acima foram variadas seguindo-se um delineamento experimental, obtido por meio da utilização de um *software* de estatística comercial.

Os corpos de prova, produzidos a partir destas condições experimentais, foram posteriormente ensaiados em uma máquina de ensaios de tração universal, e os resultados destes ensaios tratados e avaliados com o auxílio deste mesmo *software*, através de análises de variância dos dados de força de tração;

- Avaliar, mediante o emprego de um *software* CAE comercial, os efeitos dos parâmetros de escoamento do polímero dentro da cavidade do molde, tais como, a temperatura de massa do polímero, a área de *remelt* ou amolecida do inserto sobreinjetado, a temperatura da pele, a temperatura da interface entre o inserto e o polímero sobreinjetado, bem como o índice

térmico do núcleo Y_c (região central do escoamento do polímero) no processo de sobreinjeção de insertos de plástico.

As condições de processamento utilizadas nas simulações do processo de sobreinjeção, e geradoras dos parâmetros de escoamento acima mencionados, foram as mesmas utilizadas no experimento anterior, de forma que fosse possível investigar a existência de correlações destes parâmetros com os resultados das forças de adesão entre os componentes dos corpos de prova. Para o estabelecimento desta correlação foram feitas análises de variância e de regressão linear utilizando-se também um *software* de estatística comercial

- Correlacionar os fenômenos físicos do processo de sobreinjeção (temperatura de massa do polímero, área de *remelt* ou amolecida do inserto, temperatura da pele, temperatura da interface entre o inserto e o polímero sobreinjetado, e índice térmico do núcleo Y_c), decorrentes do escoamento do polímero dentro da cavidade do molde, obtidos por meio de simulações em *software* CAE comercial, e as forças de adesão obtidas nos ensaios de caracterização mecânica. Tal correlação foi realizada mediante análises de regressão múltipla em um *software* de estatística comercial.
- Investigar, por meio de ensaios dinâmicos-mecânicos (realizados em equipamento de DMA), o comportamento da adesão entre os componentes de corpos de prova produzidos por sobreinjeção a cargas dinâmicas (ensaios de fadiga e de flexão). As condições para a produção dos corpos de prova (moldagem por sobreinjeção de um inserto de ABS) para esta investigação foram as que resultaram respectivamente nos valores mais baixos e mais altos de força de adesão, resultantes da análise estatística dos valores de força de adesão obtidos nos ensaios de tração realizados em investigações anteriores.

A seguir é descrita a metodologia experimental adotada para a realização dos experimentos específicos descritos anteriormente.

3.2.2 Metodologia experimental Adotada

Para a realização das investigações descritas no item anterior, foi utilizada uma metodologia baseada nos seguintes procedimentos:

- Seleção dos materiais a serem utilizados para a fabricação das geometrias, seguindo os critérios de compatibilidade entre os polímeros (camada de recobrimento e inserto sobreinjetado), propriedades mecânicas e ópticas, processabilidade e custo.
- Definição de geometrias a serem avaliadas, que ofereçam características que permitam verificar o comportamento do processo de sobreinjeção em moldes rápidos fabricados por vazamento de resina epóxi. Tais geometrias e suas respectivas dimensões foram escolhidas em função do tamanho dos porta-moldes e máquina injetora presentes no laboratório Cimject do Departamento de Engenharia Mecânica.
- Simulação em *software* CAE comercial *Moldflow*® do processo de sobreinjeção de corpos de prova para ensaios de tração e dinâmicos-mecânicos, com a realização das estimativas dos parâmetros resultantes do escoamento do polímero relevantes para o processo de adesão como temperatura da superfície e área de *remelt* ou amolecimento do inserto de ABS, bem como dos índices térmicos do processo.
- Projeto e fabricação dos moldes (incluindo os sistemas de extração e resfriamento, saídas de ar, bem como dispositivos acessórios como termopares e transdutores de pressão) auxiliados pelo *software* CAE comercial *Moldflow*®, para a avaliação do fluxo do polímero dentro da cavidade do molde e estipulação das solicitações termomecânicas, bem como das condições de moldagem necessárias para o mesmo.
- Delineamento estatístico dos ensaios de moldagem dos corpos de prova para ensaios de tração.
- Moldagem de corpos de prova para a realização de ensaios de tração e dinâmicos-mecânicos;
- Realização de ensaios de tração em corpos de prova produzidos pelo processo de sobreinjeção para a avaliação da força de adesão entre o inserto e o componente sobreinjetado em função da variação das condições de processamento (macrovariáveis).
- Realização de ensaios dinâmicos-mecânicos para a avaliação do comportamento da união entre os componentes do corpo de prova quando submetidos a cargas dinâmicas (ensaios de fadiga e flexão).
- Análise estatística dos dados dos ensaios de tração, e parâmetros da análise do escoamento estimadas com o *software* CAE comercial *Moldflow*®.
- Avaliação final e conclusões sobre o emprego de ferramental rápido produzido pelo vazamento de resinas epoxídicas ao processo de sobreinjeção de insertos de plástico.

3.2.3 Polímeros Utilizados nas Investigações

Utilizou-se para a produção dos componentes injetados nos estudos e experimentos realizados no presente trabalho os seguintes polímeros:

- Material do inserto a ser sobreinjetado – ABS (copolímero acrilonitrila butadieno estireno) com nome comercial de *Lustran* do fabricante *Bayer* (*grade general purpose M301*).
- Materiais utilizados para a sobreinjeção – PC (policarbonato) com o nome comercial de *Durolon* (*grade HFR1700*) do fabricante Policarbonatos do Brasil, SAN (estireno acrilonitrila) sob o nome comercial de *Luran SAN 358N* do fabricante *Bayer*.

A seleção do ABS como material para a fabricação dos insertos foi determinada a partir de informações obtidas por meio da revisão da literatura sobre o processo de sobreinjeção (GE PLASTICS, 2006). A partir dessas informações pôde-se observar que o ABS é um polímero regularmente utilizado no processo de sobreinjeção, principalmente quando combinado ao policarbonato. A principal justificativa para este fato é a afinidade química entre estes dois polímeros, que pode ser estimada pelo coeficiente de Hildebrand (BAIJAL, 1982). Isto confere a este par de polímeros uma boa capacidade de adesão, por meio de interdifusão de suas moléculas, na interface entre o componente previamente injetado e a camada sobreinjetada. Além disso, segundo KUZMIK (1990), o ABS apresenta um bom desempenho no processo de metalização, processo de decoração de componentes termoplásticos utilizado neste trabalho. As características físicas, térmicas e reológicas do ABS *Lustran M301FC* podem ser encontradas na tabela 3.1, e suas curvas de viscosidade em função das taxas de cisalhamento e temperaturas podem se observadas na Figura 3.1.

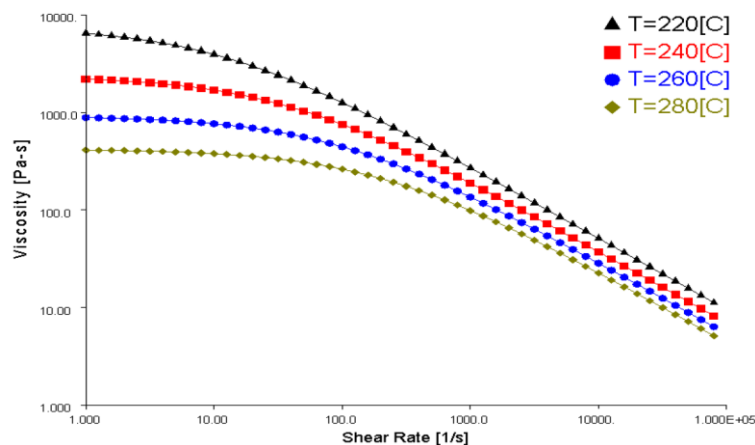


Figura 3.1 - Comportamento da viscosidade cisalhante do Lustran ABS 301M FC (Fonte Banco de dados de polímeros do *Software CAE Comercial MOLDFLOW*®).

Tabela 3.1 - Propriedades do *Lustran ABS M301 FC* (Fonte BAYER PLASTICS, 2007)

Propriedades Reológicas				
	Unidades	Método ASTM	Método ISO	Valores Típicos
Índice de Fluidez (220°C/10 kg)	g/10min	D-1238	1133	18
Densidade	g/cm ³	D-792	R-1183	1,04
Absorção de água (por 24 horas a 23°C)	%	D-570		-
Propriedades Mecânicas				
Resistência à Tração (na Ruptura)	MPa	D-638	R-527	-
Resistência a tração (no escoamento)	MPa	D-638	R-527	2,6
Módulo de Tração	MPa	D-638	R-527	2100
Alongamento (na Ruptura)	%	D-638	R-527	>15
Propriedades Térmicas				
Temperatura de Deflexão Térmica (1,8 MPa)	°C	D-648	75	96
Contração do moldado	%	D-955	-	0,5-0,8
Propriedades Ópticas				
Transmitância	%	D-1003	-	-
Índice de Refração (n _D ²⁵)	-	D-542	489	-
Condições de Processamento para a Moldagem por injeção				
Pré-secagem: 80 - 90 °C / 3-5 horas				
Temperaturas de Processamento: 240 - 260°C				
Temperatura do Molde: 30 - 60°C				
Zonas da Injetora	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Temperatura (°C)	240-260	-	-	-

A seleção do policarbonato, para a sobreinjeção dos insertos de ABS, foi baseada principalmente em fatores como transparência e afinidade química com o ABS, que o mesmo apresenta. Além disso, características como boas propriedades mecânicas, como, por exemplo, resistência à abrasão, as quais são características desejáveis para este tipo de componente, motivaram a escolha deste polímero. Associado a estes fatores está o fato de o *grade* do *Durolon HFR1700* possuir um índice de fluidez altíssimo (27g/10min), o que o qualifica para o processamento de peças com paredes finas, o que é explorado neste trabalho, já que a camada sobre-injetada possui características tais características. As propriedades físicas do *Durolon HFR1700*, bem como suas condições de processamento, encontram-se expostas na tabela 3.2 e na Figura 3.2 é apresentado o comportamento da viscosidade deste polímero em função da taxa de cisalhamento e temperatura de realização dos ensaios de reometria.

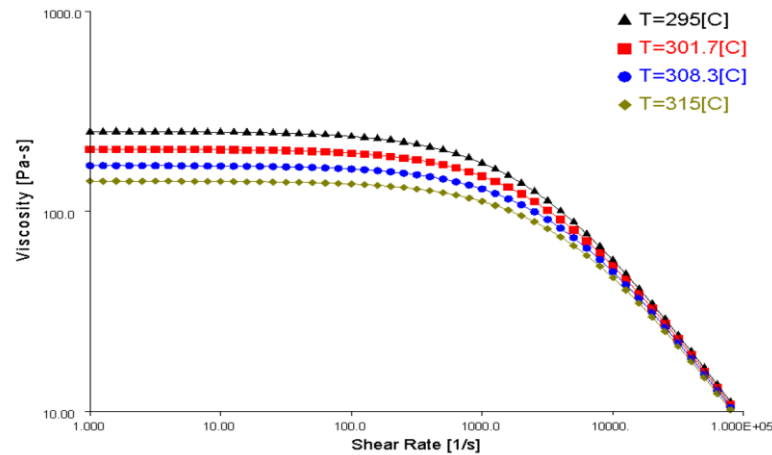


Figura 3.2 - Comportamento da viscosidade cisalhante do *Durolon HFR1700* (Fonte Banco de dados de polímeros do *Software CAE Comercial MOLDFLOW*©).

Tabela 3.2- Propriedades e Condições de Processamento para *Durolon HFR 1700* (Fonte UNIGEL PLÁSTICOS, 2007).

Propriedades Reológicas				
	Unidades	Método ASTM	Método ISO	Valores Típicos
Índice de Fluidez (300°C/1,2 kg)	g/10min	D-1238	1133	27
Densidade	g/cm ³	D-792	R-1183	1,2
Absorção de água (por 24 horas a 23°C)	%	D-570	-	0,23
Propriedades Mecânicas				
Resistência à Tração (na Ruptura)	MPa	D-638	R-527	68
Resistência a tração (no escoamento)	MPa	D-638	R-527	63
Módulo de Tração	MPa	D-638	R-527	2300
Alongamento (na Ruptura)	%	D-638	R-527	90
Propriedades Térmicas				
Temperatura de Deflexão Térmica (1,8 MPa)	°C	D-648	75	125
Coeficiente Linear de Dilatação Térmica	x10 ⁻⁵ cm/cm/°C	D-696	-	6,5
Contração do moldado	%	D-955	-	0,5~0,7
Propriedades Ópticas				
Transmitância	%	D-1003	-	89
Índice de Refração (n _D ²⁵)	-	D-542	489	1,586
Condições de Processamento para a Moldagem por injeção				
Pré-secagem: 120°C / 4 horas				
Temperaturas de Processamento: 240 - 300°C				
Temperatura do Molde: 80 - 100°C				
Zonas da Injetora	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Temperatura (°C)	250	265	260	250

A escolha do SAN, como material para a sobreinjeção, seguiu os mesmos critérios que determinaram a seleção do policarbonato, ou seja, afinidade química com o material do inserto, boas propriedades ópticas (transparência) e boas propriedades mecânicas sendo, contudo, uma alternativa de menor custo e de melhor processabilidade, já que possui temperatura de processamento inferior e índice de fluidez superior ao do policarbonato disponível comercialmente e utilizado neste trabalho (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Propriedades e Condições de Processamento para o *Luran SAN 358N* (Fonte *BASF - THE CHEMICAL COMPANY*, 2007).

Valores Típicos a 23°C	Método de ensaio	Unidade	Valores
Processamento			
Índice de fluidez volumétrico 220°C/10kg	ISO 1133	cm ³ /10min	22
Índice de fluidez volumétrico 220°C/21,6kg	ISO 1133	cm ³ /10min	27
Temperatura de secagem		°C	80
Tempo de secagem		h	2-4
Temperatura de injeção		°C	220-260
Temperatura do molde		°C	40-80
Propriedades Mecânicas			
Módulo elástico de tração	ISO 527-1/-2	MPa	3700
Tensão na ruptura	ISO 527-1/-2	MPa	72
Deformação na ruptura	ISO 527-1/-2	%	3
Resistência à flexão	ISO 178	MPa	120
Dureza Rocwell	ISO 2039-2	Classe	M83
Propriedades Térmicas			
HDT A (1,8MPa)	ISO 75-1/-2	°C	86
Temperatura de amolecimento Vicat VST B50	ISO 306	°C	106
Condutividade térmica	DIN 52612-1	W/mK	0,17
Propriedades Ópticas			
Transmitância	ASTM D-1003	%	
Índice de Refração (n _D ²⁵)	ASTM D-542		

A melhor processabilidade do SAN, de acordo com suas propriedades apresentadas na tabela 3.3, implica em uma menor tendência a danos ao inserto sobreinjetado, pois as temperaturas e pressões dentro da cavidade podem ser significativamente reduzidas, quando comparadas às necessárias ao processamento do policarbonato, sendo possível ainda obter espessuras de parede

inferiores para a camada sobreinjetada, devido à baixa viscosidade do SAN (Figura 3.3) quando comparada à do PC.

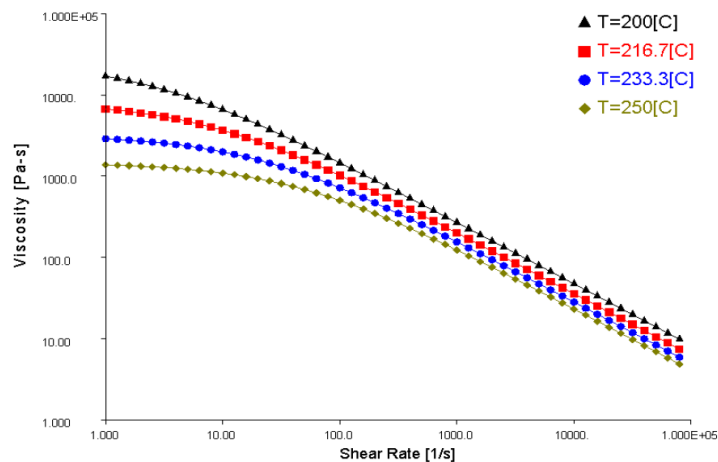


Figura 3.3 - Comportamento da viscosidade cisalhante do *Luran SAN 358N* (Fonte Banco de dados de polímeros do *Software CAE Comercial MOLDFLOW*®).

3.2.4 Projeto e Fabricação dos Moldes e Corpos de Prova

Adotou-se no presente trabalho, como requisitos e restrições de projeto para os moldes fabricados por vazamento de resina epóxi, as informações existentes na literatura especializada, segundo MENGES (1995), ROSATO (1995) e HEES (1994), aplicadas ao projeto de moldes em materiais metálicos (moldes de produção ou ferramentas definitivas). Foram, contudo, propostas modificações ao projeto dos moldes, visando o aumento da vida útil dos mesmos, assim como, sua adaptação às restrições de projeto impostas pelos recursos disponíveis no laboratório CIMJECT, tal como as características da máquina injetora e do porta-moldes existentes.

Já para o processo de fabricação dos moldes adotou-se a metodologia de fabricação de ferramental rápido proposta em trabalhos anteriores (CAVALHEIRO, 2006, VILLAMIZAR, 2005, SABINO NETTO, 2003), onde foi realizado o vazamento de uma resina epoxídica, com um percentual de carga de 30% de alumínio em pó, sobre um modelo fabricado por técnicas de prototipagem rápida (estereolitografia e impressão 3D).

Previamente a etapa de fabricação dos moldes para a moldagem dos corpos de prova, destinados ao processo de sobreinjeção, foi necessária uma avaliação dos requisitos impostos aos mesmos para o atendimento das características dos respectivos ensaios realizados. Dessa avaliação resultaram os seguintes requisitos e restrições ao projeto dos insertos:

- Tamanho do porta-moldes;

- Capacidades da máquina injetora;
- Normas referentes a ensaios de adesão;
- Tipos de ensaios a serem realizados.

A investigação na literatura especializada revelou a inexistência de normas específicas aplicadas à avaliação da adesão em produtos produzidos por sobreinjeção. Contudo, observou-se ser possível a adaptação de ensaios padronizados para adesão utilizados, por exemplo, na soldagem de polímeros, aos casos aqui investigados. Portanto, tomou-se como geometria de referência para os ensaios de tração aquela utilizada por WOOL (2005) apresentada na Figura 3.4.

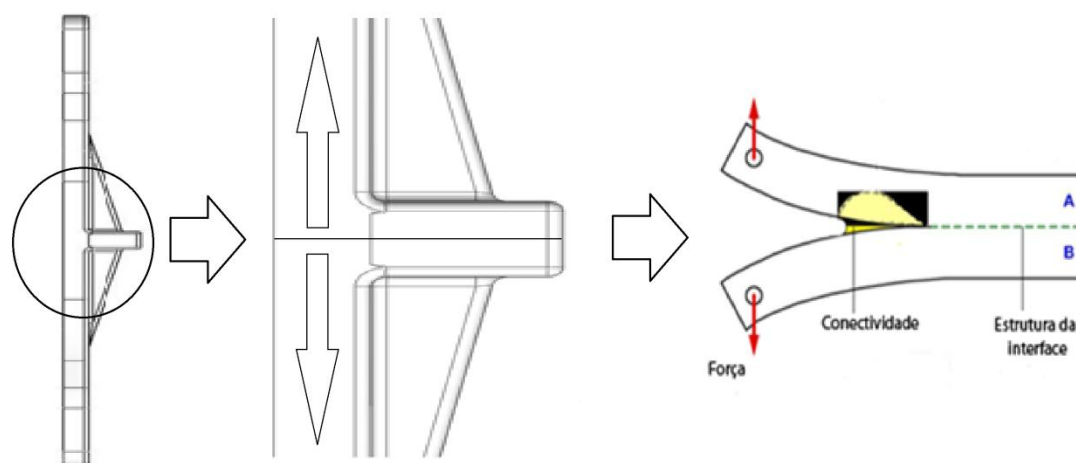


Figura 3.4 - Geometria utilizada para o ensaio de adesão entre polímeros (WOOL, 2005).

A partir desta geometria, projetou-se um corpo de prova para máquinas de ensaio de tração universal, adaptando-se a geometria descrita na norma para ensaio de tração **tipo IV da ASTM D638m** às características impostas pelo referido ensaio. A geometria resultante é apresentada na Figura 3.5 (b).

Na Figura 3.5 (a) é apresentada a metade do corpo de prova proposto para os ensaios de tração. O corpo de prova integral, utilizado para os ensaios de tração, é resultante do processo de sobreinjeção, onde o segundo componente, neste caso produzido em policarbonato e estireno acrilonitrila, é injetado sobre o inserto de acrilonitrila butadieno estireno (Figura 3.5 b). Outro detalhe que pode ser observado na Figura supracitada é que a principal característica da geometria descrita por WOOL (2005) é preservada nos corpos de prova produzidos no processo de sobreinjeção, ou seja, mantendo-se as características originais do ensaio, como, por exemplo, ponto

de aplicação e natureza dos esforços. Os desenhos 2D com as dimensões dos corpos de prova são apresentados na Figura 3.6.

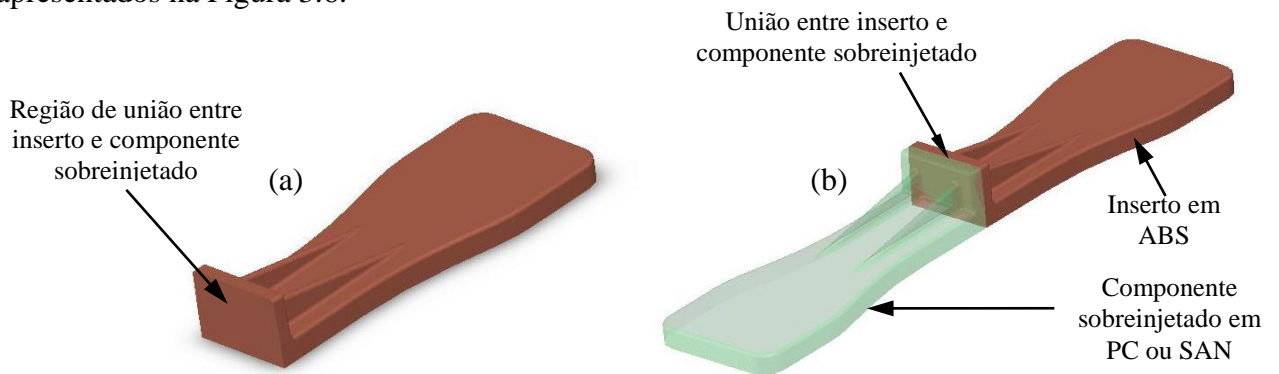


Figura 3.5 – Modelos geométricos em CAD do inserto em ABS (a), utilizado no processo de sobreinjeção, e do corpo de prova para ensaio de tração (b), obtido após a moldagem do componente sobreinjetado.

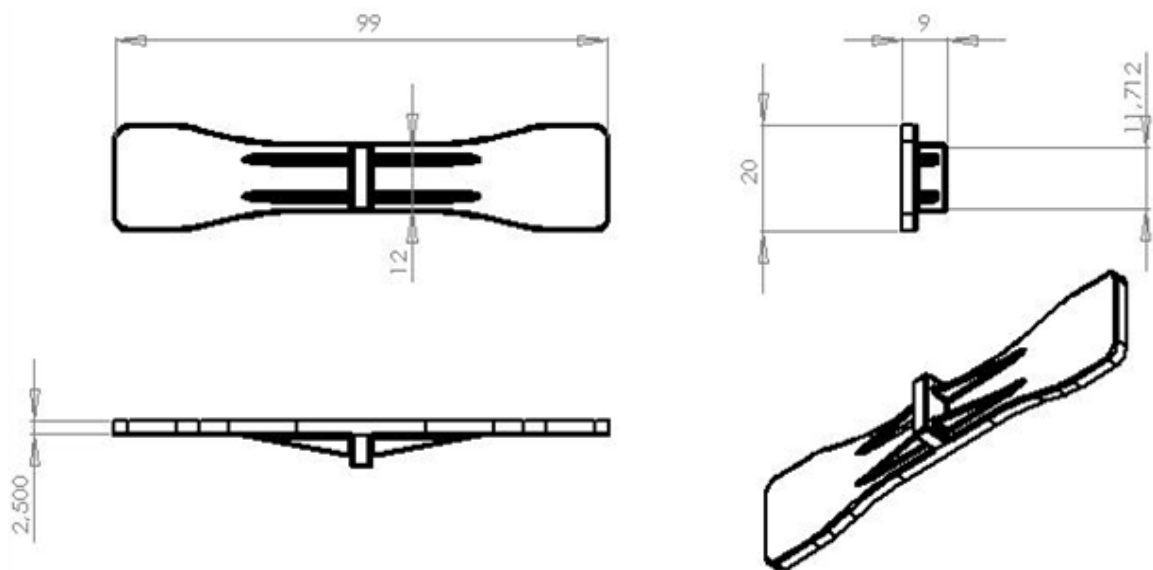


Figura 3.6 - Representação esquemática bidimensional do corpo de prova para ensaios de tração.

A partir desta geometria foram fabricados os moldes para ambos os casos, injeção dos insertos e processo de sobreinjeção, seguindo-se a metodologia descrita anteriormente.

O molde resultante para a produção dos corpos de prova por sobreinjeção é apresentado na Figura 3.7, onde também é possível observar as características de projeto dos elementos utilizados no mesmo, como posicionamento dos pinos extratores, forma e dimensões dos canais de alimentação e resfriamento, forma, dimensões e posição do ponto de injeção.

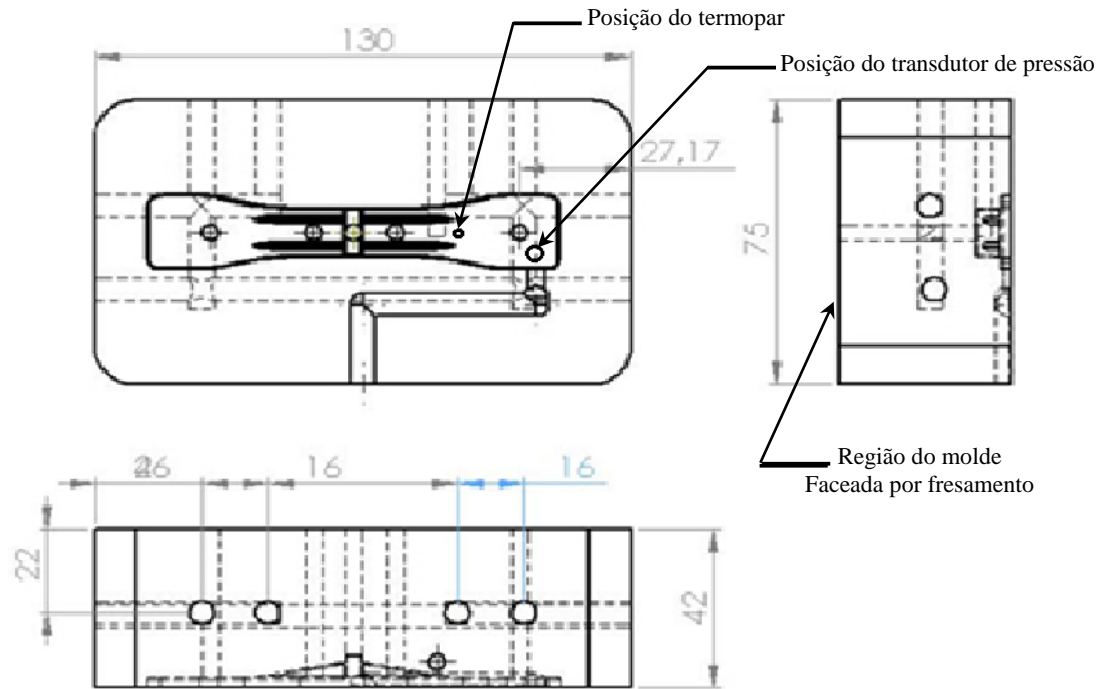


Figura 3.7 - Desenho esquemático do molde para o processo de sobreinjeção dos insertos de ABS.

Contudo, ao contrário do exposto em CAVALHEIRO (2006), no presente trabalho adotou-se a usinagem por fresamento para a realização do acabamento dos moldes (faceamento da região posterior do mold mostrada na Figura 3.7), e da furação como método de fabricação dos canais de resfriamento e fresamento para os canais de alimentação, por entender-se que os mesmos possibilitavam maior flexibilidade à construção dos moldes utilizados neste trabalho.

Para os ensaios dinâmico-mecânicos (DMA), de flexão e fadiga, foi utilizada a geometria padrão, segundo a norma ASTM D4065-95, para o ensaio com apoio em três pontos apresentada na Figura 3.8. Seguindo o mesmo procedimento que o utilizado no ensaio de tração, os corpos de prova para os ensaios dinâmico-mecânicos foram produzidos em duas etapas, ou seja, injeção dos insertos e posteriormente sua sobreinjeção com policarbonato e estireno acrilonitrila. Na primeira etapa foram produzidos os insertos com espessura de 0,8 mm (Figura 3.8), e posteriormente foram produzidos os corpos de prova para os ensaios no equipamento de DMA por meio de sobreinjeção, tendo a camada sobreinjetada uma espessura de 0,6 mm (Figura 3.9 e 3.10) para que o corpo de prova atendesse os requisitos impostos de espessura máxima para esse ensaio, utilizando o molde cuja representação bidimensional encontra-se na Figura 3.11. Já para os ensaios de flexão os corpos de prova foram cortados até a dimensão de 45 mm para que fossem adaptados à distância de fixação nas garras do referido ensaio.

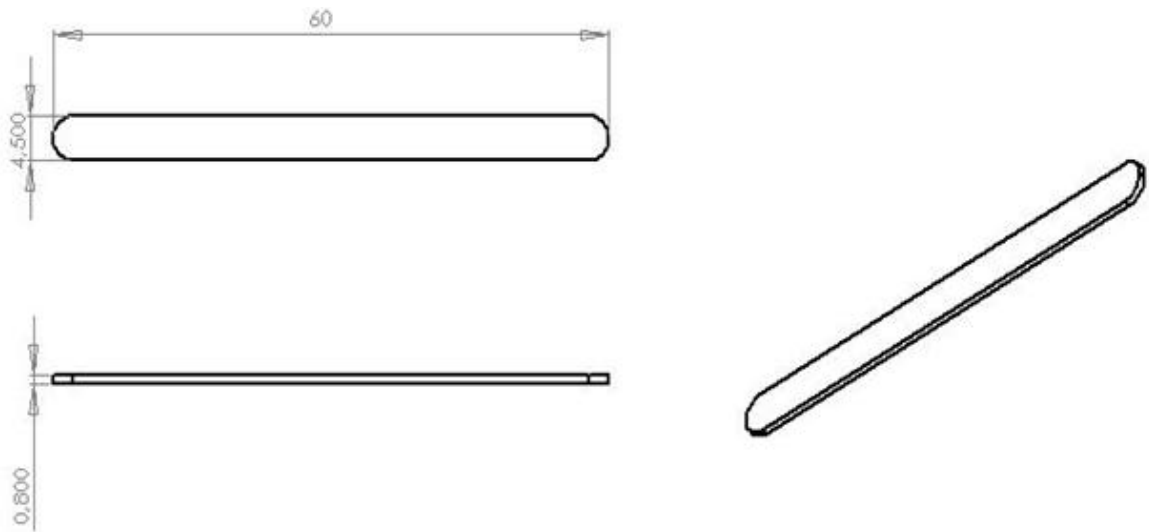


Figura 3.8 - Representação esquemática bidimensional do inserto destinado a moldagem por sobreinjeção dos corpos de prova para ensaios dinâmicos-mecânicos.

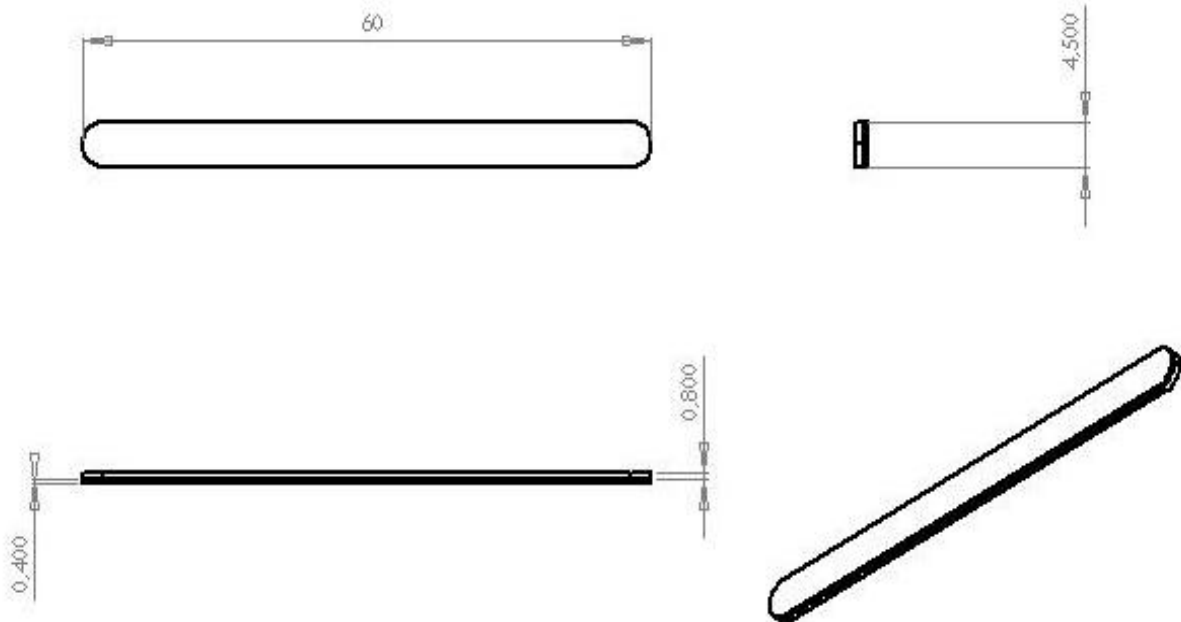


Figura 3.9 - Representação esquemática bidimensional do corpo de prova para ensaios dinâmico-mecânicos.

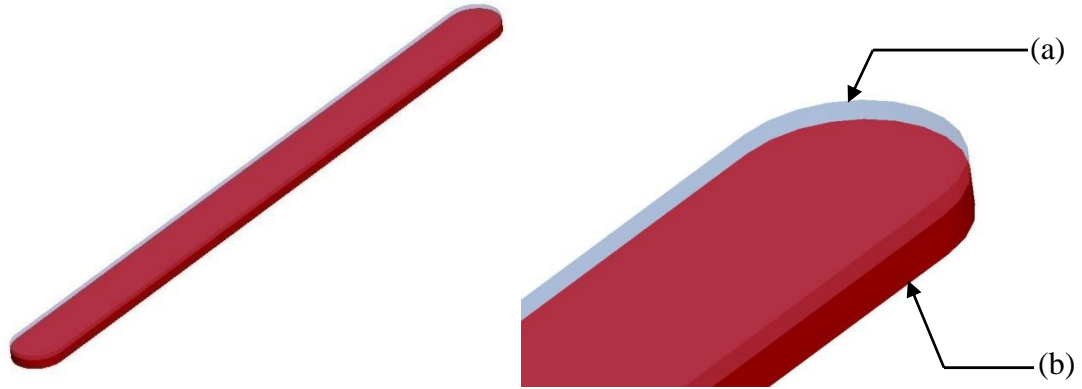


Figura 3.10 - Modelo computacional em CAD representativo da geometria utilizada para os ensaios dinâmico-mecânicos de fadiga e flexão, onde (b) representa o inserto de ABS e (a) a camada sobreinjetada em PC ou SAN.

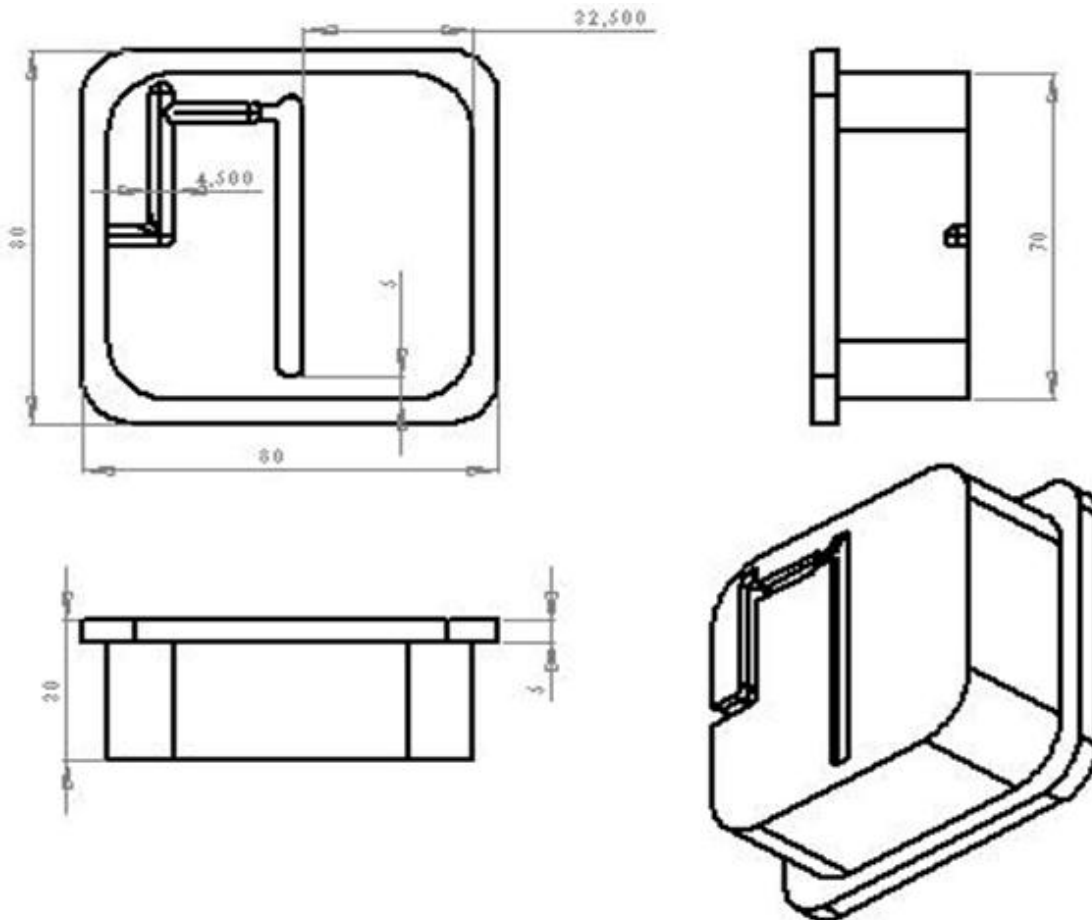


Figura 3.11 - Desenho esquemático em 2D do molde utilizado para a sobreinjeção dos corpos de prova para os ensaios em DMA.

3.2.5 Simulação do Processo de Sobreinjeção em um *Software* CAE Comercial e Cálculo dos Índices Térmicos

O *software* CAE comercial Moldflow© foi empregado, durante o desenvolvimento do trabalho, no auxílio às seguintes atividades de projeto e análise de fluxo:

- projeto dos moldes para injeção e sobre-injeção dos insertos de ABS nas seguintes tarefas:
 - auxílio ao projeto da geometria da cavidade;
 - determinação do tipo, dimensões e posicionamento dos canais de alimentação e ponto de injeção, por meio de análises em modo FILL;
 - balanceamento do preenchimento da cavidade por meio de análises em modo FLOW;
 - determinação do posicionamento das saídas de ar para minimização dos riscos de preenchimento incompleto e degradação das peças injetadas ;
 - verificação da configuração e dimensionamento do sistema de resfriamento determinados de acordo com as recomendações de projeto, de modo a minimizar a heterogeneidade de remoção de calor na superfície das cavidades, por meio de análise em modo FILL+COOL;
 - utilização do módulo de análise do processo de sobreinjeção, para a verificação dos parâmetros de preenchimento desta etapa do ciclo de produção do componente, e posterior comparação com os dados obtidos nos ensaios de tração;
- durante o planejamento experimental, para auxiliar na avaliação e definição dos valores para os níveis dos fatores, via análises em modo FILL+FLOW, e para definição dos valores de referência para os demais parâmetros, como tempo de resfriamento e parâmetros iniciais para a programação da injetora, como velocidade de avanço do parafuso de injeção e força de fechamento; foram observados os valores recomendados pela folha de dados dos materiais utilizados na biblioteca de materiais do Moldflow (MOLDFLOW, 2005).
- na estimativa dos parâmetros de preenchimento para o cálculo do índice térmico do núcleo Y_C segundo cada uma das condições experimentais; os dados de entrada foram os valores dos parâmetros empregados durante a moldagem pelo processo de sobreinjeção e as saídas observadas foram os valores máximos para a temperatura de massa do polímero (*bulk temperature*) (T_b) e a temperatura da interface inserto e componente sobreinjetado (T), na região de união entre estes componentes.

O procedimento usado para as análises é descrito a seguir:

- importação do modelo computacional da cavidade, previamente modelado e convertido para o formato de malha triangular STL (*Standard Stereolithography Tessellation Language*; BEARD, 1997) no sistema CAD (*Computer Aided Design*) SolidWorks®;
- geração da malha de elementos tetraédricos, a partir do modelo STL importado, seguindo procedimento específico de geração de malhas do *software* CAE comercial Moldflow®;
- avaliação da malha gerada para a verificação da ocorrência de problemas, e realização de eventuais correções;
- modelagem das geometrias representativas do sistema de alimentação do molde (bucha de injeção, canais de alimentação e ponto de injeção), de acordo com as dimensões reais do portamoldes e do molde (Figura 3.7 e 3.8);
- modelagem dos elementos pertencentes ao sistema de arrefecimento dos moldes, idênticos ao desenho real dos insertos (Figura 3.7 e 3.8);
- determinação das condições de contorno para cada tipo de análise;
- seleção do tipo de análise a ser realizada;
- execução da análise e interpretação dos resultados.

Da mesma forma como apresentado por CAVALHEIRO (2006), uma das condições de contorno utilizadas foi o coeficiente de transferência de calor entre polímero e molde (h_{p-m}). O Moldflow usa o valor de $25.000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ como padrão para h_{p-m} , independentemente das propriedades inseridas para o material do molde (MOLDFLOW®, 2007). Contudo, PANTANI *et al.* (2001) mostram que h_{p-m} é proporcional à efusividade térmica b_m do material do molde e decresce ao longo do tempo t_c decorrido a partir do primeiro contato do polímero com a parede de cavidade. A efusividade térmica é definida pela equação 3.1, onde C_{p_m} , K_m e ρ_m são calor específico, condutividade térmica e densidade do material do molde. O coeficiente de transferência de calor polímero-molde h_{p-m} é descrito pela equação 3.2 (PANTANI *et al.*, 2001).

$$b_m = \sqrt{C_{p_m} \cdot K_m \cdot \rho_m} \quad [\text{J/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{1/2}] \quad \text{eq. 3.1}$$

Onde:

b_m - Efusividade térmica do material molde;

C_{p_m} - Calor específico do material do molde;

K_m - Condutividade térmica do material do molde;

ρ_m - massa específica do material do molde.

$$h_{p-m}(t_c) = \sqrt{\frac{b_m}{\pi \cdot t_c}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}] \quad \text{eq. 3.2}$$

Onde:

h_{p-m} - coeficiente de transferência de calor entre o polímero e o molde;

b_m - efusividade térmica do material do molde;

t_c - tempo de cristalização do polímero.

Assim, os coeficientes de transferência de calor iniciais para os moldes de epóxi foram calculados pela equação 3.2, com os valores Cp_m , K_m e ρ_m informados na tabela 3.4 e com o valor de 0,1 s sugerido por PANTANI *et al.* (2001) para o tempo de cristalização t_c . Como pode ser visto na tabela 3.5, o valor de h_{p-m} calculado para o processamento em aço é o mesmo usado pelo Moldflow como *default*. Embora o Moldflow permita a entrada de um perfil de valores de h_{p-m} versus tempo, por simplificação do procedimento preferiu-se usar somente o valor inicial para $t_c = 0,1$ s. Na tabela 3.6, por sua vez, são apresentados os parâmetros de controle juntamente com os métodos de controle e os valores atribuídos a estes parâmetros para a realização das simulações no *software* Moldflow.

Tabela 3.4 - Propriedades da resina epóxi RenCast 436 para os cálculos do coeficiente de transferência de calor h_{p-m} .

		Resina RenCast 436 após cura	unidade
Condutividade térmica	K	0,78	W/m.°C
Calor específico	C_p	960	J/kg.°C
Densidade	ρ	1650	kg/m ³
Difusividade térmica	α	$4,92 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Coefficiente de Poisson	ν	não disponível	-
Módulo de elasticidade	E	0,65 – 0,75	GPa

Tabela 3.5. Coeficientes de transferência de calor usados como entrada no Moldflow.

	h_{p-m} (W/m ² .°C)
Aço AISI 1045	24.598
Epóxi RenCast 436	1.984

Tabela 3.6. Parâmetros de injeção para simulação dos ensaios de moldagem no Moldflow.

Parâmetro	Método de controle	Valor atribuído ao parâmetro
Preenchimento da cavidade	por tempo (t_i)	Níveis do fator t_i
Comutação para o recalque	por volume da cavidade versus volume preenchido	99%
Pressão de Recalque (P_{rec})	por pressão versus tempo	níveis do fator P_{rec} versus níveis do fator t_{rec}
Tempo de resfriamento	por valor especificado	300 s
Temperatura do molde (T_{mold})	uniforme nas duas metades	nível do fator T_{mold}
Temperatura de injeção (T_{inj})	valor especificado	Nível do fator T_{inj}
Temperatura ambiente	-	25 °C
Fluxo do fluido de resfriamento	por vazão	4 l/min
Temperatura do fluido de resfriamento	valor especificado	10-70 °C
Tipo de fluido de resfriamento	-	água

Considerações e Hipóteses Relativas aos Cálculos dos Índices Térmicos

Neste trabalho também foram seguidas as recomendações para os cálculos dos índices térmicos descritas por CAVALHEIRO (2006), ou seja:

- Tomou-se a temperatura da interface (T_i) como constante durante o ciclo, desconsiderando o aquecimento dos moldes de epóxi. Dependendo da condição experimental, a temperatura do molde de epóxi subiu entre 20 a 50 graus Celsius nos primeiros 10 segundos do ciclo. Isso significa que o índice térmico do núcleo Y_c das peças injetadas em epóxi pode ter sido subestimado.
- Desprezou-se os efeitos de processo sobre a temperatura de cristalização (T_c), que foi fixada em 155 °C para o policarbonato e 103 °C para o estireno acrilonitrila, em todas as condições experimentais. Conforme VIANA (2003), a pressão de recalque e a taxa de resfriamento tendem a aumentar T_c . Mesmo assim, o próprio autor preferiu considerar T_c constante em seus experimentos (VIANA *et al.*, 2002, VIANA *et al.*, 2004).

3.2.6 Planejamento Experimental para os Ensaio de Moldagem por Sobreinjeção

A otimização de processos de fabricação necessita de uma abordagem onde é, geralmente, necessária a alteração de múltiplas variáveis. Contudo, exceto nos casos onde os fatores ou variáveis

do processo agem de maneira puramente aditiva, sem nunca interagirem entre si, torna-se muito difícil encontrar o ponto ótimo de operação de um processo através do ajuste individual destes fatores (STATGRAPHICS CENTURION XV, 2008). Por outro lado, a tentativa de ajuste e melhoria de três ou mais variáveis, simultaneamente, pode se tornar um processo moroso e de custo extremamente elevado. Além disso, em muitas situações, vários parâmetros são responsáveis por um efeito observado em um determinado produto ou processo. Portanto, o emprego de métodos que visem facilitar a identificação do conjunto de fatores que influenciam de forma significativa em um efeito observado, assume grande importância na melhoria de um processo de fabricação ou na qualidade de um produto.

Segundo CAVALHEIRO (2006), o processo de injeção possui quatro macrovariáveis de controle, sendo elas a temperatura do fundido, a velocidade de avanço da frente de fluxo, a pressão dentro da cavidade do molde e a taxa de resfriamento ao qual o polímero está submetido durante o processo de escoamento. As variáveis listadas acima são, por sua vez, controladas por variáveis programadas na máquina injetora, bem como, por características físicas do polímero, do fluido de arrefecimento e até mesmo por condições externas, como mostra a Figura 3.12, e que atuam sobre as mesmas de forma a produzir as alterações das condições de preenchimento do molde. Contudo, existem pouquíssimas informações de como estas variáveis influenciam o processo de sobreinjeção de uma peça de plástico, especialmente no que diz respeito à adesão obtida entre os dois componentes (inserto de plástico e camada sobreinjetada).

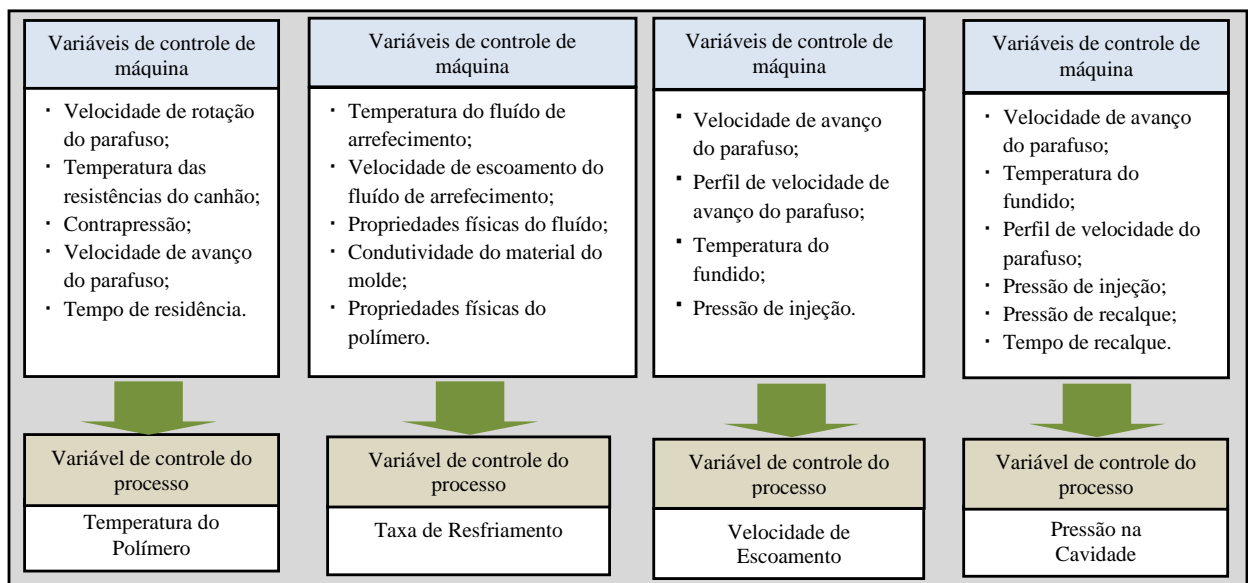


Figura 3.12 – Relação de dependência das macrovariáveis de controle do processo de injeção das variáveis de controle da máquina injetora, propriedades do polímero, do fluido de arrefecimento e do molde.

Conseqüentemente, tornou-se necessária a realização de experimentos que visassem, primeiramente, investigar quais variáveis exerciam uma influência significativa no nível de adesão entre componentes de plástico sobreinjetados, adotando-se uma abordagem exploratória.

Para tanto, recorreu-se a técnicas de delineamento e análise experimental auxiliada por programas de estatística (procedimento *screening*), os quais auxiliaram na geração das condições experimentais e, posteriormente, na análise de seus resultados, fornecendo dados que permitiram identificar o conjunto de variáveis que influenciavam de maneira significativa no processo produtivo investigado.

Os corpos de prova produzidos segundo as condições obtidas por meio do delineamento experimental foram, então, submetidos a um ensaio de tração (a ser descrito posteriormente) para a determinação da força de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados. Os resultados destes ensaios foram avaliados, por meio do emprego de uma análise de variância, para a determinação das variáveis que afetam de forma significativa na força de adesão.

A seguir são, portanto, apresentados os dois procedimentos experimentais adotados para a realização dos ensaios de moldagem por sobreinjeção, procurando-se evidenciar as diferenças e características dos mesmos.

3.2.6.1 Determinação das Variáveis de Máquina que Influenciam de Forma Significativa na Força de Adesão entre os Insertos de ABS e os Componentes Sobreinjetados – Procedimento *Screening*

No delineamento do projeto experimental *Screening* foram considerados cinco fatores, representando cinco variáveis do processo que podem ser programadas na máquina injetora ou variáveis de máquina segundo CAVALHEIRO (2006), sendo atribuído a cada variável dois níveis (MONTGOMERY *et al.*, 2004). A tabela 3.7 apresenta as variáveis de controle da máquina injetora e os valores para cada nível destas variáveis.

Os níveis dos fatores foram variados conforme os seguintes critérios:

- Temperatura do fundido (T_{melt}): selecionou-se os extremos da faixa recomendada pelo fornecedor do polímero: 260 e 290 °C.
- Temperatura inicial do molde (T_{mold}): A temperatura inicial do molde foi tomada com base nos dados fornecidos pelo fornecedor do policarbonato utilizado (*GE Plastics*), de forma que seu

nível mais baixo (50 °C) fosse igual ao menor valor de temperatura do molde sugerido pelo fabricante, e o maior nível da variável foi determinado experimentalmente, de forma que o molde não sofresse falhas prematuras devido a temperaturas excessivamente altas atingidas após a injeção do polímero na cavidade.

- Velocidade de injeção (V_{fill}): os valores foram definidos com auxílio do programa CAE de simulação do processo, tendo-se como premissas a pressão de injeção máxima compatível com a máquina injetora do laboratório CIMJECT e os valores máximos de tensão e taxa de cisalhamentos admitidos pelo material. Assim, os níveis inferior e superior selecionados foram 30mm/s (preenchimento rápido) e 60mm/s (preenchimento lento).
- Pressão de recalque (P_{hold}): O valor de 500 bar foi definido experimentalmente, em ensaios de moldagem preparatórios, para ajuste do processo; o nível máximo, de 1500 bar, foi estabelecido com auxílio de simulação do processo, tendo-se como critérios a eliminação de rechupes e a homogeneização da pressão na cavidade ao longo do caminho de fluxo. Os valores de pressão referem-se à pressão na ponta do parafuso, ou seja, a pressão do sistema hidráulico corrigida pela relação das áreas do cilindro hidráulico do parafuso e do cilindro de plastificação da injetora.
- Tempo de Recalque (T_{hold}): O tempo de recalque foi determinado de acordo com as simulações no *software* Moldflow, sendo este o tempo de solidificação médio para as regiões vizinhas ao ponto de injeção do componente sobreinjetado (aproximadamente 10 segundos). Os limites, inferior e superior, desta variável foram determinados também com base nas simulações do processo e levam em consideração as variações verificadas para os tempos de solidificação do polímero nas regiões anteriormente citadas.

Tabela 3.7 - Níveis das variáveis de controle de máquina para o processo de sobreinjeção com o Policarbonato.

Níveis das variáveis de máquina para a sobreinjeção do ABS com o policarbonato		
Variável de Controle	Nível mais Baixo	Nível mais alto
Temperatura do Fundido (°C)	260	290
Temperatura Inicial do Molde (°C)	60	90
Velocidade de Injeção (mm/s)	30	60
Pressão de Recalque (bar)	500	1500
Tempo de Recalque (s)	5	15

Com os dados listados na tabela 3.7, obteve-se o delineamento experimental apresentado na tabela 3.8, seguindo-se os procedimentos descritos no manual de utilização do programa de análise estatística StatGraphics Centurion. Nela é possível observar que os níveis dos fatores apresentados foram combinados de forma a gerarem condições de processamento para a sobreinjeção dos insertos, e os códigos apresentados na tabela referem-se ao nível do fator investigado (variável de processo) sendo L para o nível mais baixo do fator, M para seu nível médio e H para o nível mais alto da mesma.

Tabela 3.8 - Delineamento experimental para as condições de moldagem por sobreinjeção para o procedimento *screening*.

Condição	Código do delineamento experimental	Temperatura do fundido (°C)	Temperatura do molde (°C)	Velocidade de injeção (mm/s)	Pressão de recalque P_{rec}	Tempo de recalque T_{rec}
C1	MMMMM	280	75	45	1000	10
C2	LLLHL	260	60	30	1500	5
C3	MMMMM	280	75	45	1000	10
C4	LLHHH	260	60	60	1500	15
C5	MMMMM	280	75	45	1000	10
C6	HHHHH	300	90	60	1500	15
C7	LLLLH	260	60	30	500	15
C8	LHHLH	260	90	60	500	15
C9	LHLLL	260	90	30	500	5
C10	LMHLL	260	75	60	500	5
C11	HHLLH	300	90	30	500	15
C12	HHLLL	300	90	60	500	5
C13	LHLHH	260	90	30	1500	15
C14	LHHHH	260	90	60	1500	15
C15	HHLHL	300	90	30	1500	5
C16	HLHLH	300	60	60	500	15
C17	MMMMM	280	75	45	1000	10
C18	MMMMM	280	75	45	1000	10
C19	HLLHH	300	60	30	1500	15
C20	HLHHL	300	60	60	1500	5
C21	MMMMM	280	75	45	1000	10

Neste projeto é visto ainda que, além dos fatores descritos na tabela 3.8, são determinados pelo próprio programa pontos centrais, os quais representam os pontos médios dos fatores da referida tabela. A determinação dos pontos médios é de fundamental importância, pois permite calcular o erro experimental e compará-lo com o erro admissível para o experimento.

3.2.6.2 Delineamento Experimental Segundo um Projeto Fatorial Completo 3^3 para a Determinação das Condições de Moldagem e Investigação dos Efeitos das Variáveis de Máquina na Força de Adesão para os Corpos de Prova Produzidos pela Sobreinjeção com Policarbonato e Estireno Acrilonitrila

Em decorrência dos resultados obtidos do experimento *screening*, que avaliou quais variáveis de máquina influenciaram de forma estatisticamente significativa na força de adesão entre os componentes dos corpos de prova, optou-se por um projeto de experimento fatorial completo, do tipo 3^3 , com três fatores (temperatura do molde, temperatura do fundido e velocidade de injeção) e três níveis (baixo - L, médio - M e alto - H), resultando em um total de 27 condições experimentais para moldagem dos corpos de prova, moldando-se seis corpos de prova para cada condição.

Além disso, a escolha deste projeto experimental foi motivada também pela possibilidade de otimização do processo de sobreinjeção, através da obtenção das condições de moldagem (variáveis de máquina) que permitissem maximizar a adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados (MONTGOMERY *et al.*, 2004).

Os níveis dos fatores foram variados conforme os critérios apresentados no item 3.2.6.1 e são apresentados nas tabelas 3.9 e 3.10, respectivamente para os experimentos com policarbonato e estireno acrilonitrila sobre os insertos de ABS.

Tabela 3.9 - Níveis dos fatores para o delineamento do experimento fatorial PC/ABS.

Níveis das Variáveis para o Experimento Fatorial PC/ABS			
Variável de Controle ou Fator	Nível mais Baixo (L)	Nível intermediário (M)	Nível mais alto (H)
Temperatura do Fundido (°C)	260	275	290
Temperatura Inicial do Molde (°C)	50	60	70
Velocidade de Injeção (mm/s)	30	45	60
Pressão de Recalque (bar)	1000	1000	1000
Tempo de Recalque (s)	10	10	10

Tabela 3.10 - Níveis dos fatores para o delineamento do experimento fatorial SAN/ABS.

Níveis das Variáveis para o Experimento Fatorial SAN/ABS			
Variável de Controle ou Fator	Nível mais Baixo	Nível intermediário	Nível mais alto
	(L)	(M)	(H)
Temperatura do Fundido (°C)	230	245	260
Temperatura Inicial do Molde (°C)	40	55	70
Velocidade de Injeção (mm/s)	30	45	60
Pressão de Recalque (bar)	1000	1000	1000
Tempo de Recalque (s)	10	10	10

De acordo com os níveis dos fatores acima exibidos foram então determinadas as condições experimentais apresentadas nas tabelas 3.11 e 3.12 seguindo-se um arranjo fatorial 3^3 das mesmas utilizando-se o software *Statgraphics Centurion*.

Tabela 3.11 - Condições para o experimento fatorial completo PC+ABS.

Condição	Código do Experimento Fatorial	Condição Experimental	Temperatura do Fundido T_{inj} (°C)	Temperatura inicial do molde T_{mold} (°C)	Velocidade de injeção V_{inj} (mm/s)
C1	MMM	C1	275	50	45
C2	MML	C2	275	50	30
C3	HMM	C3	290	60	45
C4	MML	C4	275	60	30
C5	MMH	C5	275	60	60
C6	MHL	C6	275	70	30
C7	LHL	C7	260	70	30
C8	HHH	C8	290	70	60
C9	LMH	C9	260	50	30
C10	LML	C10	260	60	30
C11	LHM	C11	260	70	45
C12	LMH	C12	260	50	60
C13	HHM	C13	290	70	45
C14	LMM	C14	260	60	60
C15	LML	C15	260	60	45
C16	HHL	C16	290	70	30
C17	MHM	C17	275	70	45
C18	MLM	C18	275	50	60
C19	HLM	C19	290	50	45
C20	HML	C20	290	60	30
C21	HLL	C21	290	50	30
C22	MMM	C22	275	60	45
C23	MHH	C23	275	70	60
C24	LLM	C24	260	50	45
C25	HMH	C25	290	60	60
C26	HLH	C26	290	50	60

C27	LHH	C27	260	70	60
-----	-----	-----	-----	----	----

Tabela 3.12 - Condições para o experimento fatorial completo SAN+ABS.

Condição	Código do Experimento Fatorial	Condição Experimental	Temperatura do Fundido T_{inj} (°C)	Temperatura inicial do molde T_{mold} (°C)	Velocidade de injeção V_{inj} (mm/s)
C1	LML	C1	230	55	30
C2	LLH	C2	230	40	60
C3	HHH	C3	260	70	60
C4	HMH	C4	260	55	60
C5	MML	C5	245	40	30
C6	HLM	C6	260	40	45
C7	LLM	C7	230	40	45
C8	HHM	C8	260	70	45
C9	MMH	C9	245	55	60
C10	HLL	C10	260	40	30
C11	MML	C11	245	55	30
C12	LLL	C12	230	40	30
C13	HMM	C13	260	55	45
C14	MLM	C14	245	40	45
C15	MMM	C15	245	55	45
C16	HML	C16	260	55	30
C17	HLH	C17	260	40	60
C18	MLH	C18	245	40	60
C19	LHH	C19	230	70	60
C20	LHL	C20	230	70	30
C21	HHL	C21	260	70	30
C22	LMH	C22	230	55	60
C23	LMM	C23	230	55	45
C24	MHM	C24	245	70	45
C25	MHL	C25	245	70	30
C26	LHM	C26	230	70	45
C27	MHH	C27	245	70	60

3.2.7 Ensaios de Moldagem por Sobreinjeção

O processo de injeção foi realizado em uma injetora ARBURG ALLROUNDER 320S 500/150 (LABMAT/EMC/UFSC). Um banho termostaticado MICROQUÍMICA MBQTC 9920, com vazão de 4 l/min, foi usado para manter sob controle a temperatura dos insertos, montados em um porta-moldes de aço.

Para o monitoramento da temperatura dos moldes foi utilizado um termopar do tipo K, montado na posição indicada na Figura 3.7, a 2,5 mm de profundidade em relação à superfície da

cavidade, e conectado a um sistema de aquisição de sinal PICOLOG TC08, que por sua vez estava ligado a um microcomputador, permitindo o acompanhamento em tempo real e o registro da evolução da temperatura ao longo do ciclo de moldagem.

Foi realizado também o monitoramento da pressão interna da cavidade do molde, utilizando-se um transdutor de pressão KISTLER modelo 6157BA montado no molde na posição demonstrada na Figura 3.7, e conectado ao sistema de aquisição de sinais da máquina injetora.

Devido à higroscopicidade dos polímeros utilizados utilizou-se uma estufa a vácuo NOVA ÉTICA modelo 440/2D para a sua desumidificação, seguindo os procedimentos de secagem descritos nas folhas de dados de processamento dos respectivos polímeros (tabelas 3.1 à 3.3).

A seguir é descrito em detalhes o procedimento geral adotado para a realização dos ensaios de moldagem por sobreinjeção:

1. Montagem dos insertos do molde no porta-moldes, instalação na máquina injetora e conexão aos equipamentos auxiliares;
2. Programação dos parâmetros fixos, referentes aos movimentos da placa móvel, extratores e plastificação do polímero;
3. Ajuste dos parâmetros de moldagem variáveis, referentes à primeira condição experimental (velocidade de injeção, temperatura do polímero, temperatura do molde, tempo e pressão de recalque, tempo de molde fechado);
4. Tempo de espera para estabilização da temperatura do molde e da unidade injetora da máquina (canhão);
5. Purga do material dosado na unidade injetora para verificação da temperatura real do polímero antes da moldagem;
6. Ajuste da posição final de avanço do parafuso para que a comutação para a etapa de recalque ocorresse com a cavidade aproximadamente 99% preenchida, conforme condição de simulação conFigurada no Moldflow;
7. Ajuste da velocidade de avanço do parafuso para que o tempo de preenchimento se igualasse ao valor nominal pré-estabelecido; a pressão de injeção é programada com o mínimo valor capaz de manter constante a velocidade de avanço do parafuso durante o tempo de preenchimento;
8. Ajuste da força de fechamento de forma a não ocorrer rebarbas;
9. Ajuste da dosagem de material no canhão para o preenchimento de 99% da cavidade;
10. Ajuste do tempo de molde fechado, descontando-se o tempo de recalque adicional;

11. Ajuste do retardo do fechamento do molde, para resfriamento do molde até a temperatura de referência para reinício do ciclo;
12. Injeção de um mínimo de 10 peças para uso como corpo de prova;
13. Preparação para a injeção de corpos de prova sob a condição experimental seguinte, repetindo-se os passos 3 a 12;
14. Remoção do porta-molde para troca do par de insertos e repetição do procedimento desde o passo 1.

A regulagem do tempo de molde fechado para resfriamento foi variada para cada condição experimental, de maneira que o ciclo seguinte fosse iniciado sempre com a temperatura utilizada em cada condição.

Após a extração, o molde deveria permanecer aberto até que fosse atingida a temperatura de referência para reinício do ciclo sendo, neste trabalho, equivalente ao valor da variável experimental T_{mold} . Em virtude de sua baixa condutividade, os moldes de epóxi tinham sua temperatura aumentada em até 30 °C, devido ao contato e transferência de calor do termoplástico injetado. Assim, para cada condição experimental, aguardou-se um tempo necessário para que o molde atingisse a temperatura prevista para a moldagem (como já referido T_{mold}), permitindo, desta forma, o fechamento do molde e início do ciclo de moldagem subsequente, sendo este tempo controlado com o auxílio das leituras de temperatura realizadas pelo termopar instalado no molde, conectado ao sistema de aquisição PICOLOG.

Após a desmoldagem dos corpos de prova, o sistema de alimentação era removido e a peça sujeita a uma inspeção visual para uma avaliação prévia da região de união entre o inserto e o componente sobreinjetado. Caso fosse evidenciado qualquer problema (ex.: descolamento entre os componentes ou degradações) o corpo de prova era descartado e um novo era produzido.

3.2.8 Ensaios Mecânicos dos Corpos de Prova Produzidos por Sobreinjeção

Para a medição da força de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados foram realizados ensaios de tração em uma máquina de ensaio de tração universal EMIC DL2000 utilizando-se uma velocidade de ensaio, segundo norma ISO 527-1,-2, de 1 mm/min. Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente (18 °C), permitindo-se, previamente, que os corpos de prova atingissem a mesma temperatura.

Foram avaliados, neste ensaio, os corpos de prova produzidos na moldagem por sobre-injeção seguindo-se as condições de moldagem obtidas no delineamento experimental estatístico apresentado no item 3.2.4, sendo tomados os valores da força máxima na ruptura dos corpos de prova na região de união entre os dois componentes, bem como a curva de tensão deformação obtida em cada ensaio.

Os corpos de prova utilizados seguiram a geometria descrita em 3.2.2, e são apresentados na Figura 3.8.

Por meio de ensaios dinâmicos-mecânicos de tensão versus deformação e fadiga com apoio em três pontos (*three point*), determinou-se o comportamento do módulo de elasticidade, tensão e deformação máximas, bem como o tempo necessário para o descolamento entre os componentes dos corpos de prova para peças injetadas sob as condições experimentais que resultaram em valores extremos para os ensaios de tração realizados.

Os ensaios de fadiga foram realizados no equipamento T.A. INSTRUMENTS DMA Q8000 3E, do laboratório CIMJECT, com frequência de 10 Hz, amplitude da deformação de 1 e 2 mm, em temperatura ambiente. Já os ensaios de flexão foram realizados a temperatura ambiente a uma taxa de deformação de 2N/min até a ruptura dos corpos de prova.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios estão apresentados nas Figuras 3.10 e 3.11, respectivamente para os ensaios de tração versus deformação e fadiga.

Para os ensaios de tração versus deformação os corpos de prova tiveram que ser cortados para que ficassem com um comprimento máximo de 45 mm como já referido anteriormente.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4 Resultados e Discussões

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os resultados e discussões para as investigações realizadas neste trabalho e propostos anteriormente no capítulo de materiais e métodos.

Portanto, no item 4.1 são apresentados os resultados e discussões relativos à investigação e análise estatística dos efeitos das macrovariáveis do processo sobre os parâmetros do escoamento do polímero, tais como, temperatura de massa do polímero, temperatura da pele, temperatura da interface inserto e componente sobreinjetado e área de amolecimento do inserto sobreinjetado, obtidos por meio de simulações no *software* CAE Comercial *Moldflow*®, de acordo com as condições experimentais obtidas a partir dos delineamentos estatísticos realizados.

No item 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de tração realizados nos corpos de prova obtidos por sobreinjeção, sendo os valores de força de adesão, obtidos nos ensaios, correlacionados às macrovariáveis de processo, por meio de análises de variância e de regressões lineares realizadas com o auxílio do *software* *StatGraphics Centurion XV*.

Por último no item 4.3, os resultados das simulações no *software* CAE Comercial *Moldflow*® são estatisticamente correlacionados (também com o emprego de análises de variância e regressões múltiplas e análises multivariáveis) aos valores dos ensaios de tração dos corpos de prova, como forma de se estabelecer critérios para uma avaliação prévia, por meio de simulações, do processo de adesão na moldagem por sobreinjeção.

4.1 Influência das Variáveis de Processo nos Parâmetros do Escoamento no Processo de Sobreinjeção dos Insertos de ABS

As tabelas 4.1 a 4.3 apresentam os principais resultados das simulações de preenchimento para cada condição experimental obtida no processo de delineamento dos experimentos. Como referido anteriormente, nesta investigação foram avaliadas as influências das macrovariáveis de processo determinadas nos projetos experimentais sobre as condições de preenchimento das cavidades dos moldes em epóxi, estimando-se, a partir destes dados, os efeitos impostos aos insertos de ABS. Foram avaliados, desta forma, os efeitos das macrovariáveis de processo nos seguintes parâmetros do escoamento resultantes das simulações com o *software* CAE Comercial *Moldflow*®:

- Temperatura de massa (*bulk temperature*) dos polímeros na região de união dos corpos de prova - T_b ;
- Área de “amolecimento” (*remelt*) do inserto de ABS decorrente do aquecimento produzido pelo polímero sobreinjetado - A_{remelt} .
- Temperatura da superfície da pele - T_s ;
- Temperatura da interface entre inserto de ABS e polímero sobreinjetado (SAN e PC) segundo a equação 2.2 - T_i ;

A partir dos dados obtidos do *software* Comercial Moldflow também foram calculados os índices térmicos (Y_c) resultantes do escoamento do polímero na cavidade, sendo estes dados também sumarizados nas tabelas 4.1 a 4.3.

4.1.1 Resultados e Discussões Referentes às Simulações do Experimento *Screening*

Os dados referentes às simulações do processo de sobreinjeção, sumarizados na tabela 4.1, foram submetidos a uma análise estatística para a determinação da influência das macrovariáveis de processo sobre as mesmas. Nesta tabela, os códigos referentes às condições experimentais representam, respectivamente, a temperatura do fundido, a temperatura do molde, a velocidade de injeção, a pressão e o tempo de recalque.

Na Figura 4.1 a 4.4 são apresentados, respectivamente, os diagramas de Pareto para as variáveis investigadas temperatura de massa (T_b), temperatura da pele (T_s), temperatura da interface (T_i) e área de “amolecimento” (*remelt* - A_{remelt}) resultantes desta análise estatística.

Tabela 4.1- Dados resultantes das simulações em Moldflow e índices térmicos calculados referentes ao procedimento experimental *screening*.

Códigos das condições experimentais	Resultados da simulação			Temperaturas da interface e Índices térmicos do núcleo	
	T _b	A _{remelt}	T _s	T _i	Y _c
	(°C)	(mm ²)	(°C)	(°C)	
MMMMM	292,3	95,3	228,9	147,3	0,95
LLLHL	274,7	91,2	214,6	130,6	0,84
MMMMM	292,6	95,3	227,2	147,3	0,95
LLHHH	238,1	91,1	220,4	130,6	0,78
MMMMM	292,2	95,3	201,4	147,3	0,95
HHHHH	309,6	93,8	216,9	164,1	1,07
LLLLH	273,4	94,5	188,5	130,6	0,84
LHHLH	273,2	100,1	202,4	150,0	0,97
LHLLL	274,7	96,0	218,7	150,0	0,97
LMHLL	270,9	97,3	243,5	140,3	0,89
HHL LH	307,4	94,1	265,1	164,1	1,07
HHHLL	307,4	94,8	265,1	164,1	1,07
LHLHH	268,7	95,7	251,5	150,0	0,97
LHHHH	269,0	94,6	243,7	150,0	0,97
HHLHL	308,2	94,0	275,3	164,1	1,07
HLHLH	308,0	95,6	237,1	144,6	0,94
MMMMM	289,6	95,3	254,2	147,3	0,95
MMMMM	307,9	95,3	231,1	144,7	0,94
HLLHH	307,9	96,9	231,1	144,7	0,94
HLHHL	307,9	96,9	231,1	144,7	0,94
MMMMM	307,9	95,3	231,1	147,3	1,04
HLLLL	307,9	95,0	231,1	144,7	0,94

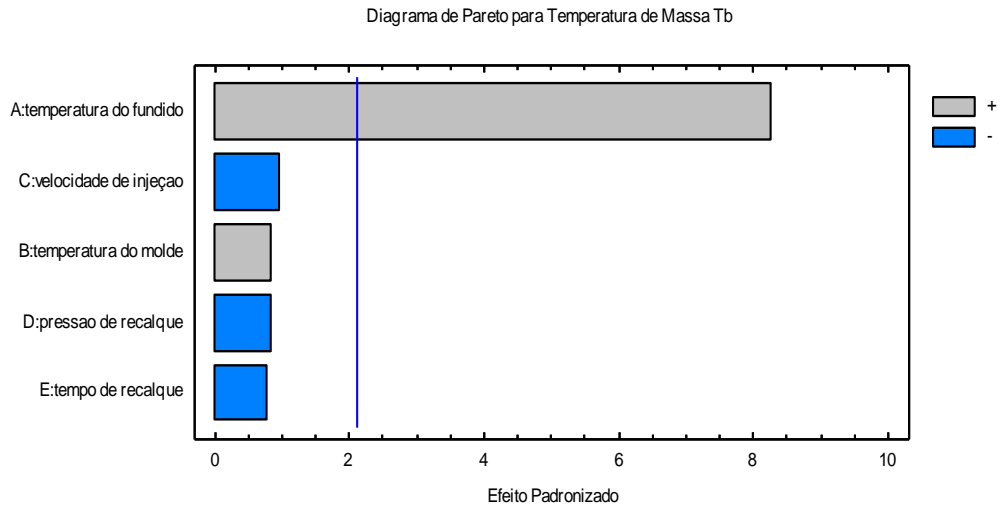


Figura 4.1 - Diagrama de Pareto para a determinação das macrovariáveis estatisticamente significativas sobre a variação da temperatura de massa do polímero obtida nas simulações (T_b), referente ao experimento *screening*.

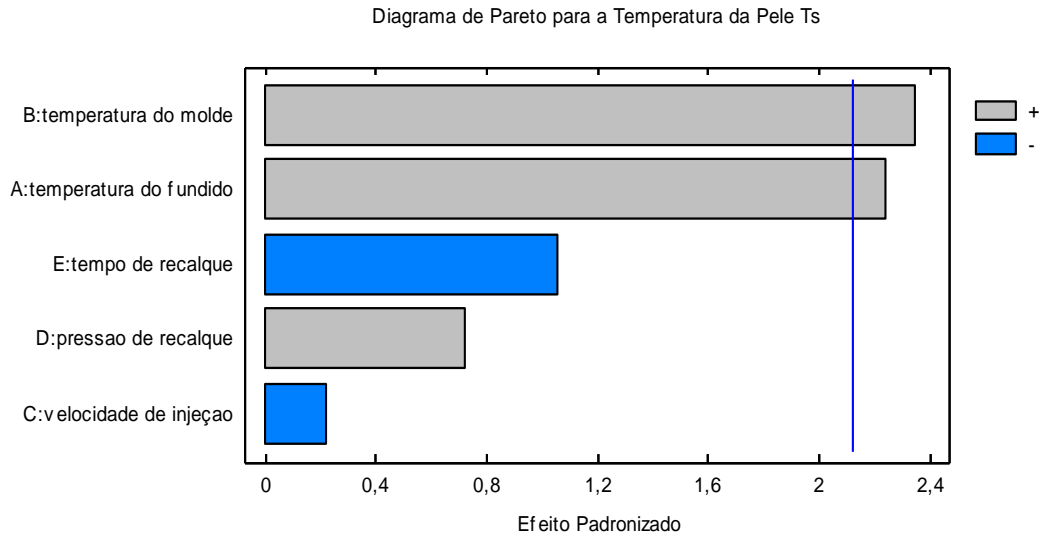


Figura 4.2 - Diagrama de Pareto para a determinação das macrovariáveis estatisticamente significativas sobre a variação da temperatura da pele obtida na simulação do preenchimento (T_s), referente ao experimento *screening*.

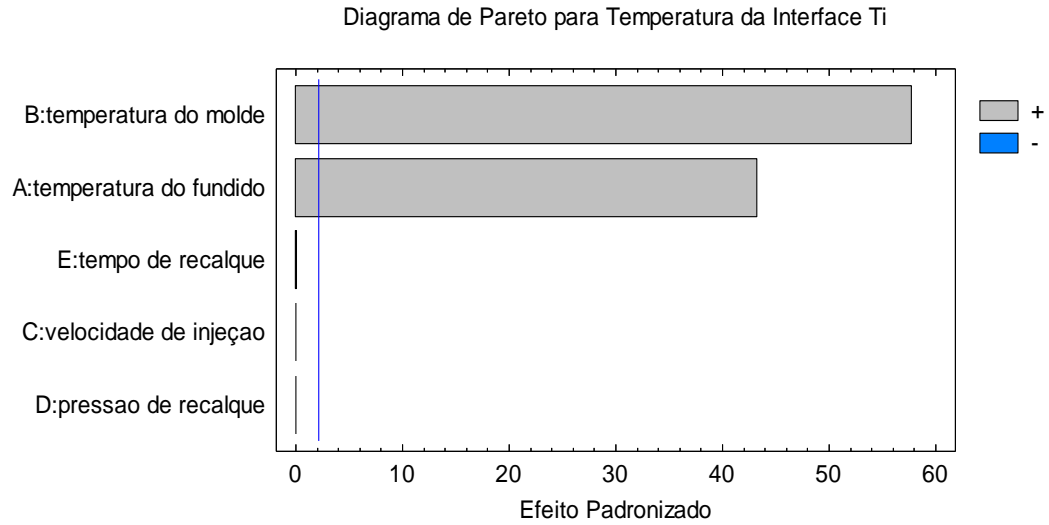


Figura 4.3 - Diagrama de Pareto para a determinação das macrovariáveis estatisticamente significativas sobre a variação da temperatura da interface (T_i) entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato obtido nas simulações, referentes ao experimento *screening*.

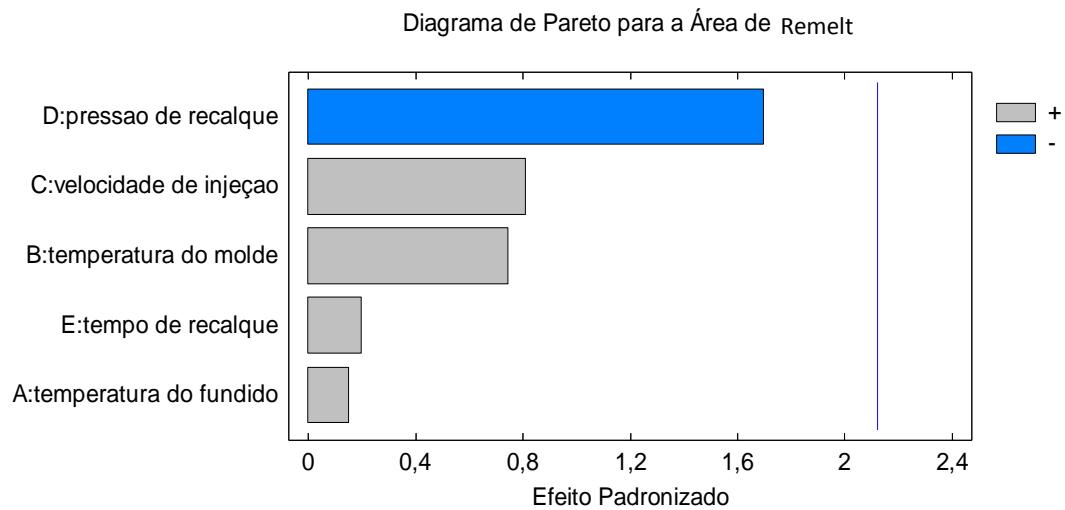


Figura 4.4 - Diagrama de Pareto para a determinação das macrovariáveis estatisticamente significativas sobre a variação da área de “amolecimento” (*remelt* - A_{remelt}) do inserto de ABS, decorrente do processo de sobreinjeção, obtidas nas simulações em Moldflow segundo o experimento *screening*.

O comportamento observado nas Figuras 4.1 a 4.4 pode ainda ser complementado por meio das Figuras 4.5 a 4.8, que mostram os gráficos dos efeitos das macrovariáveis investigadas nas simulações do processo de sobreinjeção, respectivamente, na temperatura de massa, temperatura da pele, temperatura da interface entre o inserto e o componente produzido por sobreinjeção bem como a área de “amolecimento” (*remelt*) do inserto de ABS.

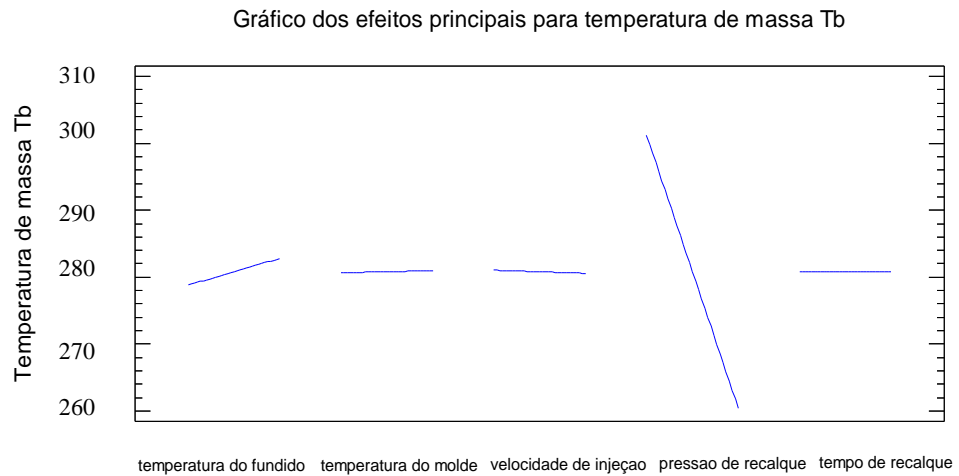


Figura 4.5 - Gráfico dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação da temperatura de massa do polímero obtida nas simulações (T_b), referente ao experimento screening.

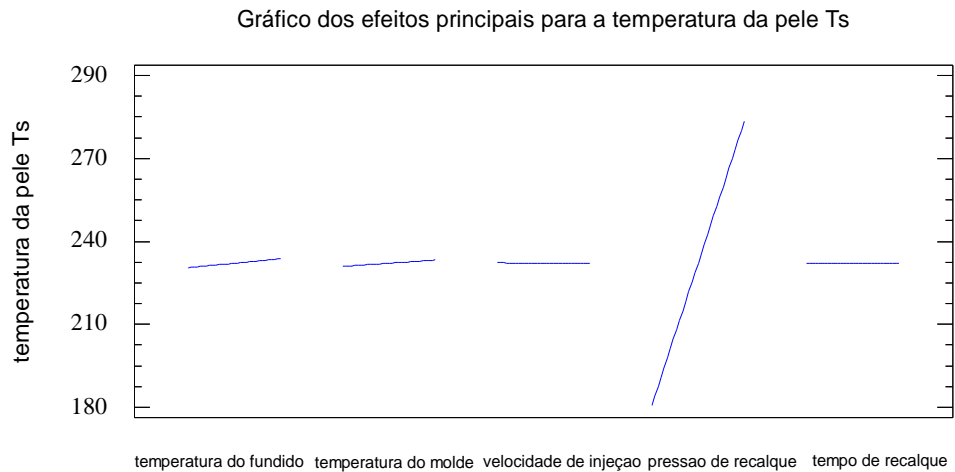


Figura 4.6 - Gráfico dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação da temperatura da pele (T_s) do polímero obtida nas simulações, referente ao experimento screening.

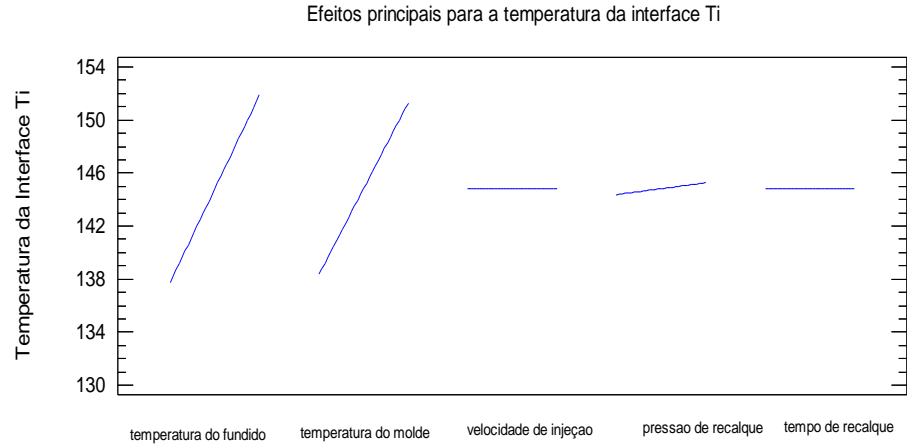


Figura 4.7 - Gráfico dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação da temperatura na interface (T_i) entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato, obtida por meio das simulações, referente ao experimento screening.

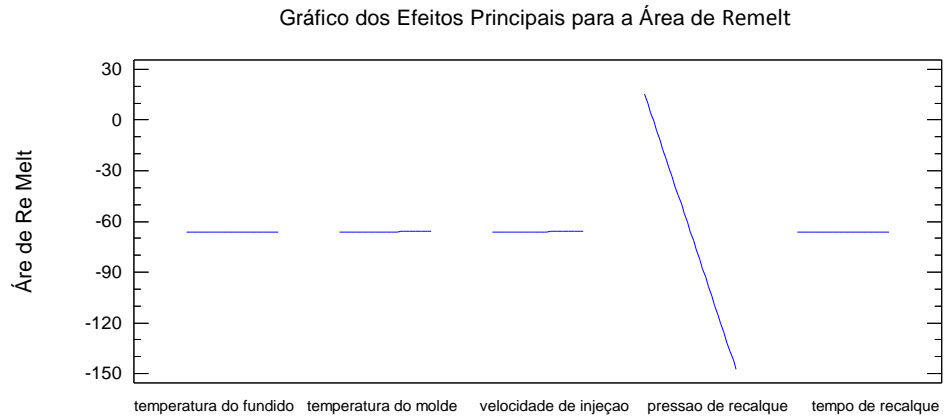


Figura 4.8 - Gráfico dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação da área de “amolecimento” (A_{remelt}) do inserto de ABS, decorrente do processo de sobreinjeção com policarbonato, obtida nas simulações de acordo com o procedimento experimental screening.

Mediante a observação dos diagramas de Pareto e dos gráficos dos efeitos das variáveis para a temperatura de massa (T_b), a temperatura da pele (T_s), a temperatura da interface (T_i) e a área de *remelt*, tomadas na região de interface entre o polímero sobreinjetado e o inserto de ABS (Figura 4.1), foi constatado que:

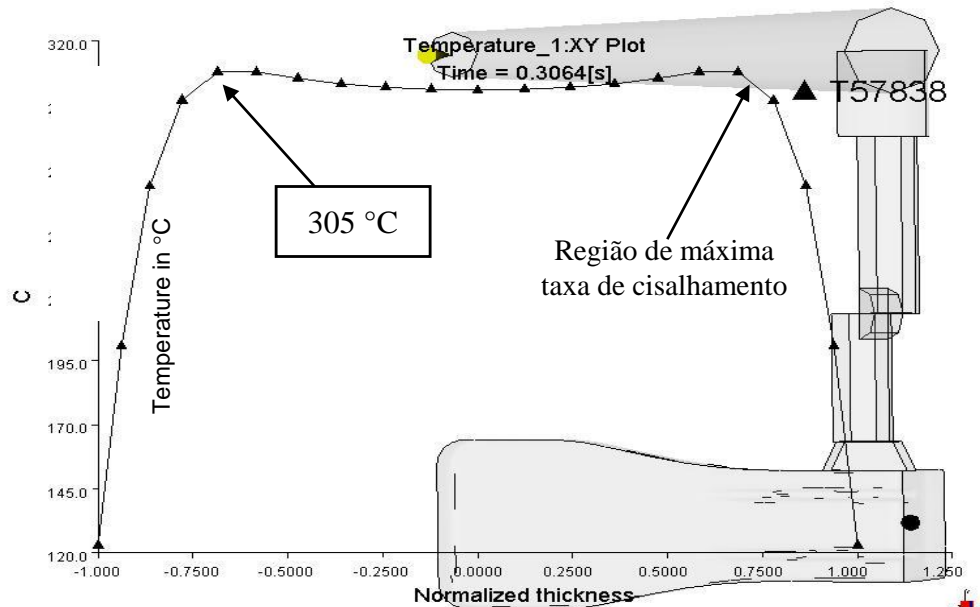
1. Apenas a temperatura do fundido influenciou de forma estatisticamente significativa na temperatura de massa do polímero na região de união entre os componentes dos corpos de prova (Figura 3.5), sendo a relação entre o aumento da T_{inj} e da T_b positivo, ou seja, para um aumento da temperatura de injeção do polímero ocorre um aumento da temperatura de massa;
2. A temperatura da superfície da pele sofreu variações influenciadas pelas temperaturas do polímero e do molde utilizadas nas simulações do processo de sobreinjeção tendo, ambas, uma relação positiva com a temperatura da pele como pode ser observado no gráfico equivalente da Figura 4.2;
3. Da mesma forma, a temperatura da interface entre o inserto de ABS e o componente produzido por sobreinjeção sofreu uma influência estatisticamente significativa produzida pelas temperaturas do molde e do fundido utilizadas nas simulações do processo, sendo também positivas estas relações;
4. Diferentemente, a área de remelt não sofreu variações significativas com qualquer das variáveis investigadas nas simulações do processo de sobreinjeção.

Discussão dos Resultados Obtidos

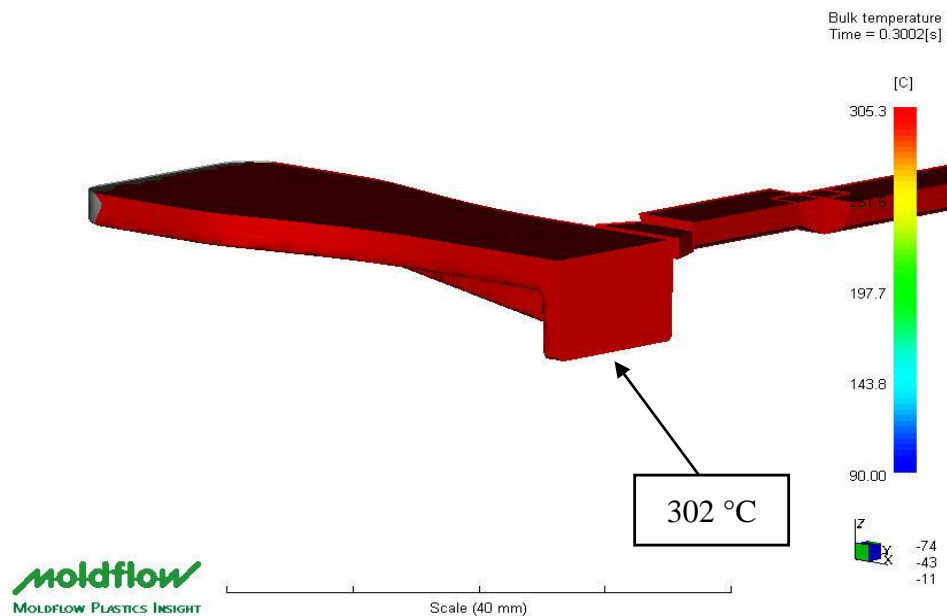
O comportamento observado na Figura 4.1 referente à temperatura de massa do polímero durante o preenchimento pode ser explicado com o auxílio da Figura 4.9, onde é apresentado o gráfico de variação da temperatura ao longo da espessura de parede do componente produzido por sobreinjeção e da distribuição da temperatura de massa na região de união dos componentes, também indicada no componente produzido por sobreinjeção. Nessa Figura é possível verificar que os efeitos de dissipação viscosa gerados pelo cisalhamento do polímero durante seu escoamento dentro do molde não contribuem de maneira significativa para o aquecimento do polímero e, por sua vez, no aumento da temperatura de massa, como é possível comprovar através da pequena variação ocorrida na temperatura de massa do fundido quando comparada a sua temperatura de injeção (300 °C).

Já a variação dos valores das temperaturas da pele (T_s) e da interface (T_i), Figuras 4.2 e 4.3, depende exclusivamente das temperaturas do fundido e do molde, visto que o aumento de temperatura do polímero, decorrente da dissipação viscosa (efeito do aumento da velocidade de injeção e conseqüente aumento da taxa de cisalhamento do polímero indicado na Figura 4.9 pela

temperatura de 305 °C), não exerceu qualquer influência no aumento da temperatura do polímero, como pode ser indicado na Figura 4.9 (b) pelo valor de 302 °C, assim como a pressão e o tempo de recalque, os quais também não exerceram efeitos significativos.



(a)



(b)

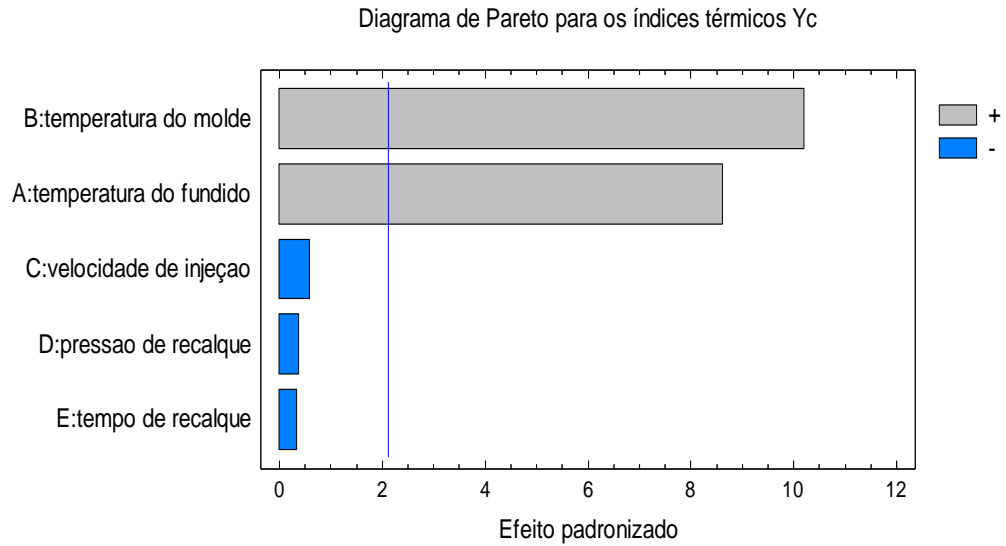
Figura 4.9 - Resultados da simulação no *Software* CAE Comercial Moldflow© do componente produzido por sobreinjeção mostrando em (a) a distribuição de temperatura ao longo da espessura da peça, e efeitos do aquecimento por dissipação viscosa, e em (b) a temperatura de massa resultante ao fim do preenchimento da cavidade.

De acordo com o diagrama de Pareto apresentado também na Figura 4.4, resultante de análise estatística dos parâmetros obtidos das simulações realizadas no *software* Moldflow, observa-se que as macrovariáveis de processo não exercem, sobre as dimensões da área de “amolecimento” (*remelt*), efeitos estatisticamente significativos em sua variação.

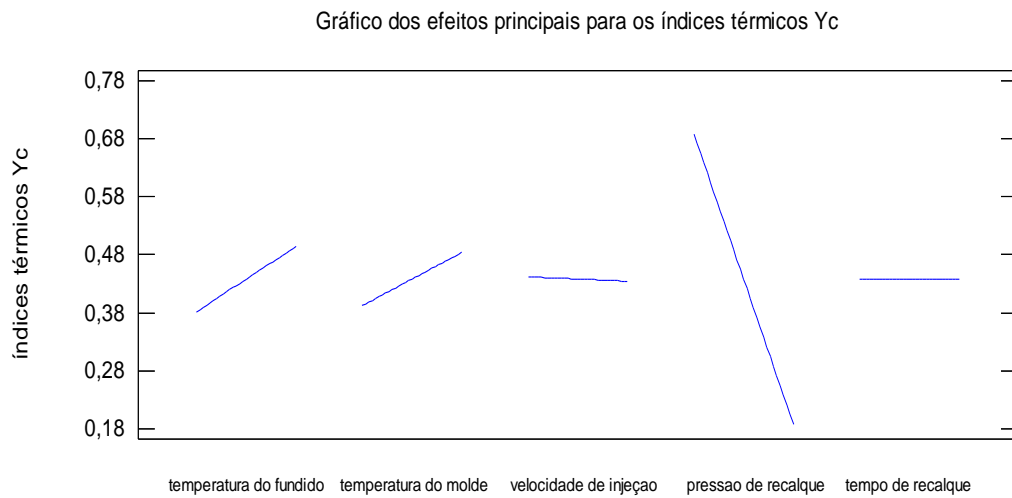
Esperava-se, contudo, que os efeitos exercidos pelas macrovariáveis do processo sobre as dimensões das áreas de “amolecimento” (*remelt*) fossem significativos, já que as temperaturas de massa, da pele e da interface na região de união entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados em PC e em SAN foram afetadas pela temperatura do fundido, no caso de T_b , e pela temperatura do molde e do fundido no caso de T_i e T_s . Como os referidos parâmetros foram significativamente afetados pelas macrovariáveis, era esperado que a área afetada pelo “amolecimento” (*remelt*) do polímero do inserto também sofresse uma variação significativa em decorrência das macrovariáveis investigadas, principalmente devido aos efeitos produzidos pelas temperaturas do fundido e do molde, o que de fato não foi evidenciado.

No entanto, pode-se justificar este comportamento pelo fato da temperatura do fundido (macrovariável), apesar de influenciar significativamente os parâmetros, levar a valores de T_b e T_i superiores à temperatura de amolecimento Vicat do ABS (108 °C) em todas as condições experimentais simuladas no *software* CAE Moldflow. Isto fica evidente quando se observa os resultados das temperaturas na interface da região de “adesão” (Tabela 4.1), cujo valor médio atingiu 147,7 °C. Este resultado mostra que mesmo para os níveis mais baixos dos fatores experimentais (menores valores da temperatura do fundido, do molde, da velocidade de injeção, pressão e tempo de recalque) as temperaturas da interface T_i atingem valores suficientemente altos para produzirem um “amolecimento” de quase toda a região de união, resultando em variações da área de “amolecimento”, entre cada condição experimental, que não são estatisticamente significativas.

A análise estatística dos índices térmicos do núcleo, calculados com base nos dados das simulações no *software* Moldflow, e listados na tabela 4.1, revela que as macrovariáveis que afetam de maneira estatisticamente significativa os valores destes índices são a temperatura do fundido e do molde, como mostra o diagrama de Pareto e o gráfico dos efeitos das variáveis da Figura 4.10, sendo possível observar também, que os efeitos exercidos por ambas as variáveis sobre os índices térmicos são positivos.



(a)



(b)

Figura 4.10 - Diagrama de Pareto (a) para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráfico dos efeitos das variáveis (b) relativos aos resultados dos índices térmicos calculados a partir das condições de moldagem para o procedimento experimental *screening*.

Esse comportamento demonstra que os efeitos das variáveis analisadas anteriormente, apresentam-se coerentes com seus efeitos, ou seja, os valores dos índices térmicos, que representam o grau de superaquecimento do polímero, variam basicamente segundo os fenômenos de

transferência de calor ocorridos na região de adesão entre o inserto de ABS e o componente produzido por sobreinjeção, sem que seja observado qualquer efeito da dissipação viscosa resultante do aumento ou da diminuição da velocidade de preenchimento da cavidade e, conseqüentemente, da variação da taxa de cisalhamento na região supracitada. Este comportamento é resultado do fato da viscosidade do fundido não ser suficientemente alta para que os efeitos produzidos pelo atrito alcancem, na região de máxima taxa de cisalhamento (Figura 2.3), valores significativamente altos, capazes de contribuírem para a alteração da temperatura de massa, temperatura da pele e, conseqüentemente, nos índices térmicos. Tal fato já havia sido observado também por CAVALHEIRO (2006) em suas investigações a respeito da influência das variáveis de processo nos valores dos índices térmicos, tanto para os experimentos em moldes de epóxi como para os experimentos em moldes de aço, que verificou que a dissipação viscosa resultante do cisalhamento do polímero durante o fluxo não contribui de forma significativa para o aumento dos índices térmicos sendo estes afetados exclusivamente pelas temperaturas tanto do molde como do fundido.

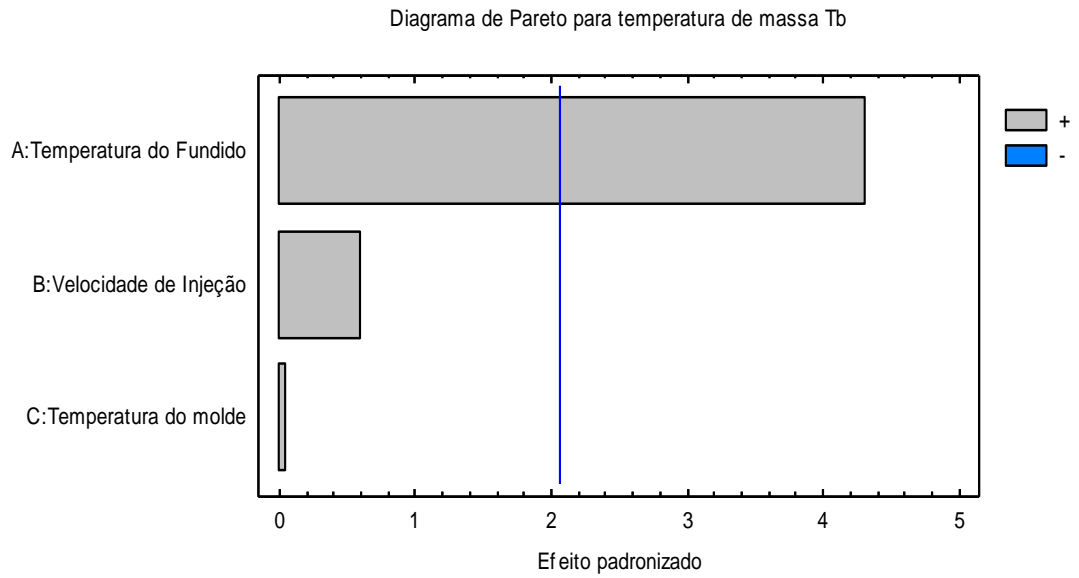
4.1.2 Resultados e Discussões Referentes às Simulações do Experimento Fatorial PC/ABS

Na tabela 4.2 são listados os dados resultantes das análises no *software* Moldflow para as 27 condições definidas no delineamento do experimento fatorial completo PC/ABS, onde os códigos referentes às condições experimentais representam, na ordem em que se encontram, respectivamente, temperatura do fundido, velocidade de injeção e temperatura do molde. De forma análoga ao experimento *screening* são apresentados os resultados para os parâmetros T_b , T_s , T_i e A_{remelt} , além dos índices térmicos do núcleo Y_c calculados com base nas informações decorrentes das simulações.

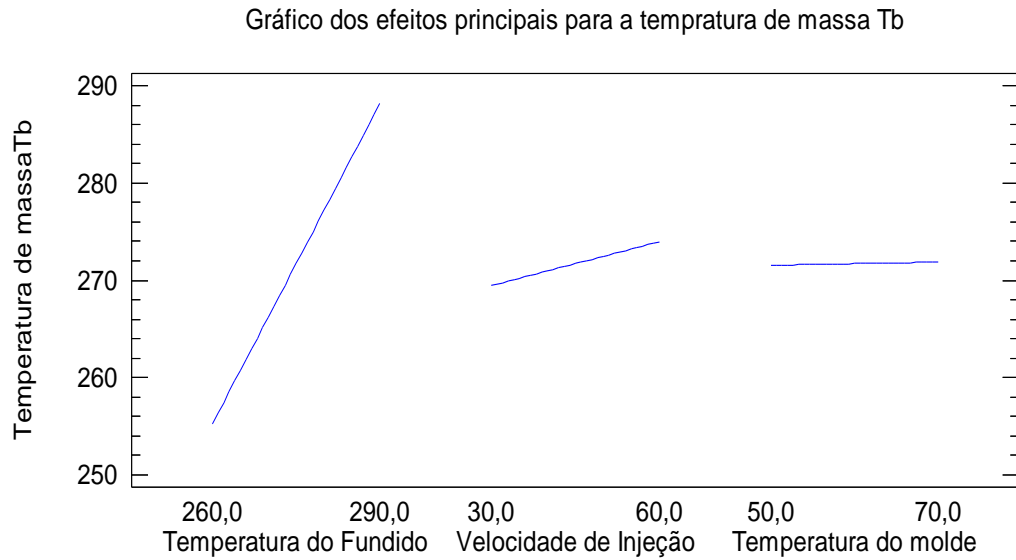
Nas Figuras 4.11 a 4.14 são apresentados, por sua vez, os diagramas de Pareto e gráficos dos efeitos das macrovariáveis do processo, resultantes da análise estatística sobre os efeitos exercidos pelas variáveis de processamento (macrovariáveis) sobre os parâmetros resultantes da simulação do escoamento T_b , T_s , T_i e A_{remelt} e Y_c .

Tabela 4.2- Dados resultantes das simulações em Moldflow e índices térmicos calculados referentes ao experimento fatorial completo PC+ABS.

Código das condições experimentais	Resultados da simulação			Temperatura da interface e Índices térmicos do núcleo	
	T _b (°C)	A _{remelt} (mm ²)	T _s (°C)	T _i (°C)	Y _c
MLM	284,4	81,1	261,9	129,4	0,84
MLL	235,5	80,1	177,5	129,4	0,77
HMM	263,6	83,2	209,3	141,2	0,90
MML	263,6	81,1	203,3	135,9	0,86
MMM	248,9	82,2	166,9	135,9	0,84
MHL	263,3	81,1	185,6	142,3	0,90
LHL	235,2	86,3	168,8	137,0	0,83
HHH	263,2	86,3	196,2	147,6	0,94
LLL	249,6	85,3	192,6	124,1	0,76
LML	263,0	84,2	176,2	130,6	0,82
LHM	248,8	72,8	171,2	137,0	0,85
LLM	235,0	86,3	157,6	124,1	0,73
HHM	297,7	86,3	297,7	147,6	0,96
LMH	267,2	86,3	267,2	130,6	0,83
LMM	266,1	86,3	266,1	130,6	0,83
HHL	297,2	86,3	297,20	147,62	0,96
MHM	281,7	87,4	281,67	142,33	0,92
MLM	280,8	87,4	280,75	129,38	0,84
HLM	297,9	75,9	297,90	134,68	0,88
HML	297,2	87,4	297,19	141,15	0,92
HLL	297,3	87,4	297,26	134,68	0,88
MMM	284,7	77,0	284,71	135,86	0,88
MHH	281,4	77,0	281,41	142,33	0,92
LLM	266,8	86,3	266,76	124,09	0,79
HMH	295,4	75,9	295,41	141,15	0,92
HLH	294,6	87,4	294,5	134,68	0,88
LHH	276,3	87,4	276,26	137,04	0,88



(a)



(b)

Figura 4.11 - Diagramas de Pareto (a) para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráficos dos efeitos das variáveis de processamento (b) sobre as temperaturas de massa (T_b) obtidas nas simulações referentes ao experimento fatorial PC+ABS.

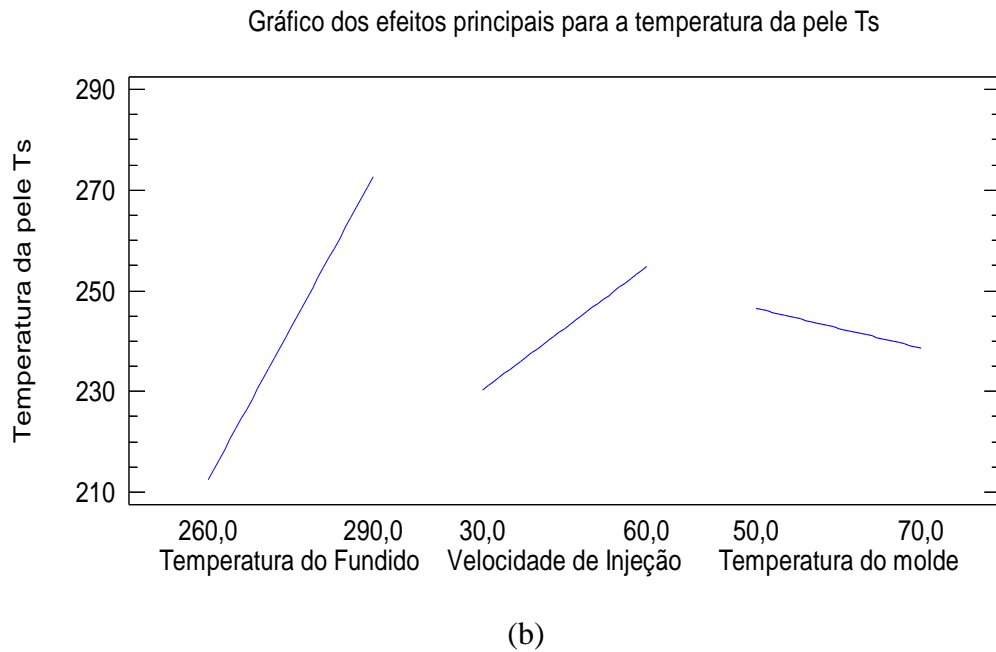
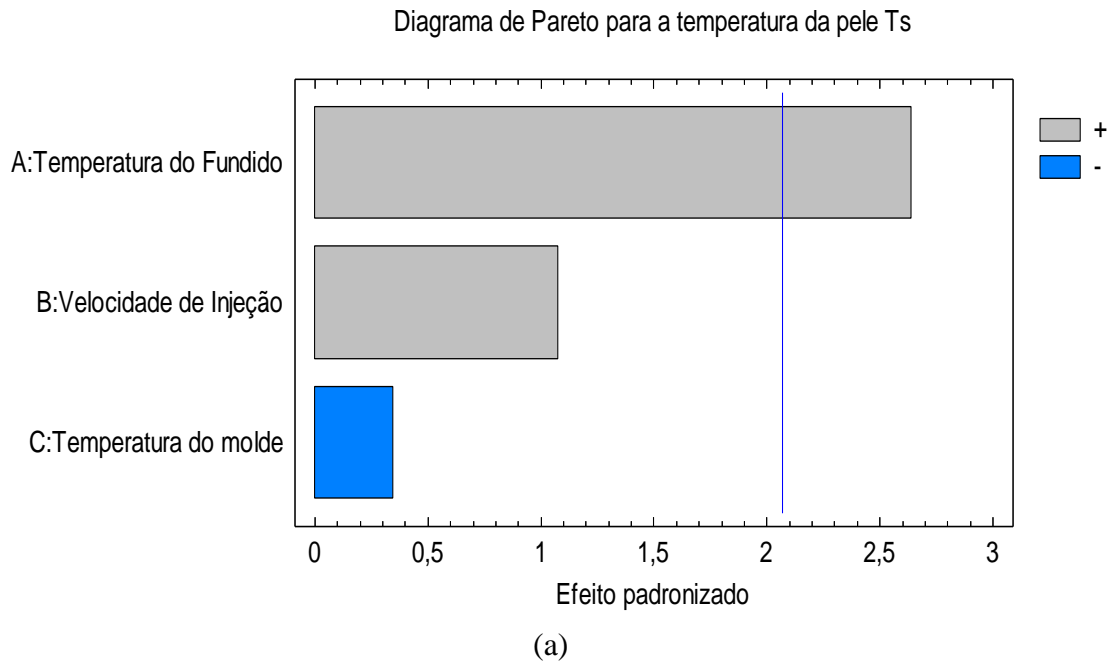
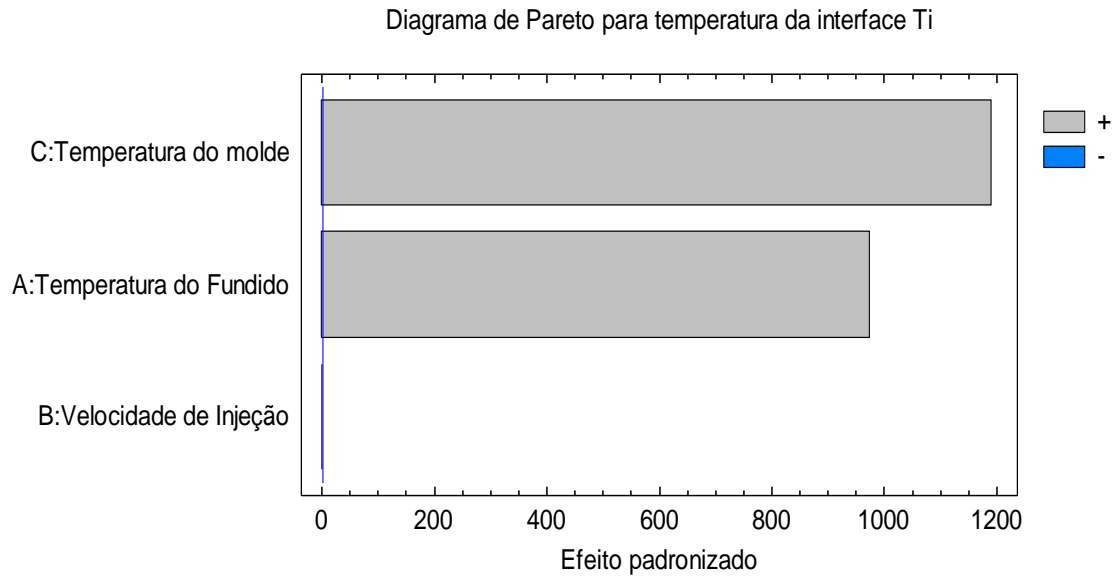
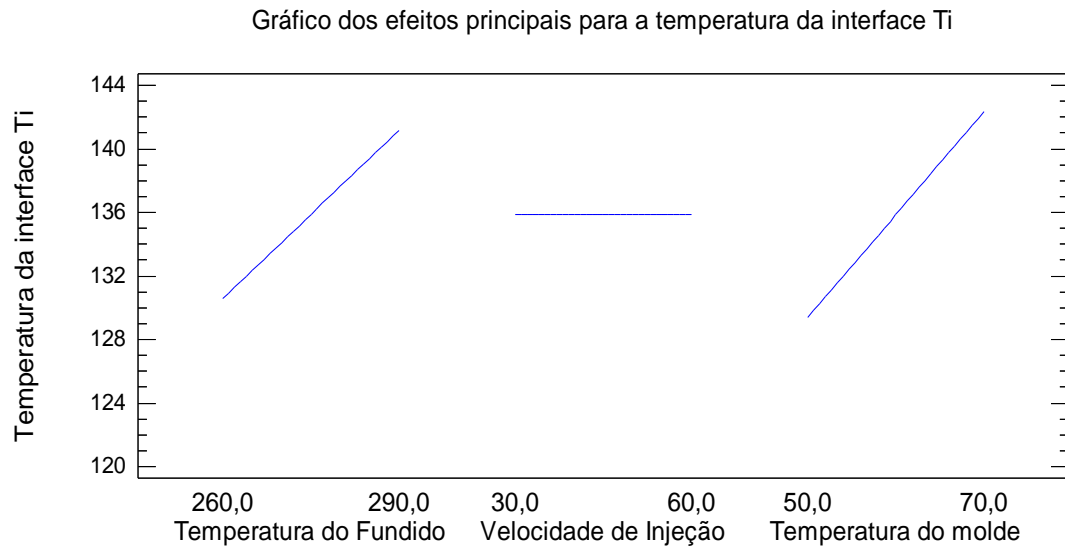


Figura 4.12 - Diagramas de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas (a) e gráficos dos efeitos das variáveis (b) de processamento sobre as temperaturas da pele (T_s) obtidas nas simulações referentes ao experimento fatorial PC+ABS.



(a)



(b)

Figura 4.13 - Diagramas de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas (a) e gráficos dos efeitos das variáveis (b) de processamento sobre as temperaturas da interface (T_i), entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato, obtidas por meio das simulações referentes ao experimento fatorial PC+ABS.

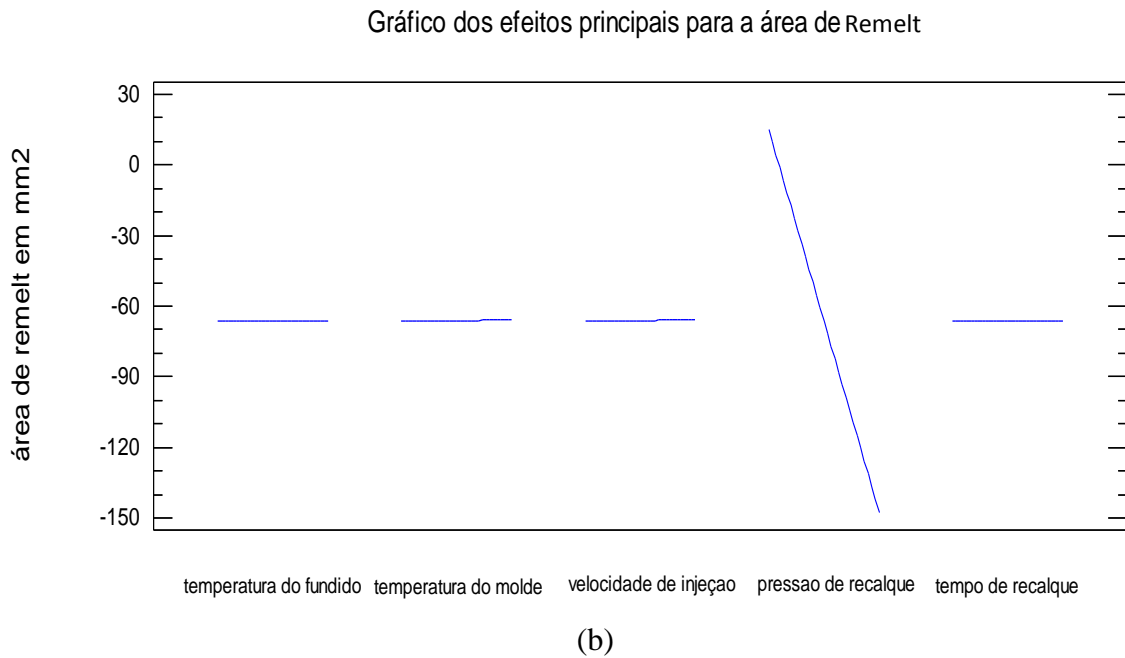
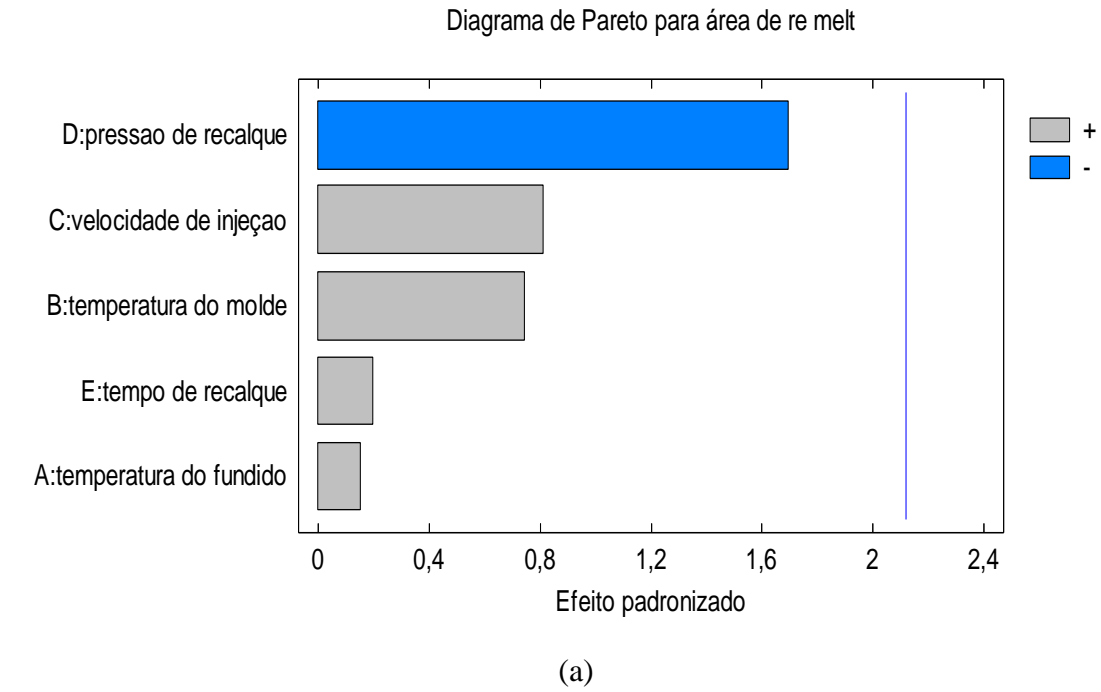


Figura 4.14 - Diagramas de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas (a) e gráficos dos efeitos das variáveis (b) de processamento sobre as dimensões das áreas de “amolecimento” (A_{remelt}), obtidas nas simulações referentes ao experimento fatorial PC+ABS.

Já os resultados da análise estatística sobre os efeitos das macrovariáveis de processo nos índices térmicos estão sumarizados no diagrama de Pareto e no gráfico dos efeitos das variáveis apresentados na Figura 4.15, onde podem ser observadas as variáveis que exercem efeitos significativos sobre os índices térmicos.

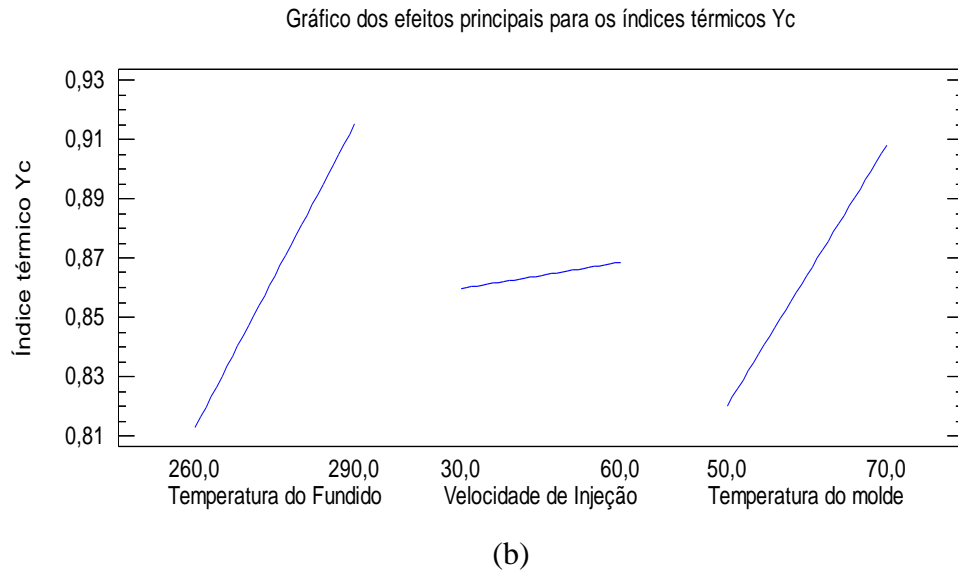
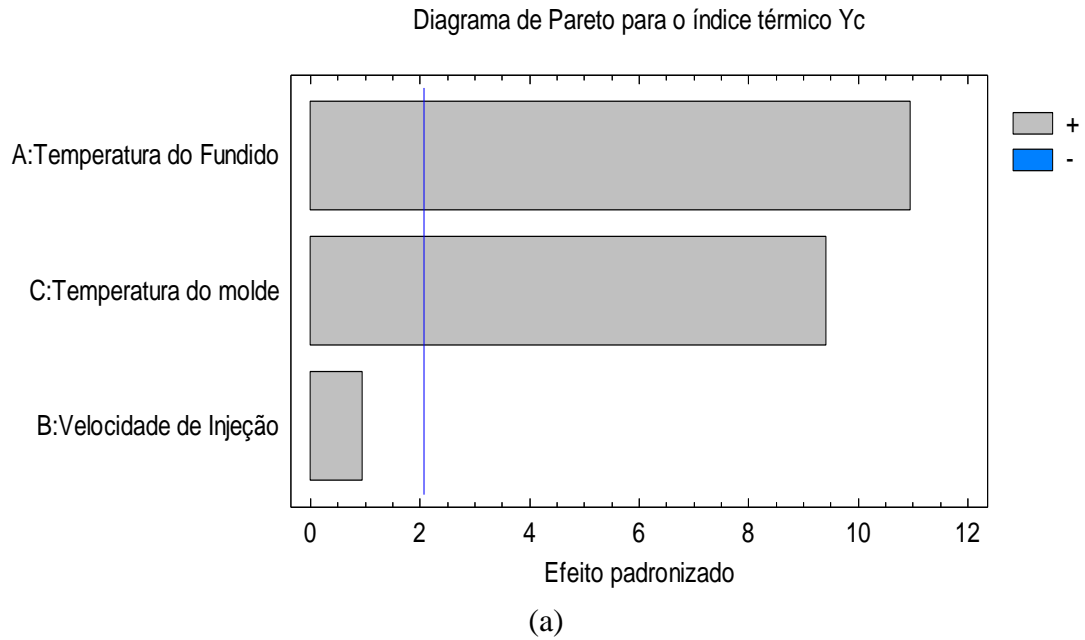


Figura 4.15 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas nos resultados dos índices térmicos do núcleo calculados a partir das condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental fatorial completo PC+ABS.

Discussão dos Resultados Obtidos

Analisando os gráficos das Figuras 4.11 e 4.14 observa-se que o comportamento para a temperatura de massa, temperatura da interface e área de *remelt* mostra os mesmos resultados obtidos no experimento *screening*, ou seja, estas variáveis são influenciadas de forma análoga pelos parâmetros de processo.

Contudo, foi observada uma diferença nos resultados da análise estatística referente aos efeitos dos parâmetros do processo na temperatura média da pele. Diferentemente dos demais resultados, aqui a temperatura do molde não exerceu qualquer efeito significativo. Uma provável explicação para este fenômeno é o fato da variação dos níveis da temperatura do molde, para este experimento, ser inferior aos demais experimentos (*screening* e fatorial completo SAN/ABS). Pode-se observar, de acordo com as tabelas 3.7, 3.9 e 3.10, que os níveis da variável temperatura do molde para os experimentos *screening* e fatorial completo SAN/ABS é de 30 °C, enquanto para o procedimento fatorial completo PC/ABS esta mesma variação foi de 20 °C. Desta forma, a variação dos níveis da temperatura do molde para o experimento fatorial completo PC/ABS, pode ter sido insuficiente para produzir efeitos estatisticamente significativos na temperatura da pele do policarbonato.

De forma semelhante aos resultados obtidos de acordo com o procedimento experimental *screening*, a análise estatística dos resultados dos índices térmicos para o experimento fatorial completo PC/ABS apresentou como variáveis significativas a temperatura do fundido e do molde, valendo aqui as mesmas considerações feitas naquele experimento para as causas de tal comportamento.

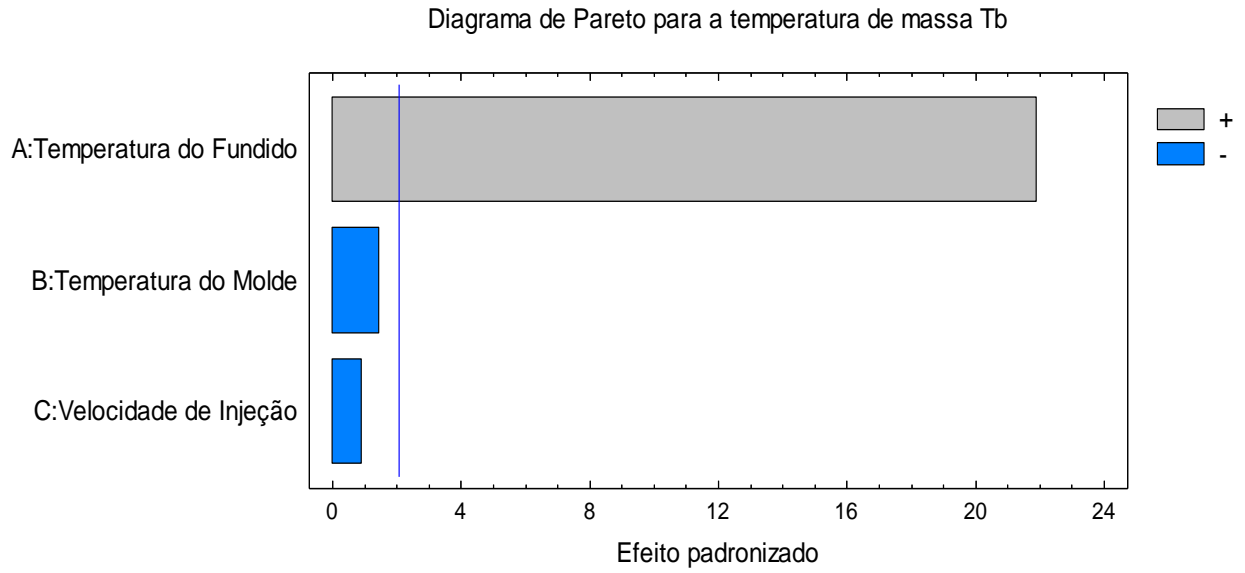
4.1.3 Resultados e Discussões Referentes às Simulações do Experimento Fatorial SAN+ABS

Semelhantemente aos experimentos anteriores, são apresentados na tabela 4.3 os parâmetros do preenchimento resultantes das simulações do processo de sobreinjeção, bem como, os valores calculados para os índices térmicos para o experimento fatorial SAN/ABS.

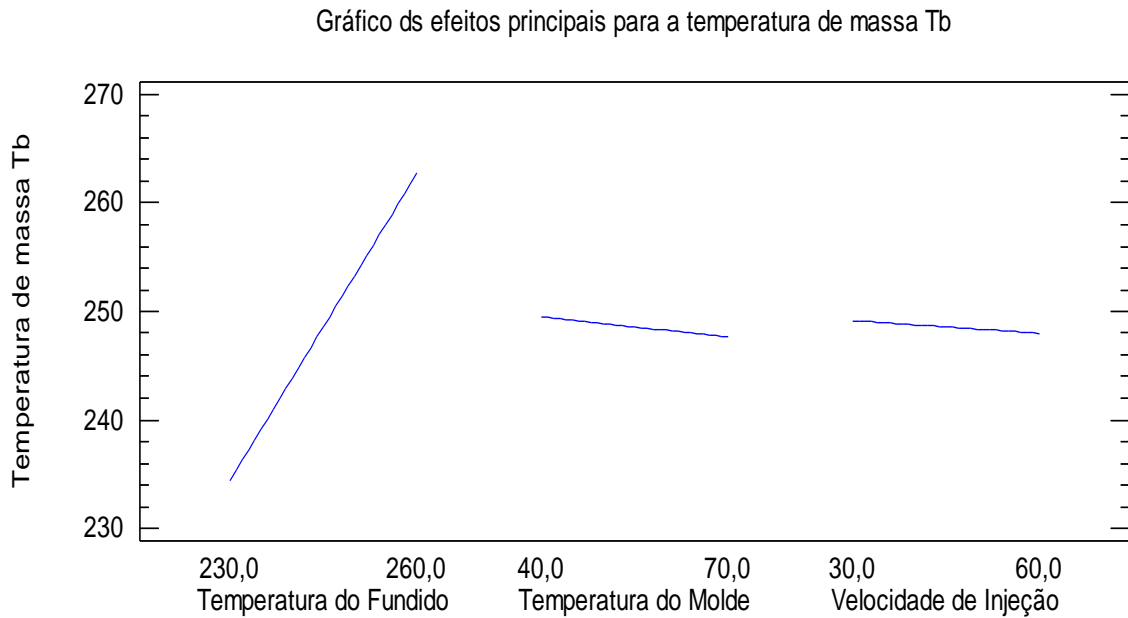
Da mesma forma são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 4.16 a 4.19 os diagramas de Pareto e gráficos dos efeitos das variáveis para T_b , T_s , T_i e A_{remelt} , e na Figura 4.9 os mesmos gráficos resultantes da análise estatística dos índices térmicos calculados.

Tabela 4.3- Dados resultantes das simulações em Moldflow e índices térmicos calculados referentes ao experimento fatorial completo SAN+ABS.

Código das condições experimentais	Resultados da simulação			Temperatura da interface e Índices térmicos	
	T_b (°C)	A_{remelt} (mm ²)	T_s (°C)	T_i (°C)	Y_c
LML	234,8	35,3	189,5	116,7	1,12
LLH	235,5	37,0	197,7	107,0	1,03
HHH	263,5	45,5	207,7	137,0	1,27
HMH	263,6	43,6	205,1	127,3	1,18
MLL	248,8	48,5	196,0	112,3	1,07
HLM	263,3	49,6	188,9	117,6	1,10
LLM	235,1	50,8	191,9	107,0	1,03
HHM	263,2	50,6	199,1	137,0	1,27
MMH	249,4	49,8	194,2	122,0	1,15
HLL	263,0	47,6	205,6	117,6	1,10
MML	248,8	49,5	198,9	122,0	1,15
LLL	234,9	49,8	184,5	107,0	1,03
HMM	263,3	50,0	217,1	127,3	1,18
MLM	249,2	49,4	202,7	112,3	1,07
MMM	249,1	50,2	206,0	122,0	1,15
HML	262,9	52,4	209,5	127,3	1,18
HLH	263,7	53,5	199,0	117,6	1,10
MLH	249,5	46,2	188,2	112,3	1,07
LHH	233,6	49,5	203,6	126,4	1,22
LHL	234,8	49,4	193,4	126,4	1,22
HHL	262,9	49,9	211,6	137,0	1,27
LMH	235,6	49,8	200,8	116,7	1,12
LMM	235,1	51,0	195,4	116,7	1,12
MHM	249,1	51,8	207,0	131,7	1,25
MHL	248,8	54,1	199,2	131,7	1,25
LHM	235,2	54,1	193,9	126,4	1,22
MHH	235,0	54,3	204,4	131,7	1,3

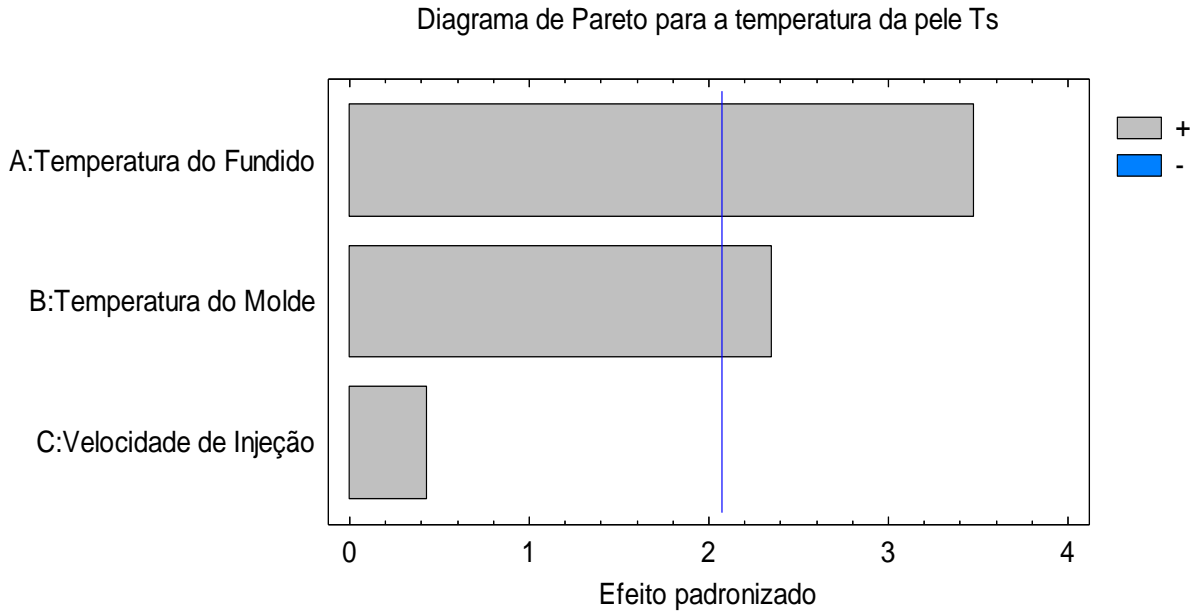


(a)

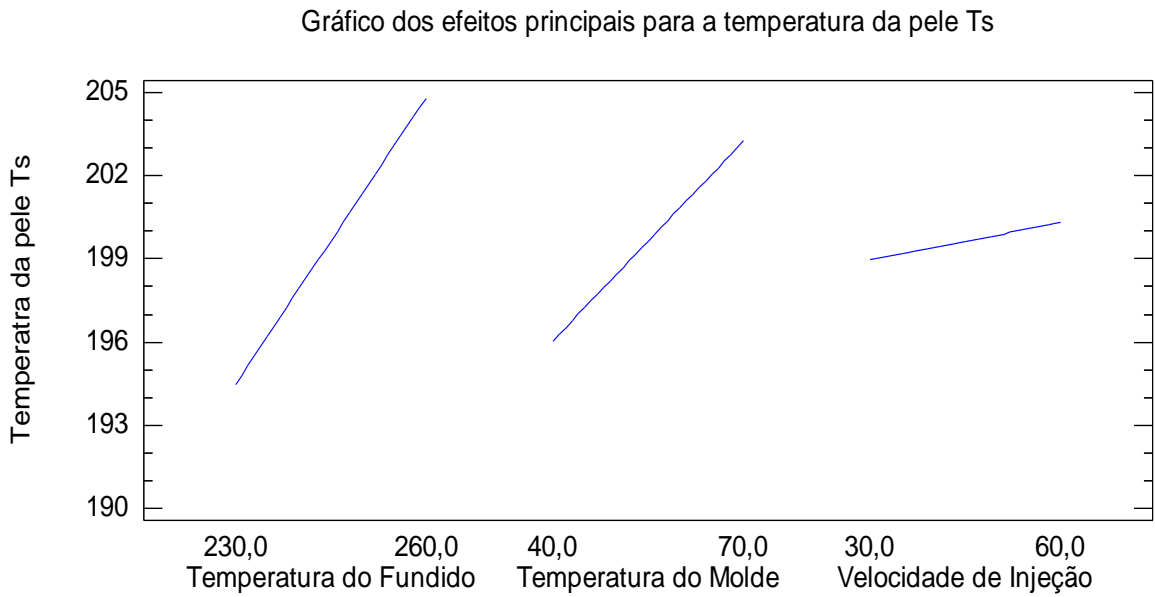


(b)

Figura 4.16 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráficos dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação a temperatura de massa (T_b), referentes ao experimento fatorial SAN+ABS.



(a)



(b)

Figura 4.17 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas sobre e gráficos dos efeitos das macrovariáveis de processamento a variação a temperatura da pele (T_s), referentes ao experimento fatorial SAN+ABS.

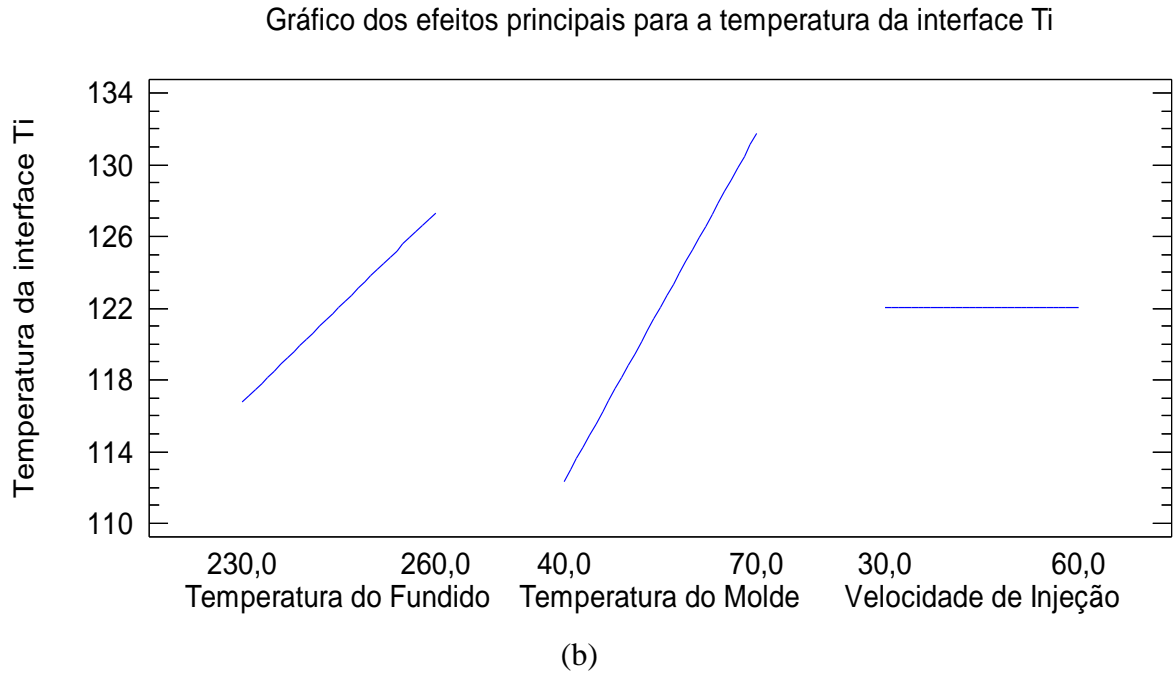
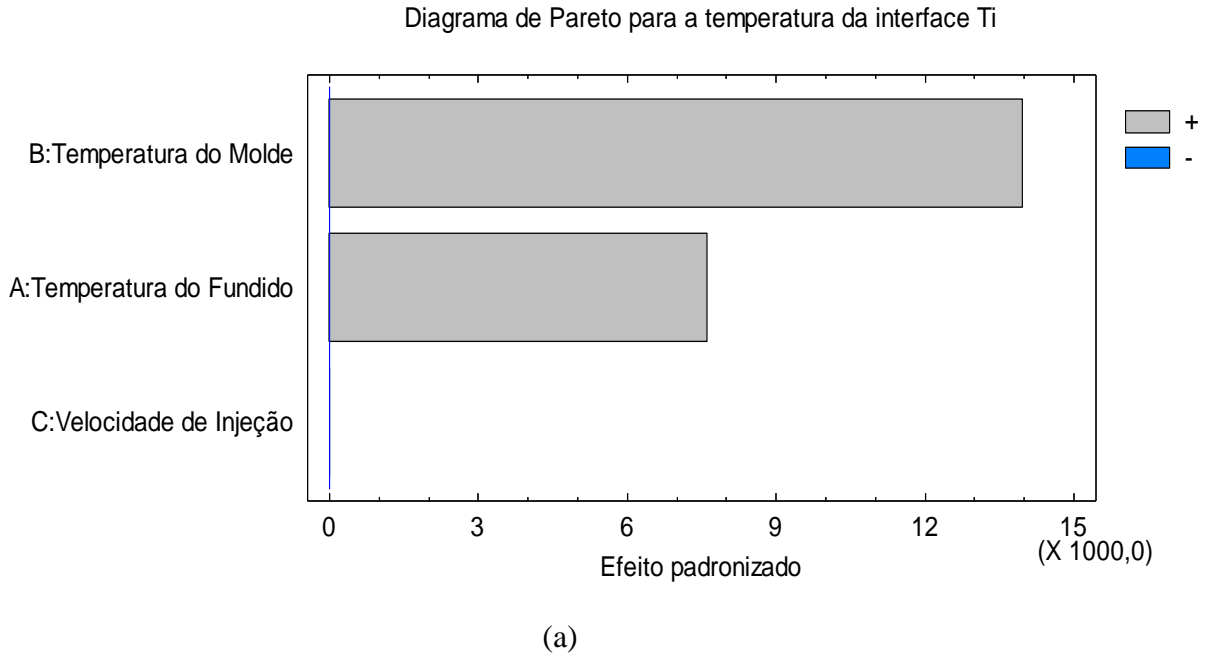


Figura 4.18 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráficos dos efeitos das macrovariáveis de processamento, sobre a variação a temperatura da interface (T_i), referentes ao experimento fatorial SAN+ABS.

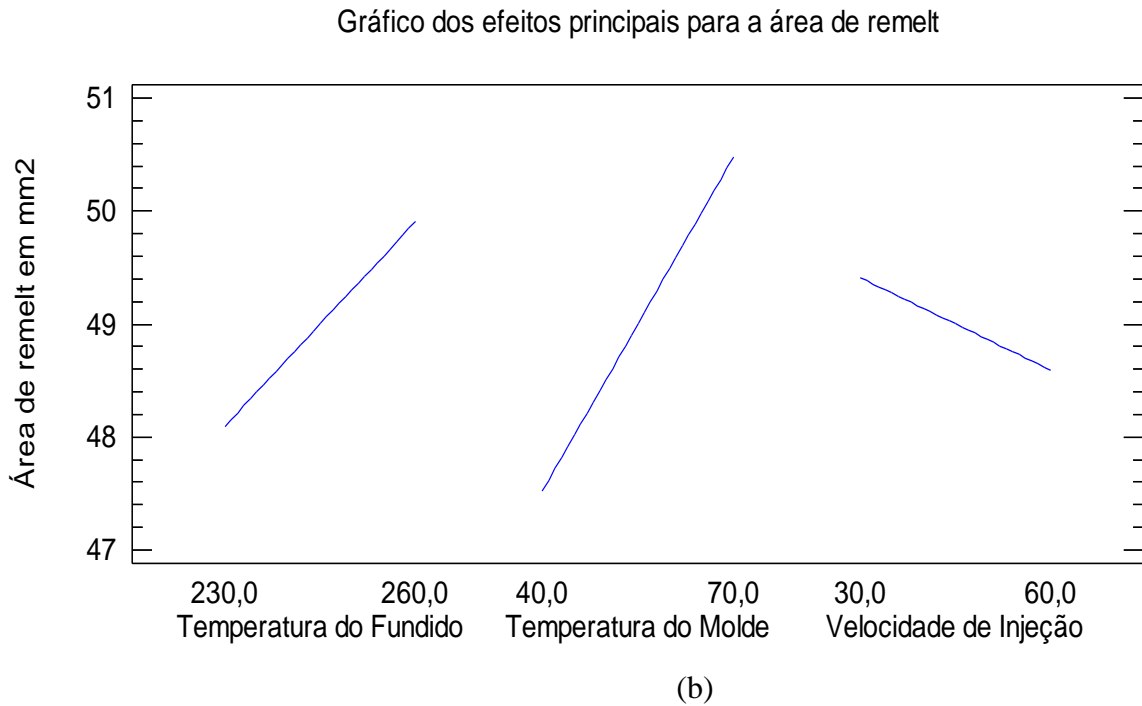
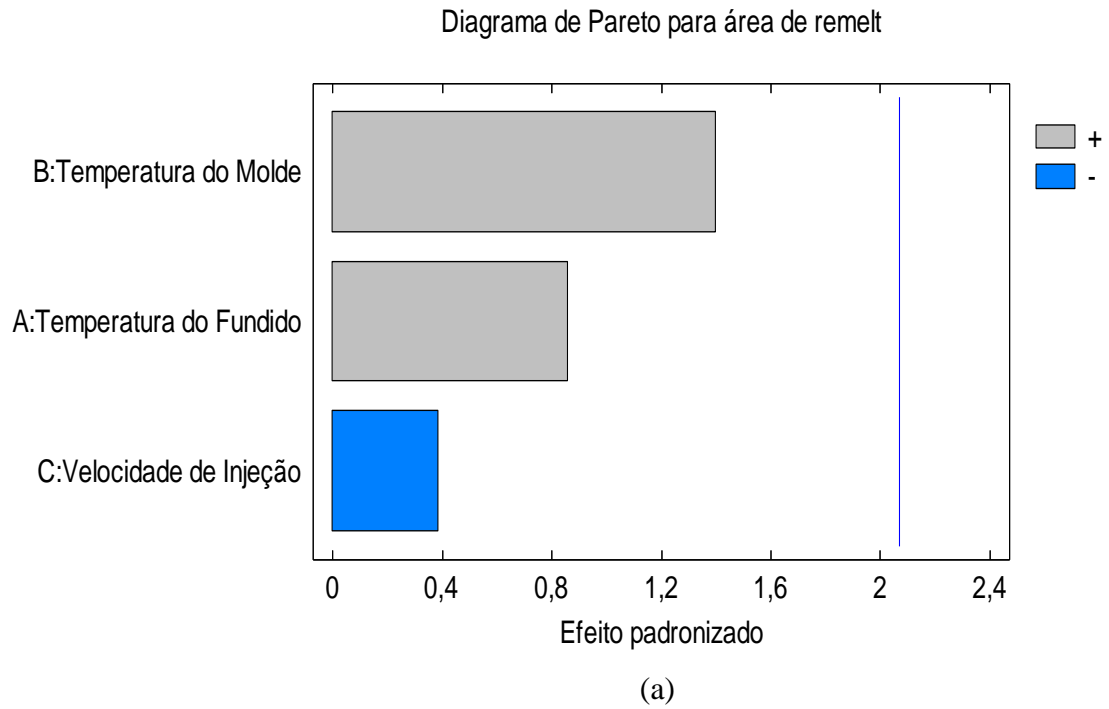
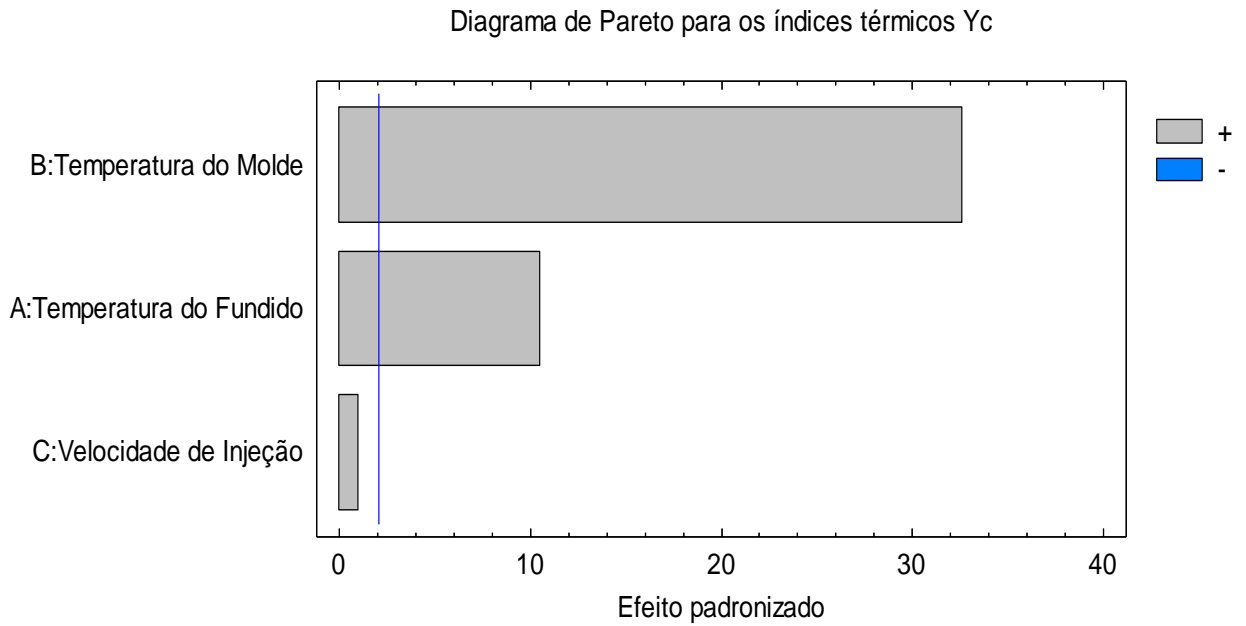
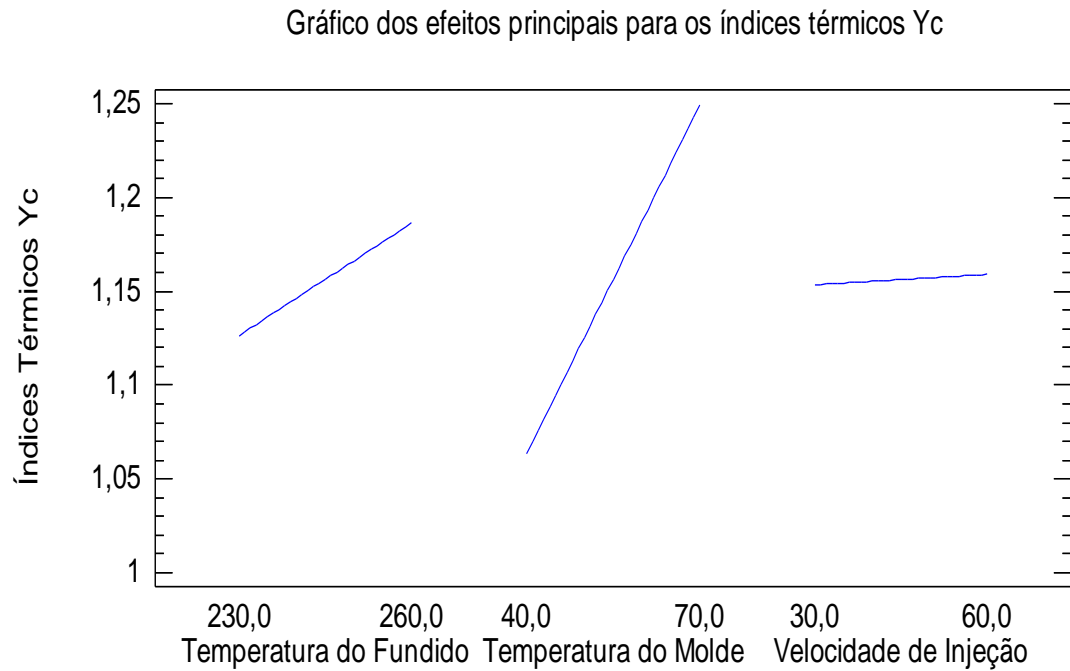


Figura 4.19 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas e gráficos dos efeitos das macrovariáveis de processamento sobre a variação das dimensões da área de “amolecimento” (A_{remelt}), referentes ao experimento fatorial SAN+ABS.



(a)



(b)

Figura 4.20 - Diagrama de Pareto para a determinação das variáveis estatisticamente significativas nos resultados dos índices térmicos calculados a partir das condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental fatorial completo SAN+ABS.

Discussão dos Resultados Obtidos

Por meio de uma análise dos resultados apresentados, pode-se observar que estes se mostram coerentes com os obtidos nos experimentos anteriores demonstrando as mesmas tendências de comportamento das variáveis de processo, tanto nos parâmetros de escoamento obtidos diretamente do Moldflow, quanto nos índices térmicos calculados a partir destes parâmetros. Portanto, é possível considerar as mesmas justificativas e considerações feitas para os resultados das análises segundo o procedimento experimental *screening* e fatorial completo SAN/ABS.

Contudo, uma ressalva deve ser feita quanto às causas dos efeitos das variáveis de processo não exercerem influências estatisticamente significativas nos valores das áreas de *remelt*. No item relacionado às discussões sobre os resultados dos experimentos anteriores, mencionou-se que o fato de nenhuma das variáveis exercer qualquer efeito significativo era devido ao fato das temperaturas, apesar de influenciarem significativamente os índices térmicos, atingirem valores acima da temperatura de amolecimento Vicat do ABS em todas as condições experimentais simuladas no Moldflow, produzindo o amolecimento de praticamente toda a área de união do inserto com o componente produzido por sobreinjeção. Já no experimento fatorial SAN/ABS ocorreu o inverso, ou seja, as temperaturas na região referida atingiram valores em sua maioria que são inferiores à temperatura de amolecimento Vicat do ABS utilizado, produzindo, portanto, áreas de remelt muito pequenas e com variações não significativas.

4.2 Investigação dos Efeitos das Macrovariáveis de Processamento sobre a Força de Adesão entre os Insertos de ABS e os Componentes Sobreinjetados

Nesta seção, são apresentados os resultados relativos aos ensaios de tração realizados nos corpos de prova produzidos segundo os delineamentos estatísticos, propostos e apresentados anteriormente neste trabalho. Assim, para uma melhor compreensão, os resultados e suas discussões são apresentados de acordo com a seguinte subdivisão:

- Investigação da influência das macrovariáveis do processo na adesão por meio de ensaios de tração dos corpos de prova obtidos segundo o procedimento experimental *screening*;
- Investigação da influência das macrovariáveis do processo na adesão por meio de ensaios de tração dos corpos de prova obtidos segundo o projeto experimental fatorial PC/ABS;

- Investigação da influência das macrovariáveis do processo na adesão por meio de ensaio de tração dos corpos de prova obtidos segundo o projeto experimental fatorial SAN/ABS.

4.2.1 - Influência das Macrovariáveis do Processo na Adesão por Meio de Ensaio de Tração dos Corpos de Prova Obtidos Segundo o Procedimento Experimental *Screening*

Segundo o exposto no capítulo de materiais e métodos, o presente experimento teve como objetivo principal o de identificar as macrovariáveis de processamento que influenciaram de maneira estatisticamente significativa nos valores de força de adesão, entre os componentes dos corpos de prova, por meio de ensaios de tração.

A partir da análise estatística dos valores de força de tração, foi possível a determinação das variáveis que exerceram a referida influência, possibilitando a exclusão daquelas variáveis que não exerceram tais efeitos. Desta forma, foi possível reduzir o experimento inicial de cinco variáveis, o qual geraria um projeto experimental fatorial de 5^3 , ou seja, 125 condições experimentais para cada polímero sobreinjetado, para experimentos 3^3 resultando em 27 condições experimentais, reduzindo desta forma o número total de ensaios necessários.

Na tabela 4.4 são apresentados, portanto, os valores médios das forças de ruptura e dos módulos de elasticidade resultantes dos ensaios de tração para os corpos produzidos por sobreinjeção segundo cada condição determinada no delineamento experimental *screening*. Como mencionado anteriormente, os corpos de prova foram submetidos a um esforço de tração em uma máquina de ensaios universal com uma velocidade de carregamento de 1 mm/min até sua ruptura completa, representada pela separação entre o inserto e o componente sobreinjetado.

Devido à forma do corpo de prova mostrado nas Figuras 3.5 e 3.6, não foi possível a fixação de um extensômetro e, portanto, os resultados do módulo de elasticidade não puderam ser calculados por intermédio do próprio *software* de controle da máquina de ensaios universal.

Para contornar este problema, utilizou-se o *software Origin Pro 8* para o cálculo dos módulos de elasticidade de cada corpo de prova ensaiado, a partir da importação dos dados numéricos de tensão versus deformação gerados pela máquina de ensaios, e derivação das curvas tensão versus deformação resultantes destes dados importados.

Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova referentes ao procedimento experimental *screening*.

Condição	Código do experimento screening	Resultados dos Ensaios	
		Média das forças de tração (N)	Média dos Módulos de elasticidade (MPa)
C1	MMMMM	302,6	943,8
C2	LLLHL	109,5	901,9
C3	MMMMM	343,5	891,7
C4	LLHHH	214,4	963,9
C5	MMMMM	347,4	893,1
C6	HHHHH	330,3	1015,1
C7	LLLLH	178,4	941,7
C8	LHHLH	203,1	859,6
C9	LHLLL	193,5	885,8
C10	LMHLL	138,9	819,6
C11	HLLLH	271,5	873,1
C12	HHHLL	171,2	808,0
C13	LHLHH	228,5	1037,9
C14	LHHHH	182,2	816,0
C15	HHLHL	231,6	924,0
C16	HLHLH	345,4	803,2
C17	MMMMM	353,5	897,3
C18	MMMMM	425,56	903,7
C19	HLLHH	377,2	971,0
C20	HLHHL	515,5	870,0
C21	MMMMM	442,4	883,5
C22	HLLLL	217,0	807,4

Na Figura 4.21, são apresentados os valores médios das forças de ruptura dos corpos de prova, juntamente com as barras de erro para cada condição experimental segundo as quais os mesmos foram obtidos.

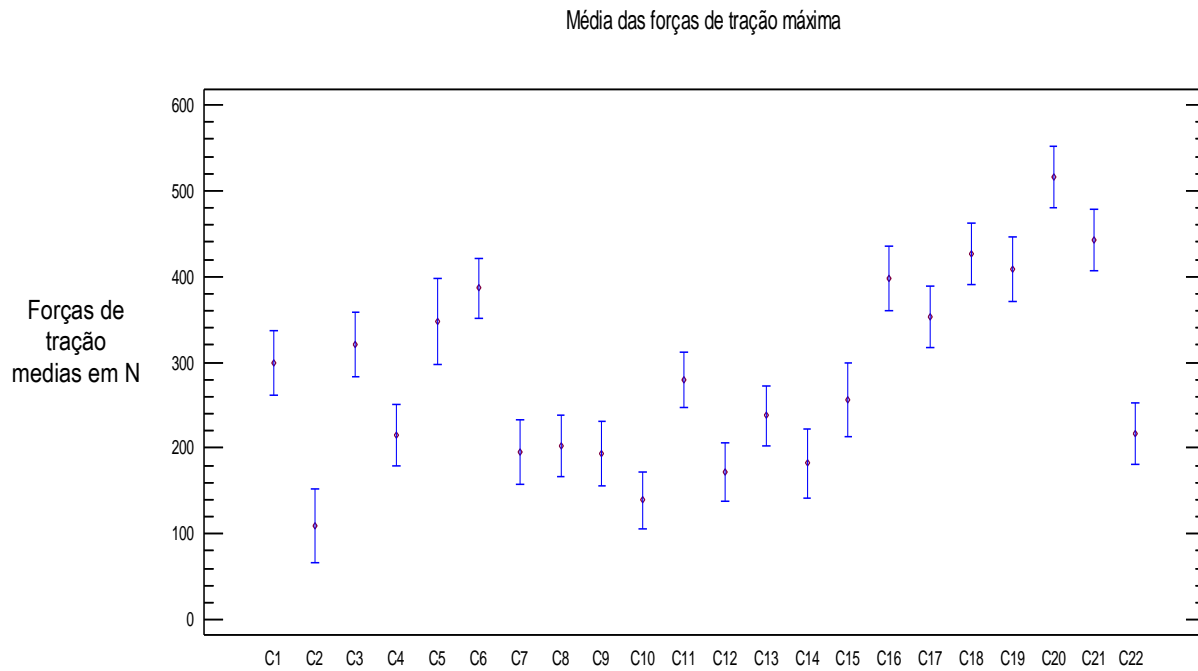


Figura 4.21 - Valores médios randomizados dos ensaios de tração segundo as condições experimentais determinadas no experimento *Screening*.

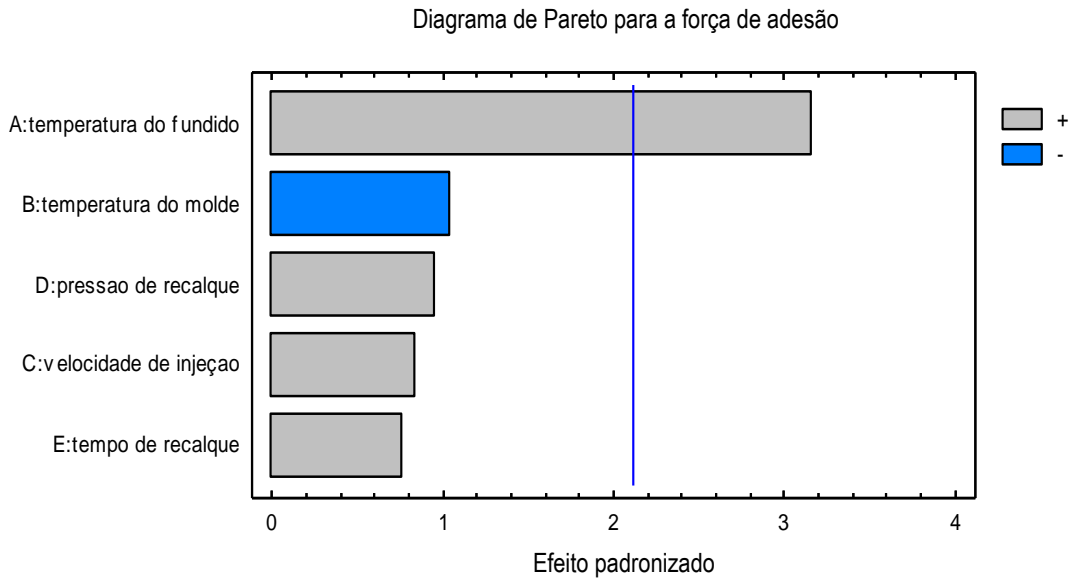
Discussão dos Resultados Obtidos

Na Figura 4.22 apresenta-se o resultado da análise do experimento *screening* para a força de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados em PC. Nesta Figura é mostrado o diagrama de Pareto evidenciando as cinco variáveis de processo examinadas, podendo-se observar também quais destas variáveis exerce um efeito significativo na força de adesão entre os componentes do corpo de provas.

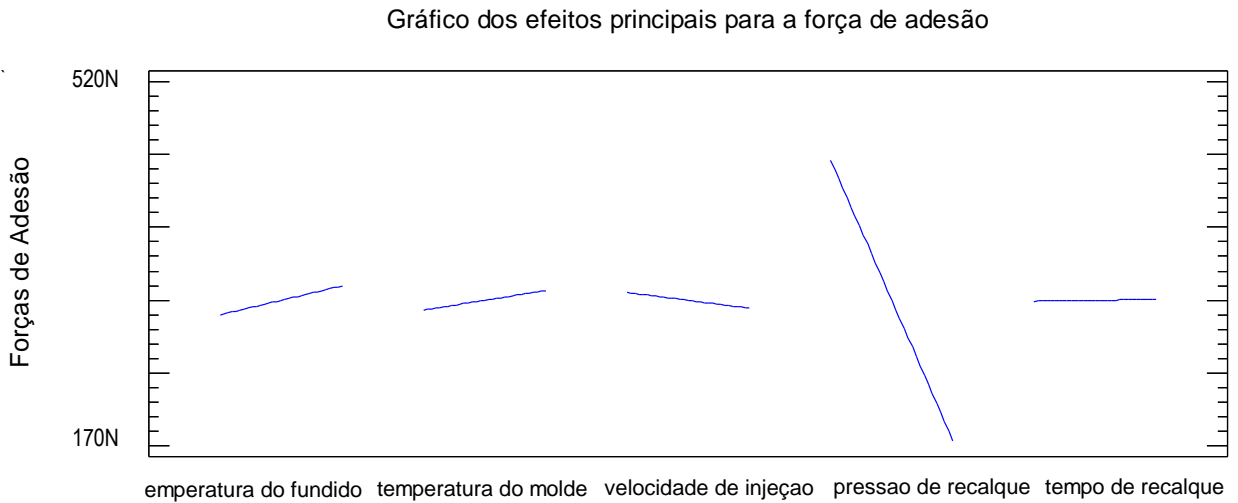
Como pode ser observado na Figura 4.22 b, são apresentadas também as curvas que relacionam o nível das variáveis de processamento e os respectivos valores de força de adesão obtidos nos ensaios de tração. A partir destas curvas pode-se inferir como cada variável atuou sobre a força de adesão, determinando um comportamento crescente ou decrescente das curvas, com o aumento do valor numérico dos níveis das variáveis de processo investigadas.

Da análise da Figura pode-se observar que a única variável a influenciar significativamente a força de adesão é a temperatura de processamento, ou fundido, do policarbonato utilizada no processo de sobreinjeção. Fica bastante evidente também, que as demais variáveis, segundo este

experimento, não exercem qualquer contribuição significativa para o aumento ou redução da força de adesão.



(a)



(b)

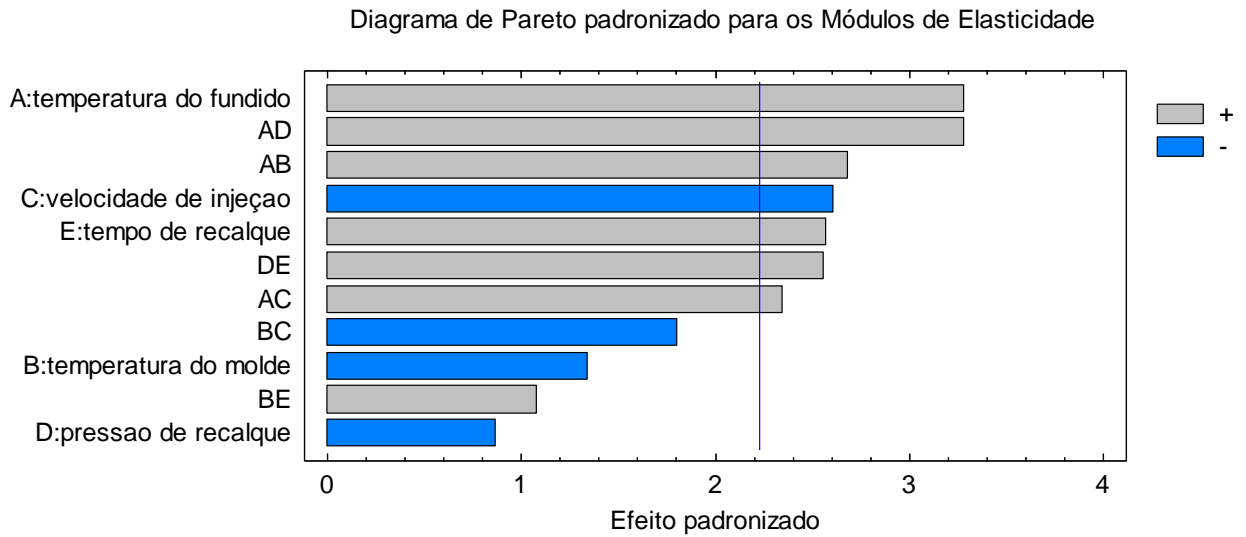
Figura 4.22 - Diagrama de Pareto (a) e gráfico dos efeitos dos parâmetros (b) para a determinação das variáveis estatisticamente significativas sobre os resultados das forças de adesão obtidas por meio de ensaio de tração a partir das condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental *screening*.

Contudo, optou-se por utilizar nos experimentos fatoriais realizados subsequentemente, as variáveis temperatura do fundido, que se mostrou significativa na alteração da força de adesão, bem como na alteração da área de “amolecimento” (*remelt*), nos índices térmicos, na temperatura média da pele bem como na temperatura de massa do fundido, assim como a temperatura do molde, que da mesma forma que a temperatura do fundido afetou significativamente os mesmos parâmetros do escoamento.

No entanto, mesmo não aparecendo como variável significativa nos experimentos realizados, a velocidade de injeção, por ser um parâmetro do processo que geralmente produz alterações na temperatura do polímero, em função dos efeitos de dissipação viscosa, fato que pode ser demonstrado por meio de simulações do processo de injeção, além de estar também apoiado por estudos anteriores (CANDAL *et al.*, 2008), foi utilizada como variável a ser investigada nos experimentos fatoriais, tanto na sobreinjeção com policarbonato como na sobreinjeção com estireno acrilonitrila.

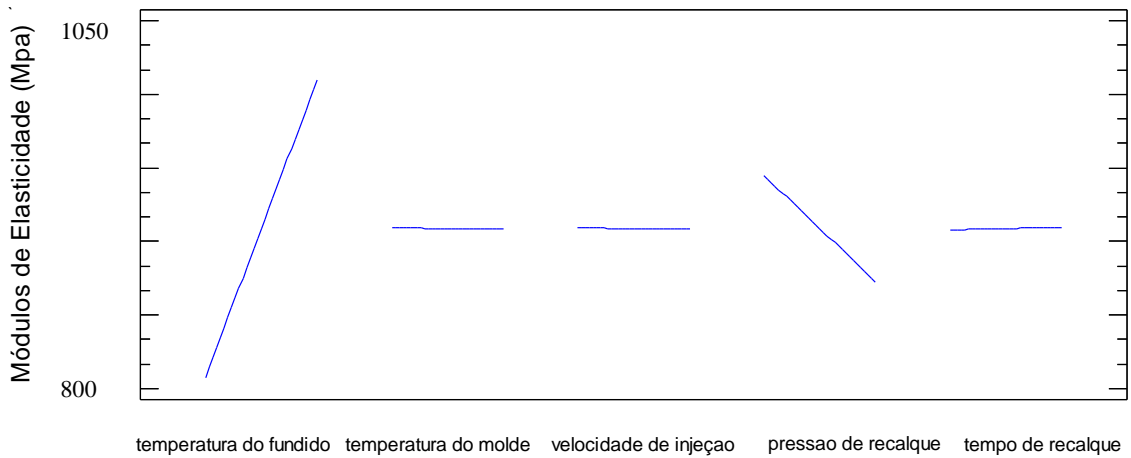
Ainda sobre as propriedades mecânicas investigadas no experimento *screening*, são exibidos no diagrama de Pareto da Figura 4.23 as variáveis que exerceram efeitos significativos nos módulos de elasticidade calculados para os ensaios de tração. Desta forma, observa-se que para o experimento *screening* foram estatisticamente significativos os fatores pressão de recalque, velocidade de injeção e temperatura do molde. Além disso, pode ser observado também na Figura 4.23, onde são apresentadas as relações entre os fatores e os módulos de elasticidade, que os efeitos das variáveis temperatura do molde e velocidade de injeção foram negativos, ou seja, maiores níveis das variáveis velocidade de injeção e temperatura do molde produziram uma diminuição do módulo de elasticidade, enquanto o aumento da pressão de recalque produziu o aumento dos módulos de elasticidade.

Porém, como o efeito principal a ser investigado neste trabalho foi a força de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados, não foi considerado como fator a ser investigado nos experimentos fatoriais a pressão de recalque, mesmo que esta tenha exercido influência no módulo de elasticidade como demonstrado pelo diagrama de Pareto da Figura 4.23, já que este efeito (módulo de elasticidade), não é fundamental para o entendimento do comportamento da adesão no processo de sobreinjeção.



(a)

Gráficos dos efeitos principais para os Módulos de Elasticidade



(b)

Figura 4.23 - Diagrama de Pareto (a) para a análise dos efeitos das variáveis de processo sobre o *módulo de elasticidade* e gráfico dos efeitos principais (b) para a correlação entre as variáveis analisadas e os módulos de elasticidade calculados a partir dos resultados dos ensaios de tração referentes ao procedimento experimental *screening*.

Como resultados dos ensaios do experimento *screening* foram observados os seguintes aspectos principais:

- A variável que influenciou de forma estatisticamente significativa na força de adesão foi a temperatura do fundido, o que está de acordo com a revisão bibliográfica apresentada (CARELLA et al, 2002), pois o mecanismo de adesão por interdifusão, que é o provável efeito governante aqui verificado, é influenciado pela temperatura em que as duas metades a serem unidas se encontram, pelo fato de aumentar a mobilidade das cadeias poliméricas e potencializar os efeitos de autodifusão que assim ocorrem.
- Dos resultados observados nas seções 4.1 e 4.2, embasados também pelas referências da literatura (CANDAL *et al.*, 2008 e CARELLA *et al.*, 2002), definiu-se como macrovariáveis a serem investigadas nos experimentos fatoriais completos a temperatura do fundido, a temperatura do molde e a velocidade de injeção como foi devidamente exposto anteriormente.
- Os resultados obtidos da análise estatística sobre os efeitos das macrovariáveis na variação dos módulos de elasticidade mostraram-se coerentes com os resultados obtidos da análise dos valores das forças de adesão. Salienta-se que, como para a força de adesão, a variável que exerceu o efeito mais significativo foi também a temperatura do fundido, reforçando a sua inclusão nos experimentos fatoriais, como forma de avaliar com mais detalhes a influência desta macrovariável na adesão entre componentes unidos pelo processo de sobreinjeção.

4.2.2 - Influência das Macrovariáveis do Processo na Adesão por Meio de Ensaios de Tração dos Corpos de Prova Obtidos Segundo o Experimento Fatorial Completo PC+ABS

Na tabela 4.5 estão listados os valores das médias das forças de tração obtidas nos ensaios e os módulos de elasticidade calculados a partir das curvas tensão versus deformação também resultantes dos ensaios de tração.

De acordo com a tabela 4.5 é apresentada na Figura 4.24 o gráfico dos valores médios das forças de tração máxima obtidos nos ensaios de tração, e na Figura 4.25 e 4.26 os diagramas de Pareto e os gráficos dos efeitos das variáveis sobre a força de tração e módulos de elasticidade, resultantes da análise estatística destes dados. Nelas pode-se observar o efeito dos tratamentos (condições de processamento) utilizados para a moldagem dos corpos de prova, indicado pela variação dos valores médios de força de tração e módulo de elasticidade.

Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova referentes ao procedimento experimental fatorial completo PC+ABS.

Condição	Código do experimento fatorial	Resultados dos Ensaios	
		Média das forças de tração	Média dos Módulos de elasticidade
		(N)	(MPa)
C1	MLM	130,4	139,4
C2	MLL	141,7	152,5
C3	HMM	127,6	140,3
C4	MML	138,6	134,8
C5	MMM	148,3	128,1
C6	MHL	152,5	133,8
C7	LHL	122,2	136,2
C8	HHH	222,9	136,5
C9	LLL	122,8	107,44
C10	LML	148,2	97,5
C11	LHM	113,0	114,6
C12	LLM	97,1	120,5
C13	HHM	206,8	114,0
C14	LMH	100,5	129,8
C15	LMM	82,4	114,7
C16	HHL	197,5	116,0
C17	MHM	133,9	119,0
C18	MLM	113,0	122,6
C19	HLM	198,0	102,5
C20	HML	138,9	85,8
C21	HLL	164,9	118,1
C22	MMM	190,4	108,5
C23	MHH	177,0	103,6
C24	LLM	108,3	117,7
C25	HMH	181,3	137,0
C26	HLH	140,3	130,5
C27	LHH	140,8	106,9

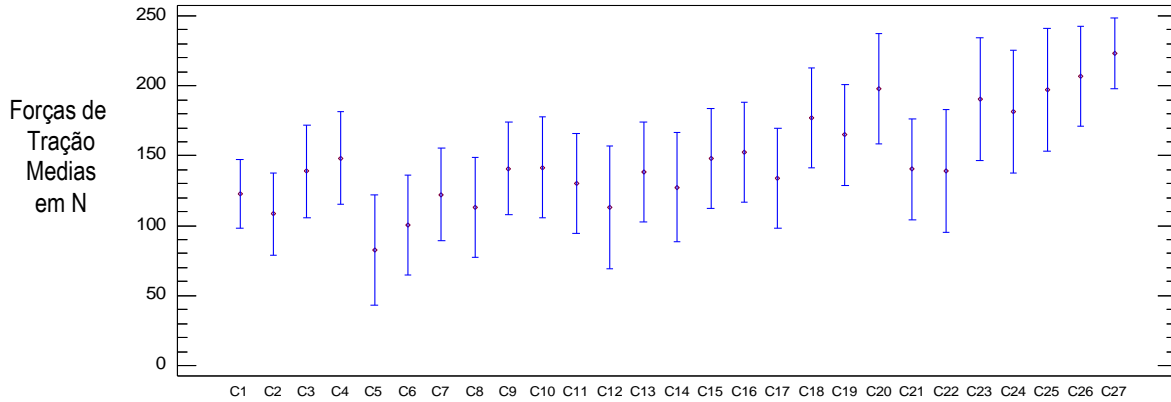
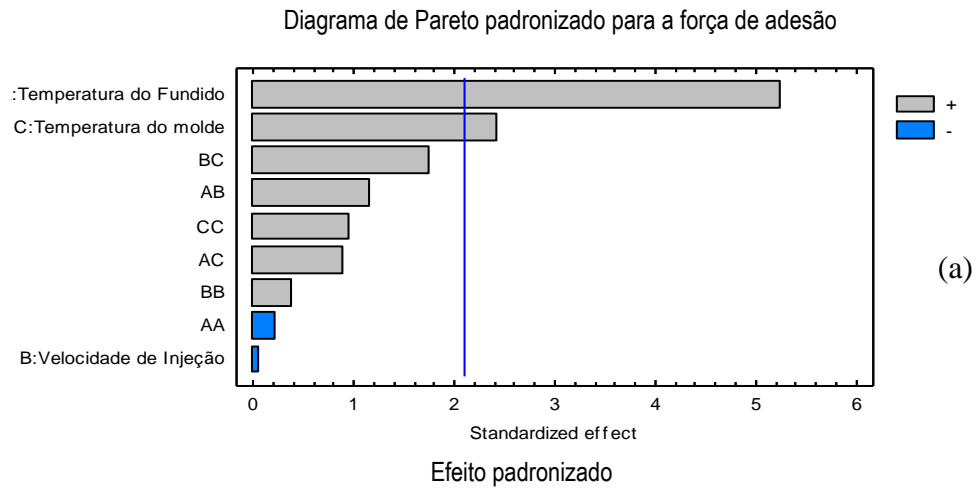
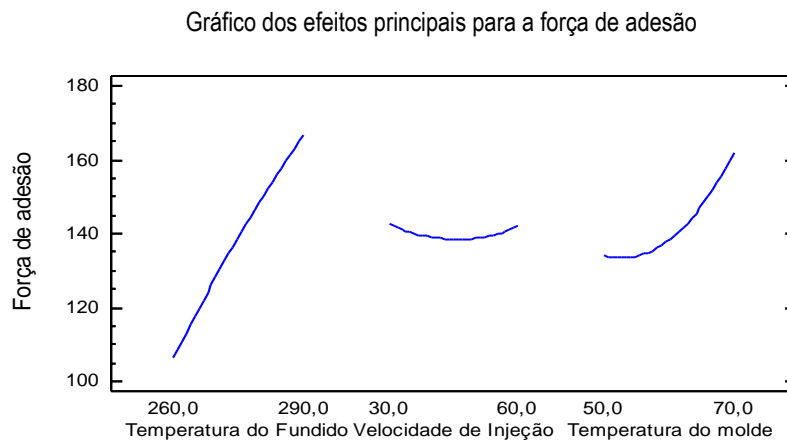


Figura 4.24 - Valores médios dos ensaios de tração para as vinte e duas condições experimentais relativo ao experimento fatorial completo PC+ABS.



(a)



(b)

Figura 4.25 - Diagrama de Pareto (a) e gráficos dos efeitos principais (b) referentes às variáveis que exercem efeitos estatisticamente significativos sobre os valores das forças de tração médias dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração para o experimento fatorial completo PC+ABS.

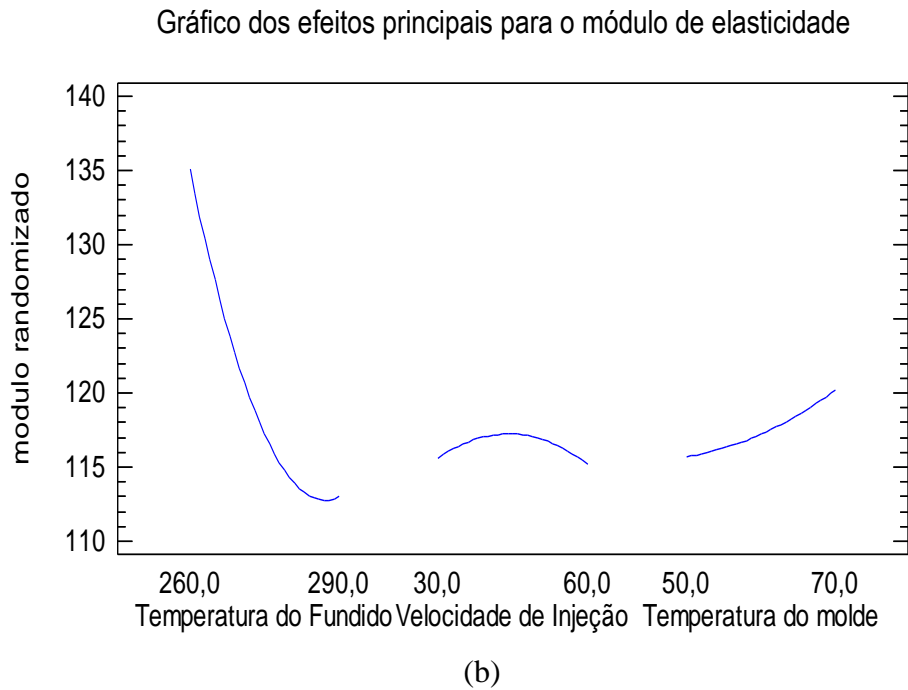
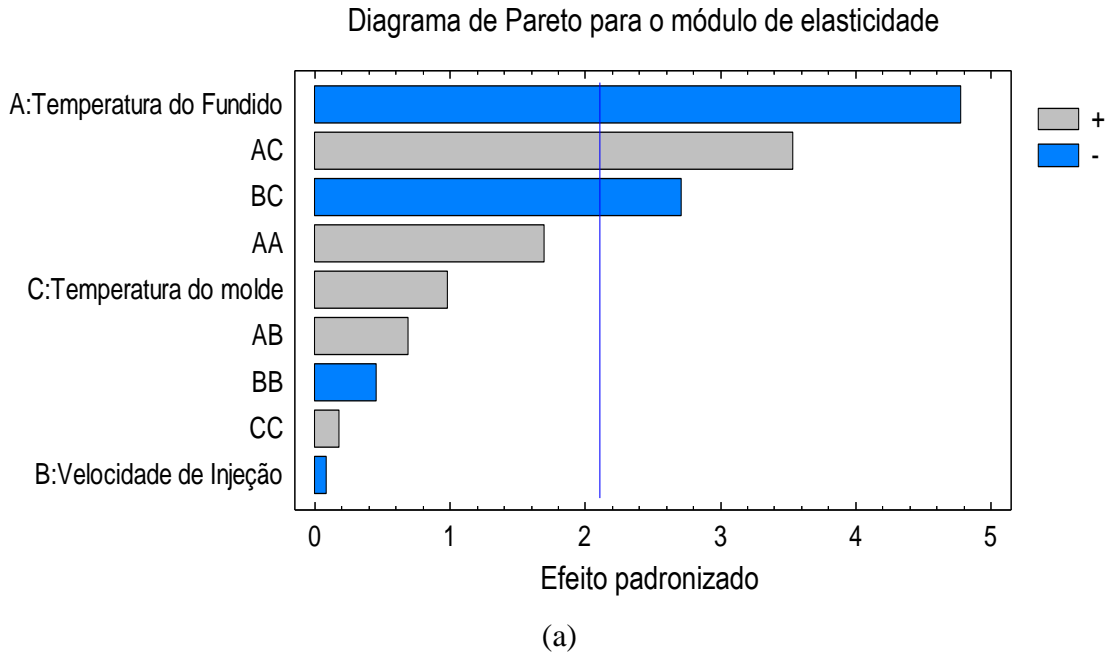


Figura 4.26 - Diagrama de Pareto (a) e gráficos dos efeitos principais (b) referentes às variáveis que exercem efeitos estatisticamente significativos sobre os valores dos módulos de elasticidade à tração dos corpos de prova submetidos aos ensaios de tração para o experimento fatorial completo PC+ABS.

Discussão dos Resultados Obtidos

A análise estatística dos dados de força média de tração indicou a existência de uma diferença significativa entre os valores médios das forças de tração (força resultante da adesão) encontradas nos ensaios.

Na Figura 4.24, contudo, os valores médios de força de tração foram organizados de acordo com o crescimento dos valores numéricos dos níveis das variáveis utilizadas nos projetos experimentais.

Pode ser observada nas Figuras uma tendência no crescimento da força necessária para a separação do inserto de ABS e dos componentes sobreinjetados, sendo a diferença e a tendência de crescimento também estatisticamente significativos, e dependentes do aumento da temperatura do molde e do fundido, como pode ser observado no diagrama de Pareto da Figura 4.25, bem como, no resumo da análise de variância apresentado na tabela 4.6, onde é possível observar que o valor P do teste estatístico F para as variáveis temperatura do molde e do fundido encontram-se abaixo de 0,05 significando que estas duas variáveis exercem efeitos significativos sobre a força de adesão avaliada neste experimento.

Tabela 4.6 – Resumo da análise de variância mediante a utilização do *software* Statgraphics Centurion.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Razão F	Valor P
A:Temperatura do Fundido	16364,9	1	16364,9	27,64	0,0001
B:Velocidade de Injeção	2,05707	1	2,05707	0,00	0,9537
C:Temperatura do molde	3476,97	1	3476,97	5,87	0,0268
AA	26,502	1	26,502	0,04	0,8350
AB	802,818	1	802,818	1,36	0,2603
AC	482,03	1	482,03	0,81	0,3795
BB	83,1123	1	83,1123	0,14	0,7126
BC	1814,2	1	1814,2	3,06	0,0981
CC	540,835	1	540,835	0,91	0,3526
Total error	10065,9	17	592,113		
Total (corr.)	33659,4	26			
R-quadrado	R-quadrado (ajustado d.f)	Erro padrão	Erro absoluto médio		
70,1	54,3	24,3	13,4		

No diagrama de Pareto da Figura 4.25 pode ser observado, como já descrito anteriormente, que as variáveis significativas, identificadas no procedimento, foram a temperatura do fundido e a

temperatura do molde. Tal resultado era em parte esperado, pois de acordo com SPERLING (2006) a influência exercida pela temperatura e por qualquer variável que a afete, causam um efeito significativo na adesão entre polímeros parcialmente miscíveis, o que é o caso deste trabalho.

A referida influência da temperatura deve-se à mobilidade das cadeias moleculares de ambos os polímeros envolvidos no processo de interdifusão, mobilidade esta que é governada basicamente pela temperatura em que os mesmos se encontram.

Contudo, inesperados foram os efeitos não significativos da velocidade de injeção, visto que, segundo MICHAELLI (1995), tal variável influencia a temperatura final do polímero fundido, em decorrência da dissipação viscosa, fenômeno que é governado principalmente pela velocidade de preenchimento da cavidade e pelo cisalhamento do polímero, como é exposto na seção dedicada à fundamentação teórica deste trabalho.

Por outro lado, este resultado apresentou coerência com os índices térmicos, obtidos para o mesmo experimento, podendo-se deduzir, portanto, que os efeitos da dissipação viscosa durante o fluxo do policarbonato não contribuíram significativamente para o aumento da temperatura final do polímero na região de união com o inserto de ABS. Desta forma, a variação da velocidade de injeção não exerceu qualquer efeito significativo sobre os resultados dos ensaios de tração, conclusão esta que encontra suporte nos resultados obtidos para a avaliação estatística dos índices térmicos, bem como, em investigações anteriores, como as realizadas por CAVALHEIRO (2006).

O que deve ficar evidente e bem compreendido nesta questão é que a velocidade de injeção produz variações na força de adesão, porém, a análise estatística demonstra que esta variação pode ser desprezada por ser muito pequena, contribuindo de forma ínfima para o resultado final dos ensaios de tração.

Outro fato não observado neste experimento foi o comportamento evidenciado por HUDACEK (2007), onde a variação da força de adesão possui um comportamento parabólico, atingindo um ponto de máximo, para em seguida sofrer uma redução com o aumento da temperatura. No experimento aqui conduzido o fator quadrático AA, que representa o comportamento quadrático da variável temperatura do fundido, apresentou-se não significativo, apesar de também negativo (concavidade da parábola voltada para baixo apresentando um ponto de máximo na força de adesão) comportando-se, a força de adesão, de forma predominante como uma reta crescente.

Também da análise dos diagramas de Pareto da Figura 4.14 (experimento fatorial PC+ABS) é possível verificar que a única variável que influenciou de forma significativa nos valores do

módulo de elasticidade, obtidos a partir dos ensaios de tração, foi a temperatura do fundido. Além disso, a observação dos gráficos dos efeitos das variáveis sobre o fator módulo de elasticidade demonstra que a relação existente entre esta variável e o módulo de elasticidade é negativa, com os valores dos módulos diminuindo para valores crescentes de temperatura do fundido.

Contudo, nenhuma das fontes consultadas realizou qualquer investigação a respeito do comportamento do módulo de elasticidade à tração mediante variações da temperatura do fundido ou mesmo segundo as variáveis investigadas neste trabalho.

Uma possível explicação para este comportamento é que, devido à estrutura morfológica do ABS, na qual o copolímero de estireno e acrilonitrila forma uma “casca” em torno da borracha de butadieno (Figura 4.27), haja a ocorrência da difusão apenas do copolímero para dentro da estrutura do policarbonato, em decorrência da maior mobilidade das cadeias do mesmo devido ao aumento da temperatura de processamento. Por este motivo resultaria uma região de interface entre os componentes do corpo de prova com maior concentração de borracha de butadieno resultando, portanto, em redução do módulo de elasticidade.

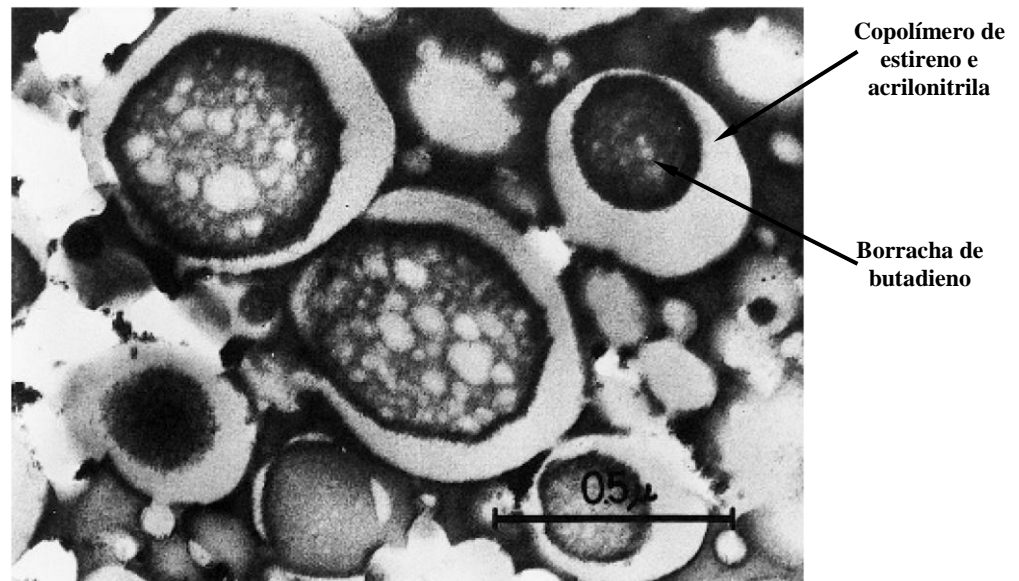


Figura 4.27 - Estrutura morfológica do acrilonitrila butadieno estireno SPERLING (2006).

A Figura 4.28 a seguir mostra a superfície de resposta estimada para o comportamento da força de adesão em função das variáveis temperatura do fundido, temperatura do molde e velocidade de injeção avaliadas por meio do *software Statgraphics Centurion XV*©.

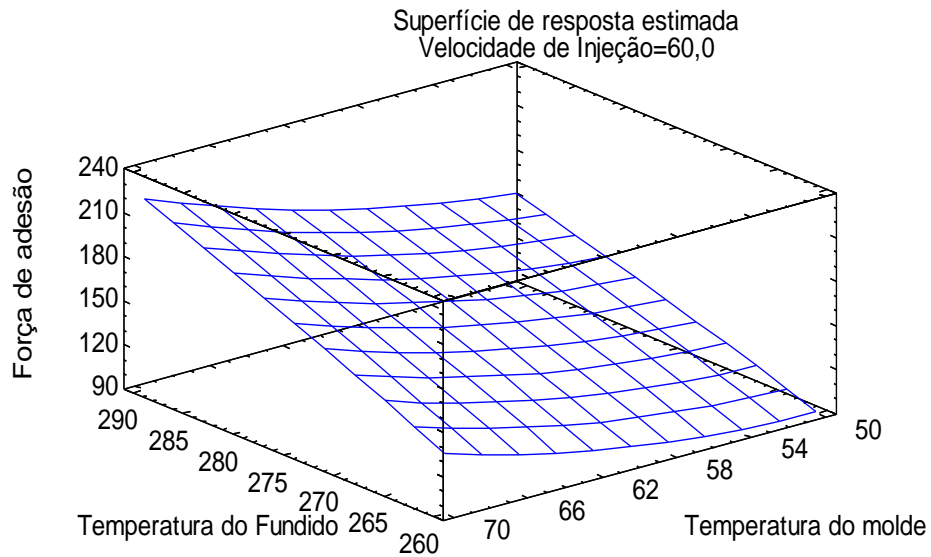


Figura 4.28 - Superfície de resposta estimada para o comportamento da força de adesão em função das variáveis investigadas no experimento fatorial PC+ABS.

Por meio desta é possível obter-se o ponto ótimo, onde as variáveis de processamento produzem a maior força de adesão entre os insertos de ABS e componente sobreinjetado em policarbonato.

O resultado da otimização da força de adesão em função das variáveis de processo é apresentado na tabela 4.7 sendo a força de adesão estimada de aproximadamente 220 N.

Tabela 4.7 - Resposta otimizada para o comportamento da força de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados de PC.

<i>Fator</i>	<i>Nível mais baixo</i>	<i>Nível mais alto</i>	<i>Nível ótimo</i>
Temperatura do Fundido (°C)	260	290	290
Velocidade de Injeção (mm/s)	30	60	60
Temperatura do molde (°C)	50	70	70

A tabela 4.8 lista os coeficientes da análise de regressão para a força de adesão obtida entre os componentes dos corpos de prova sobreinjetados. Através destes coeficientes chegou-se a

equação 4.1 resultante do modelo ajustado, a qual correlaciona as variáveis de processo com estimativas das forças de tração calculadas a partir da mesma.

$$F_A = 540,6 + 2,98 \times T_F - 16,4 \times V_I - 25,3 \times T_M - 0,009 \times T_F^2 + 0,04 \times T_F \times V_I + 0,04 \times T_F \times T_M + 0,02 \times V_I^2 + 0,08 \times V_I \times T_M + 0,09 \times T_M^2 \quad \text{eq. 4.1}$$

Onde:

- F_A - Força de adesão entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato;
- T_F - Temperatura do fundido para o processo de moldagem por sobreinjeção com o policarbonato;
- T_M - Temperatura do molde para o processo de moldagem por sobreinjeção com o policarbonato;
- V_I - Velocidade de injeção para o processo de moldagem por sobreinjeção com o policarbonato.

Tabela 4.8 - Coeficientes de regressão para força de adesão.

Coeficientes da regressão	Constante da regressão
A: Temperatura do Fundido = 2,97653	540,569
B: Velocidade de Injeção = -16,4265	
C: Temperatura do molde = -25,3114	
AA = -0,00934074	
AB = 0,0363526	
AC = 0,0422528	
BB = 0,0165415	
BC = 0,0819711	
CC = 0,0949417	

A comparação entre os valores de forças médias de adesão obtidas por meio dos ensaios de tração e os valores obtidos por meio do modelo estatístico é listada na tabela 4.9. Nela pode-se identificar uma boa correlação entre ambos os valores, os resultantes dos ensaios e os obtidos do modelo, como já havia sido indicado pelo valor do R-quadrado de 70,1 % apresentado na tabela 4.6, ou seja, mais de 70% da variabilidade encontrada nos valores pode ser explicada pelo modelo estatístico obtido nesta análise.

Uma possível explicação para a não obtenção de uma melhor correlação entre os valores ensaiados e os obtidos do modelo da equação 4.1 é o pequeno número de ensaios realizados para

cada condição experimental, fator que é limitado principalmente pelo tempo e os recursos necessários para a posterior realização dos ensaios de tração.

Tabela 4.9 - Comparação entre as médias das forças de adesão e os resultados estimados pela equação 4.1 de ajuste para a força de adesão para o par PC+ABS.

<i>Linha</i>	<i>Valor medido</i>	<i>Valor ajustado</i>	<i>Limite inferior para a média</i>	<i>Limite superior para a média</i>
1	130,377	134,085	107,944	160,225
2	141,7	150,44	120,391	180,49
3	127,568	166,54	140,399	192,68
4	138,587	142,549	116,408	168,689
5	148,303	141,873	115,732	168,013
6	152,475	153,646	123,596	183,695
7	122,243	123,233	86,5964	159,87
8	222,892	220,129	183,492	256,766
9	122,838	132,704	96,0668	169,34
10	148,174	118,474	88,4248	148,524
11	113,048	123,29	93,2402	153,339
12	97,098	91,0775	54,4407	127,714
13	206,78	196,27	166,221	226,32
14	100,465	101,439	71,39	131,489
15	82,44	106,235	80,0944	132,376
16	197,475	179,855	143,218	216,492
17	133,928	161,882	135,741	188,022
18	112,975	125,173	95,1234	155,222
19	197,972	155,798	125,748	185,847
20	138,9	162,42	132,371	192,47
21	164,903	163,974	127,337	200,611
22	190,355	138,489	112,348	164,63
23	176,997	177,561	147,512	207,61
24	108,288	108,169	78,1192	138,218
25	181,33	178,103	148,053	208,152
26	140,333	155,065	118,428	191,702
27	140,817	130,79	94,153	167,427

4.2.3 - Influência das Macrovariáveis do Processo na Adesão por Meio de Ensaio de Tração dos Corpos de Prova Obtidos Segundo o Experimento Fatorial Completo SAN+ABS

Semelhantemente ao experimento anterior, são listados na tabela 4.10 os dados obtidos nos ensaios de tração (força máxima de tração e módulos de elasticidade) dos corpos de prova sobreinjetados com estireno acrilonitrila.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de tração para os corpos de prova referentes ao procedimento experimental fatorial completo SAN+ABS.

Condição	Código do experimento fatorial	Resultados dos Ensaio	
		Média das forças de tração (N)	Média dos Módulos de elasticidade (MPa)
C1	LML	161,0	153,4
C2	LLH	153,0	155,7
C3	HHH	269,0	139,1
C4	HMH	250,5	148,7
C5	MLL	211,8	155,8
C6	HLM	265,8	149,0
C7	LLM	159,0	152,9
C8	HHM	256,3	145,4
C9	MMH	230,8	142,4
C10	HLL	254,2	147,7
C11	MML	225,0	136,6
C12	LLL	127,1	152,9
C13	HMM	245,9	135,7
C14	MLM	221,8	150,9
C15	MMM	226,4	135,0
C16	HML	252,9	156,7
C17	HLH	258,3	156,4
C18	MLH	227,0	148,4
C19	LHH	175,5	156,2
C20	LHL	165,5	144,6
C21	HHL	253,5	151,4
C22	LMH	174,5	157,0
C23	LMM	174,4	175,5
C24	MHM	249,0	144,5
C25	MHL	206,1	143,6
C26	LHM	160,2	158,3
C27	MHH	236,8	153,1

Como no experimento precedente, aqui também os módulos de elasticidade foram calculados posteriormente utilizando o software Origin Pro 8.0, devido à impossibilidade de fixação do extensômetro nos corpos de prova, provocado pela geometria dos mesmos.

Na Figura 4.29 os valores médios das forças de tração máxima são dispostos de forma que os níveis das condições de moldagem sejam crescentes, resultando em valores também crescentes para as médias das forças de tração.

Mediante a análise destes dados no *software* Statgraphics Centurion pode-se comprovar o aumento da força de adesão (ou tração) em função do aumento dos níveis das variáveis foi significativo, ou seja, pôde-se comprovar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os valores médios das forças de adesão à medida que as condições de processamento são alteradas.

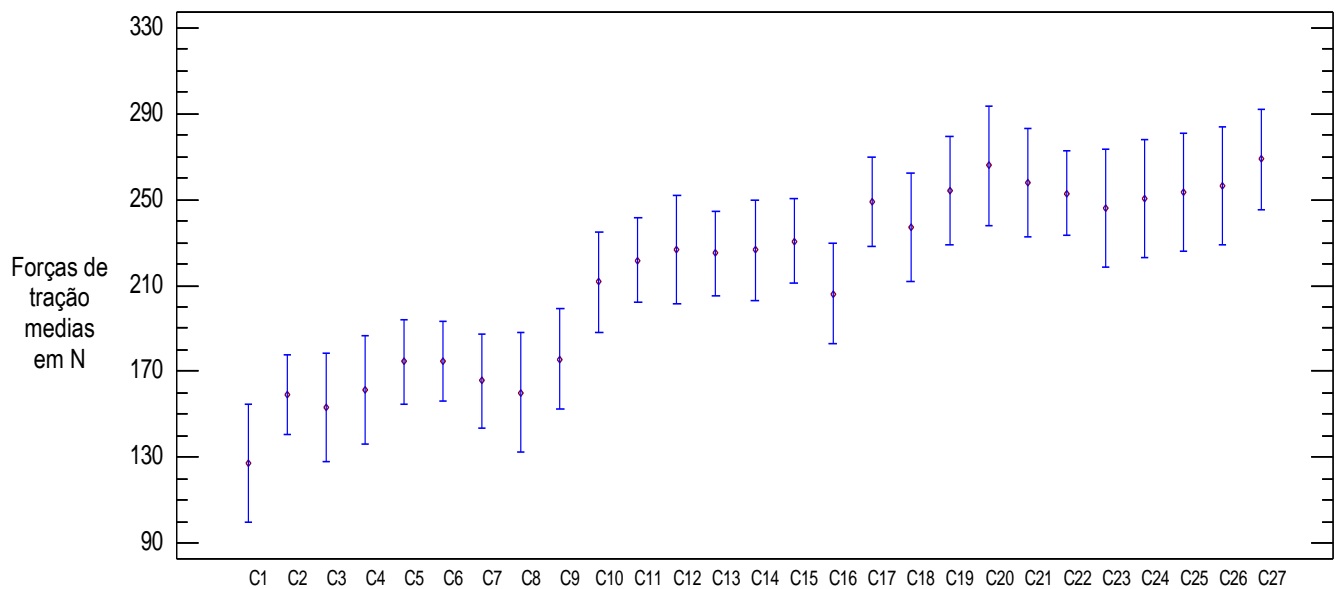


Figura 4.29 - Valores médios dos ensaios de tração para as vinte sete condições experimentais relativo ao experimento fatorial completo SAN+ABS.

Esta constatação fica mais clara nas Figuras 4.30 e 4.31, onde é apresentada uma análise do efeito das variáveis investigadas, por meio de diagramas de Pareto, sobre os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova produzidos pela sobreinjeção dos insertos de ABS com o estireno acrilonitrila (SAN).

Pode ser observado no diagrama de Pareto da Figura 4.30 que tanto a temperatura do fundido quanto a do molde influenciam de maneira estatisticamente significativa na força de adesão medida nos ensaios de tração. Além disso, pode-se também observar na Figura a existência de um fator quadrático, denotado pela interação AA, o que demonstra que o fator temperatura do fundido possui um comportamento regido por uma função de grau dois e com a concavidade voltada para baixo, já que a interação AA é negativa. Este comportamento da curva que relaciona temperatura do fundido e força de adesão pode ser verificado na Figura 4.30, onde é possível identificar a forma parabólica desta curva.

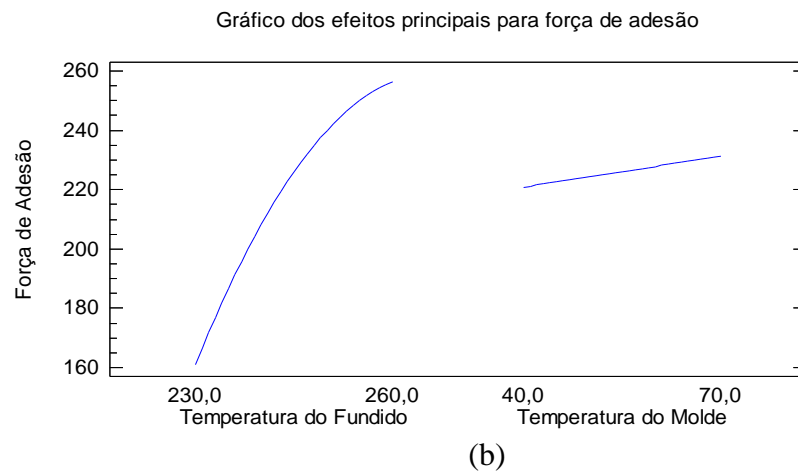
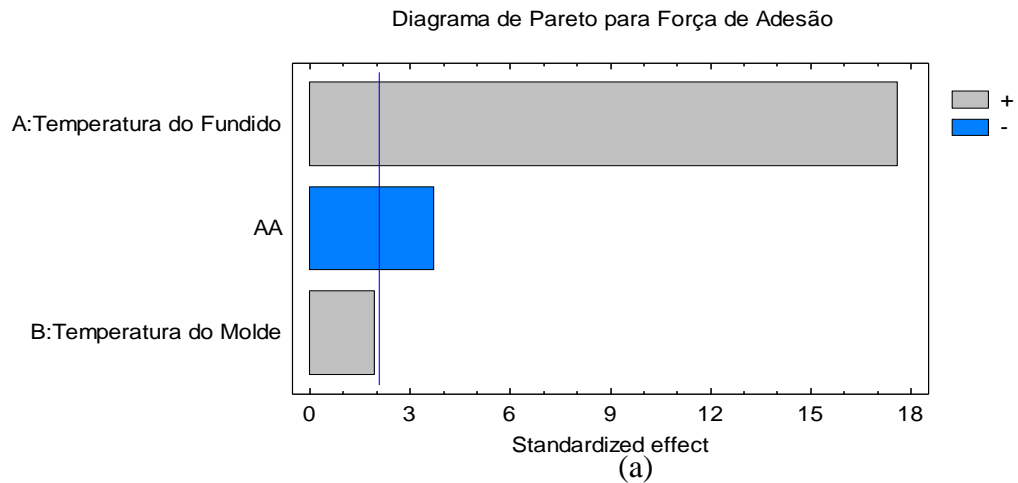


Figura 4.30 - Diagrama de Pareto (a) e gráfico dos efeitos principais (b) das variáveis para a determinação dos fatores estatisticamente significativos nos resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova produzidos com as condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental fatorial completo SAN+ABS.

Tal comportamento já havia sido verificado anteriormente em experimentos realizados por HUDACEK (2007), que observou um ponto de máximo na força de adesão entre os componentes de um produto sobreinjetado em função do aumento da temperatura, também em ensaios de tração.

Os demais fatores (variáveis e interações), contudo, não se mostraram estatisticamente significativos, não exercendo, pois, influência nas variações da força de adesão entre os insertos e os componentes sobreinjetados. Da análise do gráfico é possível observar também que não existem interações significativas entre as três variáveis analisadas, podendo-se concluir que nenhuma das variáveis influencia no comportamento das outras duas.

Desta forma, como no experimento anterior, pode-se inferir que o comportamento da força de adesão resultante entre os componentes dos corpos de prova é majoritariamente dependente das temperaturas e, conseqüentemente, do processo de interdifusão o qual é dependente das variáveis que governam a temperatura do fundido, durante o preenchimento da cavidade no processo de sobreinjeção.

Ainda é possível observar na Figura 4.31 o comportamento do módulo de elasticidade decorrente da variação das variáveis do processo mediante a análise estatística representada pelo diagrama de Pareto e pela curva dos efeitos das variáveis. Verifica-se que de maneira semelhante ao experimento fatorial PC/ABS, a única variável a exercer influência no módulo de elasticidade foi a temperatura do fundido, ocorrendo uma redução dos valores dos módulos em função do aumento da temperatura do fundido, sendo possível estabelecer a mesma hipótese para a justificativa do comportamento observado.

Na tabela 4.12 é apresentado o resumo da análise de variância realizada por meio do *software* de estatística *StatGraphics Centurion XV*©. Nela pode ser verificado que os valores do teste *P* para as macrovariáveis temperatura do fundido e do molde, assim como para o fator quadrático AA (representativo da forma da curva de variação da força de adesão com a temperatura do fundido) apresentam valores inferiores 0,05. Este resultado representa que estes “fatores” investigados, são os que exercem uma influência estatisticamente significativa no valor da força de adesão entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em SAN.

Observa-se também na tabela 4.12 o valor de R-quadrado que representa de 96,3%, representando uma excelente correlação entre os dados dos ensaios de tração e o modelo obtido por meio de regressão linear com o *software Statgraphics Centurion XV*©.

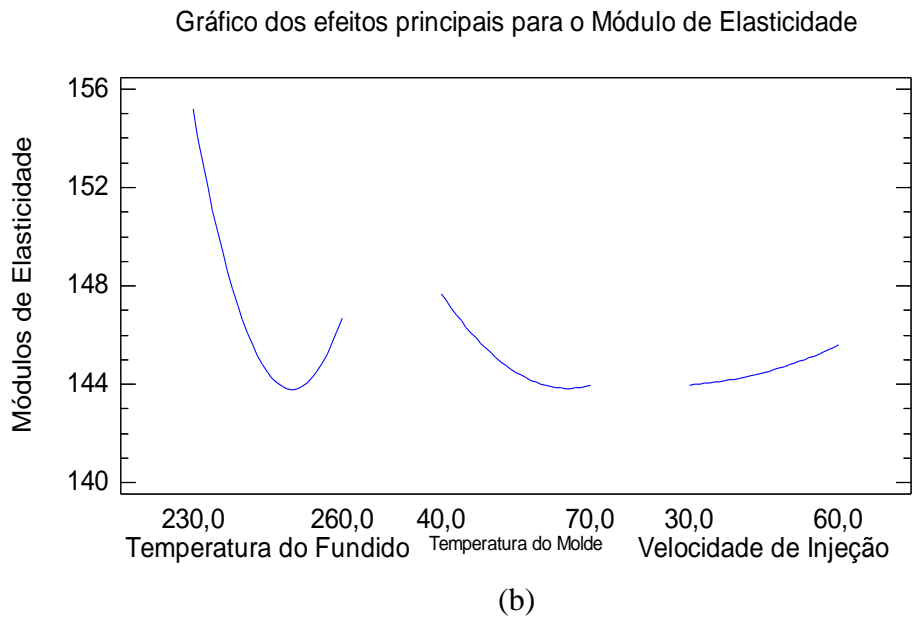
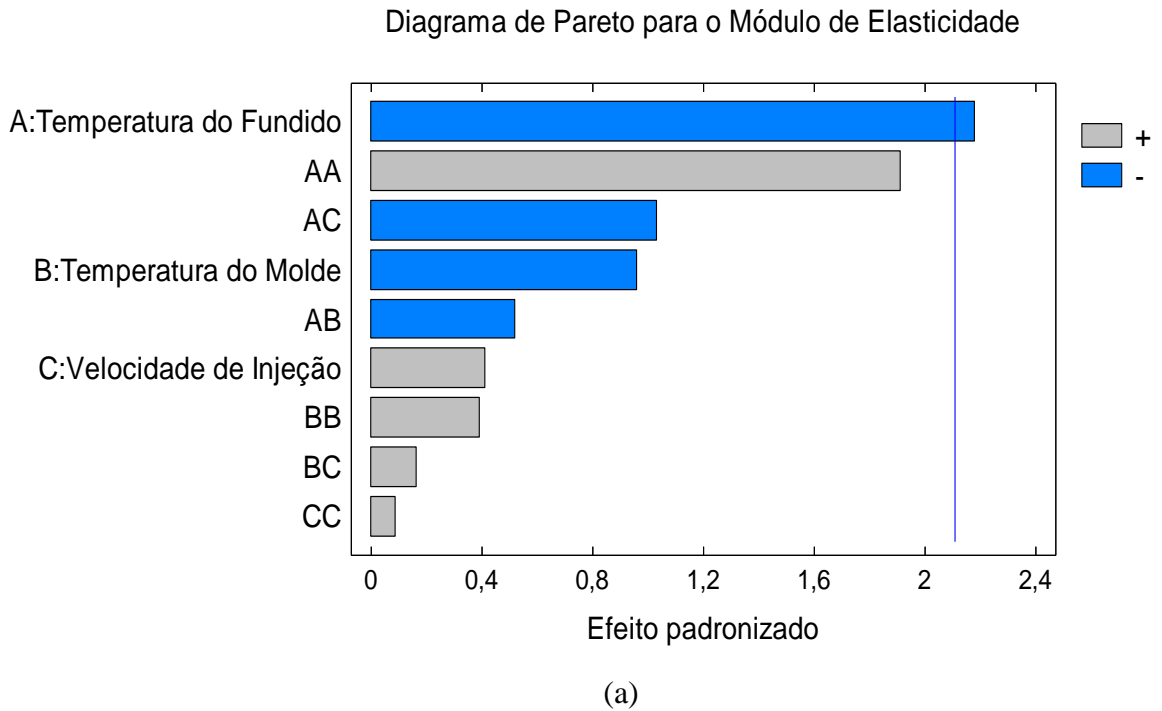


Figura 4.31 - Diagrama de Pareto e gráfico dos efeitos das variáveis para a determinação dos fatores estatisticamente significativos nos resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova produzidos com as condições de moldagem determinadas para o procedimento experimental fatorial completo SAN+ABS.

Tabela 4.12 - Resumo da análise de variância para a força de adesão referente ao experimento fatorial SAN+ABS.

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Teste F	Valor P
A: Temperatura do Fundido	40726,6	1	40726,6	411,37	0,0000
B: Temperatura do Molde	489,845	1	489,845	4,95	0,0400
AA	1811,92	1	1811,92	18,30	0,0005
AB	316,213	1	316,213	3,19	0,0917
AC	86,4033	1	86,4033	0,87	0,3633
BB	20,0446	1	20,0446	0,20	0,6584
BC	10,0833	1	10,0833	0,10	0,7535
CC	134,111	1	134,111	1,35	0,2605
Total error	1683,02	17	99,0012		
Total (corr.)	46055,7	26			
R-quadrado	R-quadrado (ajustado d.f)	Erro padrão	Erro absoluto médio		
96,3%	94,4%	9,9	6,3		

A Figura 4.32 mostra a superfície de resposta obtida para a correlação entre as variáveis investigadas no experimento com as forças de adesão resultantes, para uma velocidade de injeção de 60 mm/s.

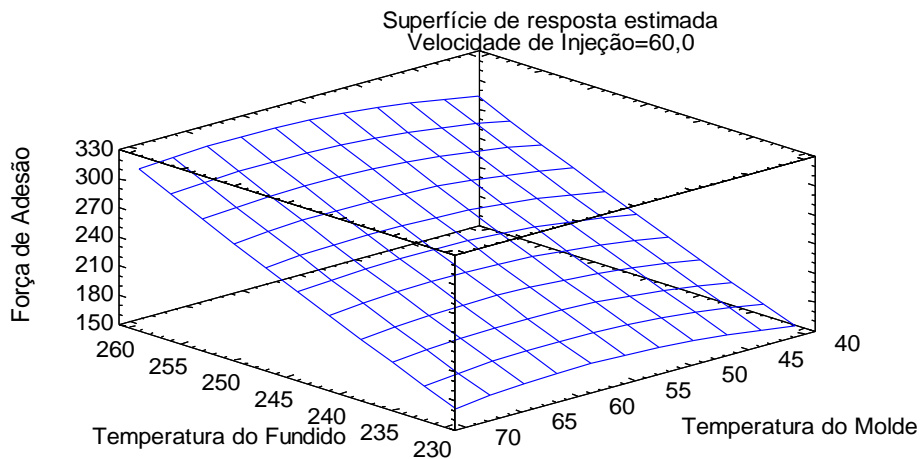


Figura 4.32 - Superfície de resposta estimada para o comportamento da força de adesão em função das variáveis investigadas no experimento fatorial SAN/ABS.

A Figura 4.32 mostra que o ponto ótimo, onde a combinação das condições de processamento fornecem a maior força de adesão entre os insertos e os componentes sobreinjetados

em SAN, está em torno de 251,5N. As condições necessárias para a produção deste resultado estão listadas na tabela 4.13, juntamente com os níveis mais baixos e mais altos para as mesmas.

Tabela 4.13 - Resposta otimizada para o comportamento da força de adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados de SAN.

Fator	Níveis mais baixos	Níveis mais alto	Ótimo
Temperatura do Fundido (°C)	230,0	260,0	260,0
Temperatura do Molde (°C)	40,0	70,0	56,9
Velocidade de Injeção (mm/s)	30,0	60,0	51,4

De forma análoga ao experimento fatorial PC/ABS, apresenta-se na tabela 4.14 a lista dos coeficientes da análise de regressão para a força de adesão obtida entre os componentes dos corpos de prova sobreinjetados. Através destes coeficientes é possível chegar à equação 4.2, a qual é resultante do ajuste do modelo estatístico aos dados experimentais, que correlaciona as macrovariáveis de processo com as estimativas das forças de tração, calculadas a partir da mesma.

Tabela 4.14 - Coeficientes de regressão para Força de adesão.

Coeficientes da regressão	Constante da regressão
A: Temperatura do Fundido = 41,0	-5717,28
B: Temperatura do Molde = 0,35	
AA = 0,08	

$$F_A = -5205,98 + 41,0.T_F + 0,35.T_M - 0,08.T_F^2 \quad \text{eq. 4.2}$$

Onde:

F_A - Força de adesão resultante dos ensaios de tração dos corpos de prova produzidos pela sobreinjeção de SAN em ABS;

T_F - Temperatura do fundido para o processamento por sobreinjeção com estireno acrilonitrila;

T_M - Temperatura do molde para o processamento por sobreinjeção com estireno acrilonitrila.

Na tabela 4.15 podem ser observados os valores de força de adesão obtidos pela curva resultante da regressão e os valores observados nos ensaios que, como já havia sido indicado pelo valor do R-quadrado de 93 % apresentado na tabela 4.12, apresentam uma excelente correlação.

Tabela 4.15 - Comparação entre os valores médios das forças de adesão medidas nos ensaios de tração com os valores obtidos por meio dos cálculos segundo o modelo obtido por meio da análise de regressão dos dados experimentais.

<i>Linha</i>	<i>Valor médio observado</i>	<i>Valor médio ajustado</i>	<i>Menor valor observado</i>	<i>Maior valor observado</i>
1	161,0	151,5	139,233	163,808
2	153,0	156,9	141,956	171,918
3	269,0	259,0	243,99	273,951
4	250,5	259,8	247,511	272,085
5	211,8	213,0	200,733	225,308
6	265,8	258,7	246,439	271,013
7	159,0	153,3	141,039	165,613
8	256,3	258,9	246,605	271,18
9	230,8	232,3	221,604	242,981
10	254,2	251,0	236,045	266,007
11	225,0	219,1	208,459	229,837
12	127,1	140,2	125,278	155,24
13	245,9	260,6	249,948	271,326
14	221,8	223,4	212,715	234,093
15	226,4	230,4	219,759	241,137
16	252,9	252,0	239,733	264,308
17	258,3	257,0	241,99	271,951
18	227,0	224,3	212,044	236,619
19	175,5	179,5	164,49	194,451
20	165,5	159,1	144,145	174,107
21	253,5	249,4	234,378	264,34
22	174,5	170,0	157,744	182,319
23	174,4	165,5	154,815	176,193
24	249,0	233,8	223,148	244,526
25	206,1	221,6	209,333	233,908
26	160,2	174,0	161,739	186,313
27	236,8	236,6	224,311	248,885

O diagrama de Pareto da Figura 4.31 (a) evidencia que, semelhantemente ao experimento fatorial completo PC/ABS, apenas a temperatura do fundido exerceu uma influência estatisticamente significativa no módulo de elasticidade, calculado a partir das curvas tensão versus deformação dos ensaios dos corpos de prova produzidos em SAN e ABS. E da mesma forma que no caso supracitado, o efeito sobre o módulo, exercido pela temperatura do fundido é negativo (relação que também pode ser observada na Figura 4.31). Porém, diferentemente do caso do experimento fatorial PC/ABS, as interações entre as variáveis não se mostraram significativas.

4.2.4 Ensaios Dinâmicos-Mecânicos de Corpos de Prova Produzidos por Sobreinjeção

Para a avaliação do comportamento dinâmico mecânico foram realizados os ensaios de flexão e fadiga dos corpo de prova produzidos segundo a descrição realizada no capítulo de materiais e métodos.

Para tanto foram produzidos corpos de prova segundo o apresentado na Figura 4.33, onde insertos de acrilonitrila butadieno estireno, com as dimensões padronizadas para a realização do ensaio em DMA (LISI LEITE 2007, CAVALHEIRO 2006), foram sobreinjetados com uma camada de estireno acrilonitrila, sendo esta camada sobreinjetada de espessura fina, de acordo com o conceito de parede fina apresentado anteriormente neste trabalho.

A utilização apenas do estireno acrilonitrila para a sobreinjeção dos corpos de prova de ABS deveu-se às suas características de fluxo, mais especificamente sua viscosidade na temperatura de processamento que, segundo as simulações realizadas no *software CAE* comercial *Moldflow*®, permitiu o preenchimento do caminho de fluxo requerido para os corpos de prova utilizados nos referidos ensaios.

Por este mesmo motivo não foi possível a utilização do policarbonato neste experimento, já que sua elevada viscosidade impossibilitava o preenchimento completo da região de sobre-injeção e, desta forma, inviabilizaria a realização dos ensaios em DMA, devido à produção de corpos de prova inadequados aos ensaios.

Contudo, como o principal objetivo deste experimento era a avaliação conceitual do processo de sobreinjeção em uma situação de carga dinâmica, a utilização apenas do SAN como material de recobrimento demonstrou ser adequada, tendo em vista o objetivo apresentado.



Figura 4.33 - Corpo de prova para a realização dos ensaios de flexão e fadiga em equipamento para ensaios dinâmico mecânicos.

4.2.4.1 Resultados dos Ensaios de Flexão dos Corpos de Prova em SAN+ABS

Nas Figuras 4.34 a 4.36 são apresentadas as curvas tensão versus deformação resultantes dos ensaios flexão em DMA dos corpos de prova representados na Figura 4.33.

Comparando-se os gráficos resultantes dos ensaios pode-se observar que tanto os valores máximos de força de flexão, bem como os módulos de elasticidade mostram-se pouco sensíveis às variações das condições de processamento utilizadas no processo de sobreinjeção dos insertos de ABS.

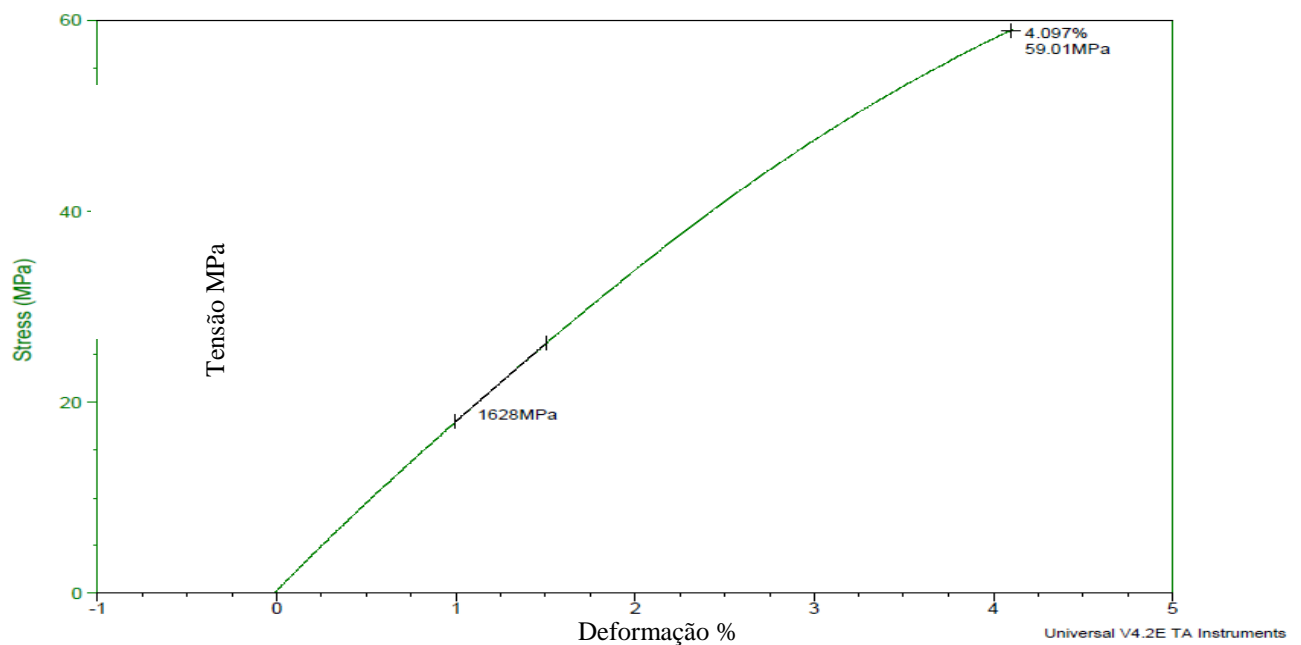


Figura 4.34 - Curva de tensão deformação resultante do primeiro ensaio de flexão em DMA do corpo de prova da Figura 4.33, produzido por sobreinjeção com estireno acrilonitrila, com temperatura do fundido de 240 °C.

Contudo, verificou-se uma tendência de que o tratamento (aumento da temperatura do estireno acrilonitrila fundido) empregado tenha afetado os valores médios das propriedades mecânicas investigadas nos ensaios em DMA. Tal comportamento encontra suporte nos resultados dos módulos de elasticidade calculados com base nos dados dos ensaios de tração, onde foi demonstrado também, que os mesmos sofreram influência dos fatores investigados nos experimentos fatoriais e, principalmente da temperatura do fundido.

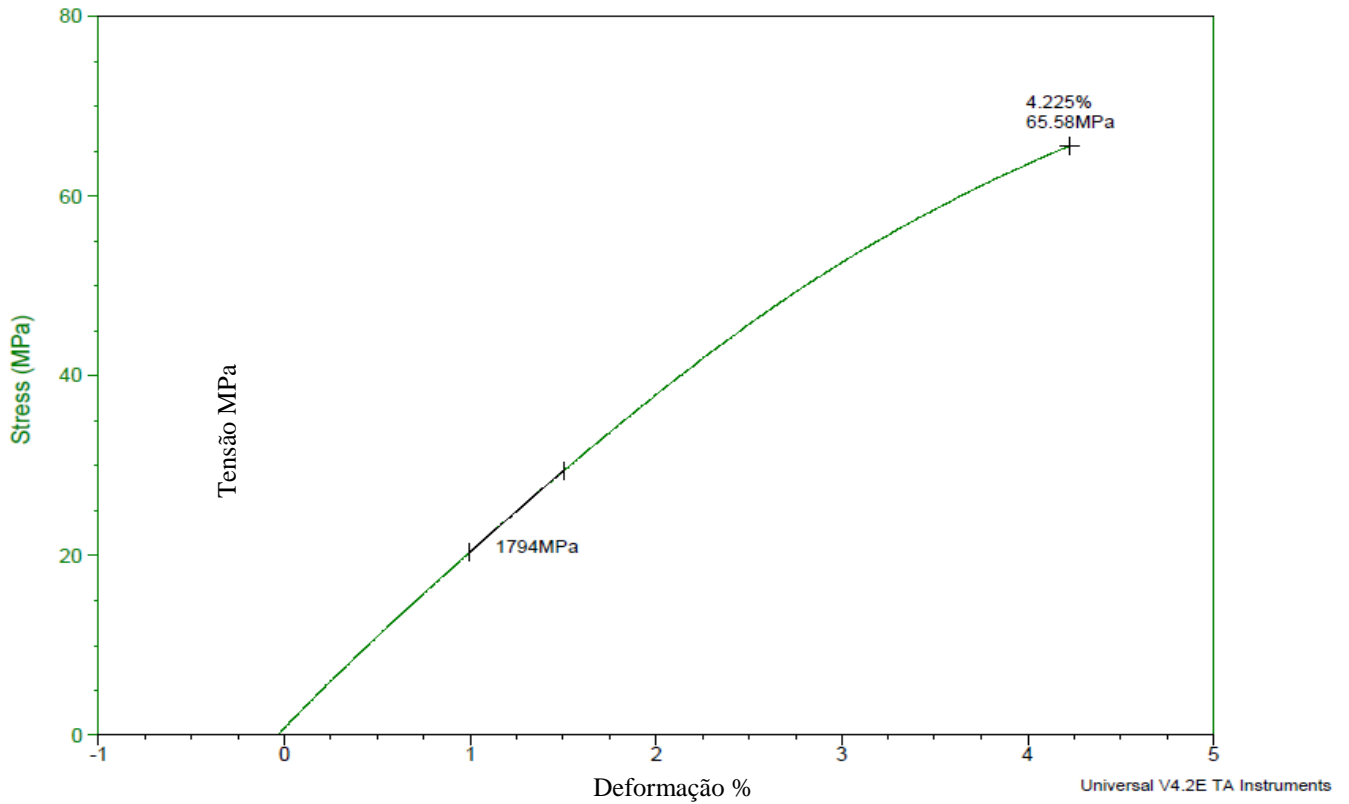
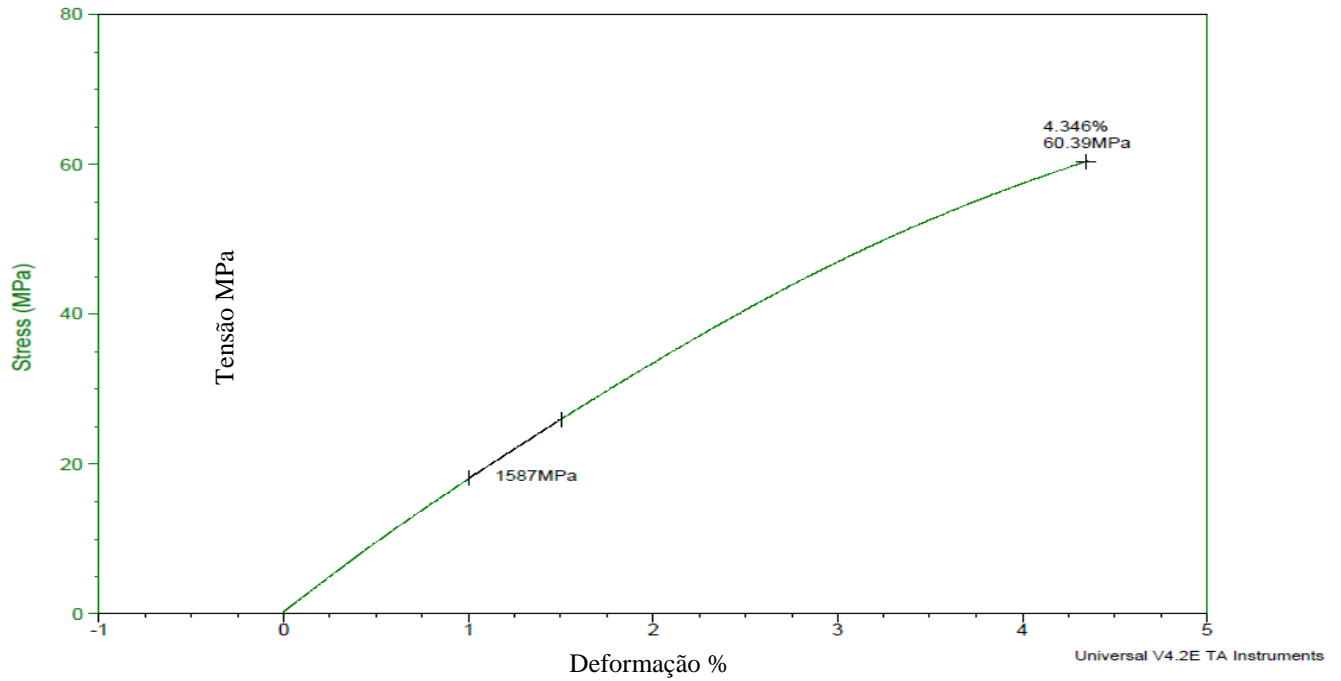
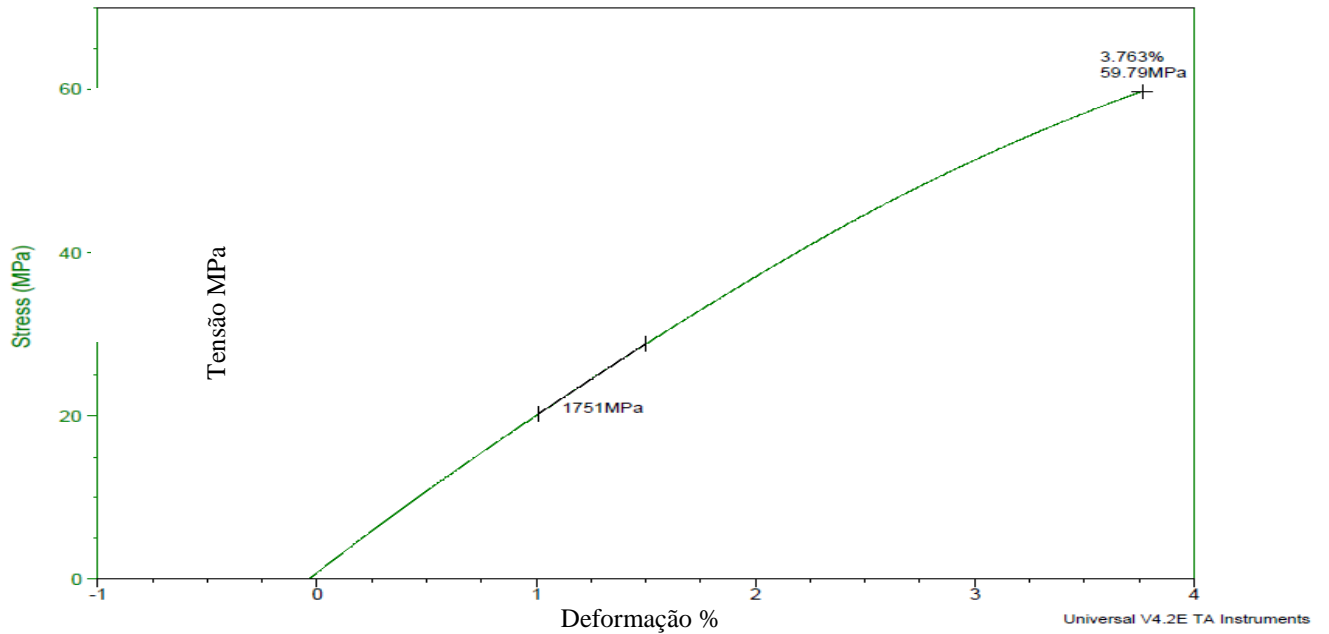


Figura 4.35 - Curva de tensão deformação resultante do segundo ensaio de flexão em DMA do corpo de prova da Figura 4.33, produzido por sobreinjeção com estireno acrilonitrila, com temperatura do fundido de 240 °C.



(a)



(b)

Figura 4.36 - Curva de tensão deformação resultante do segundo ensaio de flexão em DMA para o corpos de prova da Figura 4.33, produzido por sobreinjeção com estireno acrilonitrila com temperatura do fundido de 260 °C (corpos de prova 1 (a) e 2 (b)).

Um resumo dos dados obtidos nos ensaios de tensão versus deformação encontra-se na tabela 4.16 onde é possível realizar uma verificação dos fatos expostos acima.

Tabela 4.16 - Resumo das propriedades mecânicas medidas no ensaio de flexão realizado em equipamento de DMA para os corpos de prova produzidos com temperatura de processamento de 240 e 260 °C.

Temperatura do fundido [°C]	Corpo de prova n°	Tensão máxima [MPa]	Módulo de elasticidade [MPa]	Deformação máxima [%]
240	1	59,01	1628	4,097
	2	65,58	1794	4,225
260	1	60,39	1587	4,346
	2	59,79	1751	3,763

Já as Figuras 4.37 e 4.38 mostram as fotografias dos corpos de prova já ensaiados (produzidos respectivamente com temperaturas de 240 e 260 °C), onde se pode observar que não houve praticamente dano algum em decorrência dos ensaios às camadas sobre-injetadas, como pode ser comprovado pela ausência de descolamento da camada produzida em SAN do inserto de ABS. Contudo, observa-se nas extremidades dos corpos de prova um descolamento entre os dois componentes, porém, tal fato deveu-se ao processo de preparação das amostras (corte) para que fossem atingidas as dimensões requeridas para o referido ensaio de tensão versus deformação.



Figura 4.37 - Corpos de prova submetidos a ensaio de tensão versus deformação em DMA (temperatura de processamento 240 °C).



Figura 4.38 - Corpos de prova submetidos a ensaio de tensão versus deformação em DMA (temperatura de processamento 260 °C).

Contudo, tal comportamento necessita de um maior esclarecimento o que será realizado em seção posterior deste trabalho.

4.2.4.2 Resultados dos Ensaio de Fadiga dos Corpos de Prova

A realização dos ensaios de fadiga em equipamento de DMA revelou um comportamento tensão versus tempo decorrido como o apresentado nas Figuras 4.39 à 4.42.

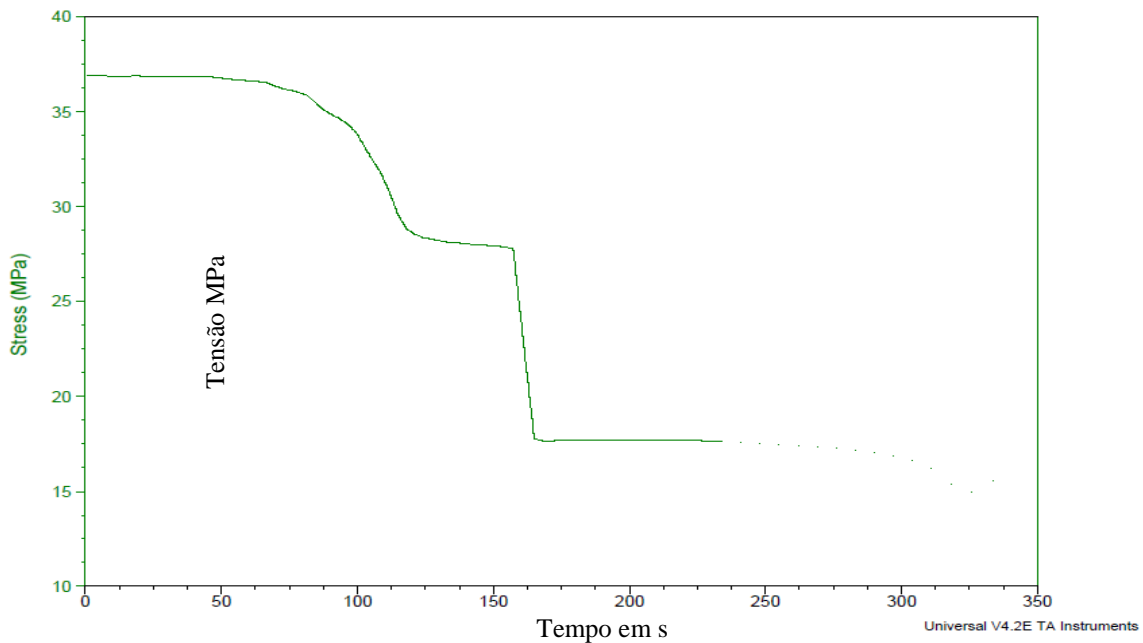


Figura 4.39 - Curva de ensaio de fadiga (tensão versus tempo) realizadas em corpos de prova produzidos por sobreinjeção com temperatura de 240 °C em equipamento de DMA com amplitude do movimento de 2mm.

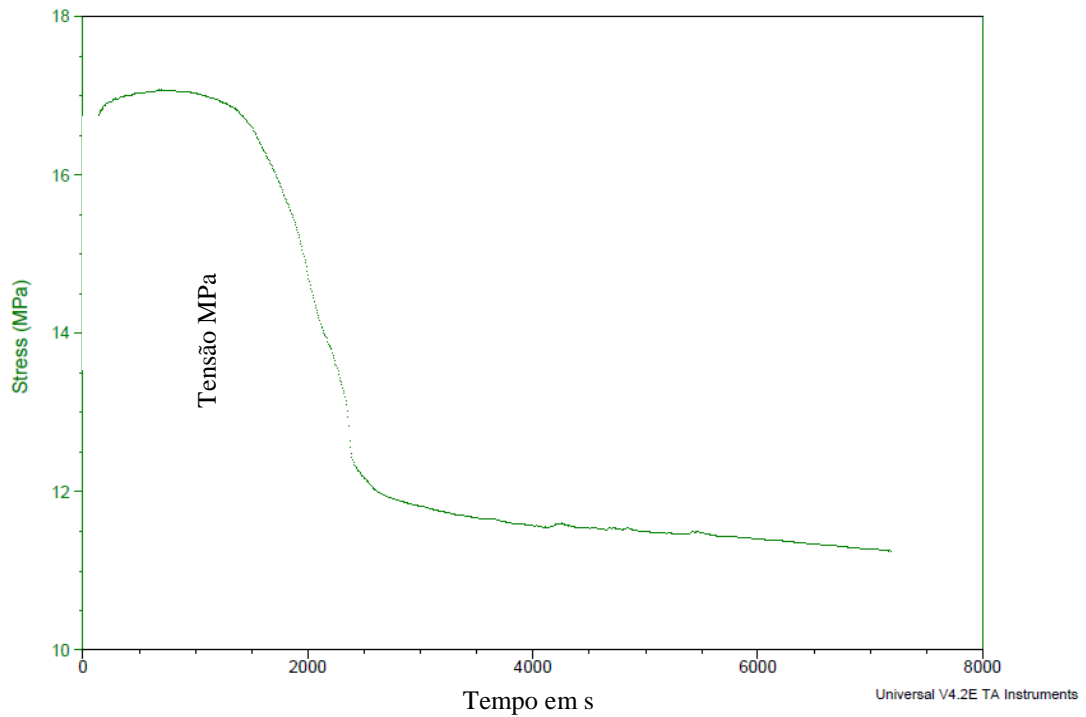


Figura 4.40 - Curvas de ensaio de fadiga (tensão versus tempo) realizadas em corpos de prova produzidos por sobre-injeção com temperatura de 240 °C em equipamento de DMA; em (a) amplitude de movimento de 1 mm.

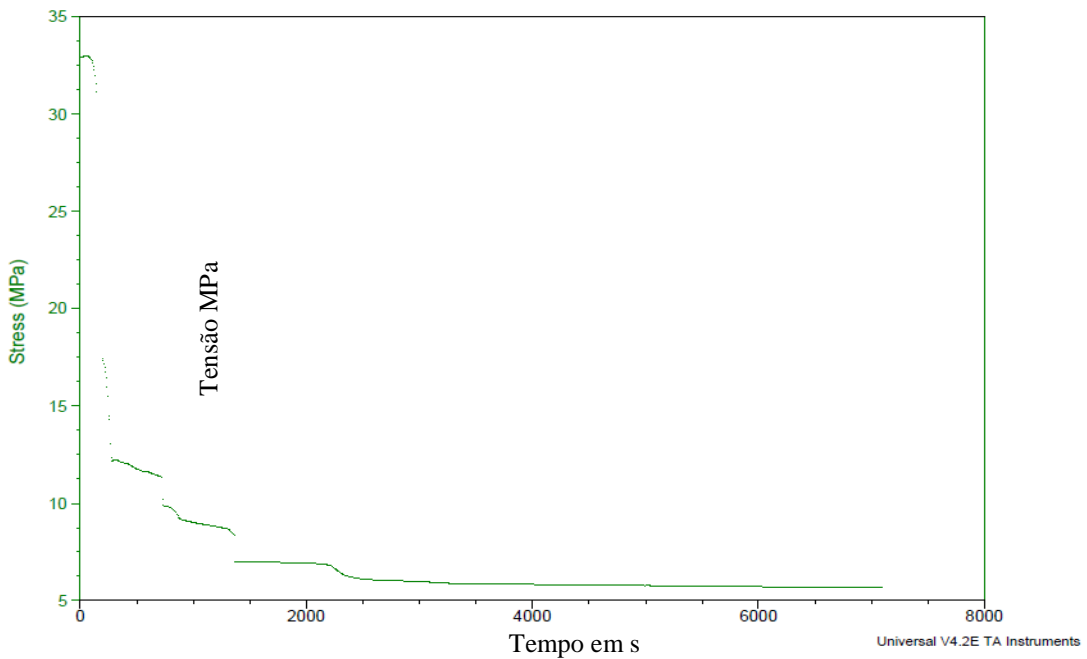


Figura 4.41 - Curva de ensaio de fadiga (tensão versus tempo) realizadas em corpos de prova produzidos por sobreinjeção com temperatura de 260 °C em equipamento de DMA com amplitude do movimento de 2mm.

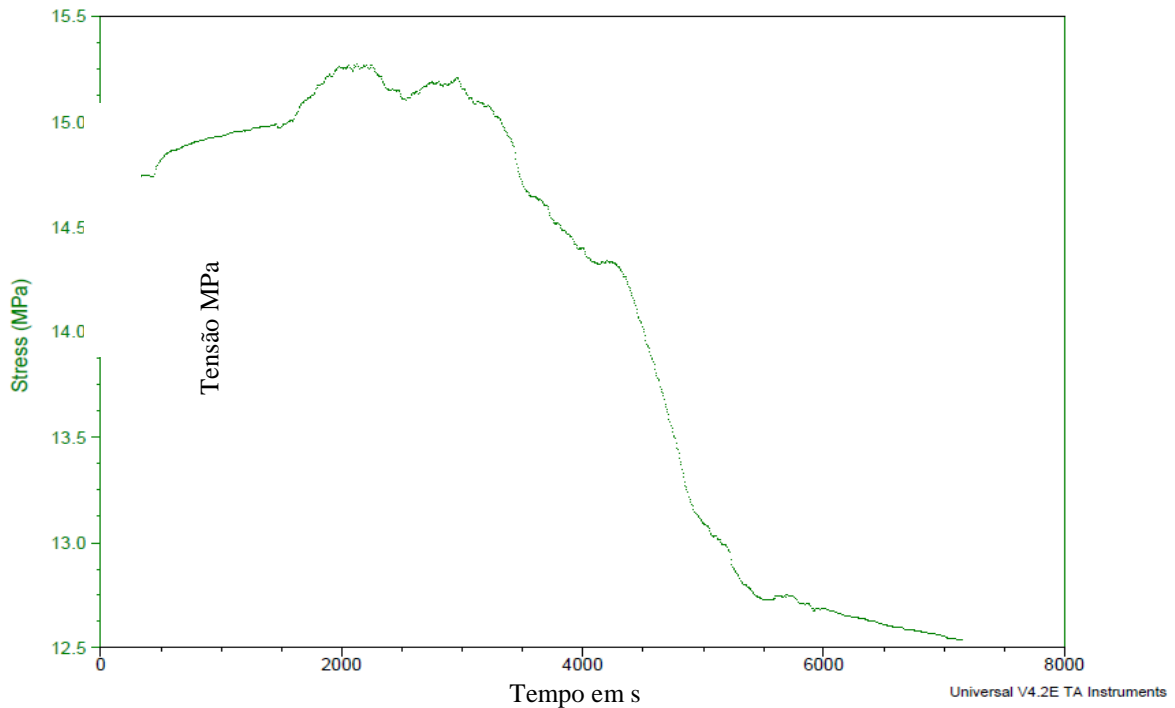


Figura 4.42 - Curva de ensaio de fadiga (tensão versus tempo) realizadas em corpos de prova produzidos por sobreinjeção com temperatura de 260 °C em equipamento de DMA com amplitude do movimento de 1mm.

Da análise dos gráficos pode-se verificar que o comportamento dos corpos de prova ensaiados com amplitudes de 1 e 2 mm possuem diferenças significativas. No gráfico da Figura 4.39 e 4.41 observa-se a ocorrência de reduções bruscas da tensão durante o ensaio (apresentando o aspecto de “degraus”), provocados, provavelmente, por sucessivos descolamentos entre a camada sobreinjetada em SAN e o inserto de ABS. Já nos gráficos das Figuras 4.40 e 4.42 observou-se uma redução da tensão mais suave, à medida que transcorre o ensaio. Fica evidente também, do tempo de duração do ensaio, que para uma amplitude de 2 mm do movimento de flexão do corpo de prova, a vida do mesmo foi bastante reduzida. Neste caso, a ruptura do corpo de prova (como mostra a Figura 4.43) ocorreu em aproximadamente 250 segundos para o corpo de prova produzido com temperatura de 240 °C, obtendo-se, contudo, resultados superiores com o corpo de prova sobreinjetado com temperatura do estireno acrilonitrila de 260 °C (Figura 4.44)

Nos ensaios realizados com amplitude de 1 mm os efeitos observados nos corpos de prova foram mínimos comparados aos dos ensaiados com amplitude do movimento de 2mm, sendo o ensaio interrompido após duas horas e trinta minutos sem que houvesse qualquer ruptura nos corpos de prova, diferentemente daqueles ensaiados com amplitude de 2mm.

As Figuras 4.43 e 4.44 apresentam os corpos de prova sobreinjetados com temperatura do estireno acrilonitrila (SAN) fundido de 240 e 260°C respectivamente e ensaiados com amplitude de 2 mm.



Figura 4.43 - Corpo de prova submetido à ensaio de fadiga em equipamento de DMA (temperatura de processamento de 240 °C, amplitude do deslocamento 2mm e frequência do ensaio de 10Hz).



Figura 4.44 - Corpo de prova submetido à ensaio de fadiga em equipamento de DMA (temperatura de processamento de 260 °C, amplitude do deslocamento 2mm e frequência do ensaio de 10Hz).

Já nas Figuras 4.45 e 4.46 são mostrados os corpos de prova sobreinjetados com temperatura do estireno acrilonitrila (SAN) fundido de 240 e 260°C respectivamente e ensaiados com amplitudes de 1mm.

Nas Figuras é visível o estado final dos corpos de prova após serem ensaiados, apresentando falhas resultantes como o descolamento da camada sobreinjetada, ou até mesmo a fratura do corpo de prova.



Figura 4.45 - Corpos de prova submetidos a ensaio de fadiga em equipamento de DMA (temperatura de processamento de 240 °C, amplitude do deslocamento 1mm e frequência do ensaio de 10Hz).



Figura 4.46 - Corpo de prova submetido a ensaio de fadiga em equipamento de DMA (temperatura de processamento de 260 °C, amplitude do deslocamento 1 mm e frequência do ensaio de 10Hz).

4.3 Correlação entre os Parâmetros do Escoamento do Polímero Obtidos por meio da Simulação do Processo de Sobreinjeção e as Forças de Adesão Obtidas nos Ensaios de Tração.

Nesta seção tem-se como objetivo principal o estabelecimento de uma correlação entre os parâmetros do escoamento resultantes da avaliação do processo de sobreinjeção no *software* Moldflow com os resultados dos experimentos de avaliação dos efeitos das variáveis do processo na força de adesão entre os componentes dos corpos de prova sobreinjetados.

A partir da obtenção de uma correlação estatisticamente significativa entre os parâmetros do *software* CAE comercial *Moldflow*© com os resultados dos ensaios para a avaliação da força de

adesão, por meio de um modelo estatístico, seria possível estabelecer-se uma base para futuras análises e avaliações do comportamento da adesão entre componentes de um produto sobreinjetado., A partir destes modelos, seria possível, em alguns casos, a previsão da força de adesão entre polímeros que possuam afinidades químicas semelhantes aos materiais avaliados neste trabalho, afinidade esta, estimada pelo parâmetro de solubilidade de Hildebrand, mencionado anteriormente neste trabalho.

Desta forma, para a verificação da existência da correlação entre os parâmetros do Moldflow e os valores dos ensaios de tração, foi realizada uma análise de regressão linear múltipla a partir da qual se estabeleceu um modelo estatístico dos efeitos dos parâmetros do Moldflow sobre a força de adesão resultante. Os resultados obtidos nestas análises são descritas e discutidas a seguir para ambos os experimentos fatoriais PC+ABS e SAN+ABS.

4.3.1 Correlação entre os Parâmetros das Simulações no Moldflow e as Forças de Adesão Obtidas nos Ensaios de Tração para o Experimento Fatorial PC+ABS

A equação 4.3 (obtida por meio de uma regressão linear múltiplas) estabelece a correlação entre a força de adesão, obtida nos ensaios de tração, e os parâmetros tanto obtidos no *software CAE* comercial *Moldflow*© quanto as variáveis de máquina utilizadas no processo de sobreinjeção.

$$F_A = -653,261 - 1,40194*A_{remelt} - 835,674*Y_c - 150,727*T_i - 0,259568*T_s + 1,84053*T_b + 56,4938*T_F + 102,271*T_M + 0,159833*V_i \quad Eq. (4.3)$$

Onde:

F_A - Força de adesão entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato;

A_{remelt} - Área de “amolecimento” do inserto de ABS resultante do processo de sobreinjeção pelo policarbonato;

Y_c - Índice térmico do núcleo;

T_i - Temperatura da interface entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato;

T_s - Temperatura da pele do policarbonato fundido;

T_b - Temperatura de massa do policarbonato fundido na região de união entre inserto e componente sobreinjetado;

T_F - Temperatura do policarbonato fundido;

T_M - Temperatura do molde;

V_i - Velocidade de injeção do policarbonato.

Na tabela 4.17 é apresentado o resumo da análise de variância resultante do software Statgraphics Centurion, onde pode ser observado que o valor P para o modelo é menor que 0,05 ($P = 0,0027$), indicando que a correlação entre os variáveis independentes da equação 4.3 e a força de adesão F_A é estatisticamente significativa e que o modelo explica, segundo o valor de R-quadrado, mais de 68% da variabilidade ocorrida nos valores da força de adesão, indicando que o modelo apresenta uma boa correlação com os valores de força de adesão medidos nos ensaios de tração.

De acordo com o resumo da análise de variância (Tabela 4.17) pode-se ainda, em função P ser muito maior que 0,05, para os parâmetros avaliados inferir que a variável velocidade ($P = 0,7054$) de injeção não exercer efeitos significativos na alteração da força de adesão obtida com o modelo de regressão podendo, portanto, ser suprimida deste.

Tabela 4.17 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow e as variáveis de processo de sobreinjeção obtida no *software* Statgraphics Centurion.

<i>Parâmetro</i>	<i>Estimativa</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Teste T</i>	<i>Valor P</i>
CONSTANTE	-653,261	302,378	-2,16041	0,0445
área de remelt	-1,40194	1,13203	-1,23843	0,2315
índice térmico	-835,674	785,629	-1,0637	0,3015
temperatura da interface	-150,727	230,006	-0,655321	0,5205
temperatura da pele	-0,259568	0,276995	-0,937088	0,3611
temperatura de massa	1,84053	1,25166	1,47047	0,1587
Temperatura do fundido	56,4938	80,7119	0,699945	0,4929
temperatura do molde	102,271	147,773	0,692082	0,4977
velocidade de injeção	0,159833	0,416081	0,384139	0,7054

<i>Fonte</i>	<i>Soma dos quadrados</i>	<i>Graus de liberdade</i>	<i>Média dos quadrados</i>	<i>Razão F</i>	<i>Valor P</i>
Model	22941,3	8	2867,67	4,82	0,0027
Residual	10718,1	18	595,448		
Total (Corr.)	33659,4	26			

R-quadrado	R-quadrado ajustado para GL	Erro padrão	Erro médio absoluto	Teste Durbin-Watson	autocorrelação
68,1573	54,005	24,4018	16,5061	2,01324 (P=0,3913)	-0,0191732

Realizando a mesma análise considerando apenas as variáveis de processo temperatura do fundido, temperatura do molde e velocidade de injeção obteve-se um modelo que explica apenas 58,9% (R-quadrado) da variabilidade da força de adesão sendo, portanto, um modelo menos preciso que o obtido anteriormente, como pode ser visto através do resumo da tabela de variância para este caso.

Tabela 4.18 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow obtida no *software* Satatgraphics Centurion.

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste T	Valor P
CONSTANTE	-489,27	112,872	-4,33473	0,0002
Temperatura do fundido	2,01016	0,385115	5,21962	0,0000
temperatura do molde	1,38984	0,577673	2,40593	0,0246
velocidade de injeção	-0,022537	0,385115	-0,0585202	0,9538

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Razão F	Valor P
Modelo	19844,0	3	6614,66	11,01	0,0001
Residuo	13815,4	23	600,671		
Total (Corr.)	33659,4	26			

R-quadrado	R-quadrado ajustado para GL	Erro padrão	Erro médio absoluto	Teste Durbin-Watson	autocorrelação
58,9552	53,6016	24,5086	18,2177	2,08465 (P=0,5775)	-0,0472148

O modelo estatístico obtido neste caso é apresentado na equação 4.4.

$$F_A = -489,27 + 2,01016 * T_F + 1,38984 * T_M - 0,022537 * V_i \quad \text{Eq. (4.4)}$$

Onde:

F_A - Força de adesão entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato;

T_F - Temperatura do policarbonato fundido;

T_M - Temperatura do molde;

V_i - Velocidade de injeção do policarbonato.

Já a análise de regressão linear múltipla realizada levando-se em consideração apenas os parâmetros resultantes da simulação em Moldflow resultou em um modelo com um valor de R-quadrado de mais de 65%, podendo, portanto, ainda ser considerado um bom ajuste, mesmo se comparado ao primeiro modelo que levou em consideração ambos, variáveis do processamento e parâmetros resultantes da simula/cão do processo de sobreinjeção. O modelo resultante desta regressão é apresentado na equação 4.5 e o resumo da análise de variância na tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow obtida no software Satatgraphics Centurion.

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste T	Valor P
CONSTANTE	-692,493	265,804	-2,60527	0,0165
área de remelt	-1,49874	1,08399	-1,38261	0,1813
índice térmico	-1106,7	685,798	-1,61374	0,1215
temperatura da interface	9,75648	4,60253	2,11981	0,0461
temperatura da pele	-0,299791	0,242341	-1,23706	0,2297
temperatura de massa	2,45419	0,952612	2,57627	0,0176

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Razão F	Valor P
Modelo	21991,9	5	4398,38	7,92	0,0003
Residuo	11667,5	21	555,594		
Total (Corr.)	33659,4	26			

R-quadrado	R-quadrado ajustado para GL	Erro padrão	Erro médio absoluto	Teste Durbin-Watson	autocorrelação
65,3366	57,0834	23,5711	16,1145	1,94544 (P=0,4043)	0,0230689

$$F_A = -692,493 - 1,49874*A_{remelt} - 1106,7*Y_c + 9,75648*T_i - 0,299791*T_s + 2,45419*T_b \quad Eq. (4.5)$$

Onde:

F_A - Força de adesão entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato;

- A_{remelt} - Área de “amolecimento” do inserto de ABS resultante do processo de sobreinjeção pelo policarbonato;
- Y_c - Índice térmico do núcleo;
- T_i - Temperatura da interface entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em policarbonato;
- T_s - Temperatura da pele do policarbonato fundido;
- T_b - Temperatura de massa do policarbonato fundido na região de união entre inserto e componente sobreinjetado;

4.3.2 Correlação entre os Parâmetros das Simulações no Moldflow e as Forças de Adesão Obtidas nos Ensaios de Tração para o Experimento Fatorial SAN/ABS

Na equação 4.6 é exposto o modelo estatístico resultante da análise de regressão linear múltipla que estabelece a correlação entre a força de adesão, obtida nos ensaios de tração, e os parâmetros de análise de fluxo obtidos no Moldflow.

$$F_A = -685,908 + 0,333434*A_{remelt} - 403,818*Y_c - 1,31859*T_i + 3,12584*T_b + 7,16958*T_s \quad Eq. (4.6)$$

Onde:

- F_A - Força de adesão entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em estireno acrilonitrila;
- A_{remelt} - Área de “amolecimento” do inserto de ABS resultante do processo de sobreinjeção pelo estireno acrilonitrila;
- Y_c - Índice térmico do núcleo;
- T_i - Temperatura da interface entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em estireno acrilonitrila;
- T_s - Temperatura da pele do estireno acrilonitrila fundido;
- T_b - Temperatura de massa do policarbonato fundido na região de união entre inserto e componente sobreinjetado;

Na tabela 4.19 é apresentado o resumo da análise de variância resultante do software Statgraphics Centurion, onde se pode observar que o valor do teste P para o modelo é muito menor que 0,05, indicando que a correlação entre as variáveis independentes da equação 4.6 e a força de adesão F_A é estatisticamente significativa e que o modelo explica, segundo o valor de R-quadrado, mais de 90% da

variabilidade ocorrida nos valores da força de adesão, indicando que o modelo apresenta uma excelente correlação com os valores de força de adesão medidos nos ensaios de tração.

Tabela 4.19 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow obtida no software Satatgraphics Centurion.

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste T	Valor P
CONSTANTE	-685,908	82,2652	-8,33777	0,0000
Aérea de remelt	0,333434	0,685546	0,486377	0,6317
Índice Térmico	-403,818	107,854	-3,74413	0,0012
Temperatura da interface	-1,31859	0,582419	-2,26398	0,0343
Temperatura de massa	3,12584	0,296057	10,5582	0,0000
Temperatura Média da Pele	7,16958	1,72735	4,15062	0,0005

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Razão F	Valor P
Modelo	41615,6	5	8323,12	39,37	0,0000
Residuo	4440,1	21	211,433		
Total (Corr.)	46055,7	26			

R-quadrado	R-quadrado ajustado para GL	Erro padrão	Erro médio absoluto	Teste Durbin-Watson	autocorrelação
90,3593	88,0639	14,5407	9,92922	11,93847 (P=0,3044)	0,0209891

De acordo com o resumo da análise de variância (Tabela 4.18) pode-se ainda, em função do valor do teste P ser muito maior que 0,05, para os parâmetros avaliados, inferir que a variável área de “amolecimento” (*remelt*) (valor P = 0,6317) não exerce efeitos significativos na alteração da força de adesão obtida com o modelo de regressão podendo, portanto, ser suprimida deste.

O modelo obtido na regressão linear apresentado na equação 4.7, que leva em consideração apenas as variáveis do processo de sobreinjeção apresentou, por sua vez, um valor de R-quadrado maior que 91%, estando muito próximo daquele obtido anteriormente.

$$F_A = -601,274 + 3,17111 \cdot T_F + 0,347778 \cdot T_M + 0,438148 \cdot V_i$$

Eq. (4.7)

Onde:

F_A - Força de adesão entre o inserto de ABS e o componente sobreinjetado em estireno acrilonitrila;

T_F - Temperatura do estireno acrilonitrila fundido;

T_M - Temperatura do molde;

V_i - Velocidade de injeção do estireno acrilonitrila.

Tabela 4.20 - Resumo da análise variância para a regressão linear múltipla para a correlação entre a força de adesão e os parâmetros de fluxo do Moldflow obtida no software Satatgraphics Centurion.

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Teste T	Valor P
CONSTANTE	-601,274	53,3304	-11,2745	0,0000
temperatura do fundido	3,17111	0,208818	15,186	0,0000
Temperatura do molde	0,347778	0,208818	1,66546	0,1094
Velocidade de injeção	0,438148	0,208818	2,09823	0,0471

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Razão F	Valor P
Modelo	41993,9	3	13998,0	79,26	0,0000
Residuo	4061,8	23	176,6		
Total (Corr.)	46055,7	26			

R-quadrado	R-quadrado ajustado para GL	Erro padrão	Erro médio absoluto	Teste Durbin-Watson	autocorrelação
91,1807	90,0303	13,2891	9,87503	2,04388 (P=0,5095)	-0,0356094

Da mesma forma como no modelo anterior, este se apresentou estatisticamente significativo apresentando um excelente ajuste dos dados experimentais obtidos nos ensaios de tração.

Considerou-se a apresentação de um terceiro modelo que incluísse ambos os parâmetros, da simulação do processo de sobreinjeção e as variáveis do processamento, desnecessária, por apresentar resultados semelhantes aos obtidos nos dois modelos apresentados anteriormente. Desta forma, optou-se por suprimir aqui sua descrição.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve como objetivo principal a investigação do processo de sobreinjeção em moldes produzidos pelo vazamento de material compósito, a base de resina epóxi e carga de alumínio em pó, enfocando o efeito das macrovariáveis de processamento na adesão entre os componentes dos produtos obtidos.

Para tanto, foram realizados experimentos para a caracterização do efeito das variáveis de processo na força de adesão entre os componentes de corpos de prova produzidos por sobreinjeção, nos quais as condições experimentais seguiram um delineamento estatístico obtido com o *software* Statgraphics Centurion. Procurou-se também, por meio de simulações em computador no *software* Moldflow®, avaliar os efeitos das variáveis de processamento nos resultados de análises do processo de sobreinjeção e correlacioná-los com os resultados dos ensaios de caracterização da força de adesão. Por último, os resultados foram avaliados segundo seu significado estatístico, mediante o uso do *software* Statgraphics Centurion, onde os efeitos das variáveis foram investigados.

Desta forma, baseado nos objetivos e no escopo desta tese, chegou-se às seguintes conclusões:

Critérios de seleção de materiais termoplásticos para o processo de sobreinjeção

- Os critérios de seleção dos polímeros a serem utilizados como componentes de um produto produzido por sobreinjeção em moldes fabricados pelo vazamento de resinas epóxi mostrou-se coerente com os critérios aplicados à seleção de materiais para a produção destes produtos em moldes de aço, como foi possível observar no levantamento bibliográfico realizado neste trabalho.
- As características apresentadas por moldes fabricados por vazamento, como menores temperaturas de trabalho (indicada pela T_g da resina epóxi), módulos de elasticidade dureza e tenacidade, tornam necessária a utilização de termoplásticos com maiores índices de fluidez, em virtude das maiores solicitações impostas durante o preenchimento da cavidade encontradas no processamento de peças com paredes finas, como pressões e temperaturas elevadas.

Influência das macrovariáveis do processo na adesão

- A temperatura do fundido foi a macrovariável com efeitos mais significativos sobre as forças de adesão obtidas nos ensaios de tração, observando-se uma correlação direta entre o aumento da temperatura do fundido e a força de adesão entre o inserto e o componente sobreinjetado.
- O aumento da força de adesão decorrente do aumento da temperatura de injeção deve-se, provavelmente, ao processo interdifusão das moléculas dos polímeros utilizados, já que um aumento da temperatura do fundido produz um aumento do grau de agitação molecular, que associado à afinidade química existente entre os termoplásticos utilizados resultou no incremento da difusão das macromoléculas.
- O aumento do tempo de resfriamento do termoplástico, quando da utilização de temperaturas de injeção mais elevadas até a temperatura de transição vítrea (T_g) do mesmo, como referido por MI *et al.* (1996) e GUO *et al.* (2004), favorece o processo de interdifusão das macromoléculas, já que o tempo disponível para este fenômeno é aumentado produzindo, conseqüentemente, os mesmos efeitos na força de adesão observada.
- A temperatura do molde também exerceu efeitos significativos sobre a adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados em PC e SAN, possuindo, igualmente, uma correlação direta com os valores de força de adesão obtidos nos ensaios de tração.
- A contribuição do aumento da temperatura do molde para aumento da força de adesão foi resultante da diminuição da taxa de resfriamento do polímero moldado durante o processo de sobreinjeção, garantindo uma maior mobilidade das moléculas por maiores períodos de tempo, favorecendo, desta forma, o processo de interdifusão molecular das macromoléculas.
- Os efeitos exercidos pela velocidade de injeção, mediante a análise estatística dos dados dos ensaios de tração, revelaram que esta variável não afetou significativamente a adesão entre os insertos e os componentes sobreinjetados, contrariando parcialmente os resultados esperados para esta variável sobre a adesão entre os componentes do corpo de prova produzido por sobreinjeção.

- Diferentemente da formação de linhas de solda em peças moldadas por injeção, a pressão de recalque não contribuiu de forma estatisticamente significativa para o aumento da adesão entre o inserto de ABS e os componentes sobreinjetados em PC e SAN.
- Analogamente à pressão de recalque, o tempo de recalque também não exerceu efeitos significativos sobre a adesão entre os insertos de ABS e os componentes sobreinjetados em PC e SAN.
- Os efeitos não significativos dos tempos e pressões de recalque podem ser atribuídos ao fato do fluxo do polímero durante a fase de recalque do processo de sobreinjeção ocorrer ao longo da região central (ao longo da espessura) da cavidade do molde, não entrando em contato com o inserto de ABS e, desta forma, não contribuindo diretamente para o processo de difusão molecular e aumento da força de adesão.

Emprego dos moldes produzidos por VRE no processo de sobreinjeção

- Como referido em trabalhos anteriores, o maior desafio para o emprego comercial de moldes produzidos pelo vazamento de resinas epóxi ao processo de injeção e sobreinjeção está na precisão da fabricação e montagem dos insertos, de modo a garantir as tolerâncias dimensionais de projeto.
- O emprego de moldes produzidos por vazamento encontrou limitações especialmente no que tange à variação das condições de moldagem empregadas no processo de sobreinjeção, pois, em decorrência das propriedades mecânicas das resinas epoxídicas, condições de preenchimento menos severas, especialmente menores velocidades de injeção, foram obrigatoriamente utilizadas.
- Apesar dos resultados encontrados nas simulações do processo de sobreinjeção apontarem para uma pequena contribuição da velocidade de injeção na adesão entre os componentes dos corpos de prova, as limitações impostas pelas características das resinas epoxídicas às janelas de processamento empregadas, dificultaram uma avaliação mais adequada das velocidades de injeção. Desta forma, não foi possível a exploração das potencialidades máximas da máquina injetora no que se refere a esta macrovariável do processo.
- Mesmo levando em consideração as limitações dos moldes produzidos por vazamento, o seu emprego assume uma importância fundamental no processo de desenvolvimento de

novos produtos, especialmente em decorrência da facilidade de fabricação, possibilidade de fácil alteração da geometria do produto e custo relativamente baixo associado à sua produção.

Investigação dos parâmetros de moldagem por sobreinjeção em *softwares CAE*

- Os resultados das análises para os índices térmicos resultantes no processo de sobreinjeção com o PC e o SAN mostraram que, de maneira análoga aos resultados de tração, apenas a temperatura de injeção e do molde exerceram efeitos estatisticamente significativos na variação deste parâmetro avaliado por meio das simulações.
- As macrovariáveis velocidade de injeção, pressão e tempo de recalque não apresentaram influências estatisticamente significativas na variação dos índices térmicos estimados com o auxílio das simulações em *software CAE*.
- Verificou-se que o efeito não significativo da velocidade de injeção sobre os índices térmicos resultou da pequena influência da dissipação viscosa, resultante do fluxo cisalhante durante o processo de moldagem, na variação da temperatura dos polímeros.
- Não foi observado qualquer efeito significativo das macrovariáveis de processo investigadas na área de amolecimento do inserto de ABS.
- Foi observado nas análises estatísticas que a única variável a exercer efeitos significativos na temperatura de massa foi a temperatura do fundido, resultado que já era esperado e encontra-se de acordo com verificações anteriores.
- A velocidade de injeção, apesar de exercer influência na dissipação viscosa (geração de calor por atrito) do polímero, não exerceu qualquer efeito significativo na temperatura de massa observada nos resultados das simulações em *software CAE*.
- Verificou-se que a temperatura da interface sofreu efeitos significativos apenas da temperatura de injeção e do molde, não sendo afetada pela velocidade de injeção.
- Com relação à temperatura da pele uma pequena discrepância entre os resultados dos experimentos foi encontrada para a sobreinjeção dos insertos de ABS com policarbonato, onde apenas exerceu efeitos significativos a temperatura do fundido, sendo que nos demais experimentos observou-se uma influência estatística da temperatura do fundido e do molde, sem que a velocidade de injeção exercesse qualquer influência significativa.

Correlação entre os resultados das simulações em *software* CAE e os ensaios de tração

- A correlação entre a força de adesão e os parâmetros do escoamento do polímero, obtidos mediante simulações em *software* CAE, por meio de uma análise de regressão múltipla mostrou-se mais precisa (R quadrado de mais de 65%), quando comparada à regressão múltipla realizada com as macrovariáveis de processo (R quadrado 58,9%) para o experimento fatorial completo PC/ABS.
- O modelo estatístico obtido por meio de regressão linear levando em consideração as macrovariáveis de processo e os parâmetros das simulações em *software* CAE apresentaram uma precisão levemente superior (R quadrado de 68%) quando comparados à regressão com os parâmetros das simulações (R quadrado de mais de 65%), demonstrando que a correlação estabelecida apenas com os parâmetros das simulações proporciona um bom ajuste aos dados experimentais.
- As análises de correlação para o experimento fatorial completo SAN/ABS, por meio de regressões múltiplas mostrou que tanto para as macrovariáveis de processo quanto para os parâmetros resultantes da simulação em *software* CAE, os valores de R quadrado atingiram mais de 90%, demonstrando que ambos os conjuntos de variáveis fornecem excelentes ajustes aos valores experimentais de forças de adesão.

Recomendações de projeto importantes para o sucesso do processo de sobreinjeção em moldes fabricados por vazamento de resinas epóxi

- Pode-se comprovar, por meio das investigações aqui realizadas, que recomendações anteriores relativas ao projeto de moldes fabricados pelo vazamento de resinas epoxídicas demonstrou uma boa aplicabilidade no projeto dos moldes para a moldagem por sobreinjeção.
- Considerações específicas devem ser estabelecidas em relação ao acabamento superficial dos moldes, que para o caso da produção de peças com alta transparência ainda carecem de um maior desenvolvimento dos compósitos e das técnicas de vazamento, visando a produção de moldes com acabamentos superficiais com menores rugosidades e defeitos.

- Ficou evidente das investigações que moldes fabricados por vazamento possuem limitações quanto ao emprego com materiais que possuem maiores temperaturas de processamento, ou requeiram altas velocidades de injeção.
- O uso de raios de arredondamento nos pontos de injeção bem como em regiões com cantos retos é fundamental para o aumento da vida útil da ferramenta, em virtude das altas solicitações impostas e a tendência de quebra destas regiões.
- O desenvolvimento e aplicação de compósitos com maiores rigidez e tenacidade apresenta-se necessário em virtude das características de escoamento encontrada no processo de sobreinjeção, sobretudo no preenchimento de componentes com paredes finas, onde as solicitações térmicas e mecânicas sobre os moldes são bastante elevadas.

5.1 Contribuição científica do trabalho

Acredita-se que o presente trabalho tenha sido bem sucedido em preencher uma lacuna importante no desenvolvimento e entendimento do processo de sobreinjeção. A metodologia adotada permitiu a exploração de forma sistematizada do processamento e dos efeitos de suas macrovariáveis nos insertos sobreinjetados. A utilização de análises estatísticas, por sua vez, permitiu elucidar várias questões relativas aos efeitos das variáveis tanto dos resultados dos ensaios de tração quanto na simulação do processo em *softwares* CAE comerciais.

Por fim, espera-se que as investigações e contribuições apresentadas pelas investigações aqui realizadas apresentem grande relevância no âmbito da moldagem por injeção e sobreinjeção, fornecendo bases para o desenvolvimento de novos produtos e para a melhoria da qualidade dos componentes já produzidos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nas discussões apresentadas e na experiência adquirida ao longo do trabalho, a seguir são resumidas sugestões para complementação desta tese e continuidade da linha de pesquisa.

- 1 Continuidade das investigações do processo de adesão em moldes de aço, utilizando a mesma geometria de corpo de prova sugerida neste trabalho, variando, contudo, as

macrovariáveis de processo dentro de janelas de processamento mais amplas, principalmente no que tange às velocidades de injeção.

- 2 Investigação do efeito da afinidade química, medida por meio do parâmetro de solubilidade de Hildebrand, na força de adesão em termoplásticos parcialmente miscíveis.
- 3 Utilização do parâmetro de solubilidade de Hildebrand nas análises estatísticas de regressão múltipla para a obtenção de modelos estatísticos mais abrangentes, que envolvam tanto as macrovariáveis de processo quanto a afinidade química entre os polímeros envolvidos no processo de sobreinjeção.
- 4 Investigação por meio de ensaios de caracterização da zona de união entre os insertos e os componentes sobreinjetados para a comprovação ou refutação da predominância ou não do efeito do processo de interdifusão molecular na adesão entre os componentes unidos pelo processo de sobreinjeção.
- 5 Avaliação de outras resinas epoxídicas e de seu desempenho no processo de moldagem por sobreinjeção no que se refere ao acabamento superficial das peças moldadas e vida útil dos moldes com elas produzidos.
- 6 Investigação do processo de sobreinjeção de insertos termoplásticos com materiais sem afinidade química e com altos índices de fluidez, por meio da ancoragem mecânica, procurando-se reduzir a espessura da camada sobreinjetada visando o aumento de sua transparência.

6 Referências Bibliográficas

- ADVANCED CAE TECHNOLOGY. **C-Mold Design Guide: A Resource for Plastics Engineers**. Ithaca, 1997. 226 p.
- BAIJAL, M.D. **Plastic Polymer Science and Technology**. Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, 1982.
- BEAL, V. E. **Avaliação do Uso de Insertos Obtidos por Estereolitografia na Moldagem de Pós-Metálicos por Injeção**. 2002. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2003.
- BIRLEY, A.W., HAWORTH, B., BATCHELOR, J. **Physics of Plastics**. Munich: Hanser, 1991. 528 p.
- BRAUN, H, ENEWOLDSEN, P. In-Mould Decoration Application Technology Information. **Plast Europe**, 1999.
- CANDAL, M. V., TERIFE GORDILLO, SANTANA O. Como as Condições de Processo Afetam a Adesão entre Polímeros na Injeção de Múltiplos Materiais. **Plástico Industrial**. Ano X, no. 115, págs. 32 à 43. Março 2008.
- CARELLA, A. R, ALONSO, C., MERINO, J. C., PASTOR, J. M. Sequential Injection Molding of Thermoplastic Polymers: Analysis of Processing Parameters for Optimal Bonding Conditions. **Polymer Engineering and Science**. Novembro 2002.
- CAVALHEIRO, A. Z. **Estudo das Variáveis do Controle do Processo de Moldagem de Termoplásticos por Injeção em Ferramentas Fabricadas por Estereolitografia**. 2004. Qualificação (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CHEN, S.C.; JONG, W.R.; CHANG, Y.P.; KANG, Y.; PENG, H.S.; HUANG, L.T.; YANG, L.K.; CHANG, C.T.; LUO R.C. Structure performance of thin-wall injection molded parts. In: ANTEC 2001, Dallas. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 2001.
- CHEN, S.C.; PENG, H.S; HUANG, L.T.; CHANG, C.T.; WEI, D.Y; RUO R.C. Thin-wall injection moulding. In: ANTEC, 2000, Orlando. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 2000.
- CHIEH, T. L., NARASIMHAN, B., A New Kinetic Model for Interdiffusion at Semicrystalline Polymer Interfaces. **POLYMER**. Vol. 46, págs. 2266 à 2275, 2005.
- CHUNG S.I., IM, Y.G., JEONG H.D, NAKAGAWA T. The effects of metal filler on the characteristics of casting resin for semi-metallic soft tools. **Journal of Materials Processing Technology**. Volume 134, Number 1, March 2003, págs. 26 à 34.
- COXE, M.; BARRY, C.M; BANK, D.; NICHOLS, K. The establishment of a processing window for thin wall injection moulding of syndiotactic polystyrene. In: ANTEC, 2000, Orlando. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 2000.
- DAWSON, E.K., MUZZY, J.D. The effect of rapid prototype tooling on final product properties. In: ANTEC, 1999, New York. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 1999.
- DUSEL, K.H., ESCHL, J., EYERER, P., LÜCK, T. Rapid Tooling: Simulation and Application of the Injection Moulding Process. In: 7TH EUROPEAN CONFERENCE ON RAPID PROTOTYPING AND MANUFACTURING, 1998, Aachen.

- FERREIRA, A. C.;VANDRESEN, M. O uso da técnica do núcleo perdido na ferramentaria rápida com estereolitografia. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2000, Natal. **Anais...** Natal: Conem 2000, vol.1, págs.71 à 78.
- FOGGIATTO, J. A. **Utilização do Processo de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) na Fabricação Rápida de Insertos para a Injeção de Termoplásticos.** 2004. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- GEDEON, B. J., MARTIN, M. A. Overmolding of TPES - design of experiments to determine influential factors. **Structural Plastics 2000: 28th Annual Conference and New Product Design Competition of SPI's Structural Plastics Division.** Vancouver; Canada; 26 à 28 Mar. 2000, págs. 27 à 31.
- GOMIDE, R. B. **Fabricação de Componentes Injetados com o Uso de Insertos de Resina Termofixa Produzidos por Estereolitografia.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 2000.
- HARRIS, R. The Injection Moulding of PEEK using Stereolithography Moulds. **Rapid Prototyping & Tooling - Industrial Applications**, págs.6 à 7. 2000.
- HARRIS, R.A, N., DICKENS, P. A Determining, Understanding & Controlling the Morphology of Injection Moulded Parts Produced in Stereolithography Moulds. In: ANTEC, 2003, Nashville. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 2003.
- HARRIS, R.A., DICKENS, P.M. The selection of mould design variables in direct stereolithography injection mould tooling. In: ANTEC, 2001, Dallas. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 2001.
- HAYDEN K.; ENGELMANN, P; DEALEY, R.; MONFORE, M. Mold wear vs. wall thickness: critical information for thin wall molding. In: ANTEC, 1999, New York. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 1999.
- HEMRICK, J. G., STARR, T. L., ROSEN, D.W. Release behavior for powder injection molding in stereolithography molds. **Rapid Prototyping Journal**, vol. 7, n.2, págs. 115 à 121, 2001.
- HOPKINSON, N., DICKENS, P. Predicting stereolithography injection mould tool behaviour using models to predict ejection force and tool strength. **Int'l J. of Production Research**, vol. 38, n. 16, págs. 3747 à 3757, 2000.
- HUANG M.C.; TAI, C.C. The effective factors in the warpage problem of an injection-moulded part with a thin shell feature. **Journal of Materials Processing Technology**, n.110, págs. 1 à 9, 2001.
- HUDACEK, L. How to Optimize Adhesion in Hard-Soft Overmolding. **Plastics Technology on Line.** 2007.
- JABBARI, E., PEPPAS, N. A., A Model for Interdiffusion at Interfaces of Polymers with Dissimilar Physical Properties. **POLYMER.** Elsevier. Vol. 36, n. 3, págs. 575 à 586, 1995.
- JENSEN, J. A., KOSARZYCKI, M. K., SEPE, M. P. Failure analysis of automotive assemblies - part I. **ANTEC 2002 Annual Technical Conference.** San Francisco, CA; USA; 5 à 9 May 2001. págs. 1 à 6. 2002.

- JESUS, M. S. **Desenvolvimento de um Compósito Polímero-Metal a Base de Epóxi para Aplicações em Moldes Rápidos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade Federal de Santa Catarina, Dezembro 2005.
- JOHANNABER, F., MICHAELI, W. **Handbuch Spritzgießen**. 2. Auflage. München. Carl Hanser Verlage, 2004.
- KUZMIK, J. J. **Electroless Plating: Fundamentals And Applications**. Noyes publications/William Andrew Publishing. Norwich, New York, 1990.
- LEAVERSUCH, R. Plastic-Metal Hybrids Momentum Is Building. **Plastics Technology**. Vol. 50, no. 7, pp. 43, 45. July 2004.
- LENCINA, D C. **Fabricação rápida de ferramentas produzidas por estereolitografia e recobertas com níquel-fósforo depositado por eletroless - com estudos de caso em moldagem de plásticos por injeção e fundição em areia aglomerada por resinas do tipo caixa fria**. 2004. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- LI, Y., GARGIULO, E.P., KEEFE, M. Studies in Direct Tooling Using Stereolithography. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, vol. 122, págs. 316 à 322, 2000.
- LIAO, S.J.; CHANG, D.Y.; CHEN, H.J; TSOU, L.S.; HO, J.R; YAU, H.T.; HSIEH, W.H.; WANG, J.T.; SU Y.C. Investigation of optimum conditions of thin-wall injection moulding process. In: ANTEC 2001, Dallas. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 2001.
- LIAO, S.J; CHANG, D.Y.; CHEN, L.S.; TSOU, J.R.; HO, J.R.; YAU, H.T.; HSIEH, W.H. Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts. **Polymer Engineering and Science**, vol.44, n.5, págs. 917 à 928, 2004.
- LIU, C.; MANZIONE, L. T. Process Studies in Precision Injection Molding: Process parameters and precision. **Polymer Engineering and Science**, vol.36, n.1, págs. 1 à 9, 1996.
- MALLOY, R. **Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction**. Hanser Gardner Publishers, 1994.
- MALONEY, R.P.; POSLINSKI, A.J. Viscosity pressure dependence and material degradation effects on thinwall mold filling simulation. In: ANTEC, 1998, Atlanta. **Proceedings...** Brookfield: Society of Plastics Engineering, 1998.
- MENGES, G., MICHAELI, W., MOHREN, P. **How to Make Injection Molds**. 3rd edition. München. Hanser Gardner Publishers, 2001.
- MICHAELI, W. **Plastics Processing: An Introduction**. München. Hanser Gardner Publishers, 1995.
- MICHAELI, W., LINDNER, F. Influence of Mould Materials on the Morphological and Mechanical Properties of Injection-Moulded Prototypes. 2000. Institut für Kunststoffverarbeitung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 52056 Aachen, Germany.
- MOLDFLOW®. **Advanced Simulation: MPI/Flow. Training Manual**. Moldflow Pty, Ltd, 2004.
- PACKHAM, D. E., **Handbook of Adhesion**, 2nd edition. US: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- PARADIS, R. A comparison of the conventional machined aluminium and rapid epoxy Shell prototype mould building process. **Journal of Injection Moulding Technology**, vol. 2, n.1, págs. 8 à 17, 1998.

- PHILLIP, J. C. **Polymer-Polymer Adhesion in Melt-Processed Multilayered Structures**. Tese. Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota. June 2002.
- POCIUS, A. V., CHAUDHURY, M. **Adhesion Science and Engineering – 2 Surfaces, Chemistry and Applications** 1st edition. Netherlands: Elsevier, 2002.
- POLOSKY, Q.F., MALLOY, R., STACER, R. A mechanical property performance comparison for plastics parts produced in epoxy tool and conventional steel tooling. In: ANTEC, 1998, Atlanta. Brookfield: Society of Plastics Engineering, págs.2972 à 2976, 1998.
- REES, H. **Mold Engineering**. 2nd edition. Hanser Gardner Publishers, 1994.
- RIBEIRO JUNIOR, A. S. **Proposta de utilização de ferramentas CAE no planejamento do processo de moldagem por injeção de termoplásticos em moldes de estereolitografia**. 2003. 133 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- ROSATO, D.V, ROSATO, D.V. **Injection Molding Handbook**. 2nd edition. New York: Chapman & Hall, 1995.
- ROUSE, A. E. Two-shot and overmolding technology for automotive applications using engineering thermoplastics. **Transactions: Journal of Materials & Manufacturing**. Vol. 111, no. 2002 Transactions, pp. 125-129. 2003.
- SABINO NETTO, A. C. **Proposta de sistemática para avaliação de soluções de projeto, de componentes moldados por injeção, auxiliadas por protótipos físicos**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Setembro 2003.
- SEIFFERT, S., OPPERMAN, W., Diffusion of Linear Macromolecules and Spherical Particles in Semi Dilute Polymer Solutions and Polymer Networks. **POLYMER**, vol. 49 págs. 4115 à 4126, 2008.
- SEPE, M. Adhesion failures in overmolding. **Injection Molding (USA)**. Vol. 8, no. 1, pp. 64, 66-68. Jan. 2000.
- SPERLING, L. H. **Introduction to Physical Polymer Science**. 4th edition. Lehigh University Bethlehem, New Jersey: Wiley Interscience. A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2006.
- STATGRAPHICS Centurion XV. User Guide. 2008
- TANTAKOM P., SCHOTT, N.R. Processing strategies for thin wall injection molding. In: ANTEC, 1998, Atlanta. **Proceedings...** Brookfield: Society of Plastics Engineering, 1998.
- TCHALAMOV, D. B., CUNHA, A. M. Structure development and mechanical properties of overmolded parts. ANTEC Conference 2003, pp. 725-729.
- TURNG, L. S. Special and Emerging Injection Molding Processes. **Journal of Injection Molding Technology**, vol. 5, n. 3, September, 2001.
- UMAMAHESWARAN, V., TRUESDAIL, A. New Weatherable Film Technology to Eliminate Painting of Automotive Exteriors. **Proceedings...** SAE. 2001-01-0443.
- VANDRESEN, M. **Aplicação da Técnica do Núcleo Perdido na Injeção de Peças Complexas, em Moldes de Ferramental Rápido, a Partir da Estereolitografia**. 2003. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- VARMA, R., LIU, D., VENKATQASURAMY, K. TPE Overmolding technology. In: ANTEC págs. 3051 à 3058, 2000.
- VILLAMIZAR, F. A. Y. **Moldes Rápidos Fabricados por Vazamento de Resina Epóxi/Alumínio: Investigação sobre o Processo de Fabricação e o Desempenho Termomecânico Durante a Injeção de Termoplásticos**. 2005. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- WOOL, R. P., Adhesion at Polymer–Polymer Interfaces: A Rigidity Percolation Approach. ELSEVIER. 2005.
- YAO D.; KIM, B. Thin-wall injection molding using rapidly heated molds. In: ANTEC 2003, Nashville. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 2003.
- YU, L.; JUANG, Y.J; KOELLING, K.W.; LEE, J. Thin wall injection molding of thermoplastic microstructures. In: ANTEC, 2000, Orlando. Brookfield: Society of Plastics Engineering, 2000.

Apêndice

Investigações Preliminares

1 Objetivos e Descrição do Procedimento Experimental

Com o objetivo de obter um entendimento inicial do comportamento do processo de sobreinjeção em moldes rápidos e de determinar estratégias para a investigação do tema proposto, foram realizados os seguintes estudos de caso preliminares:

- Injeção de peças de paredes finas em moldes de epóxi.
- Sobreinjeção de uma peça injetada de geometria simples em apenas um de seus lados.
- Recobrimento integral (sobreinjeção) de um inserto previamente injetado.

1.1 Experimento Preliminar 1 - Injeção de Peças de Paredes Finas em Moldes de Epóxi

Como mencionado no Capítulo 2, a injeção de peças com paredes finas configura-se, hoje em dia, como uma das principais vertentes do processo de moldagem por injeção, em decorrência das necessidades impostas pelo mercado consumidor.

Contudo, a inexistência de informações sobre o processamento de peças com paredes finas, bem como sua aplicação na sobreinjeção em insertos de plástico decorados, em moldes produzidos pelas técnicas de fabricação rápida, torna necessária a realização de investigações que gerem informações sobre esta aplicação.

Desta forma, o objetivo principal deste experimento foi o de realizar uma avaliação preliminar da aplicação de ferramental rápido, fabricado por meio de vazamento de resina epóxi, no processamento de peças com paredes finas (Figura 1) injetadas em polipropileno isotático (iPP), policarbonato (PC) e estireno acrilonitrila (ABS), apresentando a Figura 2 o molde resultante para a produção das peças de paredes finas. Como objetivos adicionais deste trabalho foram realizadas:

- Uma avaliação qualitativa da viabilidade de aplicação de ferramental rápido, fabricado por vazamento de resina epóxi, no processamento do polipropileno copolímero randômico, estireno acrilonitrila e policarbonato.

- Uma determinação das condições de moldagem necessárias para a injeção de materiais como o iPP , PC e SAN em moldes de paredes finas, fabricados em resina epóxi, utilizando o *software* CAE comercial Moldflow©.
- A avaliação, de forma preliminar e qualitativa, da influência do acabamento superficial do molde (rugosidade) na transparência dos polímeros injetados.

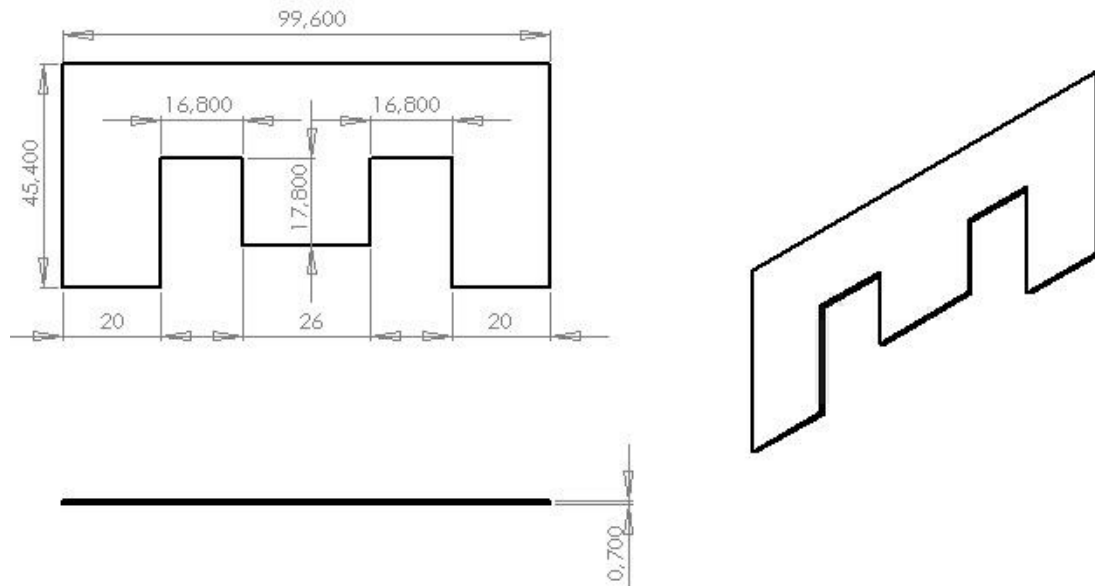


Figura 1 - Modelo geométrico da peça de paredes finas utilizada no primeiro estudo preliminar.



Figura 2 - Molde de paredes finas fabricado pelo processo de vazamento de resina epóxi.

Descrição do Procedimento Experimental Preliminar 1

Para a realização do presente estudo foram seguidas as seguintes etapas de trabalho:

- Projeto do produto e do molde de paredes finas, auxiliado pelo sistema CAE Moldflow, a partir de três geometrias previamente selecionadas, respeitando os seguintes critérios:
 - Limitação do tamanho do inserto, devido o tamanho do porta moldes existente.
 - Relação comprimento do caminho de fluxo/espessura de parede da peça de acordo com o critério estabelecido na revisão bibliografia deste trabalho.
- Seleção dos materiais a serem injetados de acordo com os critérios de:
 - Transparência.
 - Processabilidade.
 - Resistência à abrasão e risco.
 - Custo da matéria-prima.
- Simulação do preenchimento do molde com os polímeros pré-selecionados:
 - Realização da simulação do preenchimento do molde de paredes finas utilizando os materiais de interesse (PC, SAN, iPP).
 - Determinação das condições de preenchimento do molde de paredes finas.
 - Avaliação qualitativa, mediante a interpretação dos resultados das simulações, da viabilidade de injeção dos materiais citados em moldes obtidos por vazamento de resina epóxi com paredes finas.
- Avaliação do projeto do molde de paredes finas:
 - Escolha da geometria mais adequada baseada na interpretação dos parâmetros encontrados com o Moldflow.
- Fabricação do modelo da geometria definida via estereolitografia.
- Fabricação dos moldes pelo processo de vazamento de resina epóxi.
- Acabamento do molde (usinagem por fresamento e polimento com lixa da cavidade).
- Injeção dos polímeros pré-selecionados no molde de paredes finas.
- Avaliação qualitativa das peças injetadas e do molde após injeção:
 - Transparência das peças.
 - Problemas no processamento.
 - Efeitos dos materiais injetados na vida do molde.

1.2 Experimento Preliminar 2 - Sobreinjeção de uma Peça com Geometria Simples

Em virtude da falta de informações sobre o processo de sobreinjeção, utilizando ferramental rápido, desejou-se com este experimento o levantamento de dados preliminares, que pudessem ser utilizados como embasamento para investigações posteriores. Logo, o experimento aqui descrito teve como objetivo principal avaliar a aplicação de moldes fabricados em resina epóxi, no processo de sobreinjeção de um inserto de plástico, utilizando diferentes materiais de revestimento.

A geometria do corpo de prova, bem como o molde utilizado neste experimento, são apresentados na Figura 3 e 4, respectivamente. Foram sobreinjetados, portanto, neste experimento, os insertos com a geometria definida na Figura 3 com os polímeros iPP, SAN e PC, sendo o inerte fabricado em ABS.

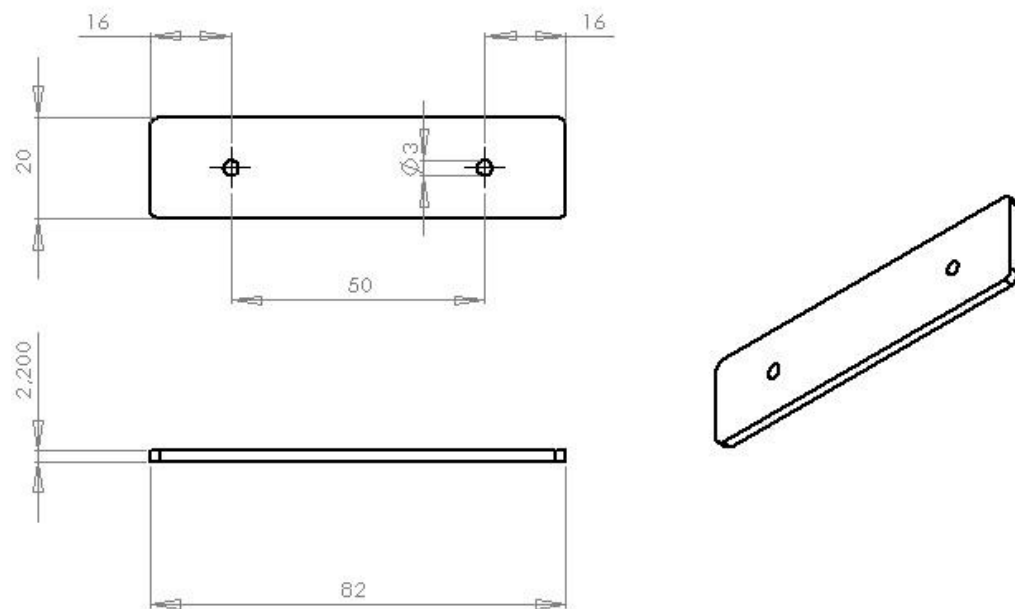


Figura 3- Geometria do inserto de plástico de geometria simples sobreinjetada no experimento preliminar 2.

A camada sobreinjetada, com o objetivo de atender aos requisitos de parede fina, teve como espessura 0,8mm, obtendo-se a relação comprimento do caminho de fluxo e espessura de parede de 1:100.

Figura 4

Para a produção dos componentes sobreinjetados os insertos mostrados na Figura 3 eram, posteriormente a sua produção, posicionados em um segundo molde (molde para o processo de

sobreinjeção) onde a camada de 0,8mm era sobreinjetada como mostra o modelo geométrico da figura 5.

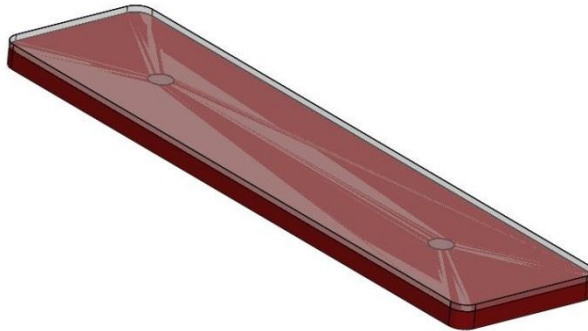


Figura 5 - Modelo geométrico co componente sobreinjetado.

Os objetivos adicionais do experimento foram:

- Avaliar, através da inspeção do componente final sobreinjetado e do molde, a possibilidade de se recobrir uma peça injetada (processo de sobreinjeção) com um polímero compatível, tendo o recobrimento como função, a proteção do inserto recoberto.
- Realizar uma avaliação qualitativa das características de adesão entre o polímero de recobrimento e a peça sobreinjetada.
- Investigar a possibilidade de recobrir um inserto de termoplástico com um outro polímero termoplástico sem afinidade química, utilizando para isso elementos de fixação que permitam a união mecânica entre as duas partes.
- Determinar as condições de moldagem para o processo de sobreinjeção em moldes rápidos utilizando o sistema CAE Moldflow.
- Determinar as limitações do processo de sobreinjeção em moldes rápidos.

Descrição do Procedimento Experimental 2

- Utilização de uma geometria padrão (Figura 3), já existente no laboratório, como inserto a ser sobreinjetado.
- Simulação do processo de injeção do revestimento para a determinação das condições de processamento.

- Fabricação do modelo da geometria definida via estereolitografia.
- Fabricação dos moldes para a injeção do inserto e para a sobreinjeção do inserto previamente moldado.
- Injeção dos insertos em ABS no molde da Figura 4.
- Posicionamento dos insertos no molde para a sobreinjeção da camada de revestimento.
- Sobreinjeção da camada de revestimento em SAN, iPP e PC com a posterior observação dos resultados qualitativos atingidos.
- Avaliação dos resultados práticos (peças injetadas) tendo como base adesão entre a camada de recobrimento e o inserto, e a qualidade geral da peça (deformações, amolecimento do material do inserto, etc).

1.3 Experimento Preliminar 3 - Sobreinjeção com Recobrimento Integral de um Componente de Termoplástico

Outra variante do processo de sobreinjeção, avaliada neste estudo, foi o recobrimento integral de inserto de plástico (envolvimento do inserto), ou seja, o componente de plástico utilizado como inserto tem todos os seus lados de interesse recobertos, com exceção de suportes de fixação no molde, pelo polímero sobreinjetado.

Nesta variante foi investigado não apenas o emprego de polímeros de recobrimento compatíveis quimicamente, como também o de polímeros não compatíveis, observando-se a possibilidade de união mecânica entre a camada sobreinjetada e o inserto de plástico.

Outra possibilidade que foi investigada neste estudo preliminar foi a de se recobrir, através da sobreinjeção, um inserto de plástico decorado por meio de metalização por *sputtering* com aço inox.

Portanto, os objetivos deste experimento foram:

- Avaliar a possibilidade de se recobrir integralmente uma peça injetada (processo de sobreinjeção) com um polímero compatível, tendo o recobrimento como função, a proteção do inserto.
- Avaliar qualitativamente as características de adesão entre o polímero de recobrimento e a peça sobreinjetada.
- Observar a possibilidade de recobrir integralmente um inserto com um polímero não compatível (sem afinidade química).

- Avaliar qualitativamente a viabilidade de utilizar a união mecânica (por meio de *features* de fixação) no processo de sobreinjeção de materiais não compatíveis.
- Investigar os efeitos do processo de sobreinjeção sobre o inserto de plástico (deformações e amolecimentos) e sobre o molde fabricado em resina epóxi (falhas por quebra do molde).
- Avaliar o processo de sobreinjeção sobre um inserto de plástico decorado por meio de metalização utilizando o processo de *sputtering* com aço inox, observando os efeitos produzidos no inserto e na camada decorada (falhas por arrancamento, amolecimentos e deformações).
- Determinar as limitações do processo de sobreinjeção em moldes rápidos, fabricados em resina epóxi.

Descrição do Procedimento Experimental 3

- Projeto de uma geometria para utilização como inserto a ser sobreinjetado (Figura 3).
- Fabricação do modelo via estereolitografia.
- Fabricação dos moldes para a injeção do inserto e para a sobreinjeção do inserto previamente moldado.
- Injeção dos insertos em ABS.
- Metalização de parte dos insertos injetados em ABS.
- Posicionamento dos insertos no molde para a sobreinjeção da camada de recobrimento.
- Sobreinjeção da camada protetora com a posterior observação dos resultados atingidos.
- Avaliação dos resultados práticos (peças injetadas) tendo como base adesão entre a camada de recobrimento e o inserto, e a qualidade geral da peça (deformações, amolecimento do material do inserto e arrancamento da camada metalizada).

2 Resultados dos Experimentos Preliminares

2.1 Experimento Preliminar 1 – Injeção em molde de paredes finas

Na primeira etapa deste estudo preliminar foi realizada a definição de uma geometria padrão de paredes finas. Como critérios para a determinação desta geometria, foram seguidas as restrições

impostas pela relação de caracterização de peças de paredes finas, apresentada na revisão bibliográfica (relação entre o comprimento do caminho de fluxo e espessura de parede de no mínimo 100), bem como o tamanho do inserto disponível (dimensões de 130mmx75mm). Desta forma, foram estudadas três geometrias que se enquadrassem nas restrições apresentadas, e que nas simulações de preenchimento demonstrassem a possibilidade de preenchimento do molde.

A combinação dos critérios acima expostos, associados às simulações de preenchimento realizadas no Moldflow, resultaram na geometria apresentada na Figura 6, escolhida para a realização da avaliação da injeção de peças de paredes finas em moldes produzidos por vazamento.

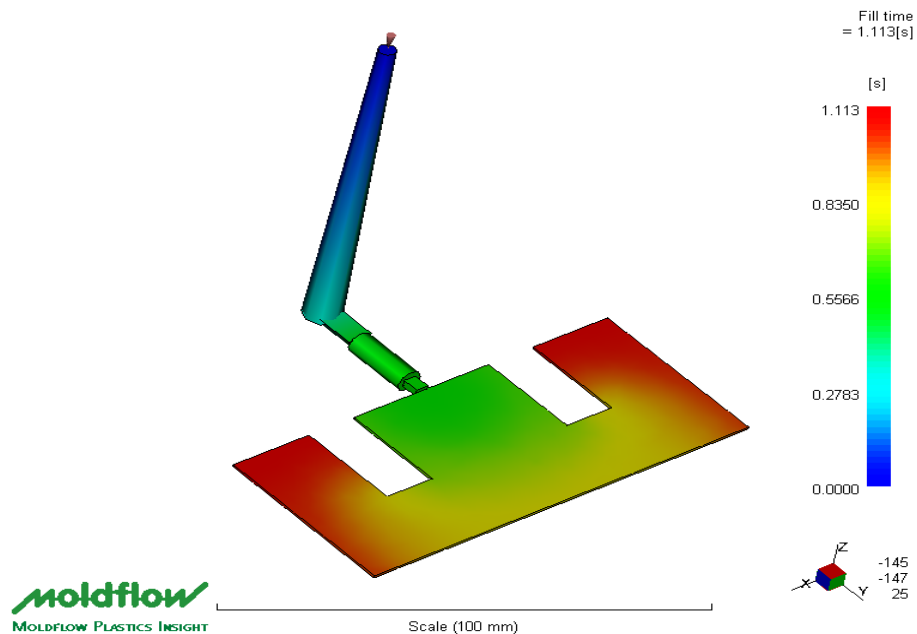


Figura 6 - Simulação do preenchimento (*fill time*) da geometria determinada a partir dos critérios de peças de paredes finas e dimensões do inserto disponível.

A definição dos polímeros utilizados nos experimentos seguiu os critérios julgados necessários para a aplicação apresentada nesta proposta de tese de doutoramento, e está apresentada no capítulo de materiais e métodos desta tese.

Além dos critérios de seleção mencionados, seguiu-se também, nos experimentos preliminares, o critério de disponibilidade dos materiais dentro do grupo Cimject.

Desta forma, as alternativas avaliadas para polímero de recobrimento foram:

- Policarbonato (PC) – *Lexan 141R da GE Plastics*.
- Copolímero estireno Acrilonitrilo (SAN) – *Lustran 5520 da Lanxess*.
- Polipropileno (iPP) – *RP 141 da Braskem Petroquímica*.

A partir da determinação da geometria e dos materiais a serem utilizados, foram realizadas as simulações do processo de injeção no sistema CAE Moldflow. Os resultados dessas simulações mostraram ser possível o preenchimento da cavidade com os polímeros pré-selecionados (SAN, PP randômico, PC), os quais são candidatos a materiais de recobrimento do inserto para o processo de sobreinjeção. A tabela 1 mostra os valores das principais variáveis de fluxo obtidos nas simulações de preenchimento.

Após esta etapa, realizou-se a fabricação do molde, apresentado na Figura 7, seguindo o procedimento descrito em VILLAMIZAR [2005].

Após as etapas de fabricação, acabamento e montagem do molde no porta-moldes, procedeu-se os ensaios práticos realizando-se a injeção dos polímeros pré-selecionados no molde de paredes finas (Figura 2).

Tabela 1 – Condições de processamento encontradas nas simulações (peça de parede fina) com o software Moldflow.

Condições de Processamento	Polímeros Injetados		
	PP	PC	SAN
Temperatura do Fundido [°C]	220	335	245
Pressão de injeção [MPa]	50,8	176,6	115
Tempo de injeção [s]	0,5	0,5	0,5
Temperatura na região do ponto de injeção [°C]	220	351	249
Temperatura máxima dentro da cavidade [°C]	220	351	250

Os resultados práticos da moldagem dos polímeros selecionados demonstraram que:

- Foi comprovada a possibilidade de injeção do polipropileno e do acrilonitrila butadieno estireno em um molde de paredes finas. A moldagem das peças em policarbonato foi prejudicada devido à quebra do molde, não sendo, portanto, possível a comprovação da injeção do mesmo. A Figura 3 apresenta as fotografias das peças injetadas após a sua desmoldagem.
- As características superficiais das peças produzidas são fundamentalmente dependentes do acabamento obtido nos moldes. Na Figura 7 pode-se observar que as peças possuem um bom nível de transparência, porém, apresentam marcas em decorrência do acabamento superficial do molde, principalmente devido à aplicação de desmoldante no modelo (segundo procedimento de fabricação de moldes rápidos pelo processo de vazamento). Para se obter,

desta forma, um aumento da transparência das peças, torna-se necessário o prosseguimento das investigações sobre a melhora do acabamento superficial produzido nos moldes rápidos.

- Com relação ao estado geral do molde após o processamento das peças, não foram observados danos significativos, excetuando na região do ponto de injeção, onde ocorreu uma pequena quebra que, todavia, não prejudicou nem a qualidade do produto injetado, nem a viabilidade do processamento neste molde.
- Devido às pressões elevadas, encontradas no processamento do estireno acrilonitrila, foi detectada uma alteração na espessura de parede na peça produzida neste material, indicando uma deformação do molde de epóxi. Este fato, contudo, não indica a inviabilidade da utilização destes moldes no processamento de peças de paredes finas, mas, evidencia a necessidade da continuação destes estudos, para que se busque um maior entendimento do problema.

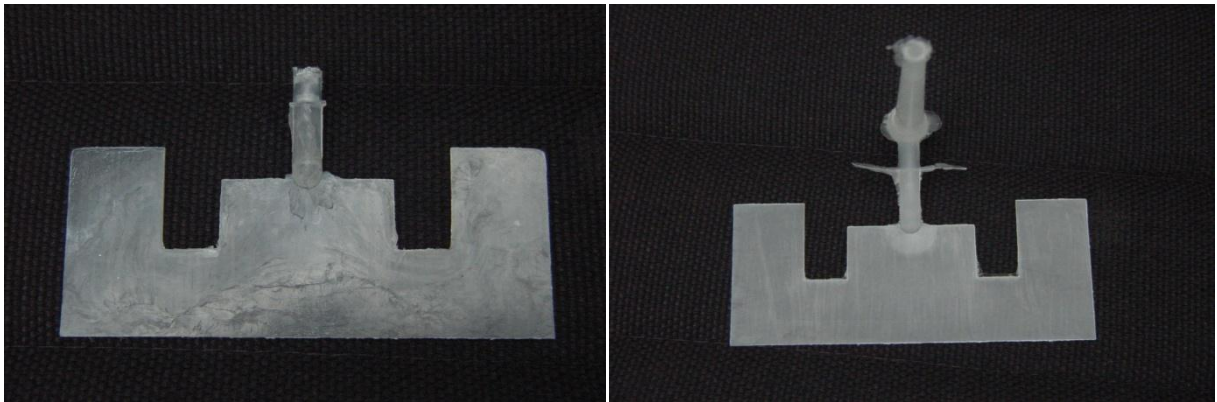


Figura 7 - Imagens das peças injetadas no molde de paredes finas; à esquerda peça injetada em estireno acrilonitrila e à direita em polipropileno randômico.

2.2 Experimento Preliminar 2 – Sobreinjeção de um inserto com geometria simples

No segundo experimento preliminar foi avaliada a possibilidade de se sobreinjetar um componente termoplástico previamente injetado, em apenas uma de seus lados. Foi utilizada neste estudo uma geometria padrão, desenvolvida dentro do próprio Cimject, e utilizada por VILLAMIZAR [2005]. A Figura 8 mostra o molde e o inserto injetado, sendo apresentado na Figura 9 o componente sobreinjetado.

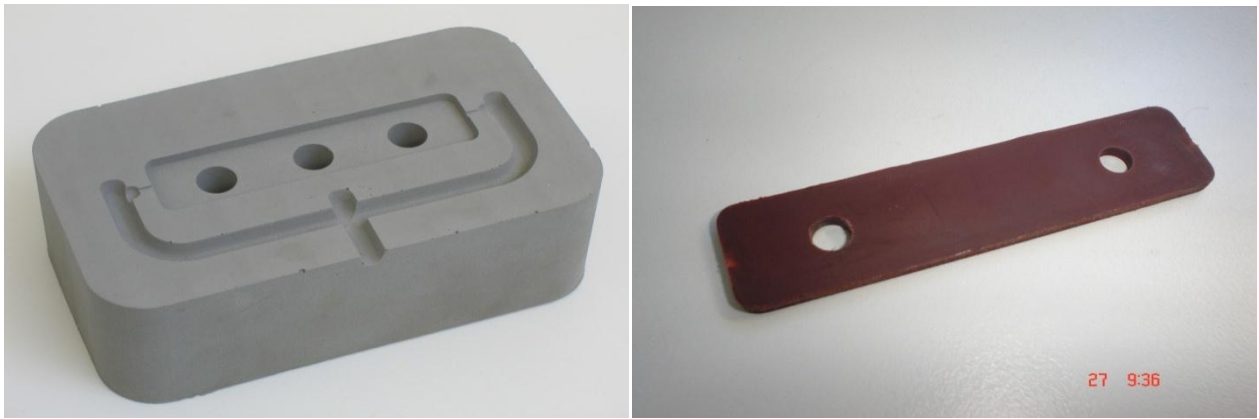


Figura 8 - Fotografias do molde rápido em resina epóxi e do inserto termoplástico nele injetado.

Investigou-se também, neste experimento, a possibilidade de combinar diferentes polímeros como materiais para a produção do inserto e da camada de recobrimento, verificando-se a influência da afinidade química no grau de adesão entre os mesmos, sendo definidas as seguintes combinações de materiais para inserto e camada sobreinjetada:

- Inserto de ABS com recobrimento em PC, SAN e PP
- Inserto de PE com recobrimento em PC, PP e SAN
- Inserto de PP com recobrimento em PP, SAN e PC



Figura 9 - Ilustração do inserto de ABS sobreinjetado PC.

Na primeira etapa do experimento foram realizadas as análises no sistema CAE Moldflow, para a determinação das condições de preenchimento do molde. Os resultados da análise encontram-se resumidos na tabela 2, sendo as imagens destas simulações apresentadas nas Figuras 10 a 12.

Tabela 2 – Condições de processamento encontradas nas simulações (processo de sobreinjeção) com o software Moldflow.

Condições de Processamento	Polímeros Sobreinjectados		
	PP	PC	SAN
Temperatura do Fundido [°C]	220	315	245
Temperatura do Molde [°C]	35	60	65
Pressão de injeção [MPa]	27,2	150	71
Tempo de injeção [s]	0,5	0,5	0,5
Temperatura na região do ponto de injeção [°C]	221	327	252
Temperatura máxima dentro da cavidade [°C]	221	327	252

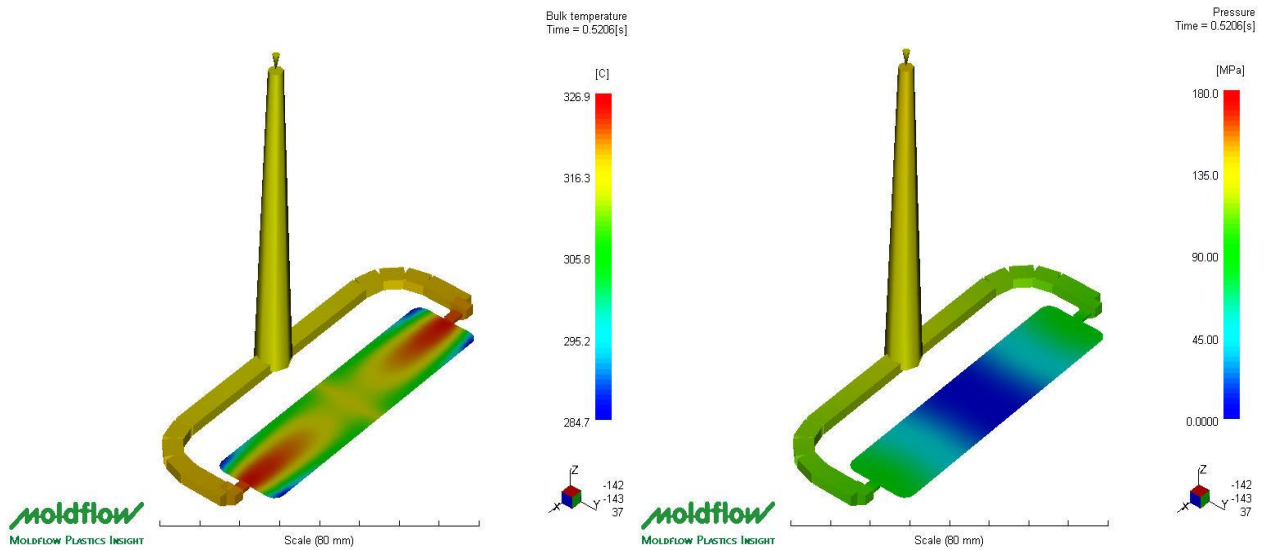


Figura 10 - Imagens das simulações de preenchimento obtidas no *software* Moldflow na injeção de PC. À esquerda os valores de temperatura e à direita os valores de pressão dentro da cavidade.

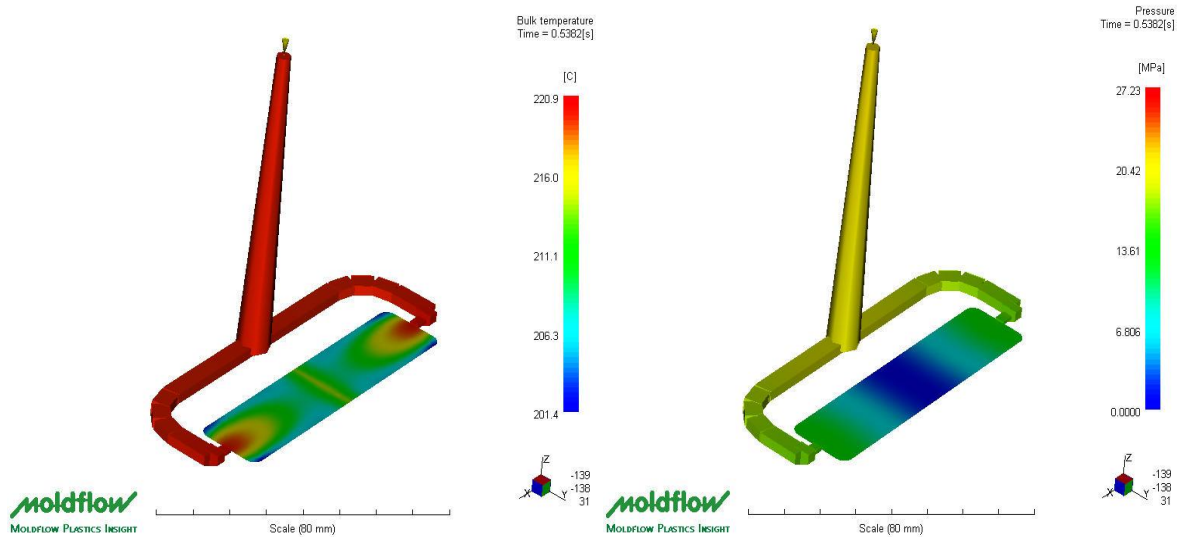


Figura 11 - Imagens das simulações de preenchimento obtidas no *software* Moldflow na injeção de PP. À esquerda os valores de temperatura e à direita os valores de pressão dentro da cavidade.

Como pode ser observado, na tabela 2, os valores de temperatura do polímero, na região do ponto de injeção, apresentam-se elevados, e em todos os casos excedem a temperatura de fusão do polímero utilizado para a fabricação do inserto.

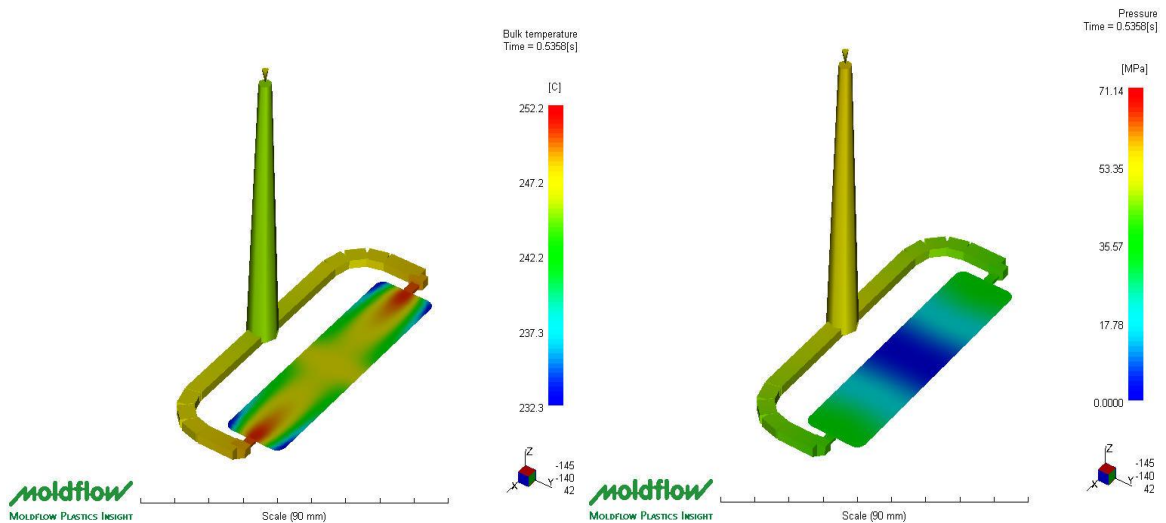


Figura 12 - Imagens das simulações de preenchimento obtidas no *software* Moldflow na injeção de SAN. À esquerda os valores de temperatura e à direita os valores de pressão dentro da cavidade.

Baseada nas condições descritas anteriormente (Tabela 2) foi realizada a moldagem das peças, sendo observados os seguintes resultados e conclusões:

- a – Foi observada uma boa adesão entre os insertos de ABS e os recobrimento de PC e uma adesão inferior entre os insertos de ABS e o recobrimento de SAN (Figura 9).
- b – Não foi observada qualquer adesão entre os insertos de ABS e o recobrimento de PP (Figura 13). O mesmo acontecendo entre os insertos de PP e PEAD e o recobrimento de SAN.

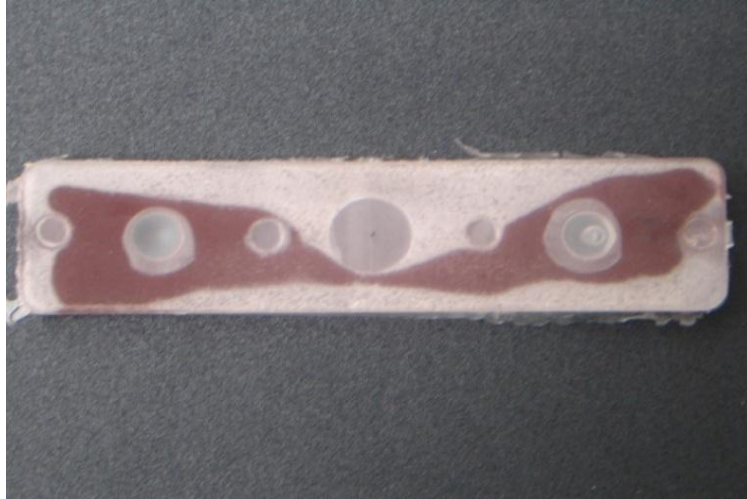


Figura 13 - Fotografia do inserto sobreinjetado evidenciando a ausência de adesão e separação entre o polímero do inserto (ABS) e o polímero sobreinjetado (polipropileno).

- c – Entre os insertos de PEAD e o recobrimento de PC observou-se uma adesão razoável, não havendo descolamento da camada de recobrimento.
- d – Tanto os recobrimentos em PC quanto os em SAN causaram danos, por amolecimento, aos insertos de ABS, PP e PEAD (Figura 14).



Figura 14 – Fotografia da peça sobreinjetada com PC, evidenciando o amolecimento sofrido pelo inserto de PEAD.

e – Verificou-se, em virtude do recobrimento ter sido realizado em apenas um dos lados, o empenamento das peças sobreinjetadas (Figura 15). Tal fato já era esperado, em virtude da contração, sofrida pela camada de recobrimento, em relação ao inserto sobreinjetado.

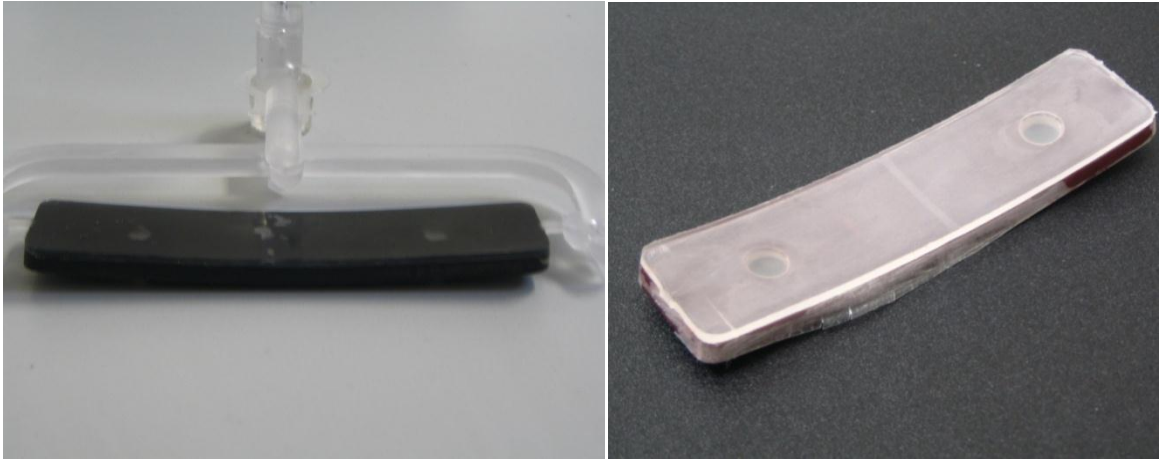


Figura 15 - Fotografias das peças sobreinjetadas mostrando o empenamento sofrido após a desmoldagem.

- f – O molde utilizado na produção dos insertos sofreu falhas catastróficas na linha de fechamento. Tal falha foi causada pelo acabamento superficial do molde que, em decorrência do processo de fabricação utilizado (usinagem), apresentava bolhas na superfície da cavidade. Desta forma, o polímero que penetrava nas bolhas produzia, durante a extração, o arrancamento de pequenas porções do molde, processo que se agravava ao longo dos ciclos.
- g - O molde utilizado no processo de sobreinjeção (Figura 16) não mostrou qualquer dano visível após a injeção das camadas de recobrimento, fato que se deve, provavelmente, ao bom acabamento obtido no mesmo, decorrente do processo de fabricação do molde, no qual foi utilizado um modelo fabricado por prototipagem rápida.

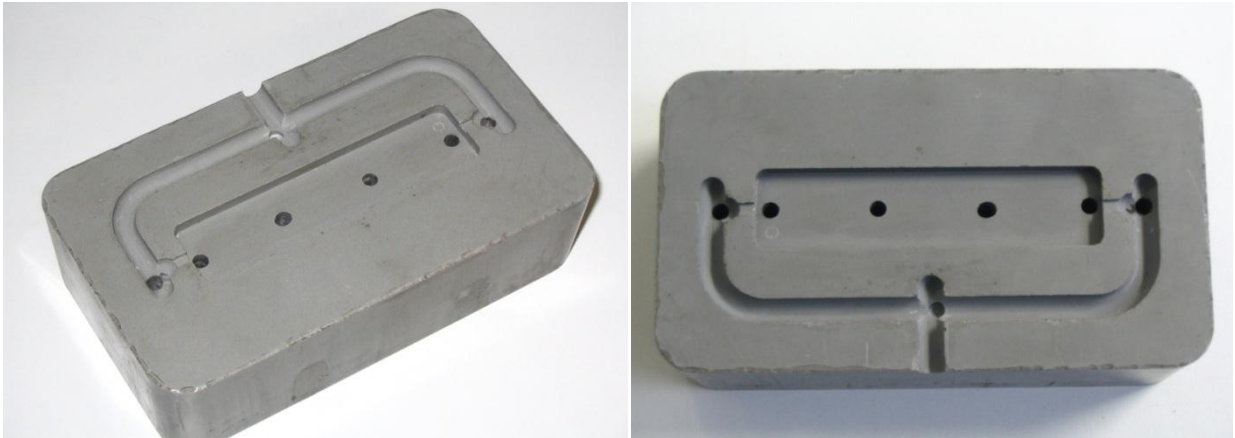


Figura 16 - Fotografias dos moldes utilizados no processo de sobreinjeção, mostrando a ausência de danos aos mesmos.

- h – Devido ao bom acabamento superficial obtido no molde, as camadas de recobrimento apresentaram uma boa transparência para todos os materiais de recobrimento.
- i – Apesar de possível, o recobrimento em apenas um dos lados apresenta limitações devido a possibilidade de empenamentos da peça final, necessitando, portanto, de um projeto mais criterioso do produto e do molde.
- j – Uma investigação mais aprofundada deve ser realizada para se evitar o problema do amolecimento e deformação dos insertos durante o processo de sobreinjeção, o que certamente implicará em modificações no projeto do produto, bem como das condições processo, visando minimizar, ou até mesmo eliminar, as deformações sofridas pelos insertos.
- k – Foi evidenciada no experimento, a necessidade de afinidade química entre o material do inserto e do recobrimento.
- l – O tipo de elemento utilizado para a obtenção de união mecânica, utilizada no experimento, não se mostrou adequado, impossibilitando uma união eficiente entre o inserto e a camada de recobrimento. Formas alternativas de projeto de união mecânica devem ser investigadas, de maneira que tal alternativa possa ser avaliada com mais critério.

2.3 Experimento Preliminar 3 – Sobreinjeção com Recobrimento Integral do Inserto

O principal objetivo deste experimento foi o de avaliar o processo de sobreinjeção, com recobrimento integral de um inserto de plástico, através de aspectos como processabilidade dos

materiais de revestimento, deformações do inserto a possibilidade de união mecânica entre a camada de revestimento e o inserto.

A definição da geometria para a realização deste estudo foi realizada em função dos objetivos da proposta de tese de doutoramento, e por ter características observadas em componentes injetados comercialmente.

As Figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, a geometria escolhida como inserto, o inserto sobreinjetado e os moldes utilizados para a sua moldagem.

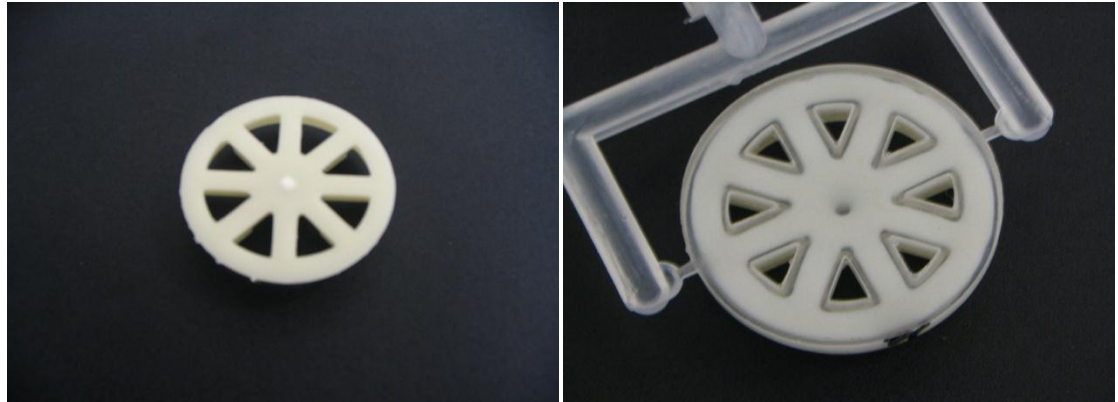


Figura 17 - Fotografias do inserto injetado em ABS à esquerda, e do componente sobreinjetado com PC à direita.

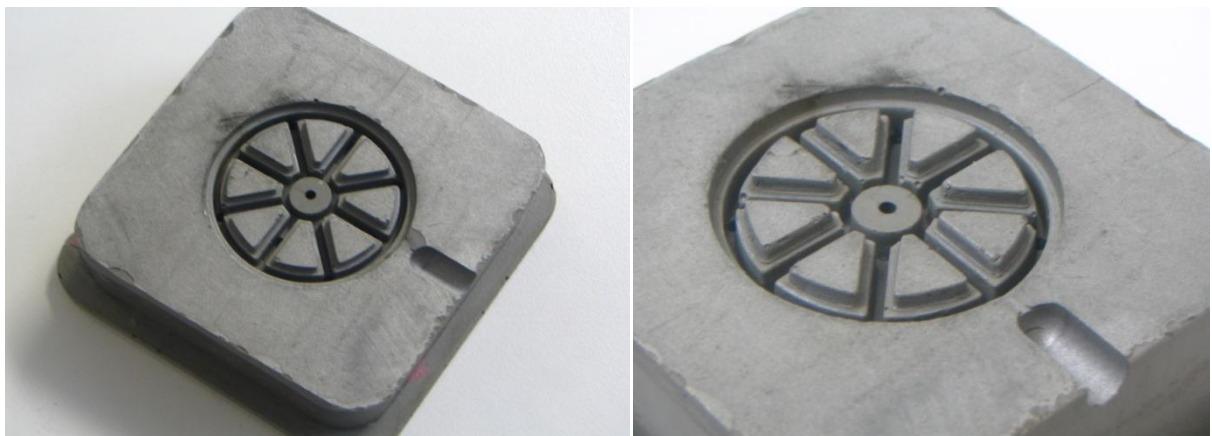


Figura 18 - Fotografias dos moldes utilizados na produção dos componentes sobreinjetados, após a realização dos experimentos.

No presente estudo foi utilizado para a fabricação dos insertos o acrilonitrila butadieno estireno, produzindo-se as seguintes combinações:

- Insertos de ABS sem decoração recobertos com SAN, PP e PC.
- Insertos de ABS decorados por meio de metalização recobertos com PC.

Após a fabricação e montagem dos moldes foram realizados os experimentos práticos na máquina injetora, sendo obtidos os seguintes resultados e conclusões:

- a - Obteve-se uma boa transparência da camada de recobrimento, permitindo a visualização de eventuais decorações que forem feitas sobre a peça sobreinjetada (Figura 17).
- b - Observou-se a ocorrência de deformações do inserto sobreinjetado, em decorrência das altas temperaturas e pressões impostas ao inserto durante a etapa de injeção.
- c - Um projeto inadequado do inserto, com paredes muito finas, pode ter contribuído para a sua deformação, demandando, portanto, uma análise mais detalhada e um projeto adequado do produto a ser recoberto.
- d - A utilização de dois pontos de injeção, para a realização do recobrimento do inserto, mostrou-se eficiente, minimizando os deslocamentos do mesmo dentro da cavidade, comprovando a necessidade de observação dos requisitos de projeto (balanceamento do preenchimento da cavidade) para o processo de sobreinjeção.
- e - Apesar de não haver afinidade química entre os pares PP e ABS, observou-se um resultado muito semelhante deste caso quando comparado aos pares PC+ABS e SAN+ABS, como mostra a Figura 19, o que evidenciou o sucesso da utilização da união mecânica (ancoragem no inserto injetado em ABS) para insertos integralmente recobertos.



Figura 19 - Fotografia do inserto em ABS sobreinjetado com polipropileno copolímero heterofásico de propeno e eteno, evidenciando uma boa transparência da camada de recobrimento.

- f - A transparência da camada sobreinjetada, bem como a aparência do produto final, mostraram-se pouco dependentes da compatibilidade química entre os pares de materiais do inserto e da camada sobreinjetada, como pode ser comprovado na Figura 19.
- g - Não foi observado o empenamento do componente após o processo de sobreinjeção, mostrando o bom resultado do recobrimento integral do inserto.
- h - Foi evidenciada a necessidade de um bom acabamento dos moldes para que sua vida útil seja aumentada, bem como, a aplicação de desmoldante aos moldes previamente à injeção das peças, pois o lixamento do molde e a aplicação de desmoldante diminuíram o atrito entre o polímero e o molde, reduzindo as falhas ocorridas no momento da extração da peça.
- i - Os moldes, feitos em resina epóxi, apresentaram um excelente desempenho, não apresentando danos significativos das cavidades, principalmente levando-se em consideração a injeção de materiais mais duros e abrasivos como ABS, SAN e PC.
- j - A sobreinjeção do inserto decorado, pelo processo de metalização, não apresentou um resultado positivo, o que, provavelmente, deve-se a falta de adesão causada por falhas no processo de metalização. A Figura 20 apresenta a fotografia do inserto metalizado e sobreinjetado.

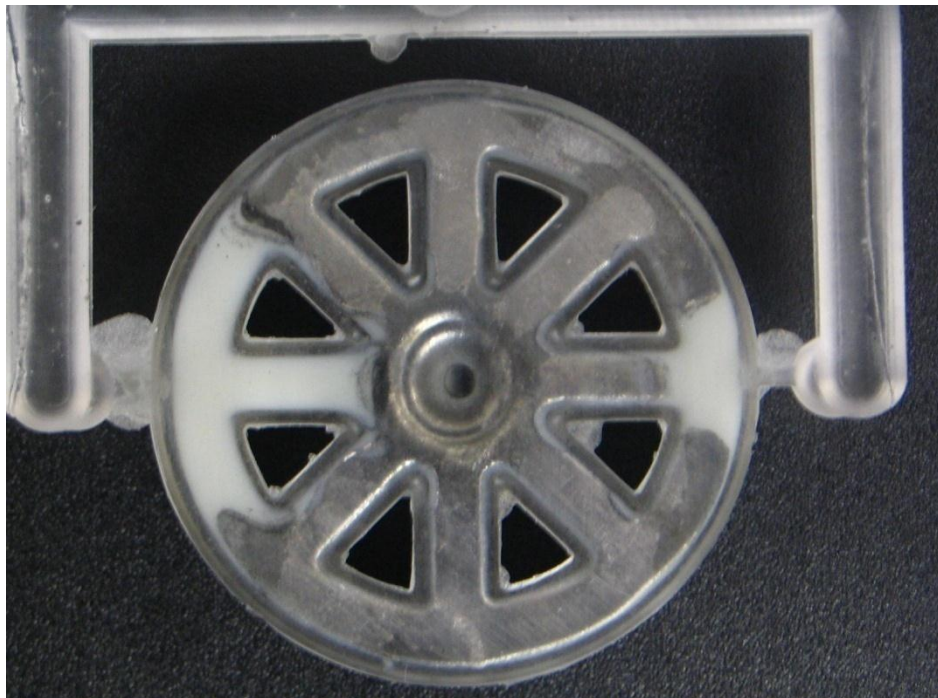


Figura 16 - Sobreinjeção em inserto plástico, mostrando os efeitos das solicitações causadas pelo preenchimento sobre a camada metalizada.