

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DE CRITÉRIO PARA A DETERMINAÇÃO DE
CONTRATIPOS DE TERMOPLÁSTICOS APLICÁVEL EM
SIMULAÇÃO DA MOLDAGEM POR INJEÇÃO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

UBIRATAN SCHUCH PINTO

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2002.

AVALIAÇÃO DE CRITÉRIO PARA A DETERMINAÇÃO DE
CONTRATIPOS DE TERMOPLÁSTICOS APLICÁVEL EM
SIMULAÇÃO DA MOLDAGEM POR INJEÇÃO

UBIRATAN SCHUCH PINTO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, ESPECIALIDADE MATERIAIS
POLIMÉRICOS E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS



PROF. CARLOS HENRIQUE AHRENS, DR.ENG – ORIENTADOR



PROF. DR. ALFREDO T. NUNES PIRES, CO – ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

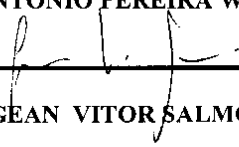
Prof. Dachamir Hotza
coordenador/PGMAT/UFSC
MASIS N°121120-SIAPE N°2219094



PROF.DR. DACHAMIR HOTZA – DR- ING – PRESIDENTE.



PROF.PAULO ANTÔNIO PEREIRA WENDHAUSEN – DR- ING.



PROF. GEAN VITOR SALMÓRIA – DR- ING.

Agradecimentos

À minha esposa Rosimarie e meu filho João Henrique, pelo carinho, apoio e coragem demonstrados, aos meus pais João Correa Pinto e Ivoni Schuch Pinto, aos meus avós, Joaquim Decker Schuch , Otilia Ness Schuch, Dionízio Correa Chagas e Joana Correa Pinto, ao Caico , pela lealdade e paciência, ao professor Alfredo pela co-orientação, ao professor Aloísio Klein, pelo seu fundamental incentivo inicial, aos amigos e professores da UFRGS, Denise Scherman Azambuja e Júpiter Palagi de Souza, ao professor Speller, pela confiança e apoio técnico, aos professores Márcio Fredel, Paulo Wendhausen, Ingeborg Kühn e Orestes Alarcon, à turma do CIMJECT, especialmente Clênio, Daniel, Fred ,Fraga, Armando e Malone, ao Mário Augusto, amigo leal, paciencioso e fundamental, à turma das produtoras e revendedoras de polímeros especialmente o Júlio Harada, Wlamir Bottura, Nércio Hesxel e Marcelo Mori, às cidades de Porto Alegre e Camaquã , enfim, a todos os quais não mencionei mas , que em ações materiais ou espirituais, ajudaram-me neste trabalho.

E principalmente, á Espiritualidade amiga e inspiradora, pela energia e perseverança recebida...

“ Não tá morto quem peia ”

ditado gaúcho

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
ÍNDICE DE SÍMBOLOS.....	XV
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT	XVIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivo.....	4
1.3 Estrutura da dissertação	4
2. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	6
2.1 Termoplásticos estudados.....	6
2.2 – Índice de fluidez e densidade.....	8
2.3. Tabelas de contratipos.....	12
2.4 Diferenciação entre termoplásticos mediante análise do índice de fluidez.....	15
2.4.1 Relações entre a viscosidade e o índice de fluidez.....	24
2.5. Diferenciação entre termoplásticos mediante a análise da densidade.....	27
2.6. O programa computacional de CAE Moldflow.....	28
2.6.1. Solução numérica para a fase de preenchimento.....	33
2.6.2. Parâmetros físico-químicos de caracterização de termoplásticos.....	43
2.7. Influência do índice de fluidez e densidade nas eq. governantes para a fase de preenchimento.....	46
2.7.1. Índice de fluidez.....	47

2.7.2. Densidade.....	48
2.7.3. Sumário da influência do índice de fluidez e densidade nas equações governantes.....	49
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51
3.1. Definição dos resultados avaliados e as condições de contorno.....	52
3.1.1. Condições de contorno	52
3.1.2. Resultados avaliados.....	56
3.2. Levantamento de termoplásticos e índices de fluidez	58
3.3. Estudos de caso	60
3.3.1. Geometria de peças e nº de elementos.....	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
4.1. Resultados de tempo e pressão de preenchimento.....	65
4.1.1. Polietilenos de alta densidade.....	65
4.1.2. Polipropilenos.....	71
4.1.3. Polietilenos de baixa densidade.....	76
4.2. Análise da previsão dos resultados do tempo e pressão de preenchimento.....	78
4.2.1. Influência da temperatura inicial do fluxo polimérico nos resultados.....	86
4.3 Análise dos resultados da presença de linhas de solda	91
4.3.1. Avanço da Frente de Fluxo Polimérico.....	91
4.4. Análise dos resultados da presença de bolhas de ar	99
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....	103
5.1. Conclusões.....	103
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	105

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
ANEXO A. Ciclo de Injeção.....	111
ANEXO B : Tabelas de contratipos.....	114
ANEXO C :Tratamento dos dados de Viscosidade.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema simplificado de um plastômetro [ASTM D 1238]	10
Figura 2: Variação da massa molar em peso de polietilenos de alta e baixa densidade versus o logaritmo do índice de fluidez	20
Figura 3: Variação do índice de fluidez com a massa molar em número de polietilenos de baixa densidade	21
Figura 4: Variação da energia de injeção com o índice de fluidez dos polipropilenos	23
Figura 5: Modelo da peça.	31
Figura 6: Geração de uma malha elemento e nó.	32
Figura 7: Gráfico que relaciona o número de elementos com o tempo de processamento computacional.....	32
Figura 8: Camada congelada. Fluxo polimérico confinado a duas camadas poliméricas solidificadas.....	36
Figura 9: Volumes de controle e nós associados	39
Figura 10: Preenchimento do nó 1.....	39
Figura 11: Preenchimento do nó 2	40
Figura 12: Preenchimento do Nó 5.....	41
Figura 13: Preenchimento do Nó 6	41
Figura 14: Preenchimento do Nó 7.....	42
Figura 15: Preenchimento do Nó 3	42
Figura 16: Preenchimento do Nó 4	43
Figura 17: Análise térmica via fluxo rápido e fluxo multilaminado	54
Figura 18: Gradiente de pressão em duas diferentes condições de injeção	57

Figura 19: Tempo de preenchimento em duas diferentes condições de injeção: um e dois pontos de injeção	57
Figura 20: Linhas de solda	58
Figura 21: “Armadilhas” de Ar	58
Figura 22: Geometria Faca (722 elementos), com indicativo da espessura em cada superfície. ..	62
Figura 23: Geometria <i>xícara</i> com diferentes números de elementos (302, 804 e 1042).....	63
Figura 24: Local do ponto de Injeção para as geometrias <i>faca</i> e <i>xícara</i> . Indicado pela flecha.....	63
Figura 25: Geometria suporte.....	63
Figura 26: Geometria chapa.	64
Figura 27:Gráfico índice de fluidez e tempo de preenchimento – PEAD.....	66
Figura 28: Gráfico índice de fluidez e pressão de preenchimento – PEAD.....	66
Figura 29: Lupolen 5031 L ,condição de ensaio C1.....	67
Figura 30: Eltex A 2080 condição de ensaio C1.	67
Figura 31: Eltex A 1100 condição de ensaio C1.	68
Figura 32: Eltex A 4090 condição de ensaio C1.	68
Figura 33: Simulações da pressão de preenchimento: Lupolen 5031 L, Eltex A 2080, Eltex A 1100 e Eltex A 4090 na geometria faca.....	70
Figura 34: Gráfico Índice de fluidez e tempo de preenchimento para polipropilenos.	72
Figura 35: Gráfico índice de fluidez e pressão de preenchimento para polipropilenos.	73
Figura 36: Resultados das simulações do tempo de preenchimentos: Eltex RP 210, Novolen 1100 H e Eltex TL 220 na geometria faca.....	74
Figura 37: Gráfico índice de fluidez e tempo de preenchimento para polietilenos de baixa densidade.	76
Figura 38: Gráfico índice de fluidez e tempo de preenchimento para polietilenos de baixa densidade.....	77

Figura 39: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os PEAD Lupolen 5031 L e Eltex A 4090, A 2080 e A 1100, na temperatura de 240 C.	81
Figura 40: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os PEAD Lupolen 5031 L e Eltex A 4090, A 2080 e A 1100, na temperatura de 260 °C.	82
Figura 41: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os PP Novolen 1100 H, Eltex TL220 e Eltex RP 210 , na temperatura de 230 °C.....	83
Figura 42: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os PP Novolen 1100 H, Eltex TL 220 e Eltex RP 210, na temperatura de 250 °C.	84
Figura 43:Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os PEBD Lupolen 1810D, Lupolen 1812D e Lupolen 1840D, na temperatura de 225 °C.....	85
Figura 44: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os PEBD 1810D, Lupolen 1812D e Lupolen 1840D, na temperatura de 245 °C.	85
Figura 45: Tempo de preenchimento PP Novolen 1102 K ,T. injeção e molde: 230 °C, 40 °C...86	
Figura 46:Tempo de Preenchimento PP 1102 K,T. de injeção e de molde: 220 °C, 40 oC.87	
Figura 47: Curva de viscosidade (modelo de 2ª ordem) PP Novolen 1102 K.....87	
Figura 48: Tempo de Preenchimento PP - Eltex P TL 220. T. injeção e molde: 220 oC, 40 oC..88	
Figura 49: Tempo de Preenchimento PP - Eltex P TL 220 ,T. injeção e molde: 230 oC, 40 oC..88	
Figura 50: Curva de viscosidade (modelo de 2ª ordem) PP - ELTEX P TL 220.89	
Figura 51: Condições ideais de processamento para o termoplástico 143 E Glaskl89	
Figura 52: Preenchimento parcial da peça, PP Eltex RP 210) e TL 220.....91	
Figura 53: Avanço da frente de fluxo (geometria xícara): Eltex A 1100, Lupolen 1810D e Novolen 1100H na condição C1.....93	
Figura 54:Avanço da frente de fluxo (geometria xícara): Eltex A 1100, Lupolen 1810D e Novolen 1100H na condição C2.....93	

Figura 55: Avanço da frente de fluxo (geometria xícara): Eltex A 1100 , Lupolen 1810D, Novolen 1100H e Styron 478 , condição C1 na geometria xícara ,malha com 1864 elementos...	94
Figura 56: Simulação na geometria suporte, preenchimento da base.....	95
Figura 57: Simulação na geometria suporte, preenchimento da lateral.....	96
Figura 58: Direção de avanço da frente de fluxo em três densidades de malha (412,976 e 1716 elementos).....	97
Figura 59: Formação de linhas de solda na geometria chapa, em diferentes densidades de malha.	98
Figura 60: Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C1, malha com 302 elementos	99
Figura 61: Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C2, malha com 302 elementos.	100
Figura 62 Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C1, malha com 804 elementos.	100
Figura 63: Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C2, malha com 804 elementos.	101
Figura 64: Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C1, malha com 1042 elementos.	101
Figura 65: Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C2, malha com 1042 elementos.	102
Figura 66: Início do ciclo de injeção, fechamento do molde [64].....	111
Figura 67: Preenchimento do molde com o termoplástico fundido [64].....	112
Figura 68: Fase de empacotamento [64].	112
Figura 69: Término do ciclo [64].	113
Figura 70: Curvas de viscosidade de termoplásticos ,modelos 1 ^a e 2 ^a ordem.	125

Figura 71: Extrapolação dos dados experimentais de viscosidade [19].	129
Figura 72: Dados de viscosidade ajustados frente as equações de primeira e segunda ordem para o PEBD Lupolen 1810 H [Banco de dados do <i>Moldflow</i>].	131

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Condições de ensaios para a determinação do índice de fluidez de polímeros.	11
Tabela 2: Condição de ensaios e respectivas temperaturas e cargas aplicadas.	11
Tabela 3: Classificação de termoplástico por faixa de densidade	12
Tabela 4: Exemplos de sistemas líquidos para formação de colunas líquidas empregadas na medida da densidade de termoplásticos.	12
Tabela 5 : Diferentes índice de fluidez e densidade de polietilenos de alta densidade e a sua correspondente aplicação.....	18
Tabela 6: Comparação da obtenção dos valores de M_n através da técnica GPC e valores de índice de fluidez para polietilenos de baixa densidade.....	22
Tabela 7: % Cristalinidade relacionada a densidade para polietilenos.....	28
Tabela 8: Condições de Contorno para as simulações do preenchimento de cavidades.	55
Tabela 9: Termoplásticos analisados e respectivos índice de fluidez	59
Tabela 10: Resultados das simulações do tempo de preenchimento e gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEAD.	69
Tabela 11: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEAD, para tempo de preenchimento de 2,5 s.	71
Tabela 12: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEAD, para tempo de preenchimento de 3,0 s.	71
Tabela 13: Resultados das simulações do tempo de preenchimento e gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para polipropilenos.	73
Tabela 14: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PP, para tempo de preenchimento de 2,5 s.	75
Tabela 15: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PP, para tempo de preenchimento de 3,0 s.	75

Tabela 16: Resultados das simulações do tempo de preenchimento e gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEBD.	77
Tabela 17: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEBD, para tempo de preenchimento de 2,8 s.	77
Tabela 18: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEBD, para tempo de preenchimento de 3,2 s.	78
Tabela 19: Comparação dos resultados de tempo e pressão de preenchimentos para os polipropilenos Novolen 1102 K e Eltex P TL 220.	88
Tabela 20: Tabela de contratipos da SPP Nemo [42].	114
Tabela 21: Tabela de contratipos da OPP [43].	117
Tabela 22: Tabela de contratipos da Rutino [44].	120
Tabela 23: Dados experimentais de viscosidade.	126
Tabela 24: Erros entre o valor de viscosidade ajustado e viscosidade experimental.	128

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

C	-	carga aplicada
C_p	-	calor específico
ρ	-	densidade do termoplástico
ρ_{melt}	-	densidade do termoplástico fundido
F	-	força
\vec{g}	-	gravidade
IF	-	Índice de fluidez
K	-	condutividade térmica
L	-	comprimento do capilar
M_w	-	massa molar média em peso
M_n	-	massa molar média em número
L_o	-	comprimento do orifício
l	-	comprimento do pistão
$h,$	-	viscosidade
P	-	pressão
PEAD	-	polietileno de alta densidade
PEBD	-	Polietileno de baixa densidade
PEDBL	-	polietileno de baixa densidade linear
PEMD	-	polietileno de média densidade
PP	-	Polipropileno
PVT	-	pressão, volume e temperatura.
Q	-	taxa de fluxo polimérico

Q	-	volume extrudado / segundo (cm^3/s)
\vec{q}	-	vetor fluxo de calor
R_p	-	raio do pistão do plastômetro
R_n		Raio do orifício do capilar
S_2	-	fluidez
t	-	tempo
t	-	tensão de cisalhamento
\dot{g}	-	taxa de cisalhamento
T_m, T_w	-	temperatura do molde
T_i		temperatura inicial do fluxo polimérico
\vec{u}	-	velocidade da partícula fluida
\vec{u}_x	-	velocidade da partícula fluida no eixo x
u_y	-	velocidade da partícula fluida no eixo y
\vec{u}_z	-	velocidade da partícula fluida no eixo z
W	-	massa do termoplástico
X	-	deslocamento do pistão

RESUMO

Analisar a simulação da moldagem por injeção em um programa computacional de CAE requer, inicialmente, que o termoplástico a ser empregado conste do seu banco de dados, o que não ocorre com inúmeros materiais produzidos no país. Apesar disso, cresce o número de empresas que procuram utilizar a simulação em CAE, a partir da indicação de um similar, usualmente chamado de contratipo. Em função da inexistência de um critério padronizado para estabelecer as semelhanças entre termoplásticos, este trabalho apresenta um estudo no sentido de avaliar a possibilidade de empregar o índice de fluidez, densidade e estereoisomeria, como prática usual para indicar a similaridade, visando a aplicação no módulo de preenchimento de cavidades (*flow*) de um sistema CAE comercial.

Foi avaliada a importância do termoplástico em resultados apresentados, através da realização de simulações em diferentes geometrias.

Os resultados mostraram que, de acordo com o objetivo da análise pretendida, o termoplástico similar é relevante. Contudo, foi possível verificar que outros resultados de simulações podem não ser influenciados pelo termoplástico mas sim, pela geometria da peça e densidade de sua malha.

Assim, a impossibilidade de correlacionar-se diferentes termoplásticos via índice de fluidez, densidade e estereoisomeria para aplicação na situação apresentada inicialmente foi demonstrada.

ABSTRACT

To analyze the simulation of the injection molding in CAE software requests, initially, that the thermoplastic to be used belongs to a polymer database, what does not happen with innumerable materials produced in Brazil. In spite of that, is increasing the number of companies which try to use the simulation in CAE, starting from the indication of a similar polymer, usually called *contratipo*. Because of the non existence of a criterion standardized to establish the similarities among thermoplastics, this work presents a study in the sense of evaluating the possibility to use the melt flow index, density and stereoisomery, as usual practice to indicate the similarity, seeking the application in the filling module of a CAE software.

The importance of the thermoplastic was evaluated in presented results, through the accomplishment of simulations in different geometries.

The results showed that, in agreement with the objective of the intended analysis, the similar thermoplastic is relevant. However, it was possible to verify that other results of simulations can be not only influenced by the thermoplastic, but also by the geometry of the piece and density of its mesh.

Therefore, the impossibility of correlating different thermoplastics through flow index, density and stereoisomery for application in the situation initially presented was demonstrated.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A existência de imposições legais, comerciais ou ecológicos, no sentido de reduzir o consumo de matérias primas não renováveis, tem impulsionado de maneira considerável o consumo de materiais poliméricos. Um exemplo disto é o fato de a moldagem por injeção ter absorvido cerca de 108 000 toneladas de polietileno da alta densidade, no mercado brasileiro, em 1998, com aplicações na produção de diversos produtos, como potes para alimentos, caixas para pescado, garrafas, contêineres, caixas d'água [1]. Outro exemplo é o consumo de polietileno de média e alta densidade para aplicação no processo de moldagem por injeção que apresentou um crescimento, no período de 1995 a 1998, de 10, 5 e 11 % para os mercados norte americano, europeu e brasileiro, respectivamente [1]. A proibição do uso do amianto na confecção de caixas d'água impulsionou de maneira significativa a sua substituição por polietilenos de alta densidade [2], sendo que o consumo deste produto no mercado brasileiro foi estimado em dois milhões de unidades por ano [1].

Dihlmann [3] afirma que, o estágio atual de desenvolvimento no setor de polímeros vem fortalecendo a posição destes materiais no consumo mundial de matérias primas manufaturáveis; com penetração em várias áreas de aplicação, especialmente nos setores automobilísticos, eletroeletrônicos, de embalagens, aeronáutico. médico e peças técnicas de alta qualidade.

Na indústria automobilística, tradicional consumidora de metais, está em franco crescimento o consumo de termoplásticos. Os pára-choques de veículos automotores, anteriormente manufaturados em materiais metálicos, hoje são, em grande quantidade, produzidos à base de termoplásticos. Uma grande montadora mundial está projetando uma nova versão de um famoso veículo utilitário, com a sua carroceria totalmente produzida em materiais

poliméricos.

Além disso a existência de uma crescente pressão para reduzir custos, e aumentar a eficiência no processo de moldagem por injeção, com forte enfoque na redução dos tempos que envolvem as diversas etapas desde o projeto até a produção, é apontada como justificativa para o surgimento de ferramentas computacionais denominadas de CAE (*Computer Aided Engineering*). Segundo *Dihlmann* [3], 70 % dos custos de produção de injetados são originários da fase de projeto.

Os programas computacionais de CAE procuram contribuir para reduzirem os tempos das etapas de projeto, colaborando de maneira decisiva para a diminuição de custos. Os programas aplicativos de CAE que simulam o comportamento de um termoplástico durante o processo de moldagem por injeção, prevêm dados relativos ao fluxo polimérico na cavidade de um molde tais como; gradientes de pressão, gradientes de temperaturas e tempos de preenchimentos, utilizados para avaliar as condições de injeção a serem propostas durante o processamento industrial [4].

Os programas computacionais de CAE permitem a simulação do processo de injeção nas mais variadas condições, como por exemplo, diferentes geometrias, temperaturas, localização(ões) de(os) ponto(s) de injeção, termoplástico; permitindo ao seu usuário a interpretação dos resultados obtidos e; a escolha das condições mais vantajosas. Os programas de CAE possuem bancos de dados contendo informações técnicas de vários termoplásticos, de modo que seja possível selecioná-los e simular o seu comportamento durante a injeção.

Cada vez mais o mercado disponibiliza termoplásticos para aplicações específicas. O termoplástico escolhido para a produção de um contêiner, por exemplo, não é o mesmo para a produção de uma tampa para garrafas plásticas ou um vasilhame para alimentos. Portanto, o usuário de um programa computacional de CAE, quando da escolha do termoplástico a ser empregado, deve fazê-lo com base na sua futura aplicação industrial. Entretanto, os bancos de

dados dos programas computacionais de CAE, dispõem normalmente, de poucos termoplásticos nacionais, sendo quase que exclusivamente compostos de tipos produzidos em outros países. Além disso, verifica-se que, apesar, de conter uma grande quantidade de termoplásticos caracterizados, poucos destes estão disponíveis no mercado nacional, sendo necessário importá-los a custos, muitas vezes, mais elevados.

Freqüentemente, a realização de uma simulação da injeção de cavidades não é conduzida com o mesmo termoplástico que será empregado no processamento industrial. A realização de uma simulação em um programa de CAE tem como objetivo inicial, como já citado, a previsão do comportamento do fluxo polimérico. Como termoplásticos diferentes podem apresentar distintas características entre si, tais como temperaturas de processamento, comportamento reológico, dentre outras, os resultados da simulação em CAE possivelmente indiquem diferentes comportamentos na injeção [19].

A situação da ausência de termoplásticos nacionais no banco de dados do programa de CAE pode ser resolvida pela possibilidade de caracterização de um novo material polimérico, entretanto, a sua caracterização é demasiadamente morosa e, freqüentemente, de alto custo, por requerer pessoal capacitado, o que pode dificultar a realização desta tarefa por empresas de pequeno e médio porte. Sendo assim, a disponibilidade de um critério simples e eficaz para a correlação entre diferentes termoplásticos para aplicação em simulações da injeção de cavidades em programas de CAE pode ser benéfico.

A correlação entre diferentes termoplásticos pode estar baseada em suas propriedades, desde que estas sejam confiáveis, apresentem fácil entendimento e estejam disponíveis ao usuário do programa CAE.

Analisando os catálogos de fabricantes de termoplásticos nacionais e internacionais, observa-se a presença de dados técnicos tais como o índice de fluidez e densidade, dados estes também aplicados na correlação industrial entre diferentes termoplásticos, estando esta

formalizada nas tabelas de contratipos (polímeros com grupos funcionais ou estrutura química análogas apresentando características de processamento e propriedades finais semelhantes) de diferentes fabricantes nacionais e revendedores de termoplásticos.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de estabelecer um critério de similaridade entre diferentes termoplásticos dos grupos polietilenos de alta densidade, polietilenos de baixa densidade e polipropilenos (critérios de contratipos), que permita ser utilizado para realizar simulações da fase de preenchimento de cavidade em um programa comercial de CAE. O critério de similaridade a ser avaliado está baseado na análise dos valores do índice de fluidez, densidade e estereoisomeria, devendo ser aplicado para um prognóstico qualitativo dos resultados, ou seja, previsão de tendências de resultados de simulações para termoplásticos pertencentes a um específico grupo polimérico.

1.3 Estrutura da dissertação

Para um melhor entendimento, esta dissertação de mestrado está dividida em cinco capítulos. O capítulo 1 é composto por introdução e apresentação dos objetivos. O capítulo 2 apresenta considerações gerais sobre o tema, descrição do programa computacional comercial de CAE (*Moldflow Plastics Insight* versão 1.1) utilizado no trabalho e a abordagem sobre a solução numérica empregada para a resolução das equações matemáticas aplicadas na fase de preenchimento. Também são apresentados os parâmetros físico-químicos de caracterização de

termoplásticos, as tabelas de contratipos e sua correspondente discussão, o conceito do índice de fluidez e densidade, a possibilidade de estabelecer-se um relacionamento entre termoplásticos de um mesmo grupo polimérico através da análise do índice de fluidez, as analogias possíveis entre a viscosidade e o índice de fluidez, além da diferenciação entre termoplásticos via análise da densidade. O capítulo 3 descreve o procedimento experimental utilizado para o alcance dos objetivos, apresentando os termoplásticos estudados e seus respectivos índices de fluidez e densidade e descrevendo os estudos de caso desenvolvidos. O capítulo 4 mostra os resultados das simulações do preenchimento de cavidades, realizadas nos estudos de caso, relacionando-os com os valores de índice de fluidez e densidade dos vários termoplásticos e também a discussão dos resultados do tempo e pressão de preenchimento e dos resultados da presença de linhas de solda e bolhas de ar para os grupos poliméricos estudados. Simultaneamente, é avaliada a influência da temperatura inicial do fluxo polimérico nos resultados do tempo de preenchimento. O capítulo 5 traz as conclusões e sugestões para novos trabalhos, enquanto que as referências bibliográficas estão apresentadas no capítulo 6.

Visando permitir um entendimento maior sobre os assuntos relacionados ao tema, esta dissertação inclui os seguintes anexos:

- 1 - Anexo A. Ciclo de Injeção. Apresentação da fase de preenchimento de cavidades e as demais componentes do ciclo de injeção;
- 2 - Anexo B. Tabelas de contratipos. Apresentação das tabelas de contratipos estudadas neste trabalho;
- 3 - Anexo C: Tratamento dos dados de viscosidade. Apresenta os modelos matemáticos de viscosidade e o ajuste dos dados de viscosidade frente às equações matemáticas de viscosidade de 1^a e 2^a ordem utilizadas pelo *Moldflow*.

CAPÍTULO 2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1 Termoplásticos estudados

Os termoplásticos caracterizam-se pela possibilidade de serem moldados uma ou mais vezes sob aquecimento, desde que não seja superada a temperatura de degradação. Seu resfriamento restabelece as forças de ligações intermoleculares, obtendo o material injetado com forma desejada e características físicas e mecânicas relacionadas com o termoplástico utilizado. Os termoplásticos podem ser endurecidos ou amolecidos reversivelmente.

Os polietilenos de alta (PEAD) e baixa densidade (PEBD) e polipropilenos (PP) são os termoplásticos estudados neste trabalho, estando as abreviações de acordo com a DIN 7728.

Em 1933, nos laboratórios da ICI (*Imperial Chemical Industry*), *Gibson* descobriu um pó branco depositado internamente em um reator autoclave empregado na reação entre o monômero etileno e benzaldeído, a 170 °C e 1400 bar, sendo este material denominado polietileno. Em 1939 uma planta industrial conseguia produzir 200 t ao ano deste novo material o qual, devido a suas características dielétricas, foi decisivo no desenvolvimento da tecnologia de radares dos Aliados durante a Segunda Guerra Mundial[6].

Os polietilenos caracterizam-se:

- i) polietileno de baixa densidade (PEBD), pela presença de moléculas bastante ramificadas, grau de cristalinidade variando de 40 a 50% e densidade na faixa de 0,915 g/cm³ a 0,935 g/cm³ [6,7];
- ii) polietileno de alta densidade (PEAD); caracterizado pela presença de longas moléculas lineares (baixo número de ramificações), alto grau de cristalinidade (60 a 80%) e valores de densidade entre 0,942 g/cm³ a 0,965 g/cm³ [6,7].

Os polietilenos de baixa e alta densidade são obtidos da polimerização do etileno, sob controladas condições de temperatura e pressão. Sob altas pressões (1 a 2 kbar) e altas temperaturas (100 a 300 °C) é obtido o polietileno de baixa densidade, caracterizados por moléculas bastante ramificadas. Com baixas pressões (menos de 30 bar) e temperaturas (40 a 150 °C) e com um catalisador extremamente ativo obtém-se o polietileno de alta densidade caracterizado por longas moléculas lineares [7].

O polietileno de baixa densidade é mais flexível e tenaz em relação ao polietileno de alta densidade devido ao menor percentual de cristalinidade, mas, apresenta menor resistência mecânica pelo mesmo motivo [7].

Os polipropilenos são um desenvolvimento mais recente do que os polietilenos, apresentando propriedades similares aos mesmos porém com menor densidade e maior resistência ao calor, sendo obtidos da polimerização do propileno [7].

Em 1953, *Natta*, com o auxílio dos catalisadores organometálicos descobertos por *Ziegler* (Instituto Max Plank, Alemanha), desenvolveu a produção de polipropilenos de alta massa molar; sendo que, posteriormente, desenvolveu um catalisador esteroespecífico, o qual permitia a produção de polipropilenos com estrutura molecular regular, caracterizada por alto nível de organização molecular e cristalinidade [6].

O consumo mundial de polipropilenos é na ordem de 7 milhões de toneladas ao ano, ocupando a terceira posição entre os termoplásticos com grande participação no comércio internacional (*commodities*), estando posicionados acima do polietileno de baixa densidade e PVC, mas abaixo do PEAD e PS [6].

Os polipropilenos quando relacionados aos polietilenos podem ser diferenciados pela menor densidade; alta temperatura de transição vítrea; menor resistência a oxidação; maior temperatura de amolecimento e percentual de cristalinidade. O grau de cristalinidade confere elevada resistência mecânica, rigidez e dureza, que se mantém a temperaturas relativamente

elevadas [6,8]. Por isso, e dado seu menor custo, o polipropileno vem deslocando os polietilenos em algumas de suas aplicações. Estão disponíveis comercialmente, copolímeros de unidades de repetição de propileno e outros grupos monoméricos (geralmente polietilenos ou butenos [6]), sendo classificados em relação a forma de distribuição dos diferentes monômeros componentes do copolímero:

- i) bloco ou heterofásico, copolímero do polipropileno e outro grupo monomérico, com a distribuição dos componentes em arranjo seqüencial;
- ii) randômico ou estatístico; copolímero do polipropileno e outro grupo monomérico, com a distribuição dos componentes em arranjo aleatório.

Considerando **A**, o monômero de propeno e **B**, um outro grupo monomérico qualquer, componente de um copolímero, classifica-se como tipo bloco e randômico as distribuições: **AAAAABBBBBBB** e **AABABBAABABAB**, respectivamente.

Dominghaus [6] utiliza para os copolímeros de polipropilenos e outros grupos monoméricos a denominação de polipropilenos modificados, indicando que estes apresentam algumas vantagens em relação aos polipropilenos homopolímeros tais como redução da temperatura de transição vítrea e aperfeiçoamento em propriedades mecânicas

2.2 – Índice de fluidez e densidade

O índice de fluidez é o valor medido da taxa de extrusão de um material fundido, em condições específicas de temperatura e pressão, através de um capilar de específicos diâmetro e comprimento [ASTM D 1238].

Shenoy e Saini [9] publicaram que, durante a produção de injetados a base de termoplásticos, o único parâmetro de fluxo polimérico que o produtor tem acesso fácil é o índice de fluidez.

O equipamento de medição do índice de fluidez é denominado de plastômetro (Figura 1), sendo constituído por um capilar com definidas dimensões aquecido eletricamente e um pistão responsável pela extrusão do termoplástico.

A medição do índice de fluidez de um termoplástico é um processo simples. Uma vez que o plastômetro alcança a temperatura indicada, uma determinada massa de termoplástico é colocada dentro do seu capilar. Após um tempo prévio de aquecimento de 6 a 8 min, é iniciada a extrusão do termoplástico fundido através do orifício do capilar - matriz padrão de formato circular. A vazão gravimétrica (quantidade de massa do termoplástico extrudada em 10 min) é o índice de fluidez do termoplástico ensaiado [10].

O índice de fluidez de um termoplástico é definido para uma específica carga (massa do pistão) e temperatura, segundo o indicado nas Tabela 1 e 2.

O ensaio do índice de fluidez é um método particularmente útil em testes de controle de qualidade aplicados em termoplásticos, sendo a sua aplicação indicada para a medição de taxas de vazão de fundido na faixa de 0,15 a 50 gramas por 10 minutos (método manual); e na faixa de 0,50 a 300 gramas por 10 minutos (método automático). O método manual difere do método automático pela forma de extração do termoplástico extrudado respectivamente, através de interferência do operador ou do próprio equipamento [ASTM D 1238].

O índice de fluidez é influenciado pela estrutura molecular de um termoplástico (massa molar média, ramificações poliméricas) e também, pelas condições de medição do fluxo extrudado [ASTM D 1238].

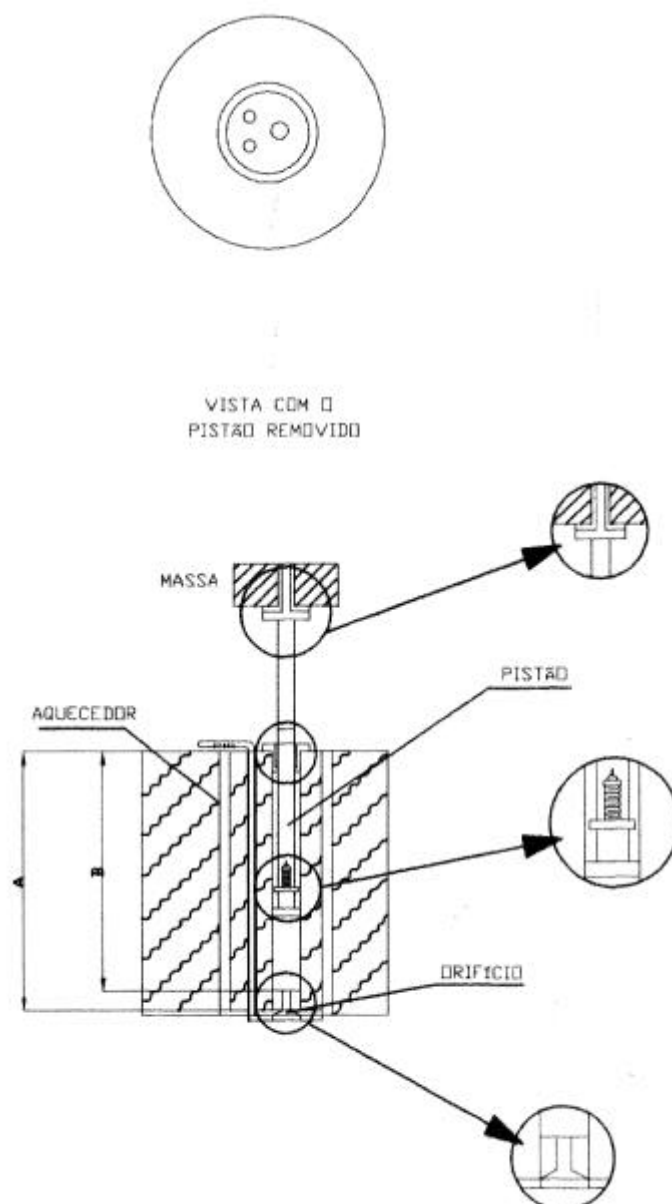


Figura 1: Esquema simplificado de um plastômetro [ASTM D 1238]

A densidade de um termoplástico está relacionada com propriedades mecânicas finais da peça injetada, tais como resistência ao impacto, tenacidade e outras [6], sendo uma propriedade facilmente medida, frequentemente associada como indicativo de alterações físicas e estruturais em uma amostra [ASTM D 1505].

Gruenwald [11] publicou que a densidade é empregada como indicativo da uniformidade de propriedades entre várias amostras, sendo aplicada também como um meio para a

identificação entre termoplásticos de diferentes grupos poliméricos conforme o mostrado na Tabela 3.

Tabela 1: Condições de ensaios para a determinação do índice de fluidez para vários polímeros.

Polímeros	Condições
Poliacetais	E, M
Acrílico	H, I
ABS	G
Esteres de celulose	D, E, F
Náilon	K, Q, R, S
Policlorotrifluoretileno	J
Polietileno	A, B, D, E, F, N, U
Policarbonato	O
Polipropileno	L
Poliestireno	G, H, I, P
Politereftalato	T
Acetato de Vinila	C

Fonte :[ASTM D 1238]

Tabela 2: Condição de ensaios e respectivas temperaturas e cargas aplicadas.

Condição	T (°C)	Massa (g)	Condição	T (°C)	Massa (g)
A	125	325	L	230	2160
B	125	2160	M	190	1050
C	150	2160	N	190	10000
D	190	325	O	300	1200
E	190	2160	P	190	5000
F	190	21600	Q	235	1000
G	200	5000	R	235	2160
H	230	1200	S	235	5000
I	230	3800	T	250	2160
J	265	12500	U	310	12500
K	275	325			

Fonte :[ASTM D 1238]

A medição da densidade de termoplásticos é através do método previsto na ASTM D 1505, o qual está baseado na comparação do nível de submersão de uma amostra em uma coluna líquida com gradiente de densidade. A densidade também pode ser determinada através dos

métodos previstos na ASTM D 792, o qual difere da ASTM D 1505 ,exclusivamente, pela forma confecção do corpo de prova.

Tabela 3: Classificação de termoplástico por faixa de densidade

Polímeros	r (g/cm³)
Polipropilenos (PP)	0,850 à 0,920
Polietilenos de baixa densidade (linear) PEBD, PELBD	0,915 à 0,929
Polietilenos de média densidade, PEMD	0,930 à 0,940
Polietileno de alta densidade, PEAD	0,941 à 0,970

Fonte: [8]

O gradiente da coluna líquida é obtido através da mistura de líquidos apresentados na Tabela 4. Maiores detalhes sobre este método estão definidos na ASTM D 1505.

Tabela 4: Exemplos de sistemas líquidos para formação de colunas líquidas empregadas na medida da densidade de termoplásticos.

Sistema Líquido	Faixa de densidade (g/cm³)
Metanol – álcool benzílico	0,80 a 0,92
Isopropanol – Água	0,79 a 1,00
Isopropanol – Dietilenoglicol	0,79 a 1,11
Etanol – tetracloreto de carbono	0,79 a 1,59
Tolueno – tetracloreto de carbono	0,87 a 1,59
Água – Brometo de Sódio	1,00 a 1,41
Água – Nitrato de Cálcio	1,00 a 1,60
Tetracloreto de carbono – Trimetil etileno dibrometo	1,60 a 1,99
Trimetil etileno dibrometo – Etileno brometo	1,99 a 2,18
Etileno brometo – bromofórmio	2,18 a 2,89

Fonte :[ASTM D 1505]

2.3. Tabelas de contratipos

Uma tabela de contratipos apresenta relações de similaridade entre diferentes termoplásticos, indicando as suas possíveis aplicações, baseadas em valores de índices de fluidez e densidade. A fundamentação teórica para esta correlação é apresentada nos itens 2.4 e 2.5. Editadas e distribuídas por produtores de termoplásticos e por empresas revendedoras as tabelas

de contratipos são utilizadas pelas indústrias de transformação de termoplásticos (extrusão, sopro, injeção e outros) ver Anexo B- Tabelas de Contratipos. Estas tabelas, são normalmente usadas, quando da indisponibilidade da empresa utilizar um termoplástico comumente empregado e, portanto necessitar substituí-lo por outro, sem causar dificuldades de adaptação do novo material polimérico no processo industrial tais como, perda de produtividade e produtos de inferior qualidade.

Uma análise da tabela de considerados contratipos (Anexo B–Tabela 20), para os termoplásticos estudados neste trabalho, mostra que:

- a) somente são considerados semelhantes termoplásticos de um mesmo grupo polimérico tais como polipropileno e polietilenos de alta densidade;
- b) a proximidade entre os valores do índice de fluidez e densidade é que indica a semelhança de processamento e utilização entre os termoplásticos polietilenos de alta e baixa densidade. Exemplificando, os polietilenos de alta densidade IA 59 U3, JV 060 U, GC 7260 LS, HI 865/UV e URA 82 são indicados como semelhantes ou seja, são considerados contratipos. Estes termoplásticos apresentam para os valores do índice de fluidez e densidade, respectivamente: 7,3 g/10 min, 0,960 g/cm³; 6,5 g/10 min, 0,954 g/cm³ ; 8,0 g/10 min, 0,958 g/cm³; 6,5 g/10 min, 0,965 g/cm³ e; 8,0 g/10 min, 0,959 g/cm³. Verifica-se, para estes termoplásticos, relacionados como contratipos, semelhantes valores de índice de fluidez e densidade;
- c) para o relacionamento entre os polipropilenos é utilizado o índice de fluidez e a estereoisomeria de sua estrutura molecular ou seja homopolímero, copolímero bloco ou randômico (item 2.1), não sendo utilizada a análise da densidade, estando esta afirmativa baseada no verificado nas respectivas tabelas do Anexo B. Os polipropilenos RM 6100 e H301 (Anexo B- Tabela 20) são considerados como contratipos. Estes possuem, respectivamente, índices de fluidez 8,0 e 10,0 g /10 min além de ambos serem

homopolímeros.

A Tabela 21 (Anexo B) mostra uma tabela de contratipos fornecida por uma empresa produtora de termoplásticos, onde é possível identificar o mesmo critério de similaridade da tabela anterior, ou seja, a correlação entre os polietilenos através da semelhança dos valores para o índice de fluidez e densidade e; para os polipropilenos, a análise do índice de fluidez e da estereoisomeria.

Portanto, comparando-se as tabelas de contratipos 20 e 21, verifica-se que:

- a) os polietilenos de alta densidade HI 865 UV, IA 59 U3, JV 060 U e URA 82 são indicados como contratipos, em ambas as tabelas;
- b) o termoplástico GC 7260 LS da Ipiranga Petroquímica, está presente na Tabela 21 sem motivo justificável;
- c) o índice de fluidez indicado para o termoplástico HI 865 UV é diferente do valor apresentado na tabela de contratipos na Tabela anterior. Posteriormente, identificado como valor correto o apresentado na Tabela 20;
- d) o estabelecimento de semelhanças entre os polipropilenos segue o mesmo critério discutido na tabela anterior, ou seja, semelhança dos valores do índice de fluidez e a estereoisomeria de suas cadeias moleculares .

A Tabela 22 mostra mais uma tabela de contratipos de uma revendedora de termoplásticos onde verifica-se as mesmas relações das tabelas anteriores.

Uma situação relevante a este trabalho é a indisponibilidade, no banco de dados de polímeros do *Moldflow*, dos termoplásticos considerados como semelhantes nas tabelas de contratipos estudadas. Esta inviabilizou a avaliação da semelhança entre os termoplásticos

indicados nas referidas tabelas, através de suas correspondentes simulações do preenchimento de cavidades no referido programa computacional de CAE.

A presença de aditivos em um termoplástico, de forma a este ter uma aplicação diferenciada, também é considerado nas tabelas de contratipos. Os aditivos podem ser, por exemplo, compostos para proteção aos raios ultravioleta. O composto de proteção aos raios ultravioleta (anti-UV) destina-se a produção de peças injetadas que ficarão expostas aos elementos naturais, os quais podem acarretar uma rápida degradação nas mesmas. Exemplificando, o termoplástico HI 865 UV não é contratipo do HI 865 pois, apesar de possuírem o mesmo valor do índice de fluidez e densidade, somente o primeiro possui um aditivo anti-UV em sua composição. Portanto, termoplásticos, nesta situação, para serem contratipos, além de possuírem semelhanças entre os valores do índice de fluidez e densidade devem apresentar idêntica composição de aditivos. As tabelas de contratipos apresentadas anteriormente (Tabelas 20 e 22) ilustram este tema, uma vez que os termoplásticos IA 59, GC 7260, HI 865 e A 2080 são considerados contratipos entre si mas, não são relacionados com os termoplásticos IA 59 U-3, GC 7260 LS e HI 865 UV, devido a presença de aditivos nestes últimos. No âmbito de uma tabela de contratipos a presença de aditivos (tipo e quantidade) é, também, uma condição para a indicação de contratipos, além da exigência de semelhança de através de valores de índice de fluidez e densidade.

2.4 Diferenciação entre termoplásticos mediante análise comparativa do índice de fluidez

Segundo *Bretas e D'Ávila* [12], reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, ela analisa as respostas (deformações ou tensões) de um material provocadas pela aplicação de uma tensão ou uma deformação.

Fleming [13] afirma que, durante os primórdios da polimerização industrial de polietilenos houveram dificuldades no controle da viscosidade devido a fatores tais como variações na cinética da reação e catalisadores, resultando termoplásticos com diferentes características reológicas. A utilização destes termoplásticos no processamento industrial acarretou problemas, tais como pressão de injeção variável e moldados com qualidade inferior, sendo conveniente o desenvolvimento de um teste prático para identificar alterações na viscosidade de termoplásticos.

Basicamente, existem dois métodos empregados para a determinação das propriedades reológicas dos termoplásticos. O método mais simples é o ensaio do índice de fluidez; o mais complexo é o emprego do reômetro capilar. A análise do índice de fluidez é uma ferramenta útil para a comparação de diferentes tipos de termoplásticos. Assim que, do aumento da taxa de fluxo gravimétrica de um determinado termoplástico em relação a outro, pode-se definir que o primeiro apresenta menores valores de viscosidade em relação ao segundo e que, este flui melhor. Sendo esta simples análise, um razoável indicador da diferença entre termoplásticos e de suas aplicações [13].

Hall [10] publicou que, a taxa gravimétrica (g/10 min) é uma ferramenta vantajosa para aplicação na comparação de diferentes materiais poliméricos; assim que de seu aumento de um lote de material polimérico para outro ocorre um decréscimo na propriedade viscosidade. Afirmando também que, diferentes materiais termoplásticos podem apresentar distintas capacidades de preenchimento de cavidades moldantes, devido a fatores tais como sua estrutura molecular e a presença de aditivos, relacionando-os ao índice de fluidez.

Como indicado anteriormente, as principais vantagens do ensaio do índice de fluidez são a sua simplicidade e a exigência de mínimo entendimento e treinamento de seus usuários.

No início de sua utilização industrial, o índice de fluidez apresentou algumas desvantagens tais como, baixa repetibilidade dos valores obtidos para a vazão gravimétrica e dificuldade na sua medição para taxas de fluxo com valores que não estejam na faixa de 1 a 10 g/10 min, ou

seja, termoplásticos com alta e baixa viscosidade. Os termoplásticos com baixos valores de viscosidade apresentam alta fluidez, dificultando a extrapolação da vazão gravimétrica para o tempo de medida padrão de 10 min; ou seja; a massa de polímeros carregada no capilar do instrumento de medição (Figura 1) escoava totalmente em intervalo de tempo inferior ao normatizado (item 2.2). A medição da massa extrudada para materiais com alta viscosidade (baixo índice de fluidez) também apresentou-se difícil, devido a sua reduzida taxa de vazão gravimétrica ocorrendo efeito contrário aos materiais com baixa viscosidade pois, ao cabo do intervalo de medição, o capilar do plastômetro ainda estava carregado com o termoplástico. O surgimento de plastômetros automatizados reduziram os erros acima apresentados, através da introdução de sistemas automáticos de leituras de massa e tempo, além de recarga automática de termoplásticos[13].

A principal diferença entre termoplásticos quando da análise dos respectivos valores do índice de fluidez é a sua massa molar. *Shit* [14] atesta que, o índice de fluidez pode ser considerado como um método indicativo da massa molar, apesar de esta indicação não ser absoluta, afirmando que baixos valores medidos para o índice de fluidez indicam alta massa molar e vice versa.

Bretas e D'Ávila [12] apresentam a equação de *Mark-Howkink* (1), a qual relaciona a viscosidade com a massa molar média em peso.

O valor do índice de fluidez deve ser utilizado com cautela, pois é somente um único ponto de viscosidade determinado a baixas taxas de cisalhamento, não servindo para a diferenciação entre termoplásticos de grupos diferentes. Ou seja, um polipropileno com o valor do índice de fluidez igual a de um polietileno de alta densidade, não pode ser considerado como seu contratipo. Entretanto, o índice de fluidez pode ser utilizado para a comparação entre termoplásticos de uma mesmo grupo polimérico [14].

$$h_0 = KM_w^a \quad (1)$$

onde K e a são constantes para um dado polímero.

O índice de fluidez deve ser somente empregado para a diferenciação entre polímeros de um mesmo grupo, não devendo ser utilizado para a previsão de parâmetros de processamento industrial [14].

Hall [10] afirma que, o ponto desfavorável da utilização dos valores do índice de fluidez é que a sua medição não ocorre em condições iguais as experimentadas na injeção ou na extrusão, pois o aparelho de sua de medição (Figura 1) produz baixas taxas e tensões de cisalhamento em relação ao verificado no processamento industrial.

A possibilidade da produção de diferentes termoplásticos em relação aos valores medidos do índice de fluidez e da densidade, habilitaram os produtores de termoplásticos a preparar e produzir tipos poliméricos específicos para aplicação na produção de produtos com os mais diferentes fins [9]. A Tabela 5 exemplifica esta situação.

Tabela 5 : Diferentes índice de fluidez e densidade de polietilenos de alta densidade e a sua correspondente aplicação.

Termoplástico	Fornecedor	IF (g/10 min)	r (g/cm ³)	Aplicação
AA-59	Politeno	0,75	0,960	Extrusão de lonas e microfilamentos
GC-7260 LS	Ipiranga	8,00	0,958	Injeção de caixas para alimentos
BT-100	Polialden	0,15	0,954	Sopro, peças de grande volume
GF4057 K	Ipiranga	0,22	0,949	Extrusão de Fios e Cabos

Fonte:[Tabelas 20, 21 e 22]

Assim, termoplásticos para as mais diferentes aplicações podem ser considerados como resultados de reações de polimerização onde são manipulados a massa molar média, a distribuição da massa molar, bem como o grau de ramificação das cadeias poliméricas, com

reflexo na estrutura molecular (densidade) e características reológicas (índice de fluidez); ambos funções da organização estrutural de um termoplástico[9].

Ao longo dos anos, vários trabalhos científicos publicados indicaram a existência de uma correlação entre o índice de fluidez com parâmetros de polimerização dos termoplásticos e parâmetros de processamento industrial. Na polimerização, tem sido observado que a temperatura de reação, a temperatura de ativação do catalisador, e a construção da massa molar podem ser relacionadas ao índice de fluidez. No processamento industrial, o índice de fluidez relaciona-se bem com temperaturas, pressões, cisalhamento do fundido, comportamento do fluxo plástico e outras.

Dark citado por *Shenoy et Saini* [9] apresentou uma relação entre o índice de fluidez e a massa molar de polietilenos de alta e baixa densidade, respectivamente com arranjo linear e ramificado de suas cadeias moleculares. As massas molares foram obtidas através da técnica GPC (*Gel Permeation Chromatography*).

Foram encontradas duas diferentes curvas: uma para polietilenos de baixa densidade representada através da Equação 2 e outra para polietilenos de alta densidade, Equação 3.

$$\log IF = (0,454 \times 10^{-5})M_w - 0,12713 \quad (2)$$

$$\log IF = -(0,6723 \times 10^{-5})M_w + 0,49359 \quad (3)$$

onde IF é o índice de fluidez e M_w é a massa molar em peso.

Ambas equações representam o melhor ajuste da M_w , conforme o apresentado na Figura 2.

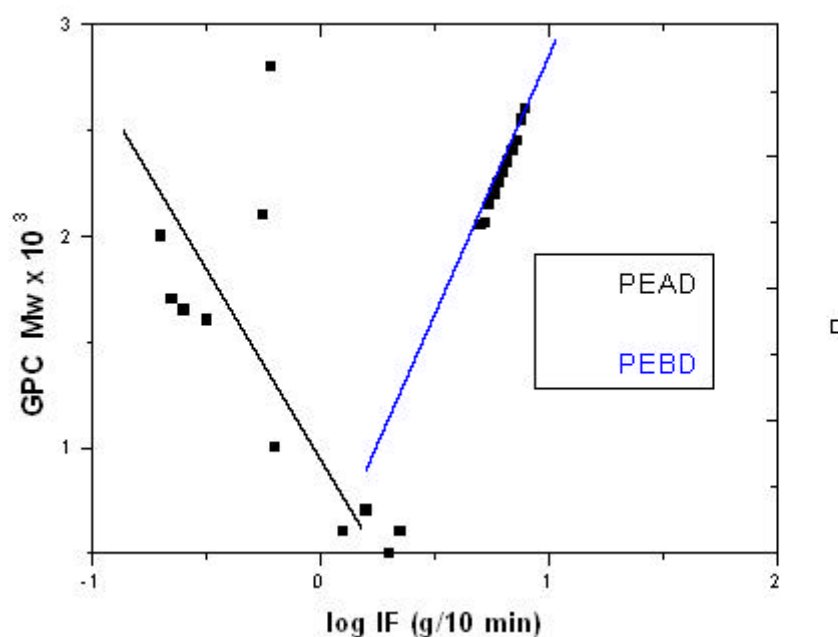


Figura 2: Variação da massa molar em peso de polietilenos de alta e baixa densidade versus o logaritmo do índice de fluidez [9].

Dark citado por [9] afirma que alguns dos dados coletados para os polietilenos de baixa densidade não são considerados corretos, como por exemplo os que indicam um alto valor do índice de fluidez para uma alta massa molar M_w , conforme é visualizado na figura 2. Os valores da massa molar M_w para os vários polietilenos de baixa densidade, cobriram uma grande faixa de grau de ramificação das cadeias moleculares, configuração do reator utilizado na polimerização e concentração do catalisador aplicado. *Dark* conclui que a previsão da massa molar M_w para polietilenos de baixa densidade deve levar em consideração as variáveis citadas anteriormente não sendo suficiente a utilização da Equação 2; para os polietilenos de alta densidade por sua vez, a Equação 3 é suficiente, baseado na consistência dos dados experimentais obtidos.

Os pesquisadores *Shenoy et Saini* [9] afirmam que, o índice de fluidez é conhecido por apresentar o melhor relacionamento com a massa molar média em peso (M_w).

Contudo, *Mortimer et al* citado por [9] baseado em pesquisa em vários polietilenos de baixa densidade, estabeleceram uma correlação entre o índice de fluidez e a massa molar média em número (M_n) como pode ser visualizado na Figura 3, sendo a sua curva, apresentada na forma da Equação 4:

$$M_n = 37000 - 8610(\text{Log IF}) \quad (4)$$

onde M_n é a massa molar média em número.

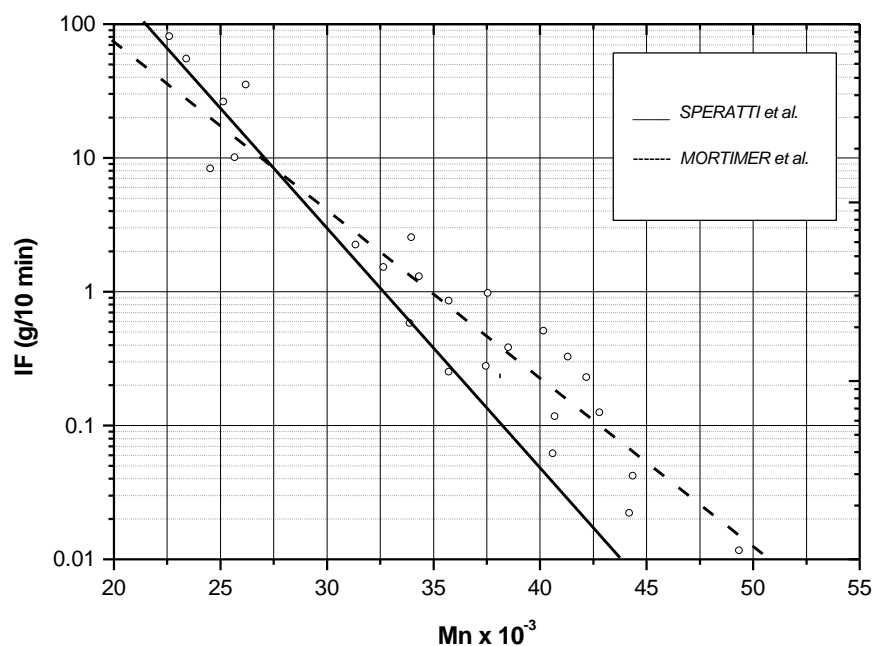


Figura 3: Variação do índice de fluidez com a massa molar em número de polietilenos de baixa densidade [9].

Mortimer et al referenciado por [9] utilizaram a Equação 4 por aproximadamente dois anos para a estimação da massa molar em número M_n pois demonstrou uma maior rapidez em relação ao meio usual – medição através da pressão osmótica.

Speratti et al definiram uma correlação semelhante a de *Mortimer et al.* (ambos citados por [9]) com diferenças na previsão da massa molar em número M_n , especialmente para as zonas de altas massas moleculares, sem aparente razão para justificá-la. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos por *Speratti et al* e de *Mortimer et al*, onde visualiza-se as diferenças dos resultados publicados por estes pesquisadores.

Tomis [15] apresentou uma relação entre a massa molar em número M_n e o índice de fluidez aplicável a polietilenos de baixa densidade, sendo estes resultados comprovados pela técnica de cromatografia por gel (GPC), ver Tabela 6. A citada relação está apresentada na Equação 5.

$$(M_n)^{1/2} = 188 - 30(\text{Log IF}) \quad (5)$$

Os valores obtidos para M_n através da Equação 5, e os obtidos através da técnica GPC são apresentado na Tabela 6, onde pode ser avaliada a concordância entre os resultados obtidos de diferentes meios.

Tabela 6: Comparação da obtenção dos valores de M_n através da técnica GPC e valores de índice de fluidez para polietilenos de baixa densidade.

M_n PEBD	Bralen FA 7 – 15	Bralen FB1 – 28	Bralen RB03 - 23
GPC	30000	35000	50000
IF	26440	35340	40670

Fonte:[15]

No processo de injeção de termoplásticos, a qualidade da peça moldada é dependente das condições de processamento tais como temperaturas, pressões, tempo de injeção e características reológicas do material injetado [9].

Termoplásticos com altos índice de fluidez são facilmente injetados devido a sua menor viscosidade. Entretanto, na situação da redução do índice de fluidez (aumento da viscosidade), o processo de moldagem torna-se mais difícil. Estas dificuldades podem ser superadas com o aumento de pressão e temperatura ou então alterando o(s) diâmetro(s) do(s) canal(is) de injeção [9].

A transferência de energia necessária à fusão do termoplástico também pode ser relacionada ao índice de fluidez conforme a Figura 4.

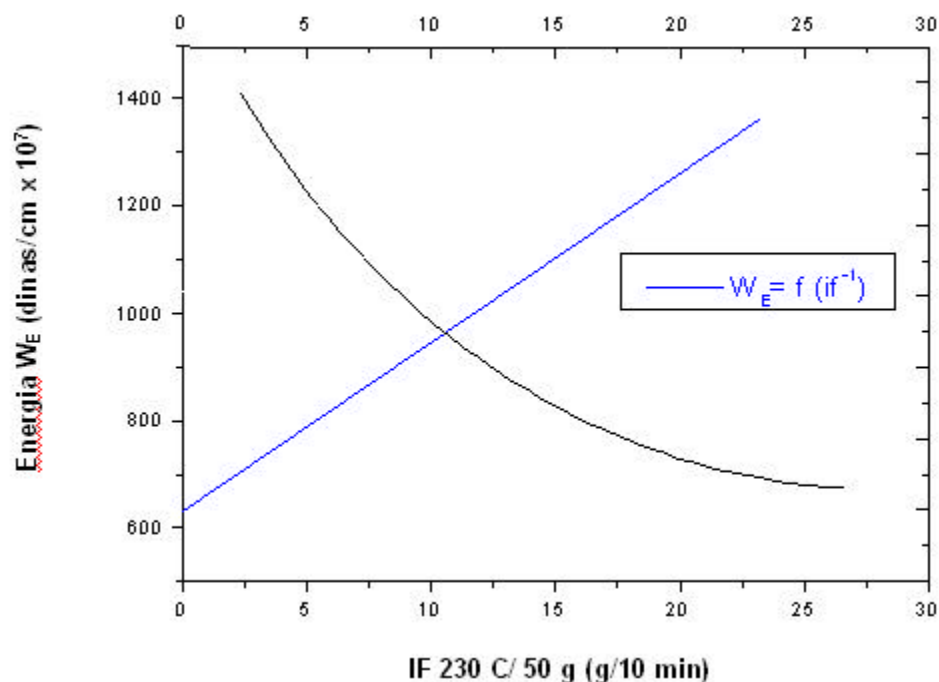


Figura 4: Variação da energia de injeção com o índice de fluidez dos polipropilenos [9].

Knappe mencionado por Shenoy & Saini [9], estudou a relação entre a energia transferida ao termoplástico (W_E) com o índice de fluidez de polipropilenos. Onde verifica-se que termoplásticos com altos valores do índice de fluidez requerem baixa energia W_E para o seu processamento e vice-versa.

2.4.1 Relações entre a viscosidade e o índice de fluidez

Reogramas descrevem, com precisão, a variação da viscosidade de um termoplástico fundido em relação à taxa de cisalhamento e temperatura. Estes são gerados em cuidadosas medições executadas em sofisticados e caros instrumentos de ensaios, os quais exigem, com frequência, operadores capacitados para sua operação. Frequentemente, a realização de ensaios reológicos requer a aplicação de razoável intervalo de tempo especialmente quando estes são necessários em uma extensa faixa de temperaturas e taxas de cisalhamento.

As exigências necessárias a realização de ensaios reológicos estão aquém dos recursos técnicos e econômicos disponíveis a grande maioria das empresa transformadoras de termoplásticos, sendo desejável um método simplificado para sua medição [16].

Shenoy e Saini [16] publicaram estudos sobre a construção de reogramas a partir do índice de fluidez, o relacionando com a viscosidade (η) através das equações usuais para a tensão de cisalhamento t e a taxa de cisalhamento \dot{g} .

$$t = R_N F / 2p (R_p)^2 l \quad (6)$$

$$\dot{g} = 4Q / pR_N^3 \quad (7)$$

onde $R_p = 0,4737$ cm, raio do pistão do plastômetro utilizado; $R_n = 0,105$ cm; raio do orifício capilar do plastômetro utilizado; $l = 0,8$ cm, comprimento do pistão (Figura 1); $F = C \times 9,807 \times 10^5$, força em dinas da pela carga de ensaio; C , carga aplicada (Tabela 1); $Q =$ índice de fluidez / $600 \times \rho$, taxa de fluxo; ρ , densidade do termoplástico.

As Equações 6 e 7 podem ser simplificadas através da aplicação das dimensões do plastômetro, resultando em:

$$t = 9,13 \times 10^4 L \quad (8)$$

$$\dot{g} = 1,83 \times \left(\frac{IF}{r} \right) \quad (9)$$

Como discutido previamente, a medição do índice de fluidez é realizada em uma específica temperatura e carga aplicadas (Tabelas 1 e 2), sendo esta representante de um único ponto na curva reológica dos termoplásticos ($t \times \dot{g}$), como pode ser visto nas Equações 8 e 9. Este fato pode ser aplicado para a determinação do índice de fluidez através de conhecidos valores de taxa e tensão de cisalhamento [16].

Este método foi empregado com sucesso por *Shenoy et al* , e também por *Rideal et Padget* (ambos referidos por [16]) quando da indisponibilidade dos valores do índice de fluidez ou então, na situação de dificuldades para as medições (item 2.4). Empregando a Equação 10 :

$$h = \frac{t}{\dot{g}} \quad (10)$$

onde η é a viscosidade.

As Equações 11e 12 são obtidas através das Equações 8 e 9:

$$IF \times h = 4,98 \times 10^4 \times r \times L \quad (11)$$

$$\dot{g} / IF = 1,83 / r \quad (12)$$

Através da análise das Equações 11 e 12 pode ser avaliada a relação de proporcionalidade entre o índice de fluidez (IF) e o inverso da viscosidade (η).

Shenoy e Saini [16] afirmam a possibilidade da referida relação ser utilizada para a previsão de toda a curva reológica de termoplásticos, somente através da alteração da massa do pistão (Figura 1), de modo a reproduzir as diversas taxas e tensões de cisalhamento.

O pesquisador *Shit* [14] também realizou pesquisas sobre emprego do plastômetro na determinação da viscosidade η (único ponto), utilizando a Equação 13 .

$$h = \left(\frac{PR_n^4}{8LQ} \right) \quad (13)$$

onde P é a pressão ao longo do capilar (MN/m^2), R_n é o raio do capilar (cm), L é o comprimento do capilar (cm) e Q é o volume extrudado (cm^3/s).

Hall [10] por sua vez, também publicou estudos sobre a determinação do índice de fluidez através de reometria capilar. Como o índice de fluidez é um ensaio reológico à tensão de cisalhamento constante, foi necessária a programação do reômetro capilar utilizado para operação em tensões de cisalhamento constantes, específicas para cada grupo polimérico[17]. Os ensaios aplicados foram realizados com três diferentes tipos de termoplásticos de cada uma dos grupos ABS, policarbonato e polipropileno. A escolha destes polímeros deveu-se ao fato destas apresentarem, respectivamente, baixa, média e alta taxa de fluxo plástico. Inicialmente, foram efetuados ensaios em plastômetro, identificando-se qual a taxa de cisalhamento, para posterior aplicação no reômetro capilar nas mesmas condições de temperaturas da etapa inicial de modo que sejam comparados os valores do índice de fluidez obtidos através destes dois métodos.

As equações utilizadas foram:

$$\mathbf{r} = W/V \quad (14)$$

onde ρ , W e V são, respectivamente, densidade, massa e volume do termoplástico extrudado em 10 minutos.

$$IF = \left(\frac{427 \cdot X \cdot \mathbf{r}_{melt}}{t} \right) \quad (15)$$

onde: 427 representa a área do pistão e cilindro, multiplicada por 600; X , deslocamento do pistão; \mathbf{r}_{melt} , densidade do fundido e t , tempo necessário para o deslocamento do pistão (10 min).

A tensão de cisalhamento τ é dada pela Equação 16.

$$t = \left(\frac{F R_n}{2pR_p^2 L_o} \right) \quad (16)$$

onde F é a força do pistão = C (kg) x 9,808 N x 10^5 dinas, R_n é o raio do orifício, R_p é o raio do pistão e L_o é o comprimento do orifício. Ver Figura 1.

2.5. Diferenciação entre termoplásticos mediante a análise da densidade

A densidade de um termoplástico está intimamente relacionada com as suas propriedades mecânicas.

Gruenwald [11] afirma que a densidade de um termoplástico é dependente da cristalinidade, sendo esta, uma função grau de ramificação de cadeias poliméricas. A Tabela 7 apresenta valores do percentual de cristalinidade para vários polietilenos, onde é possível observar a sua relação direta com a densidade.

Altos valores de densidade implicam em alta cristalinidade; o aumento de cristalinidade reduz a mobilidade dos segmentos da fase amorfa adjacente, reduzindo a tenacidade [9].

Portanto, a análise da densidade para os polietilenos é um bom indicativo das suas propriedades mecânicas.

Tabela 7: % Cristalinidade relacionada a densidade para polietilenos

Tipo	r (g/cm³)	% Cristalinidade
Polietileno de alta densidade (PEAD)	0,941 à 0,970	61 – 81
Polietileno de média densidade (PEBD)	0,930 à 0,940	54 - 60
Polietileno de baixa densidade (PEBD) e linear (PEBDL)	0,915 à 0,929	43 - 53

Fonte:[18]

2.6. O programa computacional de CAE Moldflow

Nos últimos anos, o uso de um programa comercial de CAE como ferramenta para o projeto de peças plásticas, tem sido cada vez mais freqüente, impulsionado por aumento do consumo de termoplásticos, crescente demanda de produtos de alta qualidade, além da necessidade de redução de custos e prazos[19].

Segundo *Dihlmann* [3], para uma simulação do preenchimento de uma cavidade (analisada durante a etapa do projeto de peças plásticas), emprega-se um método manual ou um assistido por computadores. Porém, no emprego da metodologia manual, quando de uma análise quantitativa, é necessário grande esforço na resolução de complexos cálculos, os quais

consomem uma parcela considerável do tempo de projeto de uma peça injetada.

Como a exigência de mercado para a redução dos prazos de projetos e avaliação do molde de injeção é cada vez maior, torna-se necessária a introdução de computadores nestas áreas. No decorrer do projeto de um molde, auxiliado por computador, tem-se um processo interativo intenso entre o projetista e o sistema (programa de CAE). Do primeiro, partem a experiência e as idéias das fases do projeto, enquanto que o segundo oferece uma gama elevada de possibilidades de cálculo e acesso às bases de dados com informações de projeto e fabricação [3]. O uso de um programa comercial de CAE tem efeito na redução dos erros dos projetos, além de possibilitar o aperfeiçoamento das variáveis de processo, redução de custos e outras vantagens. As condições em que um objeto é moldado (variáveis de processo), tem significativo efeito na qualidade do componente injetado, seja no seu acabamento superficial, na sua estabilidade dimensional ou nas suas propriedades mecânicas.

A relação entre o processamento e a qualidade do objeto moldado vem sendo estudada a longo tempo. Entretanto, devido à complexidade de relacionar o processamento à qualidade do moldado, o processo de injeção foi considerado como arte, por muitos anos, com a formação de especialistas, os quais desenvolveram suas atividades através dos métodos de tentativas e erros.

A qualidade de um produto de plástico injetado está fundamentalmente associada ao processo de fabricação e suas variáveis, ao molde utilizado e ao termoplástico escolhido para sua produção [3,4,20].

Em 1974, surgiu a primeira versão do *Moldflow* que permitia determinar condições de processamento (temperatura do fundido, temperatura do molde e tempo de injeção), além de possibilitar o balanço do fluxo polimérico nos canais de alimentação e na cavidade. Melhorava o controle da relação, condições de processamento e qualidade do objeto moldado, apesar das limitações, quando da simulação em certas geometrias.

Em 1983, o *Moldflow* foi aperfeiçoado, introduzindo-se a possibilidade de análise de

geometrias tridimensionais e, posteriormente, a da fase de empacotamento (*packing*), ver Anexo I- Ciclo de Injeção.

Através de estudo e interpretação prévia do fluxo do termoplástico, no interior da cavidade, os tempos de projetos e fabricação podem ser significativamente reduzidos, permitindo assim uma produção mais estável [3].

A importância do uso de um programa de CAE pode ser resumida em três pontos [4]:

- a) consolidação do conhecimento do processo;
- b) redução do número e direcionamento de experimentos;
- c) visualização de detalhes do processo difíceis de serem verificados experimentalmente (gradientes de pressão e temperatura, velocidades de preenchimento e outros).

Os sistemas CAE, voltados à área de injeção de termoplásticos, se bem empregados, podem reduzir consideravelmente (e até mesmo eliminar) problemas que ocorrem durante o preenchimento de cavidades dos moldes.

O programa computacional de CAE *Moldflow* apresenta graficamente dados como: distribuição de pressão, tempo de preenchimento, distribuição de temperaturas, perfis de velocidades, entre outros, facilitando de sobremaneira a interpretação de resultados e possibilitando a visualização gráfica e dinâmica de linhas de soldas, bolhas de ar e outros efeitos da moldagem por injeção [3,4].

Através da representação das formas do objeto a ser moldado (geometria), no módulo de CAD (*Computer Aided Design*) do *Moldflow*, onde são representadas as dimensões da peça e suas formas básicas, é possível simular o seu preenchimento, indicando variáveis de processamento (temperatura do molde e temperatura inicial do fluxo termoplástico), bem como a escolha do termoplástico a ser empregado em uma referida simulação.

A utilização principal do *Moldflow* é auxiliar o projeto de moldes de injeção, fornecendo

resultados relativos ao comportamento do fluxo do material, na cavidade do molde.

As etapas para a realização de uma simulação no *Moldflow* são :

a) criação de um modelo da peça a ser injetado em três dimensões (3D), seja no CAD do próprio programa computacional ou de outro, que permita interface com o *Moldflow*, conforme o mostrado na Figura 5;

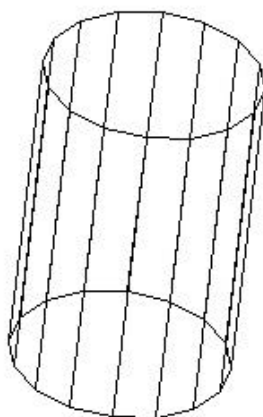


Figura 5:Modelo da peça.

b) geração de uma malha na peça, localizada na metade da espessura de cada constituinte da geometria gerada no CAD. O estabelecimento de uma malha em uma geometria é o processo no qual esta é dividida em pequenas superfícies (células elementares [21]) denominadas elementos. A definição de uma malha é acompanhada da definição de elementos definidos por pontos, denominados nós [19].A Figura 6 apresenta a malha gerada na geometria anterior, detalhando os elementos triangulares e os seus correspondentes nós.

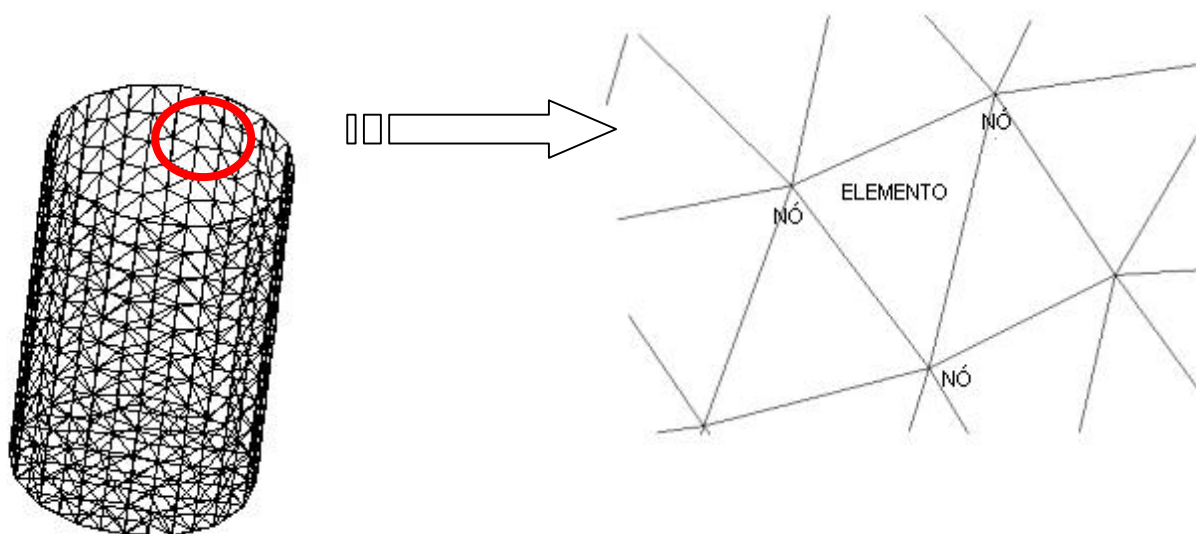


Figura 6: Geração de uma malha elemento e nó.

O número ideal de elementos em uma geometria, também conhecida como densidade de malha, é aquele no qual os resultados apresentados pelo *Moldflow* são considerados suficientemente precisos sem a ocorrência de excessiva demanda computacional. A Figura 7 apresenta a relação existente entre o tempo de processamento (demanda computacional) e o número de elementos discretizados em uma geometria; para este exemplo, a malha ideal é composta por, aproximadamente, 3000 a 4000 elementos.

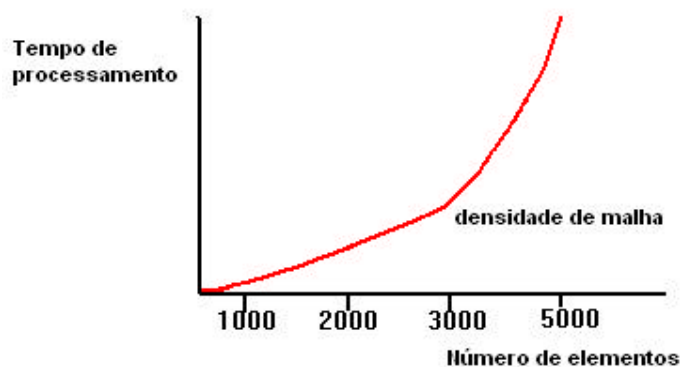


Figura 7: Gráfico que relaciona o número de elementos com o tempo de processamento computacional[22].

c) aplicação das condições de contorno da simulação tais como: termoplástico a ser utilizado para a fabricação da peça, ponto e tempo de injeção, temperatura do

termoplástico no ponto de injeção e temperatura do molde. O fornecimento do tempo de injeção ao programa de CAE é um dado opcional, já que existe a opção de ciclo automático onde o *Moldflow* calculará o melhor tempo de preenchimento da cavidade, em função da menor pressão de injeção gerada, tamanho e espessura da peça - etapa posterior à leitura do modelo em três dimensões (3D);

d) indicação dos resultados da simulação – gradientes de temperatura e pressão, força de fechamento, taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento, tempo de injeção, linhas de solda, bolhas de ar (ar aprisionado), balanceamento de canais de injeção, preenchimento e outros.

Um exemplo da aplicação do *Moldflow* e a sua colaboração para o bom preenchimento de uma cavidade em um processo de injeção, é observado no caso de peças em que os caminhos percorridos pelo material polimérico fundido são diferentes em todos os sentidos, como por exemplo em potes de sorvete de formato retangular. O referido programa realiza o balanceamento do fluxo, fazendo com que o material polimérico parta do ponto de injeção indicado pelo usuário e chegue em todos os extremos da(s) peça(s), no mesmo intervalo de tempo, evitando-se assim o seu empenamento. Outro exemplo de sua aplicação é a possibilidade da definição prévia dos parâmetros de processo, durante a etapa de simulação, reduzindo o tempo de ajuste da injetora.

2.6.1. Solução numérica para a fase de preenchimento

O *Moldflow* simula o processo de injeção de termoplásticos baseado na resolução simultânea das equações da conservação da massa, da conservação do movimento e da

conservação da energia sendo que, a sua solução numérica ocorre em três etapas sucessivas: cálculo do campo de pressão, cálculo do campo de temperatura e avanço da frente de fluxo [19].

O método dos elementos finitos é usado para o cálculo da pressão. Por sua vez, o cálculo da temperatura é desenvolvido através do método das diferenças finitas. O avanço da frente de fluxo utiliza o conceito do volume de controle. Maiores informações sobre estes métodos estão presentes em *Kennedy* [19] e *Maliska* [21]. O cálculo dos campos de pressão e temperatura ocorre em cada volume de controle, ver Figuras 10-17.

Bretas e d'Ávila [12] comentam sobre a simulação do processo de injeção que, na moldagem por injeção, as quedas de pressão e as vazões são bem maiores que as encontradas no processo de extrusão; sendo assim, a taxa de aumento de temperatura devido ao cisalhamento terá maior influência sobre todo o processo, significando que as aproximações isotérmicas (item 3.1.1) proporcionam resultados pobres do ponto de vista da simulação; afirmando que, toda análise deve ser baseada na solução das três equações de conservação (massa, movimento e energia) juntamente com uma equação reológica de estado.

Para aplicar as referidas equações na simulação da fase de preenchimento do processo de moldagem por injeção, algumas hipóteses simplificativas foram levadas em consideração [12,19,20]:

- a) o escoamento é laminar;
- b) as forças gravitacionais são desprezíveis;
- c) o fluxo de calor somente ocorre por condução térmica, sendo expresso pela lei de *Fourier*;
- d) a densidade, o calor específico e a condutividade térmica podem ser considerados constantes;
- e) o escoamento é quasi-estacionário (baixo número de *Reynolds*).

Maiores detalhes sobre a aplicação das hipóteses simplificativas apresentadas anteriormente bem como a dedução das seguintes equações, as quais são utilizadas para a solução numérica da fase de preenchimento pode ser visto em [12,19].

As equações aplicadas na solução numéricas são:

- Equação do gradiente de pressão;
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (17)$$

- Equação da fluidez (S_2);
$$S_2 = \int_0^h \frac{z^2}{h} dz \quad (18)$$

- Equação das velocidades médias no eixo x ;
$$\bar{u}_x = \frac{-2S_2}{(h^+ - h^-)} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (19)$$

- Equação das velocidades médias no eixo y ;
$$\bar{u}_y = \frac{-2S_2}{(h^+ - h^-)} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (20)$$

- Equação da conservação da energia
$$\mathbf{r}_{melt} Cp \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \mathbf{h}g^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (21)$$

- Equação da taxa de cisalhamento
$$\mathbf{g}^2 = \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{z} \right)^2 \quad (22)$$

As equações 17 e 19 são resolvidas nas seguintes condições de contorno:

i. A pressão é considerada zero na frente do fluxo fundido:

$$p = 0 \quad (23)$$

ii. A pressão ou a vazão inicial do fluxo é definida como sendo aquela no(s) ponto(s) onde o termoplástico fundido é injetado ou seja no ponto de injeção.

$$p = p_{in} \text{ ou } q = q_{in} \quad (24)$$

iii. Uma das considerações prévias a etapa de integração da Equação da conservação do movimento é que o polímero injetado possui, simultaneamente, as fases sólida e líquida e que o fluxo polimérico está interposto a duas camadas de polímeros solidificadas aderidas

as paredes do molde conformador[19]. Considerando que o gradiente de pressão é função de sua posição nos eixos x e y , o gradiente normal de pressão é zero em qualquer ponto dentro ponto da camada impermeável (Figura 8).

$$(\nabla p / \nabla n) = 0 \quad (25)$$

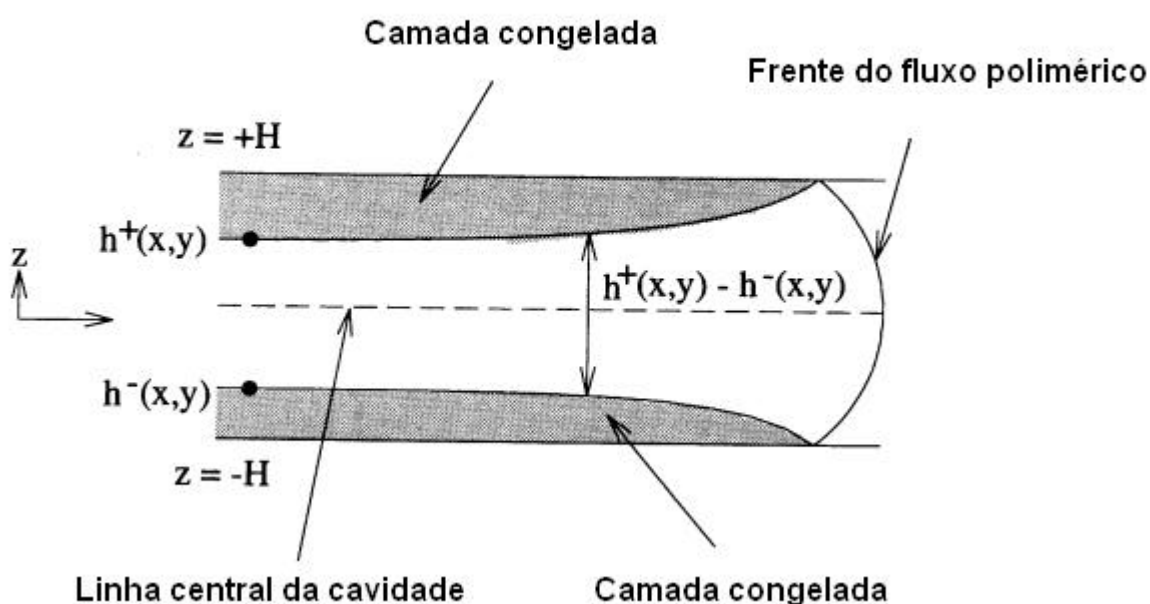


Figura 8: Camada congelada. Fluxo polimérico confinado a duas camadas poliméricas solidificadas [19].

- iv. A temperatura na superfície da parede da cavidade moldante (T_w) ou em algum ponto interior ($z = h$ ou $z = h + \delta$) da parede do molde e considerada constante e definida. Isto é:

$$T = T_w \quad (26)$$

- v. O gradiente de temperatura na direção do eixo z , é zero na linha central da cavidade ($z = 0$). Isto é:

$$(\nabla T / \nabla z) = 0 \quad (27)$$

- vi. A temperatura no ponto de injeção está definida. Isto é:

$$T = T_{in} \text{ no ponto de injeção} \quad (28)$$

Devido a dependência da fluidez S_2 (Equação 18) com a viscosidade (η) e esta, por sua vez, com a temperatura (T) e taxa de cisalhamento ($\dot{\mathbf{g}}$), as Equações 17 e 19 devem ser resolvidas simultaneamente. Portanto, para a correspondente solução numérica as equações devem ser resolvidas através de iterações em pequenos intervalos de tempo [19]. Em um particular intervalo de tempo, a temperatura é assumida constante e o campo de pressão é calculado através do emprego dos valores iniciais de viscosidade e temperatura. A viscosidade inicial está prevista no banco de dados do *Moldflow* para cada polímero em forma de uma equação matemática (ver Anexo C); a temperatura inicial do fluxo polimérico (T_{melt}) é informada pelo usuário do programa computacional (item 3.1.1). O processo de solução numérica tem as seguintes etapas [19]:

- I- Início das iterações. O algoritmo do *Moldflow* aplica na Equação 18 (Cálculo de S_2), os valores iniciais de viscosidade (η) e temperatura do fundido (T_{melt}) do termoplástico escolhido;
- II- Após o cálculo da fluidez S_2 , é resolvido a Equação 17 e determinado o campo de pressões e após as velocidades médias (Equações 19 e 20);
- III- Caso não seja a primeira iteração, após a determinação da fluidez S_2 , o *Moldflow* calcula as velocidades médias \bar{u}_x, \bar{u}_y (Equações 19 e 20) e posteriormente a taxa de cisalhamento ($\dot{\mathbf{g}}$) através da Equação 22 ,utilizando os valores de viscosidade (η) da iteração anterior;
- IV- Assumindo a temperatura constante, a viscosidade (η) é atualizada, utilizando o novo valor de taxa de cisalhamento ($\dot{\mathbf{g}}$), determinada na etapa anterior;

$$\mathbf{h}=f(\dot{\mathbf{g}}, T) \quad (29)$$

- V- Novamente, calcula a fluidez S_2 (Equação 18) com o valor de viscosidade atualizado na etapa anterior, e após o campo de pressões atualizado (Equação 17);
- VI- O campo de pressões ($\partial p/\partial x$, $\partial p/\partial y$) e a fluidez (S_2) atualizados são utilizados novamente na determinação das velocidades médias \bar{u}_x, \bar{u}_y (Equações 19 e 20);
- VII- Posteriormente, são calculadas a taxa de cisalhamento ($\dot{\mathbf{g}}$), a viscosidade (η) para uma temperatura constante, a fluidez S_2 e o campo de pressões até um nível de convergência desejado entre as últimas iterações;
- VIII- Após a convergência do campo de pressão, são calculadas as velocidades médias \bar{u}_x, \bar{u}_y a taxa de cisalhamento ($\dot{\mathbf{g}}$) e a viscosidade (η), sendo aplicados na Equação 21 para o cálculo dos termos referentes a geração de calor. Após, a aplicação do método das diferenças finitas é determinado o campo de temperaturas;
- IX- Com a temperatura agora conhecida, a viscosidade (η) é novamente atualizada, utilizando-se o valor da taxa de cisalhamento ($\dot{\mathbf{g}}$) da iteração anterior. O valor de viscosidade desta iteração é utilizado no cálculo do fluxo em cada volume de controle pertencente a frente de fluxo;
- X- Conhecendo-se a vazão do fluxo polimérico para cada volume de controle é possível prognosticar como o preenchimento ocorrerá no próximo incremento de tempo. Sendo que a frente de fluxo avança da mesma maneira.

O *Moldflow* simula o avanço da frente de fluxo do termoplástico fundido através do método do volume de controle [19]. Os volumes de controle são definidos através de uma região poligonal formada pela ligação de partes de elementos triangulares, sendo que para cada nó está associado um volume de controle (Figura 9).

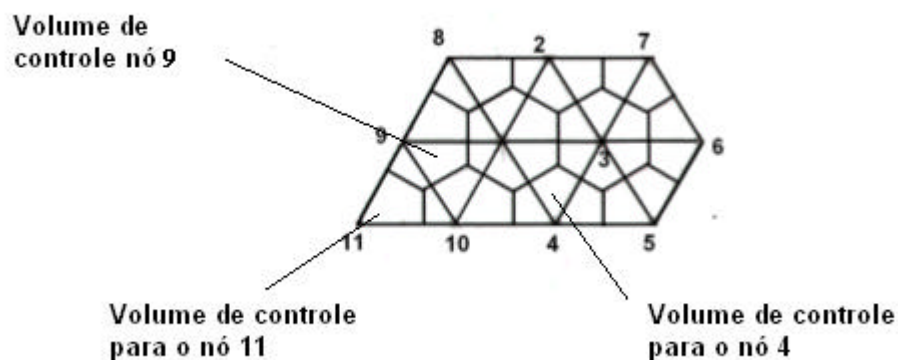


Figura 9: Volumes de controle e nós associados [19].

O *Moldflow*, para cada nó da geometria, executa a seqüência, descrita anteriormente, do cálculo sucessivo do campo de pressão, campo de temperatura e, após a sua convergência, o avanço da frente de fluxo. Após a resolução do campo de pressão, a vazão do fluxo em cada nó é calculada. Após o preenchimento de um nó, a frente de fluxo avança, preenchendo todos os nós circunvizinhos ao primeiro.

Um exemplo ilustrativo do avanço da frente de fluxo é apresentado a seguir que, por simplicidade assume que a resistência ao fluxo polimérico é igual em todas as direções, apresentado na Figura 10. Este exemplo ilustra o preenchimento de uma geometria de forma hexagonal com o ponto de injeção localizado no seu centro. Por conveniência, os elementos discretizados formadores da malha têm as mesmas dimensões.

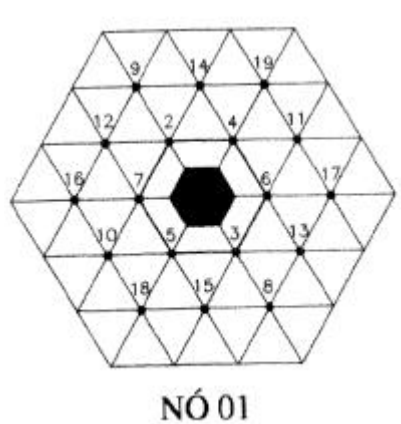


Figura 10: Preenchimento do nó 1 [19].

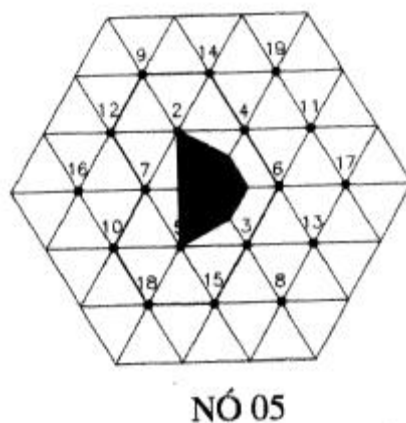


Figura 12: Preenchimento do Nó 5 [19].

Os próximos nós a serem preenchidos, de acordo com a regra da menor distância internodal, serão os de número 7, 3, 6, ou 4, todos ainda na frente de fluxo inicial. Assumindo que o nó 6 é o próximo a ser preenchido mostrado na Figura 13.

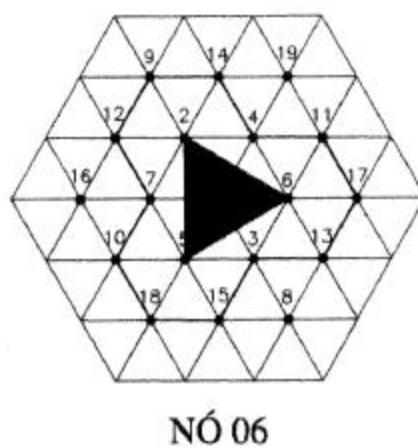


Figura 13: Preenchimento do Nó 6 [19].

Os próximos nós a serem preenchidos serão os de número 7, 3 ou 4. Assumindo que o nó 7 é o próximo a ser preenchido (Figura 14).

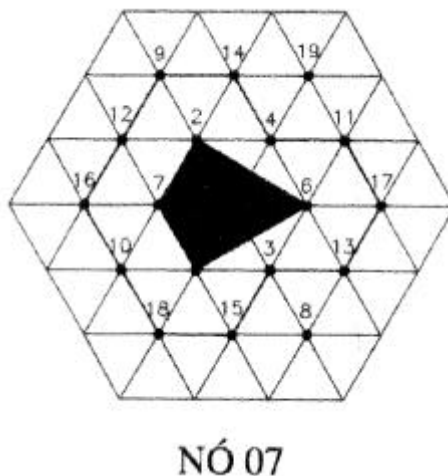


Figura 14: Preenchimento do Nó 7 [19].

Os próximos nós a serem preenchidos são os de número 3 ou 4, de acordo com o apresentado na Figura 14. Assumindo que o nó 3 é o próximo a ser preenchido, após o preenchimento do nó 4, a frente inicial de fluxo inicial é preenchida (Figura 15).

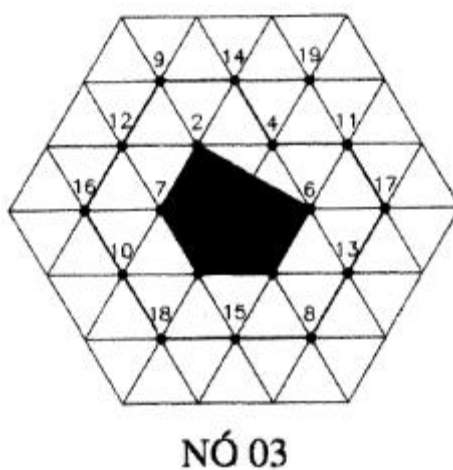


Figura 15: Preenchimento do Nó 3 [19].

Satisfazendo a regra da menor resistência ao fluxo polimérico para a escolha do caminho a ser percorrido pelo fluxo polimérico, o nó 4 é preenchido, apresentado na Figura 16.

Um dos nós conectados ao nó 2 pode ser o próximo a ser preenchido e inicia-se o ciclo novamente até o preenchimento total da geometria.

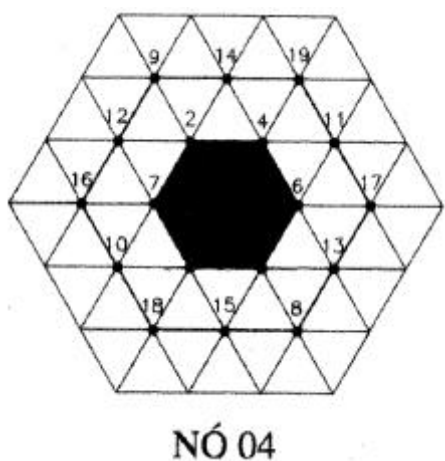


Figura 16: Preenchimento do Nó 4 [19].

2.6.2 Parâmetros físico-químicos de caracterização de termoplásticos

A caracterização de termoplásticos é o estabelecimento, através de técnicas científicas tais como ensaios DSC e determinação de curvas reológicas, dos parâmetros físico-químicos de um termoplástico necessários à previsão dos fenômenos presentes na injeção, permitindo a introdução destes no banco de dados do *Moldflow* [24]. A caracterização é utilizada quando da necessidade de prever-se resultados em CAE de um material polimérico ausente do banco de dados do *Moldflow*, garantindo assim, que o material empregado, na etapa de simulação, seja o mesmo utilizado na moldagem por injeção.

Os parâmetros físico-químicos estabelecidos são aplicados nas equações governantes aplicadas na solução numérica da fase de preenchimento de cavidades.

Os parâmetros físico-químicos necessários são:

- Condutividade térmica;
- Temperatura de extração;
- Calor específico;
- Temperatura sem fluxo (*no flow temperature*);
- Viscosidade;
- Curva PVT e contração polimérica.

O conhecimento e o entendimento dos parâmetros físico-químicos necessários à caracterização de termoplásticos é etapa prévia para a avaliação do proposto critério de contratipos de termoplásticos.

Kennedy [19] afirma que a realização de uma análise da injeção em programas CAE (preenchimento, empacotamento e resfriamento) necessita o conhecimento de dados sobre as propriedades físicas do termoplástico empregado e do material na qual o molde foi construído.

Bons resultados de uma simulação em CAE exigem parâmetros precisos. A obtenção de parâmetros de boa qualidade é crítica. Os resultados de simulação são tão bons, quanto os parâmetros físico-químicos de caracterização. Os métodos para obtenção destes parâmetros físico-químicos são citados nas referências de 25 a28.

A Condutividade Térmica (k) está associada à transferência de calor, através de uma seção transversal de área, em um definido intervalo de tempo, sendo medida através da análise da entalpia associada ao processo, assumida como constante pelo *Moldflow*, devido à dificuldade de sua obtenção[3,19,29,42].

O conceito do calor específico (C_p) auxilia na determinação do calor necessário, para o alcance da temperatura de fusão do termoplástico e, portanto, a quantidade de calor que deve ser retirada após a moldagem, quando da extração da peça moldada, sendo utilizado para calcular a perda de calor por condutividade do fundido dentro do molde durante o seu preenchimento e também o aumento de temperatura gerado pelo calor de cisalhamento [19]. A determinação do calor específico está baseada na quantidade de calor, cedida a um corpo de massa conhecida, relacionando-a com o respectivo aumento isobárico de temperatura [29,30].

A temperatura de extração é aquela na qual o fundido está solidificado, podendo ser extraído do molde, sendo o seu alcance indicativo para a abertura do molde [17,19,28].

A temperatura sem fluxo por sua vez, é definida como sendo aquela na qual o avanço da frente de fluxo polimérico (item 2.6.1), preenchedora da cavidade, efetivamente cessa. O

conceito de temperatura sem fluxo é empregado na modelagem da camada polimérica solidificada localizada nas paredes do molde, identificando quando o ponto de injeção [17,31] está solidificado[19].

Os dados PVT (pressão, volume e temperatura), descrevem a variação do volume específico de um termoplástico fundido, em função da pressão e temperatura [19,22-24]. Tais dados servem como base para o *Moldflow* determinar a redução volumétrica de um termoplástico durante a simulação [19]. A redução volumétrica indica o percentual de contração volumétrica alcançada por um termoplástico, quando do final da fase de empacotamento, indicando assim a quantidade de termoplástico fundido que deve ser adicionado para a sua compensação [20].

De acordo com *Bretas e D'Ávila* [12] e *Kennedy* [19], a viscosidade é o parâmetro físico químico mais significativo entre os necessários a uma simulação da moldagem por injeção, determinando características de processamento do fluxo do fundido, pois indica a capacidade de preenchimento de cavidades.

Bretas e D'Ávila [12] afirmam que:

- a) as vazões, quedas de pressão e aumentos de temperaturas que são parâmetros relevantes nas operações de processamento, dependem diretamente da propriedade viscosidade (η);
- b) quando um polímero é submetido a um campo de deformação em cisalhamento simples, este apresentará uma resistência ao fluxo;
- c) a grandeza que indica tal resistência é conhecida como viscosidade em regime permanente de cisalhamento ou simplesmente viscosidade $h(\dot{g})$.

A constante de proporcionalidade $h(\dot{g})$ é definida como sendo a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação do fluido, \dot{g} , considerando o modelo de viscosidade composto de duas placas [32,33].

$$t = h(\dot{g})\dot{g} \quad (30)$$

$$h(\dot{g}) = \dot{g} / t \quad (31)$$

onde $h(\dot{g})$ é a viscosidade.

Os dados de viscosidade estão associados a uma determinada temperatura e taxa de cisalhamento [12,19,20,24]. Os termoplásticos fundidos são fluidos não newtonianos e, para a sua caracterização reológica são necessários modelos matemáticos que relacionam viscosidade com a taxa de deformação do material. Polímeros não newtoniano são aqueles em que a relação tensão/taxa de deformação não se mantém constante; ou seja a tensão ou a resposta a deformação será diferente para cada taxa de cisalhamento aplicada [12].

O Anexo C-Tratamento dos dados de viscosidade apresenta alguns dos modelos matemáticos de viscosidades utilizados pelo *Moldflow* e também, o tratamento matemático aplicados aos valores experimentais de viscosidade.

2.7 Influência do índice de fluidez e densidade nas equações governantes para a fase de preenchimento

A definição das equações governantes aplicadas na fase de preenchimento de cavidades e o seu entendimento em conjunto com a sua solução numérica apresentada no item 2.6.1 são etapas fundamentais para a avaliação da possibilidade do estabelecimento de semelhanças entre termoplásticos via análise do índice de fluidez e da densidade. Pois, com este conhecimento, tem-se a compreensão do modo qual o algoritmo do *Moldflow* calcula os variados resultados de

simulações, possibilitando o entendimento da significância de cada um dos termos componentes das equações governantes e os relacionando com o índice de fluidez e a densidade. Em relação a estereoisomeria, não foi identificada relação com os termos componentes das equações governantes.

2.7.1 Índice de fluidez

Como discutido anteriormente, o índice de fluidez é um parâmetro empírico associado a capacidade de um polímero em preencher uma cavidade moldante podendo ser relacionado, qualitativamente, com o inverso da viscosidade (h) de um termoplástico, sendo ambos considerados parâmetros de fluxo polimérico (itens 2.4 e 2.6.2).

Avaliando as equações descritas no item (2.6.1) identifica-se a importância dos dados da viscosidade na solução numérica utilizada para resolução da fase do preenchimento de cavidades no *Moldflow*.

Anteriormente (item 2.4) foram apresentados trabalhos de vários pesquisadores os quais apontaram a relação entre o índice de fluidez e a massa molar média em número (M_n) e a massa molar média em peso (M_w), sendo que estas últimas podem ser relacionadas com a viscosidade (h) de um polímero através da equação de *Mark-Howkink* [12].

Entretanto, não é possível o emprego dos valores do índice de fluidez, a nível quantitativo, como substituinte dos dados da viscosidade pelo fato que sua medição é executada em um específico valor de carga e temperatura (Tabelas 1 e 2), sendo que estas condições não cobrem a totalidade de taxas de cisalhamento e temperatura empregadas na obtenção de curva viscosimétrica. Por exemplo, a curva viscosimétrica para o polietileno de alta densidade Lupolen

5031 L, presente no banco de dados do *Moldflow*, é determinada nas temperaturas de 205 °C, 225 °C e 245 °C e taxas de cisalhamento (\dot{g}) de 100 s⁻¹, 1000 s⁻¹ e 10000 s⁻¹. O seu índice de fluidez (8,2 g/10 min) é medido na temperatura de 190 °C e massa aplicada igual a 5 kg [35]. Utilizando a equação apresentada em (2.4.1) deduzida por *Shenoy e Saini* [16], pode-se calcular a taxa de cisalhamento (\dot{g}) aplicada no cálculo do índice de fluidez para este polímero.

Sendo assim:

$$\dot{g} = 1,83 \left(\frac{IF}{r} \right) \quad (32)$$

sendo IF o índice de fluidez e ρ , a densidade, para este polímero seu valor é 0,952 g/cm³ [35].

A taxa de cisalhamento calculada para a medição do índice de fluidez é aproximadamente 16 s⁻¹, o que corrobora o afirmado anteriormente, em relação as diferenças de condições de medição da curva reológica e do valor do índice de fluidez.

O discutido neste item vem a confirmar a posição de *Shit* [14] em relação a aplicação exclusiva do índice de fluidez para a diferenciação entre termoplásticos e a de *Hall* [10] em relação as baixas tensões de cisalhamento durante as medições do índice de fluidez em relação as ocorridas durante a determinação de uma curva viscosimétrica. *Hall* [10] afirma também que o índice de fluidez é somente o indicativo de um ponto na curva de viscosidade.

2.7.2 Densidade

A densidade (ρ) medida de acordo com a ASTM D1505, por sua vez, não apresenta correlação com os termos componentes das equações aplicadas na solução numérica da fase de

preenchimento de cavidades. A equação da conservação da energia (Equação 21) apresenta, como termo componente, a propriedade densidade do fundido (ρ_{melt}) sendo que esta é o inverso do volume volumétrico obtido das curvas PVT (item 2.6.2); sendo a sua medição executada a uma pressão de 0 MPa e a uma temperatura média de processamento utilizada para a simulação da injeção do material polimérico em questão[22,24]. A principal diferença entre estes dados de densidade é que uma é referente ao termoplástico no estado sólido (ASTM D1505) e a propriedade utilizada nas equações é referente ao estado fundido (ρ_{melt}).

2.7.3 Sumário da influência do índice de fluidez e densidade nas equações governantes

A relação de similaridade identificada nas tabelas de contratipos está fundamentada na proximidade dos valores do índice de fluidez e densidade para os polietilenos e proximidade dos valores do índice de fluidez e, o índice de fluidez e a estereoisomeria para os polipropilenos, sendo que as referidas condições de similaridade devem ser avaliadas simultaneamente, para termoplásticos de um mesmo grupo polimérico. Através da análise da influência dos dados estudados (índice de fluidez e densidade) nas equações governantes da fase de preenchimento de cavidades, como comentado anteriormente, é possível comentar-se a viabilidade do critério proposto para a indicação de similaridade entre termoplásticos de mesmo grupo polimérico através da semelhança dos referidos dados. O dado densidade não está presente nas equações utilizadas para a solução matemática da referida fase, restando da proposta inicial, o índice de fluidez. Idêntica afirmativa é realizada para a estereoisomeria.

O índice de fluidez apresenta uma relação qualitativa com a viscosidade, havendo a possibilidade de apresentar-se insuficiente para o estabelecimento de uma relação de similaridade entre diferentes termoplásticos, de acordo com o discutido no item 2.4.1.

Os fatos indicados acima, possivelmente, indicam a impossibilidade de utilizar-se o referido método para a indicação de semelhança entre materiais termoplásticos de um mesmo grupo. Algumas simulações do preenchimento de cavidades foram realizadas para corroborar esta assertiva.

CAPÍTULO 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será mostrado o procedimento experimental empregado para avaliar a possibilidade de estabelecer um critério de similaridade (contratipos) entre termoplásticos para ser aplicado na simulação da moldagem por injeção no programa computacional de CAE *Moldflow*.

Conforme discutido anteriormente, na indústria de transformação de plásticos é aplicada a prática de considerar como critério para a indicação da similaridade de diferentes termoplásticos, de um mesmo grupo polimérico, os valores do índice de fluidez e da densidade, para polietilenos de baixa e alta densidade; e o índice de fluidez e a estereoisomeria para polipropilenos, estando estas relações apresentadas nas tabelas de contratipos. A possibilidade de estabelecer um critério de similaridade entre termoplásticos foi utilizada na previsão qualitativa (tendência) dos resultados – tempos de preenchimento, gradientes de pressão, presença de linhas de solda e bolhas de ar.

Como discutido no item 2.7, das condições empregadas para o estabelecimento de semelhanças nas tabelas de contratipos, a única que apresenta relação com os termos componentes das equações governantes da fase de preenchimento de cavidades é o índice de fluidez.

Portanto, será avaliado a utilização dos valores do índice de fluidez como condição única e suficiente para o estabelecimento de uma relação qualitativa entre os resultados de simulações da injeção realizadas com diferentes termoplásticos de mesmo grupo polimérico. Será apresentado quais os termoplásticos estudados e os seus respectivos valores do índice de fluidez e, as condições para a realização das simulações do preenchimento de cavidades tais como geometrias das peças e temperaturas de molde e de injeção.

Assim, no sentido de embasar tal afirmação foram desenvolvidos estudos de casos de

simulação do preenchimento de cavidades no programa de CAE *Moldflow* descritas posteriormente.

3.1 Definição das condições de contorno e dos resultados avaliados

Conforme anteriormente mencionado, o *Moldflow* possibilita ao seu usuário a interpretação de vários resultados obtidos da simulação de injeção em uma cavidade com uma definida geometria, para específicas condições de contorno. Muitos destes resultados estão relacionados com as direções do avanço da frente de fluxo polimérico tais como, localização de bolhas de ar e linhas de solda e com valores de velocidade do fluxo polimérico, o qual influi no tempo de preenchimento da cavidade.

3.1.1. Condições de contorno

Antes do início de uma simulação é necessária a definição de algumas condições de contorno aplicáveis as simulações a serem realizadas. A definição de específicas condições de contorno tem o intento de garantir que as simulações executadas sejam somente influenciadas pelo material termoplástico, não estando suscetíveis a fatores não previstos; estabelecendo assim, uniformidade das condições empregadas durante as simulações nos grupos poliméricas estudados.

As condições de contornos consideradas para as simulações do preenchimento de cavidades estão apresentadas a seguir, sendo que estas são as únicas aplicáveis. As condições de contorno são:

a) temperatura do molde (T_m), é a temperatura na qual o molde conformador [17,31] deve estar durante a injeção cujo valor é dependente do tipo do termoplástico [6,7]. Como já apresentado previamente, o *Moldflow* a considera constante para toda a superfície de contato do molde com o material polimérico usado na modelagem;

b) temperatura de injeção (T_i), é a temperatura da frente de fluxo quando da sua alimentação no ponto de injeção. O valor indicado para a (T_i) é dependente do material polimérico empregado na simulação moldagem [7]. A determinação do campo de temperaturas ocorre em dois distintos algoritmo denominados: rápido ou fluxo multilaminado, indicados pelo interessado em simulação.

O algoritmo rápido considera o objeto moldado como possuindo um único elemento finito ao longo da espessura do moldado; a análise via fluxo multilaminado, por sua vez, considera a seção transversal da geometria formada de vários elementos, conforme o mostrado na Figura 17, sendo a temperatura atualizada através de iterações em cada um destes elementos.

A análise via fluxo multilaminado do gradiente térmico utiliza o método das diferenças finitas para a realização dos cálculos do gradiente de temperatura ao longo espessura da peça injetada [19].

Este algoritmo exige uma maior demanda computacional em relação ao método do algoritmo rápido mas, garante melhores resultados pois evita a aproximação isotérmica ao longo da espessura da peça, garantindo um maior detalhamento dos cálculos térmicos, de compressibilidade do material polimérico e da viscosidade [22];

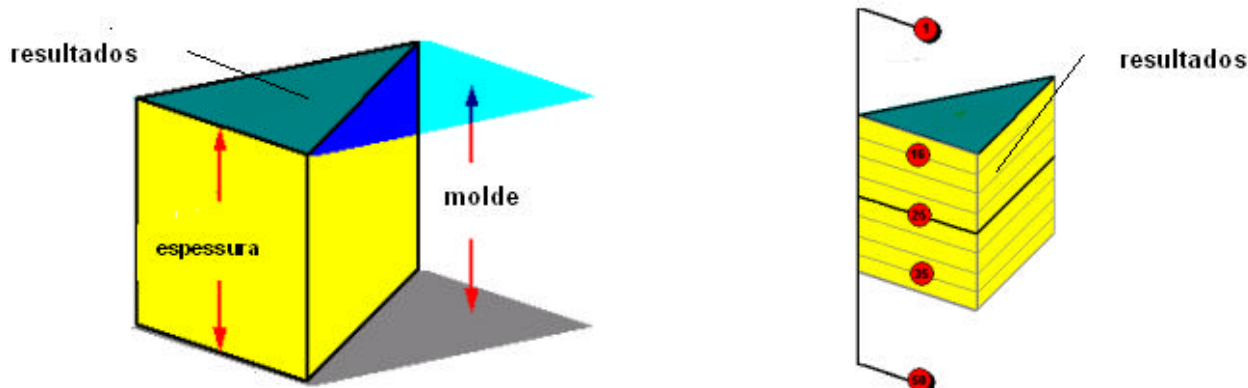


Figura 17: Análise térmica via fluxo rápido e fluxo multilaminado [22].

c) compressão via PVT. A compressão do fluxo polimérico via curva PVT (pressão, volume e temperatura) descreve a variação do volume específico em função da pressão e temperatura, fundamentando a análise da redução volumétrica do polímero durante a simulação do preenchimento [19-22];

d) ponto de injeção é(são) o(s) local(is) definido(s) na cavidade moldante para a passagem do material polimérico fundido [7,17];

e) algoritmo para o cálculo do gradiente de pressão. O algoritmo do *Moldflow* efetua a solução numérica das equações governantes em função do gradiente de pressão da fase de preenchimento (item 2.6.1). O gradiente de pressão da fase de preenchimento pode ser calculado por distintos modos:

e1) menor resultado possível (condição *automatic*). Esta condição informa ao *Moldflow* que o tempo de preenchimento será definido em função de que o gradiente de pressão do preenchimento seja o mínimo possível;

e2) através de um definido tempo de preenchimento pelo usuário. Neste caso o usuário, define um tempo de preenchimento, sendo que o gradiente de pressão é calculado em sua função. A escolha do tempo de preenchimento para a realização de simulações foi baseada na proximidade com os tempos previstos na condição a). A

definição do tempo de preenchimento é um dos parâmetro da injetora; o seu operador define qual o tempo desejado de acordo com a capacidade do equipamento disponível.

As condições de contornos utilizados são:

- i) cálculos térmicos, algoritmo fluxo multilaminado
- ii) contração volumétrica, via curva PVT;
- iii) temperaturas do molde e de injeção. Estas são indicadas em faixas de valores ideais para cada termoplástico pelo *Moldflow*. Por exemplo, a faixa de temperatura ideal para o molde conformador do polipropileno Novolen 1100 H é de 20 °C a 60 °C; a faixa de temperatura de processamento é 215 °C a 255 °C. Foram definidos valores médios para a temperatura do molde e de injeção para cada grupo de polímeros, respeitando as suas condições ideais.

As condições de contorno empregados neste trabalho, para cada grupo polimérico, são apresentadas na Tabela 8 onde observa-se um valor para a temperatura do molde e dois valores distintos para a temperatura de injeção do fluxo polimérico, denominados condição 1 (C1) e condição 2 (C2).

Tabela 8: Condições de Contorno para as simulações do preenchimento de cavidades.

Polímeros	T _m	C1	C2	Fluxo multilaminado	Compressão Via PVT
		T _f	T _f		
PEAD	40 °C	240 °C	260 °C	Sim	Sim
PEBD	40 °C	225 °C	245 °C	Sim	Sim
PP	40 °C	230 °C	250 °C	Sim	Sim

3.1.2 Resultados avaliados

O *Moldflow* oferece aos seu usuário variados resultados de simulações do preenchimento como por exemplo gradientes de temperaturas e taxas de cisalhamento. Este trabalho analisou os resultados gradiente de pressão, tempo de preenchimento, presença de linhas de solda e bolhas de ar. A sua escolha baseou-se nos seguintes motivos:

- i) importância na solução numérica das equações governantes. O gradiente de pressão é fator fundamental na solução numérica pois, o fluxo polimérico simulado somente avança para um outro elemento após o alcance de um certo nível de convergência entre os resultados do gradiente de pressão entre as últimas iterações realizadas pelo algoritmo do *Moldflow*, conforme apresentado anteriormente no item 2.6.1;
- ii) produtividade. O tempo de preenchimento de uma cavidade pode ser relacionado com a produtividade do equipamento injetor pois, indica quando o molde foi totalmente preenchido com polímero fundido (Anexo I - Ciclo de injeção);
- iii) resistência mecânica da peça injetada. O encontro de duas frente de fluxo polimérica, com frequência, pode ser causador de zonas frágeis no objeto moldado.

Definindo os resultados das simulações a serem avaliados:

- 1) gradiente de pressão. O gradiente de pressão do polímero fundido representa a perda de pressão por unidade de comprimento ao longo da direção do fluxo, sendo influenciado pela velocidade do polímero fundido e espessura da peça [22]. A Figura 18 apresenta distintas situações de preenchimento de cavidades, apresentando diferentes gradientes de pressão; 108,3 MPa e 78,8 MPa. O conveniente é que o gradiente de pressão durante o preenchimento seja o menor possível pois assim, o nível de tensões residuais no objeto injetado é menor, reduzindo possibilidades de seu empenamento;

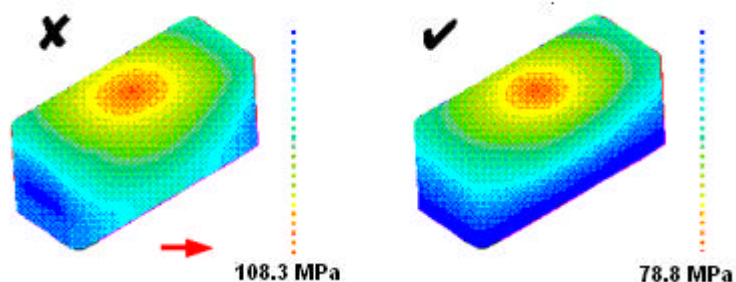


Figura 18: Gradiente de pressão em duas diferentes condições de injeção [22].

2) tempo de preenchimento. O tempo de preenchimento indica a posição da frente de fluxo a intervalos regulares de preenchimento da(s) cavidade(s) moldante. A Figura 19 ilustra o tempo de preenchimento de uma geometria onde cada cor representa as regiões do molde que são preenchidas simultaneamente.

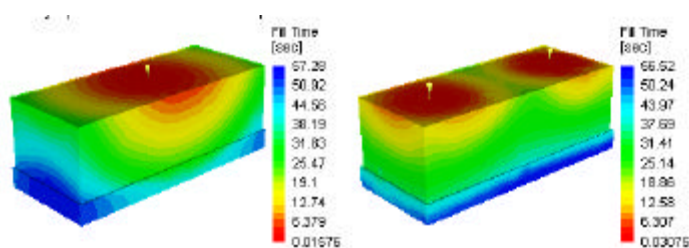


Figura 19: Tempo de preenchimento em duas diferentes condições de injeção: um e dois pontos de injeção [22]

3) linhas de solda. A linha de solda é uma zona criada pelo encontro de duas frentes de fluxo polimérico, quando do preenchimento de uma cavidade (Figura 20). As linhas de solda devem ser evitadas, sempre que possível, pois podem gerar fraqueza estrutural na peça moldada além de desagradável aspecto estético. Caso não seja possível a sua eliminação, estas devem ser deslocadas para zonas da peça sujeitas a menores esforços mecânicos, através da alteração da direção do fluxo polimérico através de ações tais como: alterar a localização do ponto de injeção e espessura de partes do objeto moldado.

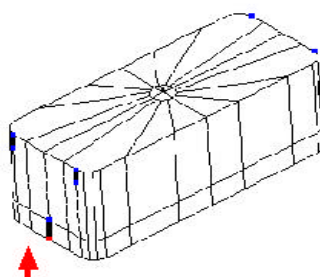


Figura 20: Linhas de solda [22]

4) bolhas de ar. O *Moldflow* indica a presença de possíveis bolhas de ar (*air traps*) quando há convergência de pelo menos duas frentes de fluxo em um mesmo nó ou então, quando este seja o último ponto a ser preenchido pelo polímero fundido, conforme ilustram as situações visualizadas na Figura 21.

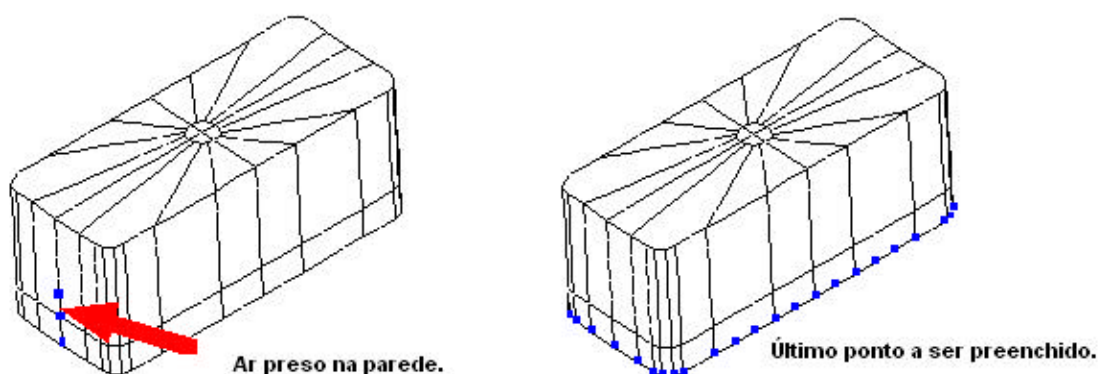


Figura 21: “Armadilhas” de Ar [22]

3.2 Levantamento de termoplásticos e índices de fluidez

Inicialmente, executou-se um levantamento de todos os polietilenos de alta e baixa densidade e polipropilenos presentes no banco de dados do *Moldflow*. Posteriormente, em análise no catálogo eletrônico *Campus* [35], catálogos de fabricantes de polímeros [34-41] e no banco de dados do *Moldflow*, identificou-se para os polímeros pesquisados anteriormente, os

correspondentes valores do índice de fluidez, garantindo que seus valores fossem obtidos nas mesmas condições de carga e temperatura sendo que, para alguns dos termoplásticos levantados não foi possível identificar o respectivo valor do índice de fluidez devido à indisponibilidade de dados. Os dados de índices de fluidez foram fornecidos por fabricantes nacionais de polímeros e pelo *Campus* [35], sendo que estes não abrangem todos os polímeros dos respectivos grupos poliméricos presentes no banco de dados do referido programa computacional.

Os polímeros avaliados e respectivos índices de fluidez são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Termoplásticos analisados e respectivos índice de fluidez .

Nr.	Polímero	Grupo	IF(g/10 min)	Fornecedor
1.	LUPOLEN 5031 L	PEAD	8,2	BASF
2.	6031 M	PEAD	10,1	BASF
3.	ELTEX A 1050	PEAD	5	SOLVAY
4.	ELTEX A 1100	PEAD	11	SOLVAY
5.	ELTEX A 3180	PEAD	22	SOLVAY
6.	ELTEX A 3300	PEAD	32	SOLVAY
7.	ELTEX A 4090	PEAD	11	SOLVAY
8.	ELTEX A 2080	PEAD	8	SOLVAY
9.	HOSTALEN GA 7260	PEAD	22,9	HOECHST
10.	HOSTALEN GC 7260	PEAD	10,5	HOECHST
11.	HOSTALEN GB 7250	PEAD	12,4	HOECHST
12.	HOSTALEN GD 7255	PEAD	5,1	HOECHST
13.	MARLEX HMN4550	PEAD	4,7	PHILLIPS
14.	MARLEX HMN 6060	PEAD	6,3	PHILLIPS
15.	MARLEX HMN 5580	PEAD	7,6	PHILLIPS
16.	MARLEX HMN 55180	PEAD	17,2	PHILLIPS
17.	NOVOLEN 1100 H	PP	2,5	BASF
18.	NOVOLEN 1100 N	PP	14,6	BASF
19.	NOVOLEN 1125 N	PP	13,7	BASF
20.	ELTEX RP 210	PP	3	SOLVAY
21.	ELTEX RV 210	PP	9	SOLVAY
22.	ELTEX RW 210	PP	15	SOLVAY
23.	ELTEX RY 210	PP	40	SOLVAY
24.	ELTEX TL 220	PP	2	SOLVAY
25.	ELTEX HV 252	PP	11	SOLVAY
26.	LUPOLEN 1810 D	PEBD	0,25	BASF
27.	LUPOLEN 1812 D	PEBD	0,25	BASF
28.	LUPOLEN 1812 E	PEBD	0,5	BASF
29.	LUPOLEN 1840 D	PEBD	0,25	BASF
30.	LUPOLEN 2420 F	PEBD	0,75	BASF
31.	LUPOLEN 2420 H	PEBD	1,9	BASF

Fonte : [Banco de dados de polímeros do *Moldflow Plastics Insight 1.1*].

3.3 Estudos de caso

A possibilidade de estabelecer-se de um critério de contratipos através de análise do índice de fluidez foi avaliada através da interpretação dos resultados de simulações do preenchimento de cavidades em determinadas condições de contorno (item 3.1.1) e geometrias de peças (item 3.3.1)

Foram realizadas duas etapas de simulações:

- a) análise dos resultados tempo e pressão de preenchimento. Simulações do preenchimento de cavidades com todos os polímeros presentes na Tabela 9. São analisados, simultaneamente, todos os polímeros de cada um dos grupos poliméricos estudados. Onde verifica-se a possibilidade da previsão de tendências (maior/menor valores do tempo e pressão de preenchimento) dos citados resultados, via análise do índice de fluidez;
- b) análise da presença de linhas de solda e bolhas de ar. Analisou-se a posição na geometria da peça onde está indicada a presença de linhas de solda e bolhas de ar, avaliando a sua relação com o índice de fluidez dos termoplásticos.

As formas utilizadas pelo *Moldflow* para apresentar os resultados simulados para o tempo e pressão de preenchimento e presença de linha de solda e bolhas de ar são distintas, sendo relevante o seu entendimento. O *Moldflow* apresenta valores (resultados numéricos) para o tempo e pressão de preenchimento simulados, sendo estes também representados graficamente.

Os resultados da presença de linhas de solda ou bolhas de ar são apresentados, unicamente, em forma gráfica, onde são registrados as zonas da previsão de suas presenças. Estes resultados são denominados como indicativos.

Os resultados numéricos são apresentados neste trabalho na forma de tabelas e/ou gráficos de forma a facilitar o entendimento do leitor. Os resultados indicativos são apresentados em formas de figuras representativas das posições previstas para a presença de linhas de solda/bolhas de ar.

As simulações foram realizadas em específicas geometrias de peças, n^o de elementos, e condições de contorno.

3.3.1 Geometria de peças e número de elementos

Foram escolhidas diferentes geometrias para a realização das simulações necessárias a este trabalho, sendo a sua escolha assim embasada:

- a) no tipo dos resultados a serem simulados. A formação de linhas de solda, por exemplo, está baseada no encontro de duas frentes de fluxo polimérico. Sendo assim para sua avaliação, é necessário efetuar-se simulações do preenchimento em uma peça que tenha detalhes em sua geometria que propiciem a divisão da frente de fluxo inicial em duas ou mais com direções contrárias. Ou então, a geometria simulada deve possuir mais de um ponto de injeção de modo a obter-se o mesmo efeito. Outros resultados, como por exemplo a simulação do tempo de preenchimento não exigem bifurcação do fluxo polimérico podendo ser avaliados em geometrias que conduzam a uma única frente de fluxo polimérico;
- b) no tempo de processamento em computadores – demanda de capacidade computacional. De um modo geral, uma simulação em programa de CAE é mais rápida quando mais simples é a geometria ensaiada. Por exemplo, um programa de CAE apresentará os resultados de simulação de preenchimento em uma peça poucos detalhes

em tempo de processamento menor do que o realizado em uma peça com geometria complexa. A necessidade da simulação da presença de linhas de solda ou bolhas de ar, geralmente ocorre em peças de geometria complexa acarretando assim maior tempo de processamento nos computadores. Quando da necessidade de aumento do número de elementos na geometria (densidade de malha), peças com maior densidade necessitam de maior recurso computacional em relação as com menor densidade (item 2.6).

Baseado no apresentado anteriormente, as geometrias escolhidas para aplicação nas simulações do preenchimento necessárias a este trabalho foram as geometrias *faca*, *xícara*, *suporte e chapa*.

A geometria *faca* foi empregadas na avaliação dos resultados de simulações do gradiente de pressão e tempo de preenchimento, a Figura 22 mostra o número de elementos desta geometria além da espessura em cada uma das suas superfícies.

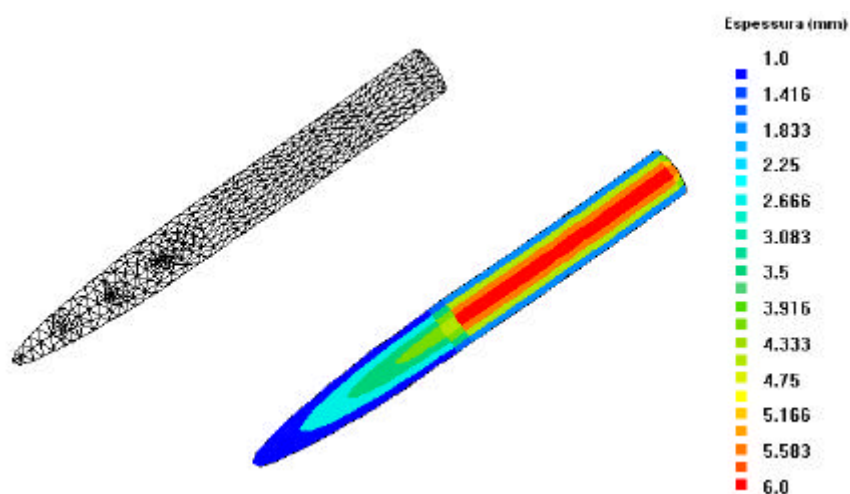


Figura 22: Geometria Faca (722 elementos), com indicativo da espessura em cada superfície.

A geometria *xícara*, em três diferentes número de elementos discretizados (302, 804, 1042 elementos), foi utilizada na avaliação da posição das linhas de solda e bolhas de ar (Figura 23).

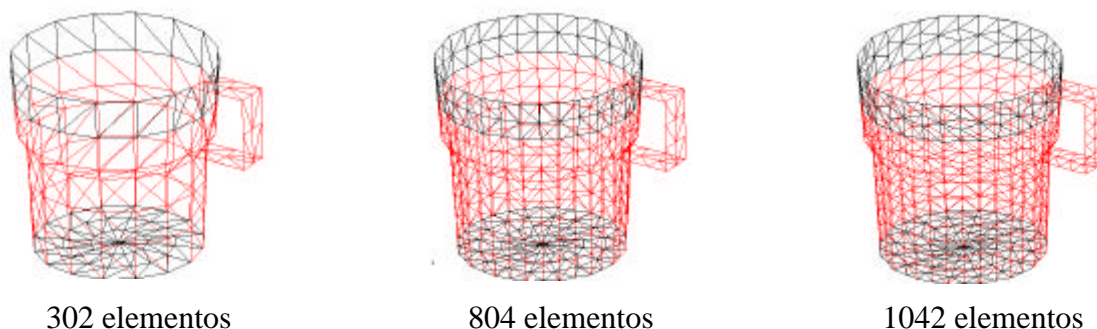


Figura 23: Geometria *xícara* com diferentes números de elementos (302, 804 e 1042).

A localização do ponto de injeção para a geometria *faca* foi no ponto central do início do seu cabo e, para a geometria *xícara* no ponto central da sua base, conforme o apresentado na Figura 24.

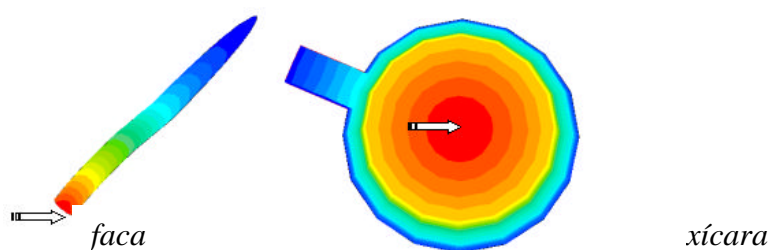


Figura 24: Local do ponto de Injeção para as geometrias *faca* e *xícara*. Indicado pela flecha.

As geometrias *suporte* e *chapa* foram empregadas na avaliação dos resultados de linhas de solda e bolhas de ar, do mesmo modo que a geometria *xícara*. A geometria *suporte* (Figura 25) possui planos em sentidos opostos sendo a sua junção caracterizada por um ângulo pronunciado, com sua malha formada por 4354 elementos. O ponto de injeção para esta geometria está situado no centro de sua base.



Figura 25: Geometria suporte.

A geometria *chapa* (Figura 26), caracterizada pela presença de um furo de formato quadrado no seu plano principal e ponto de injeção na metade de sua base, com diferentes número de elementos discretizados - 412, 976 e 1716 elementos.

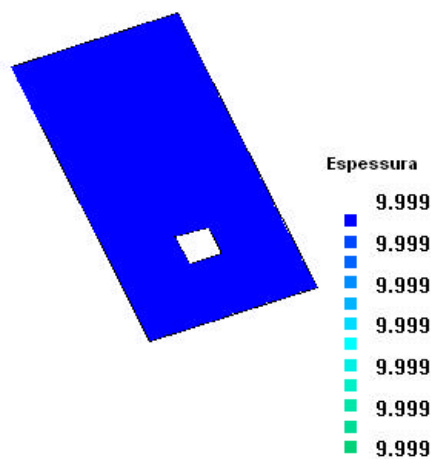


Figura 26: Geometria chapa.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados aproximadamente 500 simulações de preenchimento de cavidades no *Moldflow* para os termoplásticos estudados nas condições de contorno apresentadas anteriormente. A avaliação da possibilidade do relacionamento entre termoplásticos através do índice de fluidez, para a previsão de tendências de resultados de simulações, para o estabelecimento de um critério de contratipos foi fundamentada nas referidas simulações.

4.1 Resultados de tempo e pressão de preenchimento

4.1.1 Polietilenos de alta densidade

Os resultados das simulações do tempo e do gradiente da pressão de preenchimento para polietilenos de alta densidade estão apresentados em forma gráfica nas Figuras 27 e 28, respectivamente, nas condições C1 e C2 (item 3.1.1).

O cálculo do gradiente de pressão nas simulações apresentadas inicialmente ocorreu na condição *automatic* (item 3.1.1). Avaliando os resultados apresentados na Figura 27 observa-se um aumento dos valores do tempo de preenchimento para os termoplásticos com índice de fluidez da faixa de 5 para 8 g/10 min para posteriormente, apresentar redução após a faixa de 10 g/10 min. Os resultados de índice de fluidez relacionada a pressão apresentados na Figura 28 mostram um aumento dos valores da faixa de 5 g/10 min para 8 g/10 min para apresentar uma posterior redução.

Observa-se em ambos os casos a impossibilidade de estabelecer-se uma tendência do tipo

redução de índice de fluidez significar aumento ou redução do tempo e pressão.

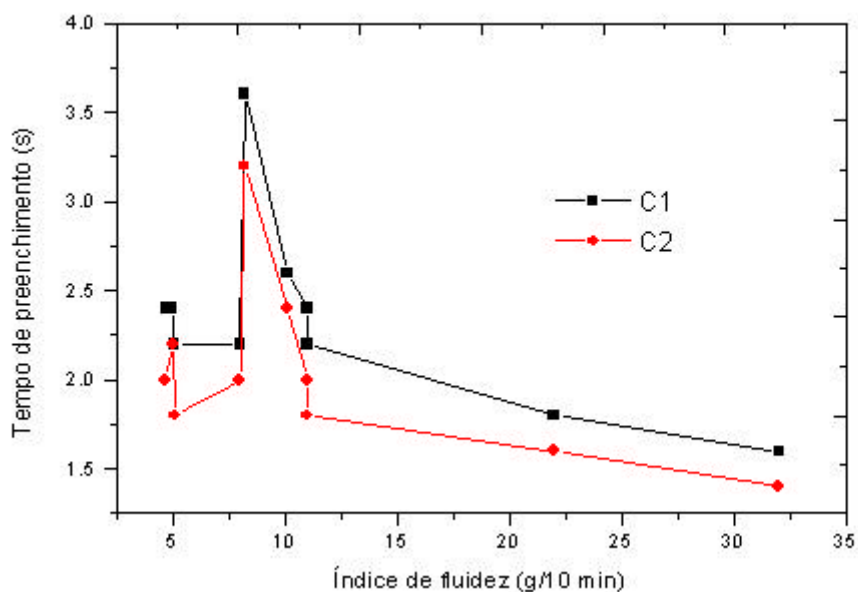


Figura 27: Gráfico índice de fluidez e tempo de preenchimento – PEAD

De forma a apresentar um maior detalhamento dos resultados apresentados nas Figuras 27 e 28, discutiu-se os resultados do tempo e pressão de preenchimento para os termoplásticos Lupolen 5031L, Eltex A 2080, Eltex A 1100 e Eltex A 4090, nas condições C1 e C2 .

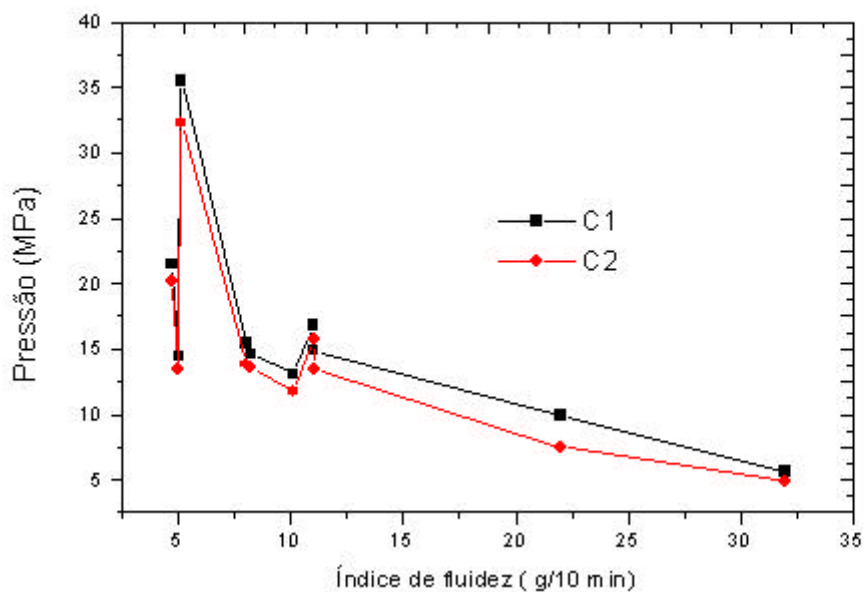


Figura 28: Gráfico índice de fluidez e pressão de preenchimento – PEAD

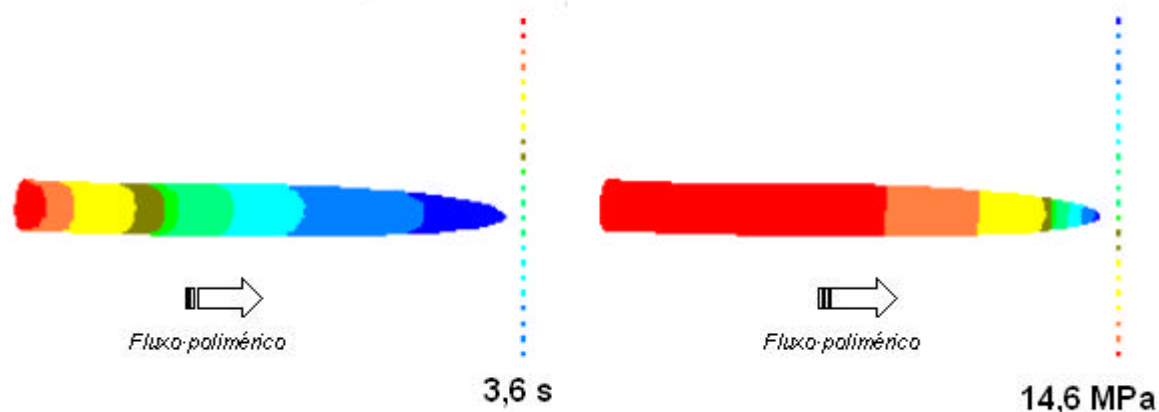


Figura 29: Lupolen 5031 L ,condição de ensaio C1.

Os resultados das simulações na condição C1 e C2 estão mostradas nas Figuras 29,30,31,e 32 e Tabela 10.

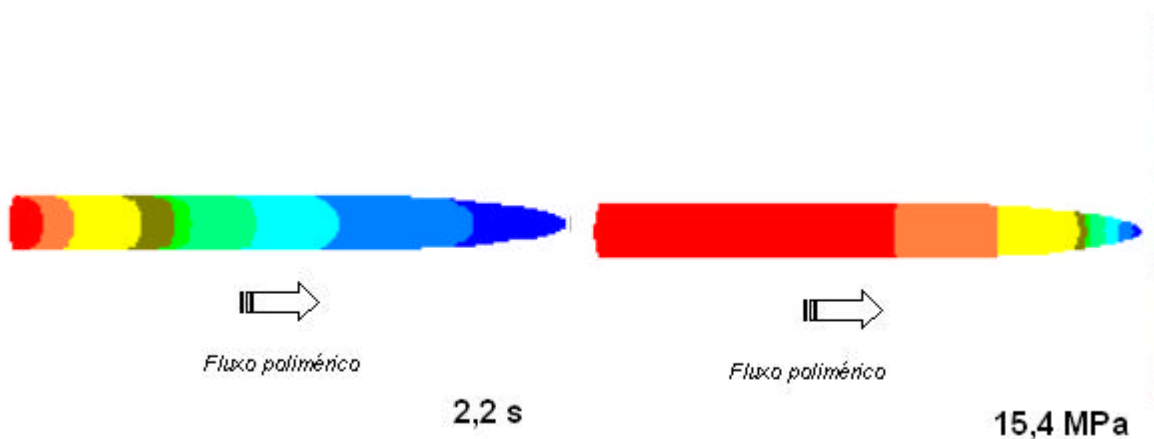


Figura 30: Eltex A 2080 condição de ensaio C1.

Os resultados das simulações do tempo de preenchimento para os polímeros com índice de fluidez igual a 11,0 g / 10 min (Eltex A 1100 e Eltex A 4090), deveriam ser iguais pois estas foram realizadas em idênticas condições de contorno (item 3.1.1) contudo, os tempos de preenchimento simulados foram 2,2 e 2,4 s.

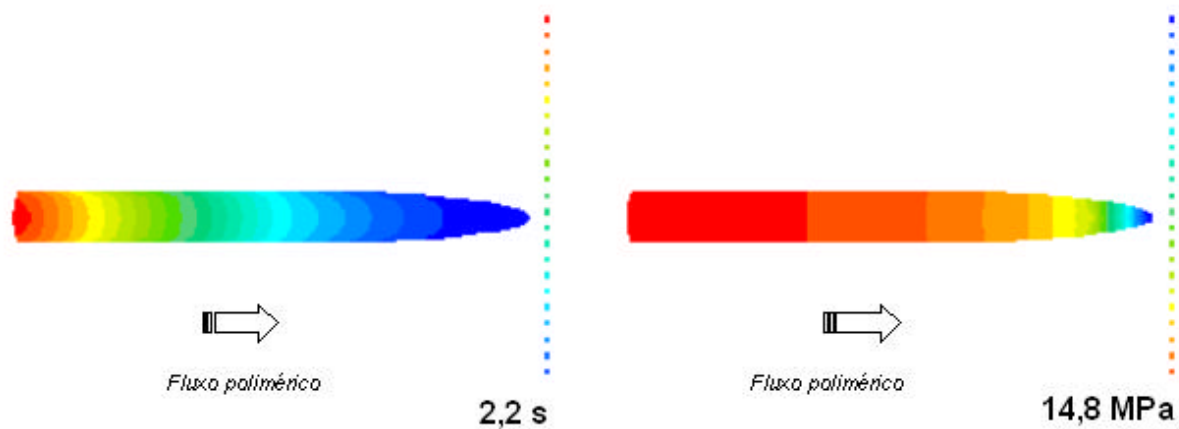


Figura 31: Eltex A 1100 condição de ensaio C1.

Esta diferença não é significativa entretanto, a sua consideração torna-se relevante quando confrontada aos resultados de simulações dos polímeros Lupolen 5031 L e Eltex A 2080 os quais possuem índices de fluidez iguais a 8,2 e 8,0 g/10 min, respectivamente.

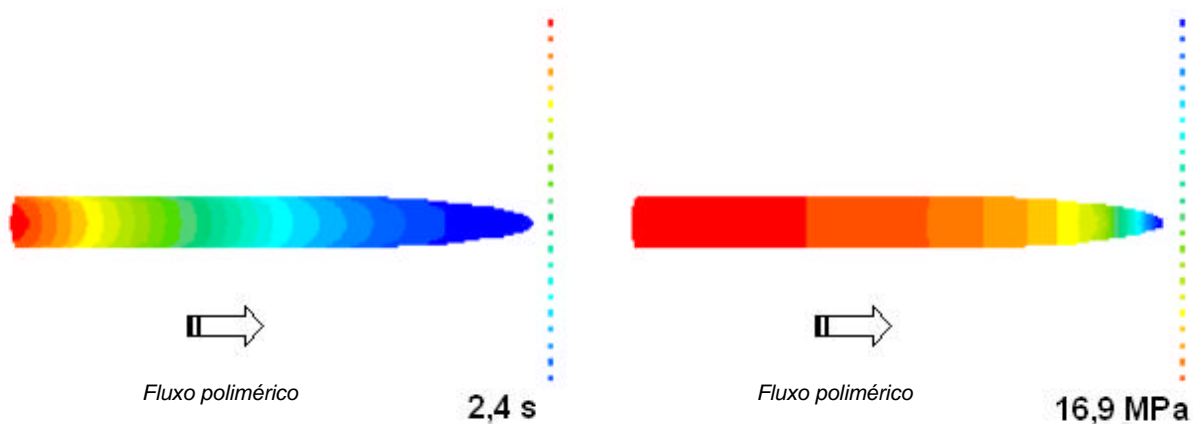


Figura 32: Eltex A 4090 condição de ensaio C1.

A tabela 10 apresenta os resultados dos tempos de preenchimento simulados para estes polímeros. A diferença substancial dos resultados da simulação do tempo de preenchimento está entre os resultados dos polímeros Eltex A 2080, Eltex A 1100 e Eltex A 4090 conforme indicado nesta tabela.

Tabela 10: Resultados das simulações do tempo de preenchimento e gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEAD.

Polímero	IF (g / 10 min)	s		MPa	
		C1	C2	C1	C2
Lupolen 5031 L	8,2	3,6	3.3	14,6	13.6
Eltex A 4090	11,0	2,4	2.0	16,9	15.7
Eltex A 2080	8,0	2,2	2.0	15,4	13.8
Eltex A 1100	11,0	2,2	1.8	14,8	13.5

A discrepância dos resultados do tempo de preenchimento para os polímeros Eltex A 1100 e 4090 não é significativa. Contudo, o resultado previsto para o tempo de preenchimento do Eltex A 2080 (2.2 s) indica a semelhança entre os respectivos valores do índice de fluidez dos polímeros Eltex A 1100 e 4090, o que não é verdade.

Na situação da possibilidade da correlação de polímeros via análise do índice de fluidez, esperar-se-ia que os termoplásticos com índices de fluidez com valor igual a 8,0 g/10 min apresentassem tempos de preenchimento superiores aos resultados dos materiais com índice de fluidez igual a 11,0 g/10 min, o que não ocorreu no resultado simulado do polietileno Eltex A 2080.

Os resultados das simulações das pressões de preenchimento para os polietilenos em discussão estão apresentados em forma de gráfico na Figura 33, onde está relacionado o índice de fluidez com a pressão de preenchimento.

Avaliando os resultados das simulações da pressão de preenchimento para polietilenos de alta densidade apresentados na Tabela 10, verifica-se a inexequibilidade da sua previsão via relação com o índice de fluidez. Os resultados das simulações da pressão de preenchimento para os polietilenos com índice de fluidez igual a 11,0 g / 10 min (Eltex A 1100 e Eltex A 4090), deveriam apresentar semelhanças contudo, seus resultados foram, respectivamente, 14,8 e 16,9 MPa (condição C1) e; 13,5 e 15,7 MPa (condição C2). Por sua vez, os resultados das simulações da pressão de preenchimento para os polímeros Lupolen 5031 L e Eltex A 2080 com índices de

fluidez de 8,2 e 8,0 g/10 min verifica-se que os seus resultados foram, respectivamente, 14,6 e 15,4 MPa (condição C1) e; 13,6 e 13,8 MPa (condição C2). Observação interessante é que, para os resultados anteriormente apresentados, existe razoável semelhança entre os resultados simulados na condição C2, o que não ocorre na condição C1.

Os resultados da simulação da pressão de preenchimento para os polietilenos de alta densidade Lupolen 5031 L e Eltex A 1100 são dignos de nota. Verifica-se proximidade entre os resultados das simulações, respectivamente, 14,6 MPa e 14,8 MPa (condição C1) e; 13,6 MPa e 13,5 MPa (condição C2), o que sugere a semelhança entre os valores do índice de fluidez, o que não é verificado (Tabela 10).

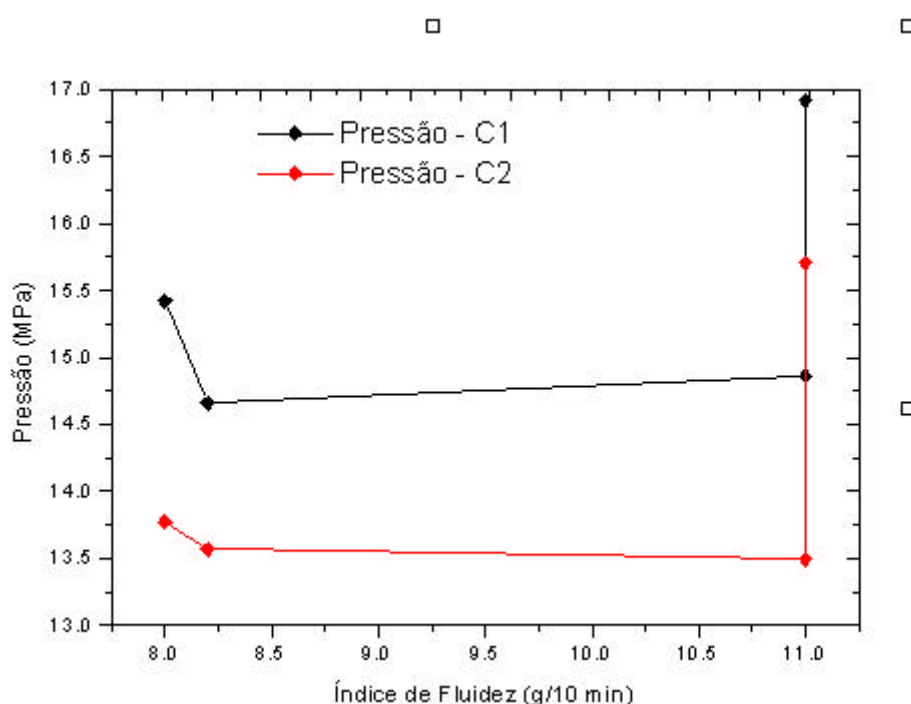


Figura 33: Simulações da pressão de preenchimento: Lupolen 5031 L, Eltex A 2080, Eltex A 1100 e Eltex A 4090 na geometria faca.

Com o intuito de avaliar os resultados das simulações em outras condições de solução numérica das equações governantes (item 2.6.1), foram realizadas algumas simulações com o cálculo do gradiente de pressão através de definidos tempos de preenchimento (item 3.1.1).

Avaliou-se o gradiente de pressão simulado para tempo de preenchimento igual a 2,5 s e 3,0 s, estando os resultados apresentados nas Tabela 11 e 12.

Tabela 11: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEAD, para tempo de preenchimento de 2,5 s.

PEAD	IF (g/10 min)	C1 MPa	C2 MPa
Lupolen 5031 L	8,2	16,13	14,52
Eltex A 4090	11,0	16,91	15,06
Eltex A 2080	8,0	15,13	13,27
Eltex A 1100	11,0	14,27	12,52

Do mesmo modo que os resultados de simulação na condição anterior, os resultados previstos para o gradiente de pressão em função de um determinado tempo de preenchimento mostraram-se inconclusivos em relação a possibilidade de sua previsão através da análise do índice de fluidez.

Tabela 12: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEAD, para tempo de preenchimento de 3,0 s.

PEAD	IF (g/10 min)	C1 MPa	C2 MPa
Lupolen 5031 L	8,2	15,39	13,87
Eltex A 4090	11,0	16,37	14,75
Eltex A 2080	8,0	14,81	13,06
Eltex A 1100	11,0	14,20	12,35

4.1.2 Polipropilenos

Os resultados da correlação entre os valores do índice de fluidez e os tempos e pressões de preenchimento para polipropilenos estão apresentados em forma gráfica nas Figuras 34 e 35,

respectivamente, nas condições C1 e C2. As simulações apresentadas inicialmente ocorreram na condição *automatic* (item 3.1.1)

Avaliando os resultados apresentados na Figura 34 para a relação entre o índice de fluidez e tempo de preenchimento (condição C1 e C2), observa-se uma redução inicial seguido de um breve aumento para posteriormente apresentar redução até a faixa de 40 g/10 min.

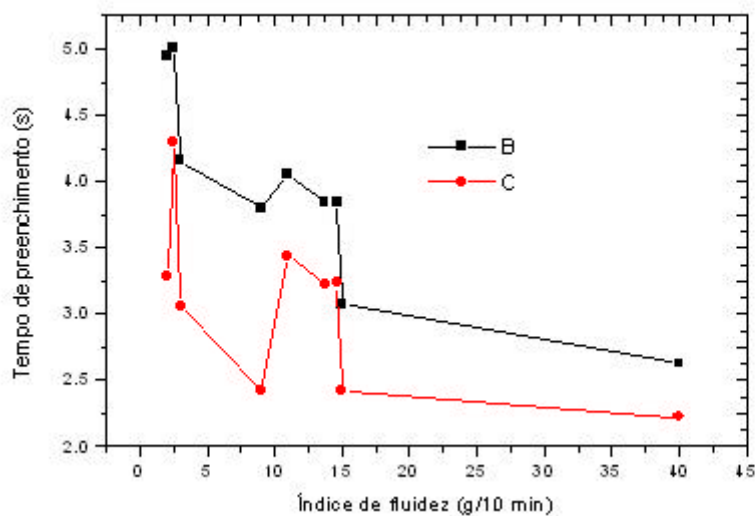


Figura 34: Gráfico Índice de fluidez e tempo de preenchimento para polipropilenos.

Os resultados de índice de fluidez relacionada a pressão, por sua vez, são apresentados na Figura 35 onde verifica-se semelhanças de tendências com o gráfico anterior. Para aumentar a particularidade da análise dos resultados da correlação do índice de fluidez com os resultados do tempo e pressão de preenchimento, apresenta-se os resultados dos polipropilenos Novolen 1100 H, Eltex RP 210 e Eltex TL 220, os quais apresentam, respectivamente, valores de índices de fluidez iguais a 2,5, 3,0 e 2,0 g/10 min.

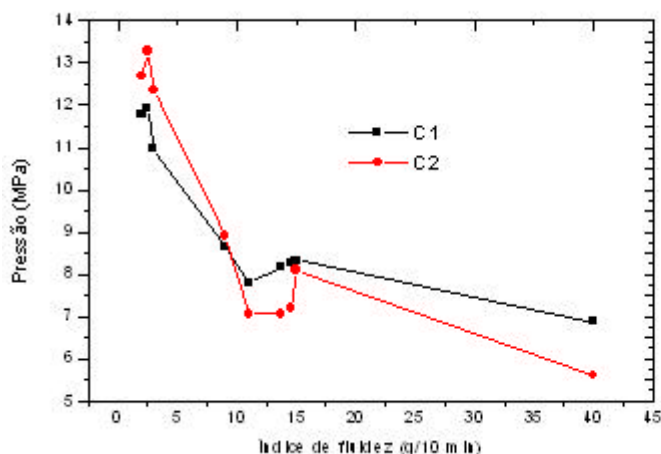


Figura 35: Gráfico índice de fluidez e pressão de preenchimento para polipropilenos.

Os resultados das simulações dos resultados do tempo e pressão de preenchimento destes polímeros em específicas condições de contorno estão indicados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados das simulações do tempo de preenchimento e gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para polipropilenos.

Polímero	IF (g / 10 min)	S		MPa	
		C1	C2	C1	C2
Eltex RP 210	2,0	4,2	3,1	10,9	12,3
Novolen 1100 H	2,5	5,0	4,3	11,9	13,2
Eltex TL 220	3,0	4,9	3,3	11,8	12,7

Avaliando os resultados das simulações anteriores registrados em forma de gráfico na Figura 36, verifica-se, do mesmo modo que para os resultados anteriores, a impossibilidade de correlacionar polipropilenos através da análise do índice de fluidez para a previsão dos resultados do tempo de preenchimento de cavidades dos polipropilenos.

Os resultados das simulações do tempo de preenchimento para os polipropilenos Eltex RP 210 e Novolen 1100 H, nas condições de contorno C1 e C2 foram, respectivamente 4,2 s e 3,1 s e; 5,0 e 4,3 s. Estes resultados, quando analisados isoladamente, demonstram uma tendência de

redução dos resultados do tempo de preenchimento para aumento dos valores do índice de fluidez dos polipropilenos.

Contudo, a previsão de tendências dos resultados do tempo de preenchimento discutido no parágrafo imediatamente anterior torna-se inviável, quando da comparação simultânea dos últimos resultados de tempo de preenchimento e seus correspondentes índices de fluidez com os valores apresentados pelo polipropileno Eltex TL220.

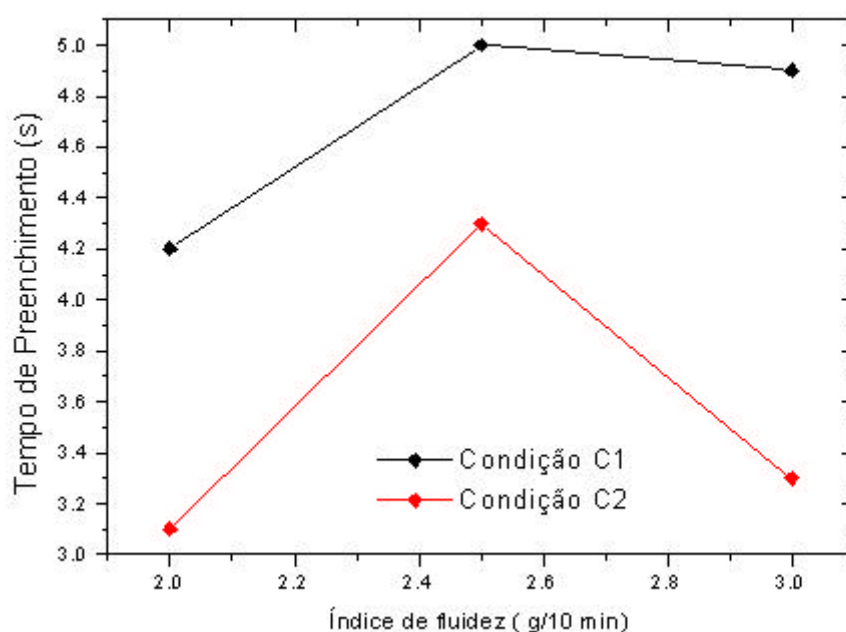


Figura 36: Resultados das simulações do tempo de preenchimentos: Eltex RP 210, Novolen 1100 H e Eltex TL 220 na geometria faca.

Os resultados das simulações do gradiente de pressão de preenchimento para os polipropilenos Eltex RP 210, Novolen 1100 H e Eltex TL 220 foram, respectivamente, 10,9 MPa e 12,3 MPa ; 11,9 MPa e 13,2 MPa e; 11,8 MPa e 12,7 MPa, nas condição C1 e C2 conforme o mostrado na Tabela 13 onde, identifica-se razoável semelhança entre os resultados das simulações (condição C1) para os polímeros Novolen 1100 H e Eltex TL 220, apesar da diferença entre os seus valores do índices de fluidez. Contudo, esta situação não mantém-se quando da análise dos respectivos resultados agora na condição C2 .

Efetuada uma comparação simultânea de todos resultados das simulações da pressão de preenchimento para polipropilenos, verifica-se que os polipropilenos Eltex RP 210, Novolen 1100 H e Eltex TL 220 apresentam índices de fluidez em seqüência crescente mas, os resultados de simulação de pressão não seguem a mesma tendência.

Foram realizadas algumas simulações com o cálculo do gradiente de pressão através de definidos tempos de preenchimento (item 3.1.1), no caso 2,5 e 3,0 s, estando os resultados apresentados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PP, para tempo de preenchimento de 2,5 s.

PP	IF (g/10 min)	C1 MPa	C2 MPa
Eltex RP 210	2,0	12,10	13,86
Novolen 1100 H	2,5	13,59	13,19
Eltex TL 220	3,0	12,91	14,70

Novamente verifica-se que não é possível o emprego dos valores do índice de fluidez para a previsão de tendências dos resultados do gradiente de pressão.

Tabela 15: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PP, para tempo de preenchimento de 3,0 s.

PP	IF (g/10 min)	C1 MPa	C2 MPa
Eltex RP 210	2,0	11,65	14,52
Novolen 1100 H	2,5	13,10	14,84
Eltex TL 220	3,0	12,10	13,02

4.1.3 Polietilenos de baixa densidade

Os resultados da correlação entre os valores do índice de fluidez e os tempos e pressões de preenchimento para polietilenos de baixa densidade estão apresentados em forma gráfica nas Figuras 37 e 38, respectivamente, nas condições C1 e C2 (item 3.1.1).

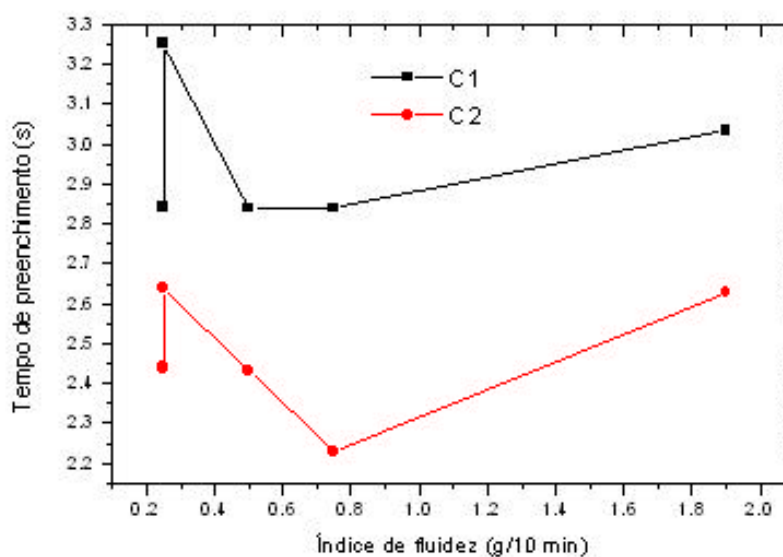


Figura 37: Gráfico índice de fluidez e tempo de preenchimento para polietilenos de baixa densidade.

Avaliando estes resultados, corrobora-se a impossibilidade de estabelecer-se uma tendência.

Os resultados das simulações do preenchimento para os polietilenos de baixa densidade trazem as mesmas deduções feitas anteriormente em relação ao proposto critério. A avaliação dos resultados previstos na Tabela 16 verifica-se que para os polietilenos de baixa densidade presentes na mesma, todos com igual valor do índice de fluidez diferentes previsões para os resultados do tempo e pressão de preenchimento, seja na condição C1 ou C2.

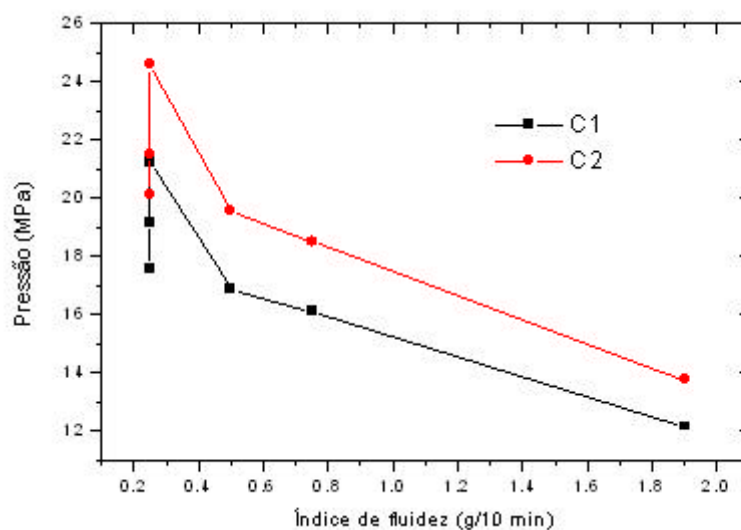


Figura 38: Gráfico índice de fluidez e tempo de preenchimento para polietilenos de baixa densidade

Tabela 16: Resultados das simulações do tempo de preenchimento e gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEBD.

Polímero	IF (g / 10 min)	s		MPa	
		C1	C2	C1	C2
Lupolen 1810 D	0,25	2,8	2,4	20,1	17,6
Lupolen 1812 D	0,25	3,2	2,6	24,5	21,2
Lupolen 1840 D	0,25	2,8	2,4	21,5	19,1

Foram realizadas algumas simulações com o cálculo do gradiente de pressão através de definidos tempos de preenchimento (item 3.1.1), respectivamente 2,8 e 3,2 s. Os resultados para estas simulações estão apresentados nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEBD, para tempo de preenchimento de 2,8 s.

PEBD	IF (g/10 min)	C	
		C1	C2
		MPa	MPa
Lupolen 1810 D	0,25	20,04	17,85
Lupolen 1812 D	0,25	24,50	21,28
Lupolen 1840 D	0,25	21,49	18,99

Tabela 18: Resultados das simulações do gradiente de pressão em diferentes condições de ensaio para PEBD, para tempo de preenchimento de 3,2 s.

PEBD	IF (g/10 min)	C1	C2
		MPa	MPa
Lupolen 1810 D	0,25	20,29	17,91
Lupolen 1812 D	0,25	24,94	21,62
Lupolen 1840 D	0,25	21,60	19,38

Avaliando os resultados do gradiente de pressão simulados para definidos tempos de preenchimento, verifica-se que estes resultados são diferentes apesar de que os termoplásticos escolhidos terem o mesmo índice de fluidez.

4.2 Análise da previsão dos resultados do tempo e pressão de preenchimento

Conforme o apresentado em 2.7.3, a correlação entre diferentes termoplásticos de um mesmo grupo polimérico através da análise do índice de fluidez para aplicação no *Moldflow*, mostrou-se inadequada para a previsão de tendências do tempo de preenchimento. O resultado esperado era que polímeros com maior índice de fluidez, ou seja, menor viscosidade (item 2.4) apresentassem menor tempo de preenchimento. Esta afirmativa está embasada nas equações governantes aplicadas na solução numérica (item 2.6.1) apresentadas novamente a seguir:

$$S_2 = \int_0^h \frac{z^2}{h} dz \quad (18)$$

$$\bar{u}_x = \frac{-2S_2}{(h^+ - h^-)} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (19)$$

$$\bar{u}_y = \frac{-2S_2}{(h^+ - h^-)} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (20)$$

O termo S_2 é denominado fluidez, apresentando relação inversa com a viscosidade η , que por sua vez é utilizado na determinação das velocidades médias do fluxo polimérico no eixo x e y (Equações 19 e 20), onde identifica-se relação direta entre a fluidez e as respectivas velocidades.

O índice de fluidez apresenta uma relação qualitativa com a viscosidade de um polímero, sendo esta última a responsável pela previsão do comportamento reológico dos polímeros e, por conseqüência, a sua capacidade de preenchimento de cavidades [19]. Materiais poliméricos mais viscosos, preenchem uma mesma cavidade com maior dificuldade (por exemplo, maior tempo de preenchimento e pressão) em relação aos menos viscosos, seja em condições de processamento industrial ou em simulações de preenchimento, desde que sejam aplicadas condições de contorno constantes tais como pressões e temperaturas.

A impossibilidade na previsão do tempo de preenchimento via análise do índice de fluidez está fundamentado na diferença entre o índice de fluidez e a viscosidade (η), como já discutido anteriormente. O valor do índice de fluidez é somente um ponto de viscosidade a baixas taxas de cisalhamento, não predizendo o comportamento reológico dos materiais poliméricos a médias e altas taxas de cisalhamento, sendo este o motivo da sua inaplicabilidade na previsão do tempo de preenchimento.

A previsão do gradiente de pressão durante o preenchimento de uma cavidade de distintos polímeros através de uma correlação baseada na análise dos valores de índice de fluidez também mostrou-se inviável.

Apresentando novamente a equação 17:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S_2 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (17)$$

Esperava-se uma relação inversa entre o índice de fluidez e o gradiente de pressão (Equações 17, 18). Entretanto, devido ao fato do índice de fluidez não representar fielmente a viscosidade, esta suposição não concretizou-se, concordando com o discutido anteriormente no item 2.7.1.

Entretanto, o conhecimento da curva de viscosidade de um material polimérico em específicas taxas de cisalhamento e temperatura, permite a correlação entre diferentes polímeros de um mesmo grupo polimérico.

Na situação do conhecimento de curvas de viscosidade de diferentes materiais poliméricos de mesmo tipo e que, somente um destes esteja disponível no banco de dados do *Moldflow*, é possível a previsão dos resultados do tempo e pressão de preenchimento do material não caracterizado sendo apresentado na seqüência, relações entre curvas de viscosidade e resultados simulados do tempo e pressão de preenchimento, as quais pertencem aos termoplásticos apresentados nos itens 4.1.1 a 4.1.4. As curvas de viscosidades são apresentadas em temperaturas referentes as condições C1 e C2 (item 3.1.1) e taxas de cisalhamento de 50 a 12000 1/s, as quais são as mesmas apresentadas durante as simulações presentes dos itens 4.1.1 a 4.1.4.

A Figura 39 mostra as curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem, ver forma de sua construção no Anexo C) para polietilenos de alta densidade Lupolen 5031 L, Eltex A 4090, A 2080 e A 1100, na temperatura de 240 °C, onde verifica-se em análise simultânea com os dados da Tabela 10 (condição C1):

- a) ordem decrescente de viscosidade para os polietilenos de alta densidade Lupolen 5031 L, Eltex A 4090, Eltex A 2080 e Eltex A 1100 ;
- b) ordem decrescente dos tempos de preenchimento para os polietilenos Lupolen 5031 L, Eltex A 4090, Eltex A 2080 e Eltex A 1100. Respectivamente: 3,6; 2,4; 2,2 e 2,2 s, apresentados na Tabela 10;

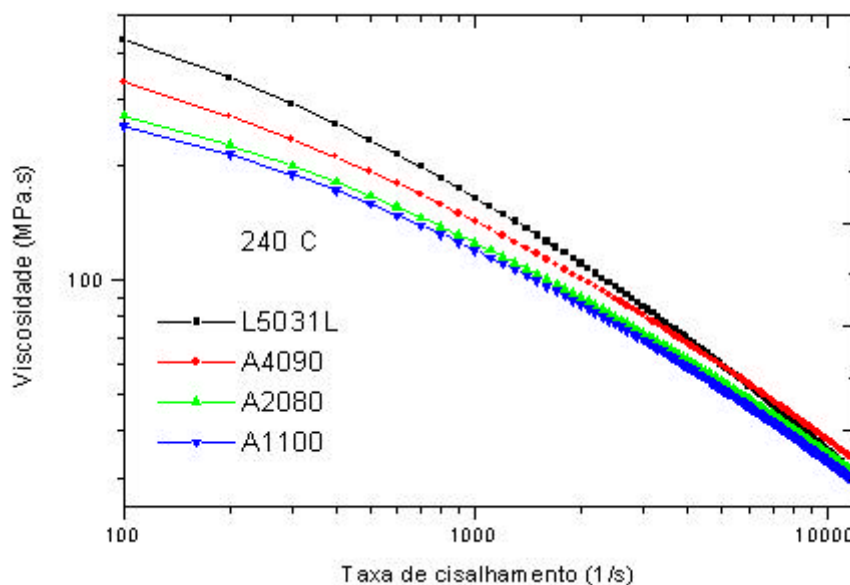


Figura 39: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os PEAD Lupolen 5031 L e Eltex A 4090, A 2080 e A 1100, na temperatura de 240 o.C.

- c) os materiais poliméricos com maiores viscosidades apresentam maiores tempos de preenchimento e vice versa. O polietileno Lupolen 5031 L é o mais viscoso dentro os listados anteriormente, apresentando o maior tempo de preenchimento simulado. Comparando os resultados da simulação do tempo de preenchimento para este último e, os resultados simulados para o polietileno Eltex A 4090 é verificado a concordância entre a diminuição dos valores de viscosidade (comportamento pseudoplástico [32,33]) e a redução dos tempos de preenchimento.

A Figura 40, por sua vez, mostra as curvas de viscosidade para polímeros Lupolen 5031 L e; Eltex A 4090, A 2080 e A 1100, em idênticas condições da Figura 39 exceto o novo valor da temperatura de injeção 260 C. Onde é visualizado a permanência da relação decrescente de viscosidade na mesma ordem da figura anterior sendo que permanecem válidos os pontos discutidos anteriormente para a Figura 39.

A Figura 41 mostra as curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem, Ver Anexo II) para os polipropilenos Novolen 1100 H, Eltex TL 220 e Eltex RP 210, na temperatura de 230 C, onde verifica-se em análise conjunta com os dados da Tabela 13 (condição C1):

- ordem decrescente dos valores de viscosidade para os polímeros Novolen 1100 H, Eltex TL 220, Eltex RP 210 até a faixa de cisalhamento próximo a 800 s^{-1} . Após esta faixa, ocorre redução dos valores de viscosidade do polipropileno Novolen 1100 H provavelmente, devido a maior sensibilidade de sua viscosidade à taxa de cisalhamento quando comparado aos demais;
- decréscimo dos tempos de preenchimento para os polímeros Eltex TL 220, e Eltex RP 210, respectivamente 4,9 s e 4,2 s, mantendo a relação previamente apontada para a relação entre viscosidade e resultados simulados para o tempo de preenchimento (item 4.1.2).

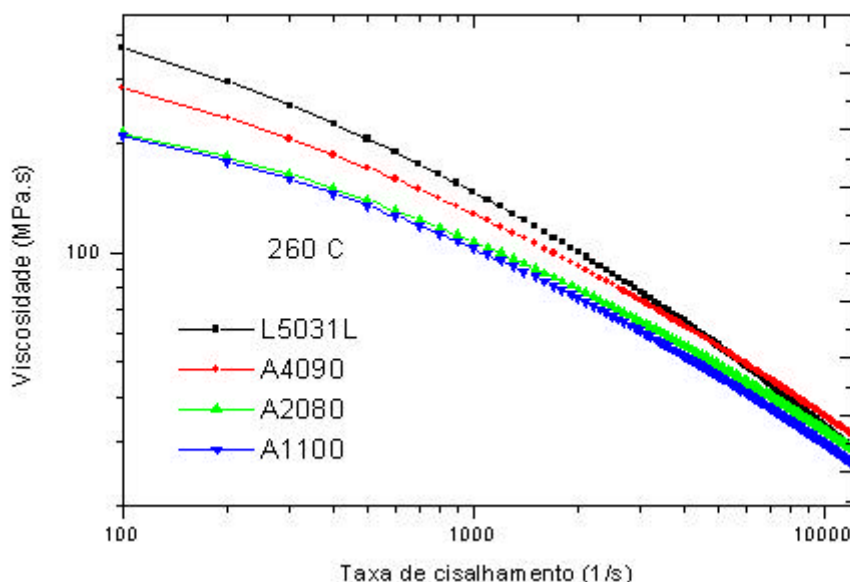


Figura 40: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os polietilenos de alta densidade Lupolen 5031 L e Eltex A 4090, A 2080 e A 1100, na temperatura de 260 °C.

A Figura 42, por sua vez, mostra as curvas de viscosidade para os polipropilenos discutidos neste item em idênticas condições da Figura 41 exceto o novo valor de temperatura de injeção -

250 °C. Onde é visualizado a permanência do decréscimo de viscosidade na mesma ordem da figura anterior sendo que permanecem válidos os pontos discutidos anteriormente para a Figura 38 exceto que a redução da viscosidade do polipropileno Novolen 1100 H ocorre agora na faixa de cisalhamento de 1000 s^{-1} .

A mesma análise simultânea dos tempos de preenchimentos e viscosidade é feita para os polietilenos de baixa densidade.

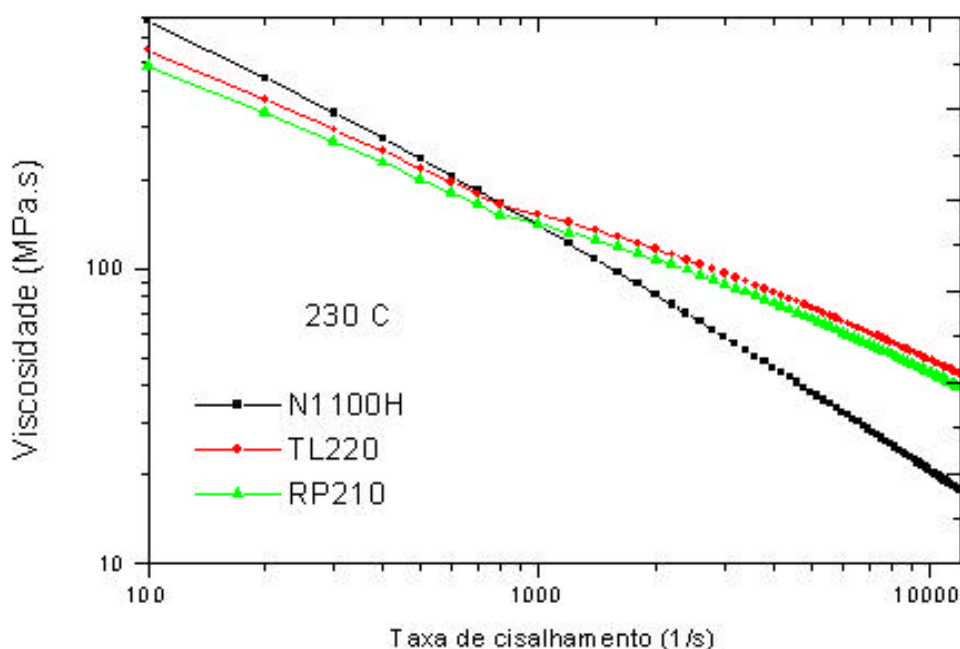


Figura 41: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os PP Novolen 1100 H, Eltex TL220 e Eltex RP 210, na temperatura de 230 °C.

Avaliando agora suas curvas de viscosidade, prevista na Figura 43 (temperatura 225 °C), verifica-se que o polímero mais viscoso é o Lupolen 1812 D, sendo este justamente o que apresenta maior tempo e pressão de preenchimento. Os polietilenos Lupolen 1810 D e Lupolen 1840 D apresentam semelhantes curvas de viscosidade, ocorrendo semelhança dos resultados previstos.

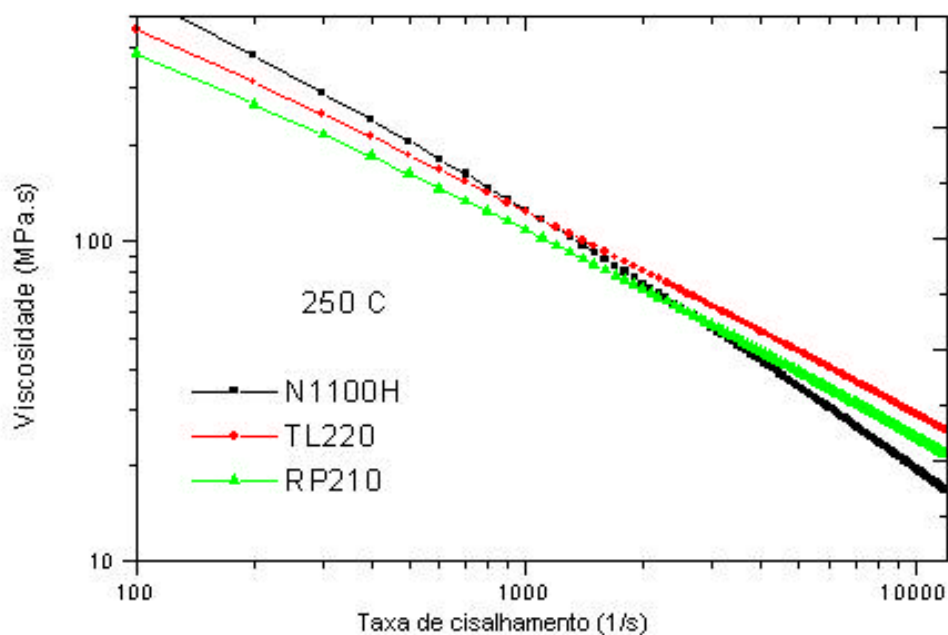


Figura 42: Curvas de viscosidade (modelo de 2ª ordem) para os polipropilenos Novolen 1100 H, Eltex TL 220 e Eltex RP 210, na temperatura de 250 °C.

O resultado simulado para o tempo de preenchimento para os polietilenos de baixa densidade Lupolen 1810 D e 1840 D é o mesmo (Tabela 16). Os resultados da pressão de preenchimento para estes polímeros, por sua vez, são próximos entre si mas, menores que o do polímero Eltex 1812 D – mais viscoso.

Os resultados das curvas de viscosidade agora na temperatura de 245 °C são mostrados na figura 44, onde verifica-se as mesmas conclusões encontradas quando de análise da figura 43. Ou seja, semelhança de resultados entre os polímeros Lupolen 1810 D e 1840 D (Tabela 16) sendo seus resultados inferiores ao polímero Lupolen 1812 D.

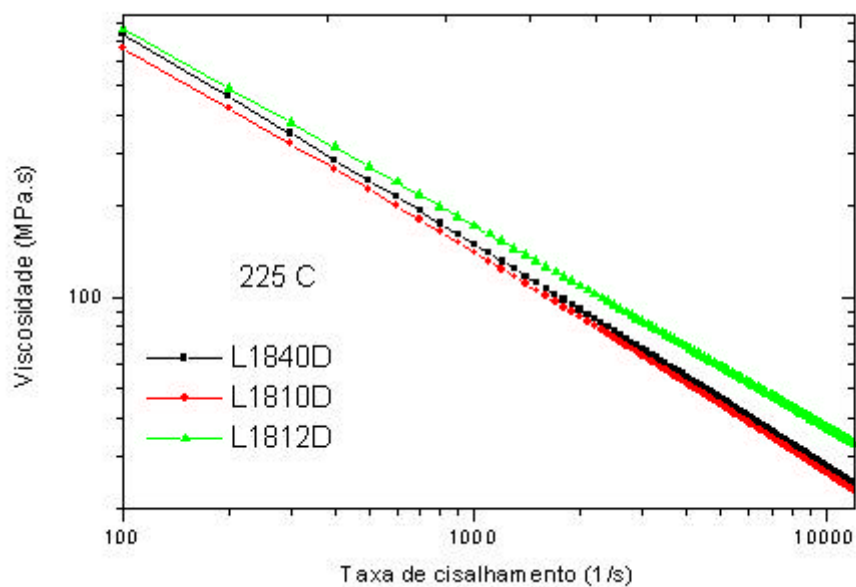


Figura 43: Curvas de viscosidade (modelo de 2^a ordem) para os PEBD Lupolen 1810D, Lupolen 1812D e Lupolen 1840D, na temperatura de 225 °C.

A relação entre a viscosidade dos polímeros e previsão do tempo e pressão de preenchimento mantém-se.

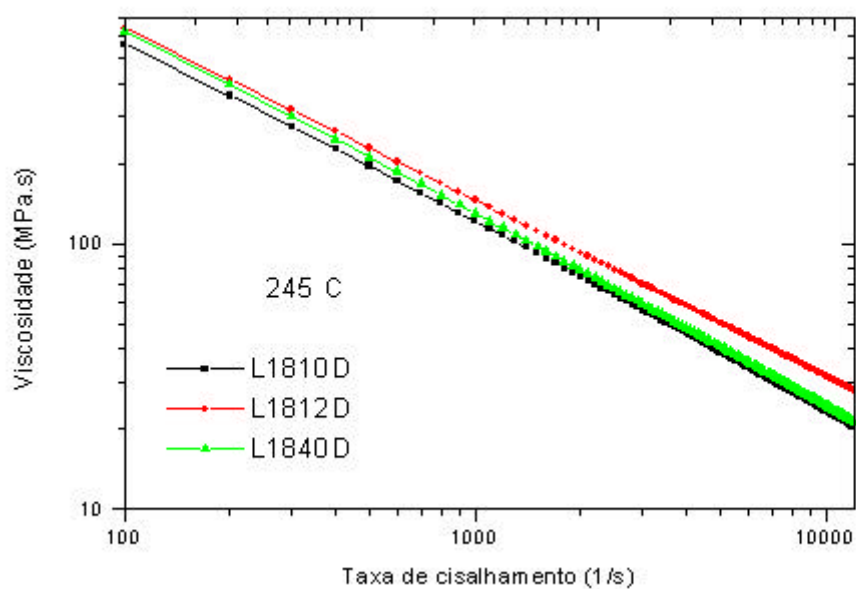


Figura 44: Curvas de viscosidade (modelo de 2^a ordem) para os PEBD 1810D, Lupolen 1812D e Lupolen 1840D, na temperatura de 245 °C.

4.2.1 Influência da temperatura inicial do fluxo polimérico nos resultados

A escolha da temperatura inicial do fluxo polimérico também pode ser uma das causas da impossibilidade da aplicação da correlação de polímeros via análise do índice de fluidez pois pode aumentar a diferença entre a viscosidade e o índice de fluidez.

Conforme discutido anteriormente (item 2.6.2), a viscosidade é o parâmetro físico-químico mais importante de um polímero, responsável pela sua capacidade de preenchimento de cavidades, sendo dependente da taxa de cisalhamento e da temperatura.

O índice de fluidez é medido em uma específica temperatura, de acordo com a condição de ensaio (Tabelas 1 e 2). O parâmetro viscosidade é influenciado pela temperatura - maior temperatura significa menor viscosidade e vice versa. Sendo assim, através da definição de maiores valores de temperatura pode-se aumentar a capacidade de preenchimento de cavidade de um específico polímero, através da redução de sua viscosidade. As simulação para o tempo de preenchimento do polipropileno Novolen 1102K (mesma geometria, ponto de injeção, condições de *software* e outras) porém com diferentes temperaturas iniciais de fluxo (230 °C e 220 °C) apresentaram resultados bastantes distintos (Figuras 45 e 46).

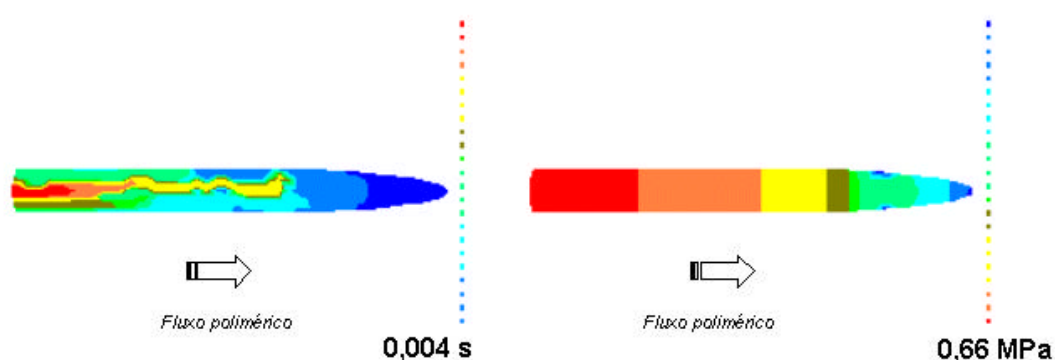


Figura 45: Tempo de preenchimento PP Novolen 1102 K ,T. injeção e molde: 230 °C, 40 °C.

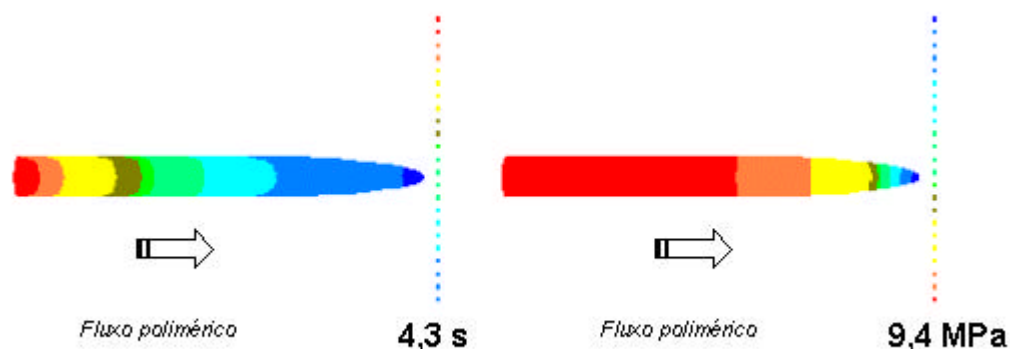


Figura 46: Tempo de Preenchimento PP Novolen 1102 K ,T. de injeção e de molde: 220 °C, 40 °C.

A simulação mostrada na Figura 45, com temperatura inicial do fluxo polimérico de 230 °C, indica para o tempo e pressão de preenchimento, respectivamente, 0,004 s e 0,661 MPa. Realizando simulação na mesma condição anterior, porém com redução de 10 °C na temperatura inicial do fluxo polimérico (Figura 46), verifica-se que os resultados previstos para o tempo e pressão de preenchimento foram ,respectivamente, 4,3 s e 9,4 MPa.

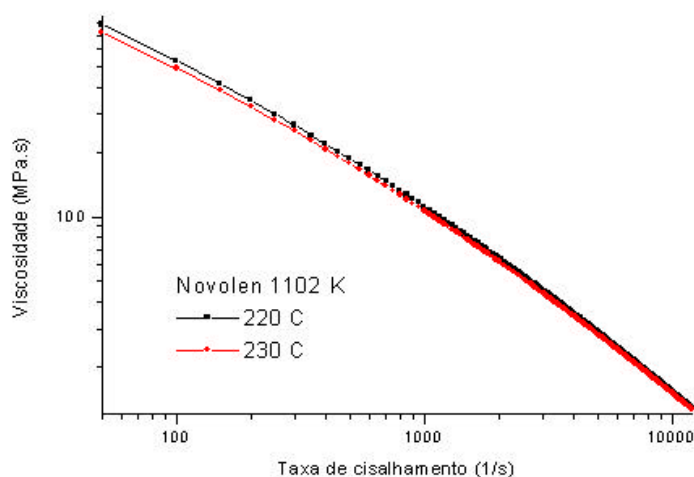


Figura 47: Curva de viscosidade (modelo de 2^a ordem) PP Novolen 1102 K.

Por sua vez, as simulações para o tempo de preenchimento de outro polipropileno, Eltex P TL 220 nas mesmas condições da simulação anterior, apresentaram resultados distintos (Figuras 48 e 49) porém em menor grau que as simulações do Novolen 1102 K, conforme mostra a

Tabela 19.

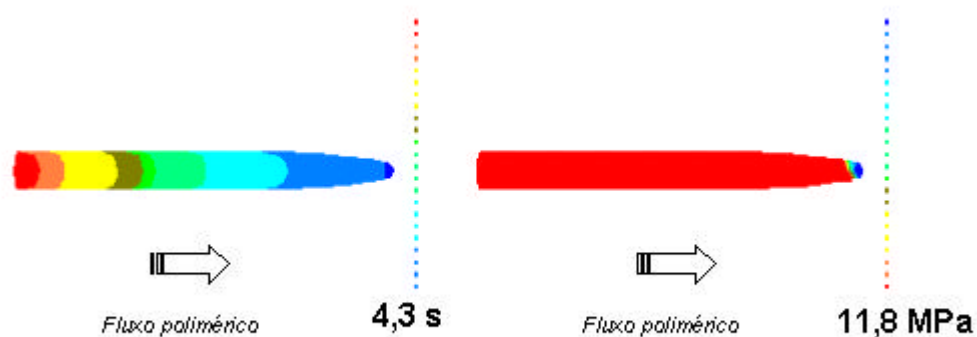


Figura 48: Tempo de Preenchimento PP - Eltex P TL 220. T. injeção e molde: 220 °C, 40 °C.

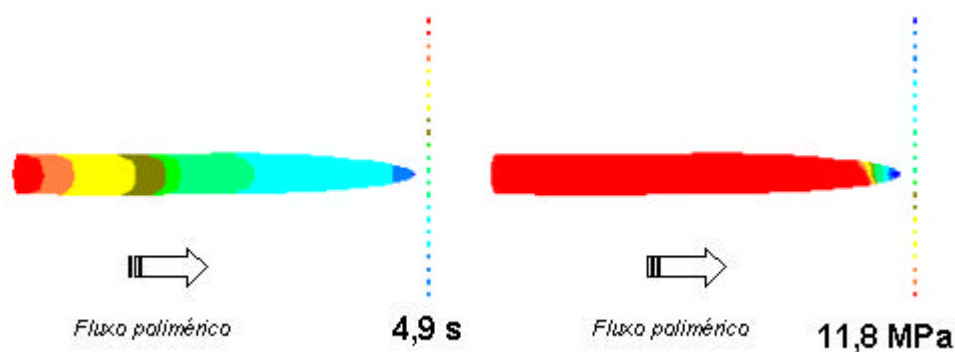


Figura 49: Tempo de Preenchimento PP - Eltex P TL 220 ,T. injeção e molde: 230 °C, 40 °C.

Tabela 19: Comparação dos resultados de tempo e pressão de preenchimentos para os polipropilenos Novolen 1102 K e Eltex P TL 220.

T °C	Novolen 1102 K		Eltex P TL 220	
	s	MPa	s	MPa
220	4,2	9,4	4,3	11,8
230	0,004	0,6	4,9	11,7

De acordo com o estipulado, as simulações apresentadas neste trabalho foram todas feitas em definidas temperaturas do molde (T_m) e do fluxo polimérico inicial (T_i), de modo a que a avaliação da diferença de comportamento de polímeros nos resultados de simulação somente fosse afetada pelos seus parâmetros físico-químicos, permitindo a avaliação da possibilidade da

correlação entre polímeros via análise do índice de fluidez. Entretanto, os resultados mostrados anteriormente, indicam possíveis variações de sensibilidade da viscosidade (η) a temperatura em diferentes magnitudes para distintos polímeros, podendo ser uma das causa da diferenças entre os resultados de simulação do Novolen 1102 K e ELTEX P TL 220 a diferentes temperaturas de injeção.

A Figura 51 mostra como o *Moldflow* registra as condições ideais para a realização de simulações, sendo: mínimas e máximas temperaturas de injeção e de molde e; mínimas e máximas taxas de cisalhamento.

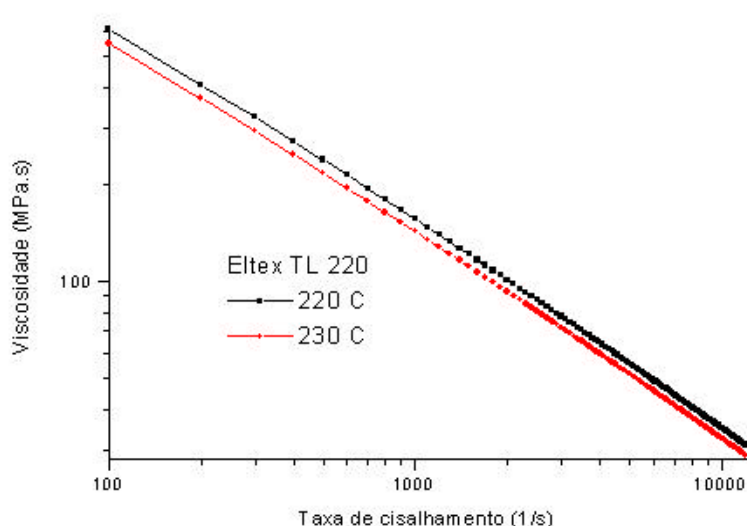


Figura 50: Curva de viscosidade (modelo de 2^a ordem) PP - ELTEX P TL 220.

EA2329	PP	NOVOLEN 2500 TCX	BASF AG	VI(240)48	BASF AG
EA2330	PP	NOVOLEN 2511 PCX 25%TF	BASF AG	VI(240)87	BASF AG
EA2331	PP	NOVOLEN 2800 JX	BASF AG	VI(240)106	BASF AG
EA2332	PP	NOVOLEN 3200 HX	BASF AG	VI(240)156	BASF AG
EA2333	PP	NOVOLEN 1126 N	BASF AG	VI(235)77	BASF AG
EA2401	PS	POLYSTYROL 143 E GLASKL	BASF AG	VI(235)81	BASF AG

Grade Details		
Processing Conditions:		
Melt Temperature Minimum		215.000000 deg.C
Melt Temperature Maximum		255.000000 deg.C
Melt Temperature Suggested		235.000000 deg.C
Generic Mold Temperature Minimum		20.000000 deg.C
Generic Mold Temperature Maximum		70.000000 deg.C
Generic Mold Temperature Suggested		45.000000 deg.C

Figura 51: Condições ideais de processamento para o termoplástico 143 E Glaskl

As definidas condições de simulações são semelhantes as condições de processamento industrial, as quais delimitam faixas de temperaturas de injeção e do molde conformador e, da taxa de cisalhamento de modo a garantir a não degradação de um termoplástico processado em condições impróprias.

As temperaturas de simulação escolhidas pelo usuário do programa comercial de CAE estão limitadas por valores ideais, os quais devem ser respeitados sob pena de possíveis imprecisões dos resultados de uma simulação do preenchimento.

Um outro exemplo da importância de seguir-se as temperaturas de processamento indicadas pelo *Moldflow* são as simulações do preenchimento do polietileno de alta densidade Eltex A 1100 e dos polipropilenos Eltex RP 210, Novolen 1100 H e Eltex TL 220, na geometria *faca* (item 3.3.1).

As temperaturas ideais de processamento para o polímero Eltex A 1100 são 240 °C, 260 °C e 280 °C, respectivamente temperatura mínima, ideal e máxima para o polímero fundido, sendo realizadas simulações do preenchimentos a temperaturas de injeção de 190 °C e 320 °C, sendo que em ambos os casos as simulações não ocorreram até o seu final, indicando o *Moldflow* a presença de erros - *data out of range*. A mesma situação ocorreu para o polipropileno Novolen 1100 H em simulações na temperatura de injeção de 180 °C.

Além da indicação de erros por parte do *Moldflow*, o uso de temperaturas não permitidas pode gerar situações de não preenchimento total da peça analisada. Os polipropilenos Eltex RP 210 e Eltex TL 220 possuem a indicação das seguintes temperaturas ideais de processamento: 240 °C, 260 °C e 280 °C. A realização de simulações de preenchimento com temperaturas de injeção de 200 °C ocasionou o não preenchimento total da peça, conforme o apresentado na Figura 52.

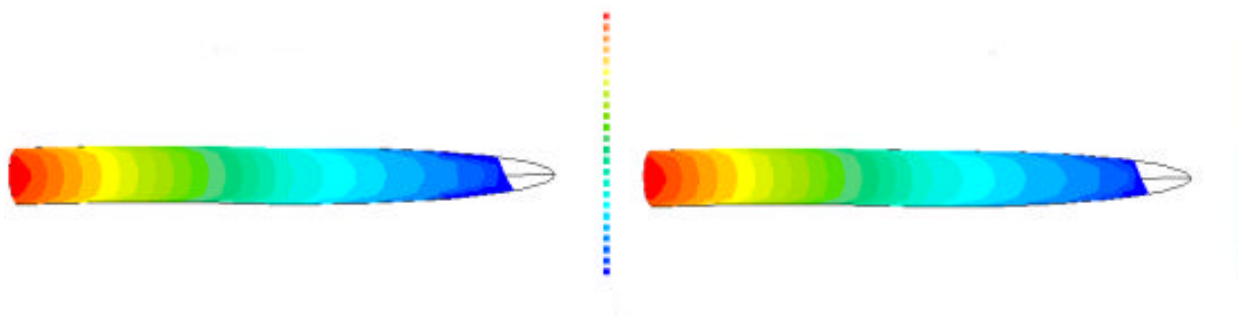


Figura 52: Preenchimento parcial da peça, PP Eltex RP 210 (esquerda) e TL 220.

4.3 Análise dos resultados da presença de linhas de solda

A análise dos resultados das simulações da presença de linhas de solda e bolhas de ar demonstra, serem influenciados, somente, pela(s) posição(s) do avanço da(s) frente(s) de fluxo(s) dentro da geometria da peça analisada não sendo influenciada pelo material polimérico.

A condição necessária e fundamental para previsão da formação de linhas de solda pelo *Moldflow* é o encontro de duas frentes de fluxo polimérico, podendo apresentar direções contrárias ou paralelas [22].

4.3.1 Avanço da Frente de Fluxo Polimérico

Como já discutido anteriormente (item 2.6.1), o avanço da frente de fluxo polimérico ocorre pelo trajeto de menor resistência dentro da geometria da peça. Sendo assim, o avanço da frente de fluxo não é função do termoplástico - seu avanço somente está relacionado a geometria da peça e seu número de elementos discretizados. Para a comprovação desta afirmativa,

realizaram-se algumas simulações, em específicas condições de contorno (item 3.1.1) em geometrias de diferentes complexidades, em distintos polímeros.

Inicialmente, as simulações foram feitas na geometria *xícara*, com malha formada por 940 elementos para os polietilenos de alta densidade Eltex A 1100, Eltex A 3180, Eltex A 1050; polipropilenos Novolen 1100 H, Novolen 1100 L e Novolen 1102 K; polietilenos de baixa densidade Lupolen 1810 D e Lupolen 1812 D e Lupolen 1812 E.

As condições de contorno para a realização destas simulações estão previstas no item 3.1.1, lá denominadas de condições C1 e C2.

O avanço da frente de fluxo polimérico está representado pela previsão do tempo de preenchimento, devido à indisponibilidade no *Moldflow* de uma forma específica para sua representação e também, pela facilidade de seu conhecimento através da interpretação do respectivo resultado.

A Figura 53 mostra o avanço da frente de fluxo para os polímeros Eltex A 1100, Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, sendo as simulações realizadas na condição C1 aplicável a cada polímero.

Sua análise mostra que a frente de fluxo polimérico avança no mesmo sentido para cada um dos diferentes polímeros apresentados, sendo cada um destes pertencentes a diferentes grupos poliméricos.

O fluxo polimérico inicia na base da peça (ponto de injeção) avança até o seu extremo superior, retornando pela alça da geometria; para na sua correspondente base, ocorrer encontros das frentes de fluxos de diferentes direções.

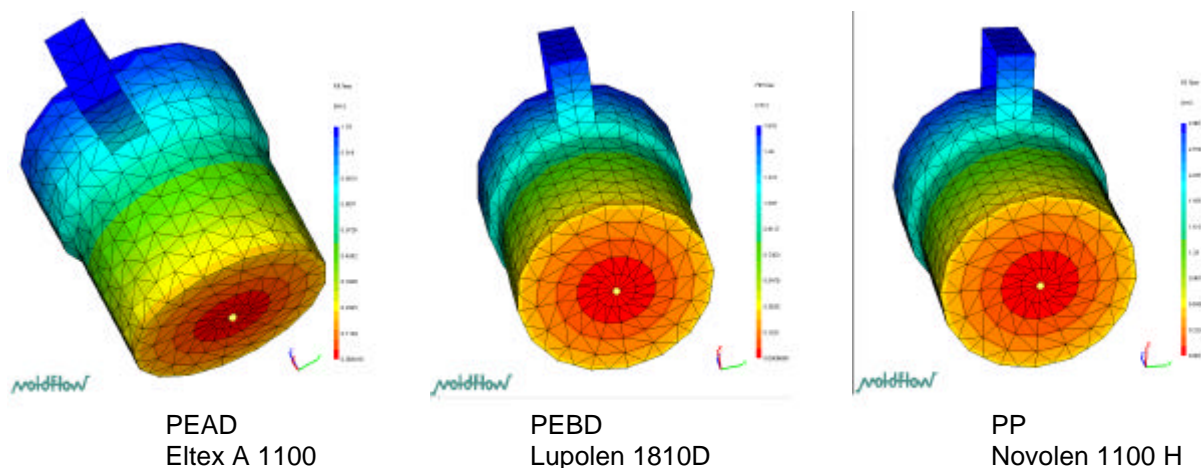


Figura 53: Avanço da frente de fluxo (geometria xícara): Eltex A 1100, Lupolen 1810D e Novolen 1100H na condição C1.

A temperatura inicial do fluxo polimérico pode apresentar efeitos de grau variável em alguns dos resultados de uma simulação de preenchimento, como demonstrado anteriormente no item 4.2.1.

Com o objetivo de avaliar o impacto da variação da respectiva temperatura no avanço da frente de fluxo polimérico, realizaram-se simulações nas mesmas condições das apresentadas na Figura 51, porém alterando as respectivas temperaturas iniciais. A Figura 54 mostra o avanço da frente de fluxos dos polímeros na condição C2 - maiores temperaturas iniciais do fluxo polimérico no ponto de injeção.

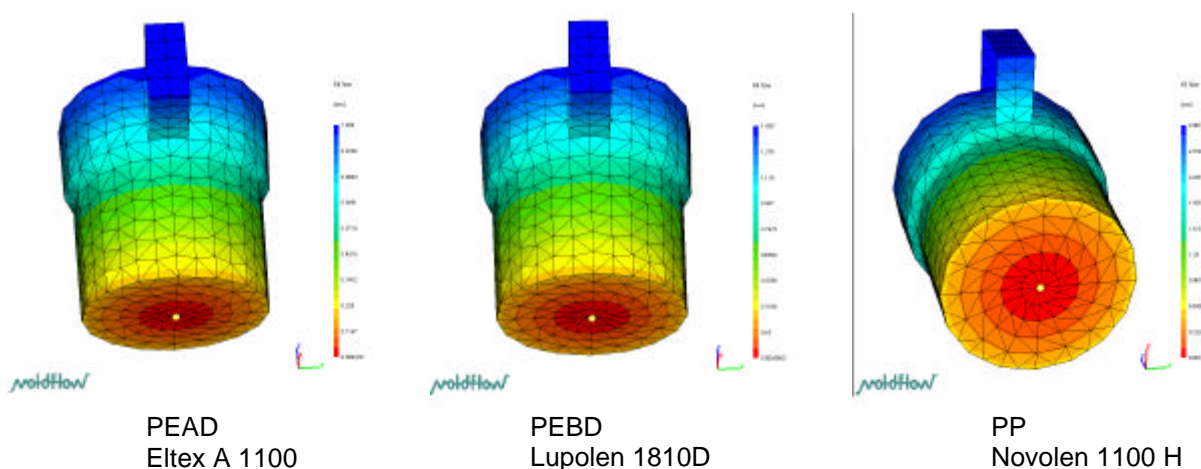


Figura 54: Avanço da frente de fluxo (geometria xícara): Eltex A 1100, Lupolen 1810D e Novolen 1100H na condição C2.

A avaliação da direção de fluxo apresentada na Figura 54 mostra que, apesar do aumento da temperatura inicial do fluxo polimérico (demais condições idênticas aos resultados apresentados na Figura 53) permanece a mesma direção do avanço da frente de fluxo polimérico.

O aumento dos valores de temperatura inicial do fluxo polimérico acarreta a diminuição dos valores de viscosidade do termoplástico em diferentes graus, dependendo da sua sensibilidade a esta variável; ocasionando prováveis alterações dos resultados de tempo de preenchimento, taxas de cisalhamento e outros contudo, sem alterar as direções de avanço da frente de fluxo polimérico.

Prosseguindo na avaliação apresentada no início deste item, realizaram-se novas simulações com alteração do número de elementos discretizados na peça, alterando este valor na geometria *xícara* para 1864 elementos. As simulações na respectiva geometria com nova densidade de malha foram realizadas com os mesmos polímeros anteriores, sendo realizadas na condição C1. A Figura 55 mostra os resultados destas simulações.

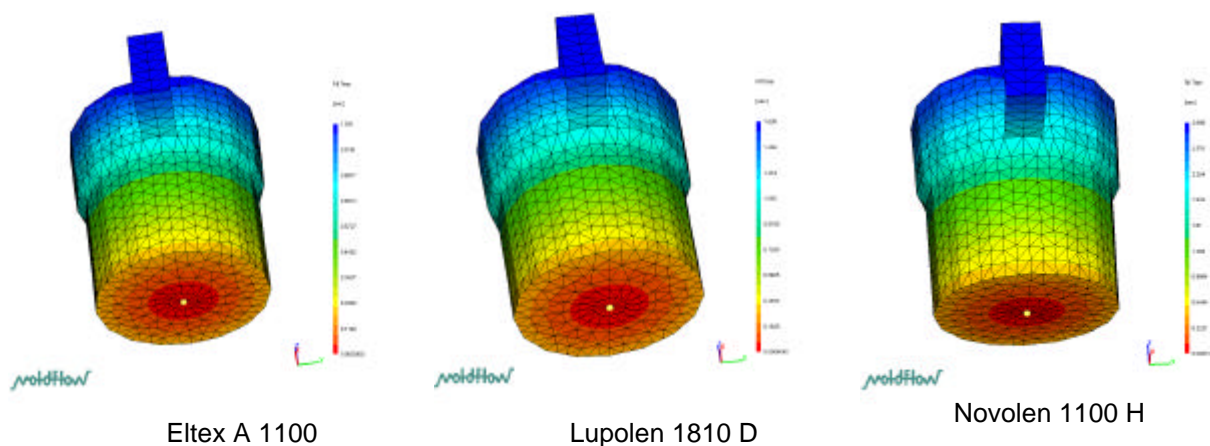


Figura 55: Avanço da frente de fluxo (geometria *xícara*): Eltex A 1100 , Lupolen 1810D, Novolen 1100H e Styron 478 , condição C1 na geometria *xícara* ,malha com 1864 elementos.

Introduzindo a geometria suporte, a qual foi simulada nos polímeros Eltex A 1100 e Lupolen 1810 D, na condição C1. O ponto de injeção aplicável a este conjunto de simulações está localizado no centro da base da respectiva geometria. Os resultados desta simulação estão

apresentados em duas figuras, sendo cada uma destas representativas do preenchimento de um dos planos da correspondente geometria. A Figura 56 apresenta o preenchimento da base da geometria, e o ponto de injeção aplicado (círculo amarelo). A Figura 57, por sua vez, mostra o preenchimento na lateral da geometria suporte – término do preenchimento da respectiva geometria.

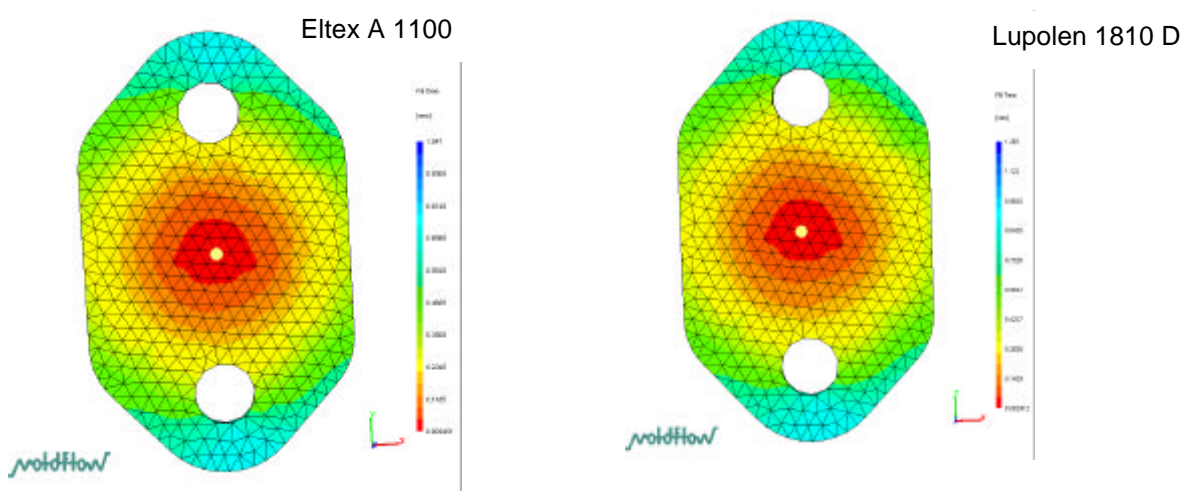


Figura 56: Simulação na geometria suporte, preenchimento da base.

As simulações para a geometria suporte, novamente mostram, que a direção de avanço da frente de fluxo polimérica é independente do polímero escolhido para a realização da simulação do preenchimento. Avaliando a Figura 56, verifica-se que a frente de fluxo polimérica avança, nos três diferentes polímeros simulados, nas mesmas direções. Inicia no ponto de injeção (mesma localização para estas três simulações), avançando simultaneamente para as direções acima e abaixo e; esquerda e direita da localização inicial do preenchimento. Posteriormente, a frente de fluxo, ascendente e descendente, contorna os furos presentes na geometria (bifurcando-se em duas semifrentes), até o seu encontro na parte superior do respectivo detalhe. Paralelamente a estes acontecimentos, ocorre o preenchimento da lateral da geometria em questão.

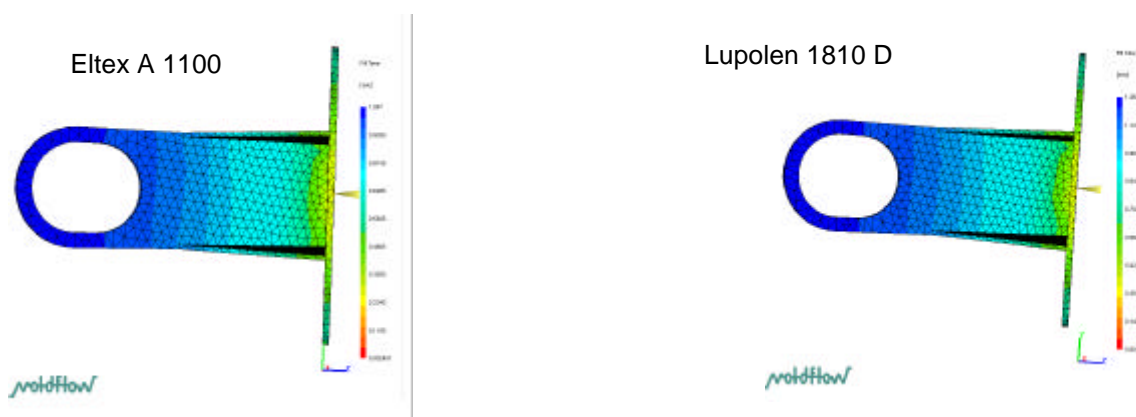


Figura 57: Simulação na geometria suporte, preenchimento da lateral.

A Figura 57 mostra o avanço da frente de fluxo polimérico, no sentido ascendente, novamente bifurcando-se no furo da lateral da geometria em duas semi frentes de fluxos até os seus encontros na parte superior do detalhe em questão.

O aumento do número de elementos discretizados em uma geometria tem efeitos no aumento da demanda de tempo computacional necessária para apresentação dos resultados, na provável melhor definição da posição prevista da presença de linhas de solda na geometria analisada e outros. Contudo, a direção do avanço da frente de fluxo não sofre alterações significativas. O avanço da frente de fluxo polimérico através dos elementos formadores da geometria da peça inicia pelo ponto de injeção previsto pelo usuário do programa, avançando pelos elementos que ofereçam a menor resistência ao fluxo [19]. Sendo assim, a comparação do avanço da frente de fluxo polimérico em geometria de igual forma porém, com substancial diferença no número de elementos formadores de sua malha, mostra que a posição do avanço da frente de fluxo é a mesma, podendo haver pequenas diferenças quando avaliada a um nível de detalhamento de elementos da malha.

As simulações na geometria chapa avaliam o avanço do fluxo polimérico em diferentes números de elementos discretizados - 412, 976 e 1716 elementos.

As direções de avanço da frente de fluxo polimérico estão apresentadas na Figura 58 onde verifica-se que estas mantêm-se constantes, apesar da variação do número de elementos

discretizados. O fluxo polimérico inicia-se no ponto de injeção (identificado na respectiva figura pela seta) deslocando-se em direção ao outro extremo da geometria, dividindo-se em duas semifrentes ao contornar o detalhe furo para, posteriormente, convergir em uma específica zona, idêntica para as diferentes situações.

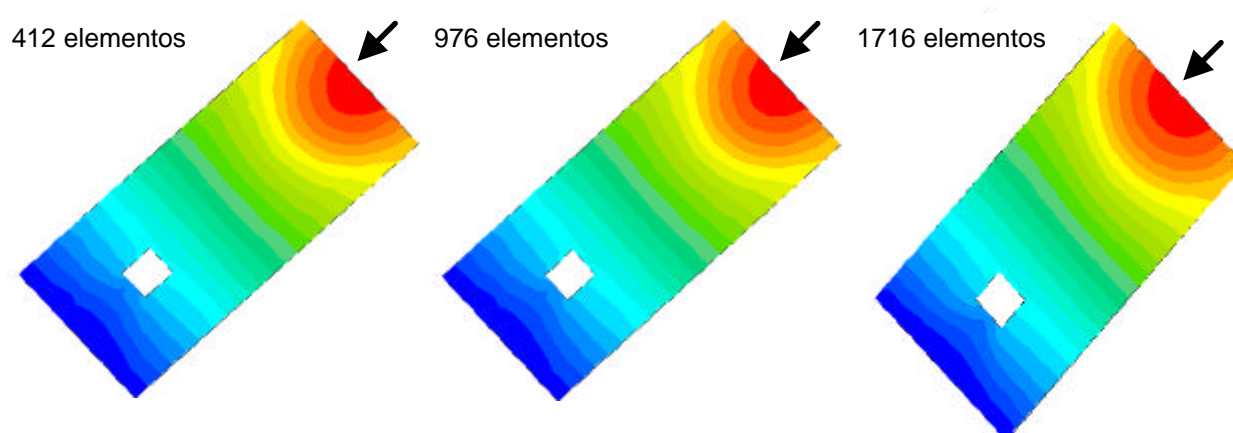


Figura 58: Direção de avanço da frente de fluxo em três densidades de malha (412,976 e 1716 elementos).

A Figura 59 mostra a formação de linha de solda para simulações realizadas nas mesmas condições da figura imediatamente anterior, apresentando também, as diferentes densidades de malha e a respectiva posição da linha de solda (indicados pela seta), na totalidade da respectiva geometria e em detalhes, permitindo uma melhor visualização da posição de formação da linha solda, a análise desta mostra que:

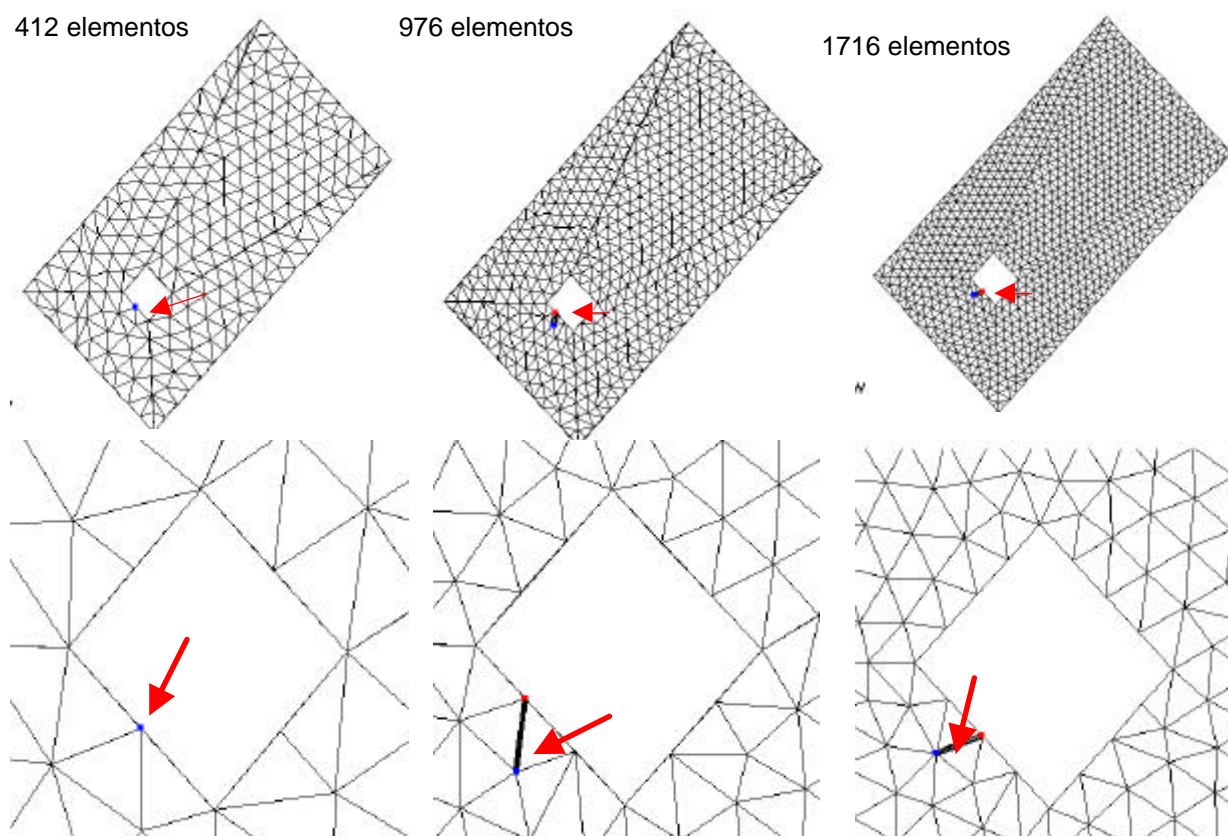


Figura 59: Formação de linhas de solda na geometria chapa, em diferentes densidades de malha.

- a) a definição da posição de formação da linha de solda torna-se mais precisa, quando do aumento do número de elementos discretizados. A posição prevista para a geometria com 412 elementos é menos definida em relação as demais, ocorrendo uma melhor definição com o aumento da densidade de malha;
- b) existem diferenças da posição de formação da linha de solda. Basicamente, as diferenças da posição de formação de linha estão em quais dos elementos componentes da malha haverá a convergências das frentes de fluxo polimérico (item 2.6.1). A posição prevista para a formação de linhas de solda para a situação de 976 elementos é distinta da prevista para 1716 elementos.

Quanto mais densa é a malha (número de elementos discretizados) maior é a definição da presença de uma linha de solda.

A previsão de bolhas de ar também está fundamentada nestas condições.

4.4 Análise dos resultados da presença de bolhas de ar

O *Moldflow* indica a presença de possíveis bolhas de ar (*air traps*) quando de convergência de pelo menos duas frentes de fluxo em um nó ou então, que este seja o último ponto a ser preenchido pelo polímero fundido.

A convergência de frentes de fluxos poliméricos é independente do material polimérico sendo somente influenciada pela geometria da peça e seu número de elementos discretizados [19]. As simulações da presença de bolhas de ar foram feitas na geometria *xícara* na densidade de malha prevista no item 3.3.1 ou seja, 302, 804 e 1042 elementos.

A Figura 60 mostra a simulação da presença de bolhas de ar para simulações do preenchimento com os polímeros Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, respectivamente, polietileno de baixa densidade, polipropileno e poliestireno, na condição C1. As posições previstas (elementos da geometria) pelo *Moldflow*, para a possível presença de bolhas de ar estão indicados nas respectivas figuras pelo ponto azul.



Figura 60: Bolhas de ar(geometria *xícara*):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C1, malha com 302 elementos

A Figura 61 mostra a simulação da presença de bolhas de ar para simulações do preenchimento nas mesmas condições da Figura 60 (densidade de malha e termoplástico), porém na condição C2.

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 60 e 61 verifica-se, que a posição prevista na geometria *xícara* para a possível presença de bolhas de ar é a mesma para as simulações realizadas com os diferentes polímeros, tanto na condição C1 e C2.

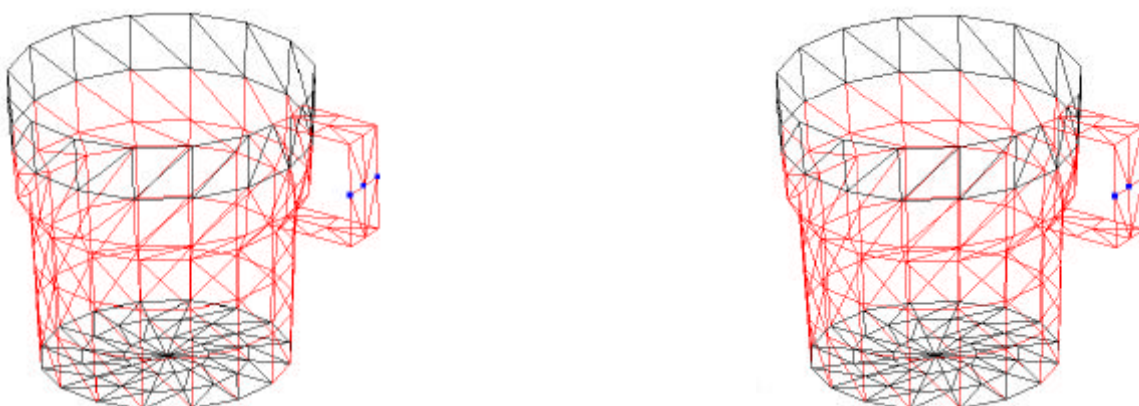


Figura 61: Bolhas de ar(geometria *xícara*):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C2, malha com 302 elementos.

A Figura 62 e 63 apresenta a simulação das prováveis zonas da presença de bolhas para os mesmos polímeros simulados anteriormente, nas condições C1 e C2, alterando-se o número de elementos da geometria para 804 elementos, ou seja com uma maior densidade de malha.

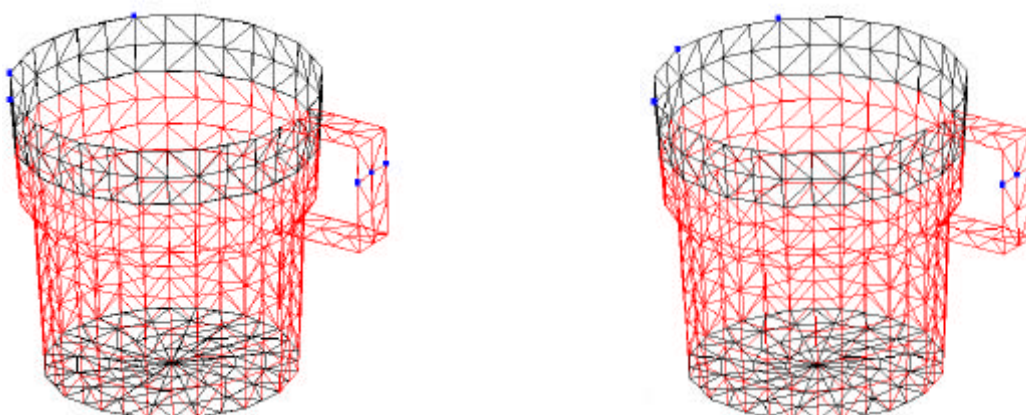


Figura 62 Bolhas de ar(geometria *xícara*):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C1, malha com 804 elementos.

Verificando os resultados da possível presença de bolhas de ar, identifica-se pequenas variações entre os polímeros avaliados.



Figura 63: Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C2, malha com 804 elementos.

Executando-se uma nova seqüência de simulações, com alterações no número de elementos da geometria (1042 elementos) com os mesmos polímeros e condições anteriores, estando seus resultados apresentados nas Figuras 64 e 65.

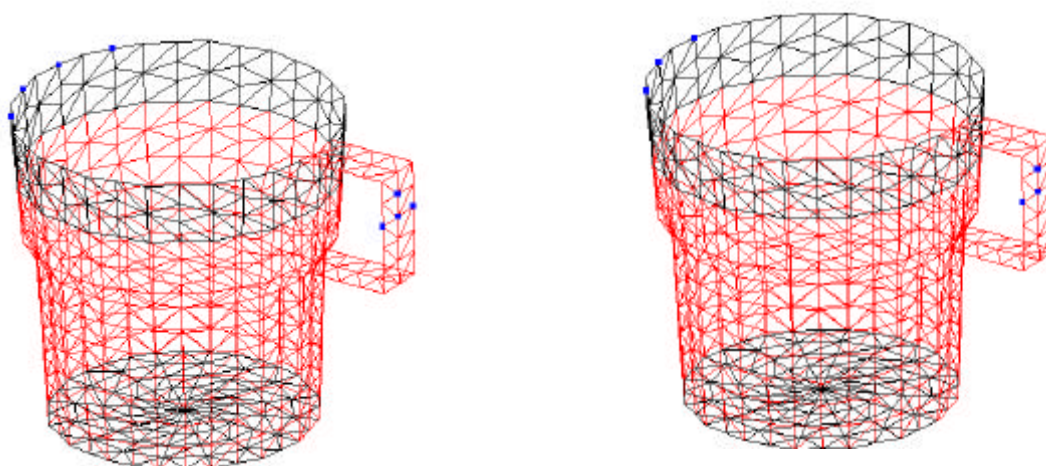


Figura 64: Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C1, malha com 1042 elementos.

Novamente, verifica-se que as simulações para as possíveis zonas de presença de bolhas de ar semelhantes para os diferentes polímeros e condições de simulação.

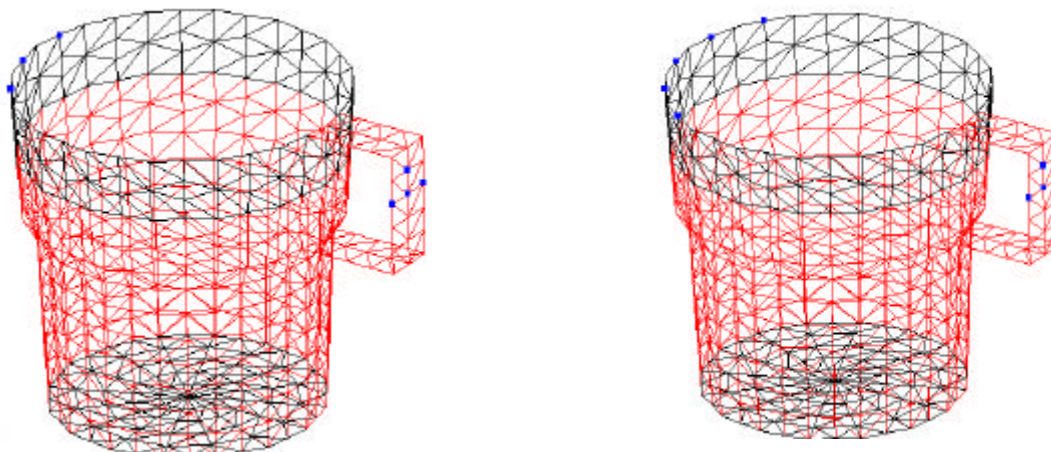


Figura 65: Bolhas de ar(geometria xícara):Lupolen 1812 D e Novolen 1100 H, C2, malha com 1042 elementos.

A possível presença de bolhas de ar indica a necessidade do projetista do molde prever dispositivos para extração de gases e a sua localização na cavidade moldante.

Avaliando os resultados apresentados acima, observa-se que os resultados das simulações da presença de bolhas de ar não são afetados, de forma significativa, pelo material polimérico, sendo função da(s) direção(ões) de avanço da frente de fluxo e este, por sua vez, da geometria da peça e da sua densidade de malha. Verificam-se, pequenas alterações nas zonas das prováveis presenças de bolhas de ar, quando da alteração do polímero simulado, sendo que estas não são relevantes a ponto de necessitar novos dispositivos de extração do ar aprisionado.

O refino da malha, ou seja, aumento de sua densidade, proporciona uma maior definição da zona da possível presença de bolhas de ar de acordo com o mostrado pelas Figuras 60 a 65.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Com base nos estudos realizados sobre a possibilidade do estabelecimento de similaridade entre termoplásticos através da análise dos valores do índice de fluidez, densidade e estereoisomeria, apresentados nas tabelas de contratipos, aplicável na correlação entre polímeros para aplicação a nível qualitativo para polietilenos de alta densidade, polietilenos de baixa densidade e polipropilenos, conclui-se que:

- em relação à aplicação dos valores de densidade. A densidade apresentada nas tabelas de contratipos e utilizada no relacionamento entre termoplásticos é medida através da ASTM D 1505. Os termos componentes das equações governantes da fase de preenchimento de cavidades não apresentam relações com esta propriedade. As referidas equações utilizam para a previsão dos fenômenos da fase a densidade do fundido, sendo esta distinta da indicada através da ASTM D 1505,
- sobre o emprego da estereoisomeria das cadeias moleculares. Do mesmo modo que a densidade, também não apresenta relação com termos componentes das equações governantes;
- a aplicação dos valores de índice de fluidez para estabelecer-se correlação entre diferentes polímeros de uma mesmo grupo polimérico. O índice de fluidez ao contrário da densidade e da estereoisomeria, apresenta relação com um dos termos componentes das equações governantes, no caso a viscosidade. Contudo, o estabelecimento de um critério de contratipos ao nível qualitativo para o estabelecimento de semelhanças entre diferentes polímeros para aplicação no *Moldflow*, baseado no índice de fluidez mostrou-se inviável. A indicação da sua impossibilidade fundamenta-se na diferença entre o índice de fluidez e a viscosidade; o

primeiro é nada mais do que um dado prático de viscosidade representativo de um único ponto a uma específica temperatura e taxa de cisalhamento, sendo que o *Moldflow* necessita, para a realização de uma simulação do preenchimento de cavidades, de uma seqüência de dados viscosidade obtidos em várias temperaturas e taxas de cisalhamento. As simulações do preenchimento realizadas mostraram que o índice de fluidez não pode ser aplicado para a previsão de tendências de resultados influenciados pelo material polimérico tais como tempo e pressão de preenchimento. Quando do surgimento desta situação, é necessário efetuar-se a caracterização do polímero interessado, ou seja, definir seus parâmetros físico-químicos necessários à realização de simulação do preenchimento no programa de CAE;

- de acordo com o tipo de resultado de simulação do preenchimento de cavidades desejado é relevante a consideração do termoplástico e por conseqüência, o estabelecimento de um critério de contratipos. A empresa transformadora de polímeros, interessada em simulações do processo de injeção em sistemas CAE, especifica ao fornecedor de simulações do processo de injeção, qual o resultado desejado, por exemplo: tempos de preenchimento ou presença de linhas de solda. Resultados de simulações do tempo de preenchimento e do gradiente de pressão são influenciadas pelo material polimérico, sendo desejável um critério de contratipos. Entretanto, quando são desejadas informações sobre o avanço da frente de fluxo polimérico fundido tais como a previsão da presença de linhas de solda e bolhas de ar, o polímero não é relevante, sendo estes resultados somente influenciados pela geometria e densidade de malhas da peça a ser simulado.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Nos módulos do *Moldflow packing, warping, cooling* e outros; definir quais os resultados apresentados pelo *programa computacional* são influenciados pelo tipo polimérico, fundamentado nas correspondentes equações governantes;
- Estabelecer a nível quantitativo um Critério de Contratipos para o estabelecimento de semelhança entre diferentes polímeros. Fundamentado na definição de percentuais de tolerâncias permitidos para a semelhança entre os seus parâmetros físico-químicos;
- O índice de fluidez é um ensaio bastante difundido nas indústrias transformadoras de polímeros. Baseado nesta e, prevendo um aumento da utilização da ferramenta programa computacional de CAE no país, aprofundar os trabalhos de *Hall* [10], *Shit* [14] e *Shenoy e Saini* [16] estabelecendo formas de correlação entre a variável viscosidade com valores de índice de fluidez obtidos em diferentes condições de temperatura e carga.
- Avaliar as condições de processo indicadas pelo *Moldflow* e sua importância nos resultados de uma simulação, tanto no módulo de preenchimento de cavidades como nos demais disponíveis no programa computacional.

CAPÍTULO 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] POLITENO S.A.. **Moldagem por Injeção**. Palestra ministrada na BRASILPLAST de 1999. Disponível em : <<http://www.politeno.com.br>>. Acesso em dezembro de 2001.
- [2] MERCER, H.. Vai transbordar. **Revista Plásticos em Revista**, São Paulo, ano 39 , n. 459, p. 6-12, abr. 2001.
- [3] DIHLMANN, C.. **Simulação e Análise do Preenchimento de cavidades em moldes para injeção de Polímeros utilizando método manual e Tecnologia CAE/CAD**. 1993. .153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [4] ESTORILIO, C.; HATAKEYAMA, K. Sistemas CAD/CAE/CAM integrados aperfeiçoam a injeção de plásticos. **Revista Plástico Industrial**, São Paulo, p. 45-53 jun., 1998.
- [5] AHRENS, C. et al. Avaliação de resultados de simulações de moldagem por injeção, em um sistema CAE, entre o material contido no banco de dados do sistema e seu contratipo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS ABPOL,5., Águas de Lindóia, SP, 1999. Programa de Atividades. Águas de Lindóia: Associação Brasileira de Polímeros, 1999.
- [6] DOMININGHAUS, H. **Plastic for Engineering**. Munich: Hanser Gardner, 1993.
- [7] BLASS, A..**Processamento de Polímeros**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC. 1988.
- [8] BRAUN D.. **Simple methods for identification of plastics**. 2. nd. ed. Munchen, Alemanha: Hanser, 1986.
- [9] SHENOY, A.V.; SAINI, D.R.. **Thermoplastic Melt Rheology and Processing**. *Revista Plastic Enginnering*, New York , v. 37,, p.312 -391, 1996.
- [10] HALL ,S.W.. **Determing the Melt Index Number from Capillary Rheometer Data**. ANTEC CONFERENCE PROCEEDINGS..., 7TH-11TH, Boston Massachussets, maio 1995, p. 4274 – 4278.
- [11] GRUENWALD, G.. **How Structure determines Properties**. Munich: Hanser Publishers, 1993.
- [12] BRETAS E. S.; D´ÁVILA, M. A. **Reologia de polímeros fundidos**. São Paulo: Editora UFSCAR, São Carlos, SP, 2000.

- [13] FLEMING, D.. Polymer Rheology : A One Number Science ?
Revista Progress in Rubber and Plastics, v. 46, , p.69-88, outubro, 1996.
- [14] SHIT , S.C.. Melt flow indexer for estimation of viscosity (single point) and MWD of polymers. **Revista Popular Plastics & Packaging**, local, p51-52, fev. 1993.
- [15] TOMIS, F.. Problems of rheology in plastics processing. **Int. Polym.Sci. Technol.**, n. 7. p. , T90 – T92, 1980.
- [16] SHENOY, A.V.; SAINI, D.R.. Copolymer Melt Rheograms from Melt Flow Index. **British Polymer Journal**, , v.17, n. 3, p. 314 – 320, março, 1985
- [17] REES, H. **Mold Engineering**. Munich: Hanser Gardner, 1995.
- [18] CARVALHO, J.W.C; SANTOS, J.W; CARVALHO, A. B. **Apostila Tecnologia do Polietileno**. São Paulo: Union Carbide do Brasil, 1995.
- [19] KENNEDY, P. **Flow Analysis of Injection Molds**. Munich: Hanser Publishers, 1995.
- [20] AKIRA D'ÁVILA, M.. **Processo de Moldagem por Injeção de Polímeros Semicristalinos: Caracterização e Simulação Assistida por Computador**. 1997. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [21] MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- [22] MOLDFLOW. **Moldflow Plastic Insight (versão 1.1) Help**. Austrália: Moldflow Pty, 2001. Aplicativo de consulta.
- [23] MICHIGAN STATE UNIVERSITY. **Intelligent System Lab**. Disponível em < http://www.isl.cps.msu.edu/trp/inj/pvt_what.html>. Acesso em junho de 2000.
- [24] PINTO, U. **Caracterização de Polímeros**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999. Estudo dirigido. Engenharia de Materiais.
- [25] SHIMADZU CORPORATION. **Introduction to Thermal Analysis**. Tóquio: Sakagusha Press, 1997. Manual do DSC Shimadzu, .
- [26] MCNAUGHTON, J.L.; MORTIMER, C.T. **Differential Scanning Calorimetry**. Estados Unidos: Perkin Elmer Corporation , 1975. Manual do DSC Perkin Elmer.
- [27] HÖHNE, G.; HEMMINGER, W.; FLAMMERSHEIM, H.J D.. **Scanning Calorimetry**. Berlin: Springer Verlag, 1996.
- [28] MOLDFLOW PTY. **Moldflow Material Testing Overview**. Austrália: Moldflow 1995.

- [29] KERN, D.. **Processos de Transmissão de Calor**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.
- [30] SMITH, J..M.; VAN NESS, H.C.. **Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química** . 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara 2, 1980.
- [31] MENGES, G.; MOHREN P.. **How to make Injection Molds**. São Paulo: Hanser Publisher, 1995.
- [32] ELIAS, H.G.. **Macromolecules**. 2. ed . New York: Plenum Press, 1984. Parte 1, 2.
- [33] BILLMEYER JR.; F.W.. **Textbook of Polymer Science**. 2. ed. New York: J. Wiley, 1971.
- [34] OPP. **Catálogo eletrônico de termoplásticos**. Disponível em <<http://www.opp.com.br>> . Acesso em janeiro de 2002.
- [35] CAMPUS PLASTICS DATA BASE: **Catálogo Eletrônico de Polímeros**. Versão 4.1. Disponível em < <http://www.campusplastics.com>>. Acesso em 2000 e 2001.
- [36] POLITENO. **Catálogo eletrônico de termoplásticos**. Disponível em <<http://www.politeno.com.br>>. Acesso em janeiro de 2002.
- [37] PETROQUÍMICA TRIUNFO. **Catálogo eletrônico de termoplásticos**. Disponível em < <http://www.pttriunfo.com.br>>. Acesso em janeiro de 2002.
- [38] UNION CARBIDE DO BRASIL. **Polietileno**. São Paulo, 1998.
- [39] SOLVAY. **Catálogo de Termoplásticos**. São Paulo, 2000.
- [40] IPIRANGA PETROQUÍMICA. **Catálogo eletrônico de termoplásticos**. Disponível em <<http://www.ipq.com.br>>. Acesso em janeiro de 2002.
- [41] BASF. **Catálogo de Termoplásticos**. São Paulo, 2000.
- [42] SPP NEMO. **Tabela de Contratipos**. Disponível em <<http://www.sppnemo.com.br>>. Acesso em dezembro de 2001.
- [43] OPP. **Tabela de Contratipos**. Triunfo, RS: OPP, 1997.
- [44] PLÁSTICOS RUTTINO. **Tabela de Contratipos**. Disponível em <<http://www.ruttino.com.br>>. Acesso em dezembro de 2001.
- [45] TA INSTRUMENTS; THERMAL ANALYSIS AND RHEOLOGY. **Rheology Softwares Models (Flow)**. Disponível em <<http://www.tainst.com>>. Acesso em março de 2000.

- [46] MOLDFLOW PTY.. **Moldflow Material Testing Service**. Austrália: Moldflow 1995.
- [47] POUZADA, A. S.. Polímeros para injeção. **Revista O Molde**, Marinha Grande, Portugal , n. 11, mar. 1991. Parte 2: Plástico de Engenharia Amorfos.
- [48] POUZADA, A. S.. Polímeros para injeção. **Revista O Molde**, Marinha Grande, Portugal, n. 11, mar. 1991. Parte 3: Plástico de Engenharia Semicristalinos.
- [49] HAN , C. D.. **Rheology in Polymers Processing**. Orlando (USA): Academic Press, 1976.
- [50] TANNER, R. I.. **Engineering Rheology**. Oxford: Clarendon Press, 1992.
- [51] BRITO, A.C.G.. **Simulação do Escoamento de Termoplásticos em Placas Moldadas por Injeção**. 1995. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Minho, Portugal.
- [52] WHITE,J.L. **Principles of Polymer Engineering Rheology**. New York: John Willey & Sons, 1990.
- [53] GUERREIRO, A.. Desenvolvimento da área médica caminha lado a lado com o dos plásticos. **Revista Plástico Industrial**, São Paulo, ano III n.30 , p.30_-40, fev. 2001.
- [54] TA INSTRUMENTS; THERMAL ANALYSIS AND RHEOLOGY. **Molecular Weight and Shear Thinnings properties of polymer sistem**. Disponível em <<http://www.tainst.com>>. Acesso em setembro de 2000.
- [55] MOLDFLOW PTY. **Materials Manual for windows**. Revisão 9.01. Austrália: Moldflow, 1995.
- [56] WALKER. B.M.. **Handbook of Thermoplastic Elastomers**. New York: Van Nostrand Reinhold , 1980.
- [57] DUBOIS, J.H; JOHN, F.W.. **Plastics**. Chap. 1. New York: Van Nostrand Reinhold, 1967.
- [58] MICHAELI, W. et al.. **Tecnologia dos Plásticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995.
- [59] MCCRUM,N.G.; BUCKLEY,C.P.. **Principles of Polimer Engineering**. Oxford: Science Publication, 1988.
- [60] ROSEN, S. L.. **Fundamental Principles of Polimeric Materials**. 2. ed., New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [61] FARIAS MILLA, A.Y.. **Influência do resfriamento na qualidade de peças termoplásticas moldadas por injeção, com estudo de caso em sistema CAE**. 1998. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- [62] THRONE, J.L.. **Thermoforming**. Munich: Hanser publisher, 1987.
- [63] CALLISTER, W.D.. **Material Science and Engineering: An Introduction**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [64] IDSA.. **Injection Process**. Disponível em <http://www.idsa-mp.org/proc/plastic/injection/injection_process.htm>. Acesso em abril de 2002.

ANEXO A. Ciclo de Injeção

Este trabalho analisa exclusivamente a simulação da fase de preenchimento de cavidades, sendo relevante compreendê-la e também a sua participação no ciclo de moldagem por injeção.

Na moldagem de termoplásticos é necessário aquecer o material polimérico a um estado de fluidez, conformá-lo na cavidade do molde, para então resfriá-lo enquanto ainda estiver no molde, para acelerar este processo adota-se a moldagem por injeção, que é uma adaptação do processo de fundição sob pressão, utilizado para metais leves [7].

O ciclo da moldagem por injeção inicia com o fechamento do molde (Figura 66).

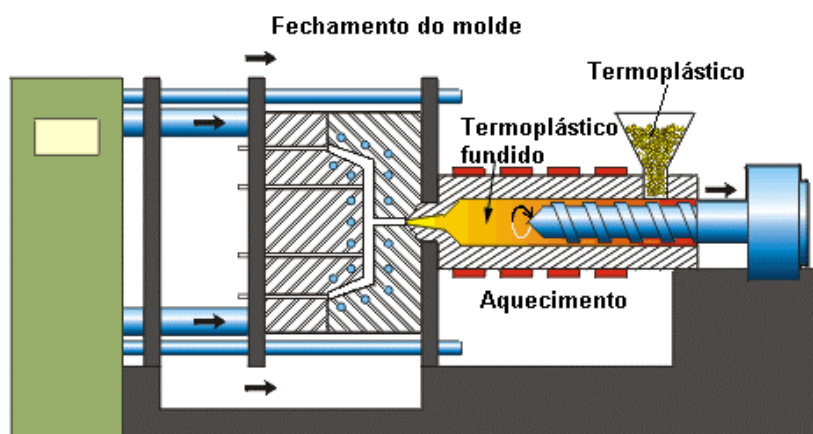


Figura 66: Início do ciclo de injeção, fechamento do molde [64].

Após, inicia-se o preenchimento da cavidade moldante com o termoplástico fundido (Figura 67). O êmbolo ou parafuso de injeção avança, inicialmente com velocidade constante até a cavidade estar totalmente preenchida.

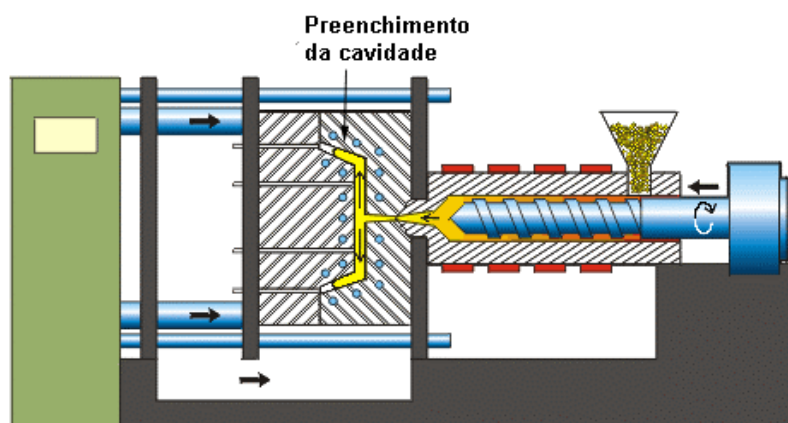


Figura 67: Preenchimento do molde com o termoplástico fundido [64].

No final do preenchimento da cavidade moldante com plástico fundido, a pressão de injeção é mantida constante para compensação da contração volumétrica do plástico solidificado.

Dividida em duas subfases distintas [12]:

- a) empacotamento; com a cavidade já preenchida o parafuso de injeção se move lentamente, submetendo o molde a pressão de recalque;
- b) compensação. O parafuso continua a avançar vagarosamente, compensando a contração volumétrica do termoplástico.

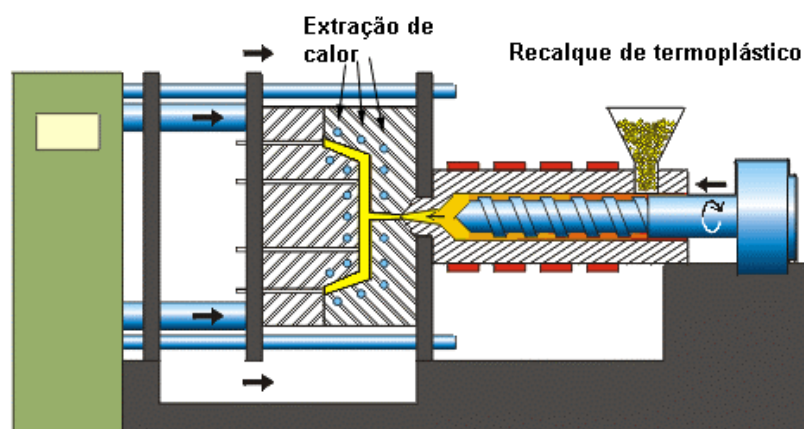


Figura 68: Fase de empacotamento [64].

Após a solidificação do plástico, o molde é aberto, possibilitando a extração do objeto moldado. Os canais de alimentação e o ponto de injeção solidificam até uma temperatura que seja possível a extração da peça.

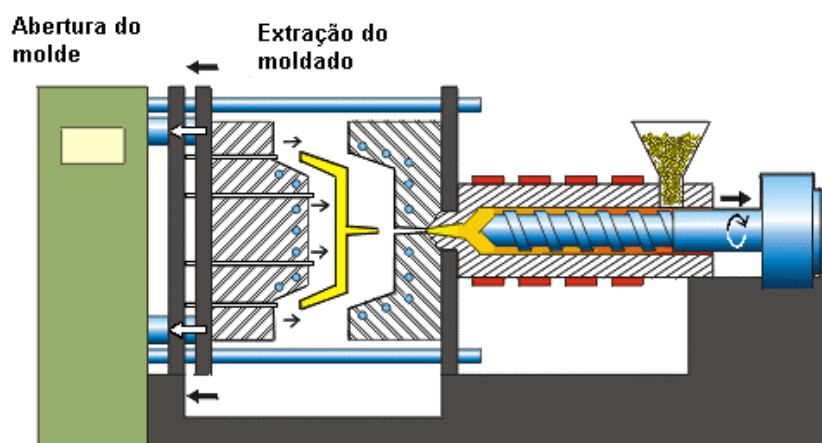


Figura 69: Término do ciclo [64].

	POLITENO			IPIRANGA			OPP			POLIALDEN			SOLVAY			APLICAÇÃO
		IF	r		IF	r		IF	r		IF	r		IF	r	
PEAD	IE 59 U3	5,00	0,959													Caixas para pescador, peças técnicas de grandes dimensões.
	IA59	7,30	0,960	GC 7260	8,00	0,958	HI 865	6,50	0,965	JV 060	6,50	0,954	A 2080	8,00	0,959	Caixas para alimentos e uso geral
	IA59 U3	7,30	0,960	GC 7260 LS	8,00	0,958	HI 865 UV	6,50	0,965	JV 060 U	6,50	0,954	URA 82	8,00	0,959	Garrafeiras, caixas e peças técnicas
	IA 58	22,0	0,957	GA 7260	18,00	0,957				JT 200	0,20	0,957				Utilidades domésticas, brinquedos e uso geral
	IB 58	35,00	0,958										A 3400	35,00	0,955	Potes e embalagens de paredes finas
	IC 58	45,00	0,956													Embalagens para alimento e potes para sorvete

Tabela 20: Tabela de Contraiços da SPP NEMO [42]

	POLITENO			U. CARBIDE			OPP			TRIUNFO			APLICAÇÃO
		IF	r		IF	r		IF	r		IF	r	
PEBD	I 7018	7,00	0,918										Injeção de tampas e batoques
							PB 208	22,0	0,923				Injeção de peças com média flexibilidade
	G 803	30,00	0,918	30 MB	30,00	0,916	PB 608	30,00	0,915	TX 5300	30,00	0,919	Injeção de peças com alta flexibilidade
				4060 A	50,00	0,915							Injeção de peças com alta flexibilidade

Tabela 20: Tabela de Contratos da SPP NEMO [42]

Tabela 20: Tabela de Contratipos da SPP NEMO [42]

PP	POLIBRASIL			OPP			APLICAÇÃO
		IF					
	HMT 6100	1,5	B				Peças para uso em trabalhos pesados, contêineres, Artigos automobilísticos.
				H 606	2,1	H	Peças de paredes grossas e temperaturas altas
				6631 F	1,8	H	Peças de paredes grossas e temperaturas altas
	KMT 6100	3,5	B				Utilidades domésticas, brinquedos, tampas, móveis, caixas de baterias, outros.
	KMT 6900	3,5	B				Utilidades domésticas, brinquedos, tampas, móveis, caixas de baterias, outros.
	PMT 6100	5,5	B	CP 442	6,5	B	Utilidades domésticas, brinquedos, tampas, móveis, caixas de baterias, outros.
	PEX 28007	8,0	B				Utilidades domésticas, brinquedos, tampas, móveis, caixas de baterias, outros.
	KM 6100	3,5	H	H 503	3,5	H	Peças de seção espessa, tampas flip top, eletrodomésticos, brinquedos.
	PM 6100	5,5	H				Peças de seção espessa, tampas flip top, eletrodomésticos, brinquedos.
	RM 6100	8,0	H	H 301	10,0	H	Utilidades domésticas, tampas e brinquedos.
	SM 6100	11,0	H				Utilidades domésticas, tampas e brinquedos.
				H 303	12,0	H	Idem ao H301, resistência superior ao impacto
	SMR 6170	11,0	R	RP 347	10,0	R	Embalagens com transparência: potes para freezer, cosméticos, seringas descartáveis
	PEX 37009	35,0	H	PF 945	35,0	H	Peças com boa transparência: utilidades domésticas, tampas transparentes, seringas descartáveis.
	TM 6100	16,0	H	H 306	15,0	H	Peças de paredes finas, utilidades domésticas, tampas e brinquedos.
	VM 6100 K	20,0	H	H 201	20,0	H	Peças de paredes finas, utilidades domésticas, tampas com lacres e brinquedos.
				H 206	22,0	H	Peças de paredes finas, utilidades domésticas, tampas com lacres e brinquedos
	VMT 6150 K	23,0	B	CP 241	20,0	B	Peças de paredes finas, utilidades domésticas, tampas com roscas e flip top.
				RP 245	25,0	R	Tampas e potes para freezers, utilidades domésticas, cosméticos, farmacêuticos (transparentes)
	PEX 19002	21,0	R	CP 204	25,0	R	Peças de parede fina, utensílios domésticos.
	WMV 6170 L	25,0	B	CP 141	25,0	R	Peças de parede fina, ciclo rápido.
	WM 6100 K	30,0	H	H 202	28,0	H	Peças de parede fina
	XM 6150K	35,0	H	PD 701	35,0	H	Peças de parede fina para utilidades domésticas, brinquedos, tampas com lacre, peças planas
	XM 6150 R	35,0	H				Peças de parede fina para utilidades domésticas, brinquedos, tampas com lacre, peças planas

Tabela 21: Tabela de Contraiços da OPP [43]

	OPP		POLITENO		POLISUL		POLIALDEN		SOLVAY		APLICAÇÃO					
	IF	r	IF	r	IF	r	IF	r	IF	r						
PEAD					GD 4960	5,0 ²	0,956						Frascos de parede fina de até 5 litros e "injection blow"			
					GD72 55 LS-L	4,0	0,954						Objetos para uso externo: Caixas para pescado e peças técnicas grandes, capacetes de segurança, garrafeiras, baldes industriais, etc.			
					GC 7260L S	8,0	0,958						Peças ao tempo: garrafeiras, baldes, lixeiras, caixas de frutas, legumes, frangos, etc.			
	HI 865/UV	7,3	0,958	IA-59 U3	7,3	0,960			JV 060U	7,0	0,964	URA 82	8,0	0,959	Peças ao tempo: garrafeiras, baldes, lixeiras, caixas frutas, legumes, frangos, etc. Não pode ter contato com alimentos.	
	HI 685	7,3	0,858	IA-59	7,3	0,960	GC 7260	8,0	0,958	JU 080	10,5	0,963	A 20 80	8,0	0,959	Peças de uso leve; utilidades domésticas, tampa, embalagens, brinquedos, etc.
									JU 080	10,5	0,963					Peças de uso leve; utilidades domésticas, tampas, embalagens, brinquedos, etc.
	HI 2054	22,0	0,957			0,957	GA 7260	19,0	0,957	JT 200	20,0	0,957	A 3180	20,0	0,955	Peças de parede fina, leves e ciclos rápido utilidades domésticas, brinquedos, etc.
													A 3400	36,0	0,952	Peças de parede fina, injeção de ciclo rápido
				IB 58	35,0	0,958										Parede fina; potes de sorvete, utilidades domésticas, brinquedos, etc.
																Peças de parede fina; potes para sorvete, alimentos, tampas com lacre, base para frascos para refrigerantes, brinquedos, etc.

Tabela 21: Tabela de Contratos da OPP [43]

	OPP			DOW			TRIUNFO			CARBIDE			POLITENO			APLICAÇÃO	
		IF	r		IF	r		IF	r		IF	r		IF	r		
PEBD							TX 6020	2,0	0,922	0159-C	3,5	0,919	S 1522 F- 2022/ 0	1,5 2,0	0,922 0,922	Injection-Blow	
	PB 283	8,0	0,91							0159 T 2795 TP	6,0 8,0	0,918 0,918	I- 7018 F- 7018	7,0 7,0	0,918 0,918	Brinquedos, utilidades domesticas, brinquedos, etc.	
	PB 202	22,0	0,923														Injeção de peças e de tampas rígidas
		30,0	0,915							30 MB	30,0	0,916	G-803	30,0	0,918		Tampas, potes, utilidades domesticas, masterbach, etc.

Tabela 21: Tabela de Contratipos da OPP [43]

PP	HOMOPOLÍMERO	OPP		POLIBRASIL		CUYO		APLICAÇÃO
			IF		IF	TIPO	IF	
								Peças de paredes grossas.
								Peças de seção espessa, tampas flip-top, eletrodomesticos, brinquedos
				PM 6100	5,5	1100 L	5,0	Peças de seção espessa, tampas flip-top, eletrodomesticos, brinquedos
		H 301	10,0	RM 6100 SM 6100 SM 6100K	8,0 11,0 11,0	1100 N	11,0	Utilidades domesticas, tampas, brinquedos, etc.
		H	12,0					Idem ao H301, com resistência ao impacto superior.
		H 306	15,0	TM 6100R	16,0	1100 P	16,0	Peças de parede fina, utilidades domesticas, tampas e brinquedos.
		H 201 H 206					18,0	Peças de parede fina para utilidades domesticas, brinquedos, tampas com lacre, etc.
		H 202					25,0	Peças de parede fina para utilidades domesticas, brinquedos, tampas com lacre, etc.
				WM 6100K WM 6100P	30,0 30,0			Peças de parede fina.
		PD 701 PD 701	35,0 35,0					Peças de parede fina para utilidades domesticas, brinquedos, tampas com lacre, peças planas, etc.
		PF 945	35,0	PEX 37009	35,0	1100T	37,0	Peças com boa transparência: Utilidades domesticas, tampas transparentes, seringas descartáveis.
		H 103	40,0					Parede fina: UD, tampas, eletrodomesticos, brinquedos, etc.
				KMT 6100 KMT 6900	3,5 3,5	2300 K	4,0	Utilidades domesticas, brinquedos, tampas, moveis. Caixas de baterias, contêineres.
								Engradados, utilidades domesticas, contêineres, etc.
		CP 442	6,0	PEX 28007 PMT 6100	8,0 5,5	2500 MC 2530 MC	8,0 8,0	Caixas de baterias, tampas flip-top, dobradiças integradas, tampas com rosca, etc.
		CP 204 CP 241						Peças de parede fina, tampas, eletrodomesticos, tampas com rosca e flip-top.
		CP 141	45,0			2500 TC	47,0	Peças de parede fina, injeção de ciclo rápido.
								Embalagens com transparência Potes para freezers, utilidades domesticas, embalagens para cosméticos, seringas descartáveis e injection-Blow
								Tampas e potes para freezer, utilidades domesticas, cosméticos, farmacêuticas, etc.

Tabela 22: Tabela de Contratipos da Rutino [44]

	POLITENO			POLIALDEN			DOW/POLISUR			IPIRANGA			OPP			SOLVAY			APLICAÇÃO
		IF	ρ		IF	ρ		IF	ρ		IF	ρ		IF	ρ		IF	ρ	
PEAD										GD 7255LS (2)	4	0,954							Containers, Pallets, Peças Técnicas, Engradados.
	IE 59 U3	5	0,959							GD 7255 LS-L	4	0,954							Containers, Pallets, Peças Técnicas, Engradados.
	IA 59	7,3	0,96							GC7260	8	0,958	HI 865	6,5	0,965	A 2080	8	0,959	Containers, Pallets, Peças Técnicas, Engradados.
										GC 7260 LS (2)	8	0,958							Capacetes, Pallets, Peças Técnicas Injetadas.
	IA 59 U3	7,3	0,96	JV 060U	7	0,957				GC7260 LS (2)	8	0,958	HI 865/UV	6,5	0,965	URA 82	8	0,959	Capacetes, Pallets, Peças Técnicas Injetadas.
				JU 080 U	10	0,957	IP-10262	9,3	0,96										Utilidades domesticas, Brinquedos, Tampas, Embalagens.
	IA 58	22	0,957				HDPE2 5455N	25	0,955	GA 7260	19	0,957				A3180	20	0,955	Peças Técnicas, Utilidades domesticas, Peças de Difícil injeção.
	IB-58	35	0,958				IP-22	23	0,948							A3400	36	0,952	Utilidades domesticas, Potes de Paredes Finas, Tampas.
	Ic-58	45	0,956																Embalagens para Sorvete, Potes para Alimentos.

Tabela 22: Tabela de Contratipos da Rutino [44]

PEBD	OPP			POLITENO			UNION CARBIDE			TRIUNFO			PE UNIÃO			APLICAÇÃO
		IF	ρ		IF	ρ		IF	ρ		IF	ρ		IF	ρ	
	BI 818	7,5	0,918	I-7018	7,0	0,918	0159 D	6,0	0,918	TX 5055	5,5	0,919	UB 2076	7,5	0,919	Utilidades domésticas, brinquedos, pequenas peças.
	PB 203	8,0	0,918										UB 1880	8,0	0,918	
	PB 208	22,0	0,923										UB 2322	22,0	0,923	Peças e tampas rígidas.
	PB 608	30,0	0,915	G-803	30,0	0,918	30 MB 4060 A	30,0 50,0	0,916 0,915	TX 5300	30,0	0,919	UB 1630	30,0	0,916	Tampas, batoques, peças complexas e flexíveis de grande porte.

Tabela 22: Tabela de Contratipos da Rutino [44]

OPP			POLIBRASIL			CUYO			IPIRANGA			APLICAÇÃO
	IF			IF	ρ		IF			IF		
H 103 H 108	40,0 100,0	H H							PH 3515	42,0	H	Utilidades domésticas , brinquedos e eletrodomésticos com parede de seção fina
			HMT 6100	1,5	C	2300 H	2,0	C				Containers, Peças Automobilísticas, Artigos Domésticos
			KMT 6100	3,5	C	2300 K	4,0	C				Utilidades Domésticas, Móveis, Tampas
			KMT 6900	3,5	C							Caixas de Bateria, Containers (maior impacto que KMT 6100)
CP 442	6,0	C	PMT 6100	5,5	C	2530 MC	8,0	C				Utilidades Domésticas, Móveis, Tampas
			PEX 28007	8,0	C	2500 MC	8,0	C				Caixas de Bateria, Containers (maior fluidez)
CP 405	7,0	C			C							Tampas de Refrigerantes Carbonatados
CP 204	20,0	C	VMT 6150 K	23,0	C							Utilidades Domésticas, Peças Automobilísticas, Eletrodomésticos
CP 241	22,0	C	WMV 6170 C	25,0	C							Baldes, Utilidades Domésticas, Eletrodomésticos
CP 141	45,0	C	PEX 18021	45,0	C	2500 TC	47,0	C				Peças de parede fina, injeção de ciclo rápido
RP 347	10,0	R	SRMR 6170	8,0	R	3240 NC	11,0	R				Potes de Utilidade Domésticas com Alta Transparência e Impacto
			RMR 6170	11,0								
			PEX 19002	21,0	R							
RP 141	35,0	R	PRB 2511	25,0	R							Potes de Utilidade Domésticas com Alta Transparência e impacto ciclo rápido

H – Homopolímero

C – Copolímero Bloco

R – Copolímero Randon

ANEXO C: Tratamento dos dados de Viscosidade

Os dados de viscosidade de um polímero são relevantes em uma simulação da moldagem por injeção, pois indica a capacidade de preenchimento de cavidades de um polímero. Considerar a qualidade dos dados experimentais de viscosidade é fundamental – quanto mais precisos forem, representando fielmente a viscosidade de um polímero, melhor serão os resultados previstos – reduzindo, ou eliminando, a diferença entre os resultados simulados e os verificados durante o processamento industrial.

O programa de CAE *Moldflow* aplica um tratamento matemático aos dados experimentais de viscosidade, os interpolando frente a modelos matemáticos de viscosidade, representativo do comportamento reológico do polímero fundido [19].

C1. Modelos Matemáticos de Viscosidade

Os modelos matemáticos de viscosidade, comumente empregado pelo *Moldflow*, são o modelo de primeira e segunda ordem. A principal condição para a escolha de um modelo matemático de viscosidade é representar, com precisão, o real comportamento reológico de um polímero fundido [19]. Além de, não predizer situações irreais em reologia [3].

O modelo da lei das potências ou modelo de primeira ordem é um dos modelos de viscosidade mais utilizados, devido a sua simplicidade e facilidade de obtenção dos dados experimentais [20,24]. Esse modelo matemático está indicado na Equação 33.

$$\mathbf{h} = m \mathbf{g}^{\bullet n-1} \quad (33)$$

onde η - viscosidade; m (consistência), n (índice da lei das potências) - constantes, sendo que n varia entre 0 e 1 para polímeros fundidos e, $\dot{\gamma}$ - taxa de cisalhamento.

O modelo de primeira ordem representa com precisão o comportamento reológico de polímeros fundidos nas regiões de altas taxas de cisalhamento, descrevendo a região linear de queda da viscosidade, importante na descrição do processamento de polímeros, onde são encontrados altos valores de taxas de cisalhamento [19]. A sua principal desvantagem, no entanto, é a má representação do comportamento reológico de polímeros fundidos nas regiões de baixas taxas de cisalhamento [12]. Como a moldagem por injeção está associada a elevadas taxas de cisalhamento, poder-se-ia pensar, neste modelo, como sendo o mais adequado a uma descrição do comportamento viscosimétrico. Contudo, no escoamento de polímero fundidos, a taxa de cisalhamento varia entre um valor mínimo (próximo a zero) e um valor máximo, obrigando a que se recorra ao modelo da lei das potências com algumas reservas, uma vez que este modelo, na região de baixas tensões de cisalhamento, não prevê a região de viscosidade constante [12,20].

O modelo de segunda ordem, ao contrário da Lei das Potências, tem boa precisão quando da previsão do comportamento viscosimétrico na região de baixas taxas de cisalhamento, representando corretamente as demais zonas de cisalhamentos [12]. Esse modelo está indicado na Equação 34:

$$\ln(\mathbf{h}) = A_0 + A_1 \ln(\dot{\mathbf{g}}) + A_2 T + A_3 (\ln \dot{\mathbf{g}})^2 + A_4 T (\ln \dot{\mathbf{g}}) + A_5 T^2 \quad (34)$$

Onde A_n são constantes para um específico polímero, T a temperatura e $\dot{\mathbf{g}}$ a taxa de cisalhamento.

O modelo de segunda ordem é baseado em observações empíricas, sendo aplicável nas seguintes situações de fluxo [19]:

- convergência de curvas de igual taxa de cisalhamento com aumento de temperatura;
- Convergência de curvas isotermas com aumento de taxa de cisalhamento;
- aumento da relação entre redução da viscosidade e aumento da taxa de cisalhamento;
- diminuição da relação entre a redução da viscosidade e aumento da temperatura.

Entretanto, existem algumas desvantagens no uso deste modelo, sendo a principal decorrente do fato dele ser muito flexível, podendo prever situações não praticáveis reologicamente [19]. Por exemplo, quando do aumento da taxa de cisalhamento, ocorrer aumento da viscosidade. A prevenção desse tipo de ocorrência é garantida pela análise dos dados experimentais e o conseqüente desprezo do conjunto de valores irrealis [28]. A Figura 70 apresenta curvas de viscosidade para os modelos de primeira e segunda ordem.

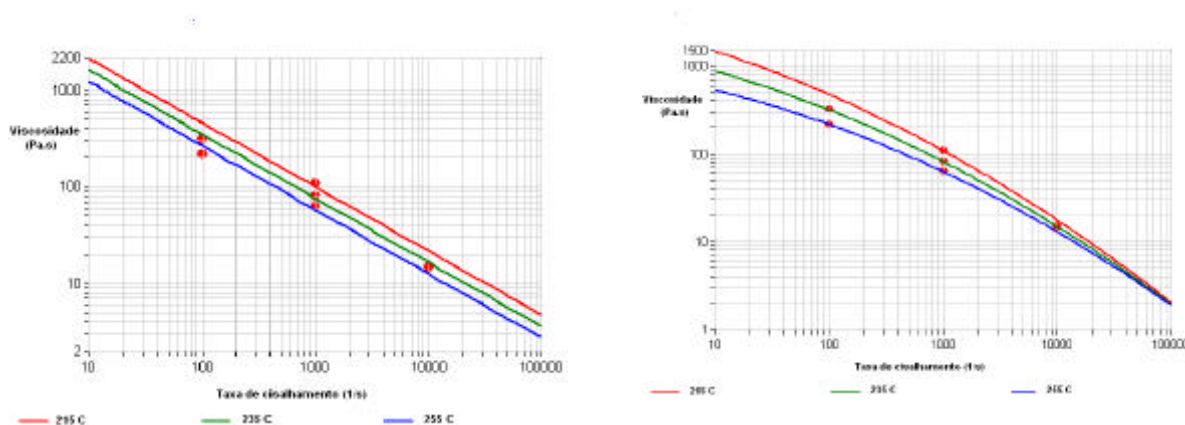


Figura 70: Curvas de viscosidade de termoplásticos ,modelos 1^a e 2^a ordem.

C2. Ajuste dos dados de Viscosidade

Antes da execução do tratamento matemático, os dados práticos de viscosidade obtidos experimentalmente devem ser analisados em relação à existência de incongruências (por

exemplo, na situação de aumento de temperatura ocorrer aumento de viscosidade) que em caso de sua presença, devem ser desconsideradas [24,28,55]. Posteriormente, os dados de viscosidade são compostos em um arquivo tipo (.txt) confeccionado em um editor de texto, de modo a permitir a interface com o Moldflow [24,28,55]. A Tabela 23 exemplifica um arquivo tipo texto com os dados experimentais de viscosidade obtido para o polietileno de alta densidade GA7260 no reômetro do Labmat, UFSC [24].

GA7260 IPQ , 1999

200,122,236
 200,244,194
 200,610,131
 200,1707,87
 200,2195,78
 200,3049,66
 200,3903,57
 200,4756,49
 200,5732,42
 240,244,133
 240,366,116
 240,489,106
 240,732,93
 240,854,90
 240,976,87
 240,2683,59
 240,4756,40
 240,9147,23
 280,122,102
 280,366,87
 280,488,81
 280,610,76
 280,1220,57
 280,3293,37
 280,4878,31
 280,5122,30
 280,9391,19

Tabela 23: Dados experimentais de viscosidade.

O arquivo tipo texto é composto na primeira linha de uma identificação breve do termoplástico em questão e nas linhas seguintes dados de temperatura e taxa de cisalhamento experimental e a correspondente viscosidade medida.

O ajuste dos valores experimentais de viscosidade deve ocorrer ao redor de uma determinada temperatura, a qual pode ser indicada pelo usuário do programa de CAE ou então,

ser definida pelo *software*. Nesta última situação, o *Moldflow* emprega o valor médio das temperaturas onde os ensaios de viscosidade foram efetuados. Para o arquivo (.txt) mostrado na Tabela 23, o valor médio de temperatura é 220 °C.

O ajuste matemático dos dados experimentais aos modelos de viscosidade é aceitável para o uso no *Moldflow*, quando são satisfeitos os critérios de máximos erros entre os valores experimentais de viscosidade e os valores ajustados frente aos modelos matemáticos de viscosidade. O critério para aceite do ajuste matemático é a satisfação de todas as condições previstas a seguir [28]:

- mínimo 80 % dos pontos apresentam erros menores que 10 %;
- máximo 15 % dos pontos apresentam erros superiores a 10 % e menores que 20 % ;
- máximo 5 % dos pontos apresentam erros superiores a 20 % e menores que 30 %;
- nenhum ponto apresenta erro superior a 30 % .

A Tabela 24 apresenta os resultados de viscosidade ajustados ao modelo de segunda ordem para os dados experimentais presentes na Tabela 23.

Avaliando os erros entre os valores de viscosidade ajustados e os valores experimentais, indicados na Tabela 24, verifica-se que:

- 96,3 % dos pontos apresentam erros menores que 10 % (mínimo 80%);
- 3,7 % dos pontos apresentam erros entre 10 % e 20 % (máximo 15 %);
- 0% dos pontos apresentam erros entre 20 % e 30 % (máximo 5 %);
- nenhum ponto apresenta erro superior a 30 %.

Como todas as condições foram satisfeitas, o ajuste dos dados experimentais é aceito.

Caso as condições prévias para o aceite dos resultados de viscosidade não sejam satisfeitas, é necessário realizar nova determinação experimental dos dados de viscosidade pois, provavelmente, os dados experimentais anteriores não são confiáveis.

Tabela 24: Erros entre o valor de viscosidade ajustado e viscosidade experimental.

T (C)	g(1/s)	h(Pa.s) ⁽¹⁾	h (Pa.s) ⁽²⁾	% Erro
200.00	122.00	236.00	223.69	-5.503
200.00	244.00	194.00	192.24	-0.918
200.00	610.00	131.00	142.59	8.130
200.00	1707.00	87.00	89.21	2.472
200.00	2195.00	78.00	77.85	-0.187
200.00	3049.00	66.00	64.34	-2.574
200.00	3903.00	57.00	55.23	-3.201
200.00	4756.00	49.00	48.59	-0.840
200.00	5732.00	42.00	42.85	1.983
240.00	244.00	133.00	132.59	-0.306
240.00	366.00	116.00	119.85	3.212
240.00	489.00	106.00	110.01	3.646
240.00	732.00	93.00	95.84	2.962
240.00	854.00	90.00	90.40	0.441
240.00	976.00	87.00	85.72	-1.498
240.00	2683.00	59.00	53.04	-11.238
240.00	4756.00	40.00	38.05	-5.135
240.00	9147.00	23.00	24.67	6.782
280.00	122.00	102.00	102.58	0.562
280.00	366.00	87.00	86.01	-1.147
280.00	488.00	81.00	79.98	-1.275
280.00	610.00	76.00	75.02	-1.306
280.00	1220.00	57.00	58.94	3.291
280.00	3293.00	37.00	37.31	0.827
280.00	4878.00	31.00	30.02	-3.259
280.00	5122.00	30.00	29.18	-2.810
280.00	9391.00	19.00	19.96	+4.823

(1) Dados experimentais

(2) Dados ajustados frente ao modelo de viscosidade de 2ª ordem.

Um fato relevante a ser considerado, é que os dados ajustados de viscosidade são alcançados através da extrapolação de valores experimentais, obtidos em específicos valores de temperatura, a outros que abranjam todo(s) o(s) fenômeno(s) a ser(em) simulado(s). Ou seja, existe a possibilidade que os valores experimentais de viscosidade tenham sido obtido em determinadas temperaturas que não sejam as mesmas realizadas durante uma simulação.

Exemplificando: se a simulação deve incluir a solidificação do polímero fundido, convém ter-se dados experimentais de viscosidade em temperatura ao redor da sua solidificação, o que

não é possível devido aos seus altos valores. A Figura 71 mostra a extrapolação dos dados de viscosidade para polímeros amorfos e semicristalinos, indicando os dados experimentais de viscosidade obtidos em uma reduzida faixa de temperatura e a previsão, para uma faixa maior de temperaturas, dos comportamentos reais da viscosidade e o previsto através do modelo de segunda ordem [19].

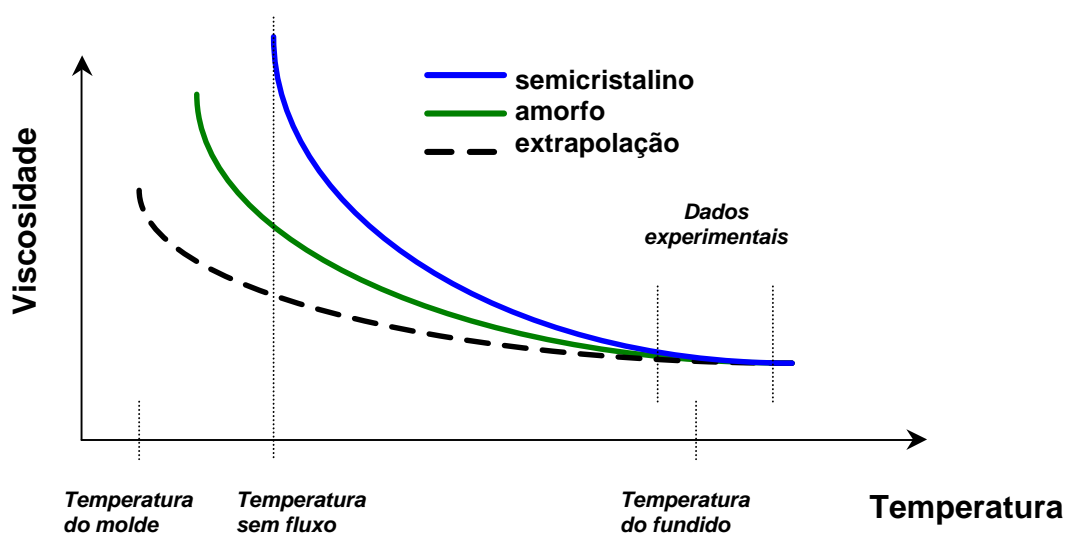


Figura 71: Extrapolação dos dados experimentais de viscosidade [19].

Verifica-se na Figura 71 que:

- a) a discordância entre os resultados de viscosidade previstos para os polímeros semicristalinos via a referida extrapolação e o seu real comportamento é maior em comparação com a apresentada para os polímeros amorfos;
- b) os polímeros semicristalinos apresentam súbita mudança nos valores de viscosidade quando da passagem do estado fundido para o sólido.

Na análise dos dados experimentais, essa mudança torna-se de difícil evidência, já que eles não estão em sua integridade, próximos e/ou dentro da zona crítica: a transição fundido-sólido.

Portanto, a extrapolação dos dados experimentais não terá grande precisão, especialmente para os polímeros semicristalinos.

A solução para esse problema é o conceito da temperatura sem fluxo (*no flow temperature*), discutida anteriormente.

A principal vantagem do emprego do conceito da temperatura sem fluxo é a não dependência de extrapolação, no ponto extremo da curva de viscosidades, em zonas, onde a extrapolação, perante os modelos de viscosidade aplicados, traz grande imprecisão.

Em polímeros amorfos [47], onde é verificado um moderado aumento da viscosidade quando a temperatura diminui, resultados de simulação tanto utilizando o conceito da temperatura sem fluxo como o método de extrapolação, apresentam resultados praticamente idênticos o que não reproduz-se em materiais poliméricos semicristalinos [19].

O método de extrapolação de viscosidades aplicado, na simulação do preenchimento, em peças injetadas, com seção de baixa espessura também apresenta imprecisões. Devido a alta taxa de extração de calor, ocasionada pela baixa espessura, ocorrerá um rápido resfriamento do polímero fundido, de maneira que uma proporção significativa da espessura da cavidade, permanecerá a temperatura abaixo daquela de solidificação. Como a extrapolação de viscosidade é feita em intervalo fora da faixa de dados experimentais, resultará em uma estimativa incorreta do gradiente de pressão ou seja, a viscosidade na zona fria estará subestimada, pois a taxa de extração de calor é alta, acarretando também alta taxa de aumento da viscosidade.

C3– Construção de curvas viscosimétricas à partir das equações ajustadas

Os polímeros disponíveis no banco de dados do Moldflow apresentam dados de viscosidade os quais foram ajustados frente a valores experimentais de acordo com o apresentado

no item C2 - Ajuste dos dados de viscosidades. Estes dados são os termos componentes da equação de primeira e de segunda ordem, conforme o apresentado na Figura 72.

Viscosity Model							
	Def.	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1st Order		6.567490e+004	-6.265090e-001	-9.445330e-003			
2nd Order		1.206460e+001	-6.028620e-001	-1.861610e-002	-1.088550e-002	5.632990e-004	1.173260e-005
Cross							
Cross-WLF							
Carreau							
Matrix							

Figura 72: Dados de viscosidade ajustados frente as equações de primeira e segunda ordem para o PEBD Lupolen 1810 H [Banco de dados do *Moldflow*].

Avaliando a Figura 72 identifica-se a presença dos coeficientes dos termos componentes das equações de viscosidade de 1ª e 2ª ordem. Estes dados permitem ao usuário do programa computacional a confecção das curvas reológicas de um polímero, assim esta pode ser útil ao interessado em simulações do preenchimento de cavidades de acordo com o discutido anteriormente no item 4.2. O *Moldflow* possui, para cada material polimérico disponível no seu banco de dados, os coeficientes das equações matemáticas representativas da variação da viscosidade (η).

De posse das equações matemáticas de viscosidade (η) é possível a construção da curva reológica de um polímero em uma específica temperatura e faixa de valores da taxa de cisalhamento. A sua construção tem as seguintes etapas:

- realizar uma simulação do preenchimento de cavidades em uma específica temperatura de injeção;
- identificar, para a simulação realizada anteriormente, o intervalo das taxas de cisalhamento simulado para o preenchimento. Por exemplo: 10 a 10000 s^{-1} ;
- aplicar na correspondente equação matemática da viscosidade, a faixa de taxas de cisalhamento b) e a temperatura de injeção, obtendo para cada um destes dados, um

valor de viscosidade (η). Esta tarefa pode ser feita em um programa aplicativo tipo tabela eletrônico (*Microsoft Excel*).

- d) de posse dos valores de viscosidade (η), específicos para a temperatura de injeção e valores de taxa de cisalhamento, a curva viscosidade (η) em função da temperatura de injeção e taxa de cisalhamento pode ser construída.

A curva reológica pode ser feita tanto frente ao modelo de primeira ou de segunda ordem.

O autor

Ubiratan Schuch Pinto, natural do Rio Grande do Sul, é graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 1992. Obteve o título de Mestre em Engenharia em 2002, área de atuação Polímeros pela Universidade Federal de Santa Catarina, no departamento Engenharia de Materiais. Já atuou na extrusão de filmes e ráfias para a produção de embalagens flexíveis e também na área de certificação de sistemas de qualidade ISO9000 / ISO14000. Contatos podem ser realizados através dos endereços eletrônicos: usp.bvqi@bol.com.br e/ou schuchpinto@hotmail.com.