

Índice

Introdução histórica sobre a indústria de moldes Portuguesa	2
Introdução ao projecto de moldes	4
O processo de moldação	6
O ciclo de moldação	8
A máquina de injeção	10
O molde	11
A estrutura do molde	12
Maquinabilidade	14
Processos de fabrico.....	15
Corte por arranque da apara, fresagem.....	16
Corte por arranque da apara, torneamento.....	18
Material de injeção	20
Definição do produto a obter	22
Condições de processamento.....	24
Simulação do enchimento	26
Simulação do MolFlow	26
Pré processamento	26
Análise	28
Pós – processamento	28
Simulação estrutural do molde	33
Simulação térmica do molde	37
Execução do molde em SolidWorks	37
Análise térmica utilizando o Cosmos Works.....	37
A maquinagem do molde	40
Tempo e preço do molde.....	40
O produto final	44
Conclusão	45
Referências bibliográficas	46
Anexos	47

Introdução histórica sobre a indústria de moldes Portuguesa

A história da Indústria de Moldes Portuguesa tem a sua génese na evolução da Indústria do Vidro. Foi já no século XX, que se começam a produzir os primeiros moldes para vidro, pois até então em Portugal, a necessidade deste tipo de moldes era satisfeita através da importação de moldes da Alemanha e da Áustria.

No final dos anos 20, surge em Portugal a “Ureia Industrial”, mais conhecida por “baquelite”, que originou então o aparecimento dos primeiros moldes para tampas e peças simples. Com o início da 2ª Guerra Mundial, as matérias-primas escassearam, o que provocou a paralisação na produção de moldes, que só viria a arrancar definitivamente em 1945, com o reaparecimento do “baquelite”, acabando por produzir o primeiro molde para a injeção de plásticos em 1946, com o aparecimento de materiais “termoplásticos”. As relações de exportação iniciaram-se com Inglaterra nos finais dos anos 50, dando-se assim início ao desenvolvimento da Indústria de Moldes.

Nas décadas posteriores, acentuou-se a qualidade dos moldes portugueses, fruto da exigência dos mercados, que foi incentivando o incremento de investimentos em novas tecnologias, permitindo assim, um desenvolvimento sustentado desta indústria.

Em 1969, foi criada a CEFAMOL- Associação Nacional da Indústria de Moldes, com o objectivo de contribuir para o desenvolvimento do sector em causa, ajudando a promover os moldes portugueses no exterior, representando o sector nas negociações com o governo e com outras organizações oficiais, tanto nacionais como estrangeiras. A sua esfera de acção inclui a pesquisa tecnológica, a formação profissional e o intercâmbio de informações técnicas e científicas com outras entidades da mesma área, tanto em Portugal como no estrangeiro. Refira-se ainda que a associação abrange a globalidade dos sub-sectores da Indústria de Moldes e não apenas os moldes para plásticos.

Em 1980, exportava-se já para mais de 50 países e só na região da Marinha Grande e Leiria existiam 64 empresas ligadas aos Moldes. Em 1983, foi instalado o primeiro sistema CAD/CAM na Indústria Portuguesa de Moldes.

Em 1991 com o apoio da CEFAMOL, foi criado o CENTIMFE - Centro Tecnológico da Indústria de Moldes e Ferramentas Especiais, com o objectivo de dar apoio técnico e tecnológico ao sector e de desenvolver actividades de interface entre outras “Instituições de saber” e a indústria, permitindo desta forma a promoção e

difusão da investigação e desenvolvimento tecnológico e o desenvolvimento de redes de cooperação e de conhecimento.

Actualmente e perante o nível de mutações técnicas e tecnológicas aceleradas, a indústria de moldes e plásticos, tem procurado uma crescente interligação e cooperação, procurando por um lado uma adaptação em tempo real às exigências dos mercados, e por outro, antecipar ciclos e tendências mundiais [1].

Introdução ao projecto de moldes

A indústria dos plásticos tem-se expandido extraordinariamente desde 1945 e parte substancial por injeção.

Foi o advento da indústria petroquímica que catalisou o desenvolvimento da moldação por injeção, a partir do fim da 2ª Grande Guerra. Hoje, este processo é talvez o de maior interesse científico e um dos de maior importância industrial, dado que quase todos os materiais termoplásticos podem ser injectados, sendo possível obter formas muito complexas.

Esta revolução, por sua vez, provocou um aumento muito grande no número, tamanho, precisão e complexidade das ferramentas de injeção utilizadas, juntamente com um aumento correspondente do número de engenheiros empenhados nos projectos e fabricação dos moldes.

Devido a toda esta evolução na indústria dos plásticos, houve uma enorme necessidade de recorrer à utilização do computador na indústria dos moldes. A computação gráfica e os métodos numéricos, são basicamente ferramentas de suporte para sistemas CAD/CAM/CAE. Actualmente, estes sistemas facilitam muito o trabalho dos engenheiros, o que permite obter produtos de melhor qualidade através da modelação dos mesmos, análise e ensaios numéricos, evitando o ensaio destrutivo e a construção de possíveis protótipos. No fim, o custo do produto é substancialmente reduzido, verificando-se uma enorme melhoria na qualidade e performance do produto final. Na elaboração deste projecto tem como objectivo utilizar ferramentas deste tipo, como o SolidWorks, CosmosWorks, MoldFlow e o MasterCam. Alguns destes programas recorrem à formulação por elementos finitos. Neste processo existem vários tipos de elementos finitos uns adequados para simular escoamentos não Newtonianos, outros para simular processos térmicos e outros para simular processos relacionados com o comportamento estrutural da ferramenta mais importante deste processo, o molde. A integração das diferentes tarefas parece adequada para melhorar a qualidade do produto final. Numa primeira fase é efectuada uma simulação do enchimento testando diferentes condições de processamento e simultaneamente, alterando a definição do produto nos locais autorizados. Numa segunda fase é efectuada uma simulação térmica da transferência de calor das placas do molde para as placas da máquina, com base na informação térmica obtida na primeira fase. O terceiro tipo de

análise decorre à simulação estrutural do molde, partindo do campo de pressões determinado aquando da simulação do escoamento.

Depois de optimizadas todas as variáveis de projecto, o processo decorre com a definição do preliminar global e os respectivos desenhos de definição. Todo este trabalho foi elaborado em SolidWorks.

Para conclusão deste projecto, são preparados os programas de maquinagem e efectuadas operações tradicionais mais simples para a construção do molde.

O processo de moldação

A moldação por injeção de termoplásticos obedece ao ciclo típico de transformação destes materiais, envolvendo, sequencialmente, as seguintes etapas: aquecimento do material até este adquirir uma viscosidade suficiente baixa; enformação sobre pressão; e arrefecimento com conseqüente recuperação de rigidez, ver figura 1.

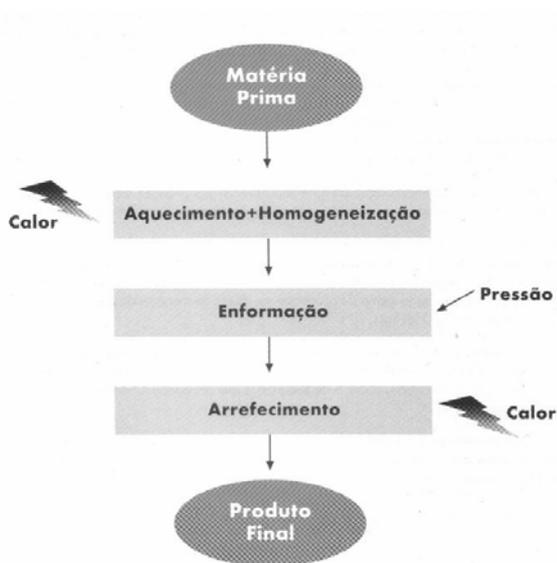


Fig.1 - Ciclo de transformação de termoplásticos.

Este ciclo é exercido sobre compostos a moldar, com características específicas, sendo de realçar: a baixa difusidade térmica, onde os plásticos são intrinsecamente maus condutores de calor, dificultando as trocas térmicas necessárias à sua transformação. Esta característica implica que na moldação por injeção se deva utilizar peças plásticas de pequena espessura. Em relação ao comportamento reológico, os termoplásticos, quando no estado fundido, apresentam-se sob a forma de fluidos com elevada viscosidade. A sua viscosidade é função da taxa de deformação imposta ao material, podendo ser relativamente baixa para velocidades de deformação elevadas. Em relação à elevada dependência térmica da densidade, o modo de organização das cadeias moleculares constituintes de um sistema polimérico é altamente dependente da temperatura. De facto, um aumento da temperatura provoca o crescimento do volume livre intermolecular e a conseqüente expansão do material. Assim se justifica a necessidade de estudar a contracção que se verifica durante o processo de arrefecimento [2].

O equipamento a utilizar e as estratégias a seguir para otimizar o processo deverão ter em conta a qualidade do produto final.

Em termos conceptuais, o processo de moldação por injeção de termoplásticos desenvolve-se da seguinte forma: inicialmente o material plástico a transformar, originalmente no estado sólido e normalmente sob a forma de grãos, é carregado na tremonha da máquina de injectar e alimentado para o interior do cilindro de plasticização onde é aquecido afim de amolecer e homogeneizar. Procede-se ao aquecimento do material que é garantido pelo calor transmitido através das paredes do cilindro e pelo calor gerado por efeito de dissipação viscosa, em resultado do esforço mecânico resultante da rotação do fuso. O fundido resultante é forçado, sob pressão, a fluir para o interior de um molde, o qual irá encher a respectiva impressão e arrefecer devido às trocas de calor com as superfícies moldantes. O processo conclui-se com a extracção da moldação, que ocorre após o período de arrefecimento completo.

O processo de moldação assenta em dois equipamentos essenciais; a máquina de injeção e o molde, embora possa ter outros equipamentos auxiliares como: robô, tapetes transportadores, moinho, dispositivos de controlo da temperatura do molde, etc. A figura 2 apresenta uma célula típica de moldação por injeção.

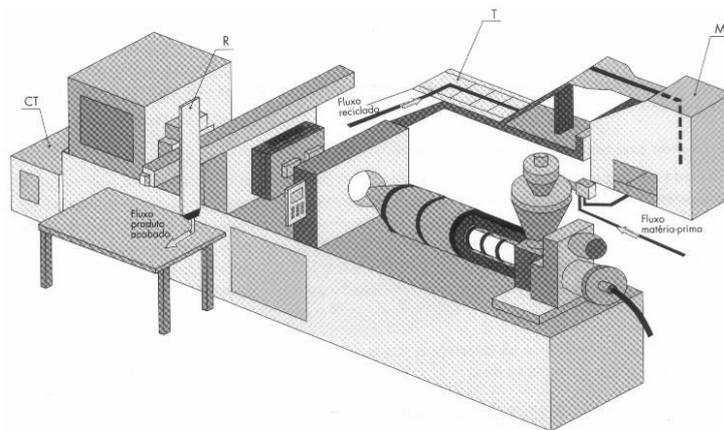


Fig.2 - Célula de moldação por injeção. CT = Controlador de temperatura, R = Robot, T = Tapete transportador, M = Moinho [2].

O ciclo de moldação

A injeção por moldação é um processo cíclico. O conjunto de operações necessário à produção de uma moldação designa-se por ciclo de moldação, ver figura 3.

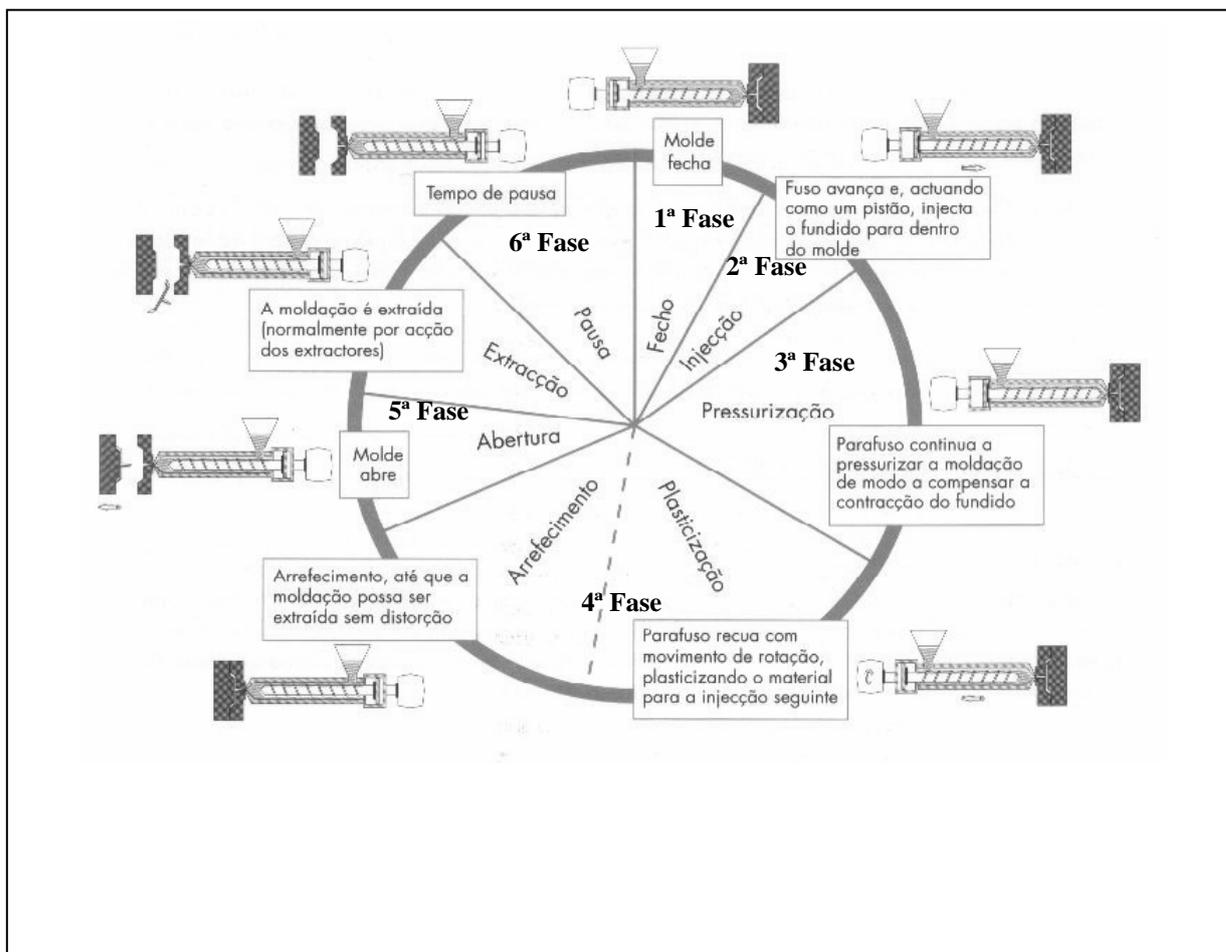


Fig. 3 - O ciclo de moldação.

Numa primeira fase, designada por fecho e trancamento, o molde deve estar em condições de operação permanente, sendo necessário o tempo para restabelecer as condições iniciais do ciclo.

Numa segunda fase, designada por fase de injeção é garantida pelo avanço linear do fuso que, funcionando como um pistão, força o material fundido a entrar no molde e a fluir no interior da zona de impressão. A velocidade de injeção deve corresponder a um compromisso entre rapidez (para assegurar o enchimento global da impressão) e a qualidade do produto final.

A terceira fase passa pelo enchimento do molde, é necessário continuar a pressurizar a impressão, afim de reduzir o efeito da contracção por arrefecimento e evitar o refluxo do fundido. No entanto, a pressurização não deve ser excessiva porquanto daí podem advir danos à peça e dificuldades na sua extracção.

A fase de arrefecimento, numero 4, inicia-se no fim da injeção e termina logo que a peça atinja uma temperatura que permita a desmoldação sem distorção.

A fase 5 serve para abrir e extrair a peça. O tempo para esta operação é uma função da máquina utilizada para garantir a extracção da moldação. É uma operação crítica do ponto de vista produtivo, pois em simultâneo, e mediante a utilização de mecanismos apropriados, pode ser efectuada a separação do jito dos canais de alimentação.

A fase 6 é definida pelo período de tempo que decorre entre o fim da extracção e o início do novo ciclo. É desejável que este período de tempo seja nulo, mas em alguns casos pode ser prolongado para que a remoção da peça seja manual.

Na actividade industrial o objectivo é produzir peças, conforme as respectivas especificações, no mais curto intervalo de tempo possível, aumenta a produtividade. Para o efeito, as condições de processamento tais como pressão de injeção, temperaturas do fundido e do molde, velocidade de injeção, contra pressão e tempo de arrefecimento, necessitam de ser ajustadas tendo em conta as propriedades do material, a geometria da moldação e as especificações do produto final [2].

A máquina de injeção

A constituição típica de uma máquina de injeção é baseada em quatro constituintes, ver figura 4.

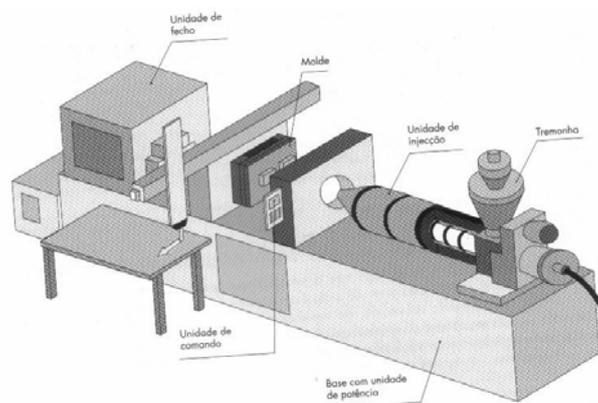


Fig. 4 - Unidades funcionais de uma máquina de injeção.

A unidade de potência, fornece a energia adequada aos diversos actuadores da máquina. Sistema baseado num sistema de pressão óleo-hidraulico, cuja bomba é accionada por um motor eléctrico, ou eventualmente baseado num sistema pneumático.

A unidade de injeção promove o transporte, aquecimento, plasticização e homogeneização do material, desde a base da tremonha até ao bico de injeção. Também garante a subsequente injeção e pressurização do fundido.

A unidade de fecho assegura a fixação e a movimentação do molde, devendo ser capaz de o manter fechado durante as fases de injeção e de pressurização. Integra também os dispositivos necessários à extracção das moldações. Construtivamente, corresponde a uma prensa que terá de ser capaz de suportar a força resultante da injeção do plástico.

A unidade de comando das operações e os dispositivos necessários para assegurar a monitorização e controlo das diversas variáveis do processo estão centralizadas nesta unidade. Assegura, igualmente, a interface com o operador e as comunicações com periféricos ou sistemas de gestão da manutenção [2].

O molde

Um molde deverá produzir peças de qualidade, num tempo de ciclo mais curto possível, possuir o mínimo de manutenção durante o tempo de serviço, definir os volumes com a forma das peças a produzir, assegurando a reprodutibilidade dimensional, de ciclo para ciclo, permitir o enchimento desses volumes com o polímero fundido, facilitar o arrefecimento do polímero e promover a extracção das peças.

A constituição dos moldes é, assim, determinada pela necessidade de realizar adequadamente as funções associadas à execução do ciclo de moldação.

Um molde pode ser uma unidade complexa, capaz de produzir moldagens na forma projectada, quando colocada na prensa de injeção. Os sistemas funcionais de um molde incluem a zona moldante, espaço definido pela conjugação da cavidade e da bucha, que serão responsáveis pela forma das peças a produzir. O sistema de centragem e guiamento, é o sistema que permite, por um lado montar o molde na máquina, e por outro ajustar as partes do molde, assegurando a reprodutibilidade dimensional das peças. O sistema de alimentação, é o sistema que permite a passagem do polímero desde o cilindro da máquina de injeção até às zonas moldantes, permitindo o seu enchimento. O sistema de escape de gases, é o sistema que permite que o ar existente nas zonas moldantes possa sair, possibilitando o seu enchimento. O sistema de controlo da temperatura ou de arrefecimento, é o sistema que contribui para o arrefecimento das peças. O sistema de extracção, é o sistema que permite a extracção das peças [2].

A estrutura do molde

A estrutura de um molde é constituída pelo conjunto de placas e calços, cujo número depende do tipo de molde. A estrutura típica de um molde de duas placas, que é o tipo de molde mais simples, é constituída por uma parte fixa ou lado da injeção e por uma parte móvel ou lado da extracção. A parte fixa é constituída pelas placas de aperto da injeção e placa das cavidades, a parte móvel é constituída pela, placa da bucha, placa de reforço da bucha, calços e placa de aperto da extracção.

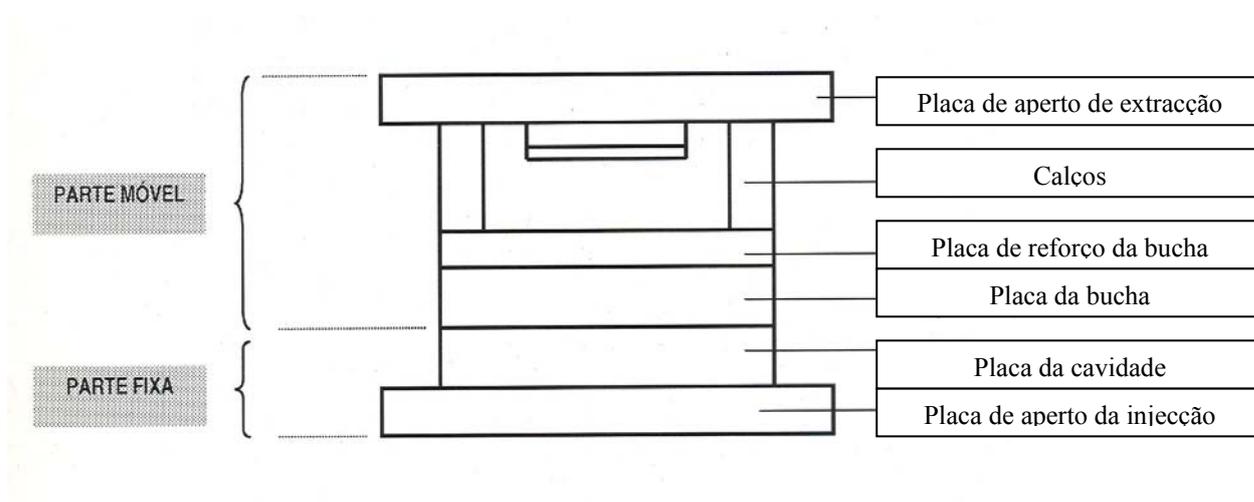


Fig. 5 - Estrutura de um molde de duas placas.

Na placa das cavidades é maquinada a cavidade, parte fêmea do molde, que define a forma exterior da peça.

Na placa das buchas é maquinada a bucha, parte macho do molde, que define a forma interior da peça.

É de notar que a cavidade e a bucha podem estar situadas, indiferentemente, na parte fixa ou na parte móvel do molde. No entanto, é mais comum a configuração descrita já que esta facilita a extracção das peças.

Os calços permitem definir o espaço necessário aos movimentos do sistema de extracção e podem contribuir para a altura mínima do molde, exigível pela máquina onde vai ser instalado o molde.

Para dar rigidez ao conjunto, as placas têm que ser aparafusadas e encavilhadas entre si, de forma a criar tantas partes quantas as necessárias ao tipo de molde em questão.

Os parafusos não deixam que as placas se separem, mas devido às folgas existentes nas roscas e aos furos de passagem não impedem que possa haver um pequeno movimento relativo entre elas. As cavilhas, que entram justas nos furos, impedem esses movimentos mas não a separação das placas. Assim, estes dois elementos devem andar sempre combinados. Em muitos casos as cavilhas podem ser substituídas por outros elementos que desempenham as mesmas funções como por exemplo, guias ou casquilhos, que tenham um respigado na parte de trás, podendo assim, fazer a função das cavilhas, como indica a figura 6.

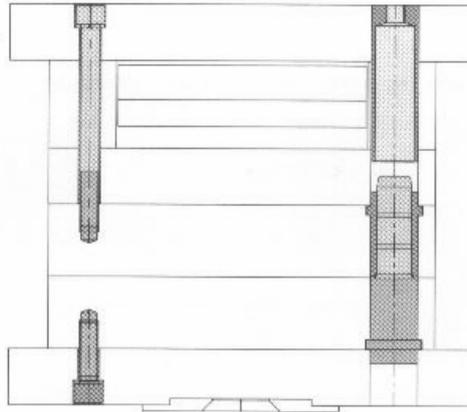


Fig. 6 - Substituição de cavilhas por guias e casquilhos com respigado.

Maquinabilidade

A maquinabilidade de um material é uma grandeza tecnológica com uma influência determinante sobre a produtividade. É determinada, normalmente, como a aptidão que um material tem para ser processado por uma ferramenta de corte.

Algumas das características mais importantes do material a cortar com o efeito decisivo sobre o processo de corte, são: propriedades da tensão e deformação, grau de encruamento, a micro-estrutura, a dureza, a abrasividade, a composição química, a condutibilidade térmica, o coeficiente de atrito, a homogeneidade e a isotropia.

O grande número de indicadores, reflecte bem que nenhum deles é totalmente satisfatório, o que é consequência da complexidade do fenómeno.

Alguns dos indicadores de maquinabilidade a considerar incluem a vida da ferramenta, a rugosidade e integridade das superfícies maquinadas, a produtividade, a força e potência necessária ao corte e a maquinabilidade relativa [2].

É essencial o conhecimento do material a maquinar para se obter sucesso numa operação de maquinação. Quando numa liga de aço o teor de carbono sobe, a maquinabilidade desce. Quanto mais liga tiver o aço, mais difícil de maquiná-lo com as ferramentas de corte. A mesma relação prevalece para a dureza e a maquinabilidade. Quando a dureza sobe a maquinabilidade desce. Para aumentar a maquinabilidade desses materiais, o teor de enxofre pode ser aumentado no material, resultando em maior maquinabilidade do mesmo. Entretanto, o enxofre reduz as propriedades mecânicas nos aços, por exemplo a tenacidade. Outra desvantagem do enxofre está relacionada com o acabamento superficial.

Aços trabalhados a frio têm frequentemente ligas de carbono, cromo e vanádio para que os carbonetos nesses aços fiquem duros e resistentes à abrasão. Os carbonetos duros reduzirão, porém, a maquinabilidade do aço, gerando um alto desgaste da ferramenta de corte.

Seleccionar a classe de aço não é tarefa fácil, a selecção da classe do aço é normalmente feita no estágio do projecto do molde, para que o material possa estar em stock e pronto aquando o projecto estiver finalizado. Em muitos casos, a escolha é um compromisso entre aquele que projecta e aquele que o maquina [3].

Processos de fabrico

Os processos de fabrico utilizados pela indústria dos moldes são essencialmente dois, o processo de alteração de formas e o de alteração de propriedades.

No processo de alteração de propriedades destacam-se os processos de alteração das estruturas, tratamentos térmicos (têmpera, normalização,...) e tratamentos mecânicos (martelagem, under-stressing, over-stressing,...), os processos de alteração de composição química e estrutura, tratamentos termo-químicos (nituração, cementação,...) e os revestimentos de superfícies, revestimentos de cromo duro, PVD, pintura, ...

Nos processos de alteração de formas consideram-se varias maneiras de conferir a forma final, os que envolvem a remoção de material desde o bloco em bruto até à forma final. Processos de alteração de forma, como o processos de corte por arranque da apara (fresagem, torneamento, furação, HSM,...), ver figura 7, corte térmico (plasma, oxicorte), corte por abrasão, laser, jacto de água, electroerosão, os processos de ligação, soldadura, ver figura 8, e os processos de enformação, fundição, pulverotecnologias, enformação plástica, são comumente utilizados na produção de moldes.

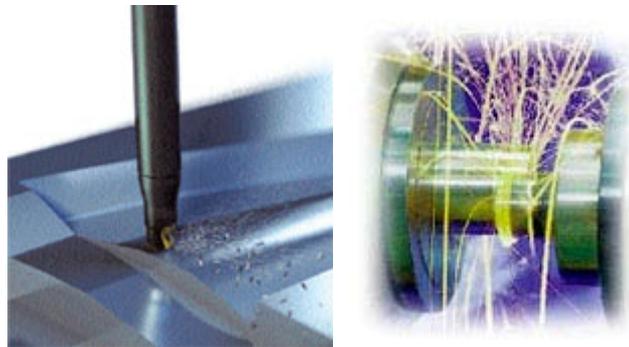


Fig. 7 – Processos de corte por arranque da apara.

O processo de alteração de formas que na indústria de moldes tem mais importância são os processos de remoção de material, com especial destaque o corte por arranque de apara e suas tecnologias, a electroerosão e a rectificação [2].



Fig. 8 - Processos de ligação.

Corte por arranque da apara, fresagem

Numa operação de fresagem, a ferramenta de corte roda em torno de um eixo enquanto a peça se desloca segundo um determinado movimento, linear ou circular. Existe uma coordenação de movimentos entre a ferramenta e a peça a maquinar. As máquinas que utilizam esta tecnologia controlam, normalmente, três ou mais eixos, não necessariamente lineares.

O desenvolvimento dos últimos anos, quer nos aspectos construtivos das máquinas, quer nos comandos CNC e de CAM, quer nas ferramentas de corte, permitem a execução de várias operações com uma eficiência e qualidade impensáveis no passado.

O corte por fresagem, ver figura 9, pode incluir o processo de fresagem periférico em que a superfície maquinada, gerada por dentes e gumes localizados na periferia do corpo da ferramenta, situa-se, de modo geral, num plano paralelo ao eixo da fresa. O fresamento periférico ou tangencial normalmente é realizado em fresadoras em que o eixo da árvore está na posição horizontal. A largura de corte (*ap*) normalmente é substancialmente maior do que a penetração de trabalho (*ae*). A superfície maquinada é gerada pelo gume principal. No fresamento frontal, a superfície maquinada resulta da acção combinada dos gumes localizados na periferia e na face frontal da fresa. A superfície maquinada é plana, sem qualquer relação com o contorno dos dentes. O fresamento frontal, pela sua alta produtividade, deve ser preferido sempre que possível. Neste fresamento ocorre simultaneamente fresamento concordante e discordante. Analisando apenas a trajectória de um dente, primeiro começa como fresamento discordante. A espessura da apara cresce até um valor máximo na linha que passa pelo centro da fresa e com direcção igual à do avanço. A partir deste ponto o corte passa a ser concordante. A espessura da apara decresce até o gume sair da peça [6].

Corte por arranque da apara, torneamento

O torneamento é um processo que consiste em gerar formas de revolução com uma ferramenta de uma só aresta de corte, geralmente sem movimento de rotação. O movimento e corte é dado rotação da árvore da máquina, com movimento simultâneo da ferramenta segundo uma directriz definida no mesmo plano do eixo da peça. É um processo que está bastante optimizado, mas requer uma análise exhaustiva de determinados factores para as diferentes aplicações. As operações básicas permitem torneiar exterior ou interior no sentido longitudinal, facejar no sentido radial, copiar cónico ou interpolação circular, ranhurar, sangrar e roscar.

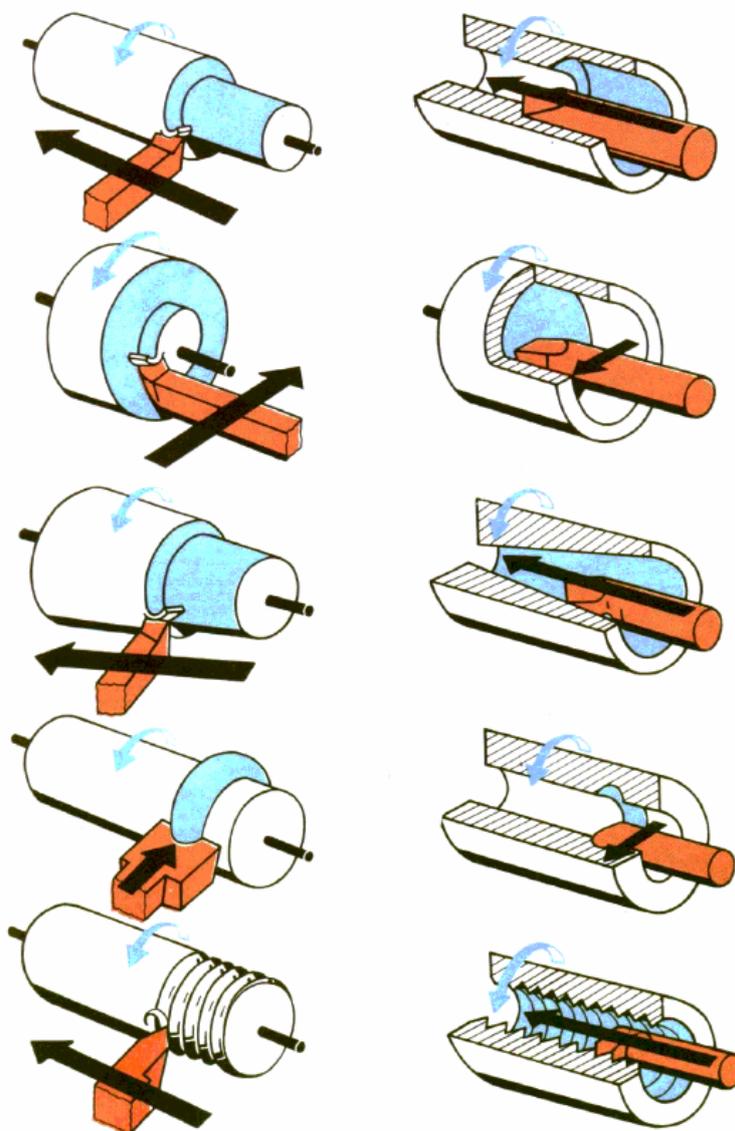


Fig. 10 - Formas de torneamento.

O torneamento é a combinação do movimento de rotação da peça e o movimento de avanço da ferramenta segundo, normalmente, dois eixos lineares independentes. O eixo Z com a direcção do eixo da árvore da máquina e o eixo X normal ao anterior. Esta solução construtiva permite gerar formas cilíndricas, cónicas e interpolações circulares.

Os centros de torneamento podem ter mais um eixo linear aos outros dois, um ou dois eixos rotativos controlados por CNC [1].

Material de injeção

Os polímeros polipropilenos oleosos ou de cera, são conhecidos há mais de 100 anos. Em 1953, foi descoberta a possibilidade de fabrico de moléculas lineares de polietileno. Natta produziu uma mistura adicionada com catalisador, que permitiu a obtenção de polipropileno com boa estrutura regular. Este polímero tem um alto grau de ordem e de cristalinidade.

Em 1990, Hilmont introduziu um novo processo. A considerável melhoria das propriedades permite um novo campo de aplicações que melhoram, o impacto a baixas temperaturas, melhor processamento, superfícies mais suaves. O polipropileno substitui os polímeros convencionais numa multiplicidade de aplicações.

Esta classe de material é o mais consumido no mundo, cerca de 7 milhões de toneladas por ano, ocupa o terceiro lugar na classificação de plásticos de maior comodidade [4].

Neste projecto específico foi escolhido para injectar o molde, o termoplástico APPRYL 3060 MN5 da Atofina, com as seguintes características:

Propriedades Mecânicas
$\rho = 0.89832 \text{ [g/cm}^3\text{]}$
$C_p = 2618.6 \text{ [J/Kg}^\circ\text{C]}$
$\nu = 0.392$
$K = 0.1762 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$
$E = 1340 \text{ E6[MPa]}$

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do PP Appryl 3060 MN5.

O material escolhido recomenda, para um bom processamento, uma temperatura de injeção mínima de 200 [°C] e máxima 260 [°C], tendo-se optado uma temperatura de 230 [°C]. O material apresenta uma variação do volume específico com a temperatura, de acordo com o gráfico da figura 10. A contracção linear varia entre os 1,192%. e 1,227%.

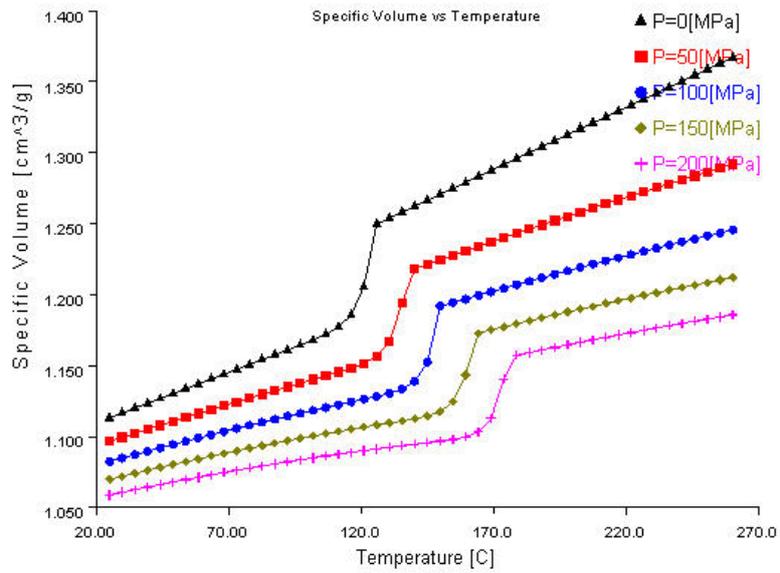


Fig. 11 - Volume específico em função da temperatura.

O material apresenta uma variação das propriedades com a temperatura e com a taxa de corte de uma forma não linear. No que diz respeito à viscosidade segue o seguinte comportamento, ver figura12.

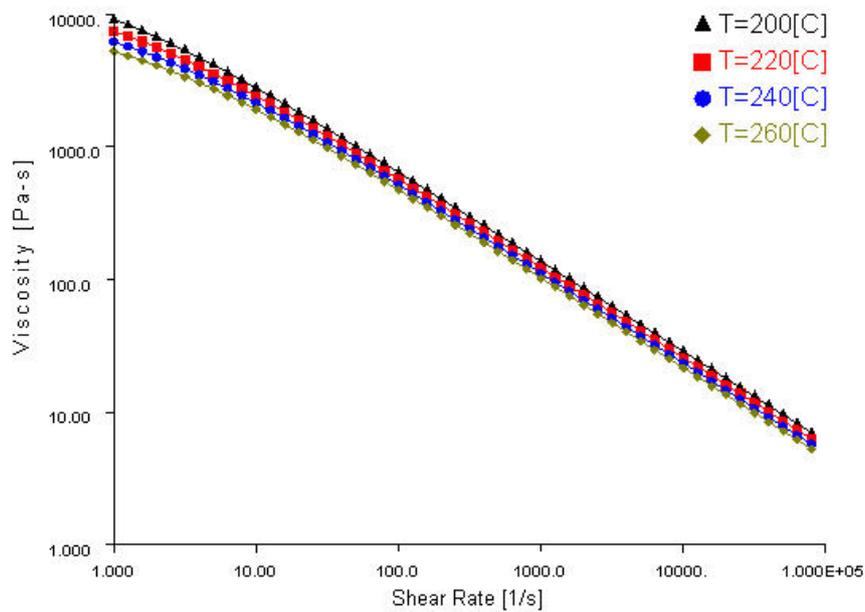


Fig.12 - Viscosidade em função da taxa de corte.

Definição do produto a obter

A definição do produto a obter, teve em conta os limites de processamento da máquina de injeção existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) para a produção das peças em plástico. A máquina tem um limite de massa de injeção de 12 [g] e o molde estará constrangido pelas dimensões máximas de largura e altura 100*130 [mm].

O produto definido foi um protector de tomadas, incluído na categoria de segurança, para que as crianças não introduzam os dedos nas tomadas eléctricas, e ainda uma chave para poder retirar esses mesmos protectores ver, figura 13.

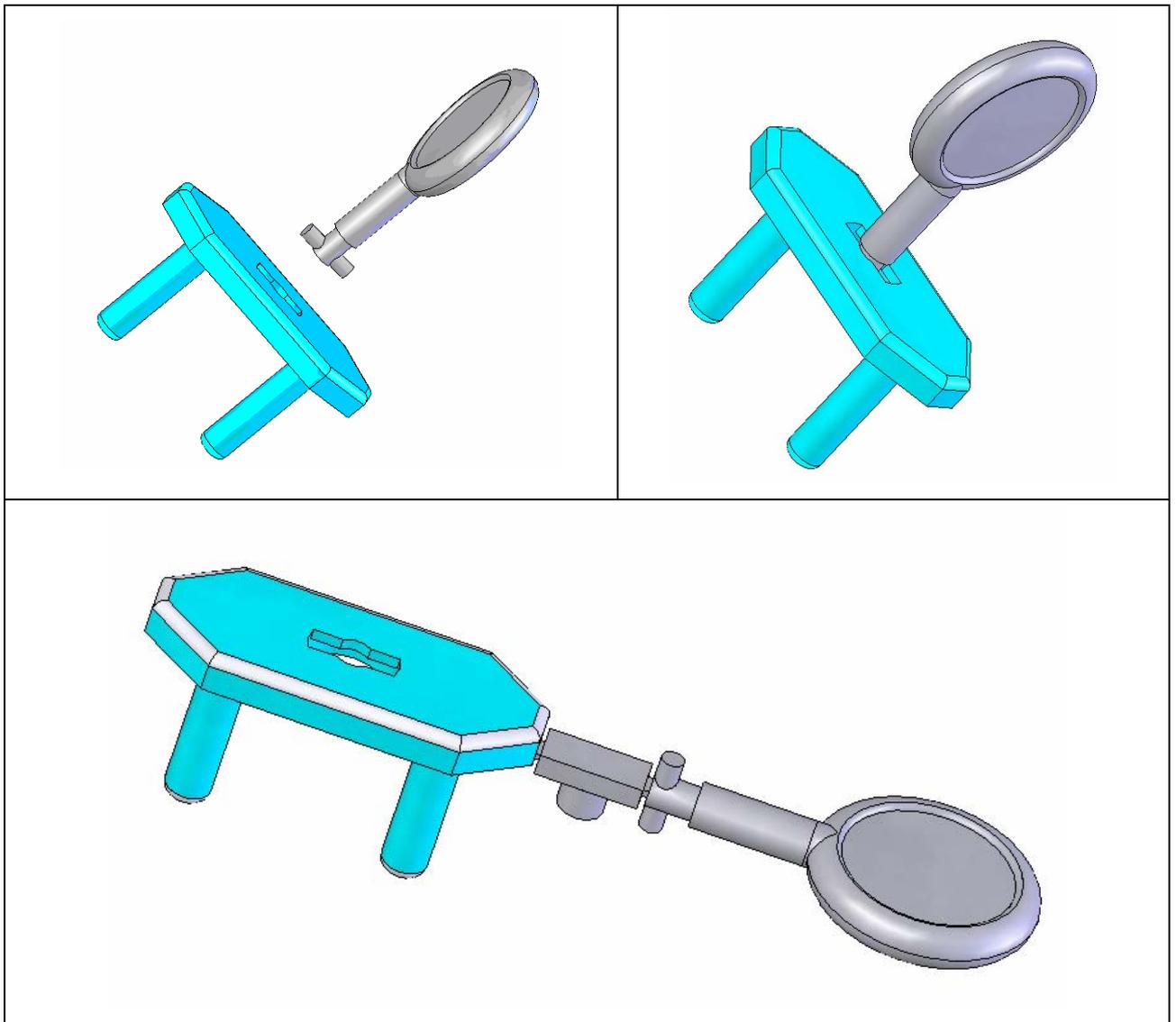


Fig. 13 – Conjunto completo a produzir num ciclo de moldação.

O objectivo deste trabalho passa pela definição simultânea das duas peças, aquando de um ciclo de moldação. Esta característica económica é responsável pela definição de uma zona moldante desequilibrada, pelo facto de não apresentar características de simetria geométrica e material.

A chave deverá possuir uma massa de 1.02 [g], um volume de 1144,2 [mm³] e uma área projectada aproximada de 994,5 [mm²].

O protector das tomadas deverá ter uma massa de 1.5 [g], um volume de 1688,73 [mm³] e uma área projectada de 1518,52 [mm²].

O sistema completo, gito, canais de alimentação e as “gates” deverá ser responsável pela massa de 4,74 [g], um volume de 5330,37 [mm³] e uma área projectada de 3770,23 [mm²].

Condições de processamento

Para que o processo de injeção seja o mais correcto, a peça não deverá ter nenhuma marca na superfície, afim de agradar visualmente ao cliente.

Foram assim escolhidas as condições que à partida poderão conferir o procedimento mais adequado, ou seja, uma temperatura de injeção de 230 [°C], temperatura do molde de 40 [°C], e uma duração de enchimento de 1.216 [s].

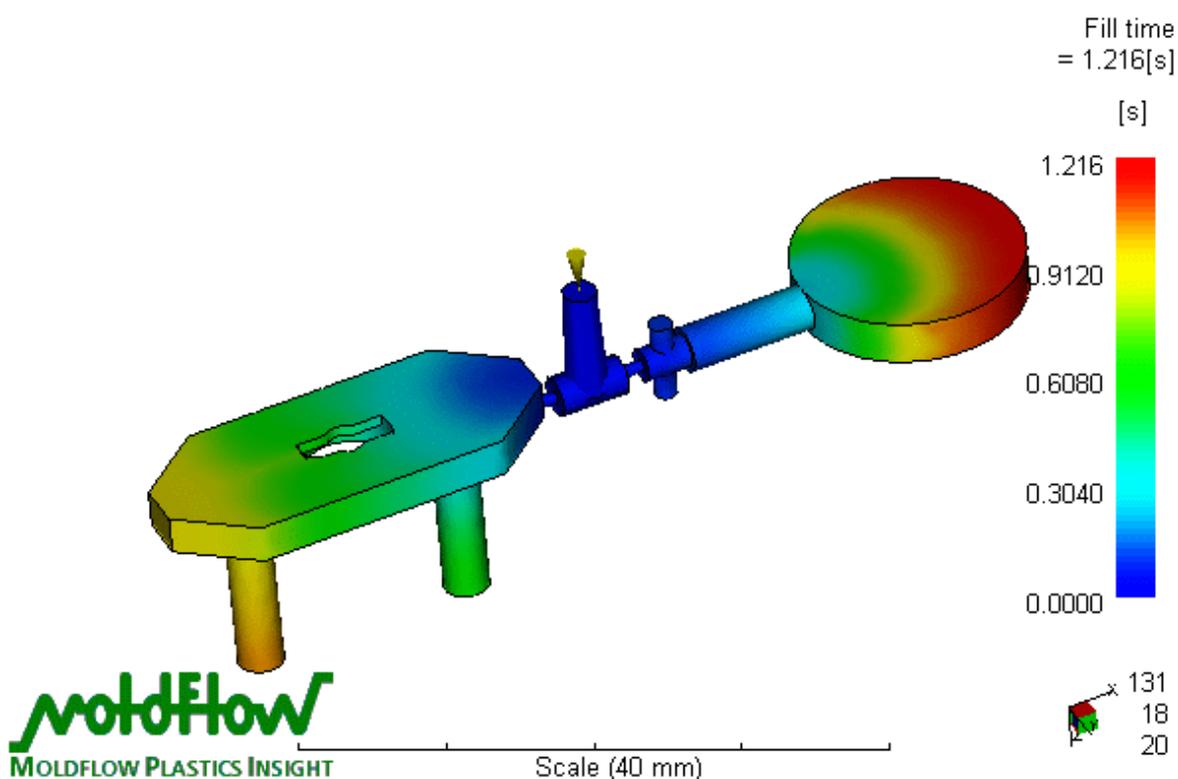


Fig.14 - Tempo de enchimento.

A contracção da peça é determinada pela pressão, ou seja, uma pressão elevada provoca sobre empacotamento, uma pressão baixa provoca marcas na superfície (chupados ou vazios). Se a pressão não for mantida tempo suficiente pode provocar elevados níveis de contracção. Para que o processo de injeção seja efectuado segundo as condições, será necessária uma pressão máxima de 40 [MPa], ver figura 15.

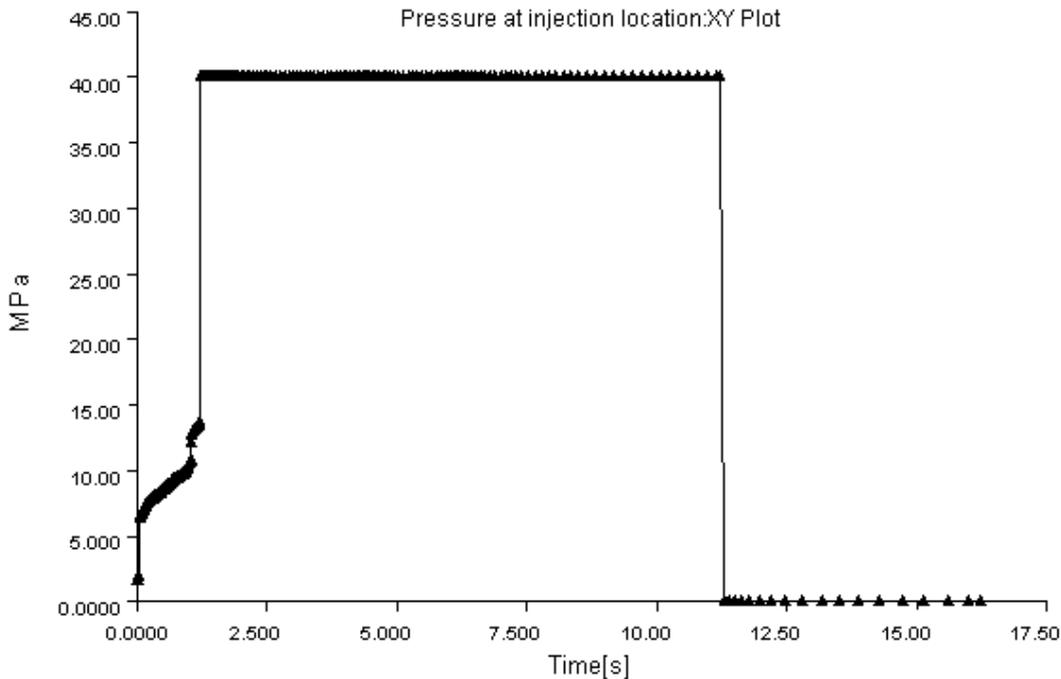


Fig.15 - Pressão ao longo do tempo resultante da simulação.

O ciclo de produção é o intervalo de tempo transcorrido para completar uma operação de injeção e obter a peça desejada. O processo de injeção é dividido em 3 fases. Numa primeira fase, verifica-se o enchimento durante 1.216 segundos, a uma temperatura de 230 [°C], a caudal constante e a pressão vai aumentando até atingir os 10 [MPa]. Ao atingir 99% de volume de material existente na cavidade, dá-se passagem a passagem do estado de caudal constante para pressão constante. Na segunda fase, fase de empacotamento, é mantida uma pressão constante de 40 [MPa] durante 10 [s], para evitar marcas na superfície das peças a obter. A última fase corresponde ao arrefecimento e extracção. Nesta fase dá-se o arrefecimento global da peça, serão necessários cerca de 5 [s]. A pressão vai diminuindo progressivamente até zero e ai se manter enquanto é arrefecida.

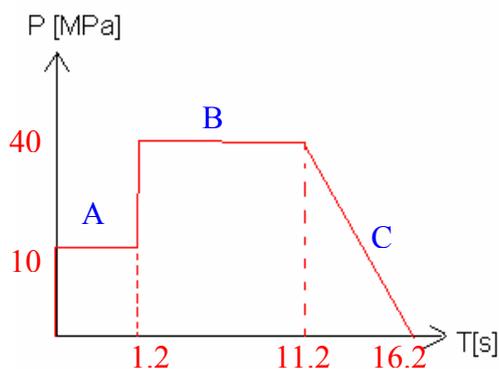


Fig.16 - As 3 fases do processo de injeção na máquina do LTM.

Simulação do enchimento

Simulação do MolFlow

Nesta fase foi utilizado o programa de elementos finitos que permite verificar o processo de enchimento dentro da cavidade do molde. Este programa foi utilizado para simular o enchimento do molde para obter as peças pretendidas. A simulação é dividida em três fases: pré-processamento, análise e pós-processamento.

Pré processamento

Nesta fase é criada a geometria da peça, bem como o sistema de alimentação.

Após a criação da geometria, é necessário criar a malha de elementos finitos, não só da peça mas também do sistema de alimentação. Foram utilizados 8520 nós e 44121 elementos do tipo tetraédricos nas peças e elementos de viga nos canais de alimentação. Nos canais de alimentação são elementos com 2 nós e lineares. Nas peças, para simular a parte sólida do material, são usados elementos com 4 nós, tetraédricos com 3 graus de liberdade (temperatura, pressão e velocidade).

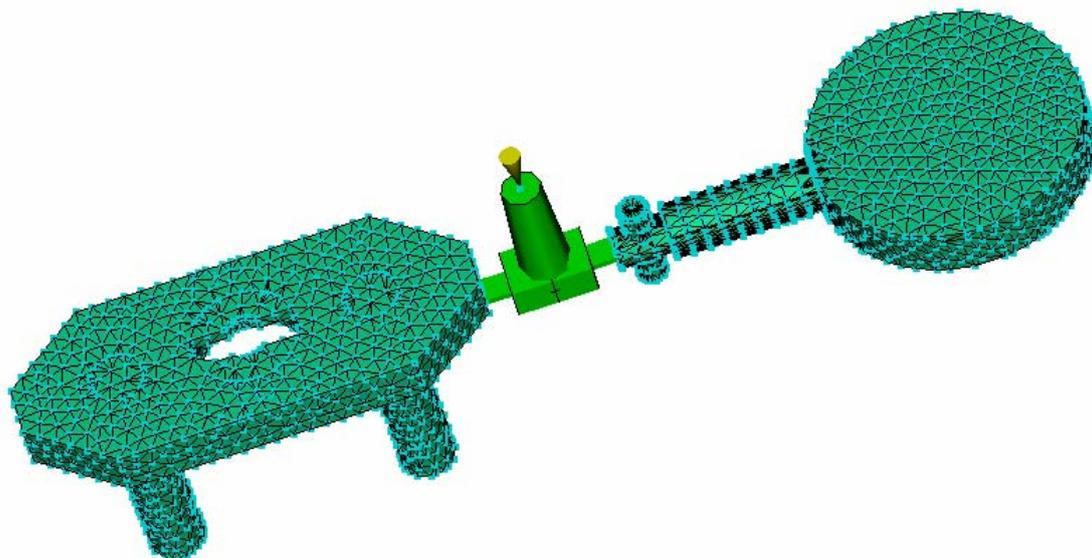


Fig.17 - Malha de elementos finitos.

Pode-se agora definir o material polimérico utilizado Appryl 3060 MN5, as condições de processamento bem como o aço utilizado na construção do molde P20AISI. Define-se a máquina de injeção disponível bem como as características de injeção na máquina.

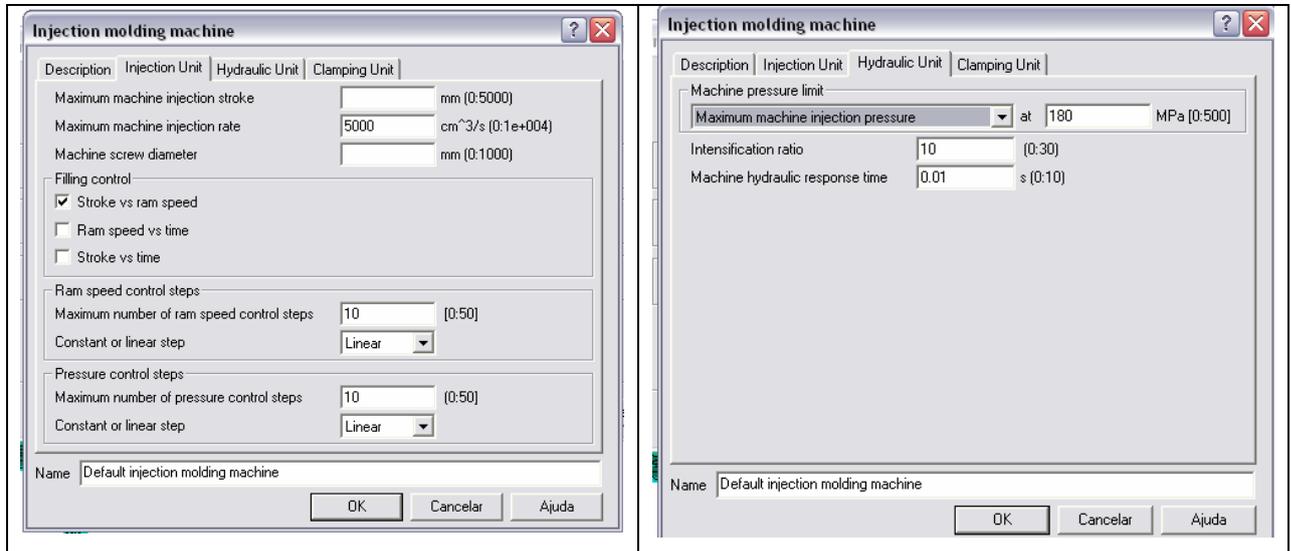


Fig.18 - Características na máquina de injeção.

O aço do molde apresenta uma densidade $7.8 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, uma condutividade térmica de $29 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$, um módulo de elasticidade de 200000 [MPa] , ver figura 19.

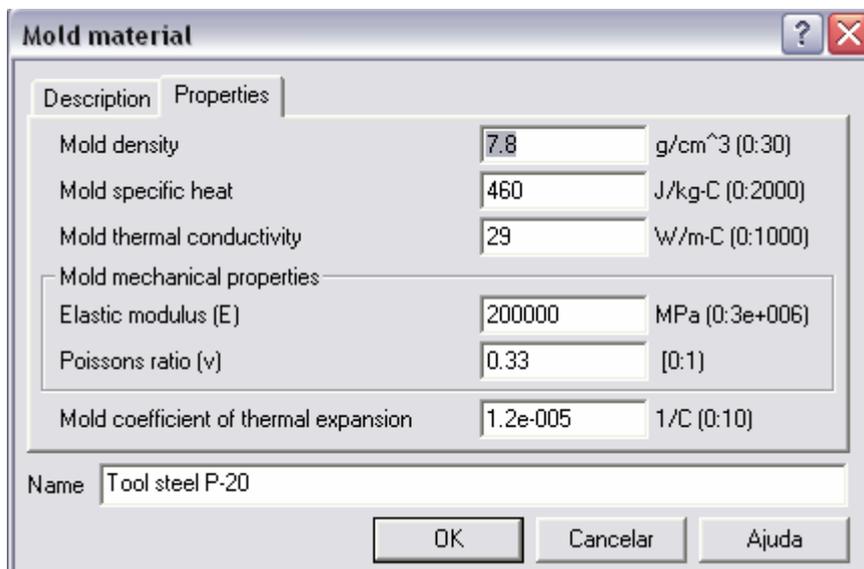


Fig.19 - Características do aço do molde.

Análise

A análise é um processo iterativo, uma vez que este processo é fundamentalmente não linear, para além do material apresentar um comportamento não linear.

A equação que segue o comportamento funcional é o resultado da determinação de dois campos que se influenciam mutuamente. O campo de pressões é determinado através da expressão (1).

$$\nabla(S\nabla p)=Q \quad (1)$$

em que

$$S = \int_0^h Z^2 dz \quad (2)$$

sendo h representativo da espessura do escoamento. A equação que rege o comportamento térmico do plástico fundido o transporte convectivo na perpendicular ao plano do escoamento, bem como aos termos de inércia.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) + \eta \gamma = \rho c p \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + v_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (3)$$

em que θ representa a temperatura, o η a viscosidade, γ a taxa de corte, ρ a massa específica e cp o calor específico [5].

Pós – processamento

Após a análise de pressão e temperatura é possível retirar conclusões sobre todo o processo de enchimento e empacotamento.

Ao nível dos campos de pressão, verifica-se que o valor máximo instalado na cavidade ocorre para o instante $t = 1.216$ [s]. o instante de maior solicitação bórica sucede no final do enchimento.

Na figura seguinte, apresenta-se os resultados dos campos de pressão instalados durante o processo, para os instantes 0.2411 [s], 0.7251 [s], 1.217 [s], 7.286 [s] e 16.216 [s].

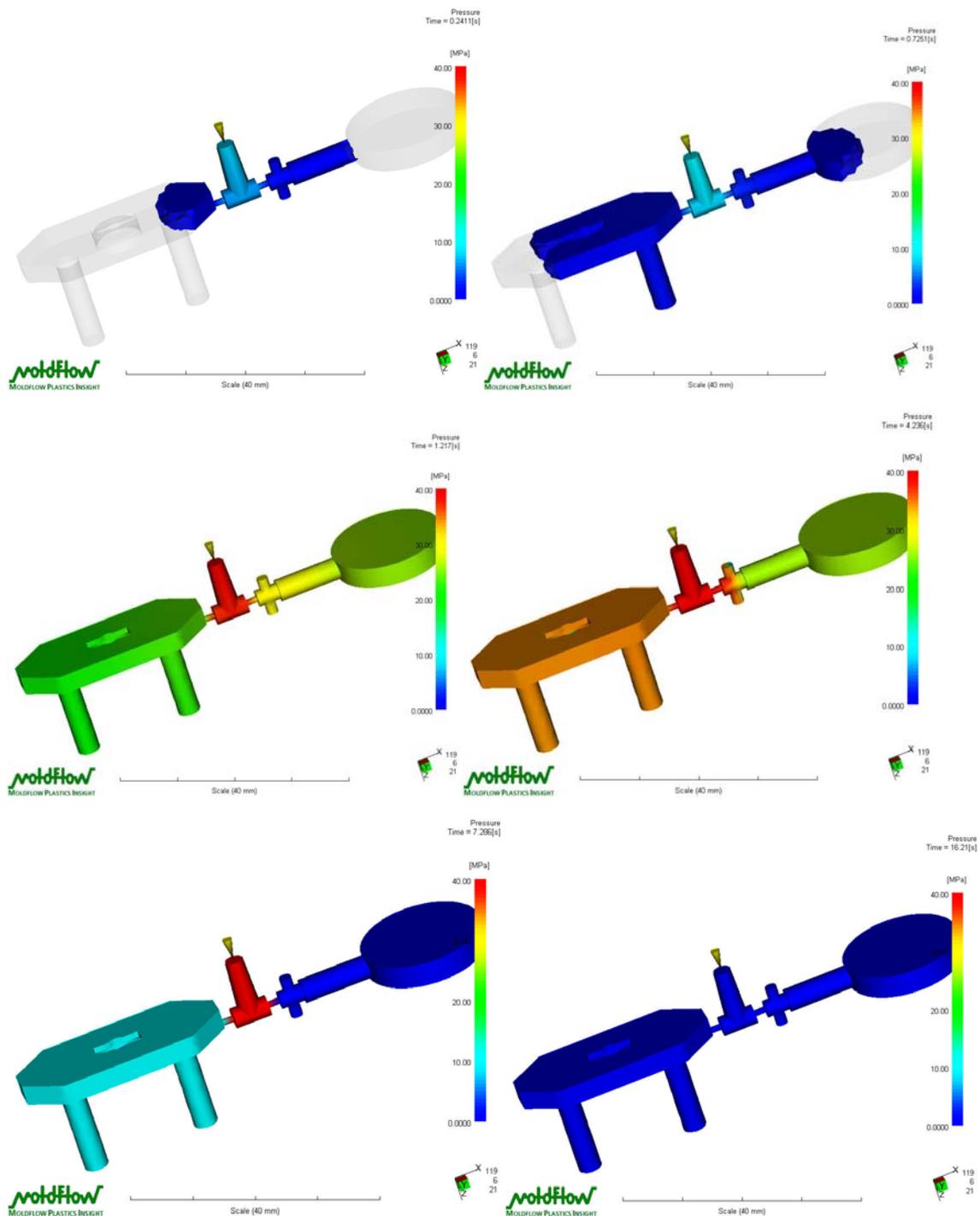


Fig. 20 - Campos de pressão.

A pressão na frente de escoamento é sempre nula, enquanto que a pressão a montante será função da pressão instalada e programada na máquina.

Como resultado da pressão instalada durante o processo, a máquina será submetida a um esforço de afastamento dos seus pratos proporcional ao valor da pressão em cada ponto. Ao efectuar o integral a todo o domínio da cavidade do campo de pressão, é possível obter a variação do valor da força de fecho dos pratos da máquina.

$$\int_A p dA = F \quad (4)$$

Na figura 21 é apresentada a variação da força de fecho da máquina. O valor máximo é inferior ao máximo admissível pela máquina, a qual possui um valor máximo admissível de 9 [ton].

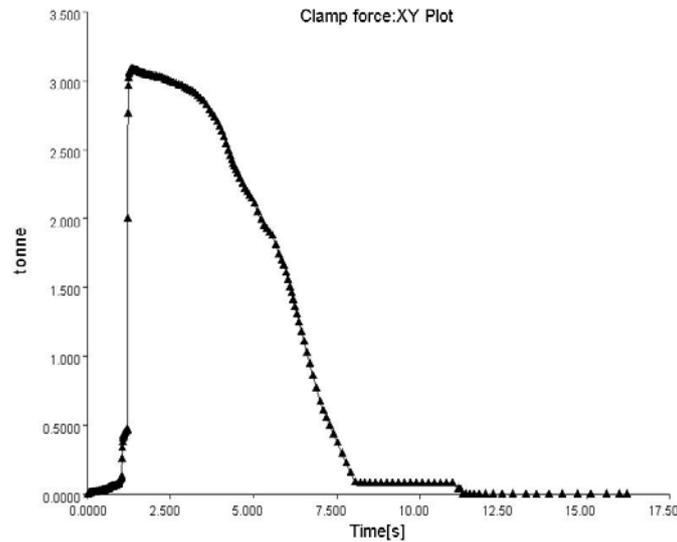
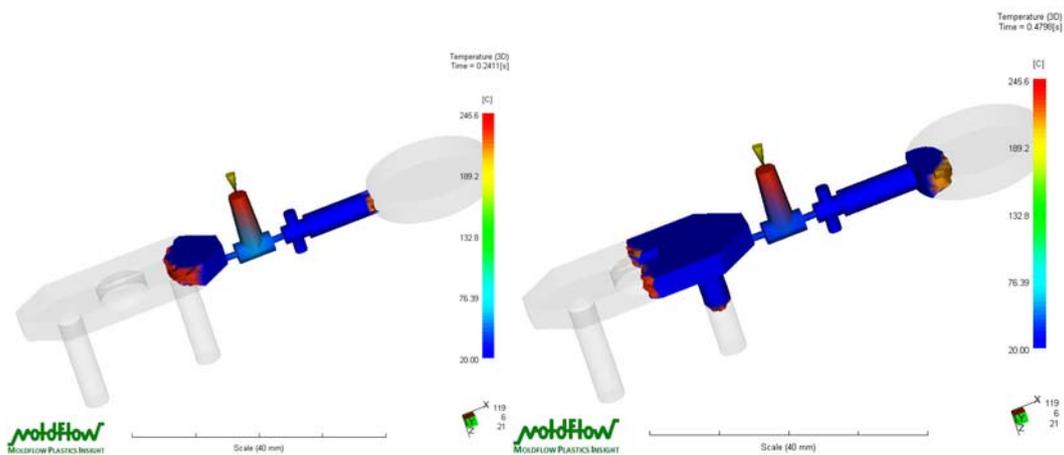


Fig. 21 - Variação da força de fecho da máquina.

Nos campos de temperaturas não existem locais que originam sobreaquecimento, sendo o instante final de enchimento um termo de comparação deste campo. No instante final do enchimento não deverá possuir um gradiente superior a 20 [°C], ver figura 22.

Este facto importa referir, pois será uma indicação de como se irá processar o arrefecimento. A não existência de um elevado gradiente é um indicador da maior uniformidade na contracção da peça [5].



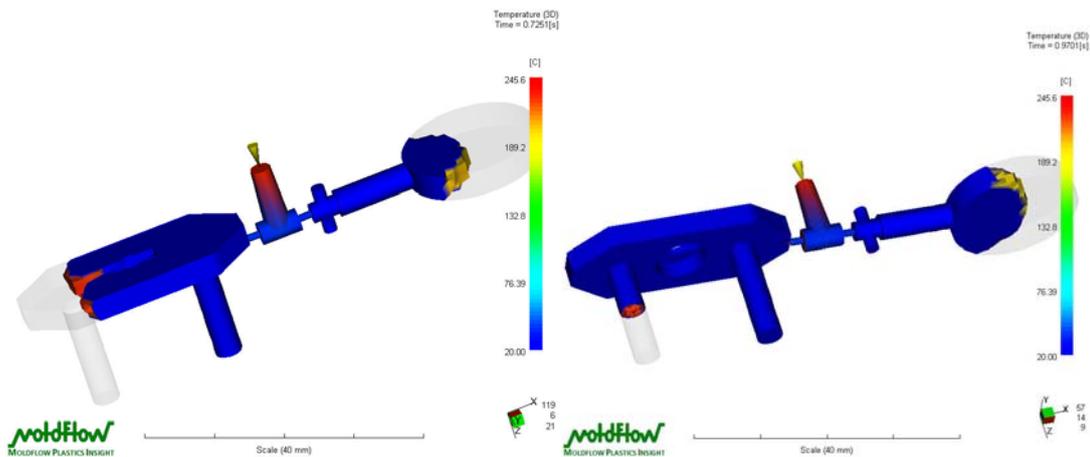


Fig. 22 - Campo de temperaturas.

A contracção volumétrica é primeiramente determinada pela exercida no polímero durante a solidificação. Tipicamente, as zonas mais longe do ataque têm maior contracção porque sentem menos pressão, enquanto que as zonas perto do ataque terão pequenas contracções, uma vez que a ultima pressão vista nesta zona é grande. Inicialmente, o empacotamento a altas pressões força o material a entrar no molde, enquanto o material vai solidificando da frente do escoamento para o ataque, a pressão é trazida para trás, produzindo contracções uniformes [5]. A figura 23 traduz a variação da construção volumétrica em percentagem.

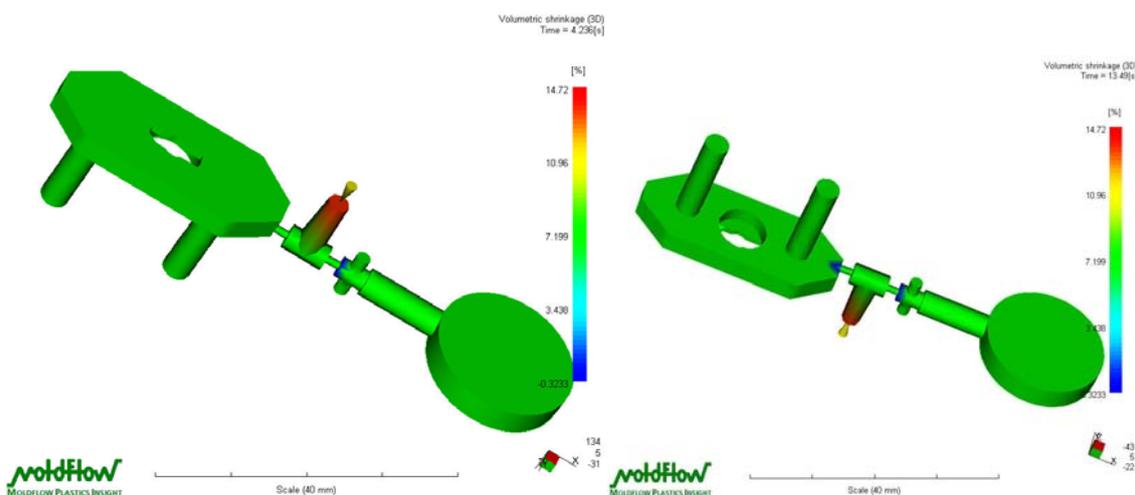


Fig. 23 - Contracção volumétrica (%).

A taxa de corte é definida como sendo a velocidade relativa entre camadas de escoamento [5]. Conclui-se que, devido às pequenas dimensões da ligação do canal de alimentação com a peça, a taxa de corte aumenta nesta zona, pois caso isto não se verificasse o material solidificava, impedindo o deslocamento do fundido, ver figura 24.

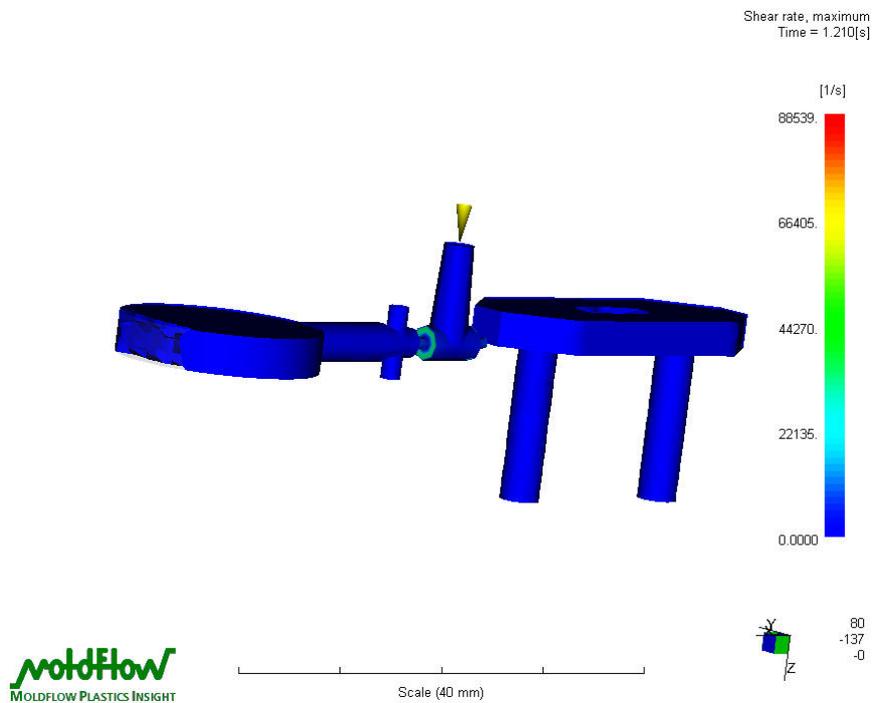


Fig. 24 - Taxa de corte

Simulação estrutural do molde

Na figura 25, estão representadas os diferentes elementos que constituem o molde a 3D, dos quais se destacam o anel de centragem, a cavidade, a bucha, os calços e a placa de aperto da extracção.

A placa dos extractores e a placa de aperto dos extractores, apenas asseguram o efeito cinemático do molde, não sendo utilizados na análise estrutural.

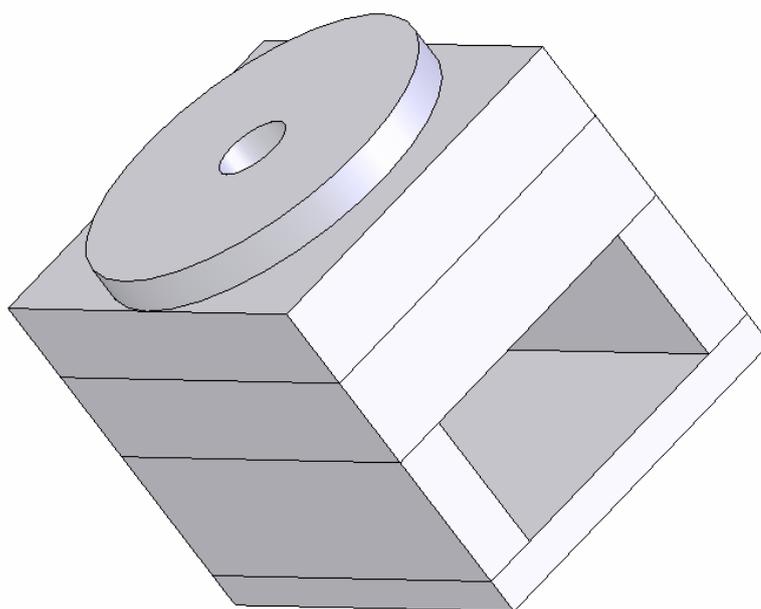


Fig. 25 - Molde a 3D.

Esta análise foi feita em função do nível e distribuição da pressão, tendo em conta as seguintes condições de fronteira: extremidades fixas (placa de aperto da extracção e a bucha) e superfícies de contacto entre a cavidade e a bucha. O campo de pressões utilizado foi o obtido na simulação de enchimento no instante crítico $t = 1.216$ [s]. Para um cálculo mais aproximado do real usaram-se diferentes pressões, ver figura 26, para a cor vermelha 10 [MPa], para a azul 9 [MPa], para a verde 6 [MPa] e para o cinzento 5 [MPa].

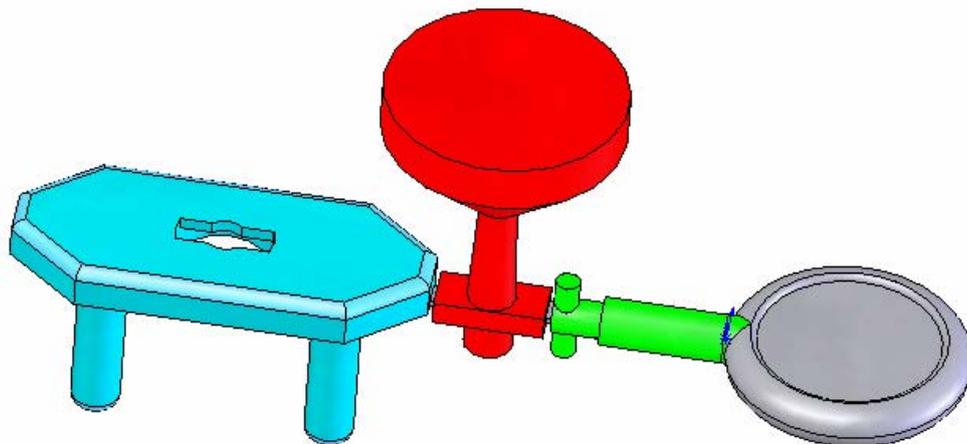


Fig.26 - Diferentes pressões de análise.

Depois das condições de fronteira e o campo de pressões, o próximo passo foi a malha de elementos finitos, sendo constituída por 53120 elementos e 79023 nós, ver figura 27. Os elementos utilizados são tetraédricos parabólicos, possuem 3 graus de liberdade (u_x , u_y , u_z), com funções de interpolação parabólicas com 10 nós por elemento. Na figura 28 pode ser observada a forma do elemento parabólico.

Model name: analise_estrutural
Study name: Estrutural
Mesh type: Solid mesh

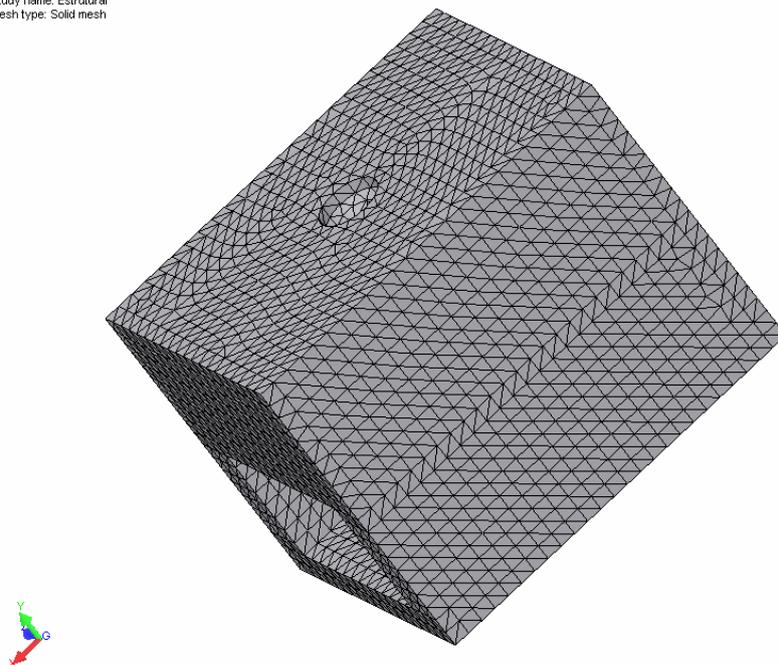


Fig. 27 - Malha de elementos finitos.

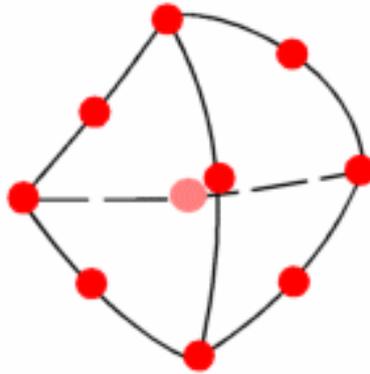


Fig. 28 – Elemento parabólico.

O valor máximo da tensão de von Mises é de 36,9747 [MPa], valor relativamente pequeno quando comparado com o do material utilizado na fabricação do molde P20, que apresenta um limite de tensão admissível de 80 [Kg/mm²], correspondendo a cerca de 785 [MPa].

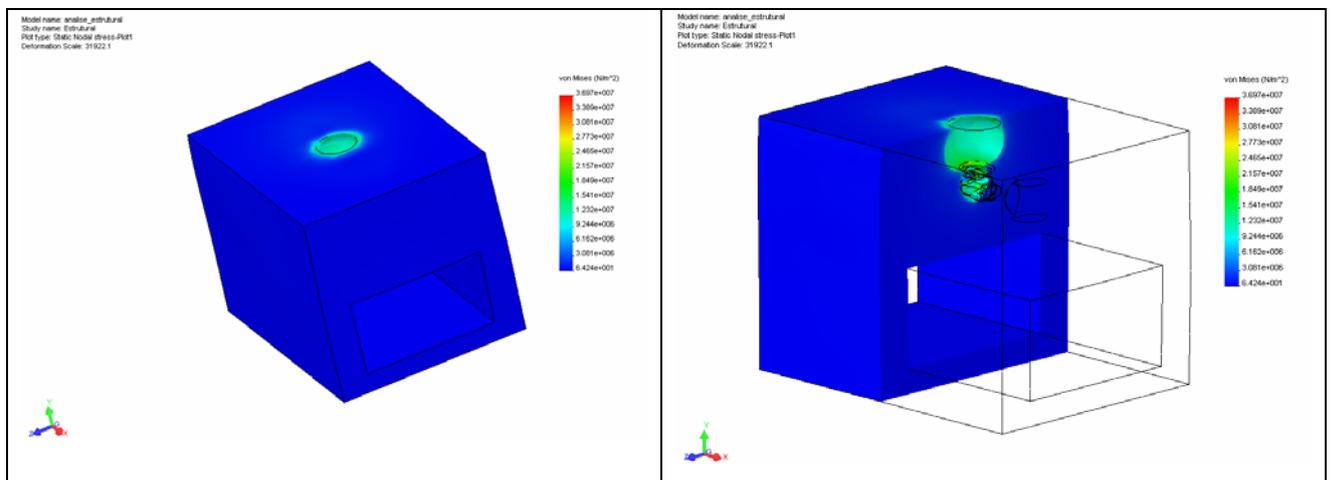


Fig. 29 - Tensões de von Mises.

O campo de deslocamentos é muito importante pois deste valor depende o material e a formação de rebarbas. Para que isto não aconteça, o valor do deslocamento não deve ser superior a 0.02/0.03 [mm].

Como podemos ver na figura, o valor máximo é de 0.000407946 [mm], logo não deverá haver fugas de material nem formação de rebarba.

Model name: analise_estrutural
Study name: Estrutural
Plot type: Static displacement-Plot1
Deformation Scale: 31922.1

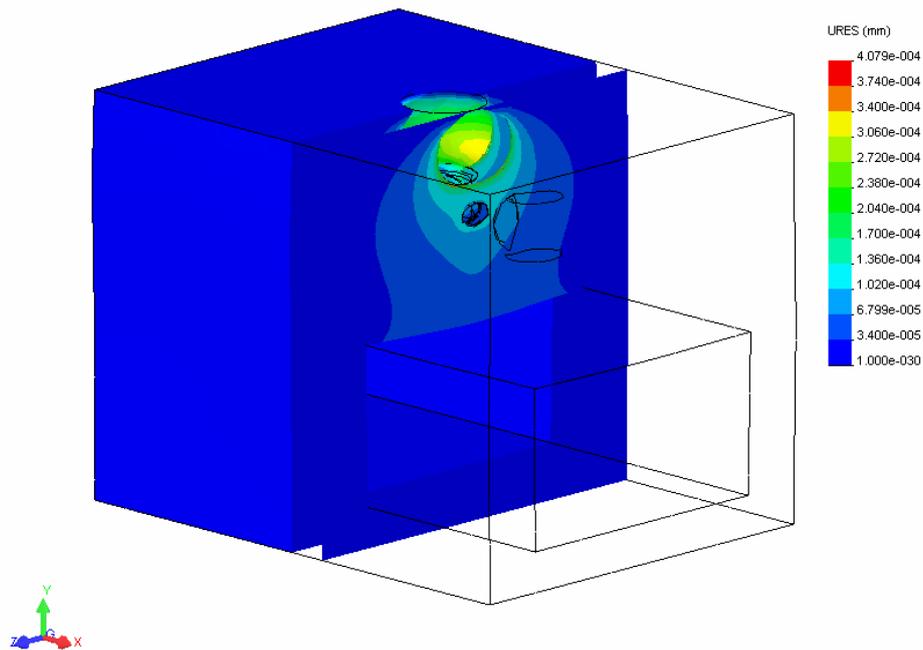


Fig. 30 - Campo de deslocamentos.

A deformada do molde, ver figura 31, tem um ligeiro empeno, mas como o valor do deslocamento é muito pequeno, não haverá abertura do molde nem ruptura.

Model name: analise_estrutural
Study name: Estrutural
Plot type: Deformed shape-Plot1
Deformation Scale: 31922.1

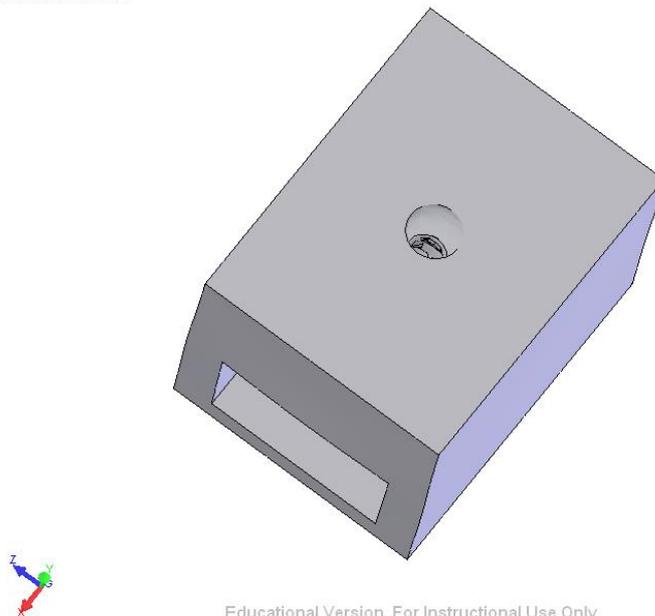


Fig.31 - Deformada do molde.

Simulação térmica do molde

Execução do molde em SolidWorks

Desenharam-se as diferentes peças que constituem o molde, anel de centragem, cavidade, bucha, calços, placa de aperto da extracção, placa dos extractores e placa de aperto dos extractores, e as duas placas de aperto da máquina de injeção que possuem os canais de arrefecimento do molde.

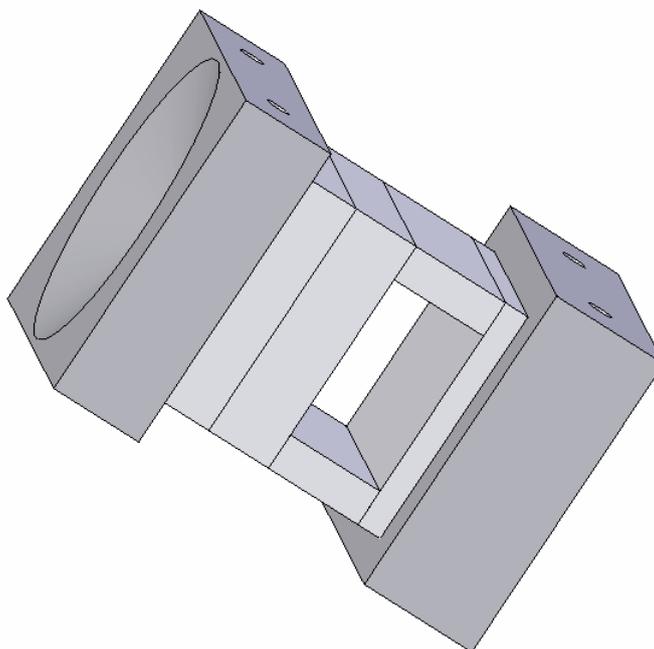


Fig. 32 - Molde com as placas da máquina de injeção.

Análise térmica utilizando o Cosmos Works

Esta análise foi feita tendo em consideração o campo obtido na simulação do escoamento relativamente às temperaturas, estando presentes vários processos de transferência de calor, como convecção natural, forçada e radiação.

As temperaturas foram obtidas na simulação de enchimento no instante mais crítico ($t = 1.216$ [s]), usaram-se diferentes temperaturas para um cálculo mais exacto, ver figura 33, para a cor vermelha 235.5 [°C], cor azul 230 [°C], cor verde 225 [°C] e cor cinzenta 200 [°C].

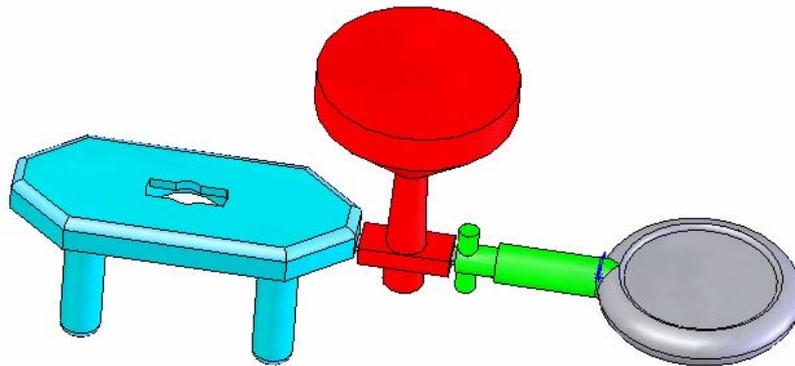


Fig. 33 - Diferentes temperaturas para a análise térmica.

Considerou-se para a convecção natural $\alpha = 10[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ e $T = 20 [^\circ\text{C}]$, para a convecção forçada (admitindo que o refrigerante é água) considerou-se $\alpha= 30 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ e $T = 10 [^\circ\text{C}]$, para a radiação considerou-se uma emissividade de 0.56 e o factor de forma igual a 1. Considerou-se convecção natural e radiação em todas as faces à excepção das extremidades que se consideram adiabáticas.

Após aplicar os diversos factores, o próximo passo é a malha de elementos finitos, sendo constituída por 79530 elementos e 118473 nós, ver figura 34. Os elementos são de forma tetraédricos parabólicos, com 10 nós por elemento e 1 grau de liberdade por nó (temperatura).

Model name: analise_termica
Study name: Análise Térmica
Mesh type: Solid mesh

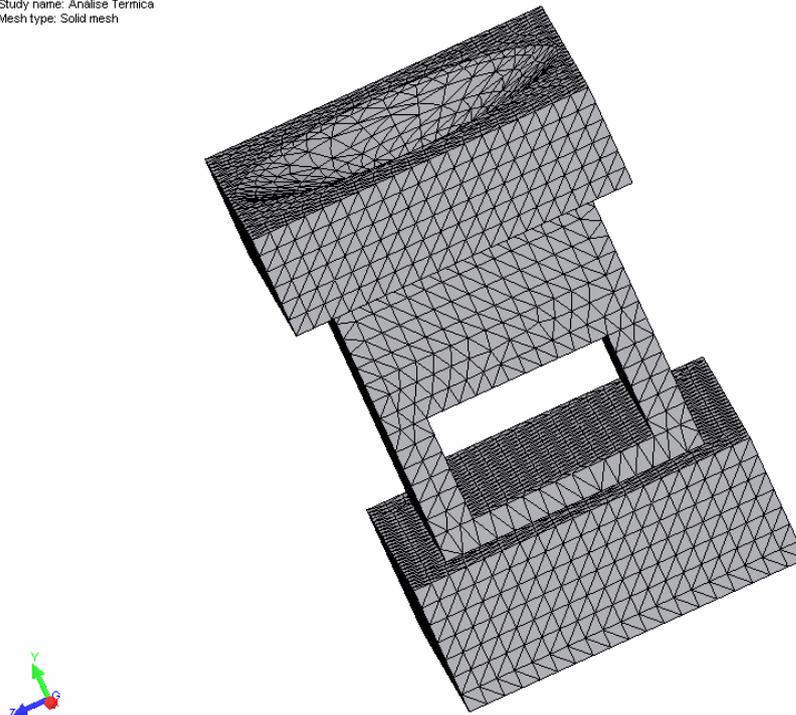


Fig. 34 - Malha de elementos finitos.

Fez-se então a análise térmica e verificou-se que a temperatura e o fluxo de calor tinham valores aceitáveis.

O valor máximo da temperatura é igual ao imposto no campo de temperaturas 233.5 [°C], como podemos ver na figura 35, a temperatura na bucha e na cavidade varia entre 15 a 20 [°C].

Model name: analise_termica
Study name: Análise Térmica
Plot type: Thermal-Plot1
Time step: 1

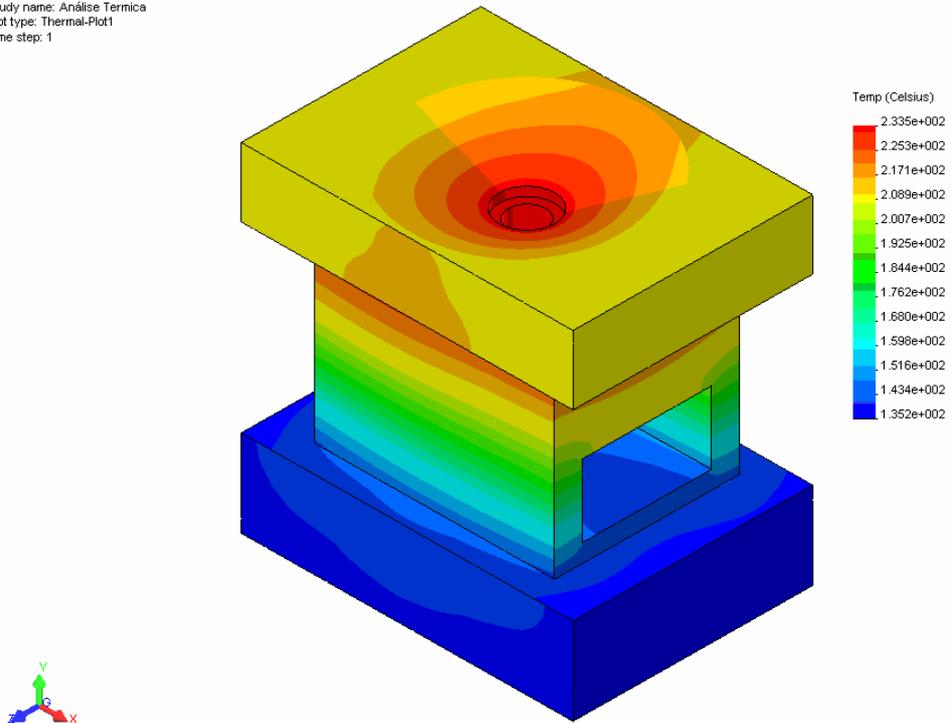


Fig. 35 - Campo de temperaturas nos nós.

Model name: analise_termica
Study name: Análise Térmica
Plot type: Thermal-Plot1
Time step: 1

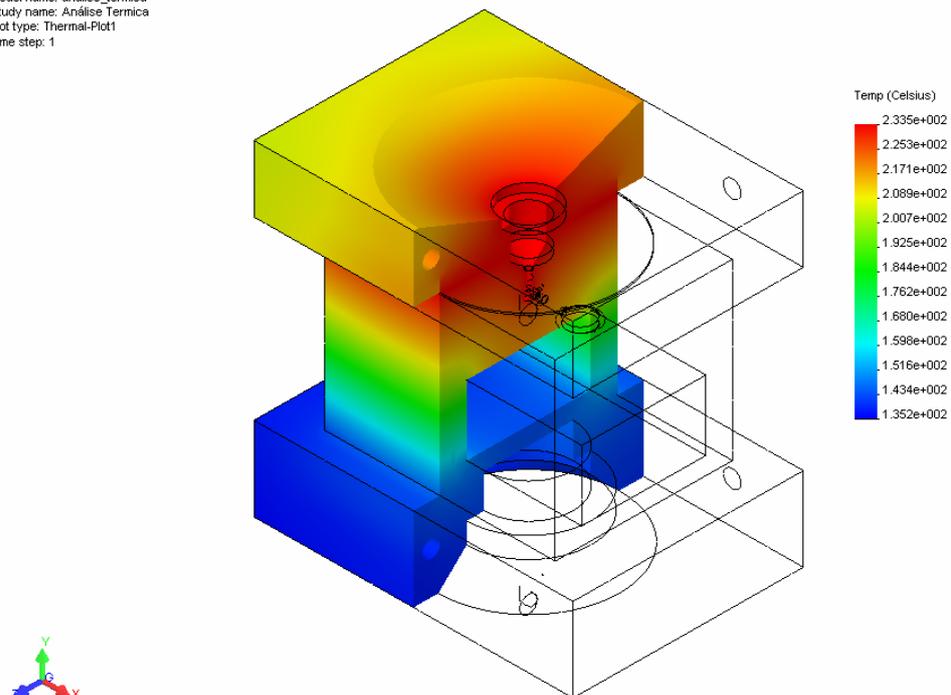


Fig. 36 - Campo de temperaturas nos nós em corte.

A maquinagem do molde

Ciclos de vida mais curtos do produto tornam a produtividade e a flexibilidade de todo o processo de manufactura essencial para se obter uma boa economia total. As máquinas ferramenta estão-se a tornar cada vez mais sofisticadas, a fim de executarem aplicações com velocidades e avanços grandes e com muita precisão. Os aços pré-endurecidos e os aços ferramenta endurecidos são usados com mais frequência assim como outros materiais difíceis de maquinar. Todas essas exigências contribuem para que se faça uma escolha e aplicações mais cuidadosas dentre as ferramentas as mais capazes, o que é decisivo para uma produção bem sucedida.

A combinação otimizada de ferramentas específicas e tecnologias de aplicação avançada é fundamental para a obtenção da melhor economia de fabricação [3].

Tempo e preço do molde

Recorrendo à matéria-prima existente no armazém do Laboratório Oficinas de Mecânica (LOM) e com base nos desenhos previamente projectados procedeu-se à maquinagem do molde para a obtenção do produto final.



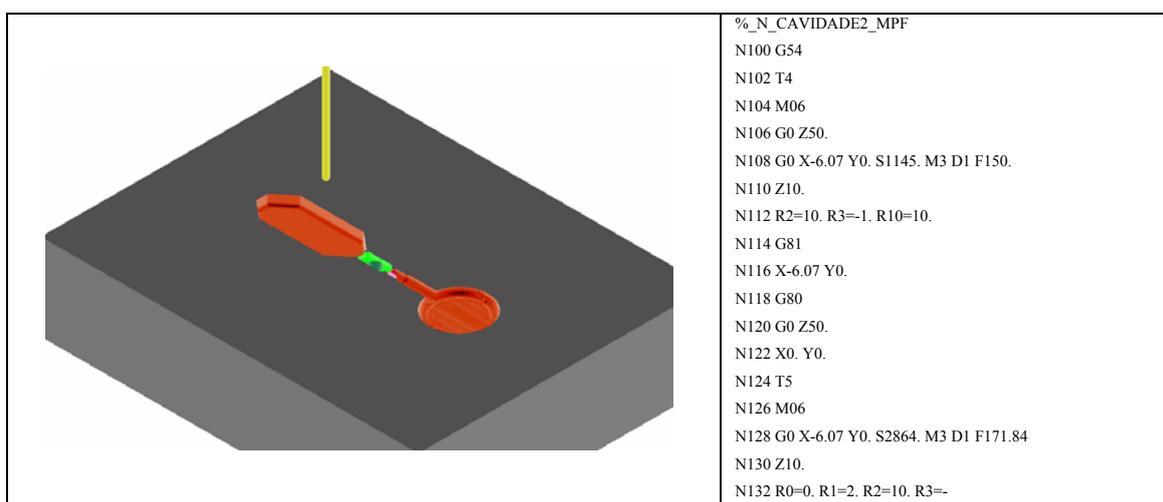
Fig. 37 - Máquinas do LOM.

Na elaboração do molde procedeu-se à maquinagem das diferentes peças a utilizar no molde. Inicialmente recorreu-se ao Laboratório Oficinas de Mecânicas para colocar os blocos em esquadria, ver figura 39, para depois os poder maquinar na máquina CNC existente no Laboratório de Fabricação Assistida por Computador (LFAC), ver figura 38.



Fig. 38 - CNC do LFAC.

No Laboratório de Fabricação fez-se a programação da maquinagem das diferentes peças de forma a obter as peças conforme o estabelecido previamente no projecto, ver figura 39.



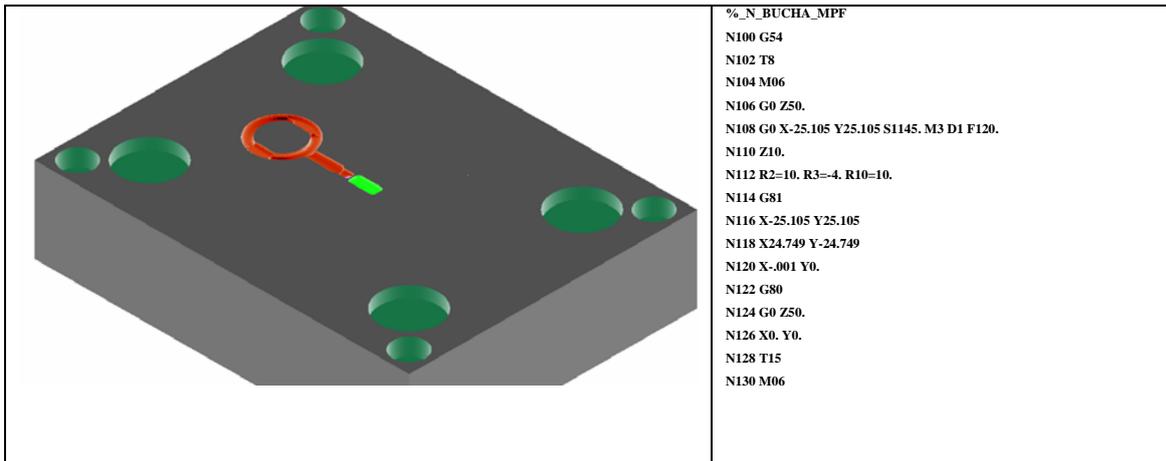


Fig. 39 - Exemplo de programação da maquinagem da bucha e cavidade.

Há peças que pela sua geometria necessitam de ser maquinadas no torno existente no laboratório, ver figura 40.



Fig. 40 - Torno do LOM.

O processo de montagem e verificação do molde fez-se com o auxílio das ferramentas existentes no Laboratório Oficinas de Mecânica.

Após o molde estar conforme o projecto fez-se a aplicação do molde na máquina de injeção, existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica, ajustaram-se os parâmetros e procedeu-se à injeção, ver figura 41.



Fig. 41 – Máquina de injeção do LTM.

Função a executar	Local de realização	Tempo de actividade	Preço/h *
Preparação dos blocos em esquadria	LOM	5h	25€
Programação CAM	LFAC	3h	30€
Maquinagem na CNC	LFAC	6h	30€
Torneamento de peças	LOM	6h	25€
Verificação	LOM	4	25€
Montagem do molde	LOM	5	25€
Injecção	LTM	2	

* Preço por hora que os laboratórios da ESTiG praticam em actividades para o exterior

Total do preço de maquinagem = 770 €.

Matéria-prima, foram utilizados 10 [Kg] de aço, a um preço de 1€/Kg, bronze 2.50 €, foram necessários 20 parafusos M6 com um preço de 0.20€/unidade. Total de custos 787.5€.

O produto final

Depois de ajustar todos os parâmetros da máquina de injeção com o respectivo molde obteve-se o produto final, ver figura 42.

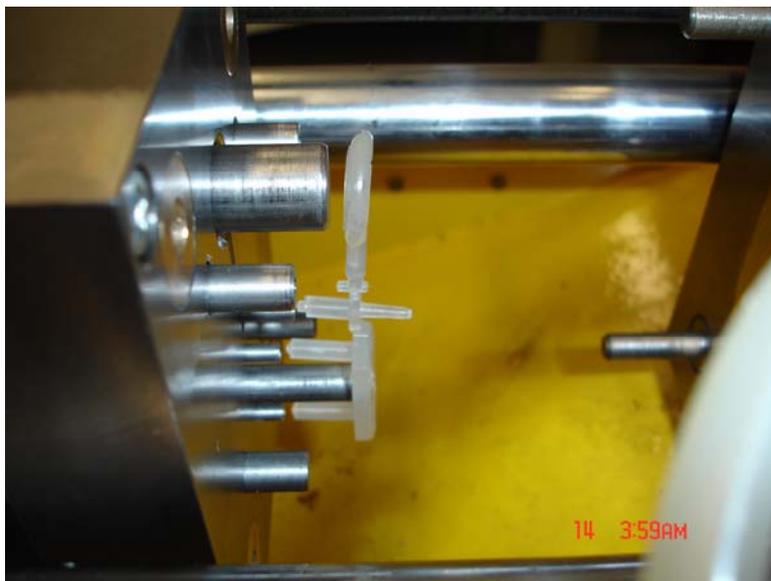


Fig. 42 – Peça na máquina de injeção.

As peças estão de acordo com o projecto e prontas para serem utilizadas, ver figura 43.

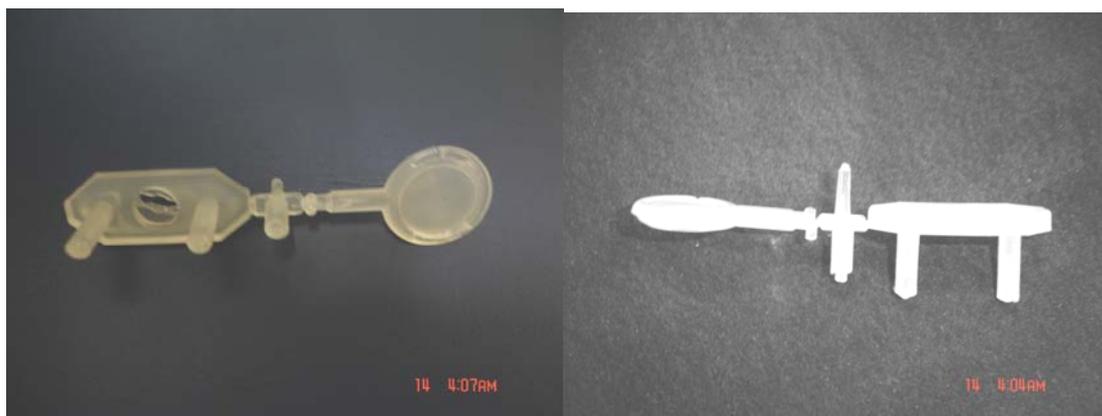


Fig. 43 – Produto final

Conclusão

Com a realização deste projecto, visto ter uma grande componente prática, permitiu ultrapassar várias etapas e revolver os vários problemas iniciais, relacionados com as dimensões do molde, a peça a obter e o peso desta, porque estes parâmetros estão relacionados com as características da máquina de injeção e com os meios disponíveis nos laboratórios.

A familiarização com os códigos de elementos finitos e o aperfeiçoamento da utilização foram melhorados tendo em vista o grande auxílio que eles prestam para os projectistas. Foi possível simular tudo antes do produto final, o que permite eliminar irregularidades e otimizar a sequência de produção.

Espero que este produto final seja aperfeiçoado e que possa ser utilizado em nossas casas por todos aqueles que o necessitarem.

Referências bibliográficas

[1] www.centimfe.com

[2] Centimfe, “Manual do projectista para moldes de injeção de plásticos”

[3] Sanvik Coromant, “Fabricação de Moldes e Matrizes”

[4] Caleiro, Carla; projecto de estágio profissional

[5] Piloto, Paulo; “Moldes para plásticos – abordagem estrutural, térmica, reológica e de escoamentos”.

[6] Caleiro, Carla; Tecnologia Mecânica II

Anexos