

Márcio Toshio Tanaka

**Tentativa de substituição de moldes metálicos para maquina de injeção
polimérica por moldes de menor custo.**

Trabalho de formatura para
Graduação na Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Orientador: Hélio Wiebeck

São Paulo

2005

Índice Geral

| | |
|---|----|
| Índice de Figuras..... | 4 |
| Índice de Tabelas..... | 5 |
| Agradecimentos..... | 6 |
| Dedicatória..... | 7 |
| 1. Objetivo..... | 8 |
| 2. Resumo..... | 9 |
| 3. Revisão Bibliográfica..... | 10 |
| 3.1 Introdução..... | 10 |
| 3.2 Máquinas para Moldagem de Injeção..... | 12 |
| 3.2.1 Ciclo de Injeção..... | 14 |
| 3.2.2 Moldes..... | 15 |
| 3.2.3 Moldes Metálicos..... | 18 |
| 3.3 Definições..... | 20 |
| 3.3.1 Polímeros..... | 20 |
| 3.3.2 Transição Vítreia..... | 20 |
| 3.3.3 Temperatura de Transição Vítreia..... | 21 |
| 3.3.4 Temperatura de Fusão Cristalina..... | 21 |
| 3.3.5 Materiais Compósitos..... | 22 |
| 3.3.6 Compósitos Estruturais..... | 22 |
| 4. Análise da Adaptabilidade do molde..... | 24 |

| | |
|--|----|
| 5. Condições das Condições Mínimas de Parâmetro da Maquina de Injeção..... | 35 |
| 5.1 Cálculo do Tempo de Resfriamento de um Molde..... | 36 |
| 6. Materiais e Métodos..... | 37 |
| 6.1 Fabricação do Molde..... | 37 |
| 6.2 Injeção com Postiço de PA12..... | 40 |
| 6.3 Execução de Testes para Analises Posteriores..... | 41 |
| 7. Resultados e Discussões..... | 42 |
| 7.1 Fabricação do Molde e primeiros testes..... | 42 |
| 7.2 Resultado dos ensaios e testes requisitados..... | 46 |
| 7.3 Analises e discussões aprofundadas..... | 52 |
| 7.3.1 Viabilidade econômica..... | 53 |
| 8. Conclusão..... | 55 |
| 9. Bibliografia..... | 56 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 1: Figura representativa de uma maquina de injeção ^[17] | 11 |
| Fig. 2: Esquema de uma maquina de injeção ^[12] | 13 |
| Fig. 3: Gráfico de um ciclo de injeção ^[12] | 15 |
| Fig. 4: Figura esquemática de um molde ^[14] | 16 |
| Fig. 5: Vista explodida de um molde de injeção ^[14] | 18 |
| Fig. 6: Mapa de Ashby (condutividade por condutividade térmica) ^[13] | 26 |
| Fig. 7: Mapa de Ashby (Deformação a uma determinada temperatura por temperatura) ^[13] | 27 |
| Fig. 8: Mapa de Ashby (coeficiente de expansão linear por condutividade térmica) ^[13] | 29 |
| Fig. 9: Mapa de Ashby (Deformação normalizada por coeficiente de expansão linear) ^[13] | 30 |
| Fig. 10: Diagrama do processo de fabricação do molde polimérico..... | 39 |
| Fig. 11: Representação da maquina de tração..... | 41 |
| Fig. 12: Molde polimérico..... | 43 |
| Fig. 13: Postiço instalado. | 44 |
| Fig. 14: Comparação de peças injetadas (PA12 e metálico)..... | 45 |
| Fig. 15: Resultado ilustrativo apresentado pelo software da maquina de tração..... | 48 |
| Fig. 16: Corpo de prova do grupo 1..... | 48 |
| Fig. 17: Resultado ilustrativo apresentado pelo software da maquina de tração..... | 49 |
| Fig. 18: Corpo de prova do grupo 2. | 49 |
| Fig. 19: Resultado ilustrativo apresentado pelo software da maquina de tração..... | 50 |
| Fig. 20: Corpo de prova do grupo 3. | 50 |

Índice de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Tabela de componentes de um molde..... | 17 |
| Tabela 2: Composição de aços para moldes ^[4] | 19 |
| Tabela 3: Tabela de propriedade dos polímeros..... | 31 |
| Tabela 4: Tabela de resultados do ensaio de tração..... | 47 |

Agradecimentos

Agradeço a todos que colaboraram com o desenvolvimento deste estudo, e em especial à Solidur, empresa que me apoiou e apóia iniciativas empreendedoras como esta que desenvolvi.

E por ultimo, e mais importante, agradeço o professor e orientador, Professor Doutor Helio Wiebeck, que apóia e desenvolve atividades empreendedoras e inovadoras em seu campo de atuação.

Dedicatória:

*Dedico este trabalho de formatura à minha mãe,
irmão e entes queridos e amigos, que muito me apoiaram
nesta jornada e que sempre me apoiarão em futuras.*

1. Objetivo

Este trabalho tem como finalidade desenvolver um molde economicamente viável para máquinas de injeção de polímeros a fim de substituir os atuais moldes metálicos, reduzindo seu custo de modo geral. A tentativa é desenvolver um molde, cuja composição seja proveniente de um compósito ou de um outro material que atenda à necessidade de injeção de artefatos de utilização corriqueira, ou seja, artefatos cujas propriedades não sejam solicitadas ao extremo.

2. Resumo

O conteúdo deste trabalho é direcionado para a tentativa de substituir os moldes metálicos, que atualmente são empregados na indústria de plásticos, por moldes provenientes de materiais de menor custo. E entrelinhas estão os verdadeiros motivos deste estudo que visa desenvolver mercados e diminuir o custo para a indústria brasileira de polímeros.

A pesquisa se inicia com uma breve introdução do histórico dos plásticos, das máquinas de injeção e uma revisão bibliográfica dos principais conceitos empregados neste estudo, como a definição de polímeros, compósitos, máquina de injeção e moldes de injeção.

Em seguida serão analisados e selecionados materiais com potencial para esta aplicação, que em um segundo momento, contou com o apoio da Solidur, empresa de torneamento de polímeros. A parceria compartilhou sua infra-estrutura para torneamento e desenvolvimento do molde.

Todos os procedimentos e métodos estão listados no capítulo *Materiais e Métodos*, bem como ensaios, testes e análises necessários para o discernimento deste estudo.

E por fim, estão os resultados, análises finais, discussões finais e a conclusão desta tentativa.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Introdução

As máquinas de injeção se iniciaram em 1926, com registros de patente por Eckert e Ziegler. Desde então houve uma evolução em todos os componentes deste tipo de maquinário. No Brasil, historicamente, a primeira máquina de injeção de plásticos (manual) foi introduzida há 57 anos no estado de Santa Catarina. Atualmente o processo de moldagem por injeção é responsável pelo processamento de cerca de um sexto de todo o plástico usado no mundo hoje.

Estas máquinas de injeção têm como função aquecer o material a um estado de fluidez, para então conformá-lo em uma cavidade (molde). Uma vez dentro do molde, o material é resfriado e ao final, o material possuirá um formato pré-determinado pelo molde.

O mecanismo para aquecer o material a ser injetado é consistido em forçar uma carga de material plástico por meio de um êmbolo, em uma prensa-cilíndrica aquecida, através de um bocal, até um molde, no qual o material preenche as cavidades ali alojadas. O material frio, granulado ou em pó é alimentado ao cilindro, onde é aquecido até amolecer, ou “plastificar”, para então ser forçado sob pressão (“injetado”) e preencher as cavidades do molde. Após o preenchimento do molde, e sob pressão, o material injetado é resfriado e posteriormente retirado do molde.

A figura a seguir representa um esquema da máquina de injeção:

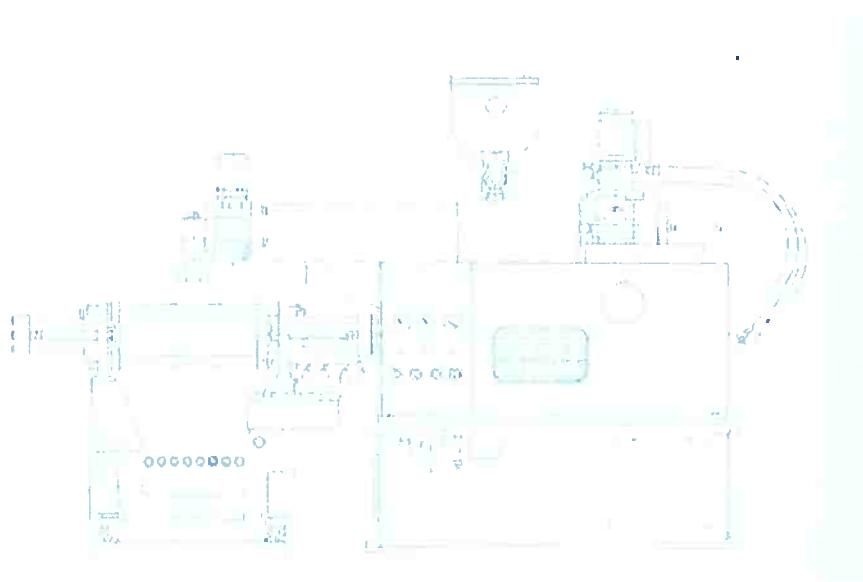


Fig. 1: Figura representativa de uma maquina de injeção^[17]

Os moldes de injeção, atualmente, tem a capacidade de injetar peças de até 1m² ou pesando até 20 Kg. E suas aplicações vão desde objetos simples como brinquedos, utensílios domésticos até componentes complexos próprios da industria de eletrônicos, automobilístico e transporte (caixas, paletes, etc).

3.2 Máquinas de Moldagem por Injeção^[12]

O maquinário para a moldagem é composto por vários componentes e estes possuem uma ampla variedade de equipamentos, em destaque estão as principais variações e seus principais componentes:

Unidade de injeção:

- 1) Maquina de pistão (convencional): o cilindro de injeção pode ser na horizontal e na vertical.
- 2) Maquina com rosca pistão: o acionamento pode ser hidráulico ou elétrico para rotação da rosca.

Unidade de fechamento do molde:

- 1) Cilindro hidráulico para fechamento horizontal.
- 2) Fechamento com articulação: horizontal e vertical.

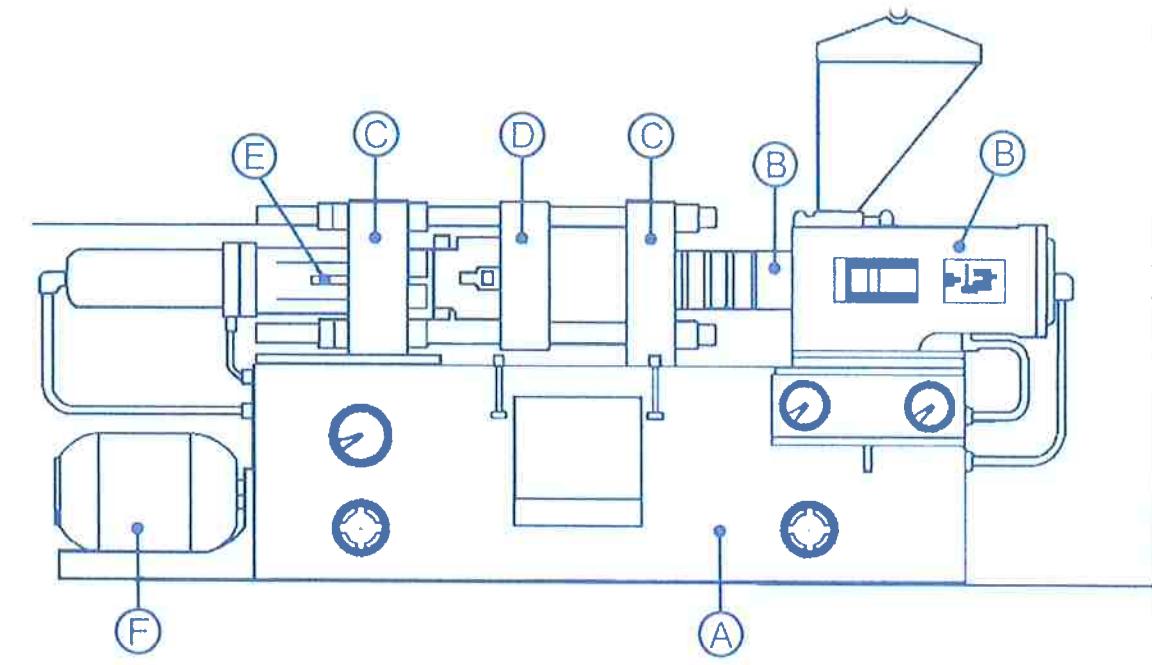


Fig. 2: Esquema de uma maquina de injeção^[12]

Nomenclatura:

- A- Base
- B- Conjunto Injetor
- C- Placas estacionárias ou fixa
- D- Placa móvel
- E- Conjunto de fechamento
- F- Motor e sistema hidráulico

Base: estrutura de forma retangular, que sustenta os demais componentes.

Conjunto injetor: é o componente responsável pela injeção. Este conjunto é composto por êmbolo, plastificador e pré-plastificador.

Placas estacionárias ou fixas: é uma estrutura q serve de apoio para o molde que leva a bucha de injeção. Esta estrutura possui furos ou ranhuras que permitem a fixação do molde e há também um furo central, por onde se alinha o anel de centragem do molde, garantindo alinhamento do molde com o bico de injeção.

Placa móvel: é um componente que serve de apoio para o molde e é por onde se situa o sistema de extração. Esta placa é móvel e acompanha o movimento de fechamento do molde.

Conjunto de fechamento: é o conjunto responsável pelo fechamento ou abertura do molde. Nele se encontra um sistema, em geral, hidráulico para uma automatização do sistema de fechamento do molde.

Motor e sistema hidráulico: estes fazem parte do conjunto de equipamentos que originarão todos os movimentos da maquina injetora. O sistema hidráulico é composto por êmbolo de fechamento, de injeção, came, válvula de inversão, de acionamento do came, de retenção, bomba, reservatório de óleo hidráulico, e válvula redutora de pressão.

3.2.1 Ciclo de injeção

O ciclo de injeção é o intervalo total de tempo entre o instante em que o molde se fecha durante o ciclo e o período correspondente em que ele se encerra no ciclo seguinte. O ciclo total é a soma do tempo do ciclo da maquina mais o tempo que o operador leva pra abrir a porta, retirar a peça, e fechar a porta. O ciclo da maquina começa quando o operador fecha a porta que ativa o fechamento do molde. As operações que se seguem ocorrem automaticamente (fechamento do molde, injeção, resfriamento da peça e abertura do molde).

Normalmente, deseja-se obter ciclos de injeção curtos. O custo operacional por hora de uma máquina injetora é constante e, portanto, os ciclos mais rápidos renderão peças de menor custo. Entretanto, ciclos muito curtos podem ter como conseqüência, maior numero de peças defeituosas.

Em muitos casos, utiliza-se água a baixa temperatura para resfriar os moldes, a fim de obter ciclos mais rápidos. Esta é uma pratica corrente, porem deve-se tomar o cuidado de trabalhar com o molde a uma temperatura não muito baixa, pois caso contrario, pode ocorrer peças tensionadas, quebradiças e superfícies sem brilho.

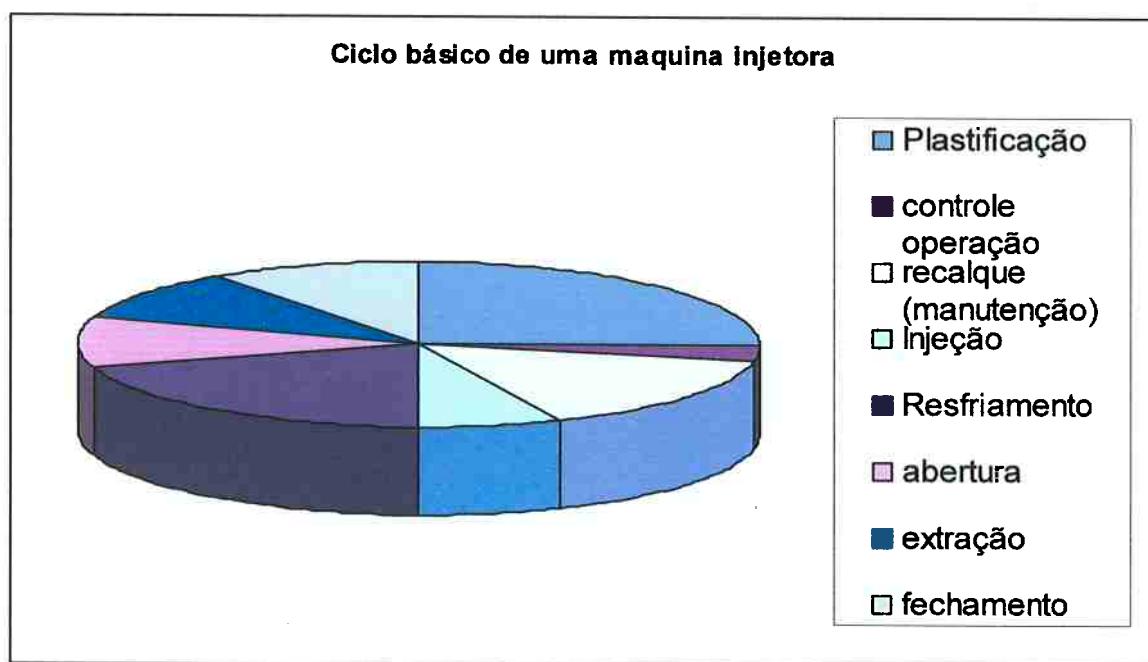


Fig. 3: Gráfico de um ciclo de injeção^[12]

3.2.2 Molde^[14]

O molde de injeção é a unidade completa com condições de produzir peças moldadas. Suas cavidades possuem as formas e as dimensões da peça desejada. O molde é adaptado ao final da máquina de injeção e recebe, em sua cavidade o material plástico fundido, introduzido por meio de pressão.

A constituição de um molde segue o princípio típico de montagem, com estrutura semelhante à figura a seguir.

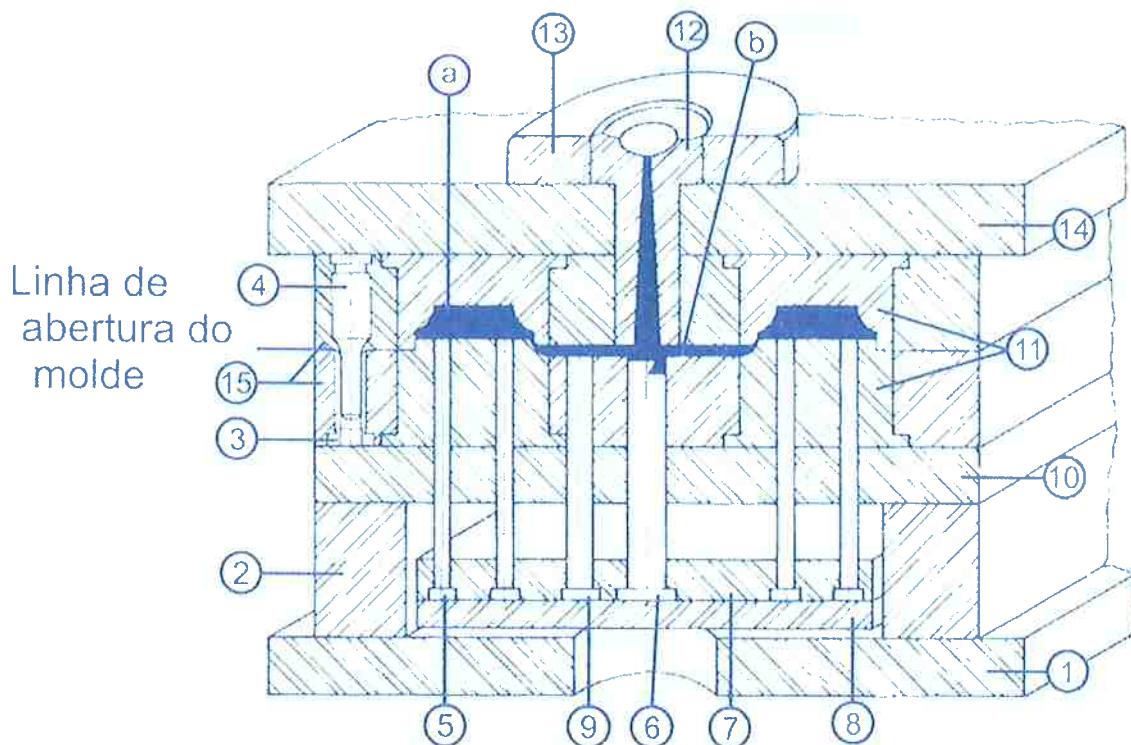


Fig. 4: Figura esquemática de um molde^[14]

- 1) Placas de fixação inferior
- 2) Coluna ou Espaçador
- 3) Bucha-guia

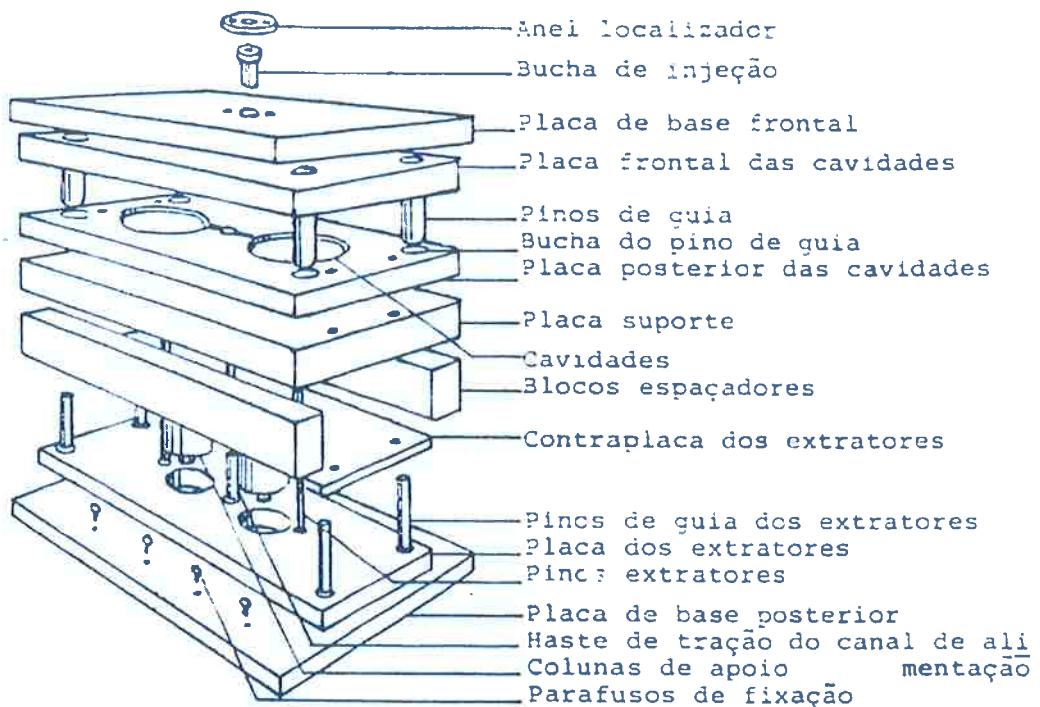
- 4) Coluna-guia
- 5) Pino extrator
- 6) Extrator de canal
- 7) Placa porta-extratores
- 8) Placa impulsionadora
- 9) Pino de retorno
- 10) Placa-suporte
- 11) Postiços
- 12) Bucha de injeção
- 13) Anel de centragem
- 14) Placa de fixação superior
- 15) Placa de montagem de postiço
 - a) Cavidade
 - b) Canal de distribuição

Tabela de características dos componentes do molde

| Componentes do molde | Características |
|-----------------------------|--|
| Base do molde (1 e 14) | Mantém a cavidade. |
| Pino guia (4) | Mantém o alinhamento entre as duas metades do molde |
| Bucha de injeção (12) | Controla a entrada do material para a parte interna do molde. |
| Canais (6) | Controlam a passagem do material desde o bico até a cavidade |
| Entradas | Controlam a entrada do material na cavidade |
| Cavidades e macho (11) | Controlam o tamanho, a forma e a superfície da peça. |
| Sistema de refrigeração | Controla a temperatura das superfícies do molde para solidificar o |

| | material |
|----------------------------------|--|
| Gaveta, pino e lateral | Formam os furos, rasgos, rebaixos e roscas do produto final |
| Saídas | Permitem a saída de gás e ar |
| Mecanismo de extração (6,7,8) | Extrai a peça rígida da cavidade |
| Pino de retorno (9) | Retornam os extratores à posição inicial quando o molde se fecha para o próximo ciclo. |

Tabela 1: Tabela de componentes de um molde.



- Vista explodida de um molde de injeção típico, de duas placas.

fig. 5: Vista explodida de um molde de injeção^[14]

3.2.3 Moldes metálicos

Os aços destinados para moldes e matrizes têm como principais características a usinabilidade, em função de gravuras profundas e fabricação em geral; resistência uniforme para a deformação durante o processo de injeção e fechamento dos moldes seja uniforme; polibilidade para se obter superfícies transparentes; soldabilidade para facilitar a modificação de gravuras e relevos do produto; condutividade térmica para extração de calor do polímero injetado. Em destaque estão as composições dos aços mais utilizados pela Aços Villares.

Aços para moldes da **linha VP20**

1- VP20ISO similar na norma W.NR ao 1.2738 mod com a seguinte composição média:

| | | | | | | |
|----------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Elemento | C 0,36 | Mn 1,60 | Cr 1,80 | Mo 0,20 | Ni 0,70 | % em peso |
|----------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|

2- VP20ISO-F similar na norma W.NR ao 1.2311 com a seguinte composição média:

| | | | | | | |
|----------|--------|---------|---------|---------|--|-----------|
| Elemento | C 0,36 | Mn 1,60 | Cr 1,80 | Mo 0,20 | | % em peso |
|----------|--------|---------|---------|---------|--|-----------|

3- VP20ISO-FS similar na norma W.NR ao 1.2312 com a seguinte composição média:

| | | | | | | |
|----------|--------|---------|---------|---------|--------|-----------|
| Elemento | C 0,36 | Mn 1,60 | Cr 1,80 | Mo 0,20 | S 0,06 | % em peso |
|----------|--------|---------|---------|---------|--------|-----------|

4- VP20IM similar na norma W.NR ao 1.2738 com a seguinte composição média:

| | | | | | | |
|----------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Elemento | C 0,36 | Mn 1,30 | Cr 1,80 | Mo 0,20 | Ni 1,00 | % em peso |
|----------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------|

Tabela 2: Composição de aços para moldes^[4]

Para todas as linhas de aços, o complemento mais importante é o tratamento térmico que permite alterar a estrutura do material depois de operações mecânicas como forjamento e laminação, trefilação a frio e a quente, usinagem, soldas de recuperação, para aumentar e diminuir as durezas ou, em outras palavras, tratamentos que colocam o aço na condição de

trabalho para o qual foi fabricado. Um aço, após deformação a quente de forjamento ou laminação, apresenta estrutura grosseira e mista, em função de seu resfriamento em geral irregular, próprio desses processos, e com dureza elevada que dificulta operações posteriores, como endireitamento, usinagem, acabamento etc. Nessas condições, o material deve sofrer um tratamento conhecido como recozimento, que visa homogeneizar sua estrutura interna, reduzindo sua dureza e permitindo uma boa usinabilidade e acabamento.

Com o aço, agora recozido e mole, o passo seguinte é sua usinagem para a fabricação das peças que, prontas, devem ser tratadas termicamente, ou seja, ter o aço endurecido, para que possa ficar em condições de ser utilizado. Este tratamento térmico é conhecido como têmpera, seguido obrigatoriamente de um revestimento que deixará as peças com dureza na ordem de 45 a 50 HRC.

3.3 Definições^[14]

3.3.1 Polímero

Os polímeros são compostos químicos de elevada massa molecular relativa, resultantes de reações químicas de polimerização. Estes contêm os mesmos elementos nas mesmas proporções relativas, mas em maior quantidade absoluta. Os polímeros são macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais pequenas (os monômeros). Ao número de unidades estruturais repetidas, numa macromolécula é chamado grau de polimerização^[15].

3.3.2 Transição Vítreia

É a mudança reversível em polímeros amorfos ou em regiões amorfas de um polímero parcialmente cristalino. Também pode ser definido através de uma condição viscosa ou elastomérica para uma condição dura ou relativamente frágil e vice-versa. A condição de transição vítreia ocorre em uma faixa relativamente estreita de temperatura, e obviamente à temperaturas mais baixas que a transição principal.

3.3.3 Temperatura de transição vítreia

A temperatura de transição vítreia é geralmente definida como a temperatura abaixo da qual o movimento dos segmentos de cadeia é congelado (bloqueado). Acima dessa temperatura há energia suficiente para permitir movimentos e ondulações nas cadeias do polímero.

3.3.4 Temperatura de fusão cristalina

A temperatura de fusão cristalina (teoricamente) a temperatura mais alta na qual os cristais poliméricos podem existir. A definição dessa temperatura só tem significado para materiais altamente cristalinos, e é obtida com decomposição da estrutura cristalina.

No caso dos polímeros com baixo grau de cristalinidade, o processo de fusão se estende sobre uma estreita faixa de temperaturas. Neste caso não se fala em temperatura de fusão, mas sim em uma faixa ou intervalo de fusão.

3.3.5 Materiais compósitos^[3]

Podem-se definir materiais compósitos como materiais formados de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades e que estão separados por uma interface. O objetivo principal de se produzir compósitos é o de combinar diferentes materiais para produzir um único dispositivo com propriedades superiores às dos componentes unitários. O comportamento estrutural de um material compósito é governado não apenas pela geometria e tipo de carregamento, mas também pelas propriedades dos materiais. A combinação dos materiais é decidida de acordo com a necessidade da estrutura e a relativa importância de várias propriedades tais como: força, resistência a corrosão, rigidez, peso, resistência a fadiga, expansão térmica, propriedades eletromagnéticas, condutividade térmica, isolamento acústico, dureza e estética. Contudo, a combinação dos materiais é decidida a partir de sua aplicação específica. Durante os últimos vinte anos, foi observado um substancial desenvolvimento destes materiais para aplicações estruturais, sendo que a principal motivação foi a possibilidade de se produzir compósitos com baixa massa específica (~2 g/cm³) aliada a alta resistência mecânica (~500 MPa) que potencialmente poderiam substituir materiais usualmente utilizados como o aço e a madeira.

3.3.6 Compósitos estruturais^[3]

Um compósito estrutural é um sistema material constituído de duas ou mais fases na escala macroscópica, cuja performance mecânica e propriedades são escolhidas para que os materiais constituintes atuem independentemente. Uma destas fases normalmente é descontínua,

rígida, e mais forte, e esta fase é chamada reforço, enquanto que a fase mais fraca é contínua e chamada matriz. Algumas vezes, por causa da interação química ou outros efeitos de processo, uma fase adicional, chamada interfase, existe entre o reforço e a matriz. As propriedades de um material compósito dependem das propriedades dos constituintes, geometria e distribuição das fases. Um dos mais importantes parâmetros é a fração volumétrica (ou peso) do reforço ou a taxa de volume da fibra. A distribuição do reforço determina a homogeneidade ou uniformidade do sistema material. Quanto menos uniforme é a distribuição do reforço mais heterogêneo é o material e mais alta é a probabilidade de falha nas áreas mais fracas. As fases do sistema compósito têm diferentes funções que à média performance do material compósito, o reforço, normalmente na forma de pequenas fibras ou partículas, propiciam alguma rigidez, somente nas tensões localizadas. As características marcantes das fibras são altas resistência e rigidez aliadas a baixa massa específica. Outra importante propriedade das fibras, relacionada com a resistência e rigidez, é a deformação total até a ruptura, ou ductilidade, pois esta influencia bastante na resistência do compósito laminado.

4. Analise da adaptabilidade do molde

Com objetivo de diminuir o custo unitário do molde e facilitar a fabricação do mesmo, tem-se a tentativa de substituir o molde metálico por um mesmo constituído de compósito ou propriamente de polímero.

A fim de estudar a viabilidade deste tipo de substituição é necessário conhecer quais são os quesitos básicos e propriedades necessárias para o material empregado na fabricação de um molde. Características como resistência uniforme, condutividade térmica, baixa dilatação, baixa variação destas propriedades com relação à temperatura e material inerte são algumas das características fundamentais. A estratégia para reunir as características do polímero a ser empregado na construção do molde devem ser baseadas nas condições de trabalho e nas características do polímero a ser injetado.

O polímero injetado será baseado nos termoplásticos mais utilizados pela indústria e que são classificados como polímeros de uso comum, como é o caso do polietileno de alta densidade (PEAD), além de este ser fácil de moldar e conformar. Para tanto serão utilizados, neste capítulo, os mapas de Ashby para avaliar quais serão os grupos que tem potencial para atuar como constituinte do molde.

A temperatura é um fator crucial, pois os polímeros, em geral, tem baixa temperatura de trabalho e condutividade térmica ruim, se comparado com os metais. Além disto, a classe dos polímeros tem alterações consideráveis de comportamento mecânico conforme a temperatura varia. E a chave para a seleção do material é se basear em escolher um material com propriedades superiores ao polímero injetado.

A condutividade térmica deve ser a melhor possível, uma vez que uma rápida solidificação significa menor tempo de ciclo de injeção. No entanto, entre o molde e o polímero injetado, apenas o último pode ter o privilégio de possuir uma condutividade pior, pois, caso contrário, isto pode acarretar em problemas como rebarba de peça, deformação ou contração excessiva ou até manchas de queimado.

Como exemplo, através do mapa de Ashby (condutividade-difusividade). As linhas tracejadas indicam os níveis para o calor por volume específico, e neste caso, o volume específico pode ser representado por maior concentração de moléculas ou átomos em determinado volume. Ora, isto também implica, caso os materiais sejam sintéticos, em maior energia para fabricá-los e, portanto maior custo. Lembrando-se dos quesitos básicos para compreensão do problema, não se podem escolher matérias puramente cerâmicas simplesmente por possuírem uma condutividade térmica próxima a dos metais, pois os cerâmicos possuem tenacidade extremamente baixa, o que acarretaria em fratura no primeiro impacto/fechamento do sistema de injeção. Portanto, na escala destes grupos, restam os polímeros e os compósitos.

Um ponto importante a ser observado no mapa é a região em que se encontra o PEAD. Pois este ponto é a referência para excluir materiais que estão abaixo dele, já que estes apresentam condutividade pior. O fato de escolher materiais abaixo deste ponto pode implicar em danos no molde devido a fragilização que poderia ocorrer devido as solicitações mecânicas e térmicas.

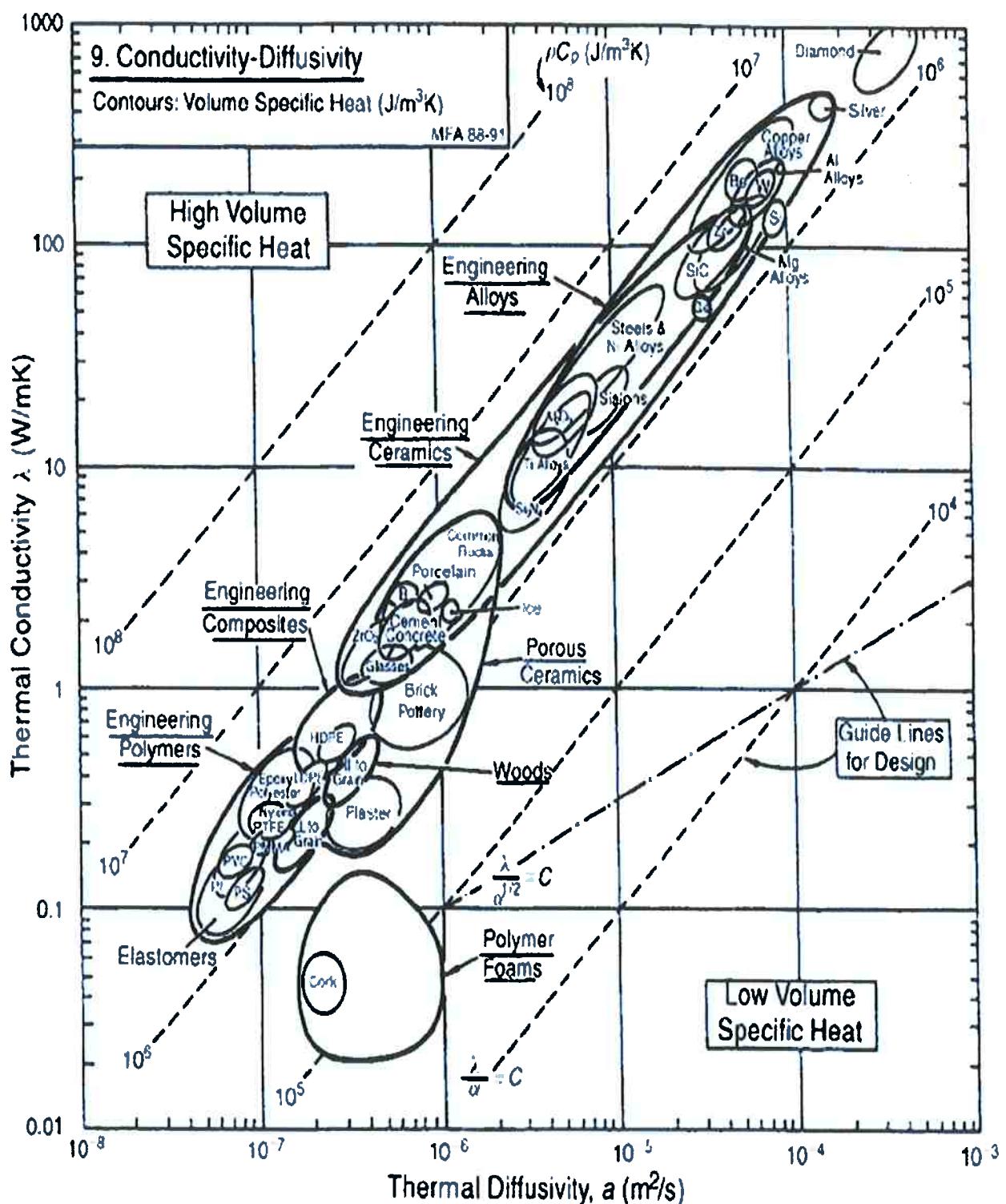


Fig. 6: Mapa de Ashby (condutividade por condutividade térmica)^[13]

O mesmo ocorre com as tensões solicitadas durante o ciclo de injeção, por parte da peça injetada. Conforme ocorre o resfriamento da peça, o molde deve comportar-se de forma a não prejudicar as contrações da peça e muito menos criar peças com tensões residuais, podendo causar peças deformadas, erro de dimensão, rachaduras e rechupes. A seguir o mapa de Ashby de resistência à tensão a uma determinada temperatura por temperatura:

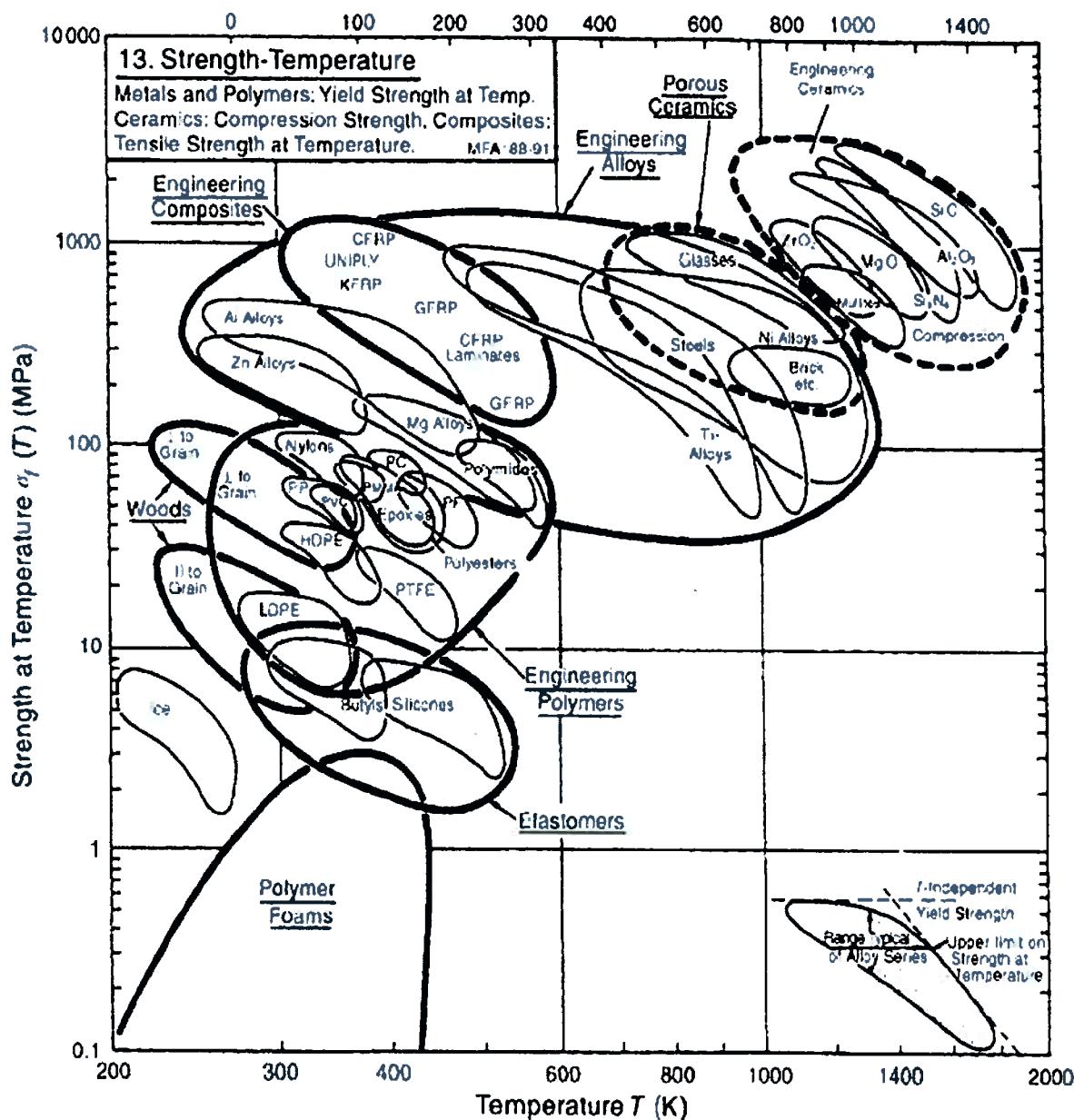


Fig. 7: Mapa de Ashby (Deformação a uma determinada temperatura por temperatura)^[13]

Este mapa traduz a necessidade de se observar o comportamento dos materiais em termos de resistência mecânica em função da temperatura. O molde deve possuir uma resistência mecânica maior que o PEAD, uma vez que a peça a ser conformada mecanicamente é o próprio PEAD. Portanto observando apenas as posições verticais, todos os materiais acima do PEAD são candidatos. O eixo vertical é a representação da resistência variando conforme a temperatura. Certamente, os materiais que estão à esquerda do PEAD estão excluídos pelo mesmo motivo, pois independente da temperatura, a resistência mecânica deve ser maior no molde.

O estudo da resistência revela outro fator critico a ser analisado é a dilatação em função da temperatura, já que não basta o material ser resistente e dilatar com uma variação pequena de temperatura. Para isto, abaixo está o mapa de coeficiente de expansão por condutividade. Condutividade? Não seria temperatura?

A resposta para esta pergunta é não. A variação de temperatura é consequência da condutividade, neste caso, o material injetado deve ser resfriado. O resfriamento é feito através da condutividade (coeficiente de expansão linear). Portanto ao analisar a dilatação em função da condutividade, implicitamente, a temperatura será seguramente analisada em segundo plano.

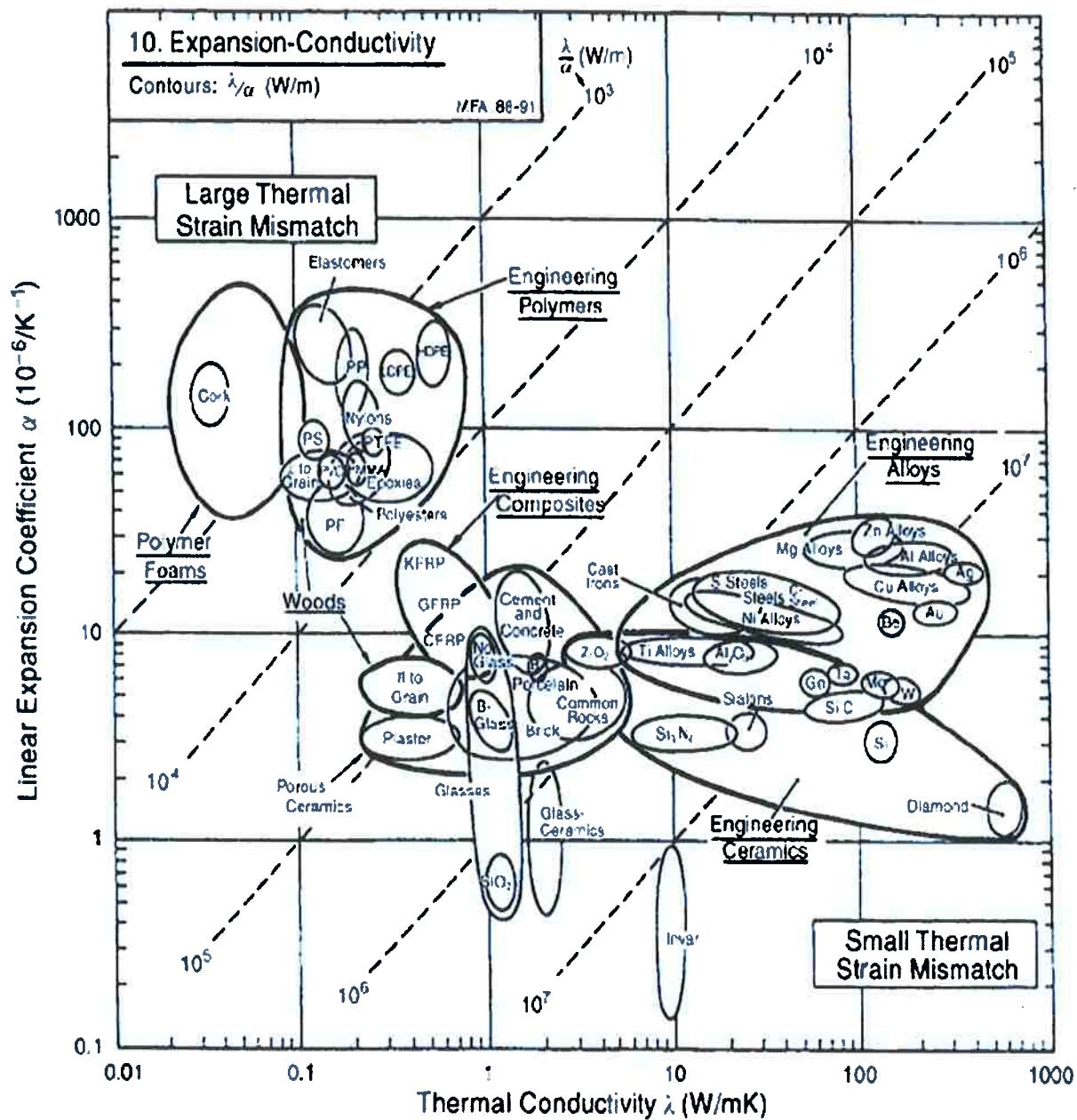


Fig. 8: Mapa de Ashby (coeficiente de expansão linear por condutividade térmica)^[13]

No caso do molde/material injetado, o PEAD encontra à direita do PP. E todos os materiais à sua esquerda são considerados candidatos, pois a deformação em função da condutividade deve ser obrigatoriamente maior no PEAD do que no molde.

O estudo de choque térmico em função da deformação também é importante. O choque térmico pode causar tensões indesejáveis causando possíveis problemas já vistos em itens anteriores. Através do mapa de Ashby de tensão normalizada por coeficiente de expansão linear pode-se observar quais são os grupos e que estes são semelhantes ao já encontrados anteriormente.

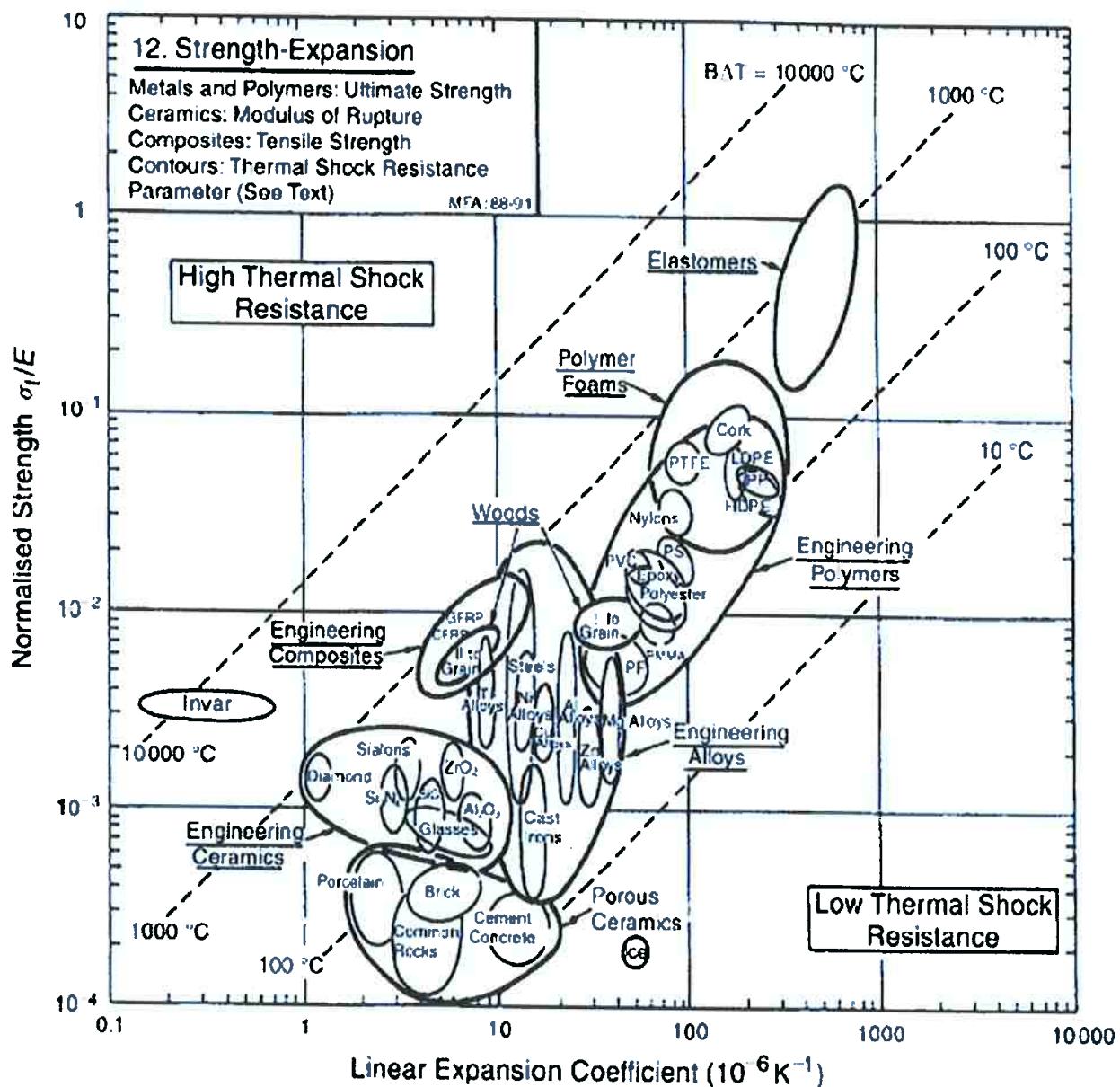


Fig. 9: Mapa de Ashby (Deformação normalizada por coeficiente de expansão linear)^[13]

Portanto através do estudo dos mapas de Ashby, os grupos já foram selecionados. Restando alguns polímeros e a classe de compósitos. No entanto, fatores limitantes como a falta de recursos para adquirir matéria-prima e principalmente de processar materiais compósitos, levam a outra opção, polímeros.

Com o apoio da empresa Solidur, que se comprometeu a fabricar e fornecer matéria-prima, algumas opções reais de molde foram oferecidas, reduzindo ainda mais as possibilidades de escolha. A suas composições estão tabeladas a seguir:

| | PA 12 - Polyamide 12 | PBT - POLYBUTYLENE TERPHTHALATE | PEEK - Polyetheretherketone | PTFE - Polytetrafluoroethylene | PE UHMW - POLYETHYLENE ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT | PPS - Polyphenylene Sulfide |
|---|-------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| Property | Value | Value | Value | Value | Value | Value |
| Dimensional stability | | | | | | |
| Coefficient of linear thermal expansion | 9 - 15 10^-5 °C-1 | 6 - 10 10^-5 °C-1 | 4.7 - 10.8 10^-5 °C-1 | 7 - 20 10^-5 °C-1 | 13 - 20 10^-5 °C-1 | 3 - 5 10^-5 °C-1 |
| H ₂ O absorption 24 hours | 0.2 - 1.9 % | 0.1 - 0.2 % | 0.1 - 0.5 % | 0.005 - 0.01 % | 0.005 - 0.01 % | 0.01 - 0.07 % |
| Shrinkage | 0.7 - 1.5 % | 0.5 - 2.2 % | 1.2 - 1.5 % | 3 - 6 % | 4 % | 0.6 - 1.4 % |
| Electrical performances | | | | | | |
| Arc resistance | 100 - 180 sec | 124 - 190 sec | 40 sec | 200 - 300 sec | | 124 sec |
| Dielectric constant | 3 - 9 | 2.9 - 4 | 3.2 | 2.1 | 2.3 | 3 - 3.3 |
| Dielectric rigidity | 7 - 30 kv/mm | 15 - 30 kv/mm | 20 kv/mm | 17 - 24 kv/mm | 28 kv/mm | 11 - 24 kv/mm |
| Dissipation factor | 3 - 2000 10^-4 | 10 - 200 10^-4 | 30 10^-4 | 2 10^-4 | 2 10^-4 | 4 - 30 10^-4 |
| Volume resistivity | 14 - 15 10^X Ohm.cm | 14 - 17 10^X Ohm.cm | 16 - 17 10^X Ohm.cm | 17 - 18 10^X Ohm.cm | 16 - 17 10^X Ohm.cm | 15 - 16 10^X Ohm.cm |
| Fire performances | | | | | | |
| Fire resistance (LOI) | 21 - 26 % | 20 - 24 % | 24 - 35 % | 95 - 96 % | 17 - 18 % | 43 - 47 % |
| Flammability | V2 e HB | HB | V0 | V0 | HB | V0 |

| UL94 | | | | | | |
|---|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------|
| Mechanical properties | | | | | | |
| Elongation at break | 30 - 400 % | 5 - 300 % | 30 - 150 % | 200 - 400 % | 200 - 500 % | 1 - 4 % |
| Elongation at yield | 5 - 42 % | 3.5 - 9 % | 5 % | | | 1 - 4 % |
| Flexibility (Flexural Modulus) | 0.4 - 1.6 GPa | 2 - 4 GPa | 3.7 - 4 GPa | 0.4 - 0.8 GPa | 0.45 - 0.6 GPa | 3.8 - 4.2 GPa |
| Hardness Rockwell M | 1 - 25 | 70 - 90 | 55 - 100 | 1 | 1 | 70 - 85 |
| Hardness Shore D | 58 - 75 | 90 - 95 | 85 - 95 | 50 - 65 | 60 - 70 | 90 - 95 |
| Stiffness (Flexural Modulus) | 0.4 - 1.6 GPa | 2 - 4 GPa | 3.7 - 4 GPa | 0.4 - 0.8 GPa | 0.45 - 0.6 GPa | 3.8 - 4.2 GPa |
| Strength at break (tensile) | 50 - 65 MPa | 40 - 50 MPa | 90 - 150 MPa | 0 - 10 MPa | 39 - 49 MPa | 50 - 80 MPa |
| Strength at yield (tensile) | 50 - 65 MPa | | 90 - 110 MPa | 9 - 30 MPa | 20 - 25 MPa | 50 - 80 MPa |
| Toughness (Notched Izod impact at room temperature) | 70 - 999 J/m | 27 - 999 J/m | 80 - 94 J/m | 160 - 200 J/m | 999 J/m | 5 - 25 J/m |
| Toughness at low T (Notched Izod impact at low temperature) | 21 - 110 J/m | 27 - 120 J/m | | 80 J/m | | |
| Young modulus | 0.4 - 1 GPa | 2 - 3 GPa | 3.5 - 3.9 GPa | 0.4 - 0.8 GPa | 0.3 - 0.6 GPa | 3.3 - 4 GPa |
| Physical properties | | | | | | |
| Density | 1.01 - 1.06 g/cm^3 | 1.3 - 1.4 g/cm^3 | 1.26 - 1.32 g/cm^3 | 2.1 - 2.2 g/cm^3 | 0.93 - 0.95 g/cm^3 | 1.35 g/cm^3 |
| Glass transition temperature | -70 °C | 55 - 65 °C | 140 - 145 °C | | | 88 - 93 °C |

| | PA 12 - Polyamide 12 | PBT - POLYBUTYLENE TERPHthalATE | PEEK - Polyetheretherketone | PTFE - Polytetrafluoroeth ylene | PE UHMW - POLYETHYLENE ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT | PPS - Polyphenylene Sulfide |
|---|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| Property | Value | Value | Value | Value | Value | Value |
| Radiation resistance | | | | | | |
| Gamma radiation resistance | Fair | Good | Excellent | Good | Fair | Good |
| UV light resistance | Fair | Fair | Good | Good | Fair | Good |
| Service temperature | | | | | | |
| Ductile/fragile temperature | -120 -- 70 °C | -40 °C | -65 -- 60 °C | -200 °C | | |
| HDT @0.46 Mpa (67 psi) | 130 - 155 °C | 115 - 150 °C | | 70 - 120 °C | 115 - 150 °C | 140 - 160 °C |
| HDT @1.8 Mpa (261 psi) | 40 - 60 °C | 50 - 85 °C | 150 - 160 °C | 45 - 50 °C | 50 - 85 °C | 100 - 135 °C |
| Max continuous Service temperature | 80 - 150 °C | 80 - 140 °C | 154 - 260 °C | 260 - 290 °C | 80 - 140 °C | 200 - 220 °C |
| Min continuous service temperature | -120 -- 70 °C | -40 °C | -65 -- 70 °C | -200 °C | -40 °C | |
| Others | | | | | | |
| Thermal insulation (Thermal conductivity) | 0.33 W/m.K | 0.21 W/m.K | 0.25 W/m.K | 0.24 W/m.K | 0.21 W/m.K | 0.29 - 0.32 W/m.K |

Tabela 3: Tabela de propriedade dos polímeros

Com base nos estudos anteriores e adjacente à tabela, gentilmente oferecida pela SOLIDUR, o material selecionado será a poliamida12, que além de todos os critérios já vistos, a temperatura de trabalho é favorável, apresentando condições de máxima de trabalho em torno de 260 a 290°C. O material selecionado foi uma das poucas opções reais oferecidas pela Solidur, e tendo em vista a dificuldade de encontrar material para este estudo, esta opção (PA12) será a escolhida.

Desta forma o estudo de seleção de materiais é superficialmente completo, restando a solução de materiais compósitos como possível estudo futuro, além de casos mais complexos de molde, onde há a necessidade de maior enfoque em resistência a tensões e de contrações conforme a temperatura.

5. Analise das condições mínimas de parâmetro para a maquina de injeção

Para dar discernimento a este estudo, deve se ter em mente quais são as condições suficientes para validar a utilização do molde a ser desenvolvido. Estas condições são, basicamente, os pontos mais importantes para que a maquina de injeção opere em um nível de trabalho tolerável para o molde em questão.

A priori, serão feitos testes na maquina de injeção do departamento de materiais no laboratório de polímeros e compósitos. E o material a ser injetado será o polietileno de alta densidade (PEAD), devido ao seu uso comum na industria.

A seguir estão alguns parâmetros utilizados pela maquina de injeção:

- 1) Temperatura de injeção: 180°C (temperatura do polímero imediatamente antes de ser injetado na matriz)
- 2) Temperatura do liquido de resfriamento do molde: 24°C (água).
- 3) Diferença de nivelamento do postiço: 1,4 mm

O parâmetro ciclo de injeção e tempo de fechamento para resfriamento do produto estão relacionados com a capacidade de condução de calor do material do novo molde. Este assunto exige um estudo mais detalhado e será discutido a seguir.

5.1 Cálculo do tempo de resfriamento do molde

O tempo de resfriamento da peça produzida está intimamente ligado ao fenômeno de transporte de calor em meio sólido, a capacidade do molde e do material injetado de conduzir calor.

Inicialmente, tem-se a formula simplificada¹⁴:

$$\Theta = - \frac{t^2}{2\pi\alpha} \ln \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{t_d - t_m}{t_i - t_m} \right) \right] \quad [\text{s}]$$

Θ : tempo requerido para resfriamento

α : difusividade térmica do material (mm^2/s)

t : espessura do moldado (mm)

t_d : temperatura de distorção do plástico ($^\circ\text{C}$)

t_i : temperatura de injeção ($^\circ\text{C}$)

t_m : temperatura do molde ($^\circ\text{C}$)

Os dados para o PEAD foram extraídos da literatura:

$$\alpha = 0,086 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$t = 5 \text{ mm}$$

$$t_d = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_i = 180 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_m = 29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Portanto $\Theta = 19,13 \text{ s.}$

6. Materiais e métodos

Os materiais utilizados neste estudo são:

- Água (aprox. 450L) : para resfriamento do molde.
- Polietileno de alta densidade (0,7kg) : utilizado como material injetado.
- Poliamida 12 (aproximadamente 1kg) : utilizado na fabricação do molde.

Os métodos empregados tanto para fabricação do molde, como para seu estudo estão apresentados em tópicos e numerados em ordem cronológica conforme a decorrência dos fatos.

6.1 Fabricação do molde

A fabricação do molde foi feita integralmente pela Solidur, desde a aquisição do tarugo de PA12, até a usinagem e acabamento do molde. *“O tarugo requer comentários, pois foi concebido através de um método peculiar, onde a reação de polimerização ocorre em um slot fechado e através de deposição sob altapressão. Com isso, o tarugo, em comparação com métodos convencionais, ganha em propriedades mecânicas, uma vez que as cadeias são supercondensadas em um volume menor. Além de propriedades mecânicas, a Temperatura de transição vítreia é alterada. ”* (Frase citada pelo Fabio Nader Azar, funcionário da Solidur)

Os procedimentos de fabricação foram os seguintes:

- 1) Diagramação: etapa que consiste em estudar o modo mais econômico de se tornear a peça, pois o principal custo envolvido é o custo por hora de um torneiro mecânico, além de utilização das máquinas de torneamento.
- 2) Dimensionamento: dimensionar o formato do postigo, tendo como base o postigo metálico que foi extraído da máquina de injeção em estudo.
- 3) Modelagem computacional: os dados do dimensionamento são empregados em modelamento computacional e posterior criação de um programa de comandos para máquinas de torneamento, ocorrendo, portanto, uma automatização.
- 4) Torneamento Primário e Secundário: O torneamento primário é realizado com baixa precisão para retirada grosseira do material. Em seguida, o torneamento secundário delinea o formato final.
- 5) Acabamento: é feito um acabamento para eliminar imperfeições nas superfícies.
- 6) Controle de qualidade: a peça é analisada para averiguar possíveis imperfeições dimensionais. Caso ocorra tal imperfeição, a peça é descartada ou, caso haja possibilidade de recuperar o defeito, este é retornado para etapa a etapa inicial do processo.

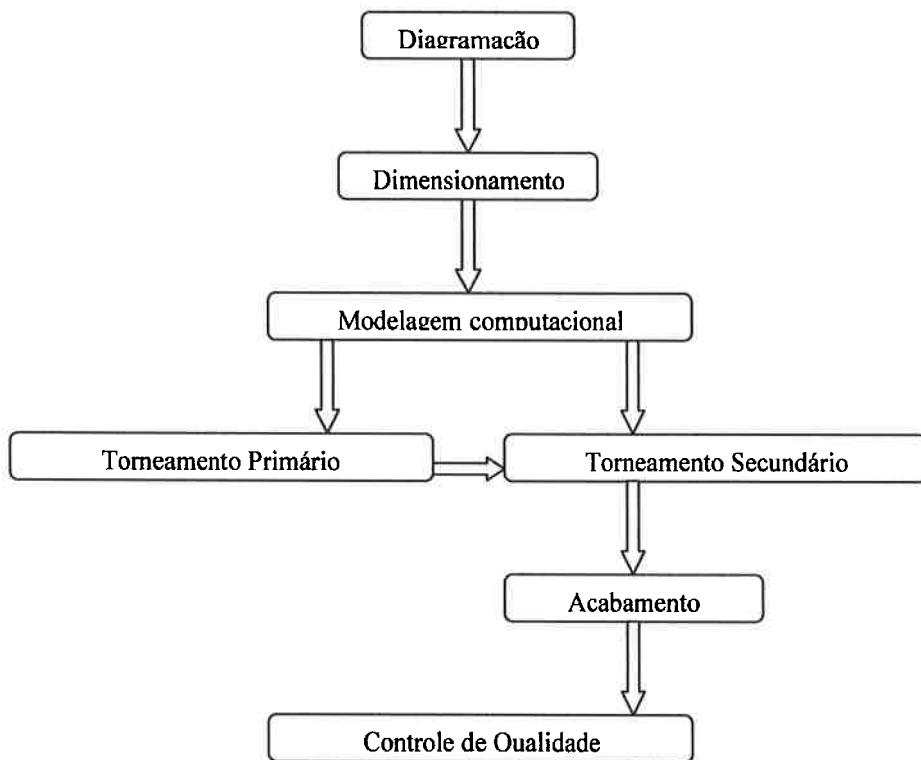


Fig. 10: Diagrama do processo de fabricação do molde polimérico.

Observações: O torneamento em polímeros, segundo a Solidur, requer ferramentas semelhantes àquelas utilizadas em torneamento de alumínio, porém, com rotação menores (em torno de 500rpm), uma vez que aspectos como tenacidade, dureza e resistência mecânica dos polímeros são muito inferiores. Altas rotações podem danificar polímeros e até deformá-las.

6.2 Injeção com postiço de PA12

Para realizar esta etapa, foram necessárias adaptações de parâmetros (já mencionados) e instalação do postiço para adequar a maquina de injeção. As etapas do procedimento estão listadas abaixo:

- 1) Substituição do postiço.
- 2) Afixar parâmetros para clico de injeção ajustado para 26 segundos.
- 3) Instalar demais parâmetros (mencionados no capítulo de parâmetros de injeção)
- 4) Aquecer Óleo e faixas de temperatura da rosca de extrusão.
- 5) Introduzir PEAD no alimentador
- 6) Depois de aquecida a rosca (observar sinalizador no painel de comando com indicação verde), iniciar extrusão até o avanço do bico de injeção.
- 7) Efetuar 10 injeções e recolher corpos de provas para posterior análise.
- 8) Substituir o postiço de PA12 pelo metálico.
- 9) Efetuar 5 injeções.
- 10) Encerrar injeção.

6.3 Execução de testes para análises posteriores

Afim de avaliar as peças injetadas, utilizou-se ensaios de tração nas peças fabricadas a partir de ambos os moldes (metálico e PA12).

Este ensaio pode identificar se houve alteração nas propriedades mecânicas das peças, como por exemplo: resistência à tração, elasticidade, tração à ruptura, e outras propriedades que estão relacionadas com o diagrama tensão x deformação.

Pelo fato de a diferença de condutividade térmica entre os moldes ser grande, é provável que este ensaio identifique a aplicabilidade dos moldes, pois a condutividade térmica influencia o resfriamento dos injetados e posteriormente, interfere nas propriedades mecânicas.



Maquina para ensaios de tração da Kratos serie K5000, com célula de carga que suporta até 2000 kgf. Com suporte de um software que possibilita resultados expressos em forma de gráfico de tração por deslocamento e cálculos de alongamento, alongamento linear, limite de resistência, limite de escoamento e outros.

Fig. 11: representação da maquina de tração

7. Resultados e Discussões

Observações importantes devem ser feitas antes de se iniciar discussões a respeito deste trabalho. De inicio houve dificuldades para estabelecer parcerias para angariar fundos ou matérias-primas para este estudo. Entretanto, após meses de procura, a Solidur apoiou a iniciativa e não só forneceu o PA12, como também desenvolveu o molde através de torneamento. Desta maneira o projeto foi realizado, apesar de não ser possível concretizar a fabricação e a tentativa de viabilizar um molde a base de compósito. Os resultados serão dispostos em ordem cronológica, iniciando pela fabricação do molde.

7.1 Fabricação do molde e primeiros testes.

Depois de realizada as etapas citadas no tópico de materiais e métodos, o molde foi então instalado na maquina de injeção, com alguns ajustes de erro de dimensionamento gerado pela medição imprecisa. E o resultado pode ser visto nas figuras a seguir:

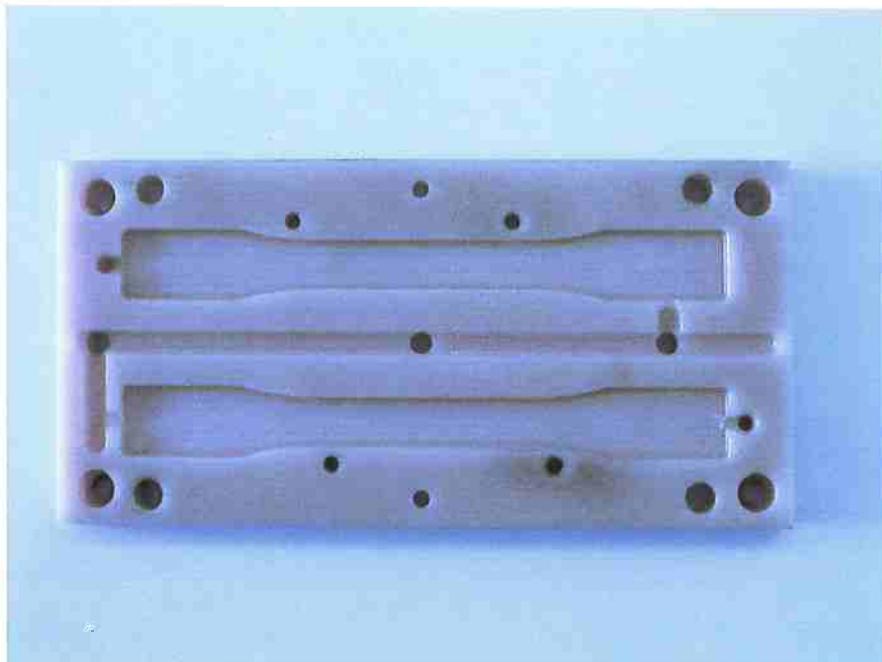


Fig. 12: Molde polimérico.

Os furos centrais da figura estavam com erros de dimensionamento. O molde entregue (data da entrega: 21/11/2005) possuía diâmetro de 4mm, enquanto que o molde deveria possuir diâmetro de 5mm. Essa diferença interfere na instalação, pois é através deste furo que os pinos de extração agem.

Após devidas correções, o molde foi instalado e as peças do fruto da injeção podem ser vistas a seguir:

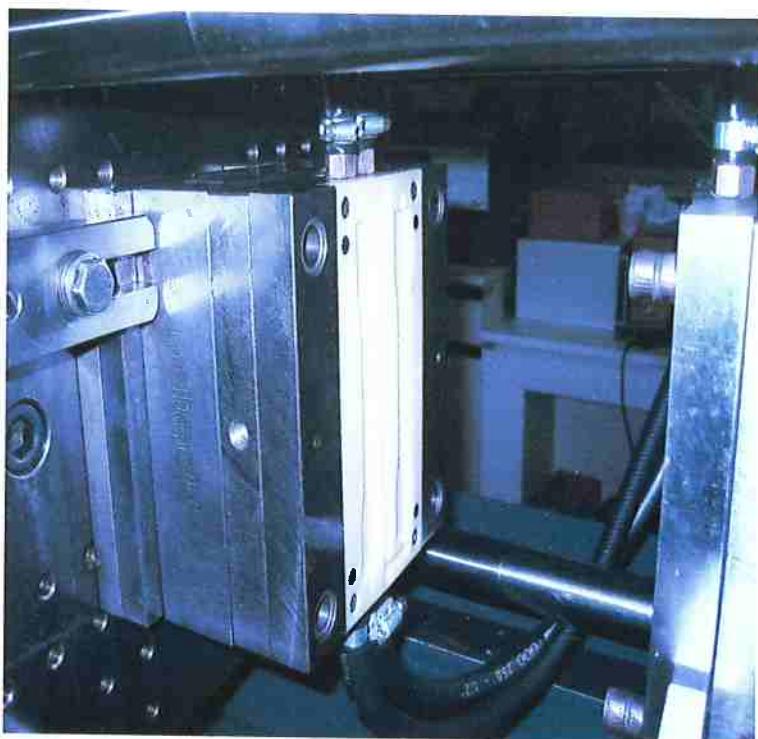


Fig. 13a: Postiço instalado no molde.

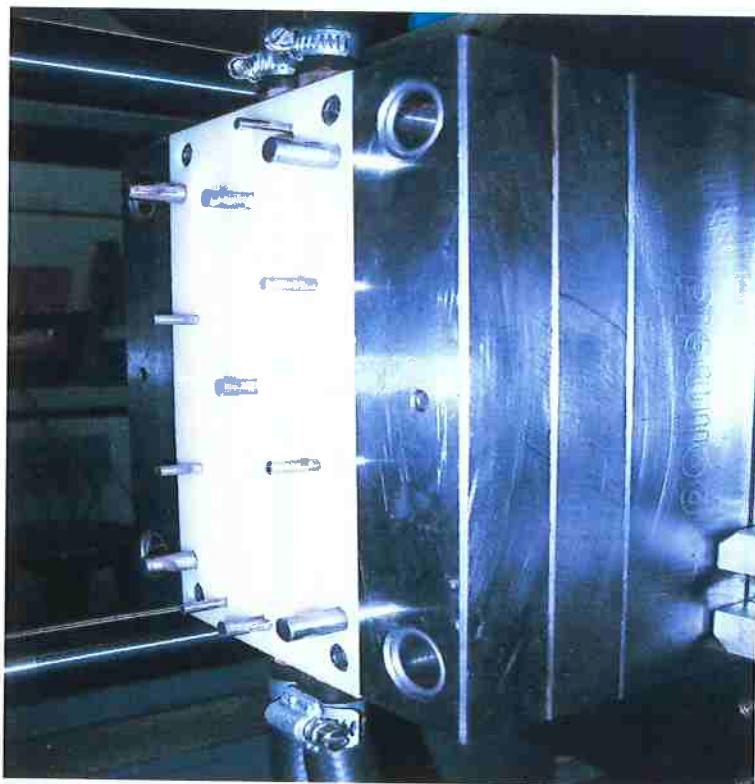


Fig. 13b: Postiço instalado no molde.

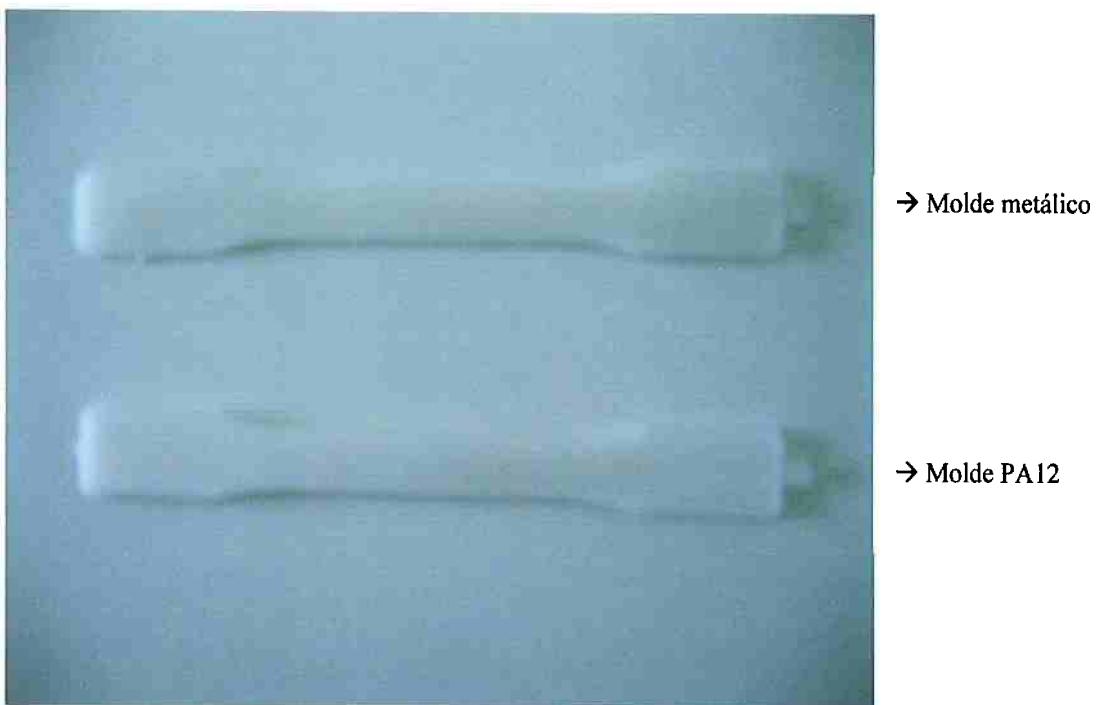


Fig. 14a : Comparação dos corpos de prova.

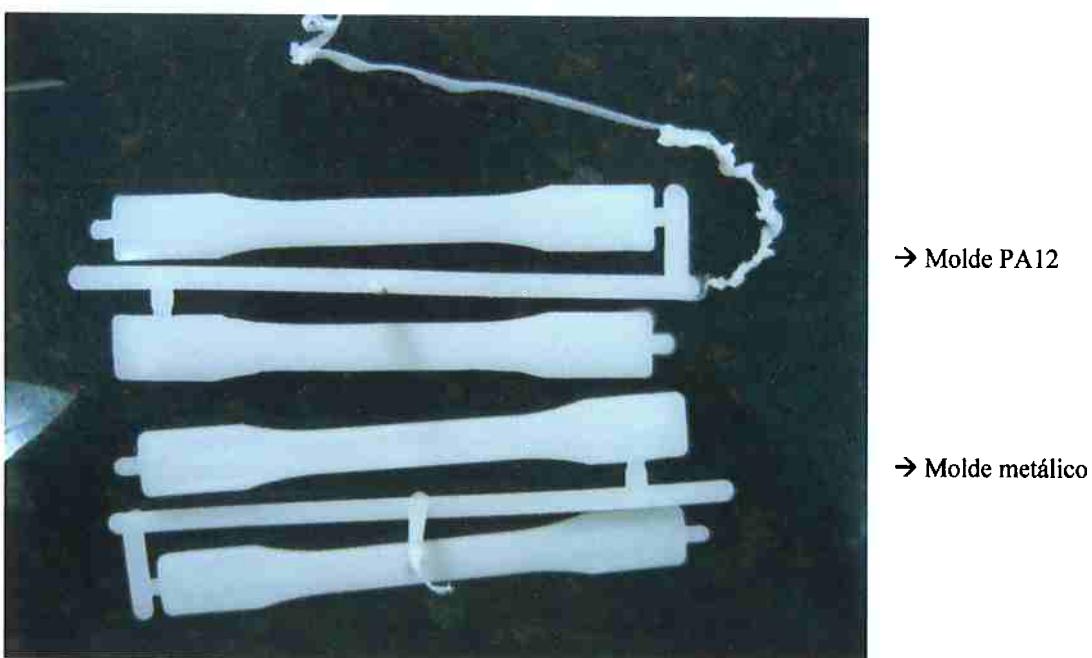


Fig. 14b : Comparação de peças injetadas (PA12 e metálico)

Esta ultima figura é um comparativo das primeiras peças a serem injetados por ambos os moldes (PA12 e metálico, respectivamente). Note que há uma rebarba na peça gerada pelo postiço de PA12. Esta rebarba é proveniente de refugo da peça devido ao excesso de material injetado. Além disto, esta peça apresentou defeito quanto à injeção, pois ao abrir o molde, a peça não se manteve alocada na cavidade, causando um resfriamento do injetado com a interface metálica e ao ar livre.

Quanto aos dois problemas, o primeiro foi sanado com o reajuste de material injetado, e quanto ao segundo problema, a não fixação da peça é causada pela não adequação dimensional da cavidade. Para tanto, foram feitas pequenas cavidades no molde a fim de fixar a peça no molde, além de utilização de óleo mineral para lubrificar o componente metálico.

O resultado foi uma injeção adequada. No entanto, apenas exames, testes e ensaios predefinidos podem delinear uma resposta mais concisa.

7.2 Resultado dos ensaios e testes requisitados

O ensaio de tração foi realizado em 3 grupos de peças:

- 1) Corpos de prova que tiveram êxito na operação de injeção com o molde de PA12.
- 2) Corpos de prova extraídos do molde metálico.
- 3) Corpos de prova “defeituosos”. Pois estes corpos não foram alocados devidamente no molde de PA12.

A analise nestes 3 grupos visa observar como o resfriamento e trocas de calor interferem na injeção. No primeiro grupo, a injeção feita em PA12 possui, certamente, um resfriamento

mais lento que o segundo grupo (molde metálico, que possui a melhor condução térmica e consequentemente, melhor resfriamento). E o terceiro grupo é o caso em que o PEAD é injetado em molde de PA12, porém o corpo de prova é resfriado em interface metálica e ao ar livre.

Os resultados resumidos e figuras representativas do ensaio de tração podem ser observados a seguir:

| Grupo | Corpo de prova | Força máxima (kgf) | Alongamento (%) | Alongamento linear (mm) | Lim. Resistência (kgf/mm ²) | Lim. Escoamento (kgf/mm ²) |
|-------|----------------|--------------------|-----------------|-------------------------|---|--|
| 1 | 1 | 83.200 | 367,30 | 246,35 | 2,09 | 1,19 |
| 1 | 2 | 90.200 | 250,57 | 167,81 | 2,27 | 1,27 |
| 1 | 3 | 89.400 | 225,42 | 151,19 | 2,25 | 1,26 |
| 1 | 4 | 88.400 | 270,46 | 181,40 | 2,16 | 1,14 |
| 1 | 5 | 88.000 | 335,74 | 225,19 | 2,19 | 1,17 |
| 2 | 6 | 89.600 | 376,30 | 252,38 | 2,21 | 1,28 |
| 2 | 7 | 87.200 | 408,72 | 274,13 | 2,19 | 1,27 |
| 2 | 8 | 87.000 | 417,16 | 279,79 | 2,19 | 1,33 |
| 2 | 9 | 89.600 | 306,27 | 205,42 | 2,21 | 1,33 |
| 3 | 10 | 85.600 | 196,43 | 131,75 | 2,16 | 1,23 |
| 3 | 11 | 82.800 | 284,26 | 190,65 | 2,08 | 1,18 |
| 3 | 12 | 86.000 | 195,04 | 130,81 | 2,16 | 1,28 |
| 3 | 13 | 85.800 | 205,25 | 137,66 | 2,18 | 1,18 |

Tabela 4: Resultados dos ensaios de tração.

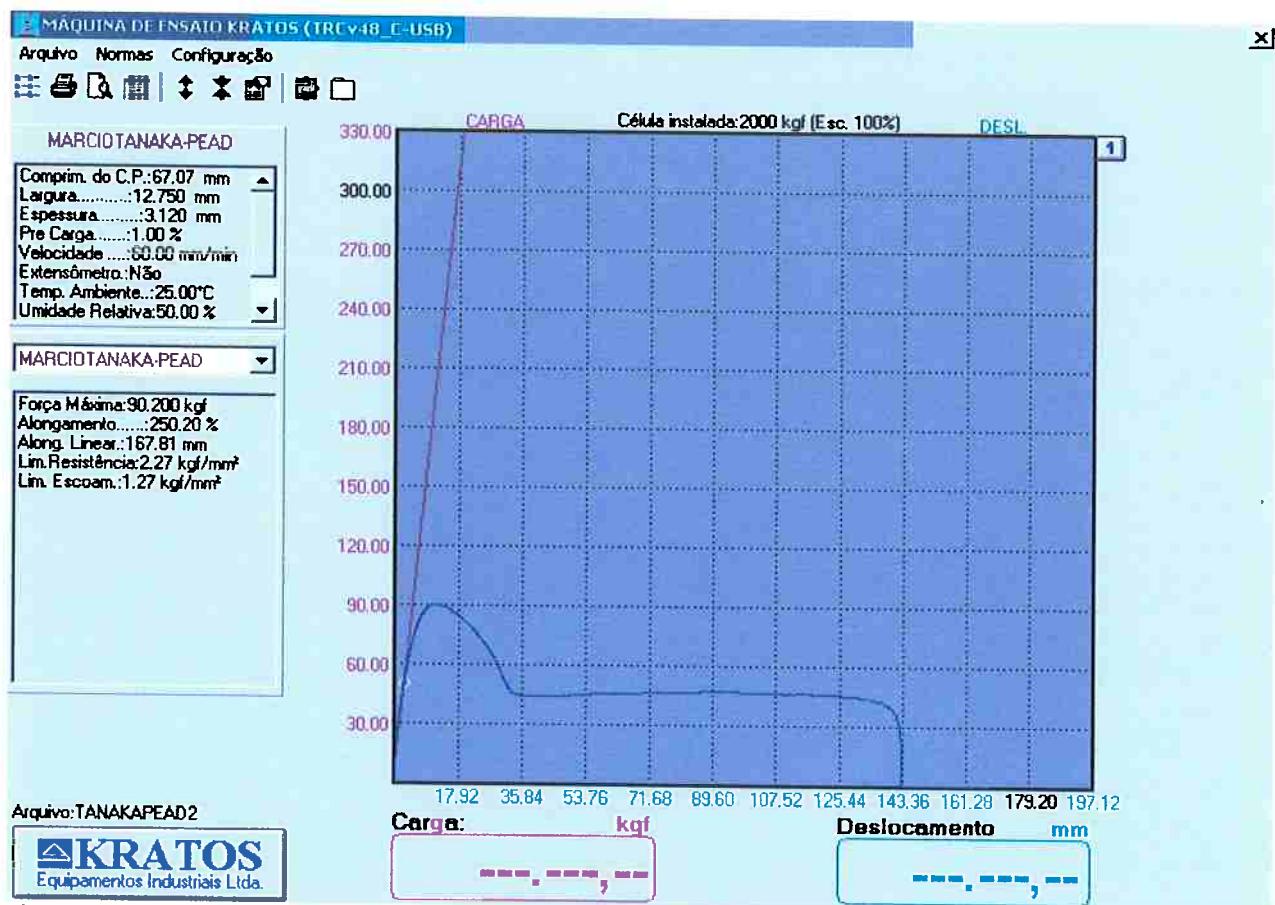


Fig. 15: Resultado ilustrativo apresentado pelo software da maquina de tração.

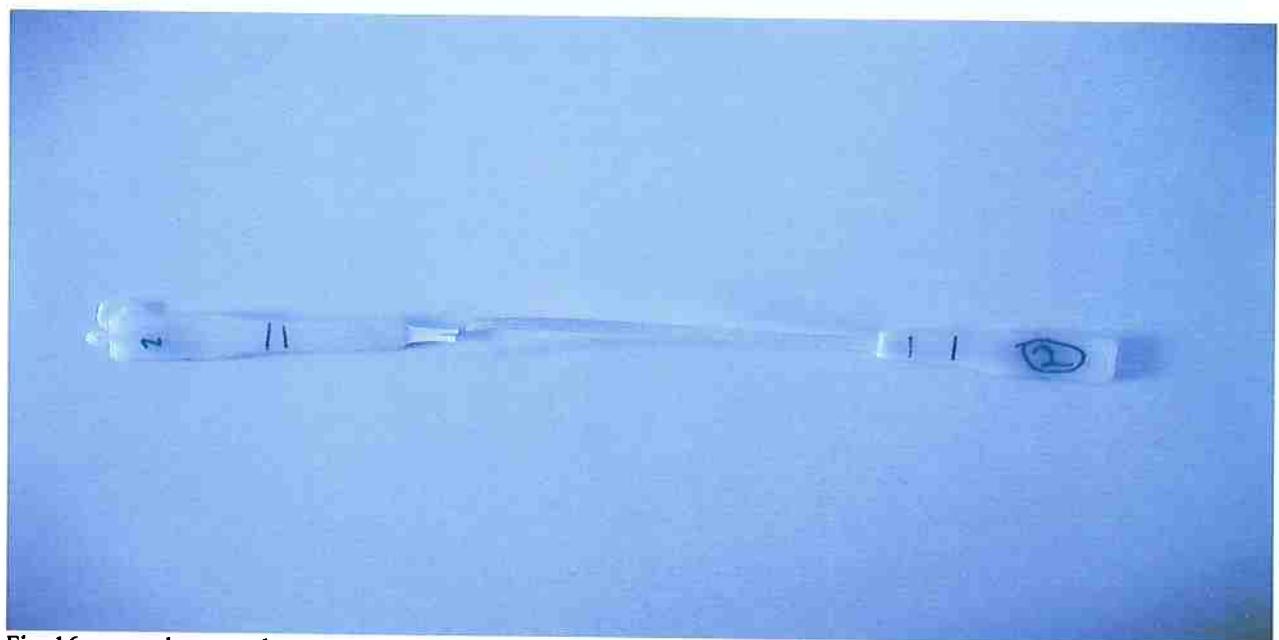


Fig. 16: corpo de prova do grupo 1.

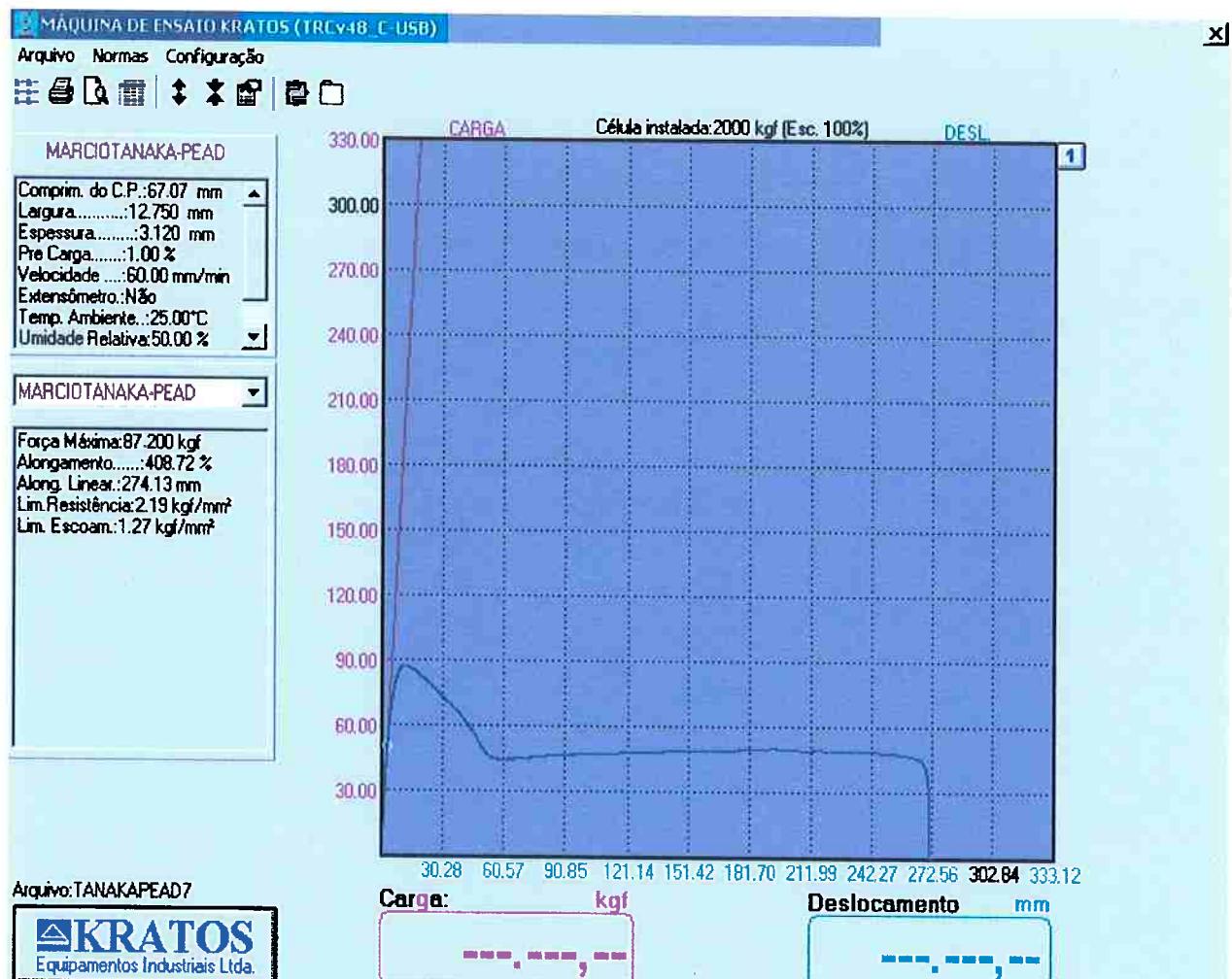


Fig. 17: Resultado ilustrativo apresentado pelo software da maquina de tração.



Fig. 18: corpo de prova do grupo 2.

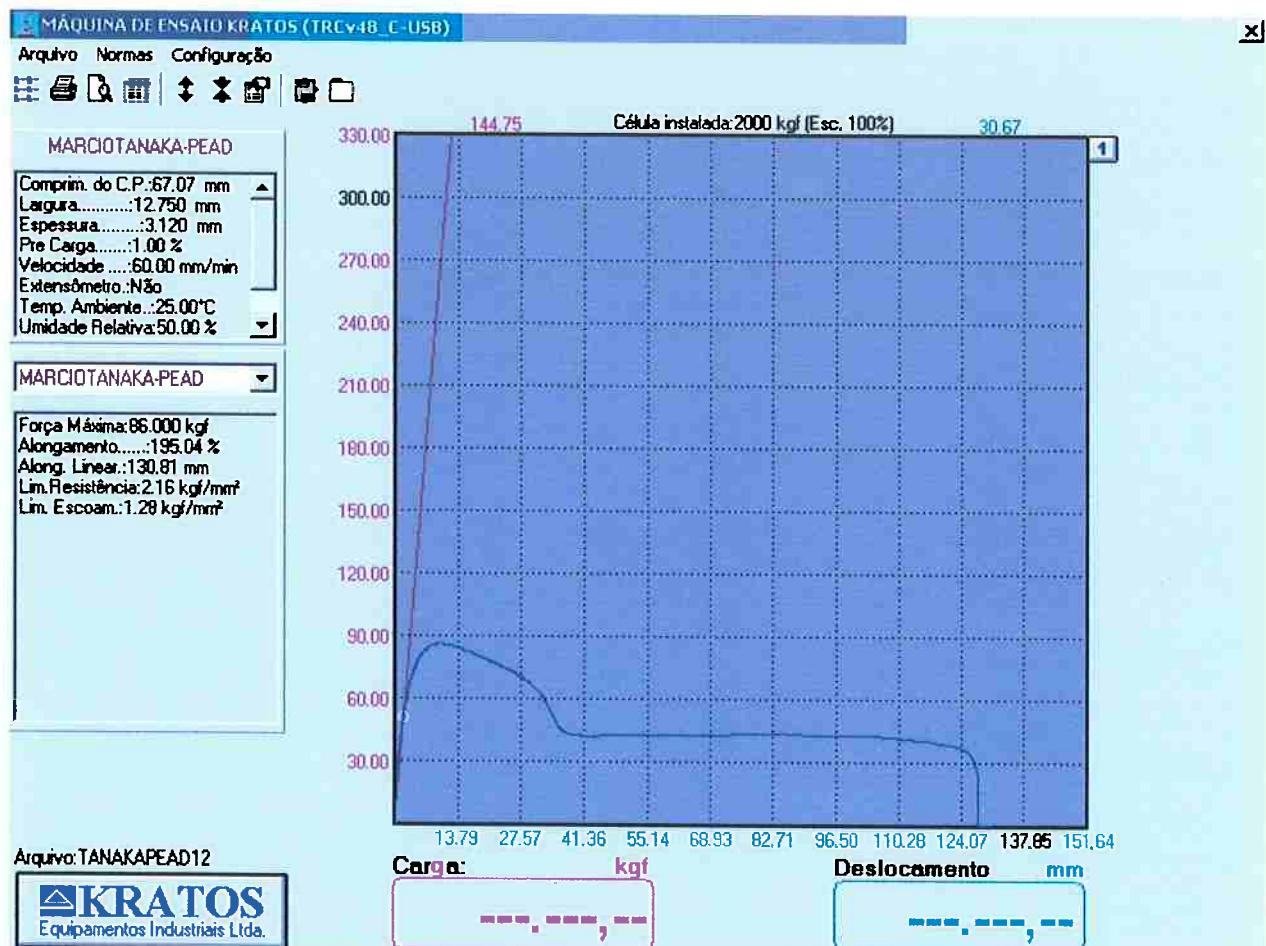


Fig. 19: Resultado ilustrativo apresentado pelo software da maquina de tração.

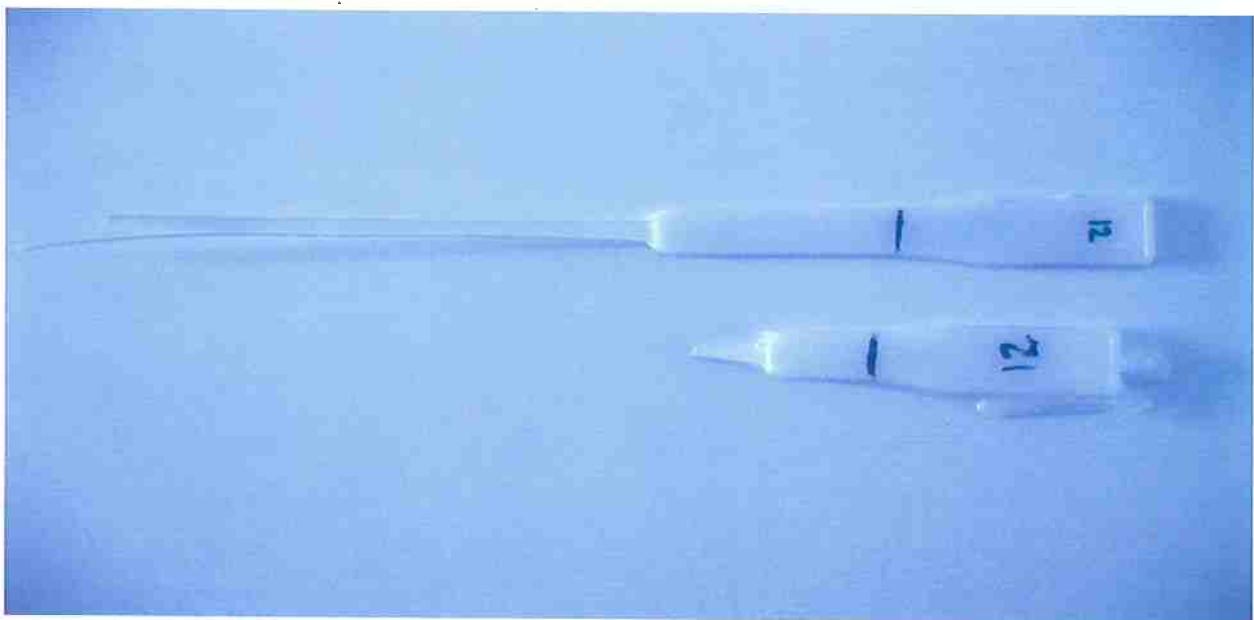


Fig. 20: Corpo de prova do grupo 3.

As figuras representativas indicam o resultado típico para cada um dos grupos. As curvas dos gráficos de carga por deformação são típicas conforme observados na literatura. E as figuras na seqüência são dos corpos de prova que revelam o aspecto visual do corpo após o ensaio de tração até a ruptura.

Todos os ensaios foram realizados com uma taxa típica para PEAD, para se observar não só a fratura como também o comportamento do material no campo plástico. A taxa de alongamento foi de 60mm/min.

Para simplificar estes dados, serão calculados medias simples do alongamento para cada um dos três grupos de corpo de prova:

$$M\ 1 = 289,90 \pm 59,53$$

$$M\ 2 = 377,11 \pm 50,40$$

$$M\ 3 = 220,24 \pm 42,91$$

Estes dados implicam que o molde PA12 é inferior ao molde de metal, no quesito plasticidade. No entanto, limites de resistência e escoamento, são similares em todos os três grupos de peças. Essa diferença no alongamento é devido a um fator que certamente está ligado aos moldes, ou melhor, à forma com que estes corpos de prova foram resfriados.

A teoria de deformação plástica dos polímeros implica que a deformação é proveniente de movimentação das cadeias, de forma a organizá-las de um estado caótico e com pouca orientação para um estado de organização linear (com direção paralela à força aplicada para a deformação). No entanto, no caso do grupo de amostras 3, há um resfriamento acentuadamente

não uniforme, pois o gradiente de resfriamento é afetado drasticamente pelos meios em que se encontram (interfaces metal/ar). Esta diferença gera uma estrutura de cadeias com tensão residual que interfere no mecanismo de deformação mencionado, e atua como fator que fragilizante, repercutindo os resultados do ensaio como fator que diminui o alongamento e antecipa a ruptura.

Não apenas no grupo 3, mas no grupo 1 também é observado tal fenômeno, uma vez que a peça injetada tem contato com uma interface PA12/metal. Porem neste caso, o gradiente de resfriamento tem menor contato com o metal e como o metal possui controle parcial de temperatura, as diferenças nos resultados não foram tão constrangedoras quanto os resultados do grupo 3.

Nota: [18]

Condutividade térmica do ar: 0,023 W/mK

Condutividade térmica do PA12: 0,33 W/mK

Condutividade térmica do Aço: 14 W/mK

7.3 Analise e discussões aprofundadas

Este estudo aponta que os moldes de poliamida 12 têm uma característica peculiar, pois os ensaios de tração revelaram que o material injetado sofreu muita influência sobre a forma como foi processada, ou seja, o molde de PA12 tem capacidade de diminuir naturalmente a taxa de resfriamento do polímero injetado e este resfriamento lento, segundo a literatura promove uma maior cristalinidade nas cadeias poliméricas e também uma maior contração.

Como foi observado nos ensaios de tração, as diferenças de taxa de resfriamento causaram uma concentração desproporcional de cadeias que foram solidificadas rapidamente em uma superfície, enquanto que o núcleo ainda não solidificado, sofreu a pressão da parte externa causando não apenas as tensões residuais como também diferença de densidade entre o núcleo e a superfície.

Os ensaios de tração foram validos para comprovar a existência desses fenômenos e também para averiguar a possibilidade de utilização deste molde em artefatos que não requerem o uso extremo das propriedades do polímero injetado. Desta forma, este estudo atendeu o objetivo inicial, que foi de substituir moldes convencionais por moldes poliméricos, que produzem artefatos de utilização rotineira, ou seja, artefatos que não requerem o uso extremo de suas propriedades.

Outro fator importante é o tempo do ciclo de injeção. Para a indústria de um modo geral, quanto menor o tempo do ciclo, maior será a produção. Os testes realizados indicam que para o mesmo formato de peça e para um mesmo tempo, os resultado obtidos indicaram que não houve alteração visual da peça, exceto pelos ensaios de tração realizados.

7.3.1 Viabilidade econômica

Um fator importante que ainda não foi mencionado é a viabilidade econômica deste tipo de substituição. Neste caso, é necessário relevar em primeira instância o custo.

O custo do molde de poliamida 12 foi projetado para algo em torno de R\$ 1.100,00 (orçamento da Solidur) e em contra partida, para descobrir o custo do molde foi feito uma

pesquisa em varias fabricas de molde metálicos e torneiros mecânicos e SENAE. O resultado foi um molde metálico com custo na faixa de R\$ 1.500,00 à R\$ 2.400,00. Esta pesquisa de custo foi baseada em aquisição do mesmo formato e dimensões do molde utilizado neste trabalho; não foram considerados os projetos de molde.

Entretanto, apenas o custo não reflete a viabilidade econômica deste estudo. Além da durabilidade, outros fatores têm peso decisivo, como são os casos da durabilidade, tratamentos de superfícies para fins estéticos e propriamente da durabilidade, projetos de molde e inclusive estudo de mercado.

8. Conclusão

Ao longo deste estudo, e conforme o aprofundamento nas pesquisas, foram feitos vários estudos, que vão desde seleção de materiais, teorias do comportamento dos polímeros diante de suas propriedades até o estudo de conformação e seus mecanismos. E todo este estudo, convergiu para um resultado que abre espaço para futuras pesquisas neste campo. Pois este teste foi executado apenas para o postiço, certamente, para futuros estudos, deve-se substituir integralmente o metal pelo polímero.

Há também o quesito durabilidade, que certamente, está ligado à geometria da peça, pois para peças mais complexas e que exigem paredes e entrâncias mais finas, há a possibilidade de causar um desgaste prematuro no molde.

Os resultados concretos revelam também outra possibilidade de aplicação, uma vez que moldes poliméricos possuem uma característica peculiar, que é taxa de resfriamento mais lento. Esta característica pode ser empregada na injeção de outros tipos de polímeros. Além disto, conforme visto no tópico de seleção de materiais, uma vasta gama de polímeros e compósitos podem substituir a poliamida 12, e consequentemente, ser substituídos com mais êxito.

9. Bibliografia

1. <http://www.planetaplastico.com.br> (17/09/2005)
2. <http://www.ctc.ufsc.br/produto/Produto1/artigos/artigo5.pdf> (17/09/2005)
3. <http://www.iem.efei.br/dpr/td/julho2001/pdf/Td092.pdf> (17/09/2005)
4. http://www.cimm.com.br/jornalvillares/jornal_5_edicao.pdf (17/09/2005)
5. <http://www.scielo.br/pdf/po/v13n4/19882.pdf> (17/09/2005)
6. http://www.ppg.uem.br/Docs/ctf/Tecnologia/2002/02_156_02_Jose%20Caraschi_Avaliacao%20das%20propriedades.pdf (17/09/2005)
7. P.S. Cracknell and R.W. Dyson, Handbook of Thermoplastics Injection Mould Design, Blackie Academic & Professional
8. Irvin I. Rubin, Injection Moulding Theory and Practice, editora Wiley Interscience
9. Helio Wiebeck e Júlio Harada, Plásticos de Engenharia, editora Artliber
10. Herbert Rees, Injection Molding Technology, Editora Hanser
11. Dubois e Pribble, Plastic Mold Engineering Handbook, quinta edição, Chapman & Hall
12. Julio Harada, Moldes para Injeção de Termoplásticos, Editora ArtLiber, 2004
13. MICHAEL F. ASHBY, Materials Selection in Mechanical Design, Second Edition, Editora Butterworth-Heinemann, 1999

14. Hélio Wiebeck e Júlio Harada, Tecnologia do processo de injeção do plástico, Cooperação Universidade Empresa.

15. <http://www.google.com.br/search?hl=pt-BR&q=defini%C3%A7%C3%A3o+de+polimero&meta> (21/11/2005)

16. William D. Callister, Jr., Materials Science and Engineering: An Introduction, Wiley, Fifth Edition, 1999.

17. http://imo.net/files/data/telescopic_charts/d/td124.pdf

18) <http://hypertextbook.com/physics/thermal/conduction/>