



Projeto

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

Fabrico e Desenvolvimento de Produtos Específicos
Termoformados

Luís Pedro Marcelino e Sousa

Leiria, 22 de Novembro de 2013



Projeto

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

Fabrico e Desenvolvimento de Produtos Específicos
Termoformados

Luís Pedro Marcelino e Sousa

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Novembro de 2013

À Minha Família

Agradecimentos

A concretização deste trabalho contou com a colaboração, orientação e incentivo de várias pessoas, às quais gostaria de expressar publicamente a minha gratidão.

Ao meu orientador de estágio, doutor Carlos Capela, um agradecimento especial pela colaboração prestada na realização deste trabalho, pela sua disponibilidade e pela transmissão dos seus saberes científicos.

À empresa *Sitecna*, meu local de trabalho, faço um agradecimento especial a todos os colaboradores que me acompanham diariamente, tanto da parte administrativa como da produtiva, pelo apoio dado ao longo destes tempos.

Ao Sr. Luís Pombeiro, administrador da empresa, que transmite diariamente otimismo a todos os colaboradores, agradeço fortemente a disponibilidade que demonstrou em facultar máquinas, ferramentas e meios para a realização deste trabalho. A sua experiência, o esclarecimento de dúvidas e a partilha de ideias foram essenciais para o meu conhecimento do processo de termoformação. Agradeço muito a confiança que depositou neste projeto muito específico.

Aos colegas Mário Alves, Paulo Maneta, Miguel Gil, operadores das máquinas de termoformação, que me explicaram pormenores relativos ao funcionamento das mesmas e mostraram sempre disponibilidade para as experimentar.

Ao Engenheiro Carlos Dias, pelo auxílio dado durante a realização dos ensaios mecânicos.

Um agradecimento para todos os professores do Mestrado, pelos seus ensinamentos.

Aos colegas de mestrado, um agradecimento especial ao Nelson Silva e ao Jorge Santos, que me acompanharam mais de perto em trabalhos conjuntos e em partilha de ideias.

A todos os meus amigos que de uma forma ou de outra me ajudaram e apoiaram nesta jornada.

Um forte agradecimento aos meus pais pelo incentivo e ajuda que me deram, e por aquilo que sou hoje.

À minha irmã Rita e ao David pelo estímulo que me levaram a voltar a estudar e a esperança que sempre me deram desde o início.

A todas as pessoas que são importantes para mim e, por vezes, ficaram privadas da minha companhia.

A todos, Muito Obrigado!

Luís Sousa

Resumo

O principal objetivo deste trabalho foi o de aprofundar o conhecimento sobre o processo de fabrico de termoformação e novas soluções construtivas de peças com zonas negativas.

Foi acompanhado passo a passo a conceção de um produto termoformado com formas específicas, que implicaram o recurso a elementos moveis acionados por guias inclinadas, técnica não muito habitual neste processo de fabrico.

Os materiais termoplásticos APET e HIPS utilizados foram caracterizados em termos mecânicos e físicos. Foram realizados ensaios de DMA, ensaios estáticos de tração.

Foi desenvolvido um molde protótipo com elementos móveis com acionamento mecânico e também foram realizados ensaios relativos ao comportamento em serviço do molde protótipo desenvolvido para este trabalho.

Palavras-chave

Termoformação, ensaios estáticos, ensaios DMA, ensaios de tração, estiramento, pregas.

Abstract

The main objective of this study was to deepen the knowledge about the manufacturing process of thermoforming and new construction solutions parts with negative areas.

Was led step by step to develop a product with thermoformed specific forms, which involved the use of slide cams triggered by slanted guides, a technique not very common in this manufacturing process.

Thermoplastic materials APET and HIPS used were mechanically and physically characterized. DMA tests and static tensile tests were done.

A prototype mold with movable elements with mechanical drive were developed and also were conducted tests on the in-service behavior of the same mold.

Keywords

Thermoforming, static tests, DMA tests, tensile tests, stretching, creases.

Índice de Figuras

Capítulo II

Figura 2.1 - Componentes de material termoendurecível de um automóvel

Figura 2.2 - Montagem de aeronave

Figura 2.3 - luvas de latex

Figura 2.4 - pneu

Figura 2.5 - Esquema da cadeia PET

Figura 2.6 - Pré-formas PET para garrafas

Figura 2.7 - Esquema da cadeia PS

Figura 2.8 - Tabuleiro em HIPS

Figura 2.9 - Gráfico tensão – deformação no PS

Figura 2.10 - Gráfico tensão – deformação no HIPS

Figura 2.11 - Artigo rotomoldado

Figura 2.12 - Máquina de rotomoldação

Figura 2.13 - Etapas do processo de Rotomoldação

Figura 2.14 - Máquina de Injeção

Figura 2.15 - Ciclo de moldação

Figura 2.16 - Exemplo de peças injetadas

Figura 2.17 - Etapas do processo extrusão-sopro

Figura 2.18 - Embalagens moldadas por sopro

Figura 2.19 - Algumas peças termomoldadas

Figura 2.20 - Etapas do processo de termoformação

Figura 2.21 - Embalagem para fruta

Figura 2.22 - Máquina termoformadora de grande cadência Illig RDK 90

Figura 2.23 - Máquina termoformadora

Figura 2.24 - Máquina termoformadora *Italproducts*

Figura 2.25 - Etapas do ciclo da máquina termoformadora

Figura 2.26 - Peça automóvel termoformada

Figura 2.27 - Máquina termoformadora *Illig RV74*

Figura 2.28 - Etapas da máquina termoformadora

Figura 2.29 - Encaixe do rolo de matéria-prima

Figura 2.30 - Câmara de pré-aquecimento

Figura 2.31 - Esquema do dispositivo de pré-aquecimento

Figura 2.32 - Estação de aquecimento e seus componentes

Figura 2.33 - Esquema do Aquecimento

Figura 2.34 - Guias de prisão da película

Figura 2.35 - Embalagem de um Ambientador doméstico com blister interior

Figura 2.36 - Blister do interior da embalagem

Figura 2.37 - Ferramenta de Moldação aberta

Figura 2.38 - Avanço do contramolde

Figura 2.39 - Avanço do molde

Figura 10 - Moldação fechada

Figura 2.41 - Corte da moldação fechada

Figura 2.42 - Ferramenta de corte aberta

Figura 2.43 - Sentido da contração

Figura 2.44 - Produto final e desperdício

Figura 2.45 - Estação de empilhamento

Figura 2.46 - Descida do empilhador

Figura 2.47 - Elevação do destacador

Figura 2.48 - Descida do Destacador

Figura 2.49 - Raquete empurrando as pilhas de peças

Figura 2.50 - Molde simples em bucha

Figura 2.51 - Molde simples em bucha com criação de balão

Figura 2.52 - Molde simples em cavidade

Figura 2.53 - Molde simples em cavidade com balão

Figura 2.54 - Atuação de contramolde

Figura 2.55 - Vácuo e compressão

Figura 2.56 - Pregas

Figura 2.57 - Estiramento

Figura 2.58 - Exemplo de formação de pregas

Figura 2.59 - Esquema da formação de pregas

Figura 2.60 - Criação de raios nas arestas e vértices do molde

Figura 2.61 - Moldura sem divisórias

Figura 2.62 - Moldura com divisórias
Figura 2.63 - Contramolde a comprimir pregas
Figura 2.64 - Buchas menos espaçadas
Figura 2.65 - Buchas mais distanciadas
Figura 2.66 - Aspiração e Estiramento
Figura 2.67 - Esquema de funcionamento dos postigos oscilo-batentes
Figura 2.68 - Tabuleiros com peças empilhados
Figura 2.69 - Pormenor do assentamento
Figura 2.70 - Pormenor do Assentamento
Figura 2.71 - Negativos Simples
Figura 2.72 - Desenho de um tabuleiro
Figura 2.73 - Postigos montados no molde protótipo.
Figura 2.74 - Postigos soltos
Figura 2.75 - Tabuleiros vazios arrumados
Figura 2.76 - Tabuleiros com peças e empilhados
Figura 2.77 - Bases de assentamento do tabuleiro

Capítulo III

Figura 3.1 - Amostras utilizadas na determinação das densidades
Figura 3.2 - Balança eletrónica utilizada na determinação das densidades: pesagem das amostras em seco (a) e submersas (b)).
Figura 3.3 - Dimensão do provete em APET para ensaio DMA.
Figura 3.4 - Dimensão do provete em HIPS para ensaio DMA.
Figura 3.5 - Dimensão do provete em APET para ensaio de tração.
Figura 3.6 - Dimensão do provete em HIPS para ensaio de tração.
Figura 3.7 - Módulos de operação de um conjunto DMA: a) compressão/penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tração e e) flexão em três pontos.
Figura 3.8 - Equipamento de ensaios DMA
Figura 3.9 - Máquina de ensaios de tração com provete colocado.
Figura 3.10 - Câmara ambiental utilizados nos ensaios de tração com diferentes temperaturas de ensaio
Figura 3.11 - Máquina Termoformadora Italproducts
Figura 3.12 - Várias gamas da marca *Obo*.
Figura 3.13 - Aspeto do molde após maquinação
Figura 3.14 - Centro de Maquinação CNC

Capítulo IV

Figura 4.1 - Módulo em tração *versus* temperatura para os materiais APET e HIPS.

Figura 4.2 - *Loss modulus versus* temperatura para os materiais APET e HIPS

Figura 4.3 - *Tan Delta versus* temperatura para os materiais APET e HIPS

Figura 4.4 - Curvas típicas de carga *versus* deslocamento para os dois materiais termoplásticos e para a temperatura ambiente.

Figura 4.5 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para os dois materiais termoplásticos e para a temperatura ambiente.

Figura 4.6 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para o material termoplásticos APET e para a temperatura ambiente.

Figura 4.7 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para o material termoplásticos HIPS e para a temperatura ambiente.

Figura 4.8 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para o material termoplásticos Apet e para temperatura de 20, 40 e 55°C.

Figura 4.9 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para o material termoplásticos APET e para temperatura de 20, 40 e 55°C.

Figura 4.10 - Curvas variação da carga máxima e dos valores de extensão correspondentes *versus* temperatura para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS.

Figura 4.11 - Curvas variação da tensão máxima e dos valores de extensão correspondentes *versus* temperatura para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS.

Figura 4.12 - Curvas variação da extensão máxima e dos valores de tensão correspondentes *versus* temperatura para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS.

Figura 4.13 - Peças termoformadas: a) APET, b) HIPS; c) área analisada.

Figura 4.14 - Secções das peças processadas por termoformação: a) transversal; b) longitudinal.

Figura 4.15 - Variação de espessuras nas secções: a) transversal; b) longitudinal.

Capítulo V

Figura 5.1 - Tabuleiro para acondicionar 70 pistões.

Figura 5.2 - Pormenor do assentamento entre tabuleiros

Figura 5.3 - Zonas negativas

Figura 5.4 - Esquema de montagem do molde

Figura 5.5 - Esquema de carretos e cremalheira

Figura 5.6 - molde aberto

Figura 5.7 - molde fechado

Figura 5.8 - Molde fechado

- Figura 5.9 - Molde aberto
- Figura 5.10 - Pormenor da atuação das molas
- Figura 5.11 - Molde protótipo
- Figura 5.12 - Aspeto do molde durante a sua construção
- Figura 5.13 - Molde com limitador barras de deslize aplicadas
- Figura 5.14 - molas *Rabourdin* de secção retangular [45]
- Figura 5.15 - molas convencionais de secção circular
- Figura 5.16 - Vedante no molde
- Figura 5.17 - Abertura de furos ao longo da zona negativa
- Figura 5.18 - Peça moldada em PVC com 200 μ .
- Figura 5.19 - Desafio proposto
- Figura 5.20 - Desafio cumprido
- Figura 5.21 - Diversas moldações com espessuras e materiais diferentes

Índice de Tabelas

Capítulo II

Tabela 2.1 - Principais características do PET

Capítulo III

Tabela 3.1 - Materiais termoplásticos ensaiados

Tabela 3.2 - Resultado do ensaio *versus* dados do fabricante

Tabela 3.3 - características das placas de poliuretano

Capítulo IV

Tabela 4.1 - Resultados experimentais e dos fabricantes das densidades dos materiais termoplásticos utilizados no trabalho.

Tabela 4.2 - Resultados DMA.

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios estáticos em tração para os dois materiais termoplásticos (Apet e HIPS) para 20°C.

Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios estáticos em tração para os dois materiais termoplásticos (APET e HIPS) para temperaturas de 40 e 55°C.

Tabela 4.5 - Variação dos valores da espessura e estiramento para a amostra em APET.

Tabela 4.6 - Variação dos valores da espessura e estiramento para a amostra em PS.

Capítulo V

Tabela 5.1 - Comparação de custos

Tabela 5.2 - Materiais ensaiados

Lista de Siglas

APET	Poli (tereftalato de etileno) Amorfo
CAD	Computer Aided Design
CO ₂	Dióxido de carbono
DMA	Dynamic Mechanical Analysis
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
HIPS	Poliestireno de alto impacto
PE	Polietileno
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de vinilo
T _g	Temperatura de transição vítrea
μm	Microns
ε	Deformação
σ	Tensão
3D	Tridimensional

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	VII
<i>Palavras-chave</i>	<i>vii</i>
ABSTRACT	IX
<i>Keywords</i>	<i>ix</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
<i>Capítulo II</i>	<i>xi</i>
<i>Capítulo III</i>	<i>xiii</i>
<i>Capítulo IV</i>	<i>xiv</i>
<i>Capítulo V</i>	<i>xiv</i>
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
<i>Capítulo II</i>	<i>xvii</i>
<i>Capítulo III</i>	<i>xvii</i>
<i>Capítulo IV</i>	<i>xvii</i>
<i>Capítulo V</i>	<i>xvii</i>
LISTA DE SIGLAS	XIX
ÍNDICE	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA GERAL	2
2. ESTADO DE ARTE	5
2.1 MATERIAIS PLÁSTICOS	5
2.1.1 TERMOENDURECÍVEIS	6
2.1.2. ELASTÓMEROS	8
2.1.3. TERMOPLÁSTICOS	9
2.2. MATERIAIS EM ANÁLISE	10
2.2.1. POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) - PET	10
2.2.2. POLIESTIRENO	13
2.2.3. POLIESTIRENO DE ALTO IMPACTO (HIPS)	14
2.3. TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO	17

2.3.1. ROTOMOLDAÇÃO	17
2.3.2. INJEÇÃO.....	19
2.3.3. EXTRUSÃO-SOPRO.....	21
2.3.4. TERMOFORMAÇÃO	22
<i>Máquina Termoformadora - Illig RV74</i>	28
<i>Zona A</i>	29
<i>Zona B</i>	30
<i>Zona C</i>	31
<i>Zona D</i>	32
<i>Zona E</i>	36
<i>Zona F</i>	38
<i>Estratégias de Termoformação</i>	42
<i>Defeitos Inerentes ao Processo de Termoformação</i>	44
<i>Zonas negativas em peças termoformadas</i>	49
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	57
3.1 MATERIAIS ENSAIADOS.....	57
3.2 DENSIDADES	58
3.3 GEOMETRIA DOS PROVETES	60
3.4 ENSAIOS DMA.....	61
3.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	62
3.6 MÁQUINA DE TERMOFORMAÇÃO	64
3.7 MATERIAL PARA MOLDE PROTÓTIPO.....	64
3.8 CENTRO DE MAQUINAÇÃO CNC.....	66
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	69
4.1. DENSIDADES	69
4.2. RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DMA	70
4.3 RESULTADOS ESTÁTICOS.....	73
4.4 ANÁLISE DAS ESPESSURAS DAS PEÇAS TERMOFORMADAS	79
5. CASO DE ESTUDO – MOLDE COM ELEMENTOS MÓVEIS	87
5.1 CONCEITO PARA PROTÓTIPO	88
5.1.1 HIPÓTESE 1:.....	90
5.1.2 HIPÓTESE 2:.....	91
5.1.3 DECISÃO	93
5.2 EXECUÇÃO DO MOLDE PROTÓTIPO.....	93
5.3 ENSAIOS DO MOLDE E CONCLUSÕES.....	94
6. CONCLUSÕES	101
6.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E FÍSICA DOS MATERIAIS TERMOPLÁSTICOS	101
6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	102
BIBLIOGRAFIA	105
ANEXOS	109
ANEXO I	109
ANEXO II	111
ANEXO III	113

1. Introdução

No presente capítulo, pretende-se efetuar uma breve síntese dos temas abordados e antever a estrutura do presente relatório.

1.1. Considerações iniciais

A Revolução Industrial foi um marco histórico na transição de métodos de produção artesanais para a produção em máquinas. Desde então, a Humanidade tem procurado incessantemente no campo das engenharias, encontrar respostas para os desafios com que se depara. Foi com os objetivos de produzir eficazmente, minimizar custos e melhorar a vida das pessoas, que os pioneiros como Henry Ford, Steve Jobs ou Kiichiro Toyoda, criaram dispositivos que mudaram, de certa maneira, a vida das pessoas.

A constante melhoria origina inovações. Hoje em dia, qualquer empresa de grande ou pequena escala, precisa de soluções inovadoras para poder competir no mercado industrial em constante inovação. Por vezes, a mais pequena solução gera uma melhoria exponencial. Muitos casos de estudo se fizeram sobre este tema. Atente-se a uma conhecida marca de papel que decidiu dar cor ao papel higiénico, transformando um produto sem alma num produto de valor acrescentado com grande sucesso de vendas.

Na engenharia de produção, Toyoda criou o seu modelo de produção, com o objetivo de melhorar as linhas de montagem automóvel e hoje todas as marcas de automóveis seguem os seus ensinamentos e adequam-no às suas necessidades.

Atualmente, as linhas de montagem da indústria automóvel tem um sistema de trabalho tão afinado e rigoroso, que as suas exigências testam os limites de quem trabalha direta ou indiretamente para esta indústria. Recorrentemente, as marcas lançam desafios aos colaboradores e fornecedores na procura de novas soluções ainda mais eficazes.

Assim, este trabalho irá abordar uma situação semelhante. Num desafio lançado por uma empresa que executa projetos de linhas de produção, propôs à empresa colaboradora deste projeto, um tabuleiro de transporte de componentes com determinadas características. Essas características exigem soluções inovadoras. Este trabalho irá relatar todo este processo, descrever as soluções encontradas e a avaliar o resultado final.

1.2. Objetivos

Com a realização deste trabalho, pretende-se ter um melhor conhecimento do processo de termoformação, bem como o desenvolvimento e fabrico de moldes para o processamento de peças com zonas negativas. É objetivo deste trabalho caracterizar o comportamento mecânico e físico dos materiais mais utilizados em termoformação, nomeadamente poli (tereftalato de etileno) (PET) e polistireno de alto impacto (HIPS). Este trabalho foi desenvolvido em conjunto com a empresa Sitecna, colaboradora deste projeto.

Pretende-se assim desenvolver um novo conceito de soluções para a moldação de peças termoformadas com zonas negativas e apresentar um caso de estudo.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar experimentalmente as propriedades mecânicas, físicas e térmicas dos materiais termoplásticos utilizados em termoformação.
- Estudar o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas em tração:
 - Determinação dos valores de $\sigma_{max.tração}$, $E_{tração}$, $\epsilon_{max.tração}$, ϵ e σ .
- Estudar o efeito da temperatura (ensaios de DMA - *Dynamic Mechanical Analysis*) no módulo de elasticidade em tração, *Loss Modulus* e determinar a temperatura de transição vítrea (*Tan delta*).
- Desenvolver um novo conceito de molde para termoformação para a moldação de zonas negativas de baixo custo.

1.3. Estrutura geral

O presente trabalho está organizado de forma a ter uma introdução relativa aos materiais plásticos e às suas propriedades físicas e mecânicas, com principal incidência nos materiais para termoformação. Os resultados experimentais, relativos aos materiais processados são apresentados e analisados. No caso de estudo são apresentadas as soluções para a moldação de zonas negativas em tabuleiros termoformados. Deste modo, o presente trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos cujo conteúdo é organizado da seguinte forma:

- **1. Introdução** - é feita uma introdução ao estudo dos materiais plásticos, são apresentadas as considerações iniciais, os objetivos e a estrutura geral da dissertação.
- **2. Estado da arte** - apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos inerentes aos materiais plásticos, processos de fabrico de termoplásticos, com ênfase na termoformação e comportamento dos materiais.

- **3. Materiais e procedimentos experimentais** - são referidos os materiais e procedimentos utilizados no processamento dos materiais plásticos, geometria dos provetes, equipamentos e os procedimentos experimentais utilizados na determinação das propriedades mecânicas e físicas (normas, equipamentos e geometria de provetes). É, também, apresentada a máquina utilizada nos ensaios de termoformação.

- **4. Resultados e discussão** - são apresentados e discutidos os resultados experimentais relativos à caracterização dos materiais plásticos utilizados.

- **5. Caso de estudo** – são explanadas soluções de baixo custo para o fabrico de tabuleiros termoformados com zonas negativas para acondicionar componentes automóveis.

- **6. Conclusões e perspetivas futuras** - são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e ainda propostas para futuros desenvolvimentos.

2. Estado de Arte

Neste capítulo irão ser abordados assuntos relacionados com materiais termoplásticos, as diversas famílias, suas características e comportamentos. Serão também abordados vários processos de fabrico, com especial ênfase à termoformação. As máquinas para processar através deste processo também estarão presentes, com vários tipos de configuração e respetiva explicação. Alguns defeitos inerentes estarão igualmente focados assim como a forma de os contornar.

2.1 Materiais Plásticos

Os polímeros são materiais presentes em larga escala no nosso dia-a-dia. Muitos dos objetos, maquinaria e quaisquer outros dispositivos tem componentes em material plástico.

Os polímeros provêm essencialmente do carbono extraído de combustíveis fósseis, nomeadamente, gás e petróleo.

Estes materiais caracterizam-se por serem leves, resistentes, versáteis, duráveis e relativamente baratos. Estas vantagens estimularam o desenvolvimento para o seu processamento e transformação de tal modo que, atualmente, é considerada indústria de ponta.

Um polímero é uma substância constituída por moléculas de grandes dimensões (macromoléculas), que se caracterizam pela repetição de uma ou mais unidades de dimensões inferiores, todas unidas por ligações covalentes. Estas repetições das unidades dos polímeros ao unirem-se formam uma estrutura linear ou ramificada que podem ainda interligarem-se e, assim, formar uma rede tridimensional reticulada. Os mesmos monómeros podem produzir polímeros diferentes dependendo do modo de distribuição das unidades: aleatório, alternado, em blocos, ou em ramificação.

Os materiais poliméricos podem ser classificados em homopolímeros, se tiverem apenas um tipo de unidade repetitiva de monómeros da mesma natureza, ou copolímeros, se tiverem duas ou mais unidades repetitivas. Podem obter-se diferentes tipos de

copolímeros em função da forma como as moléculas de monómeros se unem entre si.

Mediante a sua estrutura, os materiais poliméricos classificam-se como sendo amorfos ou cristalinos. Os amorfos apresentam uma baixa ou nenhuma ordenação das cadeias poliméricas, ou seja, a ausência de cristalinidade, logo, não apresentam nenhum ponto de fusão cristalino, mas podem tornar-se num fluido suficientemente menos viscoso para que possa fluir e ser moldado.

Quanto aos polímeros cristalinos, já apresentam cadeias poliméricas com alguma ordenação, formando assim estruturas regulares denominadas por cristais.

Um aspeto importante dos polímeros é a sua temperatura de transição vítrea, T_g . Esta é a temperatura em que o polímero adquire a viscosidade mínima para que possa fluir pelas zonas moldantes. Acima da T_g , as moléculas começam a mover-se e as propriedades do material modificam-se substancialmente [1].

A polimerização por adição, por condensação, ou por emulsão são alguns dos processos que permitem a obtenção do polímero.

Os materiais plásticos dividem-se em três grandes grupos:

Termoendurecíveis;

Elastómeros;

Termoplásticos.

2.1.1 Termoendurecíveis

Os materiais termoendurecíveis caracterizam-se por materiais amorfos que surgem pela moldação acompanhada por uma reação química ou cura. A moldação pode ser feita pelos processos de compressão, injeção-compressão e laminagem. Com o molde aberto, introduz-se a matéria-prima. Ao fechar o molde, pressiona-se a matéria-prima e, sob uma certa temperatura, desencadeia-se uma reação de polimerização, durante um determinado tempo.

É um processo de carácter irreversível, uma vez moldadas, já não é possível a reciclagem ou solda das peças.

As matérias-primas são, geralmente, resina de condensação e resina de reação. É igualmente comum, o uso de diversas fibras como reforços, para formar um material (compósito) com melhor desempenho que os seus constituintes numa condição individual, dando origem a uma nova geração de materiais com melhores propriedades mecânicas [2, 3].

Os compósitos existem em diferentes formas mas, normalmente, os mais usuais são

os materiais constituídos por um reforço de fibra embutido numa matriz polimérica.

As peças de material termoendurecível apresentam uma boa rigidez e boa resistência à fadiga. Têm também a grande vantagem de aguentar temperaturas dos 80 aos 200° e, nalguns casos até aos 300°.



Figura 2.1 - Componentes de material termoendurecível de um automóvel [3]

Os termoendurecíveis mais comuns usados na indústria são os poliésteres, os epóxidos, os silicones e os poliuretanos.

Os primeiros apresentam-se num estado líquido viscoso de cor entre o transparente e o amarelado. Para além de boas propriedades elétricas, têm também boa resistência química, nomeadamente aos ácidos [3].

Os epóxidos são sintetizados a partir de um difenol e da epiclordinina do glicol. Podem ser curados com diversos endurecedores e, em conjunto com o tempo e temperatura da cura, as suas propriedades variam ligeiramente. Em qualquer dos casos as peças apresentam elevadas resistências mecânica e química, estabilidade dimensional, baixa absorção de água, autoextinguibilidade, entre outras [4].

Os silicones possuem uma estrutura inorgânica com base em átomos de silício. A sua reticulação faz-se pela ação da temperatura na presença de um catalisador. Possuem boa estabilidade térmica no intervalo entre os -70°C e os 170°C. Ao aquecer até aos 250°C as propriedades elétrica e mecânica também sofrem ligeiras alterações. Têm a desvantagem de serem facilmente atacados pelo vapor e por bases fortes. Também são incompatíveis com outras resinas, daí serem usados na indústria dos moldes para plásticos como um agente desmoldante. Apresentam uma fraca absorção de água e geralmente não são atacadas pelas soluções ácidas ou alcalinas diluídas [3].

Os poliuretanos obtêm-se pela reação do polisocianato com o polioliol. A reticulação vem

posteriormente, utilizando um catalisador e outros aditivos. São usados como espumas, revestimentos e adesivos. Controlando o grau de reticulação, consegue-se mais rigidez ou mais flexibilidade mediante o uso a que se destina a espuma. Quando se pretende uma espuma mais expandida, controla-se a quantidade de CO₂ emitida pela reação do isocianato com a água. Este material apresenta excelentes características térmicas e acústicas [3].

As indústrias aeronáutica, automóvel e mobiliário utilizam muitos materiais termoendurecíveis, nomeadamente tabliers, peças de reforço, entre outros [5].



Figura 2.2 - Montagem de aeronave [6].

2.1.2. Elastómeros

Os elastómeros são polímeros com propriedades elásticas à temperatura de uso. Distinguem-se pela característica única de permitir um grande alongamento, seguido instantaneamente de quase completa retração, especialmente quando se encontram na condição vulcanizada. Após um processo denominado de reticulação em muito baixo grau, as cadeias poliméricas tornam-se “presas”, impedidas de escoar, o que evita a deformação permanente e confere a características borrachosa ao material. A reação de reticulação é geralmente promovida por enxofre e denominada vulcanização.

Podem ter origem natural, extraído da planta *Hevea Brasiliensis*, como o latex, ou de origem sintética, como um pneu de automóvel. As borrachas sintéticas mais importantes são também de estrutura idêntica às naturais e são obtidas pela poliadição. Outros processos de polimerização além da poliadição são a biogénese para o caso das borrachas naturais e a policondensação para os polisulfetos

Após a vulcanização, a borracha aplica-se em diversas áreas, desde pneus a luvas cirúrgicas [1].



Figura 2.3 - luvas de latex [7]



Figura 2.4 - pneu [8]

2.1.3. Termoplásticos

Os termoplásticos são materiais com uma enorme família, sendo que cada um possui características próprias para o fim a que é destinado. Constituídos por moléculas longas, com um comprimento entre de 20 a 30 nm, podem ser repetidamente processados e, conseqüentemente, serem reciclados [9]. Devido à vasta família, os termoplásticos são, na generalidade, divididos em dois grandes grupos: termoplásticos de utilização geral e termoplásticos de utilização em engenharia. Os primeiros constituem a maioria dos plásticos utilizados atualmente, como o polietileno, polipropileno e poliestireno que são materiais de custo relativamente baixo. No entanto, para uma otimização das suas propriedades pode-se adicionar cargas ou fibras específicas para o efeito. Os termoplásticos de utilização em engenharia já oferecem um conjunto de propriedades de grande interesse, tais como boa resistência mecânica e rigidez, tenacidade e/ou resistência ao desgaste, boa resistência a produtos químicos e boa condutibilidade térmica [10].

Os termoplásticos, como o próprio nome indica, necessitam de calor para serem conformados até um limite de temperatura específico para cada material. Ao exceder esse limite, o material perde as propriedades e degrada-se. Durante o processo adquirem a forma

desejada e de seguida segue-se o arrefecimento para conformar e estabilizar. Teoricamente, estes materiais podem ser várias vezes reaquecidos sem grandes alterações nas suas propriedades. Assim, pode-se reutilizar num novo ciclo de processamento [10].

Ao possuir a capacidade de amolecer e fluir quando submetidos a um aumento de temperatura e pressão, quando são retiradas essas solicitações, os termoplásticos solidificam-se novamente. Essa alteração é uma transformação física reversível, de forma que, novas aplicações de altas temperaturas e pressões produzem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo.

Assim, devido a estas características, os termoplásticos são considerados recicláveis [11].

2.2. Materiais em análise

Este trabalho irá abordar dois materiais termoplásticos: Polietileno Tereftalato e Poliestireno. São dois polímeros de grande consumo nos dias de hoje e em particular no processo de Termoformação, técnica de processamento que estará em destaque neste trabalho.

Seguem algumas características gerais destes dois termoplásticos.

2.2.1. Poli (tereftalato de etileno) - PET

O Poli (tereftalato de etileno) – PET pertence à categoria dos poliésteres termoplásticos. Para muitos autores é considerado um plástico de engenharia, para outros, um plástico de grande consumo [12]. Foi produzido pela primeira vez em 1941 por J.R. Whinfield e J.T. Dickson (Calico Printers Association) e tendo sido designado comercialmente de *Terylene* [13]. Como potencial de embalagem, o filme de PET biorientado tornou-se disponível nos anos 60, com grande aceitação para acondicionamento de alimentos. Em 1973, o processo de injeção e sopro com biorientação, desenvolvido pela *DuPont*, introduziu o PET na aplicação como garrafa, o que revolucionou o mercado de embalagem, principalmente, o de bebidas gaseificadas [14].

É um polímero cujas macromoléculas apresentam agrupamentos de para-fenilenos, volumosos, ligados a agrupamentos ésteres, de acordo com a representação em baixo.

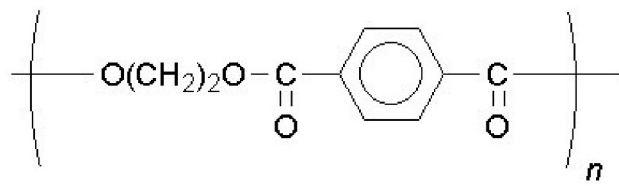


Figura 2.5 - Esquema da cadeia PET [14]

Embora seja uma cadeia linear com heteroátomos de oxigênio, a presença de uma curta cadeia carbônica e do agrupamento para-fenileno, confere à cadeia elevada rigidez [15].

Na verdade, este é um material muito versátil e resulta de uma reação de dois monómeros: ácido tereftálico+ etileno glicol.

O primeiro é um sólido cujo ponto de fusão situa-se a 140°C, o segundo é um álcool líquido à temperatura ambiente, com ponto de ebulição de 197°C [16].

O PET pode ser apresentado como homopolímero ou copolímero. O primeiro caracteriza-se pela repetição de um só mero, mas este é pouco utilizado devido à sua facilidade em cristalizar-se o que prejudica a sua transparência.

Na versão copolimérica, caracterizada pela repetição de 2 meros, ciclohexanodimetanol + ácido tereftálico e etileno glicol + ácido isoftálico, existe uma distribuição aleatória das cadeias que evitam a cristalização durante o seu processamento o que contribui para a transparência do produto final [16].

É atualmente um polímero muito popular como material de embalagem, especialmente no segmento de embalagens rígidas (garrafas e frascos) e flexíveis (filmes biorientados).

O PET apresenta boas propriedades de barreira ao oxigênio e ao dióxido de carbono, as quais podem ainda ser melhoradas pela orientação biaxial, que proporciona também excelentes propriedades de barreira a aromas [17].

Na área de embalagem, o PET é aplicado em filmes biorientados para embalagens flexíveis laminadas; garrafas obtidas por injeção/sopro com biorientação para bebidas carbonatadas, água mineral, óleo comestível, sumos e molhos; frascos obtidos por injeção/sopro para produtos farmacêuticos, blisters transparentes; e mesmo bandejas com alta estabilidade térmica para uso em fornos convencionais e em fornos de micro-ondas [14].

Os filmes de poli (tereftalato de etileno) biorientados (OPET) apresentam também excelente transparência e brilho, boa resistência química, boa resistência a óleos e gorduras, boa resistência à tração, rigidez e estabilidade térmica.

Como barreira ao vapor de água é mediano, mas pode ser sensivelmente melhorada com a metalização [14].

A cristalização do PET ocorre somente acima de determinadas temperaturas, sendo

ainda fortemente influenciada pelas condições de processamento. No caso dos filmes de PET, estes têm normalmente um limitado grau de cristalinidade mas apresentam uma excelente transparência.

A densidade do PET na forma amorfa é de 1,335 g/cm³ e na forma cristalina é de 1,455 g/cm³. Há uma relação entre o grau de cristalinidade e a densidade do polímero, o que permite o uso da medida da densidade para estimar o grau de cristalinidade. Na tabela 2.1. são apresentadas algumas características do PET:

Tabela 2.1: Principais características do PET [18].

Densidade (g/cm ³)	1,33 – 1,45
Temperatura de Fusão	250 – 270 °C
Temperatura de Transição Vítre	70 – 74 °C

Atualmente, o PET apresenta-se no mercado sob várias nomenclaturas:

PETG – PET modificado com glicol por co-polimerização, amorfo, com boa estabilidade mecânica e dimensional. Este é utilizado na extrusão-sopro de garrafas não bi-orientadas molecularmente [19].

APET – amorfo, sem orientação de baixa cristalinidade, pouco resistente, alto brilho e transparência, usualmente utilizada em produtos termoformados como bandejas para alimentos [20].

CPET – alto grau de cristalinidade, contém aditivos como iniciadores e nucleadores para maximizar a cristalinização. Devido a ser muito resistente à deformação por stress, é utilizado em produtos que podem ser levados ao congelador e forno simultaneamente sem sofrer alterações [17; 20].

Quanto às aplicações do PET elas são inúmeras. Os produtos mais comuns resultantes desta aplicação são: fibras têxteis, filmes para embalagens, filmes utilizados como chapas radiográficas em equipamentos de Raios-X, embalagens para bebidas, embalagens para óleos vegetais, filmes fotográficos e fitas magnéticas [20].



Figura 2.6 - Pré-formas PET para garrafas [21]

O PET revestindo um papel cartão, torna-o apropriado como embalagem de comida congelada, podendo ser aquecida num forno de micro-ondas., Pode igualmente ser utilizado como saco para cozedura de comida congelada (direto do congelador para o forno), assim como, para esterilização de medicamentos [17].

Apesar de representar apenas aproximadamente 3% do total do mercado de plásticos, isto é, 10% do mercado de plásticos destinado ao setor de embalagens, as embalagens de PET constituem o centro da atenção das empresas de reciclagem. Este material consegue ser mais facilmente reciclável que o vidro e outros polímeros de muitas aplicações de embalagens alimentares [22]. Entre os fatores que cooperam para este quadro estão: o custo relativamente alto da resina virgem, a alta competitividade dos seus processos de reciclagem mecânica, e o alto valor agregado do reciclado, cujo desempenho, dependendo da tecnologia aplicada, pode ser similar ao da resina virgem [23].

2.2.2. Poliestireno

O Poliestireno (PS) surgiu na Alemanha em 1936. Trata-se de um polímero vinílico, que possui uma cadeia hidrocarbónica com um grupo fenila unido a um dos carbonos do grupo vinila. É produzido a partir do monómero estireno através da polimerização via radicais livres [24].

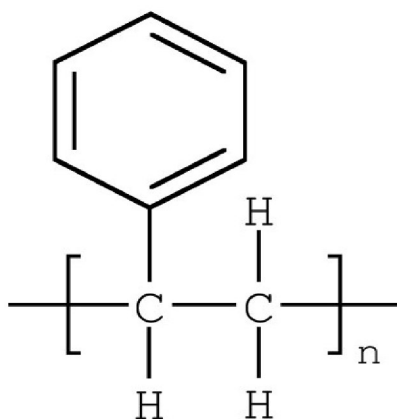


Figura 2.7 - Esquema da cadeia PS [24]

Devido às características da sua unidade repetitiva, esta inibe a cristalização do material, tornando-o num material amorfo e transparente.

A alta temperatura de transição vítrea, a transparência, a facilidade de processamento, a estabilidade térmica, o alto módulo de elasticidade, as excelentes propriedades elétricas e o baixo custo são as principais características que tornam o poliestireno num material muito solicitado.

No seu processamento em moldes de injeção, permite uma boa distribuição nas zonas moldantes e um comportamento estável..

No entanto, e devido à existência de vários *grades* e configurações, o PS pode ser transformado por outros métodos, como por exemplo co-extrusão, extrusão de chapas e termoformação, entre outros [24].

Nos fatores menos positivos, é de salientar a sua baixa tenacidade, fragilidade e instabilidade em ambientes externos, A pouca resistência aos raios UV torna-o amarelado e quebradiço, assim como, uma grande variedade de solventes, tais como os detergentes [25].

2.2.3. Poliestireno de Alto Impacto (HIPS)

Para eliminar a fragilidade do PS e aumentar a resistência ao impacto, houve necessidade de adicionar na sua composição domínios discretos de polibutadieno (PB) dispersos na matriz de PS, torna-o num produto rígido e dúctil, mais resistente ao impacto, criando-se assim o poliestireno de alto impacto (HIPS).

O HIPS é conhecido como um típico material polimérico borrachoso tenacificado, preparado pela polimerização de um radical livre de estireno na presença de polibutadieno dissolvido, aumentando desta forma, a resistência ao impacto e a tenacidade do poliestireno

vítreo [17].

Atualmente, é produzido por polimerização em massa, e sintetizado a partir de uma solução de borracha no monómero estireno em temperaturas que vão aumentando desde os 130° até aos 180°C durante 6 horas [26].

Como o HIPS é um material polimérico composto de múltiplos componentes e múltiplas camadas, com fases vítreas e borrachosas, o bom desempenho do material modificado depende de diversos parâmetros: a massa molecular que influencia a forma como as cadeias estão organizadas (em faixas estreitas ou largas); a viscosidade do polímero que altera o comportamento durante o processo de transformação; a quantidade de butadieno adicionada resultando em polímeros com características distintas [27].

No HIPS comercial utiliza-se uma percentagem de 6 a 10% de massa de borracha, 25 a 35% de conteúdo de gel e 75 a 80% de oclusões na partícula [28].

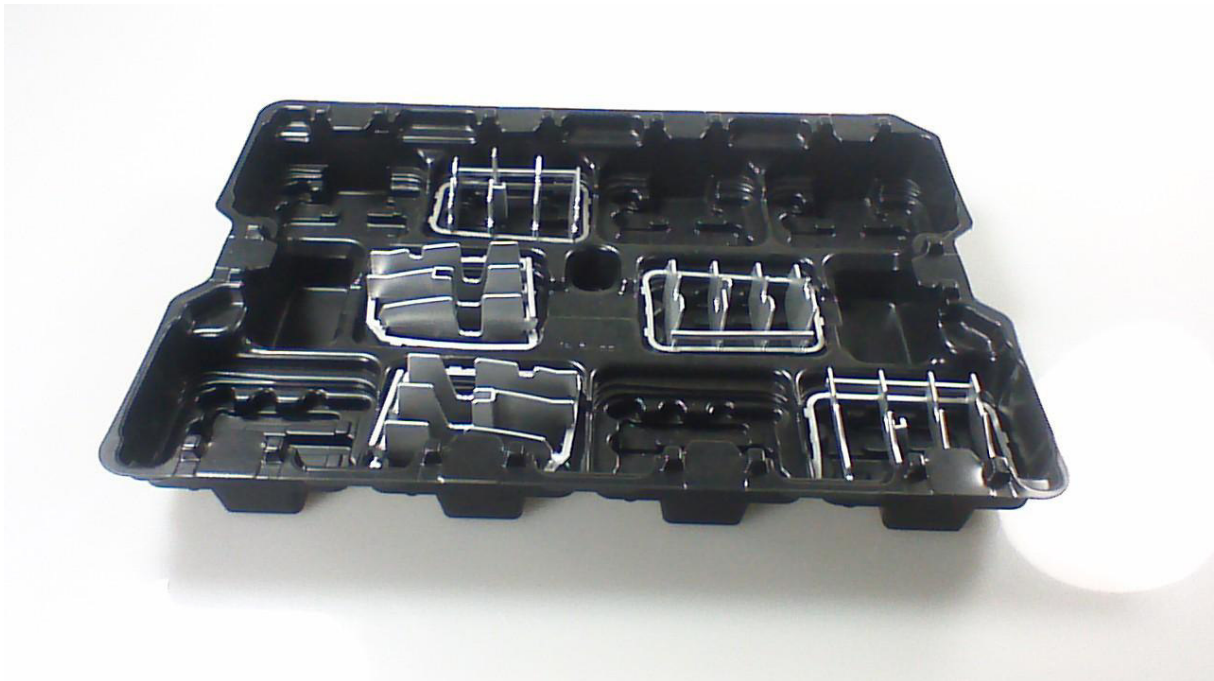


Figura 2.8 - Tabuleiro em HIPS

Comparando graficamente a tensão-deformação do PS e HIPS nas figuras 2.9 e 2.10) é possível observar a superioridade na resistência mecânica deste último material [28].

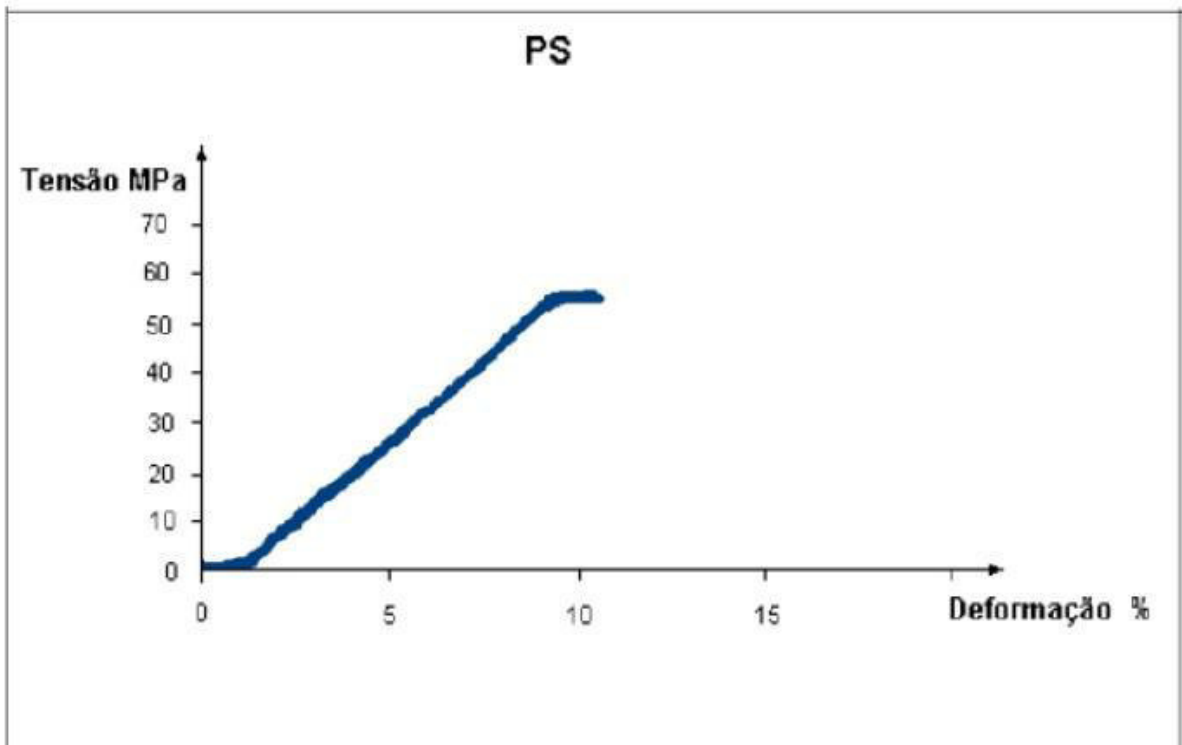


Figura 2.9 - Gráfico tensão – deformação no PS [11].

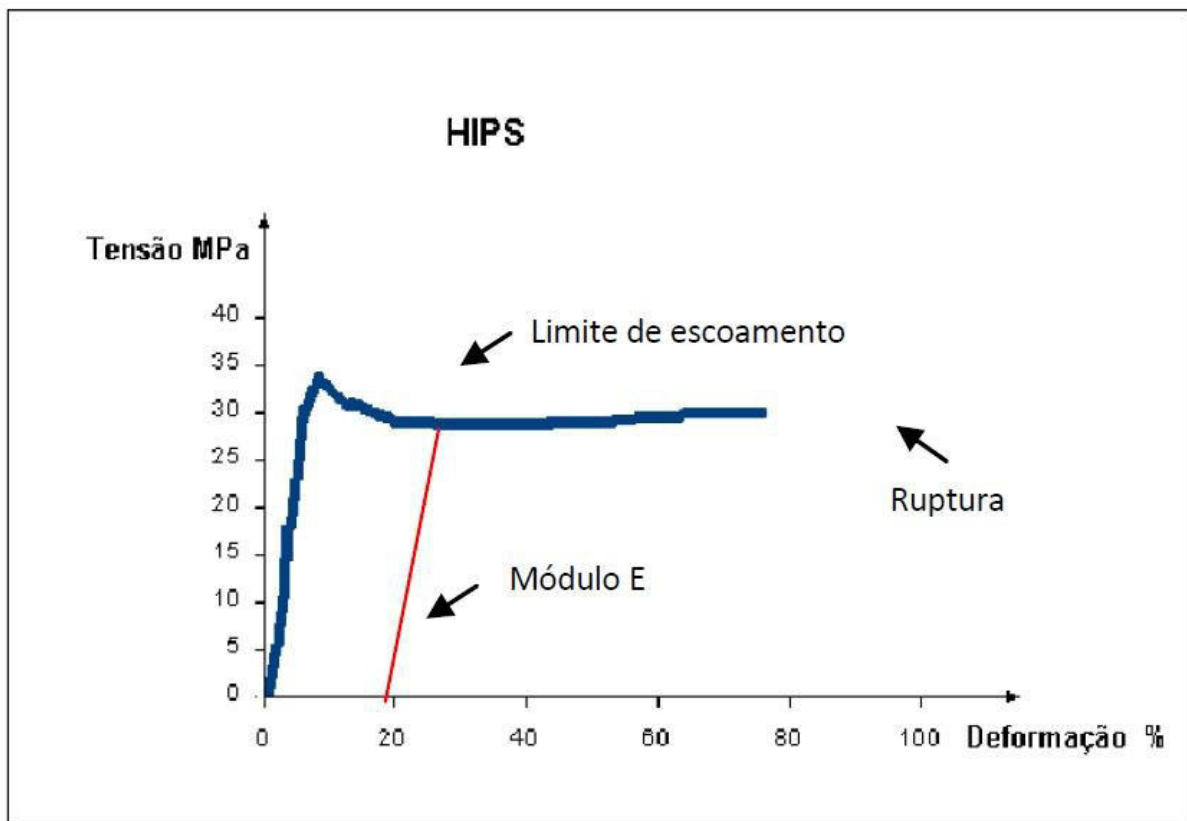


Figura 2.10 - Gráfico tensão – deformação no HIPS [11].

2.3. Técnicas de processamento

2.3.1. Rotomoldação

A rotomoldação é um processo de moldação que permite, à semelhança dos de moldação-sopro, obter peças ocas.

Esta técnica começou por ser desenvolvida na década de 40, tendo como matéria-prima plastissóis de PVC para a produção de artigos, como cabeças de bonecas. A partir dos anos 60 evoluiu-se para os pós de etileno que, até aos dias de hoje, é dos materiais mais utilizados neste processo. No entanto, também se rotomoldam poliamida 11, policarbonato, ABS e polipropileno.

Por ser relativamente simples e barata (comparando com outros processos), a rotomoldação tem vindo a ter um interesse crescente. O equipamento necessário e a facilidade de execução dos moldes são fatores que a tornam aliciante. Por esta razão, esta técnica é utilizada em pequenas séries, para a produção de artigos com grandes espessuras (superiores a 10mm)..



Figura 2.11 – Artigo rotomoldado [29]

O ciclo de rotomoldação é lento. O molde é inserido num forno a uma temperatura entre 300 e 400°C e já com a matéria-prima em pó no seu interior, é mantido a rodar segundo dois eixos perpendiculares entre si. Desta forma, o pó contacta uniformemente as paredes aquecidas do molde.

O material utilizado para o fabrico de moldes de rotomoldação são geralmente chapa

metálica de aço macio ou de aço inoxidável, com espessura até 4mm. Para séries maiores também se aplica alumínio maquinado ou vazado. A inexistência de forças ou pressões elevadas permite o uso destes materiais. Em moldes com muitos detalhes usam-se também técnicas de electrodeposição de níquel. Com o aquecimento do processo criam-se gases no interior do molde. Para os evacuar são criado uns furos de escape que, no entanto, são tapados com lã de vidro para evitar o babar de material.



Figura 2.12 – Máquina de rotomoldação [30].

Os moldes de rotomoldação assemelham-se muito a uma concha que se abre para a colocação da carga de pó para a moldação e para a desmoldagem. Por isso, os moldes são geralmente constituídos por duas peças. A existência de mais peças só se justifica no caso de produtos complexos ou com necessidade de movimentos.

Atualmente já se utilizam moldes para rotomoldação com pressurização interior. Neste caso, a linha de junta deve possuir um sistema capaz de suportar a pressão e manter o molde estanque.

Os moldes são montados nuns braços rotativos que vão rodando a cerca de 20rpm, durante os ciclos de aquecimento e o arrefecimento, com uma relação de velocidade entre os eixos de cerca de 4:1 [12].

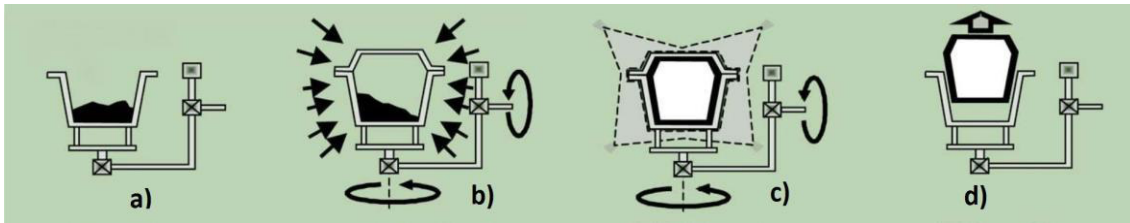


Figura 2.13 – Etapas do processo de Rotomoldação [31].

Na figura 2.13. demonstra as várias fases do processo: a) - enchimento do molde com matéria-prima em pó; b) - aquecimento do molde e rotação em simultâneo dos dois eixos; c) - continuação da rotação e arrefecimento do molde através de jatos de água; d) - abertura do molde e extração da peça final.

2.3.2. Injeção

A injeção é um processamento versátil na produção de peças plásticas. Trata-se sobretudo, em injetar um material polimérico aquecido, a uma temperatura acima de T_g , sob pressão, para o interior de um molde que replica a geometria final da peça a processar.



Figura 2.14 – Máquina de Injeção [32]

O sucesso deste processo deve-se sobretudo a diversas vantagens que o tornam competitivo, tais como: elevadas cadências de produção, grande reprodutibilidade e precisão dimensional.

Este processo executa um ciclo de moldação que contempla diversas fases, como mostra a figura 2.15. Como é um processo que precisa de um investimento inicial, nomeadamente no molde e nos seus periféricos, este ciclo de moldação deve ser otimizado ao máximo para o amortizar no menor período de tempo possível [33].

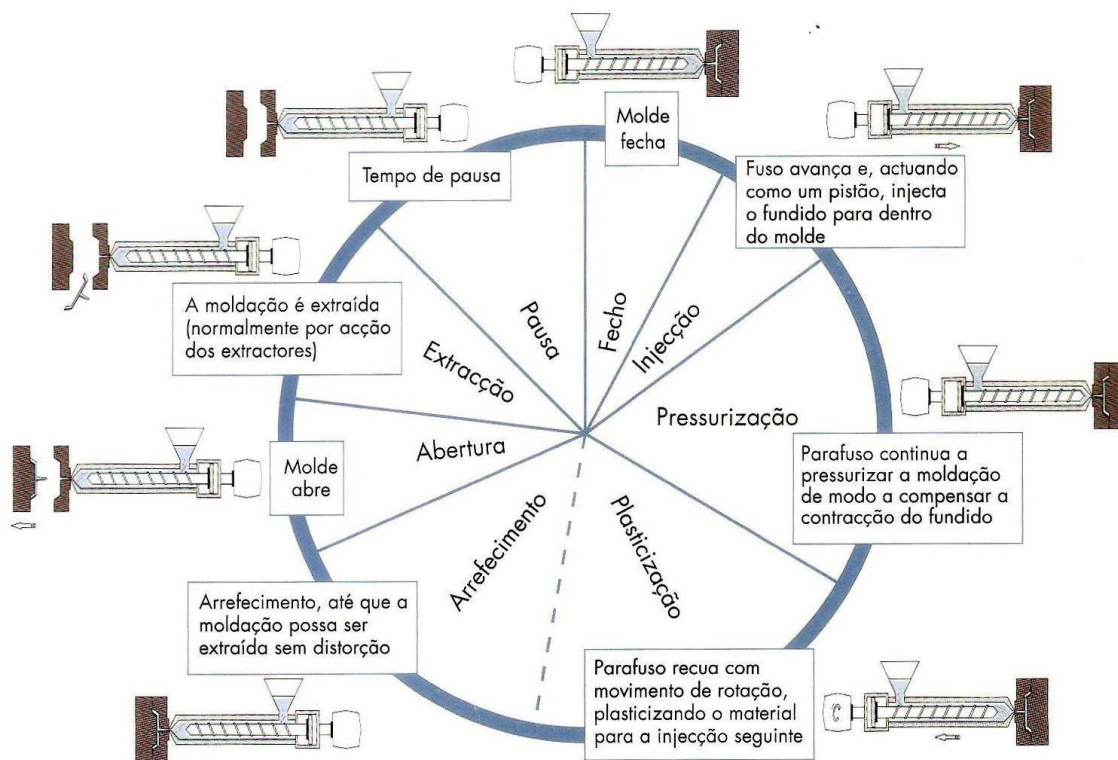


Figura 2.15 – Ciclo de moldação [12].

A otimização de cada uma destas fases depende de diversos fatores, nomeadamente, a geometria da peça plástica, o material, os sistemas de injeção e refrigeração, o acabamento superficial das zonas moldantes e as condições de processamento.

O molde está instalado na máquina, fechado e inicia-se o ciclo. Na fase da injeção, o fuso avança sem rodar levando o fundido ao molde. De seguida, dá-se a pressurização para compensar a contracção do material. Na fase seguinte, o fuso recua rodando para plasticizar o material para o ciclo seguinte. Entretanto, o material continua no molde o tempo necessário para estabilizar e arrefecer.

Na terceira fase, a de arrefecimento, a peça contrai e reproduz o acabamento superficial das zonas moldantes.

A última fase corresponde à extração da peça plástica do interior do molde. Nesta fase, a peça plástica já possui rigidez suficiente e, estando à temperatura de extração contrai, naturalmente, até atingir a temperatura ambiente. Deve-se ter em conta alguns cuidados durante esta fase de extração, nomeadamente no manuseamento e embalamento da peça para não comprometer o produto final.



Figura 2.16 – Exemplo de peças injetadas [34].

Este processo de injeção tem um enorme peso no desenvolvimento económico e industrial já que é responsável por cerca de 30% da produção de peças plásticas [10].

2.3.3. Extrusão-Sopro

A extrusão-sopro é um processo de moldação indicado para recipientes com tampas, frascos, garrafas, garrafões. Baseia-se numa extrusora que molda uma manga em plástico, chamada *parison*, (ver figura 2.17.) a qual é inserida dentro de duas metades de um molde (a). Quando estas duas metades se fecham, entalam a manga e é imediatamente aplicada a insuflação no seu interior que a obriga a expandir para as paredes frias do molde (b). Finda a pressão, uma lâmina aquecida corta a manga excedente, o molde abre e a peça é extraída (c). [12; 35].

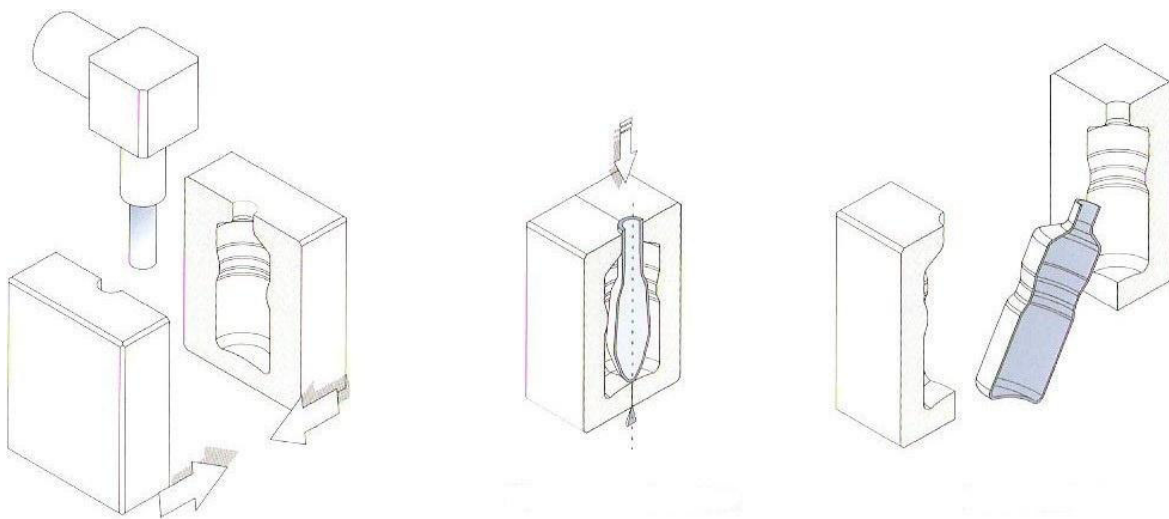


Figura 2.17 – Etapas do processo extrusão-sopro [12].

Os materiais mais usados neste processo são, PVC, PE de alta e baixa densidade e, por vezes, o PP.



Figura 2.18 – Embalagens moldadas por sopro [36].

Como se pode verificar na figura 2.18, os moldes são simples, e como resultado final as embalagens são constituídas por duas metades. Não necessitam de tratamento térmico por não haver grandes pressões. Possuem insertos na zona de topo do molde onde geralmente se situa o gargalo da garrafa e o *pinch-off*, que é a zona inferior do molde, onde se vai acumular o excesso do *parison* e o seu respetivo corte. Tanto os insertos como o *pinch-off* são geralmente feitos de aço, a restante estrutura pode ser feita em alumínio se for para moldar PEBD. Esta estrutura pode ser maquinada mas, nalguns casos pode-se obtê-la por vazamento para cavidades simples.

Apesar de ser um processo com alguma simplicidade, apresenta algumas desvantagens. Não é possível reproduzir pequenos pormenores que a peça possua. Os raios da peça devem ser projetados tendo em conta o estiramento do material, para que permitam um enchimento adequado da cavidade. Outra desvantagem prende-se com o facto de a sua contração após extração do molde é muito lenta, com a durabilidade de 24 horas [12;35].

2.3.4. Termoformação

A termoformação é um processo que consiste em dar forma a uma película de plástico com a ajuda de um molde, calor, vácuo e/ou pressão de ar.

Este processo é muito solicitado para embalagens diversas, bandejas para a indústria alimentar, tabuleiros para linhas de produção, blisters, etc. PP, PS, PET a ABS são os materiais mais usados neste processo. Este é relativamente barato, é processado em máquinas com configuração simples e suporta cadências de produção muito elevadas, com preços muito aliciantes e competitivos [12].



Figura 2.19 – Algumas peças termomoldadas [37].

A matéria-prima vem sob a forma de bobine ou em planos devidamente extrudidos ou calandrados. Esta é aquecida por radiação até atingir a temperatura ideal para a sua deformação. De seguida, na máquina é criado um perímetro de vácuo entre o molde e a película com força suficiente para fazer chegar o material às paredes do molde que é refrigerado. A película, ao tocar no molde arrefece e adquire assim a forma final. Por vezes, no lado contrário ao vácuo, é também injetado ar comprimido para ajudar na moldação. Assim, de um lado existe força de vácuo, do outro existe pressão. No fim do processo, a máquina abre e liberta a peça termomoldada. (ver figura 2.20)

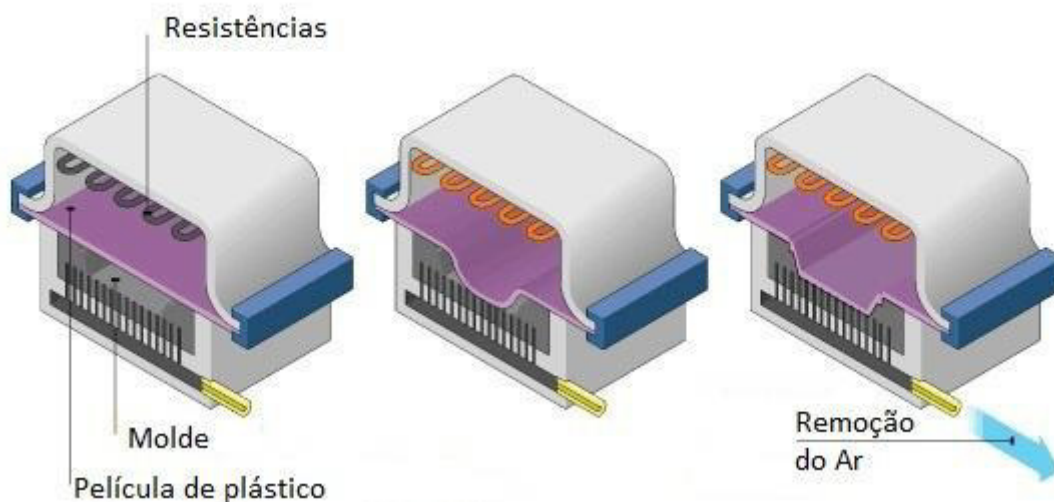


Figura 2.20 – Etapas do processo de termoformação [38].

Em linhas muito gerais, esta é a descrição deste processo. No entanto, neste trabalho ele será ainda mais abordado com pormenores relevantes, defeitos inerentes ao processo e outros.

Relativamente às máquinas termoformadoras, existem variantes dedicadas a cada tipo de produtos. Numa só máquina, podem existir várias estações e, cada uma delas executa uma tarefa específica que compõem o resultado final, por exemplo uma embalagem de fruta:



Figura 2.21 – Embalagem para fruta [39].

Esta embalagem é constituída por uma base e uma tampa ligadas por uma charneira que se dobra, possui umas prisões nos cantos da tampa para que ao fechar faça “clique” e a prende. Possui igualmente uns orifícios redondos para a circulação de ar.

Para uma embalagem deste tipo, a máquina termoformadora ideal possui as seguintes estações:

Moldação: para moldar o maior número de peças;

Puncionamento: para criar os orifícios de circulação de ar;

Corte: para separar as peças da película;

Empilhamento: para fazer pilhas de peças e depois embalá-las para expedição;

Embalamento: coloca as pilhas automaticamente dentro de uma caixa na quantidade certa.



Figura 2.22 – Máquina termoformadora de grande cadência Illig RDK 90 [40]

Todas estas tarefas estão englobadas numa só máquina, o que torna o preço da embalagem competitivo quando se pretende produzir grandes cadências. Pode ter uma área de moldação até cerca de 80x80cm que permite produzir várias peças por ciclo. Acrescenta-se também o facto de se conseguir 1500 a 2500 ciclos de moldação por hora. Porém, este processo tem um custo associado de ferramentas dedicadas para cada tipo de produção.

Para peças que são produzidas individualmente, a arquitetura da máquina é mais simples, ideal para moldar produtos, como peças de automóvel, arcas frigoríficas, tabuleiros para linhas de produção, entre outros.



Figura 2.23 – Máquina termoformadora [41].

Esta máquina deverá ter as seguintes características:

Área grande de moldação,

Elevado poder de vácuo e de pressão,

Capacidade de trabalhar com espessuras grossas

Neste caso, a termoformadora, apenas faz a moldação, o corte que separa a peça da película é feito separadamente, fora da máquina.

Para melhor entendimento deste tipo de máquina, toma-se como exemplo a máquina termoformadora *Italproducts*, que está presente na empresa Sitecna, empresa colaboradora neste projeto.

A máquina foi produzida em 1980 pela empresa italiana *Italproducts* e é de arquitetura simples. Possui um sistema que puxa a película de matéria-prima no final de cada ciclo, permitindo assim ciclos automáticos sem a intervenção do operador.

Legendando a imagem que se segue (figura 2.24), tem-se o eixo de suporte da bobine de matéria-prima (1), a área de moldação com 700x430mm (2), as resistências multi-zonas para aquecimento do material (3), a tubagem para arrefecimento, da qual circula ar forçado direcionado para a zona moldante (4) e pneumáticos que acionam um mecanismo de arrasto da matéria-prima, útil para a máquina trabalhar em ciclos automáticos (5).



Figura 2.24 - Máquina Termoformadora *Italproducts*

Nesta máquina existem 5 etapas para completar 1 ciclo, desde a entrada da matéria-prima até à peça final: alimentação, aquecimento, moldação, arrefecimento e extração.

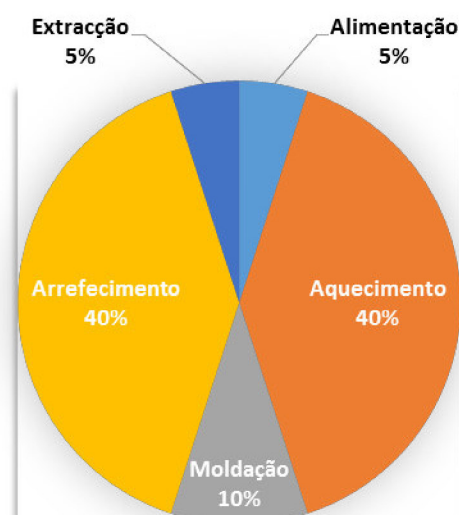


Figura 2.25 - Etapas do ciclo da máquina termoformadora

Os valores da figura 2.25 são apenas exemplificativos da generalidade das produções, tendo uma tolerância de 10% nas etapas maiores. Cada produção tem valores diferentes de modo a obter ciclos curtos com peças bem moldadas.

Seguindo cada uma das etapas, começa-se com a alimentação. Nesta etapa a máquina puxa da bobine a matéria-prima para a zona de moldação fazendo o curso mínimo necessário para não haver desperdício de material.

De seguida, o material aquece. O conjunto de resistências desloca-se à área de moldação, ficando por cima da película para a aquecer. A temperatura das resistências será sempre superior àquela que é desejada no material. A temperatura do material vai ser controlada através do tempo a que está exposto às resistências.

Atingida a temperatura desejada do material, as resistências deixam a área moldante e imediatamente é acionado o sistema de vácuo para que seja feita a moldação. Nesta fase pode também ser acionado o sistema de contramolde, caso haja.

Terminada a moldação, são acionadas umas turbinas que expõem ar à temperatura ambiente diretamente para a zona de moldação, fazendo assim o processo de arrefecimento.

Quando o material tiver arrefecido, é acionada a extração que, no fundo, é a inversão do sistema de vácuo. A máquina passa agora a injetar ar pelos canais de vácuo de forma a desmoldar a peça que ainda se encontra dentro do molde. Simultaneamente a essa injeção de ar, o molde é baixado da zona moldante, soltando a peça.

Recentemente esta máquina foi alvo de melhorias no sistema de aquecimento. Atualmente possui resistências que atingem 370°C e é possível controlar o aquecimento dividindo a área total por zonas e regular a temperatura em cada zona, permitindo assim uma afinação mais rigorosa e um melhor desempenho.

Quanto à capacidade de vácuo, também foi melhorada, conseguindo 7.0 Bar de pressão, permitindo uma moldação de películas/placas até 6mm de espessura.

As ferramentas associadas são muito mais baratas (menos de metade da máquina de grande cadência), mas apenas permite 60 a 120 peças por hora.

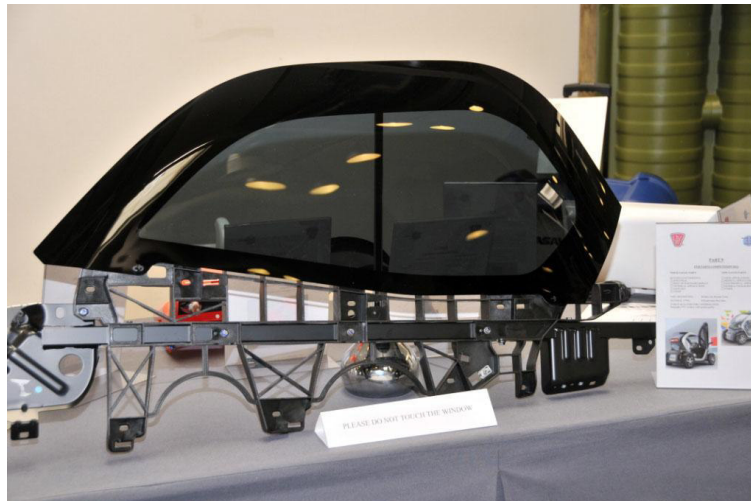


Figura 2.26 – Peça automóvel termoformada [42]

Máquina Termoformadora - Illig RV74

Voltando às máquinas de grande cadência, estas são atualmente, as que apresentam elevada precisão e rapidez derivadas do desenvolvimento tecnológico que os fabricantes depositam.

Assim, segue uma breve descrição pelas várias etapas que uma película de matéria-prima passa, desde a bobine até à transformação no produto final.

Tomemos como exemplo a máquina termoformadora Illig RV74, que atualmente está presente na empresa Sitecna, empresa colaboradora neste projeto.



Figura 2.27 - Máquina termoformadora Illig RV74

Esta máquina é construída na Alemanha, nos arredores de Estugarda pela Empresa *ILLIG Maschinenbau* que, em conjunto com a *Keifel*, lideram o mercado de máquinas de termoformação por vácuo. A *ILLIG* foi inclusive, a primeira empresa a construir a primeira máquina de termoformação por vácuo no mundo em 1960 [43].

Esta empresa criou simultaneamente manuais técnicos dentro deste processo de fabrico que são uma referência importante para o seu estudo, abordando temas como afinações para melhor desempenho, comportamentos das várias matérias-primas, regras para a correta execução de ferramentas, entre outros assuntos.

Esta máquina de termoformação por vácuo é constituída por vários módulos ou estações que executam determinadas tarefas.

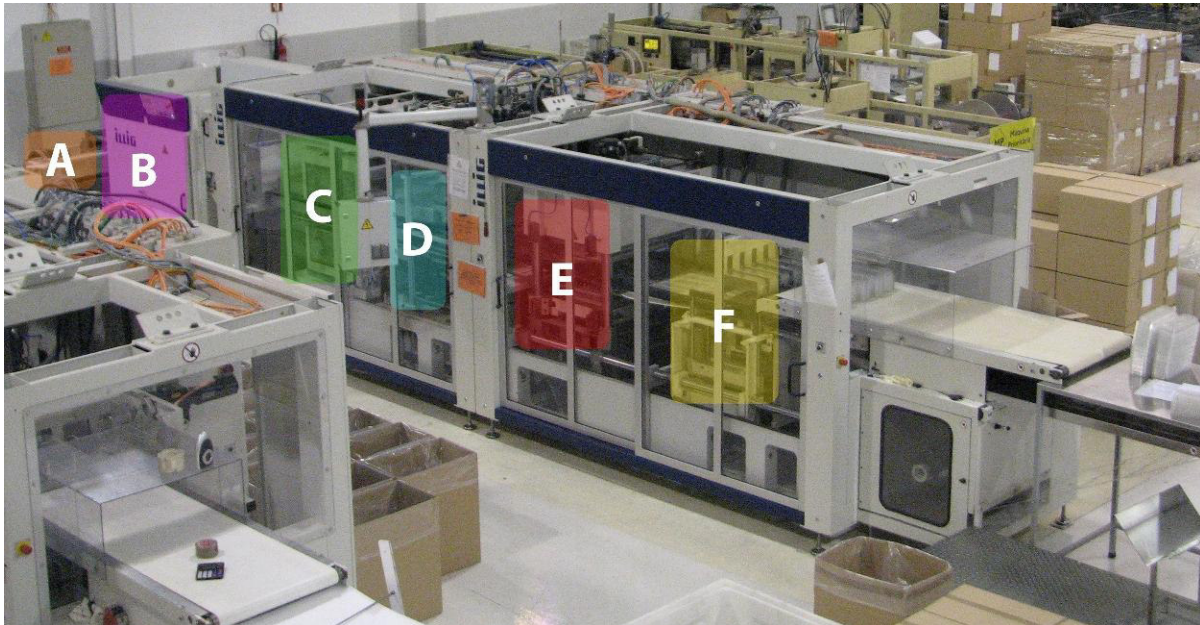


Figura 2.28 - Etapas da máquina termoformadora

Zona A

A primeira zona da máquina é onde o rolo de matéria-prima é encaixado. Possui um dispositivo que vai puxando a película suavemente à medida que esta é solicitada pela máquina. Suporta um rolo até 1000kg ou com um diâmetro máximo de 1200mm [43].



Figura 2.29 - Encaixe do rolo de matéria-prima

Zona B

Aqui encontra-se o *Pre-Heater* que executa um pré-aquecimento por contacto à matéria-prima.



Figura 2.30 - Câmara de pré-aquecimento

Trata-se de um dispositivo opcional na aquisição da máquina. É constituído por 1 ou 2 cilindros revestidos com um material antiaderente que por contacto vão aquecer o material. Um ventilador de ar quente vai uniformizar a temperatura no interior da câmara antes da saída para a estação de aquecimento.

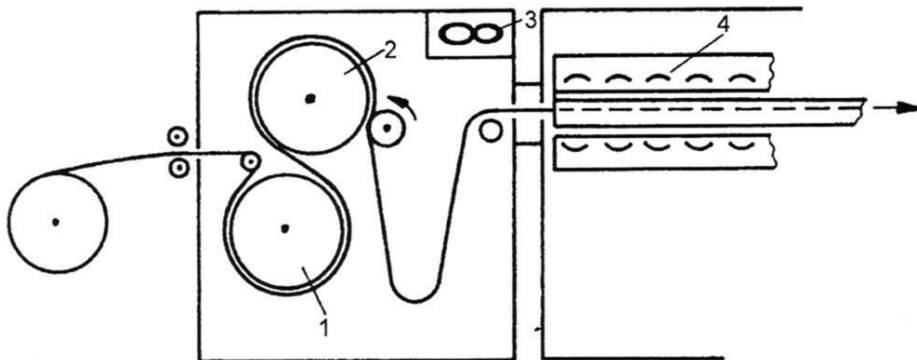


Figura 2.31 - Esquema do dispositivo de pré-aquecimento [43].

O uso deste dispositivo apresenta uma série de vantagens a assinalar. O material ao passar pelas estações de pré-aquecimento e na seguinte, a de aquecimento, vai atingir a temperatura desejada de uma forma gradual sem grande choque térmico. Desta forma, consegue suprimir tensões ao material, permitindo-o ter um melhor desempenho nas estações seguintes. O facto de o material não estar em tensão vai proporcionar um correto estiramento e uma contração homogénea. Ao permitir um melhor desempenho do material, vai-se conseguir ter ciclos de moldação mais curtos e uma menor taxa de refugo.

Existem também dispositivos apenas com um cilindro, de diâmetro maior mas com as

mesmas prestações que o de dois cilindros. De acordo com o fabricante ILLIG, são mais indicados para matérias-primas com espessuras até 500µm. Os de dois cilindros já suportam até 1000µm e permite uma temperatura máxima de 180°C.

Zona C

Nesta zona encontra-se o aquecimento propriamente dito à película de matéria-prima. O propósito desse aquecimento é tornar a matéria-prima maleável de modo a adquirir a forma de um balão flexível que posteriormente será aspirado no molde através dos inúmeros furos de aspiração existentes no mesmo.



Figura 2.32 - Estação de aquecimento e seus componentes

Esta estação é constituída por duas grandes zonas de aquecimento: a superior (1) e a inferior (2). Cada zona possui 9 linhas por 7 colunas de resistências (3) e cada resistência tem regulação independente. Deste modo e de acordo com a forma da peça a moldar, pode-se alterar a temperatura em zonas mais críticas da peça. Esta amplitude térmica é de cerca de 50°C. A temperatura máxima que cada resistência pode atingir ronda os 500°C [43].

Trata-se portanto de aquecimento por radiação e quanto mais espesso é o material, maior é a sua taxa de absorção. Cada versão de material (modelo, cor, etc.) tem a sua própria taxa de absorção.

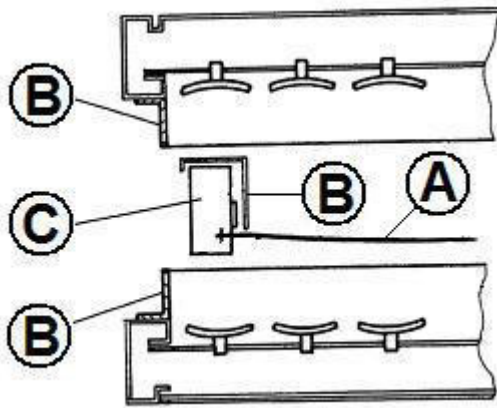


Figura 2.33 - Esquema do Aquecimento [43].

De salientar a existência de refletores (B) para uma melhor distribuição da radiação. Deste modo, ao ser refletida permite que as radiações atinjam a película de vários ângulos do género ricochete, evitando também o escape das mesmas para o exterior.

De uma forma geral, junto às guias (4 ou C), ou seja, nos rebordos da película, é onde necessita de mais temperatura porque o facto de as guias estarem a segurar o material torna-o mais resistente ao estiramento a que vai ser sujeito.



Figura 2.34 - Guias de prisão da película

A guia é uma corrente com um dente em cada elo que perfura a película segurando-a com firmeza suficiente para suportar o pára-arranca a que está sujeita. Irá guiar a matéria-prima pelas várias estações.

Zona D

Aqui encontra-se a estação de moldação. É aqui que se localiza o molde e onde a película ganha a forma desejada.

Para explicar o funcionamento desta etapa do processo, atente-se ao exemplo de um molde em bucha.

O resultado final será uma embalagem para acondicionar um ambientador doméstico, como se pode observar nas figuras em baixo.



Figura 2.35 - Embalagem de um Ambientador doméstico com blister interior

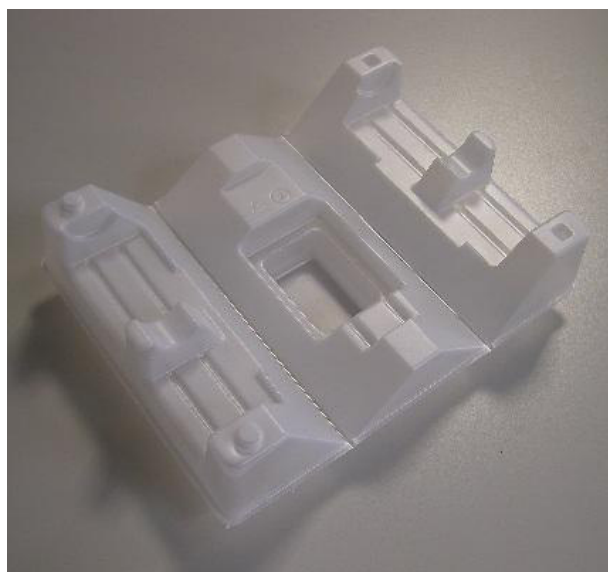


Figura 2.36 - Blister do interior da embalagem

A ferramenta de moldação é constituída pelo molde, um contramolde e duas molduras ou marcos que, quando fechadas entre si, irão criar uma câmara de vácuo com a película no seu interior.

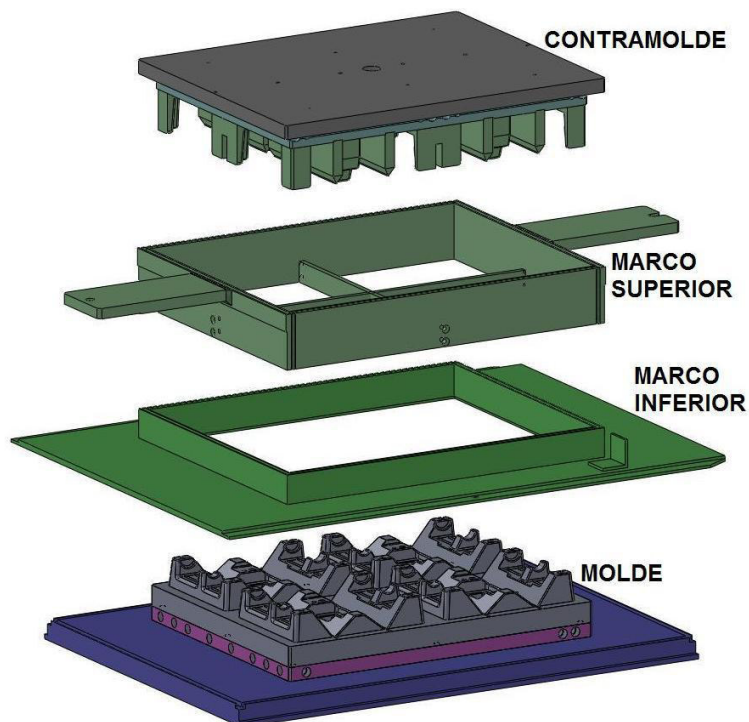


Figura 2.37 - Ferramenta de Moldação aberta

Numa primeira fase, as ferramentas encontram-se afastadas entre si, enquanto a matéria-prima presa às guias e já aquecida avança uma distância programada, posicionando-se na área definida pelo marco. A película (não visível na figura) situa-se entre os marcos superior e inferior.

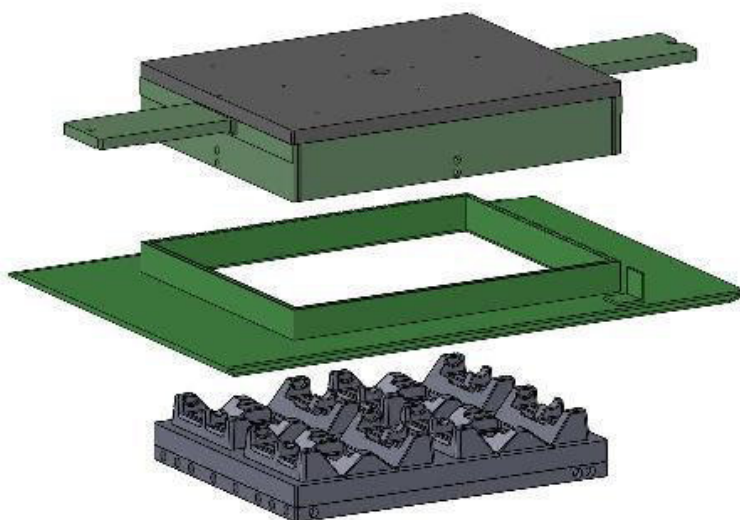


Figura 2.38 - Avanço do contramolde

De seguida, o contramolde vai-se encostar ao marco superior. Entre estas ferramentas existe um vedante que, em conjunto com a película irá criar uma câmara no lado superior da película.

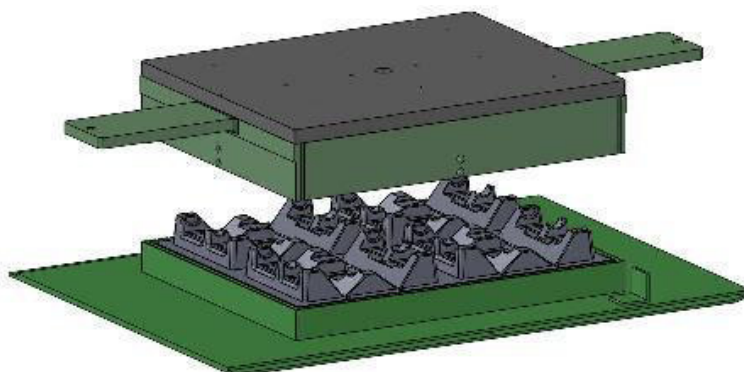


Figura 2.39 - Avanço do molde

Como é mostrado figura 2.39, no próximo passo o molde avança até encostar-se ao marco inferior. Também entre estas ferramentas existe um vedante que em conjunto com a película irá criar outra câmara, mas no lado inferior.

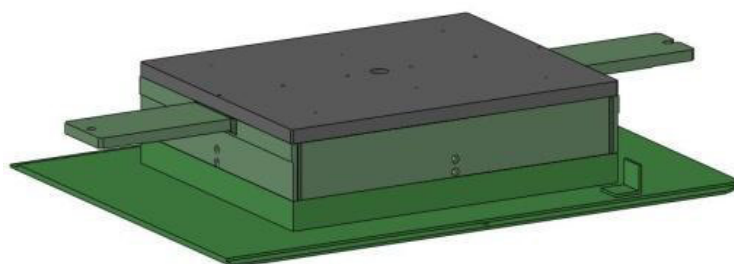


Figura 30 - Moldação fechada

A moldação fica fechada e a película entalada. Nesta posição, o molde e o contramolde estão em contacto com a película criando o pré-estiramento.

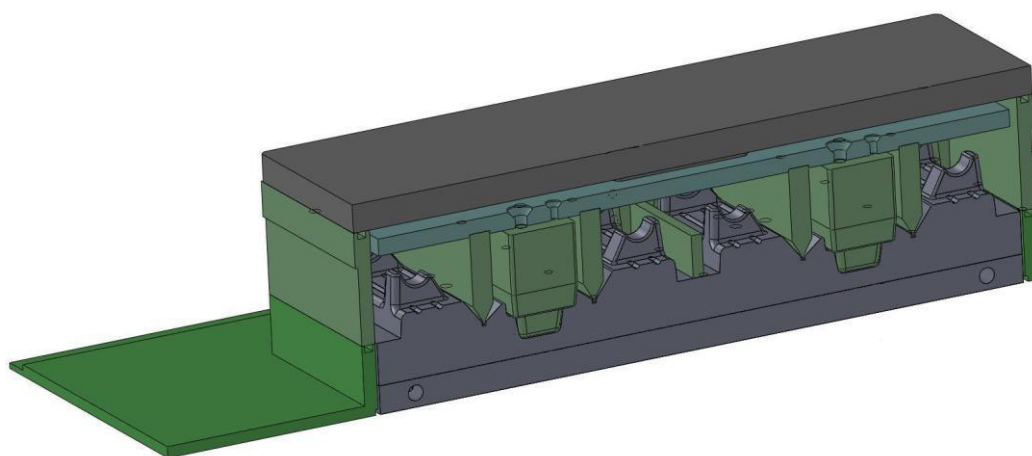


Figura 2.41 - Corte da moldação fechada

Na figura 2.41 é possível observar a moldação fechada. De salientar que o contramolde nunca colide com o molde, fica sim, a uma distância suficiente para cumprir o seu objetivo, que é pré-estirar a película, homogeneizando a espessura da película.

De seguida, o sistema de vácuo existente na máquina vai atuar e puxar a película até às paredes da zona moldante. Este sistema cria vácuo na câmara inferior e é este mesmo vácuo que faz mover o material, aliado ao facto de este estar quente e maleável. Em simultâneo, na câmara superior da película acontece o inverso, ou seja, o material é empurrado para as paredes do molde através de ar comprimido que entra na câmara.

Resumindo, existem duas forças a atuar na matéria-prima mas em sentidos opostos, garantindo uma termoformação correta e rápida.

Dá-se a abertura da ferramenta mas a película moldada está agarrada às paredes do molde. Para a extrair, o fluxo do ar é invertido para se dar a extração do material. Esta inversão é instantânea, na ordem das centésimas de segundo. Se no molde havia aspiração para puxar a matéria-prima, agora há pressão para que esta se solte do molde. Enquanto se dá esta pressão, o molde desce de forma a desprender-se da moldação, ficando esta apenas agarrada às guias, pronta para ser guiada até à estação de corte [43].

Zona E

A estação de corte irá executar o corte em volta da peça, separando-a do material excedente. Funciona como uma prensa de corte constituída por duas bases: uma inferior e outra superior. É numa destas bases que os cortantes podem ser fixos. No entanto, só a superior é aquecida, pelo que se torna vantajoso fixá-los a esta. Deste modo, ao aquecer os cortantes por contacto melhora o seu desempenho, visto que assim elimina rebarbas em alguns tipos de matéria-prima, que aparecem mais tarde por consequência do desgaste dos cortantes.

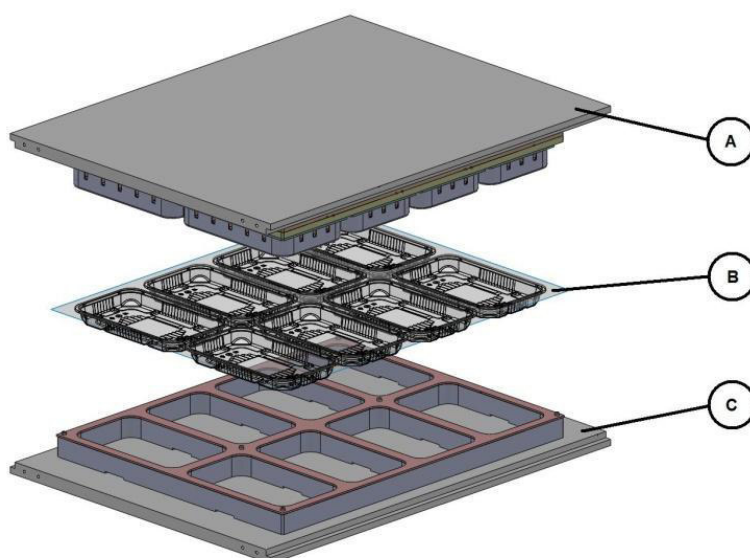


Figura 2.42. - Ferramenta de corte aberta

Na figura 2.42 é visível a estação de corte aberta. Neste exemplo de ferramenta, pretende-se cortar oito bandejas alimentares (B). Os cortantes estão presos na base superior (A). A base inferior (C) é uma base em que no seu plano mais alto tem uma chapa inox para onde os cortantes irão bater no fecho do corte.

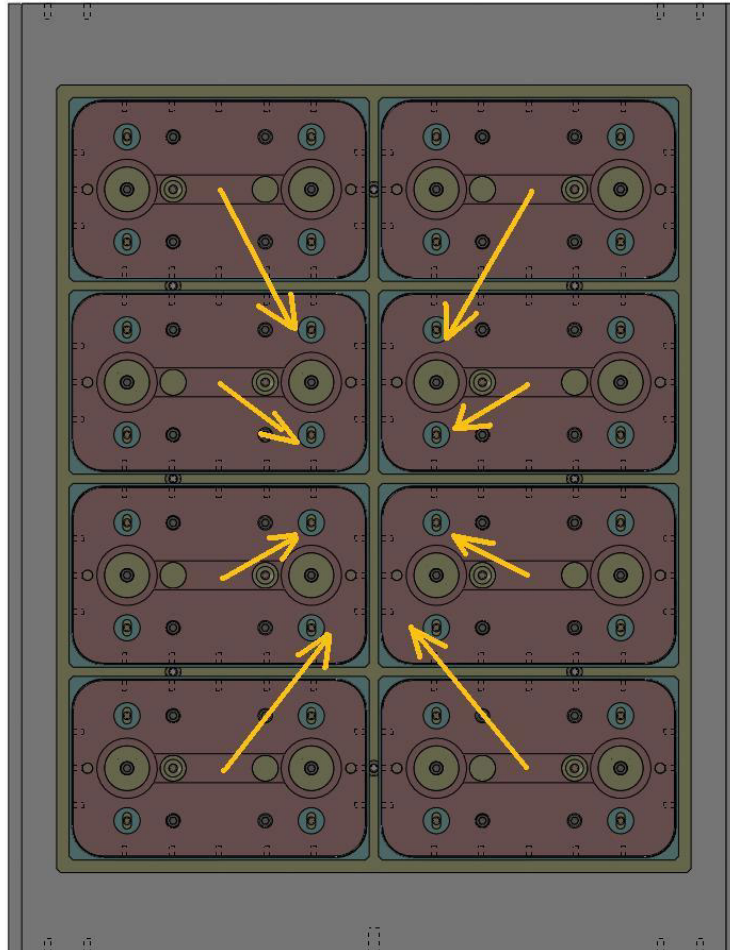


Figura 2.43 - Sentido da contração

Para estas situações de várias cavidades é preciso ter em conta o fator contração. As cavidades dos extremos são as que mais se deslocam devido esse efeito. E quanto maior for a área de moldação mais se torna visível. Há que prever uma ferramenta com corte ajustável.

É importante salientar que o corte não desprende as peças do desperdício. Estas ficam presas na maioria dos casos por 4 pontos, mas a um pequeno toque, soltam-se. Esta função serve para que não caiam fora da zona de empilhamento. Por isso, é de grande importância que todas as chapas estejam retificadas para que o cortante assente com o gume todo, executando um corte perfeito.

Há um fator a ter em conta ainda na fase preliminar de um projeto. Embora a prensa tenha uma força de 40ton, esta força vai ser distribuída pelas lâminas dos vários cortantes. Quanto mais espessa for a matéria-prima, mais força as lâminas vão precisar.

Por este motivo, o fabricante fornece uma tabela (ver Anexo I) que indica a relação entre a espessura do material e o perímetro total das lâminas. Ao cumprir os valores que a tabela impõe, fica-se com a certeza que a força de fecho da máquina é suficiente para cortar todas as peças [43].

Zona F

Nesta última zona situa-se a zona de empilhamento.

Quando as peças moldadas chegam a esta estação, já estão cortadas mas ainda presas ao desperdício em 4 pontos minúsculos, geralmente nos cantos das peças.

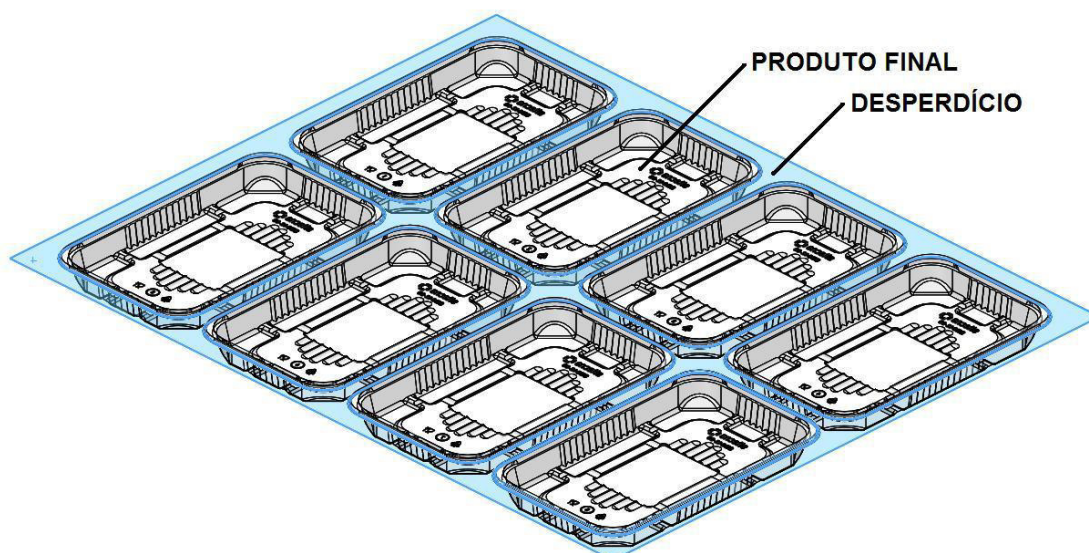


Figura 2.44 - Produto final e desperdício

A função desta estação é separar e empilhá-las em pilhas com uma determinada quantidade (configurável). Quando as pilhas atingirem um determinado número são empurradas para um tapete rolante onde está um operador que as vai acondicionar numa caixa de cartão.

A figura em baixo mostra o aspeto desta estação.

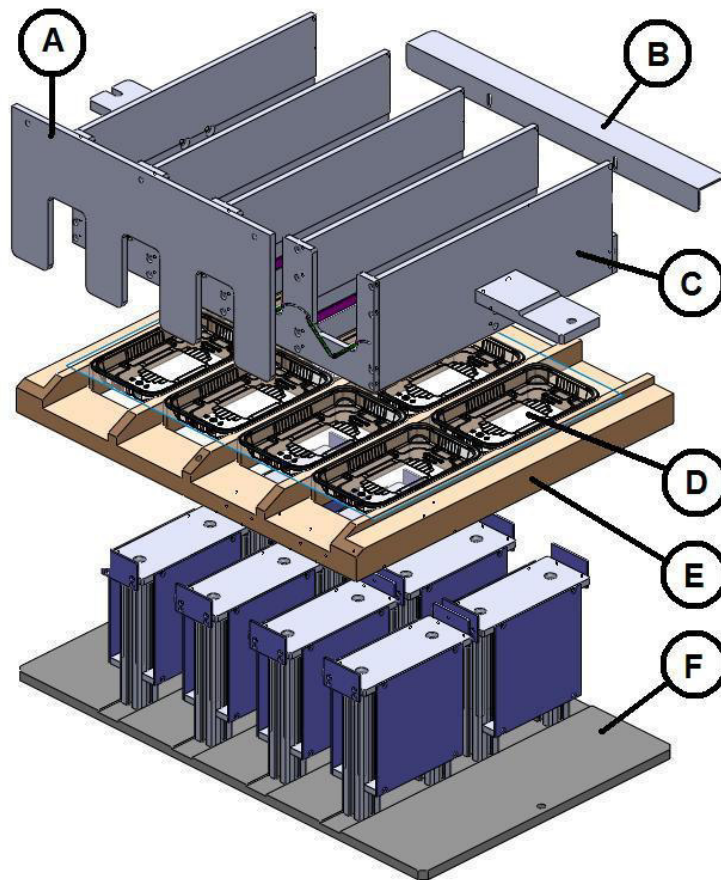


Figura 2.45 - Estação de empilhamento

Descrevendo as diversas peças desta estação, tem-se a raquete (A) que arrasta as pilhas de peças para o tapete. A quantidade de peças que a pilha possui é determinada de acordo com o volume da caixa de cartão.

Existe uma rampa (B) que se destina a preencher o espaço existente entre o empilhador e o tapete para que não caiam peças.

O empilhador (C) é o local onde as peças vão sendo sobrepostas de forma a criar as pilhas. Deve garantir um empilhamento perfeito, evitando que qualquer peça possa ficar mal encaixada, para não prejudicar o ciclo de produção.

Em (D) encontram-se as peças moldadas prontas a serem separadas do desperdício.

O Gabari (E) vai entalar a película moldada ao empilhador. Esta fica fixa e o destacador (F) poderá mais facilmente separar as peças do desperdício.

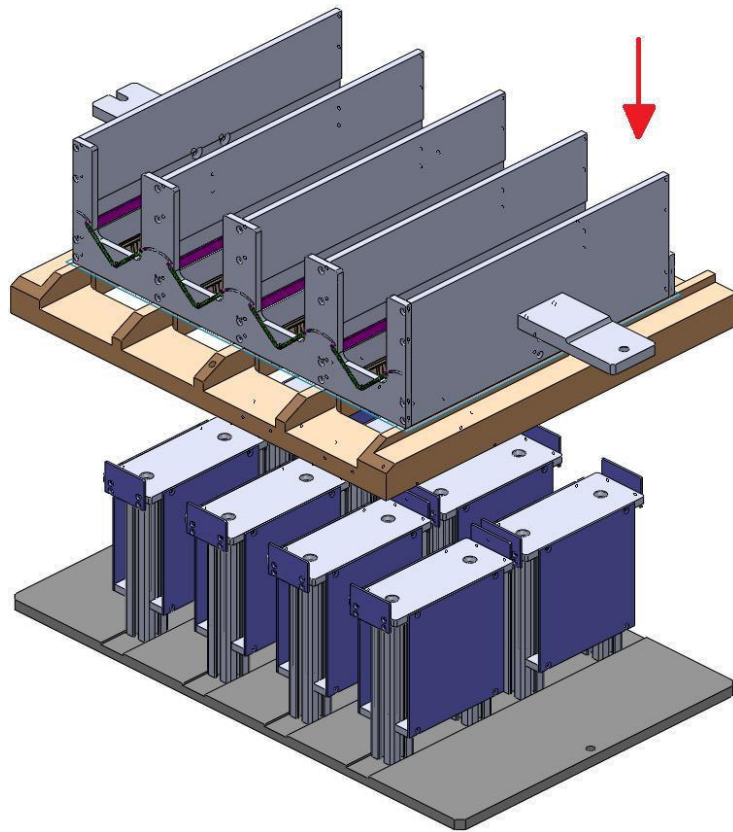


Figura 2.46 - Descida do empilhador

Este ciclo começa quando a moldação está posicionada em cima do Gabari. O Empilhador desce até ao Gabari e ambos vão entalar a moldação pela zona do desperdício, deixando as várias cavidades intactas.

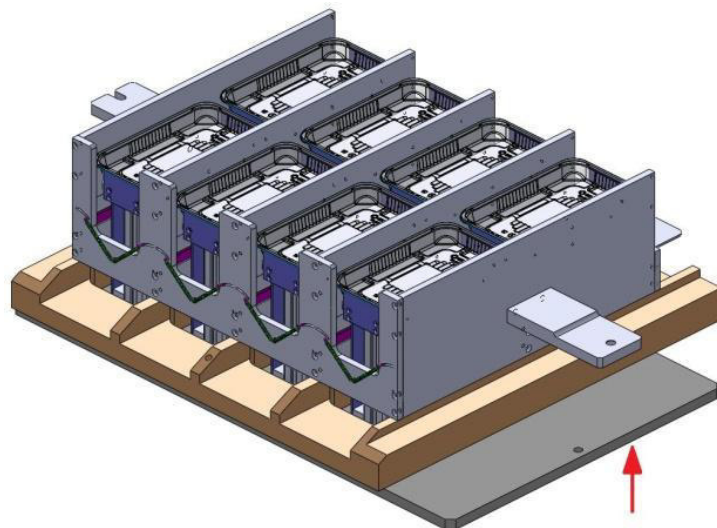


Figura 4.47 - Elevação do destacador

De seguida, o destacador sobe, indo ao encontro das cavidades, rompendo as ligações que as faziam continuar presas ao desperdício. Depois deste rompimento a subida não é interrompida e, com as peças já separadas do desperdício, o destacador entra por dentro do empilhador até uma determinada altura.

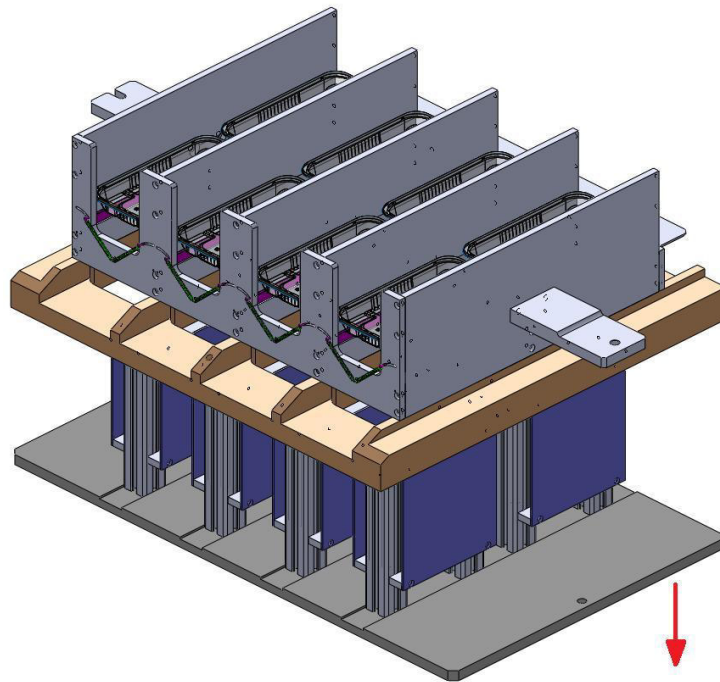


Figura 2.48 - Descida do Destacador

Atingindo essa altura, volta a descer. Durante a descida as peças vão ficar encurraladas no empilhador por meio de umas dobradiças que, devido à sua configuração atuam como válvulas, deixando as peças entrar mas não as permitindo sair. Ao ficarem presas ficam também imobilizadas o que permite que a peça que venha no ciclo seguinte encaixe na primeira peça [43].

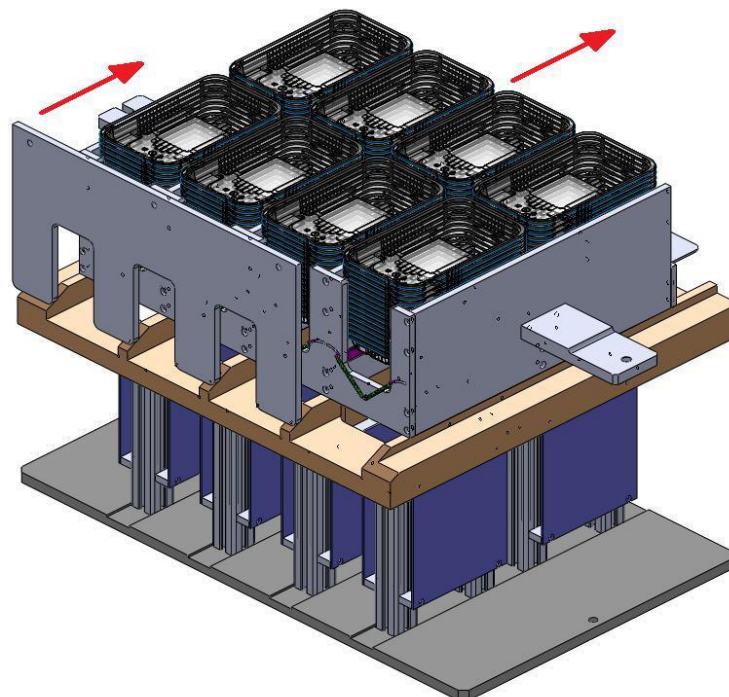


Figura 2.49 - Raquete empurrando as pilhas de peças

Durante um determinado número de ciclos as peças vão-se acumulando umas sobre as outras. Quando a pilha de peças atinge a quantidade desejada, o destacador sobe ainda mais que o habitual de forma a elevar as pilhas até ao nível do tapete de saída. Aí a raquete é ativada e ao mover-se vai arrastar as pilhas até ao tapete. Na zona do tapete está um operador que vai manualmente acondicionar as pilhas de peças numa caixa de cartão.

Este operador é a única mão de obra necessária para uma produção nesta máquina. Ainda assim, existe um módulo/estação adaptável a esta máquina que coloca automaticamente as pilhas no caixote.

Estratégias de Termoformação

As estratégias de moldação dependem claramente do formato da peça, da sua função e de evidências que se queiram garantir, para tal deve-se definir uma estratégia de moldação correta, definindo à partida se a moldação será em bucha ou cavidade, com contramolde ou sem contramolde, entre outros fatores. Assim, nas figuras 2.50 a 2.55 estão descritas as diferentes estratégias de moldação.

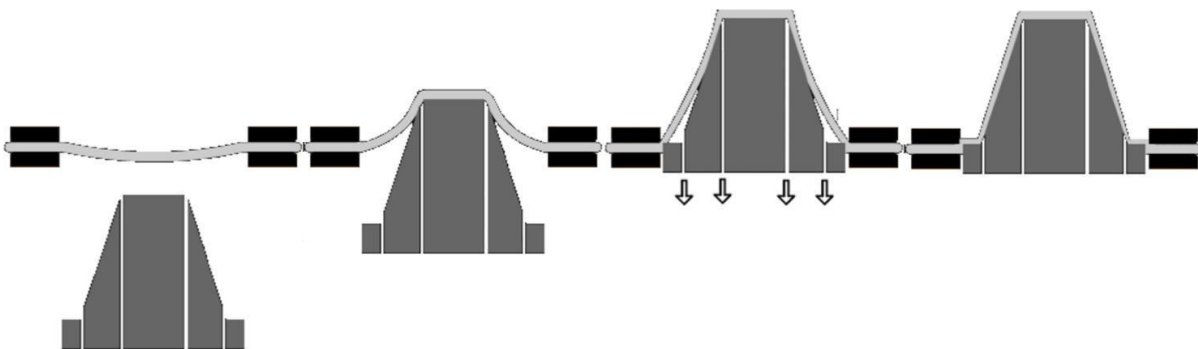


Figura 2.50 - Molde simples em bucha [44].

Nesta primeira configuração é apresentado um molde simples em bucha. O molde ao completar o seu curso, inicia o vácuo, forçando a película a aderir às suas paredes e conformar-se. Esta estratégia criará mais espessura de material no topo do molde.

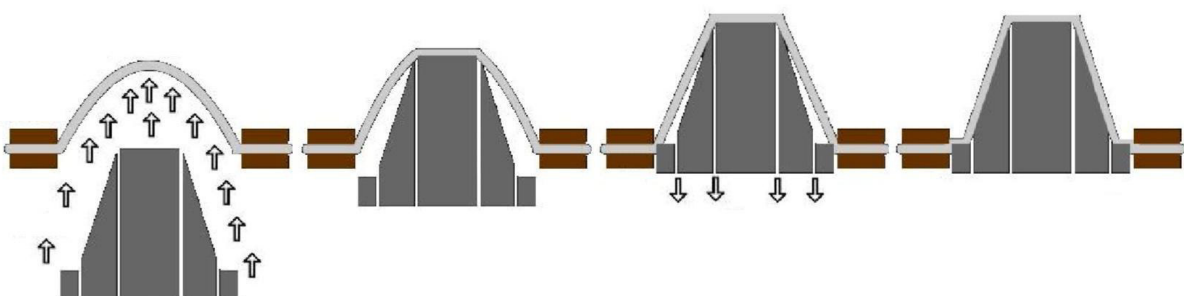


Figura 2.51 - Molde simples em bucha com criação de balão [44]

Na figura 2.51 mostra o processo de moldação em bucha em que é criado um balão inicial através da circulação de ar comprimido. Com esta estratégia consegue-se melhorar a homogeneidade da espessura do material, pois minimiza o efeito de estiramento.

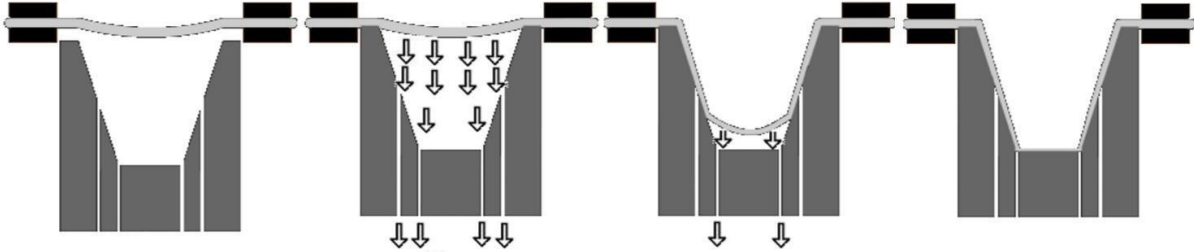


Figura 2.52 – Molde simples em cavidade [44].

Para o caso de moldes em cavidade (figura 2.52) a espessura na cota 0 é sempre superior junto à moldura de fixação da película, em detrimento nas restantes zonas da peça que a espessura é claramente mais fina.

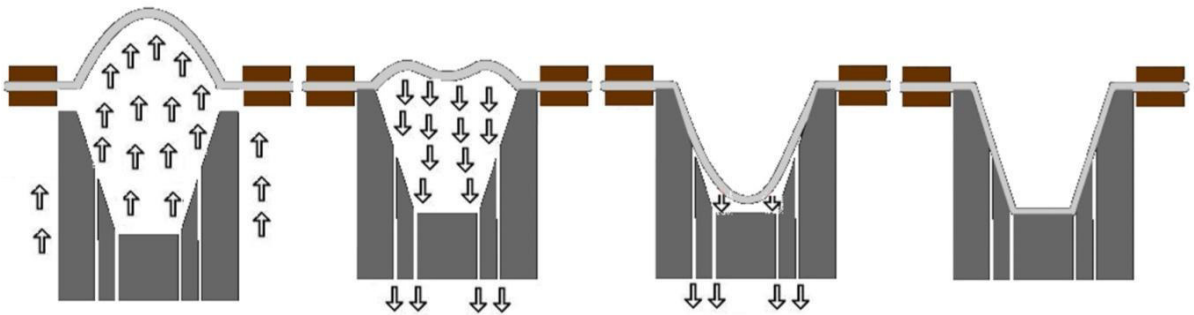


Figura 2.53 - Molde simples em cavidade com balão [44].

Na estratégia moldes em cavidade com balão, representado na figura 2.53, o balão permite minimizar o estiramento da película e distribuir a espessura mais uniformemente.

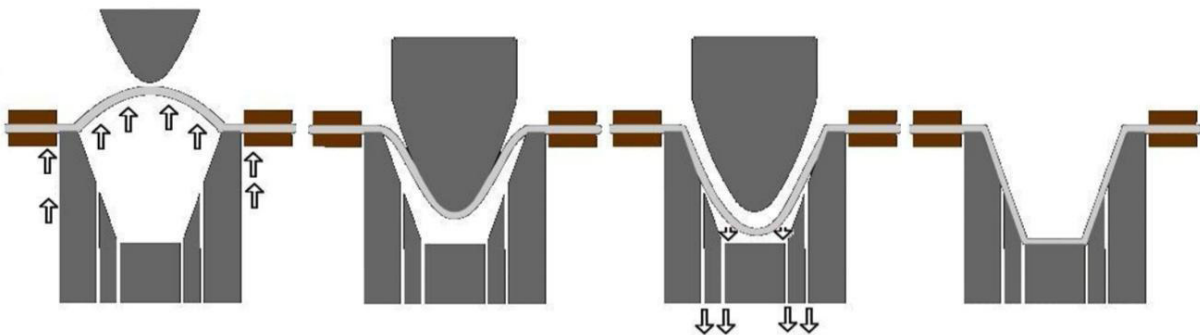


Figura 2.54 - Atuação de contramolde [44].

A atuação de um contramolde irá fazer chegar espessura a zonas específicas da peça. Permite uma homogeneidade superior à da simples aplicação de balão, embora aumente não só o custo da ferramenta, como também o tempo de ciclo.

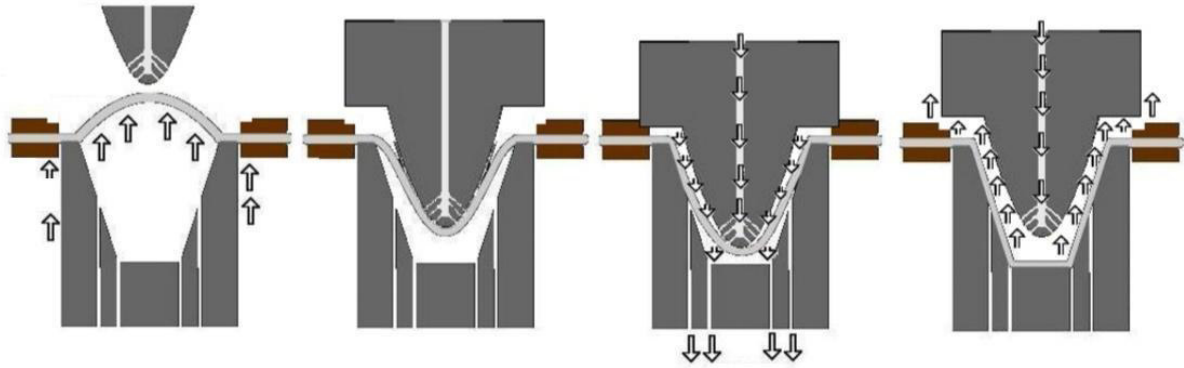


Figura 2.55 - Vácuo e compressão [44].

A figura 2.55 demonstra uma estratégia mais elaborada composta por várias etapas. Começa pela criação de balão, segue-se a atuação de um contramolde e do vácuo que permite moldar a película nas paredes do molde. Simultaneamente é aplicado ar comprimido na zona superior para melhor evidenciar os detalhes da peça que, de outra forma, o vácuo simples não conseguiria evidenciar [44].

Defeitos Inerentes ao Processo de Termoformação

Quando se está a projetar um produto termoformado existem duas características das quais se deve ter em conta: as pregas e o estiramento.



Figura 2.56 – Pregas



Figura 2.57 – Estiramento

Pregas

Numa descrição geral, as pregas são o excedente de material que não foi absorvido pela espessura do mesmo. Isto é, durante a moldação a película vai ao encontro das paredes do molde e, no caso da zona moldante ser sinuosa ou possuir saliências, pode criar acumulação de material, dando origem às pregas. De acordo com a forma de cada peça, este fenómeno irá aparecer em zonas críticas como na figura 2.56 em que aparece entre dois pinos ou como na figura 2.57 em que aparece nas arestas [42].

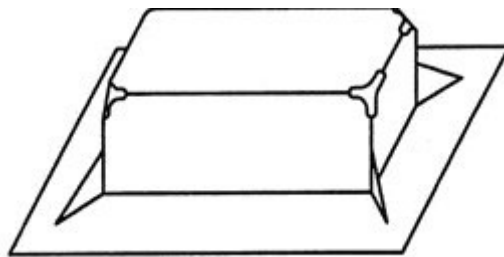


Figura 2.58 - Exemplo de formação de pregas [43].

Para evitar o surgimento deste fenómeno, antes de se iniciar o vácuo ou a formação da pressão, o material quente encontra-se preso ao marco "ABCD" (figura 2.59) é pré-estirado como uma tenda ao entrar em contacto com a bucha. No topo da bucha fica o teto da tenda "abcd". Repare-se que este pré-estiramento criou 4 arestas: "Aa", "Bb", "Cc" e "Dd".

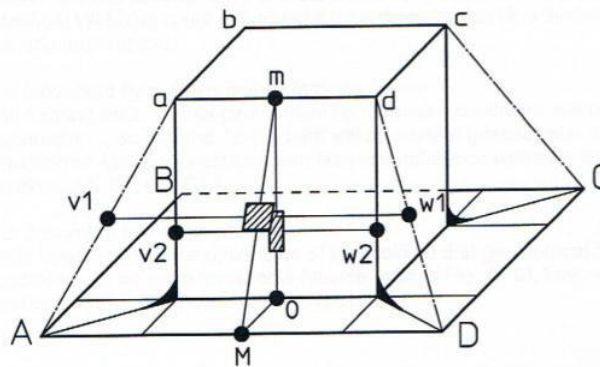


Figura 2.59 - Esquema da formação de pregas [43].

No centro da linha "Mm" da parede frontal da tenda "AadD", verifica-se que durante a moldação os pontos "M" e "m" não saíram do lugar, mas a distância "Mm", tal como uma hipotenusa, esticou em todo o comprimento dos 2 catetos "MO+Om".

Se se tiver em conta a linha horizontal central "v1w1" vai-se verificar que, durante a moldação, esta encurtou para "v2w2". Isto significa que o material quente durante a moldação tem de passar por uma compressão na horizontal.

Contando que o material permite compressão, então não haverá pregas. Caso a compressão seja muito rigorosa, em certas áreas, e o material não consiga absorver, então as pregas vão surgir [42].

Para prevenir estas ocorrências existem diversos métodos que podem ser implementados, com destaques dos mais comuns.

Prevenir o arrefecimento rápido do material, ou seja, a ferramenta de moldação não deve estar demasiado fria para que o material não arrefeça rapidamente e dê tempo para o mesmo se conformar nas paredes do molde e em detalhes acentuados;

Aplicar um raio grande no lado superior do molde permitirá que o processo de compressão geométrica não seja tão abrupto. Na figura 2.60 é possível ver que o comprimento das arestas “Aa”, “Bb”, “Cc” e “Dd” diminuiram;

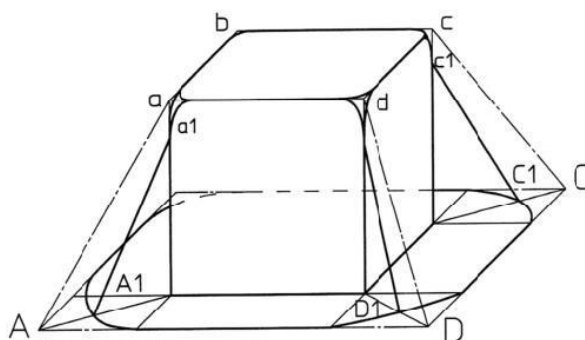


Figura 2.60 – Criação de raios nas arestas e vértices do molde [43].

Aplicar divisórias na moldura da máquina permitirá a criação de um balão individual para cada cavidade do molde (ficando a “tenda” mais pequena). Caso contrário, ter-se-ia um só balão para várias cavidades, não existindo assim uma barreira a intervalar cada cavidade. Deste modo, durante a moldação, as buchas provocariam pregas entre si (figura 2.61). Com as divisórias, este problema praticamente desaparece, exceto em casos em que a altura das buchas é mais acentuada [43].

Figura 2.61 – Moldura sem divisórias [43].

Figura 2.62 – Moldura com divisórias [43].

Criar um contramolde para uniformizar a espessura do material em zonas críticas. A prega é esmagada pelo contramolde obrigando a espessura a absorver o material em excesso. Contudo, se houver muito material em excesso para ser eliminado e a espessura não for suficiente para o absorver, este terá de ir para algum lado. Na figura 2.63 ilustra que uma prega grande se transformou em duas pequenas devido à ação do contramolde.

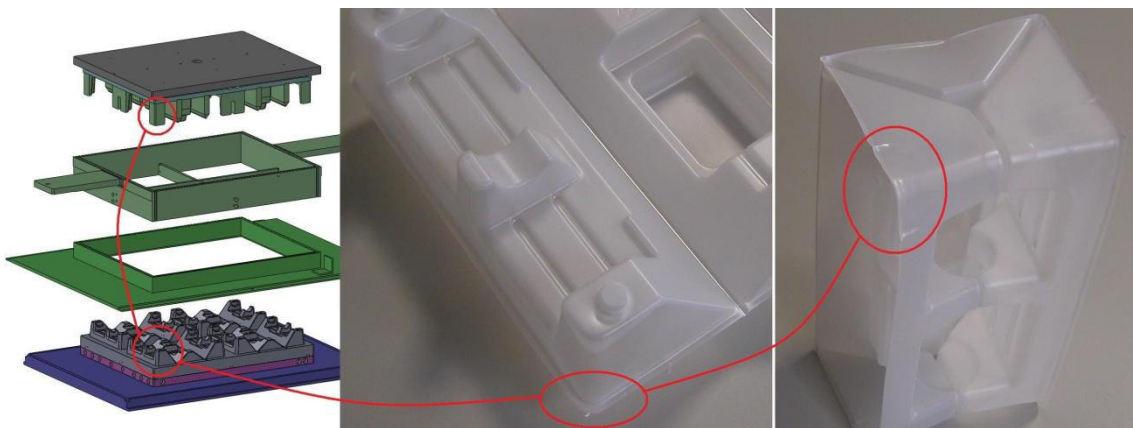


Figura 2.63 - Contramolde a comprimir pregas

Deixar um espaçamento mínimo entre buchas 1.5 vezes maior ao valor da altura da mesma. Se as buchas tiverem 50mm de altura, o espaçamento entre elas deverá ser, no mínimo, 75mm (figuras 2.64 e 2.65).

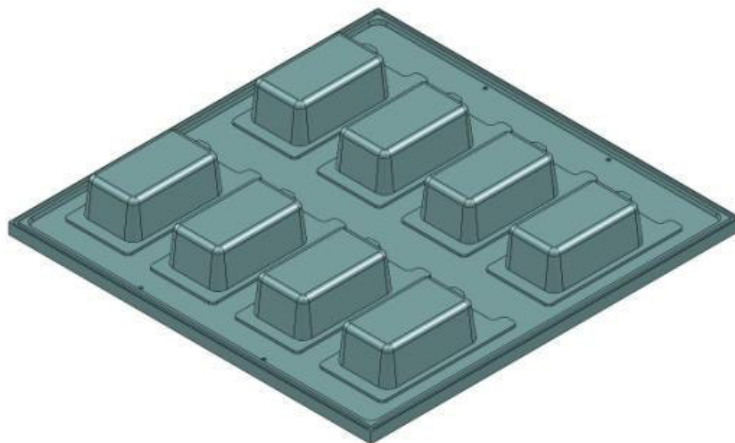


Figura 2.64 – Buchas menos espaçadas.

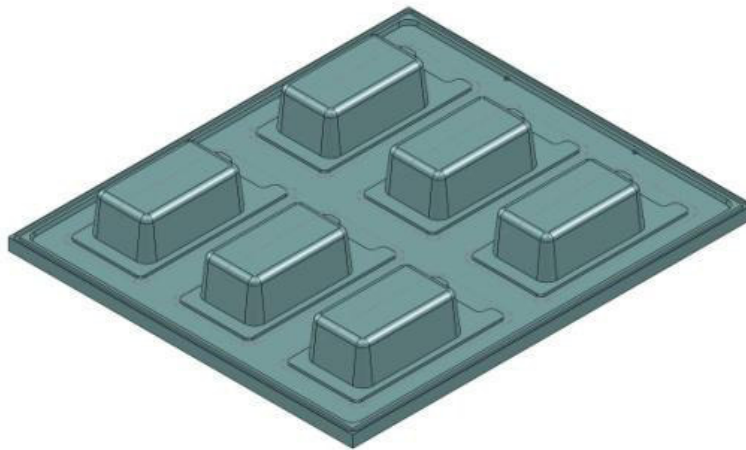


Figura 2.65 – Buchas mais distanciadas.

Estiramento

O estiramento é um fenómeno que consiste no ato de esticar a película de modo a chegar a todos os pontos da zona moldante. Com o processo de aspiração da película, por meio de vácuo, ela vai ganhando a forma do molde. Para abranger toda a zona moldante, a espessura do material vai sendo distribuída pelas várias paredes do molde e, conseqüentemente, deixa de ser uniforme [43].

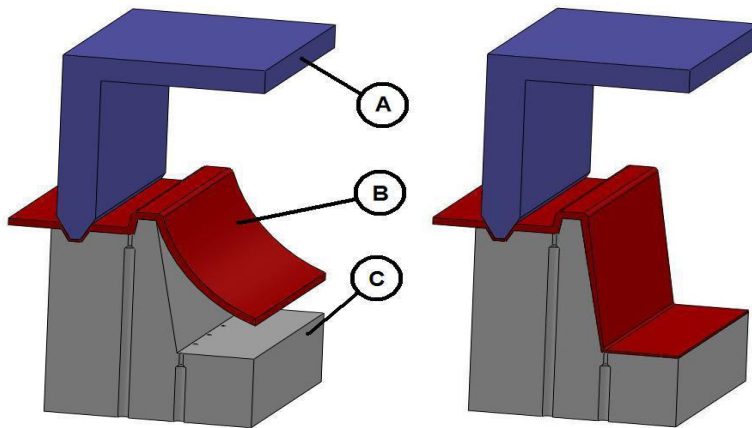


Figura 2.66 - Aspiração e Estiramento

Como se pode verificar na figura 2.66, no fim da película (B) tomar a forma do molde (C), nota-se que a espessura deixou de ser uniforme. A peça (A) é uma moldura à volta do molde que fixa a película e também veda a área moldante para impedir a fuga de vácuo e de pressão.

Na figura 2.57 a matéria-prima do copo de iogurte possui listas brancas e vermelhas. Na parede do copo é possível observar que a lista vermelha quase quadruplicou a sua dimensão devido ao estiramento. Ou seja, a película foi esticada e nesta mesma parede

ficou com cerca do quádruplo da espessura original.

É um fenómeno que, mais acentuado ou menos visível, está sempre presente em todas as peças termoformadas.

Zonas negativas em peças termoformadas

No processo de termoformação, existem peças que precisam de zonas negativas, não só para criar bases de assentamento, mas também para criar prisões às peças a acondicionar, para sistemas poka-yoke, etc.

Estas são soluções muito utilizadas em tabuleiros para linhas de produção.

Oscilo batentes

A técnica oscilo batente caracteriza-se por um postigo que roda em torno de um eixo. Esse eixo está numa extremidade do postigo de modo a que o seu peso o faça voltar sempre à posição zero. Deste modo, o postigo é acionado quando se dá a extração, forçado pela geometria da peça. O material deste deve ser em ferro ou outro material pesado para garantir o seu movimento (figura 2.67).

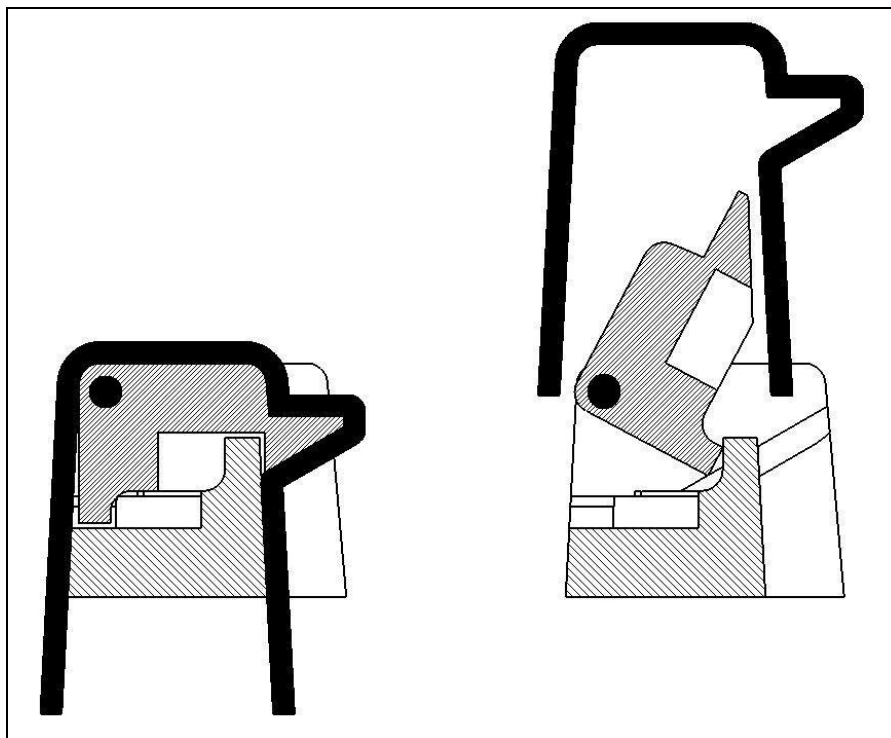


Figura 2.67 - Esquema de funcionamento dos postigos oscilo-batentes

Este dispositivo foi aplicado em tabuleiros para uma linha de montagem de ecrãs para caldeiras domésticas, como está presente nas figuras 2.68 e 2.69. Com esta técnica, garantiu-se o correto empilhamento dos tabuleiros, ficando todos corretamente posicionados como pretendido pelo cliente (figura 2.70).



Figura 2.68 - Tabuleiros com peças empilhados



Figura 2.69 - Pormenor do assentamento

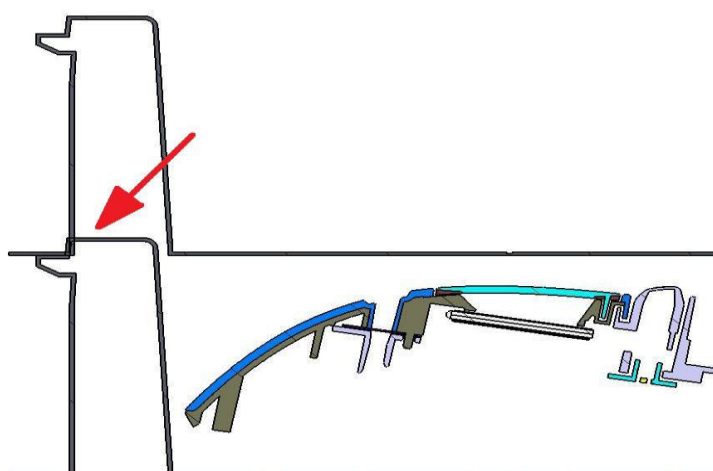


Figura 2.70 - Pormenor do Assentamento

Negativos Simples

Os negativos simples caracterizam-se por assentamentos na peça para que estas sejam empilháveis, através da moldação de zonas negativas no molde (figura 2.71). Estas zonas são extraídas de forma forçada, pelo que deve ter um ângulo de saída suave, para não danificar a peça moldada.

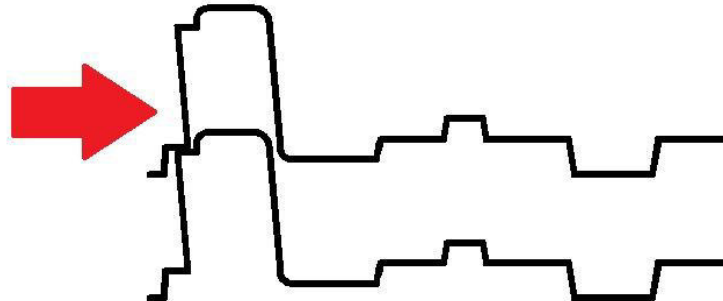


Figura 2.71 - Negativos Simples

Esta opção de assentamento tem como desvantagem, a dificuldade de extração no molde. Dependendo da geometria da peça, raramente se pode ir além dos 8° negativos em máquinas convencionais. No entanto, existem máquinas termoformadoras específicas que moldam zonas negativas acentuadas e permitem a sua extração.

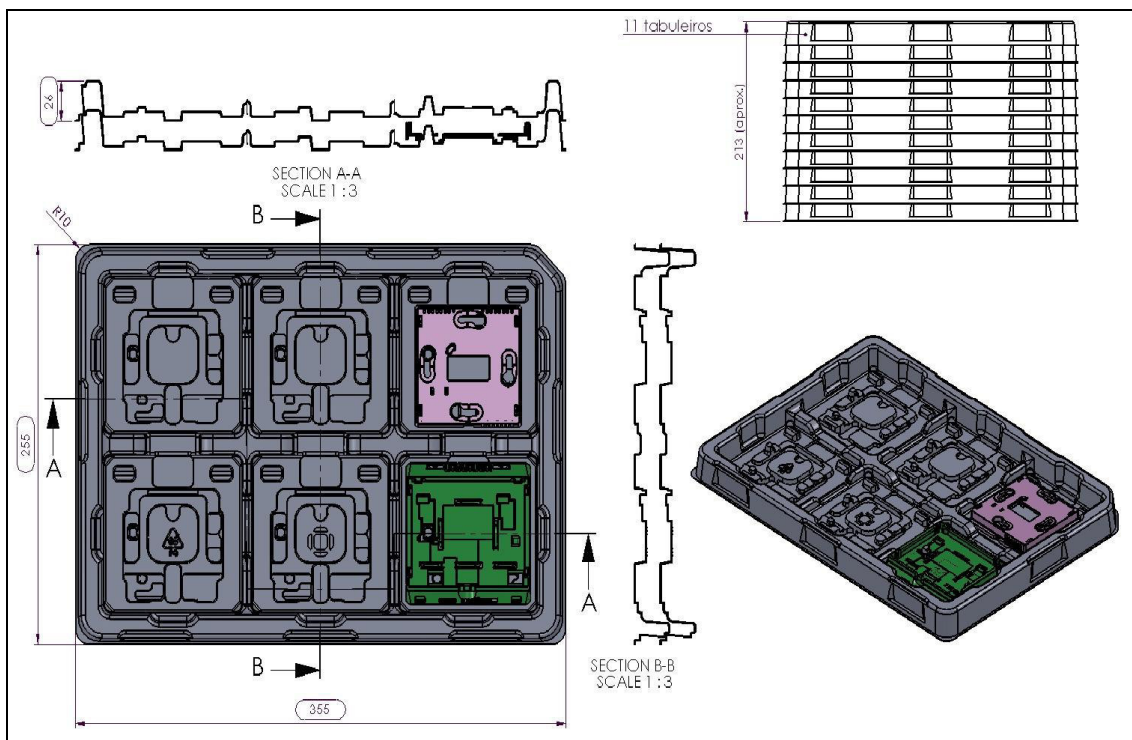


Figura 2.72 - Desenho de um tabuleiro

Na figura 2.72 mostra um caso em que o empilhamento dos tabuleiros deverá ser numa só posição (poka-yoke). Caso o operador o rode ele não encaixa. É possível observar que um dos cantos do tabuleiro está cortado. É um método utilizado para, ainda assim, ajudar o operador a posicionar corretamente o tabuleiro.

Postiços Soltos

Os postiços soltos são uma solução ideal para protótipos e pequenas séries. Este método é de fácil execução, rápido e de baixo custo (figura 2.73). Tem a desvantagem de, por cada moldação, ser necessário retirar os postiços manualmente das amostras. Há que retirá-los com cuidado para não as danificar (figura 2.74).



Figura 2.73 - Postiços montados no molde protótipo.

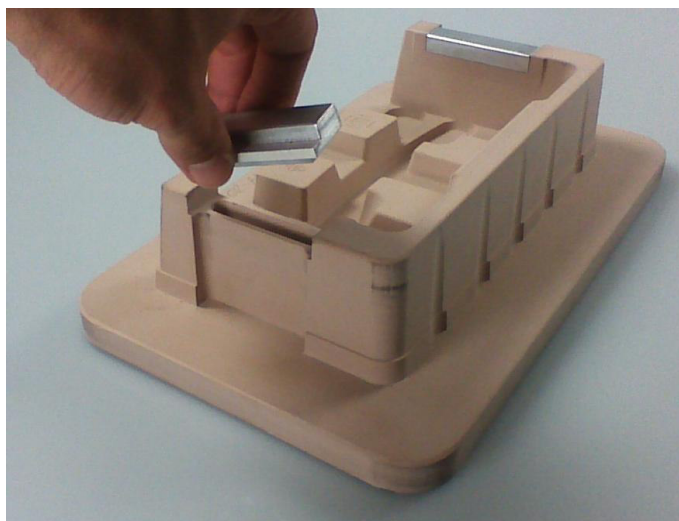


Figura 2.74 - Postiços soltos.

As bases de assentamento não são feitas exclusivamente com zonas negativas. Existe outra solução a considerar, como por exemplo, o empilhamento rodado.

Empilhamento rodado

O empilhamento rodado é uma solução prática que permite duas posições de assentamento: uma para acondicionamento dos tabuleiros vazios (figura 2.75) e outra para acondicionamento com os tabuleiros cheios (figura 2.76).



Figura 2.75 - Tabuleiros vazios arrumados.

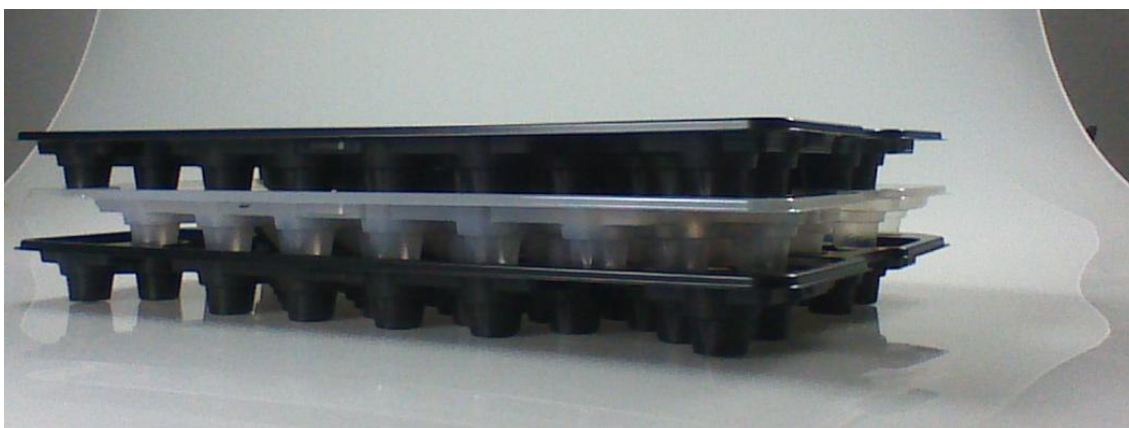


Figura 2.76 - Tabuleiros com peças e empilhados.

Como as figuras mostram, este tabuleiro é vantajoso na sua arrumação, isto é, quando não estão em uso, podem ser encaixados entre si, poupando espaço.

Para empilharem os tabuleiros com peças, ter-se-á de rodar 180° o tabuleiro que fica por cima, de forma a deixar espaço para as peças.



Figura 2.77 - Bases de assentamento do tabuleiro.

Na figura 2.77 estão assinalados os pontos de assentamento onde um tabuleiro igual, mas rodado a 180° vai assentar. Neste caso, existe o risco do operador se enganar e, ao não rodar o tabuleiro, pode assentá-lo em cima das peças acondicionadas no tabuleiro de baixo.

3. Materiais e procedimentos

Neste capítulo são apresentados os materiais testados bem como as técnicas utilizadas no processamento e caracterização dos materiais. Os materiais caracterizados são utilizados no fabrico de peças Termoformadas para os vários setores da indústria, desde bandejas alimentares aos tabuleiros técnicos para a indústria automóvel.

No processo de termoformação a matéria-prima é aquecida e conseqüentemente, as propriedades mecânicas do material a processar são alteradas para permitir a deformação do material, por forma a se obter a peça final. Assim, foram realizados ensaios mecânicos *versus* temperatura de modo a analisar os comportamentos dos materiais considerados neste trabalho.

3.1 Materiais ensaiados

A informação relativa às características dos materiais plásticos por parte dos fabricantes é escassa, disponibilizando apenas fichas com alguma informação (Anexos II e III).

Tabela 3.1: Materiais termoplásticos ensaiados

Material	Fabricante	Espessura	Cor
APET	Klöckner Pentaplast	800 μ	Transparente
HIPS	Candeas	1000 μ	Preto

O termoplástico APET ensaiado é um material essencialmente utilizado na indústria alimentar e conseqüentemente, cumpre normas rígidas relativamente ao setor alimentar. Este material é um material *standard* para este setor. No entanto, sob pedido ao fabricante pode apresentar propriedades extra através da introdução de aditivos. Algumas das propriedades são a resistência ao frio do congelador, a resistência ao aquecimento de micro-ondas, resistência à adsorção ou libertação de gases (material barreira), a capacidade de suportar produtos alimentares corrosivos (molhos).

Este material, apesar das suas propriedades focalizadas no setor alimentar também pode ser usado noutros ramos.

O Poliestireno de Alto Impacto (HIPS), é um material com determinada percentagem de reciclado, não anunciada. No entanto, as propriedades enunciadas no Anexo III estão garantidas. Existe uma propriedade muito requisitada, não incluída nesta amostra que consiste na condutividade da eletricidade, muito útil para eliminar o efeito de estática. Se este material for usado para a moldação de tabuleiros transportadores de componentes elétricos, este é, sem dúvida, um requisito que o cliente vai pedir.

3.2 Densidades

A determinação das densidades dos materiais utilizados neste trabalho teve como objetivo poder comparar as densidades obtidas com as indicadas pelo fabricante da matéria-prima. Foram realizados três ensaios e obtidos os valores médios para cada material.

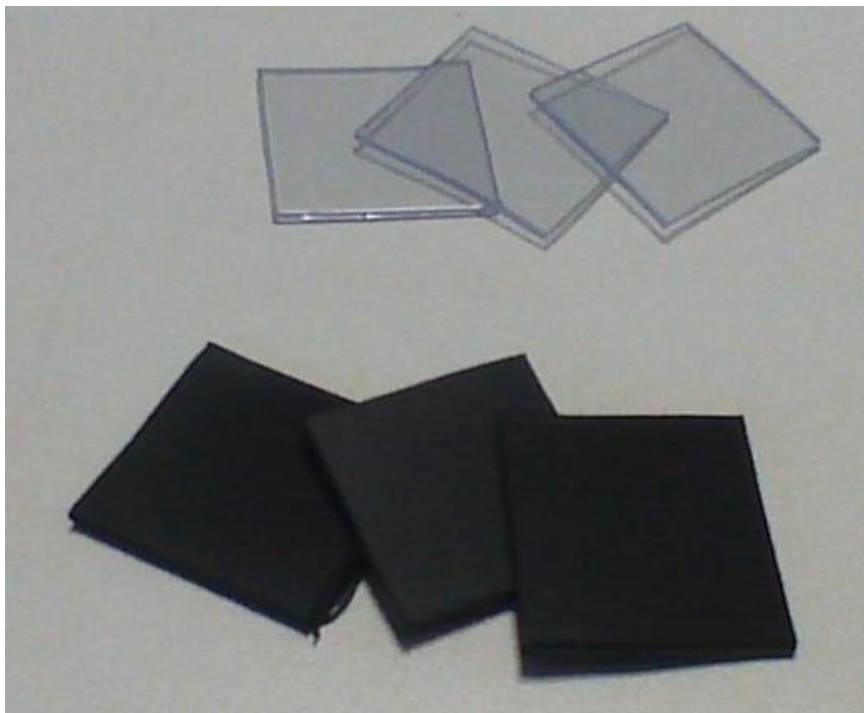
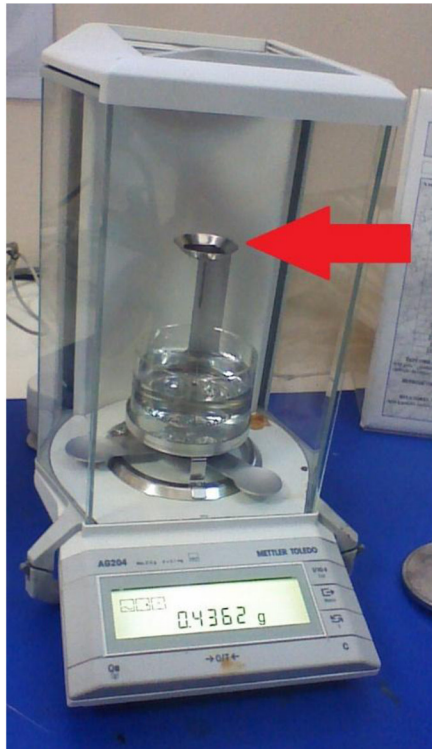


Figura 3.1 - Amostras utilizadas na determinação das densidades

Os ensaios de densidade foram realizados com o apoio de uma balança eletrónica de precisão (figura 3.2) à temperatura ambiente de 21°C. Este aparelho está equipado com um dispositivo que permite calcular as densidades pelo método descrito abaixo. Este tipo de ensaios não requer amostras com dimensões específicas.



a)



b)

Figura 3.2 – Balança eletrônica utilizada na determinação das densidades: pesagem das amostras em seco (a)) e submersas (b)).

O método usado para a determinação das densidades têm base o *Princípio de Arquimedes*. Na determinação das densidades dos materiais processados foi utilizado o seguinte procedimento:

- 1) Determinação da massa do material (m_c);
- 2) Determinação da massa aparente (m_a);
- 3) Cálculo da temperatura da água (T_{H_2O});

4) Cálculo da densidade da amostra pela fórmula: $\rho = \left(\frac{m_c}{m_c - m_a} \right) \cdot \rho_{H_2O}$

A ρ_{H_2O} deve ter em conta a temperatura da água medida no ponto 3.

Na tabela em baixo estão apresentados os resultados finais e os fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3.2: Resultado do ensaio *versus* dados do fabricante

	APET		HIPS	
	Dados do fabricante	Resultado do ensaio	Dados do fabricante	Resultado do ensaio
Densidade (gr/cm³)	1.32 a 1.36	1.34	1.06	1.05

3.3 Geometria dos provetes

Para os ensaios DMA foram utilizados provetes com as seguintes dimensões:

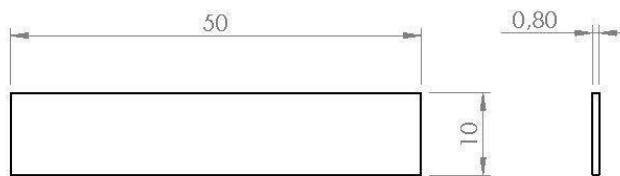


Figura 3.3 - Dimensão do provete em APET para ensaio DMA.

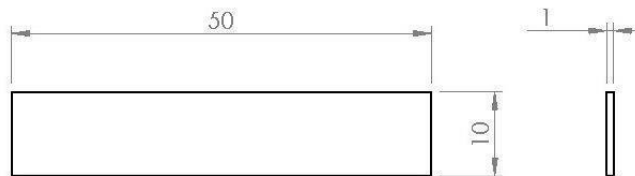


Figura 3.4 - Dimensão do provete em HIPS para ensaio DMA.

A diferença reside apenas na espessura, devido a ser o material que havia disponível.

Para os ensaios de tração foram utilizados provetes com as seguintes dimensões:

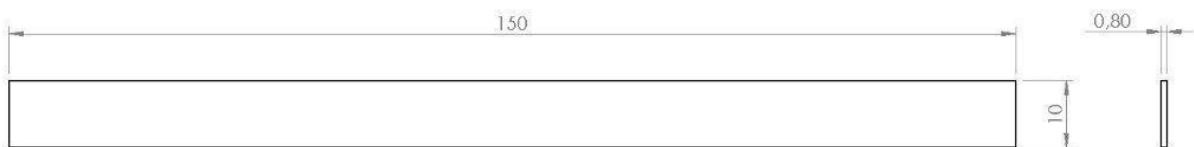


Figura 3.5 - Dimensão do provete em APET para ensaio de tração.

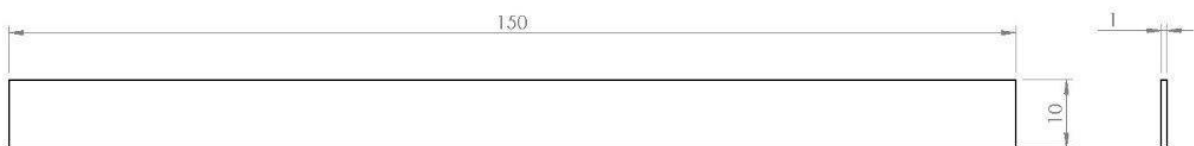


Figura 3.6 - Dimensão do provete em HIPS para ensaio de tração.

3.4 Ensaios DMA

A Dynamic Mechanical Analysis (DMA) Tem como um dos principais objetivos relacionar as propriedades mecânicas de cada material às relaxações moleculares associadas a mudanças e deformações microscópicas geradas a partir de rearranjos moleculares [43].

É uma técnica onde se pode avaliar o comportamento mecânico de um material, quando sujeito a um programa de temperaturas controladas e sob o efeito de uma força mecânica que se altera no tempo. Uma análise de DMA depende, como é de esperar, do modo de operação como se pode verificar pela figura 3.7.

A norma alemã DIN53457 é a referência neste tipo de análise térmica. Foram obtidos os módulos elásticos (storage modulus E_1) e viscosos (loss modulus E_2) e o coeficiente de dano ($\tan \delta$, damping coefficient).

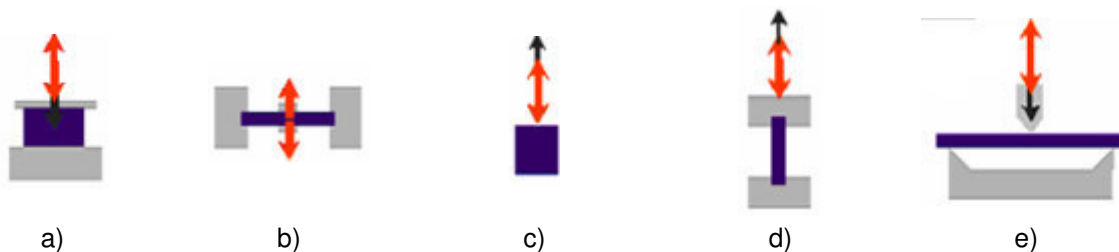


Figura 3.7 - Módulos de operação de um conjunto DMA: a) compressão/penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tração e e) flexão em três pontos.

Com este tipo de análise pode-se obter a temperatura de transição vítrea (T_g). A temperatura de transição vítrea é a propriedade do material onde se pode obter a temperatura da passagem do estado vítreo para um estado “maleável”. A transição vítrea é um importante parâmetro nas áreas de processamento, pesquisa e desenvolvimento, devido à grande importância com relação às mudanças das propriedades relacionadas a esses materiais, onde se pode estudar o comportamento em função da temperatura.

Na determinação da variação do módulo, loss modulus e $\tan \Delta$ versus temperatura, foi naturalmente considerado a configuração d) (tração).

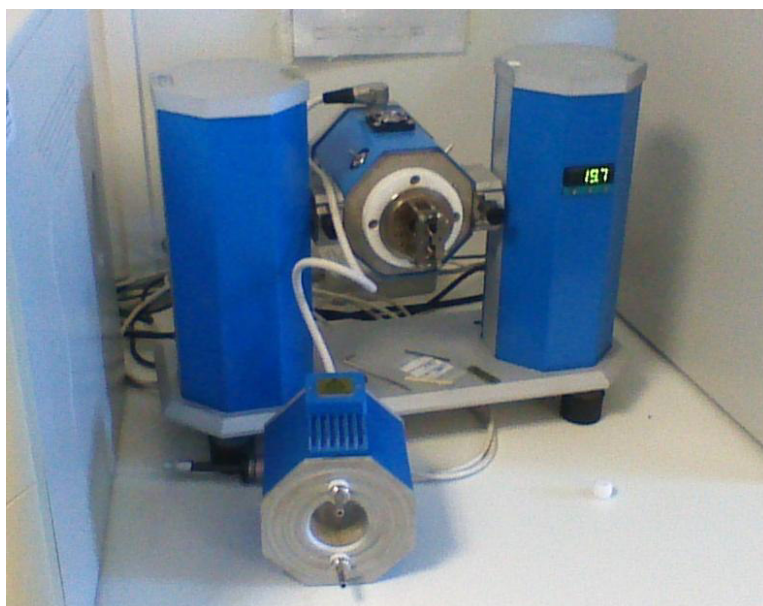


Figura 3.8 - Equipamento de ensaios DMA

3.5 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina eletromecânica Zwick / Z100 (Figura 3.8) e de acordo com a norma da ASTM D638 (1980) à temperatura ambiente. Foram executados em controlo de deslocamento, com a velocidade do carregamento em todos os ensaios de 2 mm/min, registando-se a força, deslocamento e extensão dos provetes. Esta máquina possui uma consola de controlo e acoplamento a um computador, permitindo, através de um software específico, o controlo e tratamento de todos os parâmetros (carga, velocidade, deslocamento, etc.); permite também, a visualização do andamento da curva carga – deslocamento ao longo do ensaio, bem como o tratamento e armazenamento de resultados.

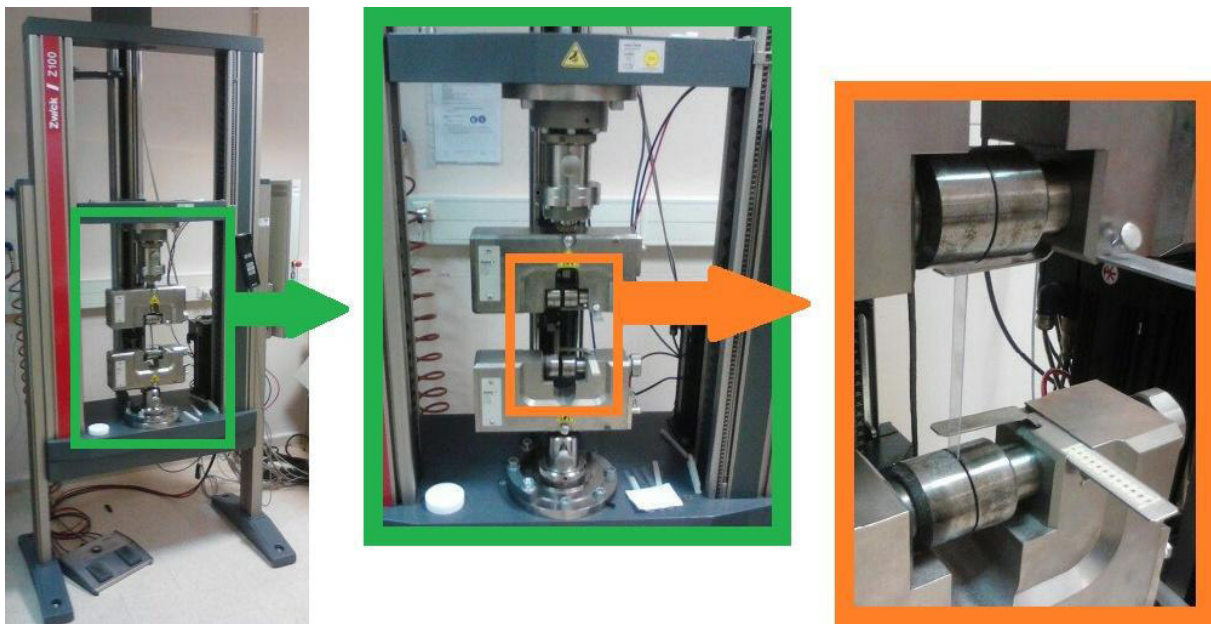


Figura 3.9 - Máquina de ensaios de tração com provete colocado.

Nos ensaios de tração com variação de temperatura foi utilizado o mesmo equipamento mas equipado com uma câmara ambiental (figura 3.10.). Por forma a garantir que a temperatura do provete era uniforme e estava à temperatura de ensaio foram colocados dois termopares junto ao provete.



Figura 3.10 - Câmara ambiental utilizados nos ensaios de tração com diferentes temperaturas de ensaio

3.6 Máquina de Termoformação

A máquina de termoformação utilizada nos ensaios foi construída em 1980 pela empresa italiana Italproducts e é de arquitetura simples.

Possui uma área de moldação com 700x430mm e aquece o material através de resistências que são controladas independentemente. Para arrefecimento da moldação possui uma turbina que força o ar para a moldação. Um mecanismo de avanço da matéria-prima permitir executar ciclos automáticos.



Figura 3.11 - Máquina Termoformadora Italproducts

3.7 Material para molde protótipo

Relativamente ao material do molde, atualmente existem no mercado algumas marcas produtoras de chapas em poliuretano. A Obo, a Sika e a Necumer são alguns exemplos.

Este material tem uma aparência e propriedades físicas semelhantes à madeira, porém, isento de veios, nós e com uma orientação molecular homogénea. Cada marca apresenta várias gamas de poliuretano com variantes no que diz respeito à densidade, resistência à temperatura, acabamento final. Cada gama tem a sua cor identificadora.



Figura 3.12 - Várias gamas da marca Obo.

Segundo estas marcas, o campo de aplicação principal destes materiais são mesmo os vários tipos de modelo: modelos de protótipo, de trabalho, de experiência e gabaris.

Porém, a sua utilização não vai além do mencionado, ou seja, restringe-se a aplicações de pequenas séries. É um material que pelas suas características não permite um acabamento brilhante, que nalguns protótipos é um fator importante. Por ser um material permeável, torna-se impossível criar um circuito de refrigeração, pelo que, ao dar-se um uso mais intensivo, começa a apresentar alguns empenos devido ao sobreaquecimento. Com uso do molde, o arredondamento das suas arestas é outra consequência visível e é nessa altura que acaba o ciclo de vida do modelo.

Das gamas que foram disponibilizadas para este trabalho, escolheu-se duas diferentes para testar essencialmente a sua maquinabilidade. Em baixo estão indicadas as suas características fornecidas pela marca:

Tabela 3.3: características dos placas de poliuretano

Gama OBO	Densidade (kg/m ³)	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Coefficiente de expansão térmica linear (temp. de 25 a 70°C)	Temperatura de deflexão (°C)
700	720	33	31	44x10 ⁻⁶ .K ⁻¹	80
1400	1200	94	100	76x10 ⁻⁶ .K ⁻¹	88

Durante a maquinação destes dois materiais, foi possível observar algumas diferenças. A gama 1400 revelou um acabamento superficial superior e a apara resultante

do desbaste da fresa era bem formada. No caso da gama 700, no desbaste a aparta veio em forma de poeira e quanto ao acabamento superficial, não permitiu um brilho mínimo, consequência da sua porosidade e baixa densidade.



Figura 3.13 - Aspeto do molde após maquinação

3.8 Centro de Maquinação CNC

Para a execução do molde recorreu-se a um centro de maquinação CNC. Foi desenvolvido pela empresa Tecnirolo especificamente para a execução de moldes protótipo para a Termoformação.

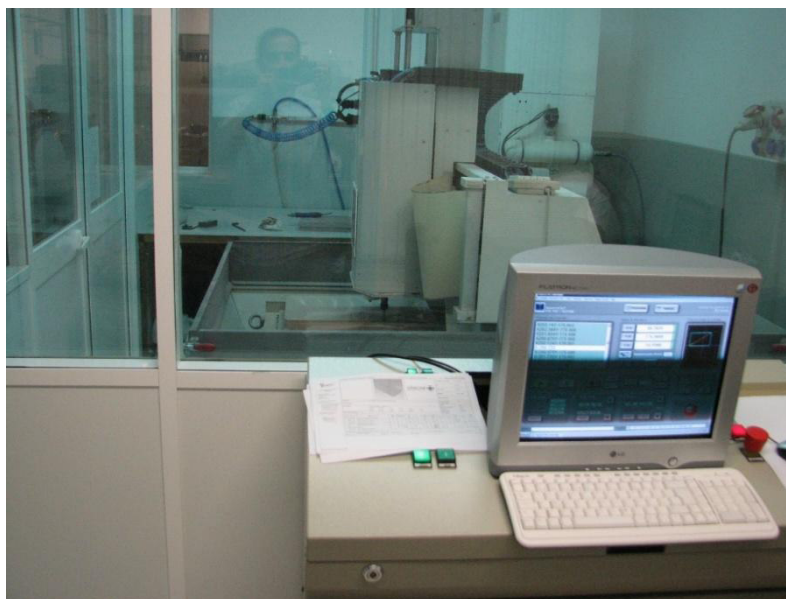


Figura 3.14 - Centro de Maquinação CNC

Com uma área de 750 x 700 x 200. O eixo Z não é um valor alto, mas os moldes com

que se trabalha não podem ultrapassar esse valor porque atinge o limite estipulado pelas máquinas de Termoformação. Possui um controlador Mach3 com linguagem ISO. O cabeçote da máquina consegue atingir uma rotação de 30000rpm, no entanto não suporta grandes esforços. Desaconselha-se a maquinação de peças em ferro, aço ou outros materiais semelhantes. Alumínio é suportável. Madeiras e poliuretanos são materiais onde a máquina se sente mais à vontade.

4. Discussão de Resultados

Neste capítulo são demonstrados os resultados experimentais dos materiais ensaiados. Os materiais foram sujeitos a ensaios DMA, ensaios de tração e sujeitos a várias temperaturas.

São também analisadas peças moldadas no molde desenvolvido neste projeto (Capítulo V), nomeadamente a variação da espessura.

4.1. Densidades

Na tabela 4.1 pode-se observar os resultados experimentais e os fornecidos pelos fabricantes dos materiais utilizados no processo de termoformação. Na determinação das densidades foi utilizado o equipamento indicado na figura 3.2. e o procedimento indicado no ponto 3.1.

Como se pode observar na tabela 4.1, a diferença entre os resultados experimentais e pelos fornecidos pelos fabricantes não é significativa. Os desvios observados podem ser devidos a erros de leitura (densidades) e/ou condições de processamento destes materiais. Os valores relativos aos termoplásticos ensaiados foram retirados das fichas técnicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 4.1: Resultados experimentais e dos fabricantes das densidades dos materiais termoplásticos utilizados no trabalho.

MATERIAL	Massa em seco	Massa em submersão	Água T=21°C	Densidade	Densidade Experimental	Densidade Fabricante
HIPS_1	0,3995	0,0316	0,998	1,0837	1,055	1,06
HIPS_2	0,4263	0,0202	0,998	1,0476		
HIPS_3	0,4361	0,0150	0,998	1,0335		
APET_1	0,3821	0,0940	0,998	1,3236	1,329	1.32 a 1.36
APET_2	0,3816	0,0941	0,998	1,3246		
APET_3	0,4099	0,1046	0,998	1,3399		

4.2. Resultados obtidos nos ensaios DMA

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores de variação do módulo em flexão para os materiais utilizados no fabrico dos protótipos dos tabuleiros (APET e HIPS) e para duas temperaturas (20°C e 90°C). O aumento da temperatura é responsável por uma diminuição significativa da rigidez (módulo de elasticidade em tração) para todos os materiais e, naturalmente também para estes dois termoplásticos. Os resultados apresentados na tabela 4.2 mostram uma diminuição em perda de rigidez de cerca de 18% para um aumento de temperatura dos 20º para os 90ºC.

Tabela 4.2: Resultados DMA.

Material	T=20°C	T=90°C
	E [GPa]	E [GPa]
APET	1.91	0.01
HIPS	1.24	0.71

Na Figura 4.1 são apresentadas as curvas de variação do módulo em tração *versus* temperatura e para os dois materiais considerados neste estudo. No intervalo de temperatura entre os 20 e os 90°C, pode-se observar uma natural e expectável diminuição da rigidez, sendo esta mais acentuada no caso do material APET (tabela 4.2).

É, também, possível observar uma súbita queda do valor do módulo em tração na região da temperatura de transição vítrea (T_g).

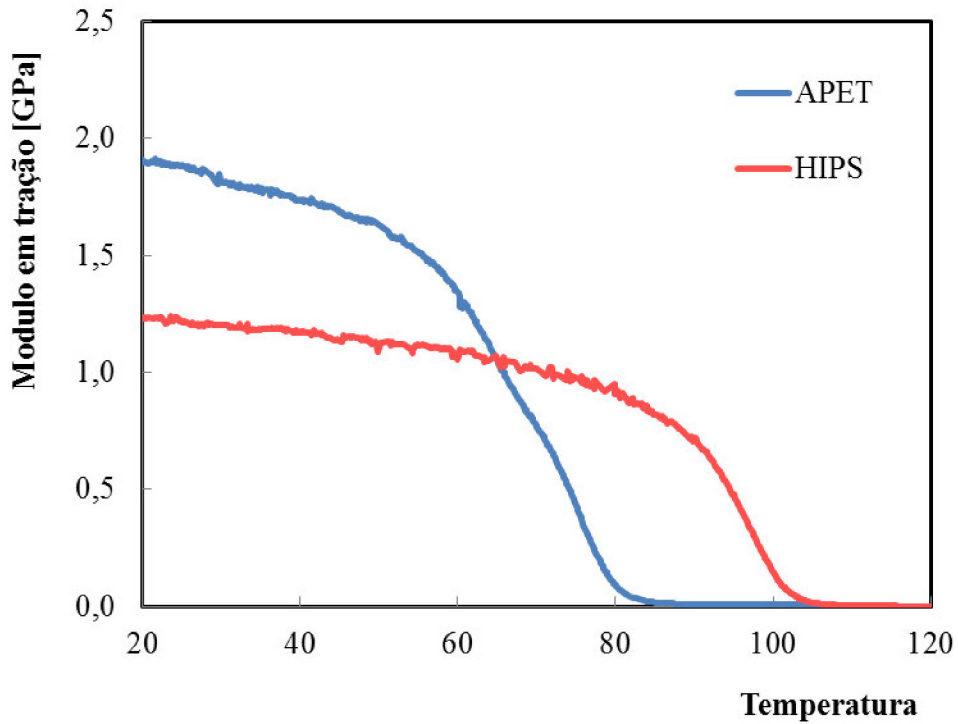


Figura 4.1 - Módulo em tração *versus* temperatura para os materiais APET e HIPS.

Na Figura 4.2 pode observar-se as curvas de variação do *Loss Modulus versus* a temperatura para ambos os materiais.

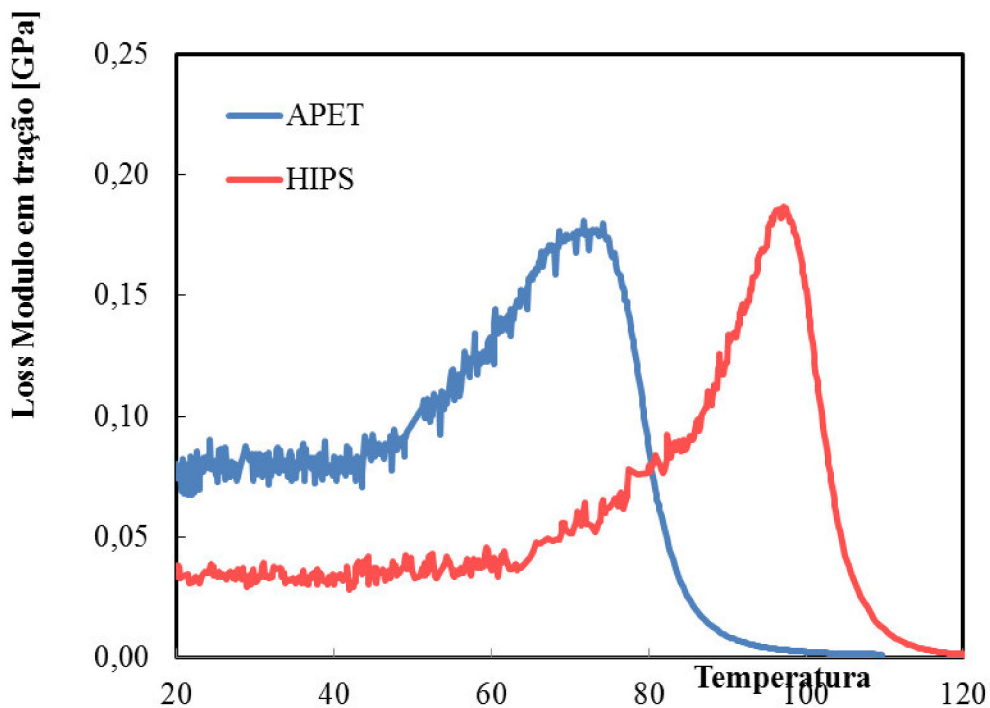


Figura 4.2 - *Loss modulus versus* temperatura para os materiais APET e HIPS

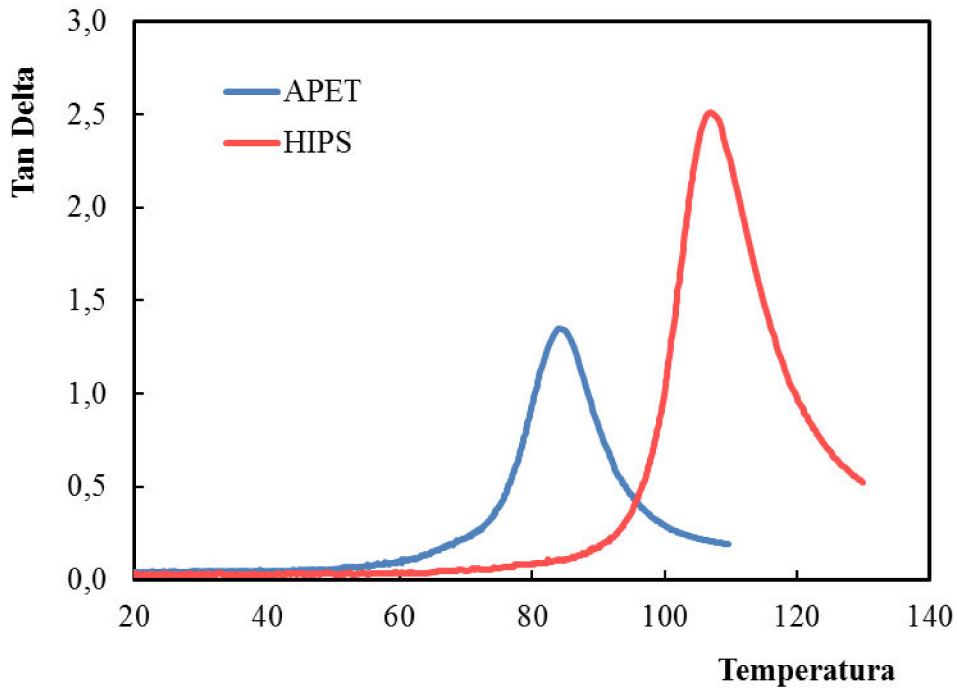


Figura 4.3 - *Tan Delta* versus temperatura para os materiais APET e HIPS

Na Figura 4.3 pode observar-se as curvas de variação do *Tan Delta* versus a temperatura para dois materiais processados.

A temperatura à qual o *Tan Delta* apresenta o pico máximo é geralmente interpretada como a temperatura de transição vítrea do material. Os valores de Tg (temperatura de transição vítrea) obtidos foram de 82,7°C e 105,8°C para o APET e para o HIPS respetivamente.

4.3 Resultados estáticos

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de carga máxima à tração, tensão máxima e de módulo de elasticidade para os materiais termoplásticos ensaiados.

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios estáticos em tração para os dois materiais termoplásticos (Apet e HIPS) para 20°C.

Material	Carga [N]	$\sigma_{\text{máx.}}$ [MPa]	E [GPa]
APET 1	350,93	42,55	2067,6
APET 2	340,87	42,61	1991,4
APET 3	342,38	41,51	2007,2
Média APET	344,7	42,2	2022,1
DP	5,4	0,6	40,2
HIPS 1	194	18,44	1652,3
HIPS 2	196,4	18,65	1622
HIPS 3	188,46	17,89	1648,6
Média HIPS	193,1	18,3	1641,0
DP	4,1	0,4	16,5

O APET apresenta, relativamente ao HIPS, valores de resistência mecânica e de módulo de elasticidade superiores e, não foram observadas diferenças significativas nos vários ensaios realizados.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 pode observar-se o andamento das curvas carga *versus* deslocamento, e tensão *versus* extensão, respetivamente, para os dois materiais utilizados neste trabalho. Pode-se observar que as curvas apresentam um comportamento típico.

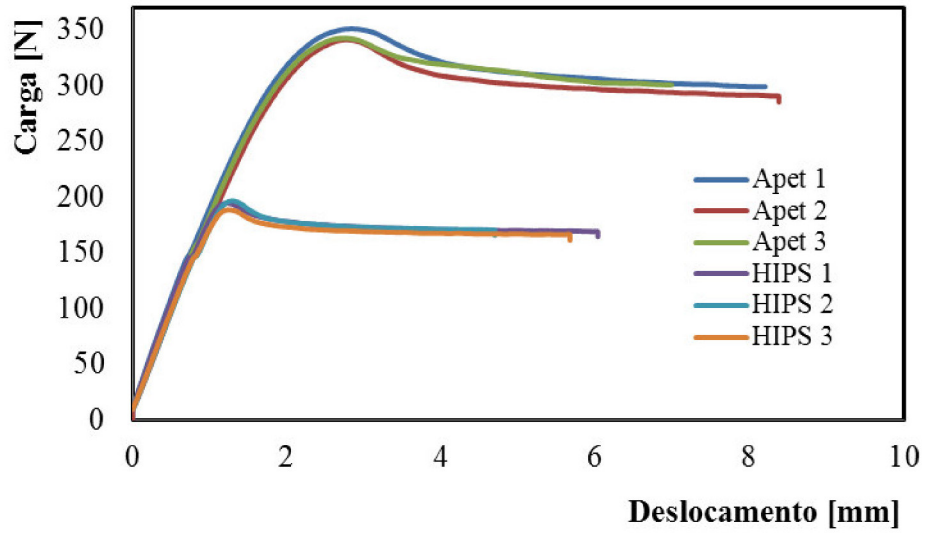


Figura 4.4 - Curvas típicas de carga *versus* deslocamento para os dois materiais termoplásticos e para a temperatura ambiente.

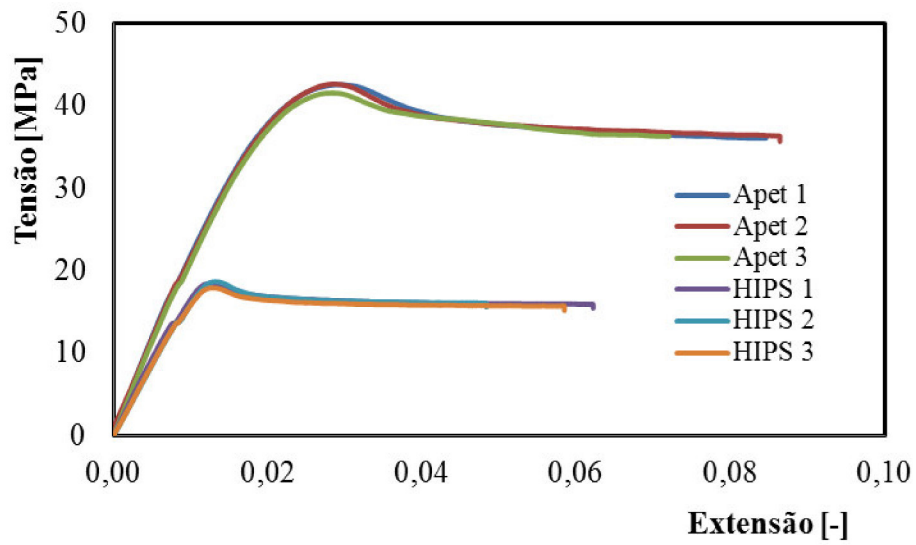


Figura 4.5 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para os dois materiais termoplásticos e para a temperatura ambiente.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 pode observar-se as curvas típicas do APET e do HIPS, respetivamente.

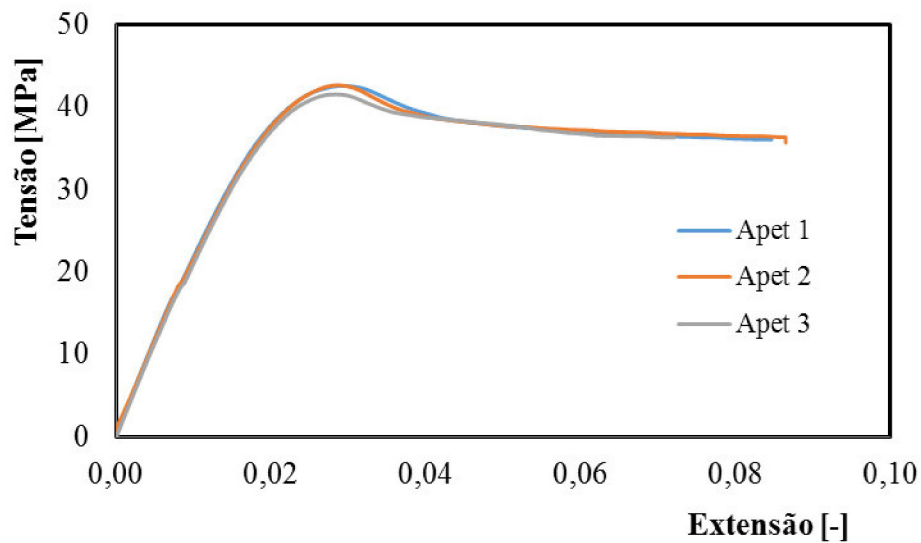


Figura 4.6 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para o material termoplásticos APET e para a temperatura ambiente.

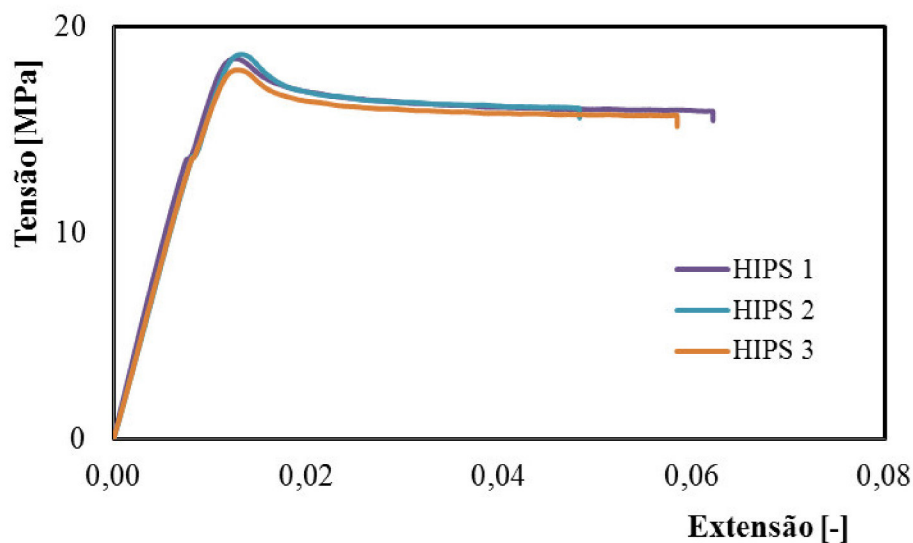


Figura 4.7 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para o material termoplásticos HIPS e para a temperatura ambiente.

Na tabela 4.4 são apresentados os resultados dos ensaios estáticos realizados com os dois materiais e para duas temperaturas (40 e 55°C). São apresentados os resultados de resistência mecânica e de módulo de elasticidade, valores médios e respetivos desvios padrão. O APET apresenta valores de comportamento mecânico para 40°C superiores ao HIPS. Para a temperatura de 55°C o HIPS apresenta valores de comportamento mecânico superiores.

Tabela 4.4: Resultados dos ensaios estáticos em tração para os dois materiais termoplásticos (APET e HIPS) para temperaturas de 40 e 55°C.

Material	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	E [MPa]
APET_1 40°C	33,60	1650,6
APET_2 40°C	24,74	1370
Média a 40°C	29,17	1510,3
DP	4,43	198,4
APET_1 55°C	1,73	108,8
APET_2 55°C	1,85	112,58
Média a 55°C	1,74	105,69
DP	0,16	9,74
HIPS_1 40°C	14,41	1714,70
HIPS_2 40°C	16,69	1777,8
Média a 40°C	15,55	1746,25
DP	1,14	31,55
HIPS_1 55°C	4,80	416,21
HIPS_2 55°C	4,54	275,37
Média a 55°C	4,67	345,79
DP	0,13	70,42

Na figura 4.8 são apresentadas as curvas típicas de variação da tensão versus extensão para o APET e para três temperaturas (20, 40 e 55°C). É possível observar uma queda abrupta da curva de tensão versus extensão para a temperatura de 55°C.

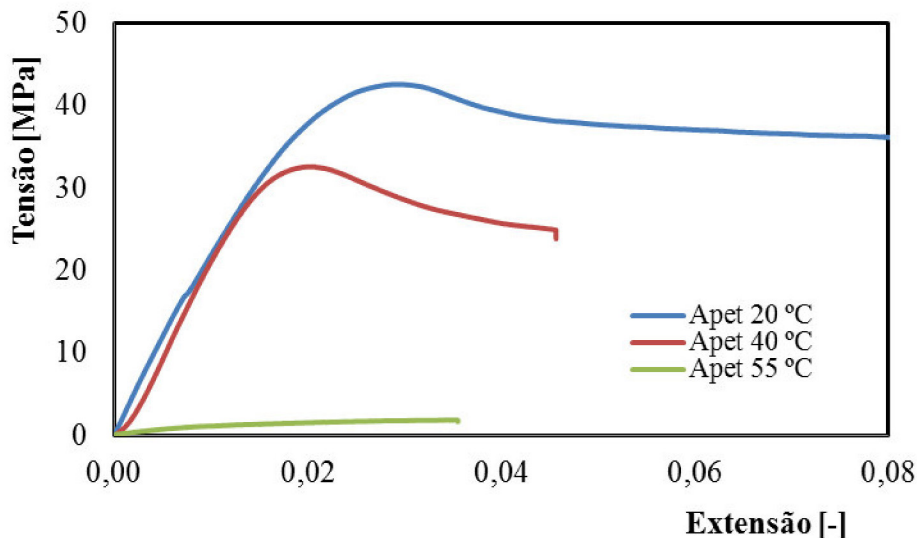


Figura 4.8 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para o material termoplásticos Apet e para temperatura de 20, 40 e 55°C.

Na figura 4.9 são apresentadas as curvas típicas de variação da tensão versus extensão para o HIPS e para três temperaturas (20, 40 e 55°C). É possível observar uma queda menos acentuada (relativamente ao APET) da curva de tensão versus extensão para a temperatura de 55°C.

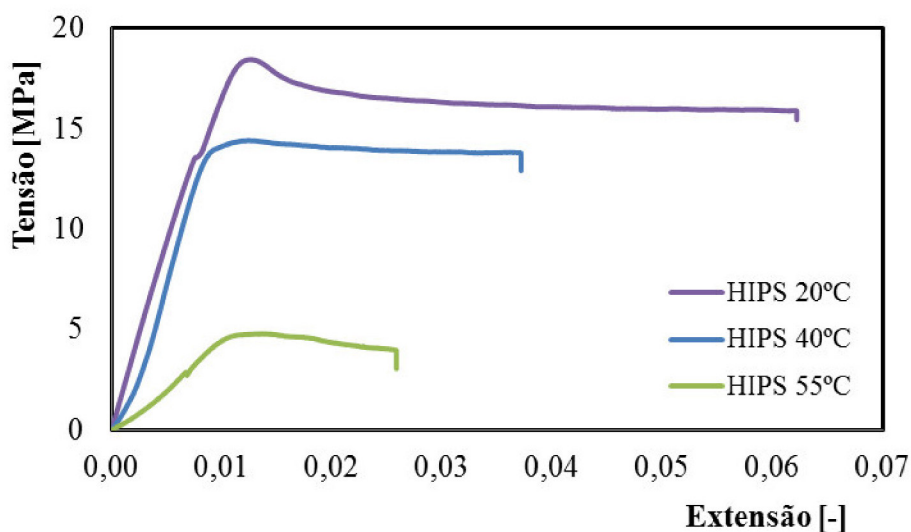


Figura 4.9 - Curvas típicas de tensão *versus* extensão para o material termoplásticos APET e para temperatura de 20, 40 e 55°C.

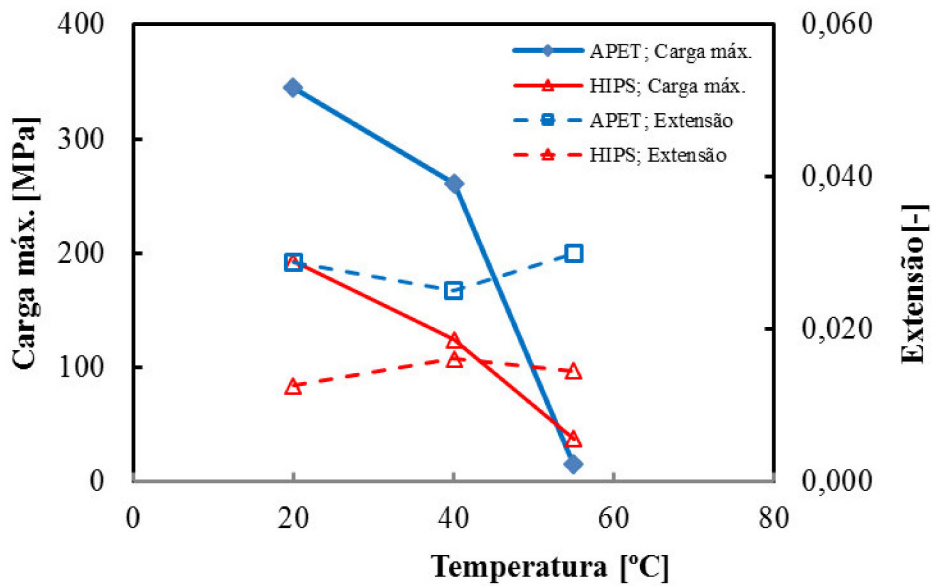


Figura 4.10 - Curvas variação da carga máxima e dos valores de extensão correspondentes versus temperatura para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS.

Na figura 4.10 pode-se observar as curvas de variação da carga máxima e dos valores de extensão correspondentes versus temperatura para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS. A partir da figura pode-se observar que os valores de carga máx. diminuem, naturalmente, para temperaturas crescentes. Por outro lado, é possível observar que os valores de extensão correspondentes apresentam alguma dispersão mas com uma tendência crescente com o aumento da temperatura.

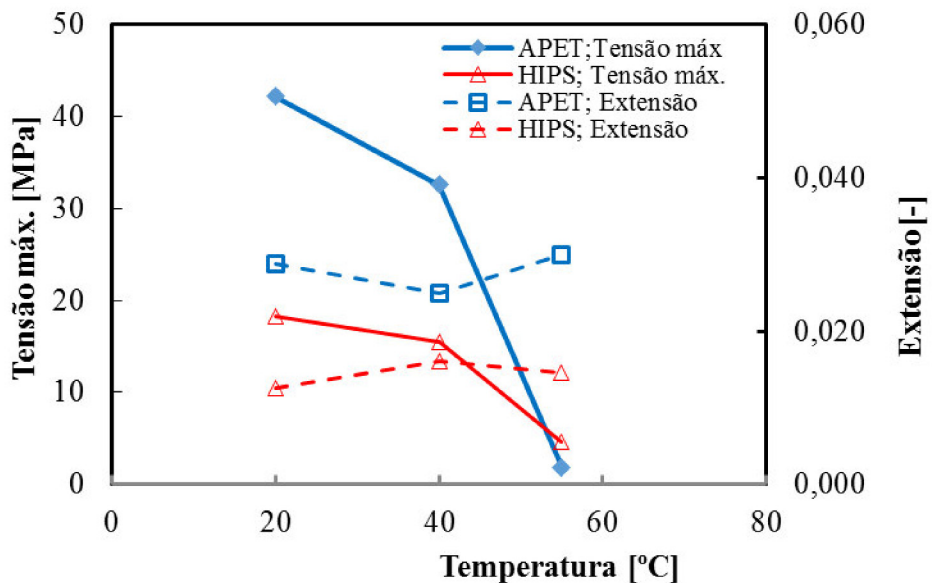


Figura 4.11 - Curvas variação da tensão máxima e dos valores de extensão correspondentes versus temperatura para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS.

Na figura 4.11 pode-se observar as curvas de variação da tensão máxima e dos valores de extensão correspondentes versus temperatura para os dois materiais

termoplásticos APET e HIPS. A partir da figura pode-se observar que os valores de tensão máx. diminuem, naturalmente, para temperaturas crescentes. Por outro lado, é possível observar que os valores extensão correspondentes apresentam alguma dispersão mas com uma tendencia crescente com o aumento da temperatura.

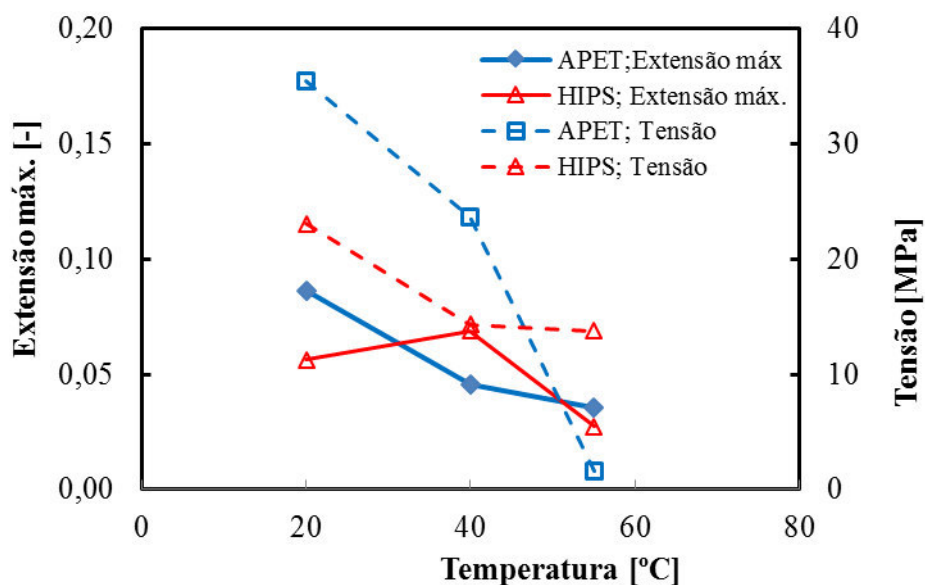


Figura 4.12 - Curvas variação da extensão máxima e dos valores de tensão correspondentes *versus* temperatura para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS.

Na figura 4.12 pode-se observar as curvas de variação da extensão máxima e dos valores de tensão correspondentes *versus* temperatura para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS. É possível observar que os valores de extensão máx. diminuem para temperaturas crescentes e que os valores tensão correspondentes apresentam uma tendencia decrescente com o aumento da temperatura.

4.4 Analise das espessuras das peças termoformadas

O molde protótipo produzido para o processamento das peças desenvolvidas para este trabalho foi ensaiado na máquina termoformadora (Capítulo III, 3.5) da empresa *Sitecna* e foram obtidas peças processadas de acordo com o pretendido. O sistema de elementos móveis considerado neste projeto, para moldar as zonas negativas da peça desenvolvida, apresentou um bom desempenho mecânico.

As peças termoformadas obtidas apresentaram um comportamento de estiramento normal e esperado. Por forma a analisar este comportamento, foi realizado um estudo de controlo das espessuras das peças termoformadas com os dois materiais termoplásticos utilizados no processamento por termoformação (APET, HIPS). Nas figuras 4.15 a) e b) são apresentadas as peças termoformadas em APET e HIPS, respetivamente.

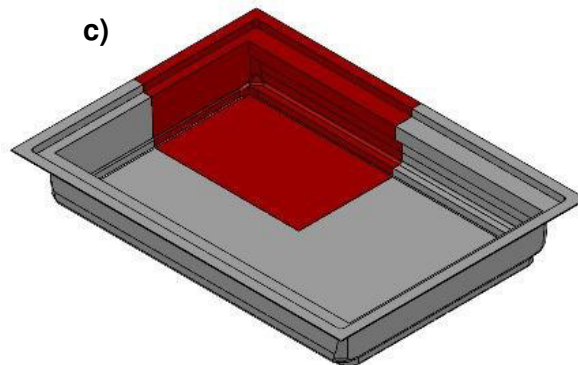
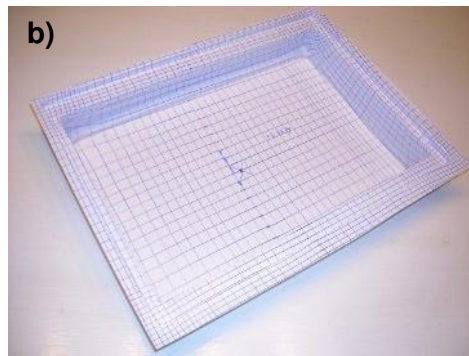
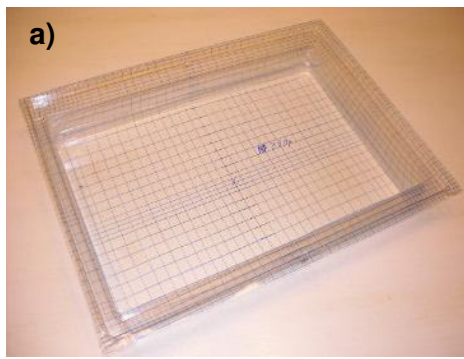


Figura 4.13 – Peças termoformadas: a) APET, b) HIPS; c) área analisada.

Na figura 4.13 c) podemos observar a área de análise representativa.

Na figura 4.14 são indicadas os pontos de medida. Nesta análise foi utilizado um micrómetro de exteriores.

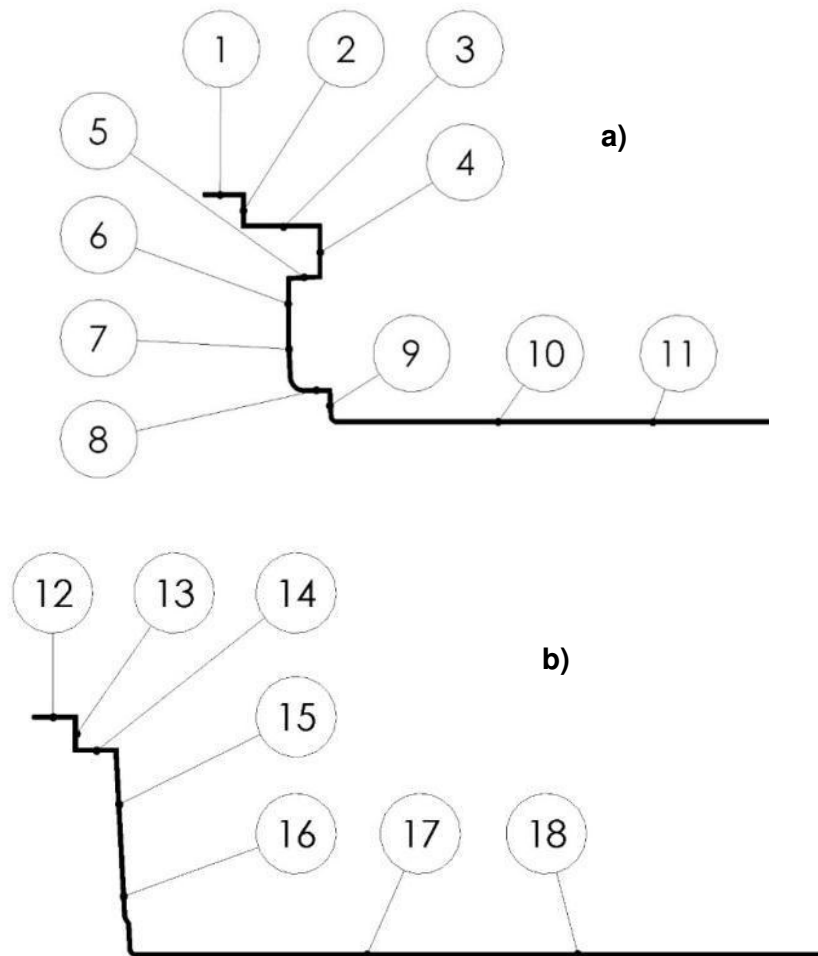


Figura 4.14 - Secções das peças processadas por termoformação: a) transversal; b) longitudinal.

Nas tabelas 4.5 e 4.6 pode-se observar os resultados do controlo de espessuras efetuado para cada amostra.

Tabela 4.5: Variação dos valores da espessura e estiramento para a amostra em APET.

Zona	Espessura 350 μ m		Estiramento	
	%	μ m	%	mm
1	100	350	0	10
2	100	350	0	10
3	83	290	25	12.5
4	71	250	30	13
5	49	170	a)	a)
6	51	180	70	17
7	50	175	122	22
8	49	170	a)	a)
9	51	180	a)	a)
10	73	255	45	14.5
11	81	285	10	11
12	100	350	0	10
13	100	350	0	10
14	81	285	30	13
15	71	250	35	13.5
16	59	205	35	14.5
17	77	270	20	12
18	83	290	0	10

a) Não é possível medir porque a dimensão da grelha ultrapassa a dimensão da zona a medir.

Tabela 4.6: Variação dos valores da espessura e estiramento para a amostra em PS.

Zona	Espessura 350 μm		Estiramento	
	%	μm	%	mm
1	100	350	0	10
2	100	350	0	10
3	84	295	25	12.5
4	74	260	30	13
5	50	175	a)	a)
6	51	180	80	18
7	50	175	120	20
8	47	165	a)	a)
9	51	180	a)	a)
10	71	250	35	13.5
11	80	280	15	11.5
12	100	350	0	10
13	100	350	0	10
14	83	290	30	12
15	73	255	25	12.5
16	57	200	50	15
17	77	270	15	11.5
18	81	285	5	10.5

a) Não é possível medir porque a dimensão da grelha ultrapassa a dimensão da zona a medir.

De acordo com os resultados relativos ao controlo de espessuras efetuados, pode-se concluir que estes apresentavam valores similares para os dois materiais considerados no processamento por termoformação das peças desenvolvidas.

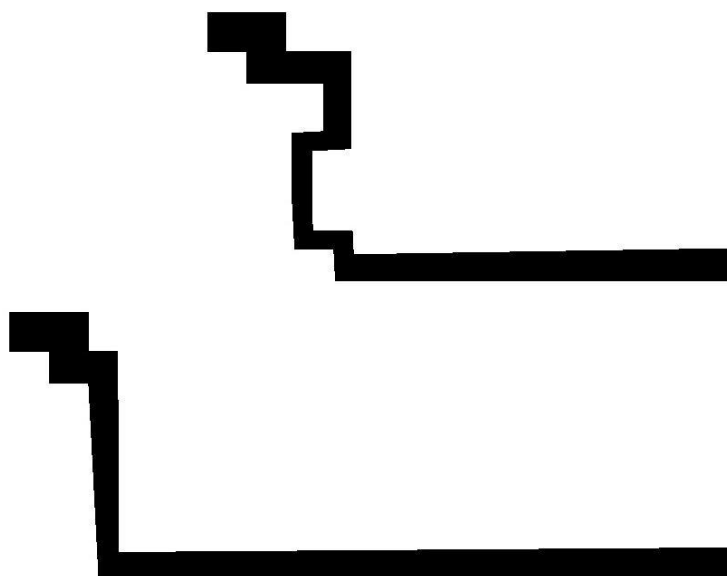


Figura 4.15 - Variação de espessuras nas secções: a) transversal; b) longitudinal.

As zonas que apresentaram maiores valores de estiramento foram naturalmente as zonas negativas, moldadas pelos elementos moveis do molde. Na figura 4.15 a espessura foi ampliada 10x para melhor se visualizar a sua variaçãõ.

5. Caso de estudo – molde com elementos móveis

O caso de estudo que aqui se relata acontece em 2013 na empresa *Sitecna, Soluções de Embalagem SA*, colaboradora neste projeto.

A *Sitecna* é uma empresa situada em Marinha Grande focada em soluções de embalagem. Fundada há mais de 25 anos, dedica-se sobretudo ao fabrico de embalagens termoformadas e possui sete máquinas termoformadoras.

Neste conjunto de máquinas, existem várias configurações de máquina de forma a ser possível responder às exigências do cliente em termos de qualidade, baixo custo e prazo curto.

Um cliente cujo negócio está ligado a automatismos, robótica e construção de linhas de montagem, faz um pedido para a execução de um determinado tabuleiro. Pretende-se que o tabuleiro acondicione 70 componentes (pistões) iguais. No fim de cheios seguem para a linha de montagem. Um braço robótico retira os pistões dos tabuleiros e coloca-os numa determinada máquina. De salientar que estes tabuleiros carregados estão empilhados sobre si próprios até um máximo de dez unidades. À medida que os tabuleiros vão sendo descarregados, vai sendo criada outra pilha com eles já vazios.

O cliente facultou uma amostra (figura 5.1) do que pretende e explicou as características do tabuleiro que têm de ser salvaguardadas.



Figura 5.1 – Tabuleiro para acondicionar 70 pistões.

Este tabuleiro é atualmente fabricado na Hungria, mas o cliente pretende que seja fabricado em Portugal por razões de transporte, bem como para demonstrar aos seus clientes estrangeiros o know-how que as empresas portuguesas possuem.

5.1 Conceito para protótipo

O tabuleiro tem um pormenor que é de difícil execução. Possui uma base de assentamento para ser possível empilharem sobre si próprios (figura 5.2). Esse pormenor (figura 5.3) geralmente é moldado numa máquinas termoformadoras próprias, que possuem uns pneumáticos que ativam uns elementos móveis que vão moldar essa base.

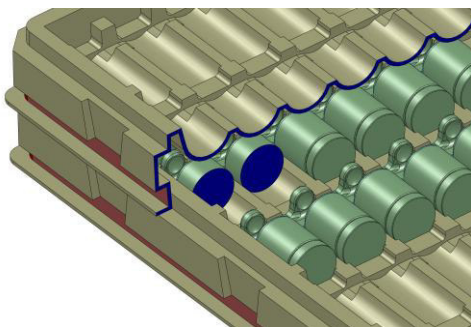


Figura 5.2 - Pormenor do assentamento entre tabuleiros.

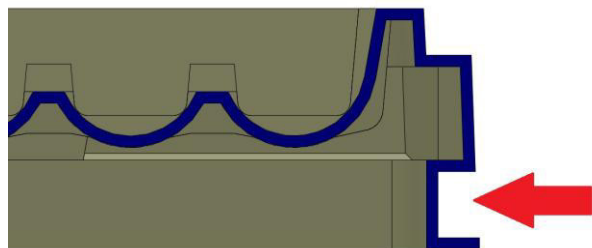


Figura 5.3 – Zonas negativas.

Para incorporar esse sistema de pneumáticos numa máquina de termoformação convencional torna dispendioso o processo, pois existem afinações a realizar, os mecanismos estão expostos ao calor, que é gerado pelas resistências que aquecem a matéria-prima, e todo o custo dos acessórios (pneumáticos, electroválvulas, entre outros).

Depois de se debruçar sobre o desafio e de alguma pesquisa sobre acionamento de elementos móveis, começa-se a esboçar alguns conceitos de movimentos mecânicos de fácil execução.

Dos vários conceitos idealizados, apenas dois deles apresentam todos os requisitos necessários. No entanto ambos têm um tipo de arquitetura diferente.

De seguida segue a descrição das duas hipóteses.

5.1.1 Hipótese 1:

Inicialmente projetou-se um sistema de movimentos mecânicos acionados por um conjunto de carretos e cremalheira (figuras 5.4 e 5.5).

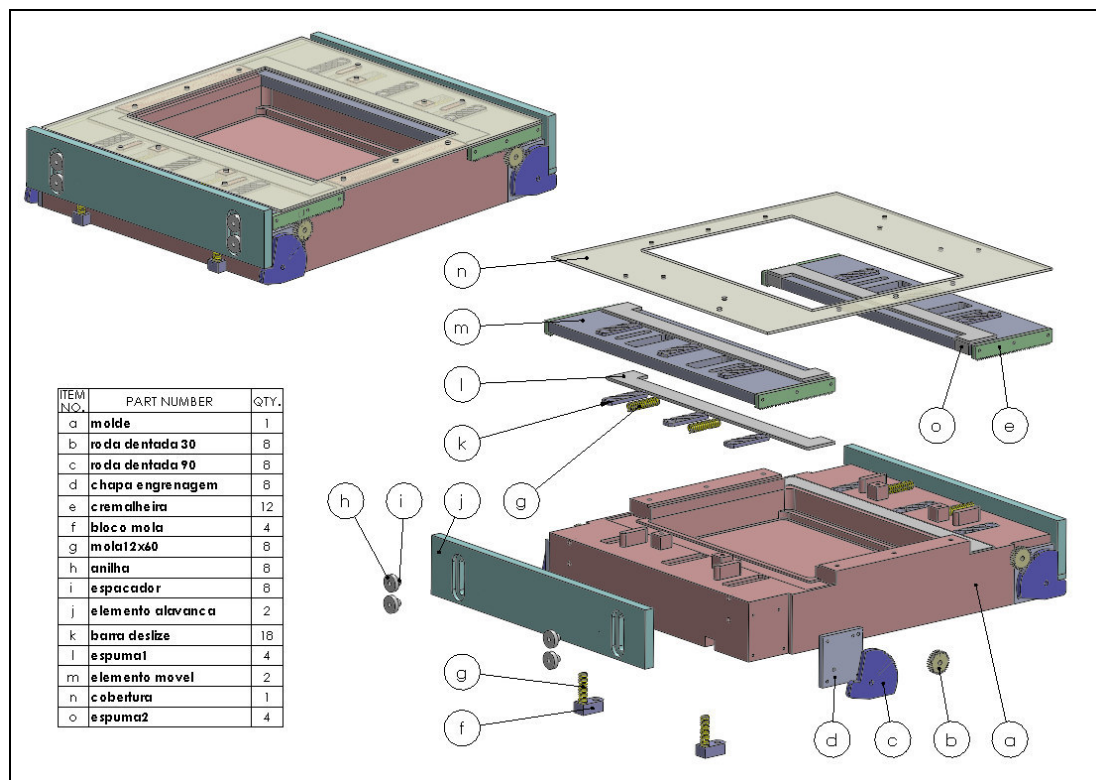


Figura 5.4 - Esquema de montagem do molde

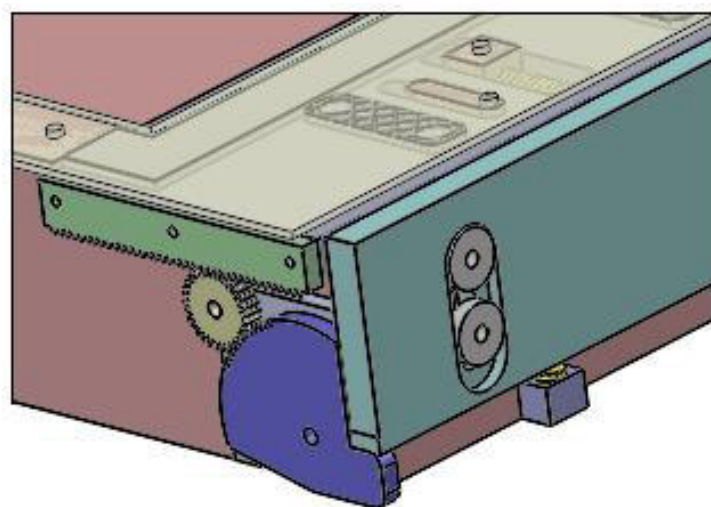


Figura 5.5 - Esquema de carretos e cremalheira

Este método permite que o molde ao descer / desmoldar destranque os elementos móveis. Com apenas um movimento descendente de 7mm, os elementos afastam-se 11mm (figuras 5.6 e 5.7).

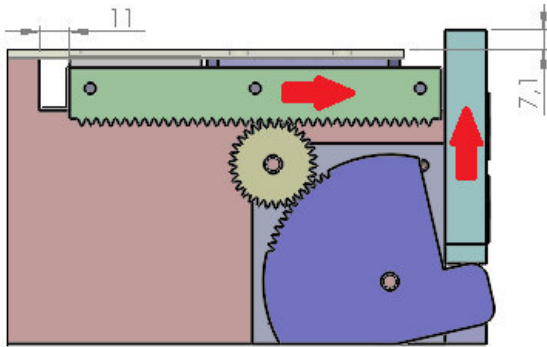


Figura 5.6 - molde aberto

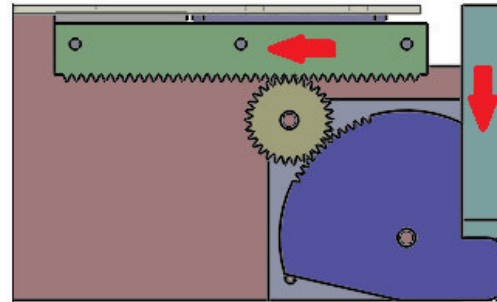


Figura 5.7 - molde fechado

Porém, este método necessita de vedar o vácuo em toda a área, inclusive onde os elementos atuam, por este motivo, os elementos deslizam sobre vedantes, o que não é vantajoso. Esta solução exige uma manutenção maior e vigilância durante a produção. É um molde composto por muitas peças, tornando-o dispendioso e rigoroso. No entanto, não deixa de ser um conceito a ter em conta em projetos futuros.

5.1.2 Hipótese 2:

À semelhança dos elementos móveis existentes em moldes de injeção, os que aqui são apresentados também atuam mediante guias inclinadas.

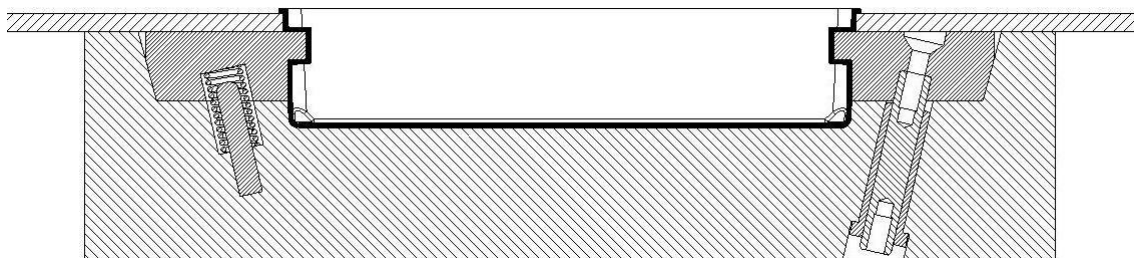


Figura 5.8 - Molde fechado

Na figura 5.8 pode-se observar os elementos móveis guiados por guias e casquilhos. O molde fechado faz comprimir as molas devido à atuação da mesa da máquina sobre os elementos móveis.

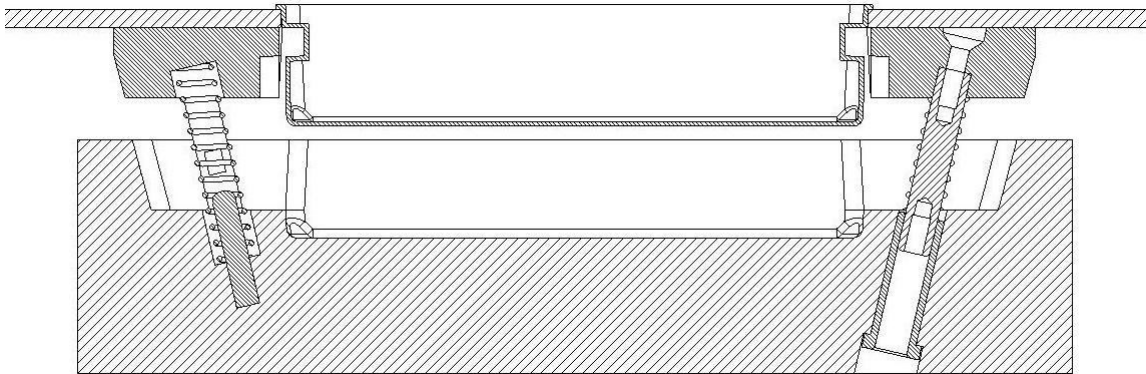


Figura 5.9 - Molde aberto

O molde ao descer / desmoldar aciona os elementos móveis, que desmoldam as zonas negativas (figura 5.9).

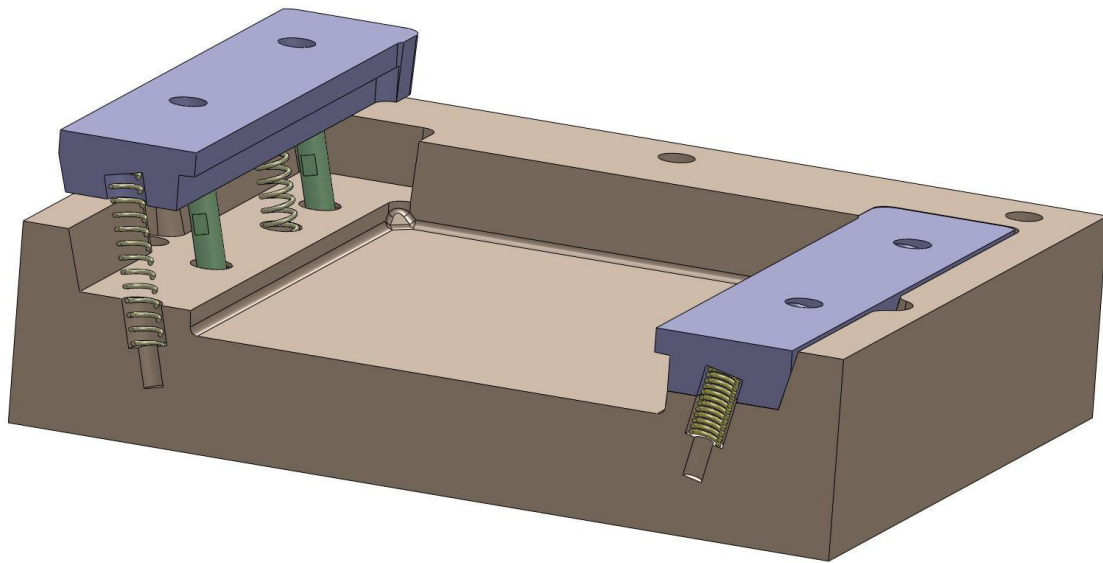


Figura 5.10 - Pormenor da atuação das molas

A figura 5.10 ilustra o comportamento das molas que ao atuarem nos elementos móveis forçam a sua abertura. A inexistência das molas poderia comprometer o desempenho do mecanismo. Quando o molde descesse para desmoldar, poderia levar por arrasto a própria peça recém moldada. O curso de abertura dos elementos móveis está dependente do comprimento das molas, isto é, quando a compressão nas molas deixa de existir, os elementos já não abrem mais. É importante ajustar esta abertura com o curso que as guias permitem, sob pena de os elementos móveis saírem fora do seu guiamento. Na figura 5.9 vê-se que a abertura é a necessária para conseguir manter as guias ainda dentro dos casquilhos.

5.1.3 Decisão

A decisão da melhor opção, numa abordagem primária, recai para a hipótese 2. No entanto, vejamos a tabela 5.1 comparativa dos custos de cada hipótese:

Tabela 5.1: Comparação de custos

Estimativa de custos (€)		
	Hipótese 1	Hipótese 2
Conceção / Projeto	500	300
Programação CNC	150	100
Maquinação	250	100
Materiais e acessórios	500	200
Total	1400	700

Além de ter um custo estimado de 1400€, a Hipótese 1 é, como já foi referido, muito rigorosa requerendo também uma manutenção constante.

Por outro lado, a Hipótese 2 apresenta um custo aproximado de 700€, com mecânica simples mas eficaz, com menos horas de trabalho e de fácil manutenção.

5.2 Execução do molde protótipo

O molde protótipo que aqui se apresenta (figura 5.11) serve dois propósitos. Primeiro, para validar as aberturas de elementos móveis que, como está foi anunciado, é um sistema não muito comum no universo da termoformação. Segundo, analisa o comportamento da matéria-prima, seja HIPS ou APET e verifica as diferenças de comportamento, do aspeto e da resistência da peça final.

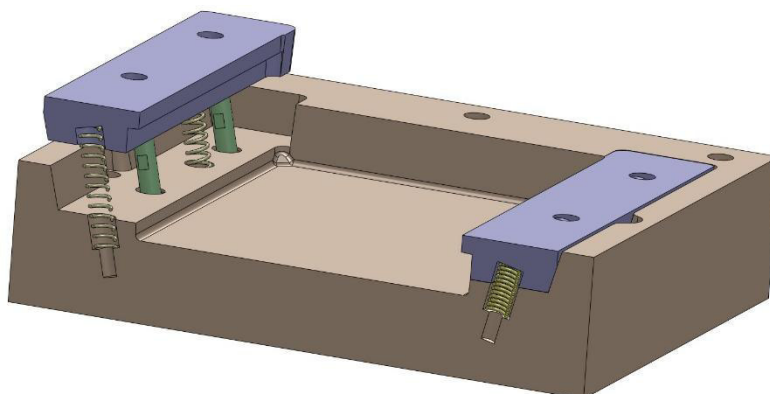


Figura 5.11 - Molde protótipo

Quanto a outros requisitos igualmente importantes, este deve ser desenvolvido no menor espaço de tempo com um material fácil de maquinar e que simultaneamente seja resistente para a quantidade de peças a produzir.

5.3 Ensaio do molde e conclusões

Durante a construção do molde (figura 5.12) e já numa fase final, houve uns ajustes e afinações a executar.

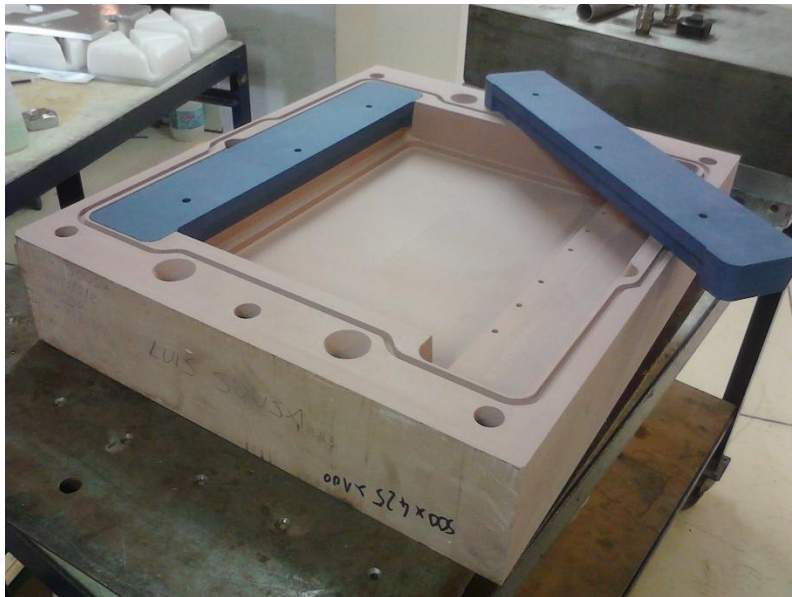


Figura 5.12 - Aspeto do molde durante a sua construção

Começou-se por adicionar umas barras de deslize nos elementos móveis, para diminuir o atrito durante o arrasto provocado pela abertura do molde. Foram também acrescentadas umas correntes para limitar a abertura dos mesmos (figura 5.13).

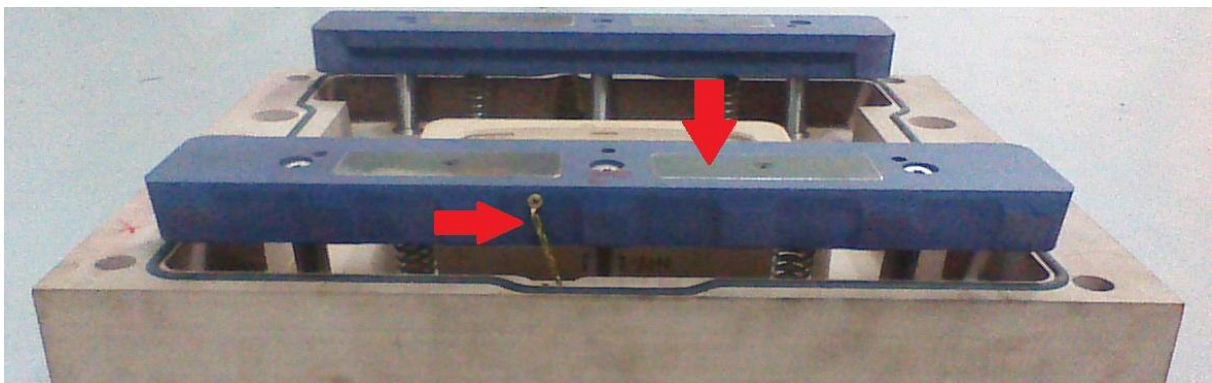


Figura 5.13 - Molde com limitador barras de deslize aplicadas

Embora a abertura dos elementos móveis fosse limitada pela extensão máxima das molas, nada garantia que a peça moldada os arrastasse, soltando-os dos casquilhos que os guiam.

Uma solução mais técnica para limitar o curso dos elementos móveis seria a aplicação de acessórios dedicados a esse efeito. Neste caso aplicar-se-iam 2 limitadores de curso por elemento móvel. Recorrendo ao catálogo *Rabourdin*, marca vocacionada para a indústria dos moldes, os limitadores com a Ref. 612-16-100 seriam os mais indicados para o efeito. Tendo um custo de 10€ cada, sem IVA, seriam necessários 4 peças elevando assim o custo total do projeto em mais de 40€, não contando com o preço para a instalação dos mesmos. A solução apresentada das correntes, teve um custo inferior a 1€ e aplicou-se em menos de 5 minutos (figura 5.13).

O último ajuste a fazer estava relacionado com a força das molas. Inicialmente estavam previstas umas molas de baixa tensão, fabricadas pela marca *Rabourdin* com a Ref. 324-20-89. No entanto, revelaram-se fortes demais para o efeito pretendido.



Figura 5.14 - molas *Rabourdin* de secção retangular [45]

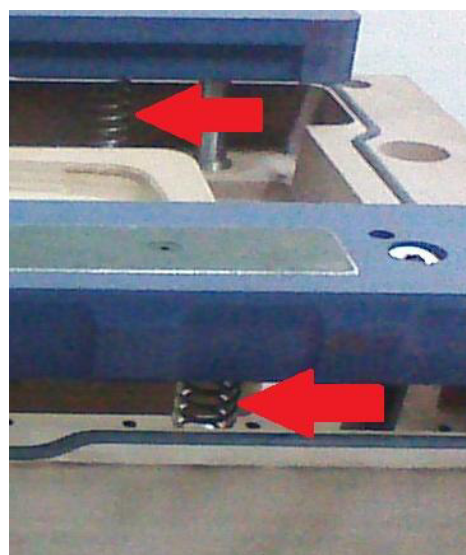


Figura 5.15 - molas convencionais de secção circular

A força aplicada seria mais forte que a força de fecho do molde. Deste modo, o molde nunca iria fechar na sua totalidade, não permitindo sequer uma moldação. Ao substituir estas molas por outras mais fracas e de uso corrente, conseguiu-se o resultado desejado.

Durante a conceção de molde, houve o cuidado de tentar absorver toda a força de vácuo disponível na máquina. Para tal, criou-se uma área isolada por um vedante (figura 5.16), que evita a dissipação do vácuo para outras áreas não importantes e a conseqüente perda de força.



Figura 5.16 - Vedante no molde

Assim, conseguiu-se uma enorme evidência na moldação. Nos elementos móveis foram abertos furos na aresta que se pretendia bem moldada (figura 5.17). Houve a necessidade de os fazer com $\varnothing 1.5\text{mm}$ com intervalos entre eles de 20mm aproximadamente, garantindo assim uma aspiração adequada.



Figura 5.17 - Abertura de furos ao longo da zona negativa

Este tipo de conceção de molde revelou-se muito versátil, não só abraçando qualquer tipo de matéria-prima, como também moldou em diversas espessuras.

A figura 5.18 mostra uma peça moldada em PVC 200 μm .

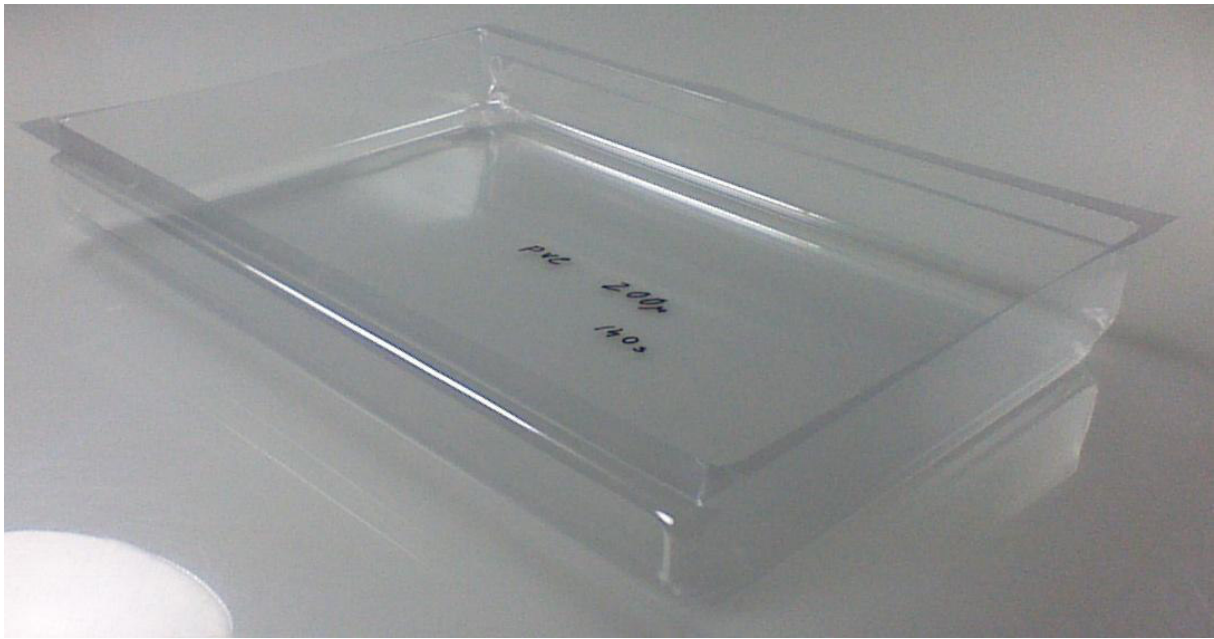


Figura 5.18 - Peça moldada em PVC com 200µ.

À partida este é um tipo de material que não molda tão bem como um poliestireno. No entanto, conseguiu-se uma boa moldação, e uma extração perfeita. Devido à fragilidade da peça moldada, houve receio que a abertura dos elementos móveis pudessem arrastá-la acabando por deformá-la, mas tal não aconteceu.

Por outro lado, um ensaio com HIPS com 2mm de espessura mostrou um comportamento igualmente excelente, embora se saiba que este material na generalidade dos casos, permite boas moldações.

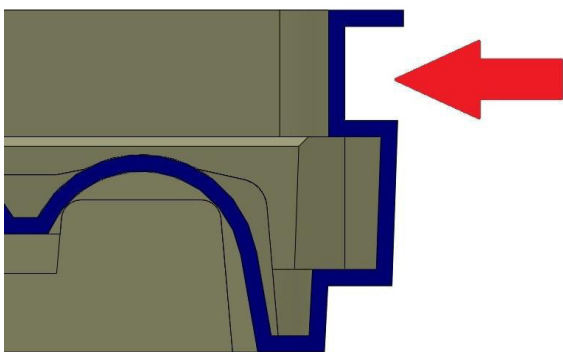


Figura 5.19 - Desafio proposto

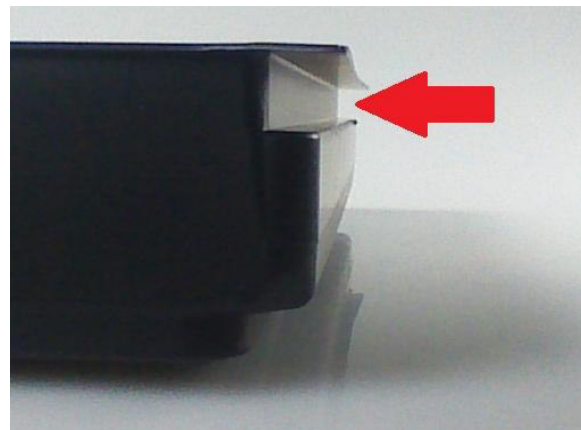


Figura 5.20 - Desafio cumprido

Ao todo, ensaiou-se o molde com diversos tipos de materiais:

Tabela 5.2: Materiais ensaiados

Matéria-prima	Espessura (μm)
PVC	200
PET/PE	600
HIPS	600
HIPS	1500
HIPS	2000

Conforme já foi explicado no Capítulo III, a temperatura das resistências na máquina foi a mesma para todos os materiais. Porém, os tempos de aquecimento foram diretamente proporcionais à espessura da matéria-prima.



Figura 5.21 – Diversas moldações com espessuras e materiais diferentes

Após este projeto, chegou-se à conclusão que é possível aceitar o desafio proposto pelo cliente. Conseguiu-se executar uma ferramenta de moldação com movimentos mecânicos, abdicando dos movimentos pneumáticos. A inovação, o baixo custo, a fiabilidade e a moldação foram parâmetros plenamente atingidos.

6. Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se aprofundar o conhecimento sobre o processamento por termoformação. Trata-se de um processo de fabrico não muito comum no tecido empresarial português.

Neste trabalho, foram analisadas em termos mecânicos e físicos os materiais utilizados no desenvolvimento e fabrico de um tabuleiro.

6.1 Caracterização mecânica e física dos materiais termoplásticos

- As diferenças de densidade experimentais e teóricas observadas não são significativas;

- Com base nos ensaios de DMA foi possível observar uma diminuição significativa da rigidez com o aumento da temperatura para todos os dois materiais processados (APET e HIPS). O termoplástico APET apresenta maior rigidez, para a temperatura ambiente que o HIPS. No entanto, para temperaturas superiores à temperatura ambiente, foi possível observar uma natural e expectável diminuição da rigidez dos dois materiais, sendo esta diminuição mais acentuada no caso do material APET.

É possível observar uma súbita queda do valor do módulo em tração na região da temperatura de transição vítrea. Os valores de T_g (temperatura de transição vítrea) obtidos foram de 83°C e 106°C para o APET e para o HIPS, respetivamente. Estes valores foram obtidos para a temperatura à qual o Tan Delta apresenta o pico máximo.

- Os valores de tensão máxima à tração obtidos nos ensaios estáticos do APET são significativamente superiores ao HIPS (cerca de 57%). Os valores de módulo de elasticidade do APET relativamente ao HIPS são também superiores (cerca de 22%).

Os valores de módulo de elasticidade realizados nos ensaios estáticos, em tração, são muito similares aos obtidos nos ensaios de DMA, para a temperatura ambiente. Foram

obtidas curvas típicas de carga versus deslocamento e tensão versus extensão muito semelhantes.

Foram também realizados ensaios estáticos em tração para as temperaturas de 40 e 55°C. O APET apresenta valores de comportamento mecânico para 40°C superiores ao HIPS. Para a temperatura de 55°C o HIPS apresenta valores de comportamento mecânico superiores.

Com base nas curvas de variação da tensão máxima e dos valores de extensão correspondentes versus temperatura (para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS) é possível observar que: os valores de tensão máxima diminuem, naturalmente, para temperaturas crescentes; os valores de extensão correspondentes apresentam alguma dispersão mas com uma tendência crescente com o aumento da temperatura.

Com base nas curvas de variação da extensão máxima e dos valores de tensão correspondentes versus temperatura (para os dois materiais termoplásticos APET e HIPS) é possível observar que: os valores de extensão máxima diminuem para temperaturas crescentes; os valores de tensão correspondentes apresentam uma tendência decrescente com o aumento da temperatura.

- Os resultados relativos ao controle de espessuras efetuados permitiram concluir que apresentavam valores similares para os dois materiais. As zonas (da peça desenvolvida e processada por termoformação) com maiores valores de estiramento foram naturalmente as zonas negativas, moldadas pelos elementos móveis do molde.

- A partir de um programa de CAD 3D foi desenvolvida uma peça, um tabuleiro multiuso para ser processado por termoformação. Este possuía características específicas que implicava ferramentas próprias nunca antes desenvolvidas na empresa: movimentos mecânicos acionados pela abertura do molde. No desenvolvimento do tabuleiro foram estudadas várias soluções para a moldação das zonas negativas. A solução mais eficaz foi a que permitia a moldação/extração com elementos móveis acionados por guias inclinadas.

6.2 Desenvolvimentos futuros

- Avaliar a vida útil do molde, quando exposto ao fluxo de calor das resistências de aquecimento das placas de material a processar, em vazio durante um período de 24 horas. Analisar, também possíveis empenos ou dilatações dos materiais utilizados no fabrico do molde.

- Implementar na empresa esta tipologia de moldes com elementos móveis, em

máquinas termoformadoras com outro tipo de arquitetura.

- Utilizar softwares de simulação por termoformação, por forma a analisar comportamento das peças termoformadas com este tipo de moldes.

Bibliografia

- [1] Mano, E.; Mendes, L. – *Introdução a Polímeros*, Editora Edgard Blücher, 1999.
- [2] Hellerich; Harsh; Haenle – *Guía de Materiales Plásticos*, Hanser Publishers, 1989.
- [3] Ventura, A. - *Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas*. C.Tecn. Mat., vol. 21, 2009.
- [4] Fonseca, S. - *Materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras usados na engenharia civil. Características e aplicações*”; ITMC 35; LNEC, Lisboa, 2005.
- [5] Gnauck, B.; Fründt, P. – *Iniciación a la química de los plásticos*, Hanser Publishers, 1991.
- [6] http://www.engenhariae.com.br/wp-content/uploads/2013/04/Technik_0547.jpg, acesso em 16-08-2013
- [7] http://www.hayleysfibreusa.com/coco_pots.html, acesso em 27-08-2013
- [8] http://www.goodyear.eu/po_pt/images/Omnitrac_MSD-II_Max-Tech_315-80-R22.5_tcm2149-121638.png, acesso em 27-08-2013
- [9] Davis, H. E.; Troxell, G. E.; Hauck, G. F. W. – *The Testing of Engineering Materials*, 4ª ed. USA: McGraw-Hill, 1982.
- [10] Paulo, V. – *Determinação das Forças de Extração em Moldes de Injeção de Termoplásticos*, 2010.
- [11] www.fem.unicamp.br/~assump/Projetos/2010/g5, acesso 10-09-2013.
- [12] Matos, A.; Pousada, A.; Ferreira, E.; Soares, R.; Campante, H.; Pontes, A.; Brito, A. – *Manual do Projectista para Moldes de Injeção de Plástico: Moldes na Indústria de Transformação*, 1º fascículo, Centimfe, Marinha Grande, 2003.

- [13] Denardin, E. – *Rearranjo Estrutural de PET Durante Compressão Plana*, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, PortoAlegre, 2004.
- [14] Sarantópoulos, C. et al - *Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades*, Editora CETEA/ITAL, 2002.
- [15] Billmeyer JR., F. – *Textbook of Polymer Science*, 3ªed., John Wiley & Sons, 1984.
- [16] Melo, José – *Produção e Caracterização de Pó de PET, obtido a partir de garrafas pós-consumo*, 2004.
- [17] Selke, S. et al - *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations*, Hanser Gardner, 2004.
- [18] Silva, T.; Miranda, L. – *Estudo Comparativo das Propriedades do Poli (Tereftalato de Etileno) Virgem e Reciclado*, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil, 2002.
- [19] <http://www.manufacturingterms.com/Portuguese/PETG.html>, acesso em 21-03-2013;
- [20] Michaeli, W.; Greif, H.; Kaufmann H.; Vossebürger, F-J. – *Introducción a la Tecnología de los Plásticos*, Hanser Publishers.
- [21] <http://www.abipet.org.br/UserFiles/Image/pref%20cristal.jpg>, acesso em 10-09-2013
- [22] Ophir, A. et al - *Hot-Fillable Containers Containing PET/PEN Copolymers and Blends*, Polymer Engineering and Science, vol. 44, Sep. 2004.
- [23] Santos, A. et al - *Tendências e Desafios da Reciclagem de Embalagens Plásticas. Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 14, 2004
- [24] Veronese, V. – *Desenvolvimento e Avaliação de Propriedades de Misturas de Poliestireno (PS) e Copolímeros em Bloco Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2003.
- [25] Fred, W.; Billmeyer Jr. – *Textbook of Polymer Science*, 2ª edição, 1971.
- [26] Grassi, V.; Forte, M. – *Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de alto Impacto, Polímeros, Ciência e Tecnologia*, Vol II, nº3, 2001.
- [27] *Boletim Técnico*, Innova Etilbenzeno, Estireno, Poliestireno, 1998.

- [28] Rovere, J.; Correa, C. – *Caracterização Morfológica do Poliestireno de Alto Impacto*, Itapiba, Brasil, 2007
- [29] <http://www.sie.pt/#28>, acesso em 05-02-2013;
- [30] <http://www.plastne.ws/uploads/1358611194.jpg>, acesso em 12-02-2013;
- [31] <http://www.brasita.com.br/blog/0-32/Design+++Tecnologia:+Rotomoldagem>, acesso em 12-02-2013;
- [32] http://www.bombayharbor.com/Company/65560/William_Machinery_Co_Ltd.html, acesso em 12-02-2013;
- [33] Carvalho, Ana – *Injecção de Polímeros – Peças Técnicas*, Bragança, 2009
- [34] <http://creative.lego.com/en-us/fun/default.aspx>, acesso em 12-02-2013;
- [35] Rosato, Donald; Rosato, Dominique – *Blow Molding Handbook, Technology, Performance, Markets, Economics, The Complete Blow Molding Operation*, Hanser Publishers, 1989.
- [36] <http://www.logoplaste.com/products.php?id=bGFuZz1FTiZwPTU1>, acesso em 13-02-2013;
- [37]
http://www.primaindustriesinc.com/yahoo_site_admin/assets/images/Website_Pix.304200229_std.JPG, acesso em 20-02-2013
- [38] http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/design/images/rm_vacuum_moulding.gif, acesso em 20-02-2013
- [39] <http://www.illig.de/en/applications/appcat/klappverpackungen-1/app/klappverpackung-fuer-obst/>, acesso em 22-02-2013
- [40] http://www.kunststoff-schweiz.ch/K-Messe/html/illig_k_messe_10_engl.html, acesso em 22-02-2013
- [41] <http://www.directindustry.com/prod/cms/thermoforming-machines-33275-356396.html>, acesso em 22-02-2013
- [42] http://www.e-t-d.org/index.php/parts-competition_it.html, acesso em 2013-11-19.

[43] Illig, A – *Illig Thermoforming – A Practical Guide*, Adolf Illig Maschinenbau GmbH &Co., Heilbronn, Alemanha, 2001.

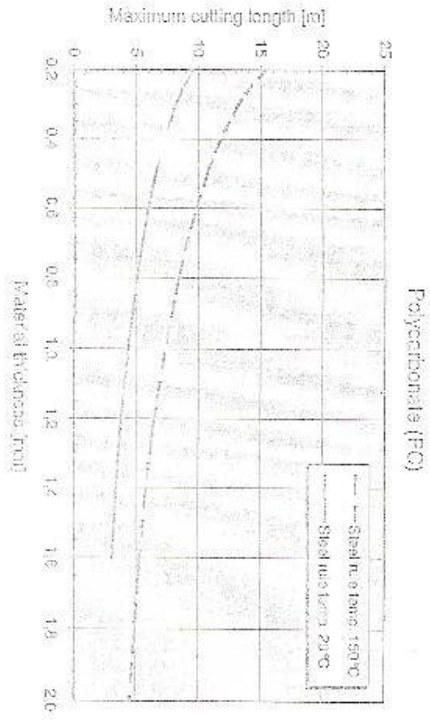
[44] Leão, A. R. – *Termoformagem – Estudo de Conformação de Chapas Termoplásticas por Vácuo com auxílio de Contramolde*, Centro Paula Souza, Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2009.

[45] <http://www.rabourdin.fr/2D3DCD-cao-online-EN.html> , acesso em 2013-09-17

Anexos

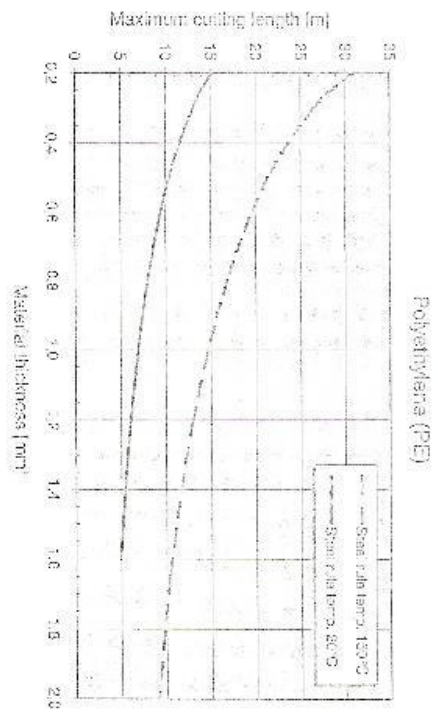
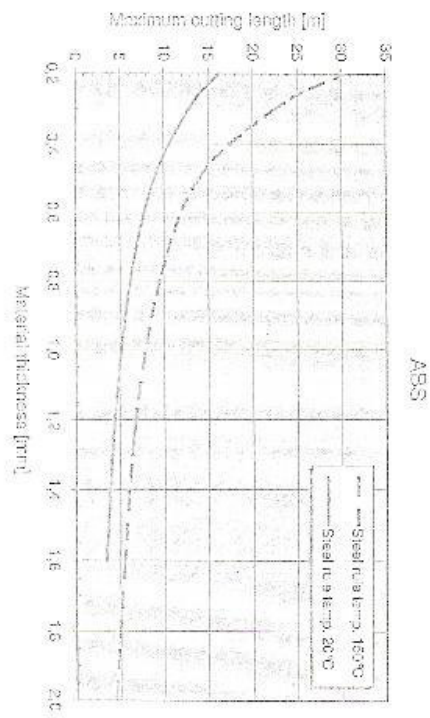
Anexo I

Determination of Cutting Length
RV 74b - Steel rule punch press



12.6.10.03.2003 Stahlschneidplan

Determination of Cutting Length
RV 74b - Steel rule punch press



Anexo II

(HIPS) POLIESTIRENO CA-410
CONDUCTIVO PERMANENTE
COLOR NEGRO

PROPIEDADES GENERALES

PROPIEDAD	METODO DE ENSAYO	UNIDADES	VALORES
DENSIDAD	ASTM-D792	gr/cm ³	1,06
TEMPERATURA DISTORSION A 0,45 MPa	ISO 75	°C	78
MODULO DE FLEXION	ISO 178	MPa	1.800
RESISTENCIA A TRACCION A ROTURA	ISO 527	MPa	22
RESISTENCIA A TRACCION PUNTO DE FLUENCIA	ISO 527	MPa	26
ELONGACION A ROTURA	ISO 527	%	35
COEFICIENTE EXPANSION TERMICA LINEAL	ISO 11359	°C ⁻¹	0,9.10 ⁻⁴
RESISTIVIDAD SUPERFICIAL	ASTM-D257	Ohm/sq.	≤ 5.10 ⁵

LOS VALORES EXPRESADOS SON EL RESULTADO DE ENSAYOS REALIZADOS SOBRE PROBETAS HECHAS POR COMPRESION Y DEBEN CONSIDERARSE COMO DATOS DE ORIENTACION Y EN NINGUN CASO COMO ESPECIFICACIONES TECNICAS.

NOTAS DE INTERES:

1. Este tipo de material termoplástico es 100% reciclable.
2. Cumple las Directivas Comunitarias Europeas:2002/95/CE, 2002/96/CE y 94/62/CE, por lo que NO CONTIENEN "Metales Pesados" de tipos: Cd, Cr^{VI}, Hg, Pb.

Anexo III

Product name: **Pentafood® APET Tr (11/0000)**
FD-E666/93-1160000-100_0-ZZZ

Description: thermoformable
Quality segment: FD - FOOD PACKAGING FILMS
Type: E666/93 - APET
Colour: 1160000 - Uncolored transparent PET 1160000
Surface: 100_0 - glossy/glossy
Additional treatment: ZZZ - No additional treatment

Properties	Standard	Unit	Values
Thickness	DIN 53370 / ISO 4593	µm	125 ... 1000
Tolerance of Thickness	DIN 53370 / ISO 4593	%	-10 ... 10 200 µm -7 ... 7 201 ... 400 µm -5 ... 5 401 ... 999 µm
Density	DIN EN ISO 1183-2	g/cm³	1,32 ... 1,36
Coefficient of Friction, max.	ASTM D 1894-08 kinetic		0,240
Oxygen transmission, max.	ISO 15105 at 23°C, 0% rel. hum.	cm³/m²·d·bar	28,50 150 µm 20,90 200 µm 16,40 250 µm 13,50 300 µm 11,40 350 µm 9,90 400 µm 8,70 450 µm 7,80 500 µm 6,40 600 µm 5,40 700 µm

Regulatory: The product corresponds to:
- Respective regulations and directives for food contact
- Supplementary confirmations to the above-named points can be issued on request.

Storage conditions:
- Ideal storage conditions between 10 - 30°C (50 - 86°F)
- Ideal RH 50%
- Should not be stored in direct sunlight and avoid major thermal fluctuation
- Store in original packaging
- Before working up the films should be conditioned a minimum of 24 hours at room temperature
- Recommended use of the material within 12 months of production date