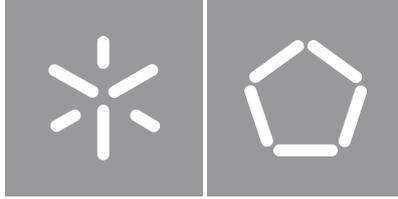




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Hélder Filipe de Oliveira Ferreira Rodrigues

**Substituição de terminais sobre injetados
em Zamak em cabos metálicos por um
material polimérico em componentes para
automóveis**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Hélder Filipe de Oliveira Ferreira Rodrigues

**Substituição de terminais sobre injetados
em Zamak em cabos metálicos por material
polimérico em componentes para
automóveis**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professora Doutora Carla Martins

e

Engenheiro Manuel Castro

Despacho RT - 31 /2019 - Anexo 3

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença [abaixo](#) indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Agradecimentos

Após a realização deste trabalho, é impossível olhar para trás e não referir algumas pessoas sem as quais o mesmo seria impossível. A todos, que de uma forma ou de outra foram imprescindíveis, os meus sinceros agradecimentos.

À minha orientadora, Prof^a Carla Martins por ter aceitado guiar-me neste projeto e por toda a ajuda e conselhos que me deu.

À FICOSA, por ter aceitado receber-me e por me ter proporcionado as condições necessárias à realização deste trabalho. Aos colegas de trabalho, nomeadamente à Andreia Sousa, Cláudia Silva, Carlos Duarte e Paulo Oliveira, por terem ajudado na minha integração num novo ambiente e por estarem sempre disponíveis a ajudar sempre que requisitei.

Ao Eng.^o Duarte Couto da Madiplaste, por ter sido uma voz ativa na realização deste trabalho e por ter intermediado as conversações com fornecedores. Obrigado, também, à ROMIRA por ter cedido de boa vontade uma amostra de material para realização de ensaios.

Ao Eng.^o Maurício, por me ter auxiliado na realização dos ensaios de microscopia ótica.

Aos meus amigos do Glassware, por todos os momentos vividos ao longo destes 5 anos e por todos que ainda estão por viver, que sem dúvida vou guardar durante toda a vida.

À minha família, por todo o esforço e confiança depositada durante todo o meu percurso académico, principalmente durante este último ano de estágio curricular.

À minha namorada, Joana, por todo o apoio incondicional ao longo destes anos, por ter facilitado os momentos que pareciam impossíveis de ultrapassar.

Por último, muito obrigado ao meu orientador na FICOSA, Eng.^o Manuel Castro, por ter sido um mentor durante estes últimos meses. Por todos os ensinamentos que me proporcionou será sem dúvida uma figura que vou levar como exemplo a seguir na minha carreira.

A todos, um muito obrigado.



Declaração de integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.



Resumo

Num momento em que o mundo atravessa uma grave crise social e económica devido à pandemia COVID 19, seguida por diversas tensões sociopolíticas que bloqueiam as cadeias de fornecimento, aumentam os custos de transporte internacionais e atrasam os prazos de entrega, causando o aumento exponencial do custo de obtenção de matérias-primas, torna-se fulcral que as empresas dinamizem as suas atividades e se adaptem a uma nova dinâmica de mercado, para conseguir reduzir custos e manter a qualidade nos seus produtos.

Neste contexto, surgiu o tema da presente dissertação que consiste na substituição de terminais sobreinjetados em Zamak por um material polimérico, para componentes da indústria automóvel. O trabalho é realizado na empresa Fico Cables, onde se produzem cabos de acionamento mecânico aplicados no interior de veículos automóveis de inúmeros produtores mundiais. Estas peças possuem pequenos componentes sobreinjetados num cabo metálico, fabricados em Zamak e sobreinjetados em plástico. O Zamak é uma liga metálica constituída por elementos como zinco, alumínio, magnésio e cobre, tendo como principal característica a elevada resistência mecânica. Este material possui um custo de produção muito elevado, com elevadas taxas de desperdício de matéria-prima na sua moldação e também alguns riscos associados à sua produção devido às elevadas temperaturas de fusão, na ordem dos 400°C. A substituição por materiais termoplásticos permite taxas produtivas mais elevadas, a redução de etapas do processo e redução de custos produtivos.

Tendo em vista a identificação e caracterização de um material termoplástico capaz de substituir as ligas de Zamak nos terminais de bloqueio de cabos metálicos, foram selecionados e testados diferentes materiais, através da realização de ensaios que pretenderam verificar diferentes fatores de controlo associados a este produto, como a geometria da peça e a interface plástico/metal. A realização de ensaios mecânicos e morfológicos permitiu aprofundar o conhecimento acerca das características da relação processamento-estrutura da peça que beneficiem a sua resistência mecânica. Por fim realizaram-se também ensaios de fadiga aos componentes plásticos com o objetivo de validar a sua aplicabilidade de acordo com as normas da indústria automóvel.

A poliamida aromática foi a opção mais viável para a tipologia de produto em estudo, permitindo a redução de etapas do processo e um ganho significativo de custos produtivos.

Palavras-chave: Cabo de controlo, Indústria automóvel, Ligas de Zamak, Material polimérico.



Abstract

At a time when the world is going through a serious social and economic crisis due to the pandemic COVID 19, followed by various socio-political tensions that block supply chains, increase international transport costs and delay delivery times, causing an exponential increase in the cost of obtaining raw materials, it is crucial that companies streamline their activities and adapt to a new market dynamic, to be able to reduce costs and maintain the quality of their products.

In this context, the subject of this dissertation arose, which consists in the replacement of overmolded Zamak terminals with a polymeric material for automotive industry components. The work is carried out at the company Fico Cables, which produces mechanical drive cables used inside automobiles of many world producers. These parts have small components overmolded into a metallic cable, made of Zamak and overmolded into plastic. Zamak is a metal alloy made of elements such as zinc, aluminum, magnesium and copper, and its main characteristic is its high mechanical resistance. This material has a very high production cost, with high rates of raw material waste in its molding and some risks associated with its production due to high melting temperatures, around 400°C. The substitution by thermoplastic materials allows for higher production rates, the reduction of process steps and reduction of production costs.

To identify and characterize a thermoplastic material capable of replacing Zamak alloys in metallic cable locking terminals, different materials were selected and tested, by performing tests that aimed to verify different control factors associated with this product, such as the part geometry and the plastic/metal interface. Mechanical and morphological tests allowed deepening the knowledge about the characteristics of the processing-structure relationship of the part that benefit its mechanical strength. Finally, fatigue tests were also performed on the plastic components to validate their applicability according to the automotive industry standards.

The aromatic polyamide was the most viable option for the type of product under study, allowing the reduction of process steps and a significant gain in production costs.

Keywords: *Command Cable, Automotive industry, Zamak alloys, Polymeric material.*



Lista de Abreviaturas e Siglas

Zamak - *Zink-Aluminium-Magnesium-Kupfer* (Zinco, Alumínio, Magnésio e Cobre)

UAP – Unidade Autónoma de produção

AFIA – Associação de Fabricantes para a Indústria Automóvel

ABS - Acrilonitrilo-butadieno-estireno

PC – Policarbonato

PP – Polipropileno

PPE – Éter de polifenileno

PEEK – Poli (éter-éter-cetona)

PA – Poliamida

GF – Material reforçado com fibra de vidro (*glass fiber*)

POM – Poliacetal

NOK – Não OK

DEP – Departamento de Engenharia de Polímeros

Lista de Símbolos

% - Percentagem

T_g – Temperatura de Transição Vítrea

T_m – Temperatura de Fusão

E – Módulo de Elasticidade

ρ – Massa específica

σ – Desvio-padrão

Lista de Unidades

N – Newton

kg – Quilograma

g – Grama

ton – Tonelada



μm – Micron

mm – Milímetro

cm – Centímetro

dm - Decímetro

m – Metro

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius

MPa – Mega Pascal

GPa – Giga Pascal

s – Segundo

h – Hora

€ - Euro

ml – Mililitro

rpm – Rotações por Minuto



Índice de Figuras

Figura 1 - Fluxograma de atividades	18
Figura 2 - Cadeia de abastecimento da indústria automóvel	22
Figura 3 - Principais exportadores da indústria automóvel	23
Figura 4 - Evolução da utilização de plásticos no fabrico de automóveis	24
Figura 5 - Cabo de comando completo	26
Figura 6 - Esquema representativo do número de cabos de comando num automóvel.....	27
Figura 7 - Esquematisação do funcionamento de um cabo de controlo.....	28
Figura 8 - Conjunto de elementos de um cabo metálico	29
Figura 9 - Construções mais comuns de um cabo metálico	30
Figura 10 - Tipos de enrolamento de filamentos metálicos	31
Figura 11 - Diferentes geometrias de terminais de bloqueio metálicos.....	32
Figura 12 - Alguns produtos fabricados em Zamak	34
Figura 13 - Variedade de processos de fundição.....	37
Figura 14 - Esquematisação de processo de fundição em câmara quente	38
Figura 15 - Esquematisação de processo de fundição em câmara fria.....	39
Figura 16 – a) Produção da flor; b) Injeção de Zamak; c) Sobreinjeção de material plástico	41
Figura 17 - Máquina de injeção ARBURG ALLROUNDER 270M 350-90	51
Figura 18 - Manual de Qualidade da Ficosa: a) Flor OK; b) Posicionamento da flor no molde	52
Figura 19 - Defeito na produção de flores	52
Figura 20 - a) Canais de alimentação; b) Molde utilizado nos ensaios.....	54
Figura 21 - Posicionamento das flores	55
Figura 22 - a) Flor 2,5mm; b) Flor 3,5mm; c) Terminal injetado	56
Figura 23 - a) Decapagem do revestimento do cabo; b) Preenchimento da zona decapada com plástico; c) Enchimento incompleto da gola	57
Figura 24 - Molde com centradores de cabo	58
Figura 25 – Peças obtidas durante o estudo de balanceamento do molde.....	59
Figura 26 - Geometria do novo terminal.....	59
Figura 27 - Diferentes dimensões das flores utilizadas no ensaio: a) 3mm; b) 4mm; c) 5mm).....	60
Figura 28 - Referências de cabo utilizadas no ensaio prático: a) 68C; b) 68CK	62
Figura 29 - Características do material ROTEC HPPA comparativamente com outras poliamidas.....	63
Figura 30 - Máquina de tração	64
Figura 31 - Modo de funcionamento da máquina de tração	65
Figura 32 - Material utilizado na preparação de amostras: a) Resina epóxi e endurecedor; b) Moldes para enchimento com resina.....	66
Figura 33 - Polideira Presi Minittech 233	67
Figura 34 - Estrutura utilizada na realização do ensaio de fadiga.....	69
Figura 35 - Distribuição normal dos ensaios da 1ªFase.....	71
Figura 36 - Distribuição normal dos ensaios da 1ªFase (com gola).....	72
Figura 37 - Diferenças nos modos de falha dos terminais consoante o diâmetro da flor no interior	73
Figura 38 - Distribuição normal dos ensaios em molde com centramento de cabo	75



Figura 39 - Evolução da resistência das peças ao longo de 3 semanas de estágio.....	75
Figura 40 - Distribuição normal dos ensaios realizados em molde a 60°C	77
Figura 41 - Distribuição normal dos ensaios realizados com material ROTEC HPPA.....	80
Figura 42 - Amostra embebida em resina epóxi no plano de corte que será observado	81
Figura 43 - Flor de 3mm em material Durethan.....	82
Figura 44 - Flor de 4mm em material Durethan.....	82
Figura 45 - Flor de 5mm em material Durethan.....	83
Figura 46 - Ampliação da zona central da amostra (20x): a)500N; b)900N	84
Figura 47 - Ampliação da zona lateral esquerda da amostra (20x): a)500N; b)900N	84
Figura 48 - Ampliação da zona lateral direita da amostra (20x): a)500N; b)900N	85
Figura 49 - Amostras de terminais fabricados em ROTEC HPPA com flor de 5mm	86
Figura 50 - Análise à zona de corte de amostras em ROTEC HPPA após o ensaio de tração.....	87

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Componentes de um cabo de controlo.....	28
Tabela 2 - Elementos presentes nas ligas de Zamak [31]	36
Tabela 3 - Custo da máquina de Zamak para produção de 100 peças.....	43
Tabela 4 - Custo de material Zamak para produção de 100 peças	43
Tabela 5 - Custo da máquina Babyplast para produção de 100 peças.....	44
Tabela 6 - Custo de material POM para produção de 100 peças.....	45
Tabela 7 - Propriedades físicas das ligas de Zamak	47
Tabela 8 - Propriedades mecânicas das ligas de Zamak.....	47
Tabela 9 - Tabela de ponderação de requisitos e especificações	48
Tabela 10 - Seleção de materiais	49
Tabela 11 - Algumas propriedades do material DURETHAN AKV50H.....	49
Tabela 12 - Características do equipamento de injeção.....	50
Tabela 13 - Parâmetros de injeção (Durethan AKV50H)	53
Tabela 14 - Parâmetros de injeção (ROTEC HPPA)	53
Tabela 15 - Resultados mecânicos da 1ªFase	70
Tabela 16 - Resultados mecânicos (2ªFase)	74
Tabela 17 - Resultados mecânicos com molde aquecido (60°C)	76
Tabela 18 – Força necessária à rotura do terminal em função da respetiva cavidade (cabo 68C)	78
Tabela 19 - Força necessária à rotura do terminal em função da respetiva cavidade (cabo 68CK)	78
Tabela 20 - Resultados mecânicos (ROTEC HPPA)	80

Índice de Equações

Equação 1 - Cálculo da massa específica.....	45
--	----





Índice

1. Introdução	15
1.1. Enquadramento	15
1.2. Objetivos	16
1.3. Metodologia	17
1.4. Estrutura da Dissertação	19
1.5. Apresentação da empresa	19
2. Estado de arte	21
2.1. Indústria automóvel	21
2.1.1. Conceitos gerais	21
2.1.2. Cabos de controlo para automóveis	25
2.1.3. Cabos metálicos e as suas configurações	29
2.1.4. Terminais de Bloqueio em Zamak	31
2.2. Ligas de Zinco e o seu processamento	33
2.2.1. Conceitos gerais	33
2.2.2. Ligas Zamak	34
2.3. Tecnologia da Fundição	36
2.3.1. Conceitos Gerais	36
2.3.2. Fundição Injetada	37
2.3.3. Defeitos do processo	39
3. Seleção de materiais e viabilidade económica	41
3.1. Apresentação de produto e suas características	41
3.2. Análise de custos ao processo atual	42
3.3. Análise de custos associada à produção de peças em plástico	45
3.4. Seleção de materiais	46
4. Materiais e Métodos Experimentais	50
4.1. Materiais	50
4.2. Processamento por moldação por injeção	50
4.3. Cabo metálico e produção de flor	51
4.4. Produção dos terminais em material plástico	53



4.5.	Moldes utilizados.....	54
4.5.1.	Molde A.....	54
4.5.2.	Molde B.....	57
4.6.	Cabo 68C vs Cabo 68CK – Incidência por Cavidade	61
4.7.	Avaliação com nova Matéria-Prima	62
4.8.	Ensaio de Caracterização.....	64
4.8.1.	Caracterização Mecânica – Ensaio de Tração	64
4.8.2.	Caracterização Estrutural	65
4.8.3.	Ensaio de Fadiga	68
5.	Apresentação, análise e discussão de resultados	70
5.1.	Caracterização Mecânica.....	70
5.2.	Caracterização Estrutural	81
5.3.	Ensaio de Fadiga.....	88
5.4.	Análise económica final.....	88
6.	Conclusões.....	90
7.	Bibliografia e Webgrafia.....	92
8.	Anexos	96
	Anexo 1 – Folha de cálculo do custo do processo POM + Zamak	96
	Anexo 2 – Ficha técnica do material Durethan AKV50H 2.0	97
	Anexo 3 – Ficha técnica do material ROTEC HPPA	98
	Anexo 4 – Mangueiras para aquecimento do molde.....	99
	Anexo 5 – Estufa.....	99
	Anexo 6 – Serra de fita de diamante do DEP	100
	Anexo 7 – Orientação de corte da amostra	100
	Anexo 8 – Microscópio ótico OLYMPUS BH 2	101
	Anexo 9 – Lupa estereoscópica OLYMPUS SZ-PT	101
	Anexo 10 – Valores obtidos no ensaio da 1ªFase	102
	Anexo 11 – Valores obtidos nos ensaios da 2ªFase.....	105
	Anexo 12 – Valores obtidos no ensaio com molde aquecido.....	108
	Anexo 13 – Valores obtidos com matéria-prima ROTEC HPPA.....	110
	Anexo 14 - Condições de processamento com Durethan AKV50H	114
	Anexo 15 – Condições de processamento com ROTEC HPPA	116



1. Introdução

1.1. Enquadramento

A indústria automóvel caracteriza-se por uma competitividade a todos os níveis em busca da qualidade máxima dos produtos. Num mercado que tem vindo a causar perdas enormes às empresas (em alguns casos fatais) devido ao elevado custo de extração do subsolo de materiais semicondutores utilizados na produção de microchips, que são o “cérebro” de qualquer sistema eletrónico, desde o carro ao telemóvel. Este acontecimento, aliado aos bloqueios comerciais sentidos desde o início da pandemia da COVID 19, inflacionaram os preços dos transportes e de aquisição de matérias-primas por parte das empresas, criando um choque em cadeia em todo o mercado de componentes para automóveis. Sem estes componentes, toda a pirâmide de fornecimento da indústria automóvel sai afetada. Torna-se então fundamental para as empresas adaptarem-se à nova realidade, procurando reduzir os seus custos de produção, sem nunca afetar a qualidade do produto final [1].

Assim surgiu o convite à realização deste projeto, por parte da FICOSA, como tentativa de perceber qual a viabilidade de substituir um material como o Zamak, com custos energéticos muito elevados, por um material polimérico com custos de produção mais reduzidos, mas que consiga garantir um bom nível de propriedades mecânicas.

O Zamak é uma liga metálica constituída por zinco (Zn), alumínio (Al), magnésio (Mg) e cobre (Cu), é utilizado em inúmeras aplicações, nomeadamente em terminais de bloqueio para soluções de acionamento mecânico instalados no interior de viaturas automóveis, tais como: cabos de abertura e trancamento de portas, abertura de capô, travão de mão, caixas de velocidades (*shifters*), etc.

Os cabos de controlo têm no seu interior um cabo metálico que comanda todos os movimentos de acionamento. Numa das pontas é sobre injetado um terminal em Zamak, que por sua vez sofrerá uma sobreinjeção na sua superfície de um material polimérico que visa absorver as vibrações no interior da carroçaria automóvel e, assim, diminuir a emissão de ruídos para dentro do veículo. Pretende-se com o projeto de dissertação substituir o uso do material Zamak por uma matéria-prima polimérica, com vista à redução do número de ações a realizar durante o processamento dos cabos.



1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste na identificação e caracterização de um material polimérico capaz de substituir as ligas de Zamak nos terminais de bloqueio de cabos metálicos, tendo como ponto de partida principal o facto de estes terem um requisito mínimo de funcionamento que exige que a ligação plástico-metal seja capaz de suportar 800N num ensaio à tração. O segundo ponto a ter em conta é garantir a sua viabilidade económica comparativamente com o processo produtivo atual, pretendendo-se que esta alteração permita à empresa reduzir a sua tabela de custos de produção, diminuindo o número de encargos para metade, assim como o número de materiais utilizados. Será realizado um estudo acerca do custo do processo produtivo atual, tendo em conta o custo hora-máquina de ambas as máquinas utilizadas (máquina de Zamak e Babyplast) e o gasto monetário em ambos os materiais, considerando a massa de material necessária para cada injeção (peças + gito).

Um dos objetivos será também realizar uma pesquisa bibliográfica acerca das ligas de Zamak e boas práticas da sua moldação, de modo a possuir um melhor conhecimento acerca do tema em estudo, assim como eliminar um dos processos de injeção na linha de fabrico, uma vez que este cabo sofre a sobreinjeção de Zamak e seguirá para outra máquina dentro da mesma linha onde se fará uma sobreinjeção de plástico. Se for viável substituir a injeção do Zamak por plástico, seria possível realizar estas duas etapas numa só peça maciça, sem encargos na aquisição de novos moldes, pois estes já foram adquiridos anteriormente. Por fim, espera-se identificar e corrigir quaisquer defeitos na produção destes componentes de maneira a manter a produção o mais otimizada possível.

Os objetivos podem ser definidos de forma sucinta nos seguintes:

- Compilação dos requisitos e especificações do produto;
- Seleção de materiais poliméricos para substituição do Zamak;
- Produção de peças por moldação por injeção e identificação de janela operatória;
- Caracterização (mecânica e morfológica) do produto plástico;
- Análise de viabilidade de novo material e processo de substituição do Zamak;
- Realização de ensaios de durabilidade às peças obtidas.



1.3. Metodologia

Com vista à obtenção de resultados, serão selecionadas, através de *softwares* de bases de dados poliméricas, diversas matérias-primas de base polimérica que sejam capazes de corresponder aos requisitos do projeto e que possam ser capazes de substituir o Zamak processado por fundição nos terminais de cabos. Após a escolha da matéria-prima, esta será aplicada nos terminais dos cabos metálicos onde serão realizados ensaios destrutivos inerentes à linha de montagem com o objetivo de comparar estes dados com as especificações do produto definidas pelo cliente. Como métodos de caracterização serão usados ensaios mecânicos e de microscopia ótica. As amostras serão submetidas a ensaios de microscopia ótica de reflexão com o intuito de analisar a distribuição e dispersão das fibras de vidro presentes no material. Além disso, algumas amostras serão colocadas na lupa estereoscópica do DEP (Departamento de Engenharia de Polímeros), para observar a zona de contacto entre flor e o material plástico, e assim verificar a existência de defeitos, tais como vazios que sejam criados no interior das peças aquando de injeção.

O trabalho prático será constituído por diferentes fases onde será testada a influência de diferentes fatores de controlo na resistência mecânica suportada pelas peças, como: posicionamento da flor, diâmetro da flor, criação de uma gola de plástico ao longo do cabo, aquecimento do molde, etc. À medida que forem sendo analisados os resultados, serão selecionadas as condições em estudo de forma a serem mantidas nos ensaios seguintes, até ser obtida uma condição maximizada e capaz de corresponder aos requisitos exigidos para a peça.

Por fim, caso os materiais de base polimérica demonstrem ser capazes de responder aos requisitos do cliente, irá ser feita uma análise ao ganho económico associado à alteração de material, considerando o custo da matéria-prima por quilograma e o custo envolvido na produção das peças por moldação por injeção.

Este projeto foca-se na linha de produção GL3 da FICOSA, onde foram iniciados estudos preliminares em anos anteriores acerca de uma possível substituição de matéria-prima, inclusive foram adquiridos os moldes necessários, no entanto um projeto de investigação como o atual nunca foi desenvolvido.

Na Figura 1 apresenta-se o fluxograma de atividades que serão desenvolvidas ao longo do projeto e que foram anteriormente explicadas.

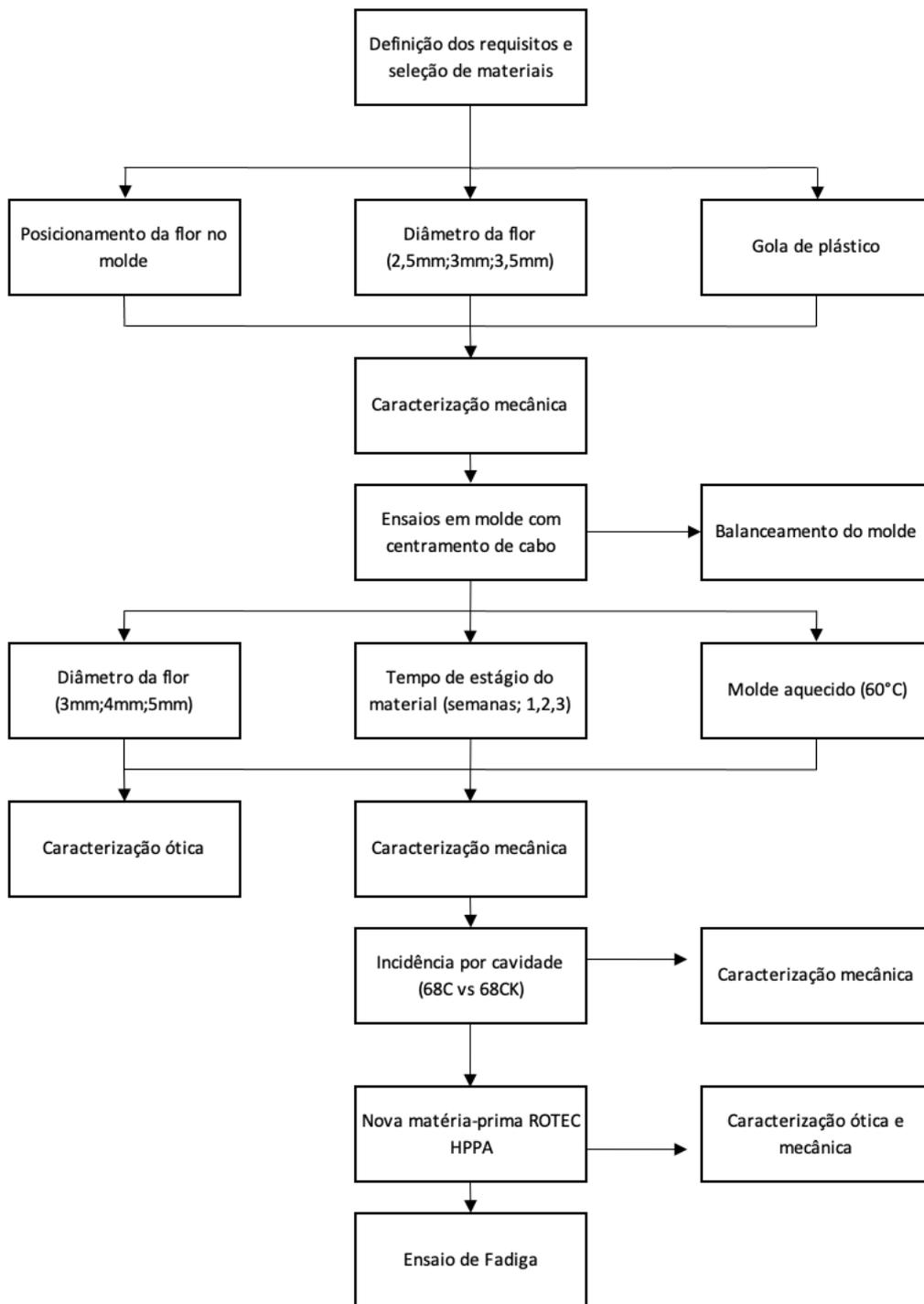


Figura 1 - Fluxograma de atividades



1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é elaborada em sete fases, sendo a primeira referente à presente introdução. A secção 2 apresenta a revisão bibliográfica do conteúdo teórico das matérias a abordar, tais como: conceitos gerais da indústria automóvel e dos cabos de controlo, ligas de zinco, Zamak e o seu método de processamento.

Na secção 3 efetua-se a seleção de materiais com base em alguns requisitos e especificações relevantes à tipologia de produto em questão. Apresenta-se também uma análise económica preliminar ao custo de produção deste projeto antes de serem feitas alterações.

A secção 4 inicia a parte prática deste projeto, onde são descritas as condições de processamento e se realizam ensaios de injeção sob diferentes condições, procurando maximizar a resistência mecânica suportada pelas peças. É ainda incluída uma fase de caracterização estrutural e mecânica que procura dar suporte aos resultados obtidos.

A análise dos resultados encontra-se na secção 5 e o trabalho termina com todas as conclusões retiradas e melhorias aplicadas ao sistema produtivo, na secção 6.

1.5. Apresentação da empresa

O presente projeto foi realizado nas instalações da empresa Fico Cables, na cidade da Maia, entre março e julho de 2022, sob supervisão do engenheiro Manuel Castro, que desempenha as funções de Diretor da UAP 4 (Unidade Autónoma de Produção 4).

Grupo FICOSA *International*

A empresa Fico Cables pertence atualmente ao grupo espanhol FICOSA, fundado no ano de 1949 em Barcelona, tendo iniciado a sua produção no mercado de peças de reposição. Hoje, a FICOSA opera no setor automóvel e possui 32 unidades fabris espalhadas por 16 países de todo o mundo. Ocupa, assim, o lugar de uma das principais fornecedoras da indústria automóvel, sendo líder global no desenvolvimento e produção de espelhos retrovisores, tecnologias de visão traseira, sistemas de assistência ao condutor, sistemas de acionamento de portas e assentos, entre outros.



Fico Cables

No ano de 1971, num pequeno anexo em Vila Nova de Gaia nasceu a empresa Teledinâmica. Depois, em 1981, associada à primeira expansão internacional do grupo FICOSA, mudou-se para as instalações na cidade da Maia, onde, em 1993 alterou o seu nome para Fico Cables Lda., até aos dias de hoje, possuindo cerca de 1000 trabalhadores. A empresa trabalha em três principais áreas de negócio, sendo eles: sistemas de conforto (coxins e *suspension mats* que são aplicados no interior dos assentos e têm a função de suportar o peso do utilizador), cabos para transmissão de força mecânica (cabos de porta, capô, travão de mão, elevação de janela etc.) e um dos projetos mais recentes da Fico Cables que são os *shifters* (caixas de velocidades), responsáveis por realizarem a alternância de velocidades num sistema de mudanças automóvel.

A Fico Cables encontra-se dividida em cinco unidades distintas, cada uma alojada no seu pavilhão industrial, são denominadas de Unidades Autónomas de Produção, trabalhando de forma independente entre si, com os seus próprios projetos e por vezes atuando também como fornecedoras internas de outras UAP's. Estas unidades possuem as seguintes funções:

- UAP 1 – Produção de bobinas de espiral e revestimento de cabo por co-extrusão. Esta UAP atua como fornecedora interna das restantes UAP's.
- UAP 2 – Linhas de montagem de cabos, injeção de terminais de espiral em plástico e primeira injeção de Zamak.
- UAP 3 – Linhas de montagem de cabos com maior volume de vendas, corte de cabo e primeira injeção de Zamak.
- UAP 4 – Maioritariamente responsável pela produção de sistemas de conforto e *shifters*. Corte, conformação e revestimento de arame. Possui também diversas máquinas de sobreinjeção verticais para fabrico de coxins.
- UAP 5 – Única das 5 UAP's que não está situada na mesma área industrial, encontra-se localizada a sensivelmente 2 quilómetros das restantes UAP's. Produz referências em fim de vida que a empresa contratualmente deve garantir a sua produção.



2. Estado de arte

2.1. Indústria automóvel

2.1.1. Conceitos gerais

A indústria automóvel é uma das indústrias de maior preponderância nas economias de vários países a nível mundial, não se tratando de um setor isolado de fabrico de automóveis, mas sim de toda uma cadeia de fornecimento desde os produtores de moldes e de pequenos componentes até às gigantes multinacionais de que diariamente se ouve falar. Trata-se, assim, de toda uma cadeia interligada de fornecedores e produtores responsável por fazer chegar os automóveis ao mercado. É a indústria responsável pelo projeto, desenvolvimento, fabrico, publicidade e a venda de veículos automóveis. Devido à sua competitividade, encontra-se em constante mudança. A necessidade de produzir peças mais complexas e mais leves no sentido de se conseguir uma vantagem competitiva é uma constante em todas as empresas ligadas à produção de peças para automóveis [2].

Embora os veículos movidos a vapor tenham sido produzidos anteriormente, o início da indústria automóvel está marcado pelo desenvolvimento do motor de combustão interna em 1885, pelo alemão Carl Benz, que veio revolucionar o setor industrial. Ainda assim, os Estados Unidos dominaram completamente a indústria mundial na primeira metade do século XX, representados pela Ford e pela General Motors, duas das principais produtoras de automóveis mundiais [3][4], através da invenção de técnicas de produção em massa, no ano de 1909 por Henry Ford, aumentando assim as cadências de produção de automóveis, permitindo que o veículo automóvel passasse a estar ao alcance de qualquer trabalhador, deixando assim de ser um exclusivo dos membros mais ricos da sociedade. Na segunda metade do mesmo século, a situação alterou-se acentuadamente uma vez que os países da Europa Ocidental e o Japão se tornaram em larga escala os principais produtores e exportadores [3].

Desde a década de 1990, a relação entre fabricantes do setor automóvel e os fornecedores de componentes tem sofrido cada vez mais uma maior dependência do primeiro sobre o último. Os fornecedores de componentes tornaram-se mais envolvidos no desenvolvimento de novos projetos, isto significa que o seu papel evoluiu de simples fornecedores de peças que foram produzidas de acordo com os requisitos e especificações do cliente, para terem uma voz ativa na conceção e desenvolvimento de novos modelos de veículos. Este desenvolvimento tem sido acompanhado pelo estabelecimento de uma cadeia de fornecimento organizada em níveis (*tiers*) [4], como está descrito na Figura 2.

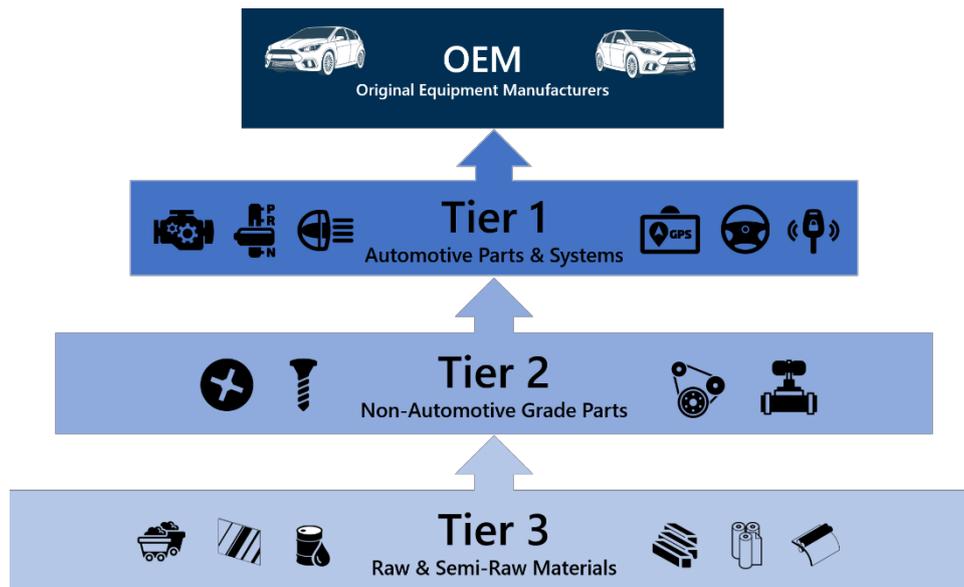


Figura 2 - Cadeia de abastecimento da indústria automóvel [4]

A Europa possui uma forte tradição no fabrico de automóveis, garantindo a produção de alguns dos melhores automóveis do mercado. Representa, desta forma, um setor estratégico na União Europeia, onde são produzidos anualmente cerca de 17 milhões de automóveis e veículos comerciais, empregando 2,3 milhões de trabalhadores altamente especializados, com uma representação de 7,6% de toda a mão de obra da indústria europeia.

O setor automóvel, mais precisamente o da produção de componentes, é um dos principais pilares da economia portuguesa, com uma grande vertente exportadora, onde mais de 80% de toda a sua produção se destina a outros mercados. O principal mercado de destino é a Europa, tendo as exportações aumentado 29% no período de 2007-2015, destacando-se alguns países como Espanha, Alemanha e França como principais “clientes” da indústria automóvel portuguesa [5].

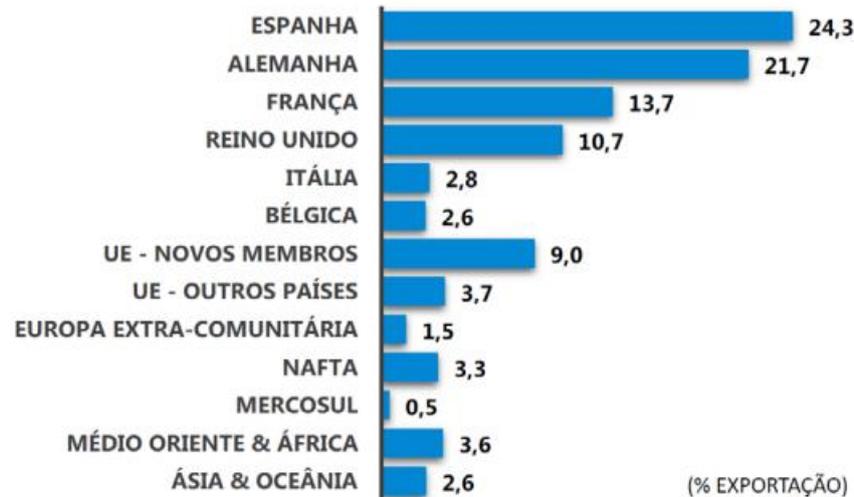


Figura 3 - Principais exportadores da indústria automóvel [5]

A indústria automóvel em Portugal apresenta um forte contributo no emprego e no PIB do país. As suas três principais áreas de atividade são: fabrico de moldes, fabrico de componentes e o fabrico de viaturas automóveis. Segundo a AFIA (Associação de Fabricantes para a Indústria Automóvel), o setor de componentes para automóveis é o mais significativo dos três, com um agregado composto por cerca de 200 empresas, representa assim 42.000 postos de trabalho [5][6]. A indústria de moldes portuguesa é intrinsecamente dependente do setor automóvel, onde cerca de 85% de toda a produção de moldes nacional (maioritariamente concentrada em duas zonas geográficas principais, nomeadamente na Marinha Grande e Oliveira de Azeméis) é exportada [7].

A utilização de plásticos no setor automóvel remonta ao início do século XX, tendo sofrido um incremento exponencial ao longo dos anos. Por exemplo, a quantidade em massa de materiais plásticos num automóvel em 1960 representava cerca de 9 kg do total do automóvel, enquanto no ano de 2010 esse valor já teria aumentado para cerca de 162 kg [7]. Esta mudança no setor automóvel acontece após sucessivas exigências por parte dos governos e instituições mundiais de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, uma vez que quanto menor for a massa total do veículo, menos combustível irá ser consumido. Estima-se que uma redução de 10% na massa de um veículo permite reduzir o seu consumo de combustível na ordem dos 5-8%, que são valores astronómicos quando se pensa nos milhões de carros que circulam diariamente em todo o mundo [8][9].

A utilização de polímeros de engenharia e de elevado desempenho no setor automóvel permite uma maior liberdade a nível de design na fase de desenvolvimento do produto, quando comparado com outros materiais que são utilizados, como aço e outras ligas metálicas, que representam cerca de 85-



90% da massa total do veículo. A utilização de materiais plásticos no fabrico de automóveis acrescenta também outras vantagens, tais como [10]:

- Menor corrosão dos materiais, aumentando o tempo de vida do veículo;
- Elevada flexibilidade na incorporação de componentes;
- Segurança, economia (devido ao menor custo do plástico) e conforto;
- Reciclabilidade.

Na Figura 4 é possível verificar o incremento substancial relativo à utilização de materiais plásticos na produção de veículos para a indústria automóvel, considerando um período de 50 anos, até 2020.

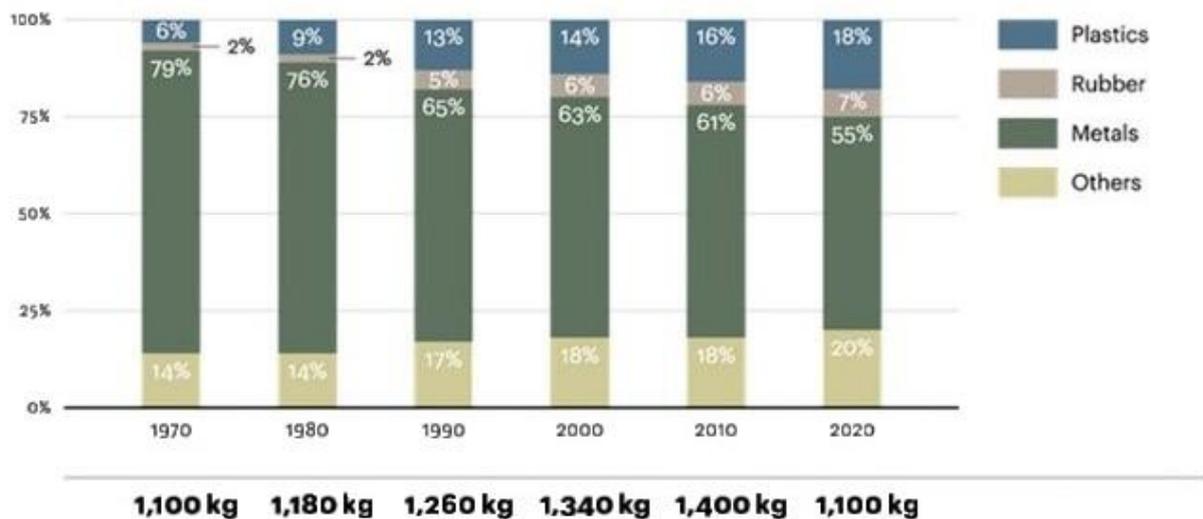


Figura 4 - Evolução da utilização de plásticos no fabrico de automóveis [10]

Nos dias de hoje, a utilização de materiais plásticos em automóveis, destina-se à produção de componentes internos. Um exemplo disso são os painéis de instrumentos, onde estão visíveis informações importantes para uma condução segura, como velocímetro, conta-rotações do motor, medidor de combustível, etc. Estes painéis eram tipicamente produzidos recorrendo a vários componentes metálicos que eram fixados com recurso a uma estrutura de suporte em aço. Inicialmente, os termoplásticos entraram na estrutura dos painéis de instrumentos com o objetivo de melhorar a estética do produto, mas hoje são praticamente produzidos em materiais plásticos, permitindo reduzir o peso e os custos de produção. Os termoplásticos mais utilizados nestas aplicações são [11]:



- Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS);
- Policarbonato (PC);
- Misturas de PC e ABS;
- Polipropileno reforçado com diferentes percentagens de fibras de vidro (PP %GF);

2.1.2. Cabos de controlo para automóveis

Nos automóveis, são utilizados diversos sistemas de comando responsáveis por realizar o acionamento dos diversos sistemas de movimento e conforto, desde os cabos de porta aos cabos de abertura de capô ou de travão de mão.

Cabos de controlo são componentes mecânicos de baixo custo e flexíveis com a função de transmitirem a energia mecânica aplicada entre dois ou mais dispositivos, pelo princípio de movimentação de um cabo (usualmente de aço) no interior de um outro exterior, chamado de tubo espiral [12]. Podem ser utilizados para o acionamento de vidros, abertura de portas, posicionamento de assentos, assim como nos sistemas de aceleração, embraiagem e travagem, como se ilustra na Figura 6 [13][14]. Relativamente aos seus constituintes, é possível identificar três que são fundamentais ao correto funcionamento destes produtos: tubo espiral (responsável por dar resistência ao cabo e permitir adotar diferentes layouts dentro do automóvel consoante a aplicação desejada), cabo metálico (produzido através de filamentos metálicos enrolados em torno do seu próprio eixo, responsável por transmitir o esforço mecânico entre o sistema atuador e recetor), e os terminais de bloqueio metálicos (produzidos em Zamak, sobreinjetados numa das extremidades do cabo metálico e é aqui que se concentra a maior parte das tensões aplicadas a todo o cabo). Além destes componentes, também é possível encontrar outros constituintes dependendo do modelo em questão, como: terminais de espiral, revestimento de terminal Zamak, tubos exteriores (diminuição dos efeitos sonoros) e “grommet” (aplicado em cabos de porta, define a interface entre a zona seca e húmida da porta do automóvel. Na Tabela 1 apresentam-se os vários componentes de um cabo de controlo, que se ilustra na Figura 5.

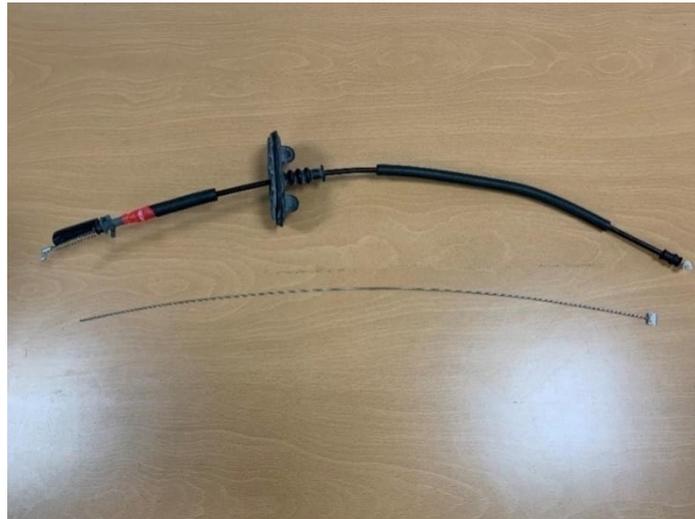
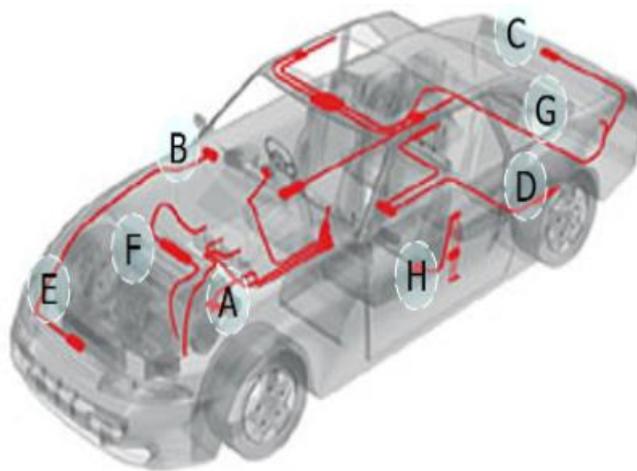


Figura 5 - Cabo de comando completo

A utilização destes sistemas de acionamento mecânico possui a vantagem da utilização de diferentes layouts de disposição do cabo entre o local de aplicação da força e o local onde este efeito é sentido. É possível assim adotar diversas configurações nos cabos ao invés de estes apresentarem um percurso puramente unidirecional [15]. Outra vantagem relaciona-se com a redução de massa dos componentes, uma vez que os cabos de guiamento mecânico permitem reduzir a massa total em comparação com outras soluções, como por exemplo cintos ou arames de direcionamento de força mecânica, que possuem maiores quantidades de material metálico na sua constituição [16].

Esta tipologia de cabos, independentemente da função que estes terão durante a sua utilização, quer se destinem a serem instalados na porta de um automóvel, nos assentos ou no processo de abertura do tejadilho (Figura 6), não possuem uma grande variação no número de componentes presentes nos cabos, a maior diferença reside no comprimento do cabo, conforme a distância que exista entre o local de aplicação da força e o local onde se pretenda que esta seja sentida. Esta transferência de força mecânica encontra-se representada na Figura 7.



- A) Cabo de Transmissão de Mudança;
- B) Cabo de embraiagem;
- C) Abertura da mala;
- D) Travão de mão;
- E) Cabo de abertura do capô;
- F) Cabo de acelerador;
- G) Abertura da tampa da gasolina;
- H) Cabo de abertura de porta

Figura 6 - Esquema representativo do número de cabos de comando num automóvel

Estes cabos de acionamento mecânico são compostos por um sistema atuador (local onde se aplica a força) e um sistema recetor (local até onde a força é transmitida). Podem dividir-se em dois tipos de sistemas diferentes: o sistema *Pull-Pull* e o sistema *Push-Pull*, descritos de seguida [17].

Sistemas *Pull-Pull* (Puxar-Puxar) – este sistema de cabos apenas é aplicado em situações onde apenas a transmissão de forças de tração seja pretendida, trabalhando apenas numa direção. Em alguns modelos, instalam-se molas de retorno num dos terminais do cabo com o objetivo de manter uma carga constante no cabo e de o retornar à posição inicial para nova ativação. Para aumentar a flexibilidade geométrica de instalação do cabo, são aplicados núcleos de cabos flexíveis no interior dos mesmos.

Sistemas *Push-Pull* (Empurrar-Puxar) – Estes cabos transmitem forças tanto à tração como à compressão, atuando em duas direções. Esta tipologia de cabos apresenta uma maior capacidade para suportar tensões exercidas em modo de tração do que em modo de compressão.

Estes sistemas devem suportar elevadas cargas tanto de tração como de compressão, sendo que este se trata do principal requisito definido pelo cliente aquando do pedido do projeto. Um cabo de comando para ser utilizado em automóveis normalmente é requisitado que consiga suportar esforços de tração entre 800 e 1200 N [18].

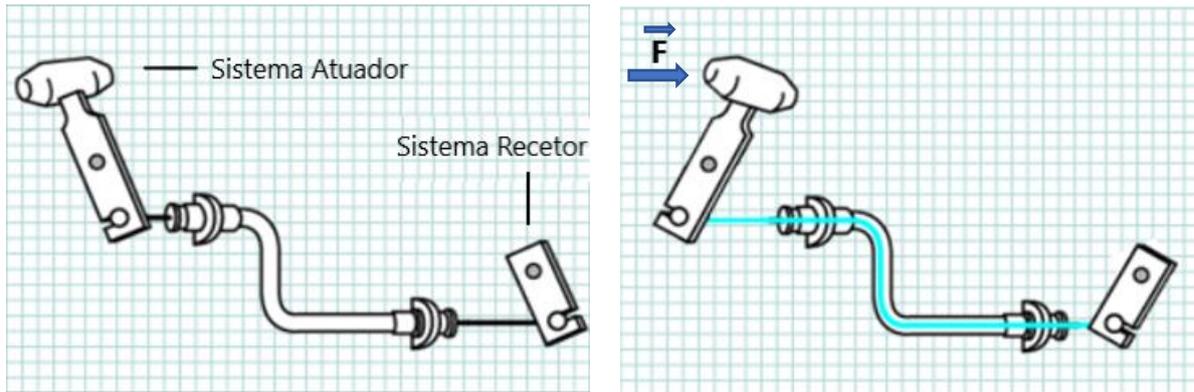


Figura 7 - Esquemática do funcionamento de um cabo de controlo [15]

Componentes de um cabo de controlo

Tabela 1 - Componentes de um cabo de controlo

Componente	Imagem	Função
Tubo espiral		Faz o guiamento e fornece proteção ao cabo metálico durante a sua utilização.
Tubo exterior		Motivos de acústica. Devem absorver o ruído provocado pelo cabo e evitar que este seja sentido dentro do habitáculo.
<i>Grommet</i>		Utilizado em cabos de porta de modelos que exijam uma interface entre a zona húmida e a zona seca do automóvel.
Terminais de espiral/clips		Devem assegurar a fixação do cabo em diferentes posições ao longo do seu comprimento.
Terminais de bloqueio (zamak)		Responsáveis por suportar as tensões mecânicas aplicadas ao cabo. Devem suportar esforços de tração na ordem dos 800 N.
<i>Container</i>		Controla a movimentação do terminal de zamak. Deve garantir que este se move apenas dentro das distâncias requisitadas.



2.1.3. Cabos metálicos e as suas configurações

Os cabos metálicos representam um componente fundamental na constituição dos cabos de controlo. Sem um cabo metálico no seu interior, um cabo de controlo perderia toda a sua utilidade. Caracterizam-se por serem capazes de resistir a tensões axiais muito elevadas, comparativamente com cargas de flexão ou de torção [19]. Como se observa na Figura 8, um cabo é constituído por um aglomerado de filamentos, enrolados numa forma helicoidal, podendo ou não ser enrolados em torno de um núcleo central ou apenas torcidos em torno do seu eixo. Dependendo do número de filamentos e da sua disposição helicoidal, é possível realizar uma distinção entre corda e cabo, sendo cada um deles aplicado também em diferentes funções. Uma corda é um conjunto de filamentos, onde se realizou uma torção numa direção e são referidas por 1x o número de filamentos (por exemplo, 1x7 ou 1x19 são as construções mais usuais). Já um cabo metálico, apresenta um núcleo central, tipicamente de aço (também são núcleos em fibra) onde são dispostas diferentes cordas enroladas helicoidalmente. Resumidamente, o elemento base é o filamento, sendo que numa corda é um conjunto de filamentos e num cabo um conjunto de cordas. As construções em corda apresentam uma menor flexibilidade, devido ao reduzido número de filamentos e uma maior resistência à abrasão do que as construções em cabo, que possuem números de filamentos superiores [19][20].

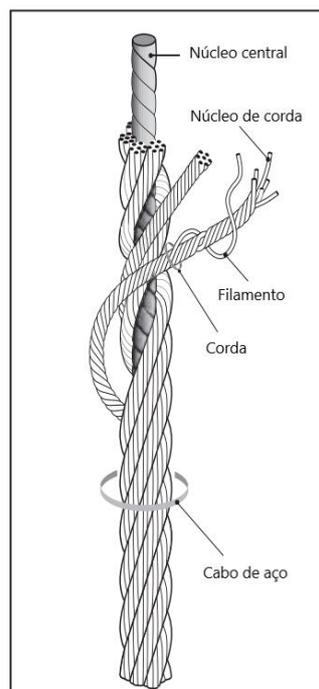


Figura 8 - Conjunto de elementos de um cabo metálico



Os cabos metálicos podem apresentar diversas configurações, relativamente ao número de filamentos como já foi anteriormente dito, mas também relativamente ao diâmetro dos filamentos metálicos ou das respetivas camadas. Podem apresentar as seguintes constituições [20][21]:

- *Seale* – Nesta composição, existem pelo menos 2 camadas com o mesmo número de filamentos. Os arames da camada externa possuem um diâmetro maior para fornecer resistência contra o desgaste.
- *Warrington* – O cabo possui pelo menos uma camada com filamentos de dois diâmetros diferentes e alternados entre si.
- *Warrington-Seale* – Esta constituição apresenta características de ambas as referidas acima. Fornecendo ao cabo elevada resistência tanto à fadiga como ao desgaste.
- *Filler* – Apresenta uma camada de filamentos de diâmetro significativamente inferiores às restantes camadas. Aumentando a área de contacto entre filamentos, fornecendo assim uma elevada flexibilidade.

Existe ainda uma outra constituição, a mais simples, onde os filamentos do cabo apresentam todos o mesmo diâmetro, estes cabos são bastante utilizados nos cabos de comando aplicados na indústria automóvel. Na Figura 9 encontram-se representadas as construções descritas anteriormente, onde o diâmetro dos filamentos encontra-se por norma situado entre 1,25mm e 1,5mm.

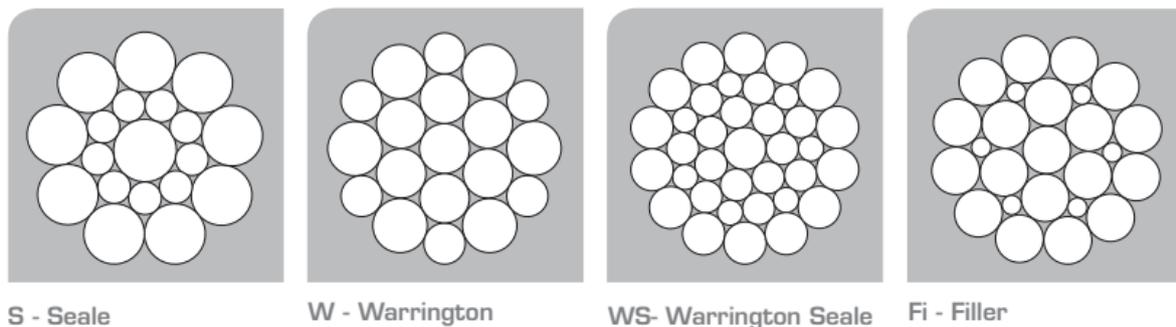


Figura 9 - Construções mais comuns de um cabo metálico [21]

O sentido e torção dos filamentos é também muito importante para o desempenho das cordas e dos cabos. Os cabos podem ser de torção à direita, ou de torção à esquerda, representados com a simbologia S e Z, respetivamente. Ainda assim, os filamentos podem apresentar torção à direita enquanto as cordas possuem torção à esquerda, sendo assim, é possível distinguir estes cabos em dois grupos [20]:

- Tipo Regular – Os filamentos encontram-se torcidos na direção oposta à torção das cordas.
- Tipo Lang – Os filamentos são torcidos na mesma direção que as cordas.



É possível observar estes dois tipos de enrolamento na Figura 10.

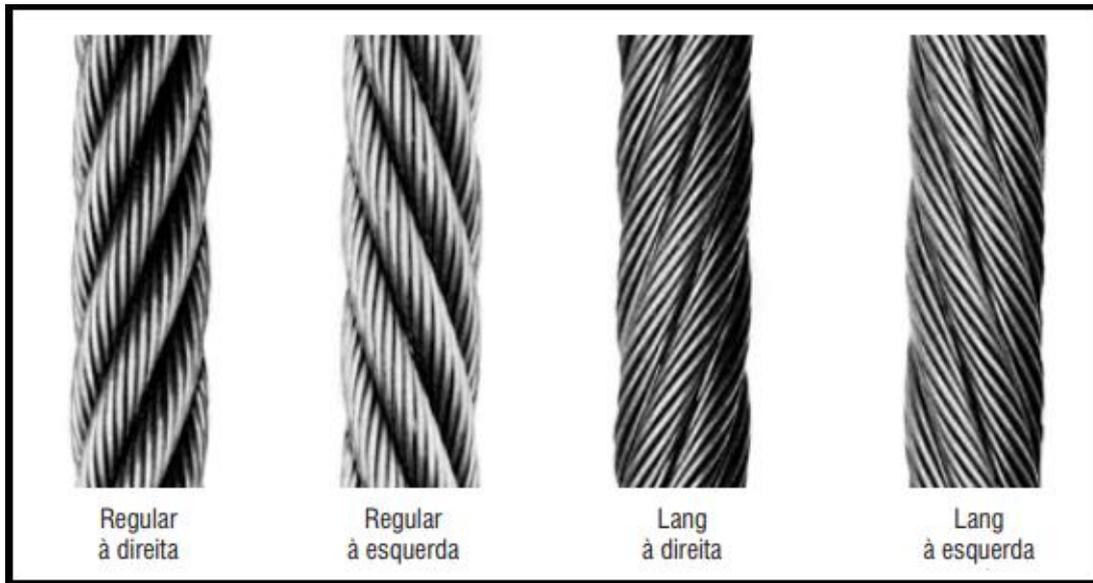


Figura 10 - Tipos de enrolamento de filamentos metálicos [20]

2.1.4. Terminais de Bloqueio em Zamak

Os terminais de bloqueio são pequenos componentes fabricados em diferentes ligas metálicas (Figura 11), que se aplicam nas extremidades dos cabos metálicos e têm a função de suportar as tensões mecânicas aplicadas ao cabo durante o seu funcionamento. Trata-se de um constituinte fundamental dos cabos de controlo, uma vez que devem ser capazes de suportar elevadas cargas (dependendo do projeto em questão, podem ter de suportar esforços de tração superiores a 1200 N). Estes terminais podem ser processados por várias técnicas como: estampagem, forjamento, prensagem ou fundição, sendo possível encontrar terminais com diferentes geometrias (os mais típicos são os terminais em esfera e em barril) [22][23].

Estes componentes são geralmente fabricados em Zamak, que é um material capaz de fornecer uma elevada resistência à tração devido à boa adesão com o cabo metálico e ao seu elevado módulo de elasticidade (E). No entanto, trata-se de um processo pouco estável onde os custos de equipamento e manutenção são relativamente elevados. A técnica utilizada no seu fabrico é a fundição, em que o Zamak, em formato de lingotes, é aquecido num forno a uma temperatura de cerca de 450°C e é depois sobreinjetado diretamente na superfície do cabo metálico [22].



Figura 11 - Diferentes geometrias de terminais de bloqueio metálicos

De modo a aumentar a resistência do conjunto Cabo-Terminal é boa prática realizar uma deformação na extremidade do cabo de forma a dispersar os filamentos metálicos antes da injeção do Zamak [20]. A este processo dá-se o nome de “flor” e tem como objetivo aumentar a área de contacto entre o material injetado e os filamentos metálicos, aumentando substancialmente a resistência do conjunto a esforços de tração. É também possível controlar em certa medida o diâmetro da flor, sendo que a grande maioria dos conjuntos aplicados em cabos de controlo apresenta um diâmetro entre 2.5 e $3,0 \pm 0,2$ mm [22][24]. O processo de realização da flor apresenta uma tolerância associada ao seu diâmetro (0,2mm), uma vez que a forma de alterar o diâmetro da flor é realizada fazendo variar o curso de uma placa metálica que se pode aproximar ou distanciar da extremidade do cabo. Uma vez pressionado o botão de início do processo, a placa metálica movimenta-se sempre a mesma distância, portanto, se se aproximar a posição inicial da placa ao cabo metálico, a placa irá exercer pressão ao longo de um maior comprimento do cabo e os filamentos irão afastar-se mais da sua posição central, originando uma flor de maior dimensão.

Apesar de a flor se encontrar no interior do terminal de bloqueio para aumentar a resistência do conjunto, existem algumas práticas que se devem cumprir quando se realiza este processo de modo a evitar que se reduza a resistência do terminal, nomeadamente o posicionamento da flor no molde de injeção de Zamak que deve ser o mais centrado possível, uma flor muito próxima do bico de injeção ou demasiado afastada do mesmo pode reduzir significativamente a resistência da peça quando tracionada.

Outro aspeto importante a ter em conta é o posicionamento da flor relativamente ao molde. Esta deve possuir a sua extremidade o mais centrada possível relativamente à posição do cabo metálico [24].



2.2. Ligas de Zinco e o seu processamento

2.2.1. Conceitos gerais

O zinco (Zn) é uma substância bastante comum que surge de forma natural, tanto na água, na terra ou no ar. À temperatura ambiente é um material bastante frágil e quebradiço, começando a ganhar alguma ductilidade quando aquecido a temperaturas superiores a 110°C. Encontra-se na posição 30 da tabela periódica e cerca de 50% das suas aplicações são direcionadas para a fabricação de metal galvanizado (devido às suas boas propriedades anticorrosivas), sendo também muito importante como material base na preparação de várias ligas metálicas [25].

Estima-se que cerca de 15% do consumo mundial de zinco seja direcionado para o fabrico de ligas à base de zinco que são posteriormente utilizadas em componentes para automóveis, sistemas elétricos, torneiras e bens domésticos, entre outros [26][27]. Cada vez mais se recorre também à produção secundária de zinco, sendo que entre 20-40% da produção global de se trata de zinco reciclado [28].

Uma vez que o zinco se trata de um material muito frágil, são-lhe adicionadas pequenas quantidades de outros elementos ligantes, como alumínio, magnésio e cobre, dando origem às ligas de Zamak, que serão abordadas no subcapítulo seguinte.

Para a transformação das ligas de zinco é utilizado o processo de fundição sob pressão. Os maiores desafios prendem-se com a massa específica do zinco (cerca de 7,13 g/cm³) e a sua baixa resistência à fluência, causando assim alguma dificuldade na sua aplicação em peças espessas como em motores para automóveis, especialmente a temperaturas entre os 100-150°C, devido ao relaxamento das ligas de zinco sob tensão [29].

A capacidade de produzir componentes com paredes de menor espessura diminui o impacto negativo que a massa específica apresenta na massa final das peças. De forma a ser possível competir com metais de menor massa específica, recorre-se à utilização de paredes ultrafinas com o auxílio de novas técnicas de processamento e adição de novos elementos como o alumínio (Al) em quantidades entre 4-5%, permitindo assim produzir paredes com cerca de 0,75mm de espessura. Com o aumento da procura, foram sendo progressivamente criadas ligas à base de zinco com cada vez maior percentagem de alumínio, respetivamente 8% e 27%, permitindo criar peças com paredes internas com espessuras inferiores a 0,3mm e melhores propriedades mecânicas.

Algumas características das ligas à base de zinco são: boa resistência à corrosão, baixo ponto de fusão, boa capacidade de ser fundido sob pressão e apresenta boa estabilidade dimensional quando



fundido. As ligas de Zamak podem ser encontradas em diversas áreas e produtos como: componentes interiores para automóveis, antenas, dobradiças, porta-chaves, peças decorativas e até em moedas, como se ilustra na Figura 12.

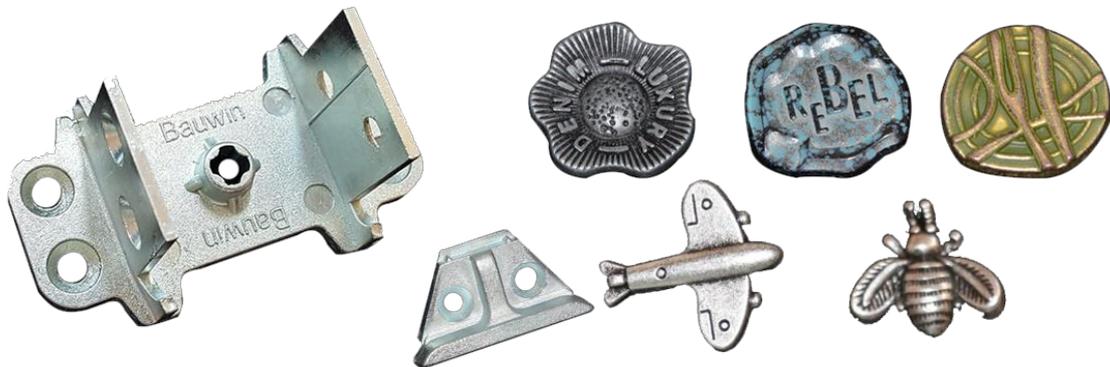


Figura 12 - Alguns produtos fabricados em Zamak [30]

2.2.2. Ligas Zamak

As ligas de Zamak são uma família de ligas metálicas contendo zinco como o seu principal elemento, mas também outros elementos ligantes em menores proporções, como: alumínio (3,7-4,3%), cobre (0,1-3,3%) e magnésio (0,025-0,06%). Como se pode observar na Tabela 2, podem ser encontrados ainda outros elementos na sua constituição, no entanto estão presentes em quantidades muito reduzidas e consideram-se insignificantes, uma vez que alguns dos elementos das ligas Zamak são adicionados com o objetivo de anular o efeito de algumas impurezas. Uma vez que o zinco no seu estado natural é um material com pouca qualidade tanto a nível estético, como de propriedades mecânicas, como baixa rigidez, baixa ductilidade e uma estrutura interna bastante quebradiça, são adicionados na sua constituição os diferentes elementos referidos acima, em quantidades muito inferiores. Estes elementos vêm acrescentar algumas propriedades que o zinco não possui, tornando-o um material mais propício a ser utilizado em condições mais exigentes e criando uma liga com uma microestrutura mais refinada e com uma rigidez bastante superior [31].

Os teores dos referidos elementos de liga afetam diretamente as propriedades mecânicas das peças obtidas. De acordo com o conteúdo de alumínio presente, as ligas de zinco podem ser divididas em 2 grupos:

- As ligas de Zamak, que podem apresentar diversos graus, nomeadamente Zamak 2, 3, 5 e 7 que contêm aproximadamente 4% de alumínio;



- As ligas ZA (Zinco-Alumínio), cuja quantidade de alumínio varia entre 8% e 27%, dependendo da aplicação a que o material se destina. Apresentam uma fluidez muito superior às ligas de Zamak.

A liga de Zamak 5 é frequentemente utilizada quando se trabalha com fundição sob elevadas pressões, tanto de câmara quente como de câmara fria, nomeadamente quando aplicada em terminais de bloqueio em cabos metálicos para soluções de acionamento mecânico em automóveis.

Relativamente aos elementos ligantes adicionados ao zinco, nomeadamente alumínio, magnésio e cobre, é importante compreender que cada um destes elementos é utilizado com um propósito e em quantidades estipuladas. Por exemplo, o alumínio apresenta uma elevada solubilidade com o zinco, sendo adicionado ao processo de fundição para aumentar a fluidez, reduzir o ponto de fusão da liga e incrementar algumas propriedades mecânicas como o alongamento [26]. O cobre é utilizado pois permite aprimorar características mecânicas como resistência à tração, dureza, resistência ao desgaste e à fluência. Por último, o magnésio é o constituinte em menores quantidades nas ligas à base de zinco, não fornecendo as mesmas propriedades que o alumínio e o cobre, mas atuando como um bloqueio à corrosão interna causada pelas impurezas. Todos estes elementos juntos formam as ligas de Zamak, não sendo possível obter uma liga com as mesmas características se algum destes materiais fosse retirado da equação [32].

As ligas de Zamak apresentam então diferentes propriedades tendo em conta o teor de cada elemento na sua constituição e, conseqüentemente, diferentes aplicações. As ligas mais utilizadas no processo de fundição (que será abordado no próximo subcapítulo) são as de Zamak 2, 3 e 5 e 7 e diferem pelas seguintes características:

- Zamak 2 – Oferece uma maior resistência à fluência. Possui a mesma constituição do Zamak 3, com uma pequena adição de 3% de teor de cobre para aumentar a resistência em 20%. Esta liga apresenta a maior resistência mecânica entre todas as ligas de Zamak, o que influencia também o seu custo de aquisição.
- Zamak 3 – Apresenta uma maior ductilidade e resistência ao impacto. Utilizada em soluções de acabamento e de revestimento de superfícies de pequenos componentes. Esta liga funciona como standard para as outras ligas.
- Zamak 5 – A sua maior aplicação é no fabrico de componentes para a indústria automóvel devido à sua resistência à fluência, elevada dureza e resistência a esforços



de tração. Possui um incremento de 1% de cobre que faz aumentar em 10% a resistência geral da liga.

- Zamak 7 – Modificação da liga de Zamak 3. Contém um teor de magnésio inferior o que lhe permite aumentar a fluidez e a ductilidade na fundição de peças de espessuras reduzidas.

Tabela 2 - Elementos presentes nas ligas de Zamak [31]

Liga	Al%	Cu%	Mg%	Fe%	Pb%	Cd%	Sn%	Si%	Zn%
Zamak 2	3,7-4,3	2,6-3,3	0,02-0,06	<0,005	<0,005	<0,004	<0,002	-	restante
Zamak 3	3,7-4,3	<0,1	0,02-0,06	<0,005	<0,005	<0,004	<0,002	<0,035	restante
Zamak 5	3,7-4,3	0,7-1,2	0,02-0,06	<0,005	<0,005	<0,004	<0,002	<0,035	restante
Zamak 7	3,7-4,3	<0,1	0,005-0,02	<0,005	<0,003	<0,002	<0,001	<0,035	restante

2.3. Tecnologia da Fundição

2.3.1. Conceitos Gerais

Embora existam atualmente diversas formas de definir a Tecnologia da Fundição, uma das mais exatas é aquela que a identifica como uma técnica de obtenção de objetos metálicos por vazamento de um metal, ou liga metálica, no estado líquido, para o interior de uma cavidade moldante que seja dimensional e geometricamente estável, para permitir a solidificação do metal líquido no seu interior, mantendo a forma e dimensões pretendidas para o produto final. A fundição está atualmente na base de quase toda a atividade industrial. Peças geometricamente complexas e de qualquer dimensão podem ser produzidas por fundição, em qualquer tipo de liga e qualquer que seja a sua futura aplicação. Setores industriais tão diferentes como a indústria automóvel, aeronáutica e aeroespacial, construção naval, ferroviária, etc., incorporam grandes quantidades de peças fabricadas através desta tecnologia, o que revela bem o desempenho e o vasto domínio de aplicação de metais fundidos, e a importância da fundição no mundo atual [34].



Existem diversas técnicas de fundição, sendo que a seleção do processo a utilizar deve ter em conta as dimensões da peça requerida, o seu acabamento superficial, detalhes geométricos internos e externos, o número total de peças a produzir e os custos inerentes a todo o ciclo de produção. Como está representado na Figura 13, algumas das técnicas de fundição de ligas metálicas mais utilizadas são [35][36]:

- Moldação não permanente em areia.
- Moldação cerâmica.
- Moldação metálica, que pode ser ramificada em três variantes:
 - Fundição injetada;
 - Moldação por gravidade;
 - *Squeeze casting*.



Figura 13 - Variedade de processos de fundição

Uma vez que o caso concreto deste trabalho está relacionado com a fundição injetada de ligas de Zamak, será este o processo a ser abordado e descrito no subcapítulo seguinte.

2.3.2. Fundição Injetada

A fundição injetada é um processo que se adapta às necessidades de indústrias como a automóvel. É bastante utilizada pois permite obter peças exigentes do ponto de vista dimensional e com qualidade superficial. Para além disso, permite obter taxas de produção muito superiores quando comparado com



outros métodos de produção, sendo que grande parte dos componentes principais de um automóvel fabricados em ligas metálicas podem ser produzidos através desta tecnologia [29].

Esta tecnologia é caracterizada por uma fonte de energia hidráulica que origina pressões de injeção entre os 7 e os 350 MPa, dependendo do equipamento utilizado, que faz deslocar a grande velocidade e pressão, um metal no estado líquido, promovendo um rápido enchimento de um molde metálico [37]. Este molde, absorve as tensões exercidas pela injeção, dissipa o calor contido no metal, e facilita a remoção da peça moldada, iniciando depois um novo ciclo [38].

Com diferenças no ciclo de trabalho associado, esta técnica de fundição pode ser dividida em dois processos principais: fundição com câmara quente e fundição com câmara fria.

A fundição em câmara quente utiliza o mesmo processo descrito anteriormente - o metal fundido é forçado através da cavidade de um molde pré-moldado recorrendo ao uso de pressão. A característica principal da fundição em câmara quente é que o metal é aquecido dentro da máquina de fundição ao invés de uma máquina ou forno separado.

As máquinas de fundição em câmara quente apresentam um forno embutido no qual o metal é aquecido para atingir um estado fundido. É utilizado um pistão hidráulico que força o metal fundido para dentro da cavidade do molde. A fundição em câmara quente é um processo relativamente rápido, com um ciclo típico de apenas 15 a 20 segundos. Embora não seja adequado para metais com alto ponto de fusão, é ideal para ligas de zinco, ligas de estanho e ligas de chumbo, onde os pontos de fusão se situam na ordem dos 450°C [39].

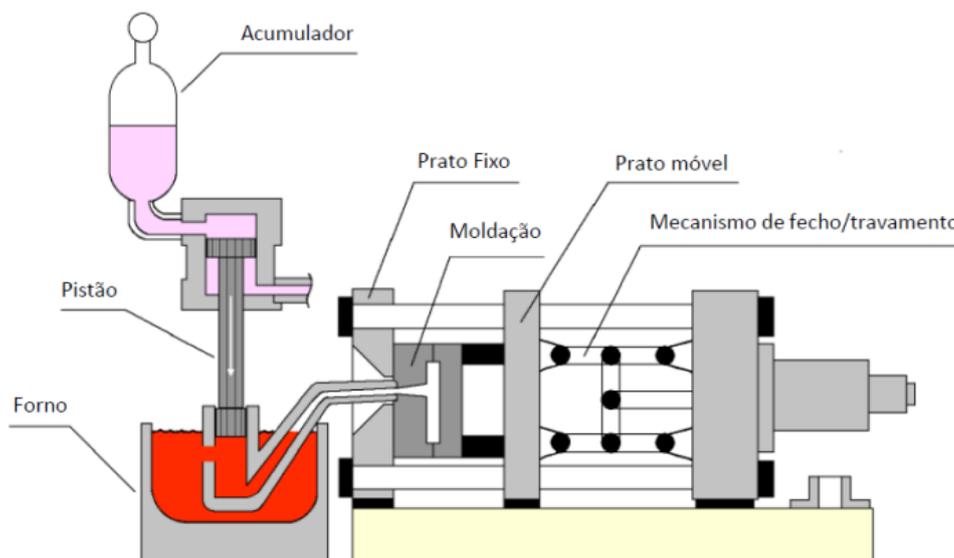


Figura 14 - Esquemática de processo de fundição em câmara quente



A fundição em câmara fria, ao contrário do que o nome indica, requer também o uso de metal aquecido que é forçado para dentro de um molde. A diferença entre os dois processos é que a fundição sob pressão em câmara quente aquece o metal dentro da própria máquina de fundição, enquanto a fundição sob pressão em câmara fria envolve o aquecimento do metal num forno separado e, em seguida, a transferência do metal para a máquina de fundição.

Na fundição em câmara fria, o metal é aquecido primeiro para atingir um estado fundido. O metal fundido é então transportado para a máquina de fundição, onde é alimentado na câmara da máquina. A máquina utiliza um pistão pressurizado para forçar o metal fundido a preencher o molde.

Outras ligas, como as de alumínio, que possuem pontos de fusão por volta dos 600°C só podem ser processados usando fundição em câmara fria. As altas temperaturas necessárias para atingir um estado fundido para metais como alumínio, magnésio e cobre significam que um forno separado deve ser usado, e é por isso que alguns fabricantes escolhem a fundição em câmara fria em vez de fundição em câmara quente [40].

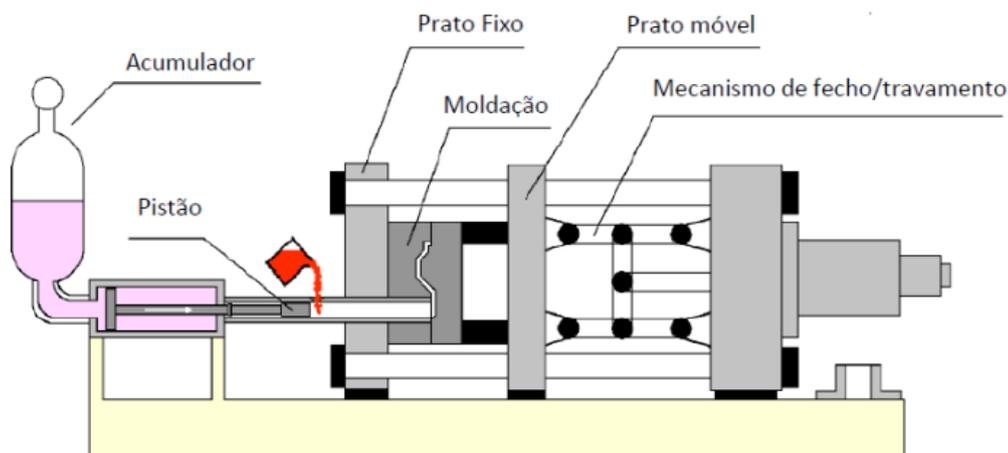


Figura 15 - Esquemática de processo de fundição em câmara fria

2.3.3. Defeitos do processo

Um defeito ou não conformidade em fundição pode ser considerado como qualquer descontinuidade em relação à qualidade requisitada para a peça que se pretende obter [41].

A ocorrência de defeitos durante o fabrico de produtos através da técnica de fundição é o grande responsável pela perda de produtividade por parte de uma empresa. Torna-se assim fundamental reduzir ao máximo a sua ocorrência ou, uma vez que não seja possível evitar o seu aparecimento, deve-se atuar em conformidade o mais rápido possível com o objetivo de eliminar os defeitos e voltar a linear toda a produção. Caso não se atue em conformidade sobre os defeitos ocorridos, isto levará a desperdícios de



tempo e recursos por parte da empresa, causando atrasos nas entregas e consequente insatisfação por parte do cliente. A maioria das não conformidades podem ser evitadas se forem seguidas algumas das regras de boas práticas mais comuns quando se utiliza a técnica da fundição, tais como: projeto e manutenção da fiação, qualidade da matéria-prima, controlo do processo, manutenção das máquinas e o manuseio dos materiais [42]. O livro *International Atlas of Casting Defects* define todos os defeitos que possam ocorrer numa indústria de fundição injetada, entre eles [43][44]:

- Contaminação da matéria-prima;
- Porosidades;
- Rebarbas;
- Moldação incompleta;
- Juntas frias;
- Fissuras.



3. Seleção de materiais e viabilidade económica

O presente trabalho teve como objetivo a substituição de terminais sobreinjetados em Zamak diretamente numa das extremidades de cabos metálicos, por um material de matriz polimérica, garantindo que a peça respeita os mesmos requisitos de produção definidos pelo cliente. Este trabalho visa diminuir os gastos energéticos e económicos associados à matéria-prima e a equipamentos necessários à produção de peças, uma vez que para a injeção de Zamak são necessários equipamentos com capacidade de aquecimento a elevadas temperaturas, o que faz disparar o custo associado a todo o processo produtivo.

3.1. Apresentação de produto e suas características

Na Figura 16 apresenta-se um terminal e as suas várias etapas produtivas. Estes terminais são desde há vários anos produzidos em Zamak, uma vez que se trata de um material que adere facilmente ao cabo metálico e é capaz de suportar tensões à tração na ordem dos 2000N. Devido a tratar-se de um material com um custo de produção e de manutenção de equipamentos elevado, a empresa pretende encontrar materiais alternativos que possam garantir a resistência dos cabos.

Apesar de os terminais em Zamak conseguirem suportar cargas muito elevadas, o requisito da generalidade destas referências de projeto não excede os 800/900 N e nesta gama de valores pensa-se ser possível produzir os mesmos terminais com materiais poliméricos.

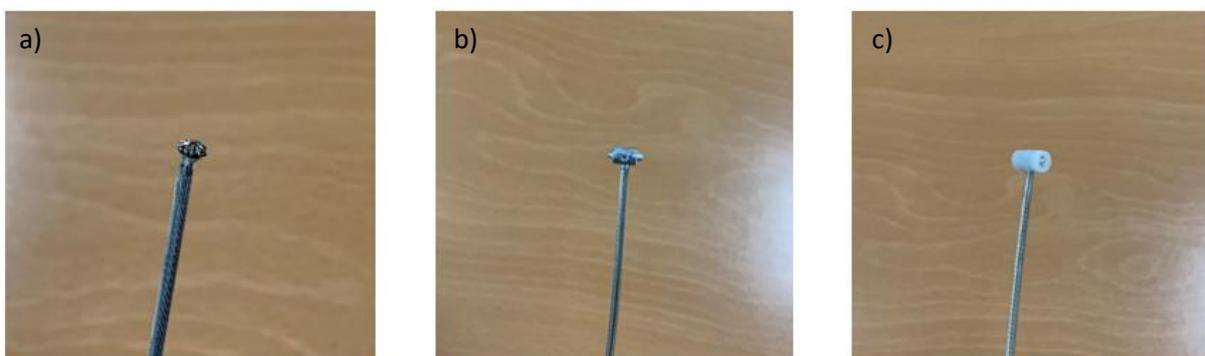


Figura 16 – a) Produção da flor; b) Injeção de Zamak; c) Sobreinjeção de material plástico

As etapas de produção do terminal, descritas na Figura 16, consistem em numa primeira fase realizar uma dispersão dos filamentos metálicos para fabricar a flor e aumentar a área de contacto antes da injeção do material Zamak. Na fase seguinte, injeta-se o Zamak e, num último momento, dá-se a



sobreinjeção de uma capa de POM na superfície do Zamak. O objetivo principal deste trabalho consiste na substituição do material Zamak por um material termoplástico e pela eliminação do passo 2 do processo (Figura 16, imagem ao centro).

3.2. Análise de custos ao processo atual

Realizou-se uma análise económica ao custo da matéria-prima, de modo a compreender qual o custo por quilograma que poderia ser atingido, garantindo um ganho económico na substituição de material e eliminação do processo de injeção de Zamak. Como termo de comparação utilizou-se o custo (em euros) por cada lote de 100 peças produzidas, no modelo atual (com ambos os materiais) e numa condição onde se contempla um aumento de massa de plástico para compensar a eliminação do Zamak. Nestes cálculos, foram tidos em conta o custo associado ao funcionamento das respetivas máquinas, bem como o custo de aquisição das matérias-primas.

Para o efeito, recolheram-se alguns dados junto do Departamento de Compras que se encontram listados de seguida:

- Preço do Zamak: 4€/kg.
- Preço do POM: 2,77€/kg.
- Tempo de ciclo do processo de injeção de Zamak (1 peça): 4s.
- Tempo de ciclo do processo de injeção de POM (molde de 4 cavidades): 12,1s.
- Custo hora-máquina Babyplast (para injeção de POM): 24,23€/h.
- Custo hora-máquina Zamak: 14,35€/h.
- Massa do jito de Zamak: 0,87g.
- Massa do jito de POM: 1,48g.

De seguida, iniciaram-se os cálculos do custo de produção de 100 terminais de Zamak e de 100 capas de POM, respetivamente, sendo que a soma destes dois representa o custo total de produção de 100 peças.



Custo do processo de injeção de Zamak (máquina e matéria-prima)

Custo da máquina

Uma vez que é sabido o custo hora-máquina, de 14,35€/h, converteu-se o tempo de ciclo de 1 peça (4s) para horas (0,00111h) e calculou-se o tempo correspondente para 100 peças, obtendo-se o valor de 0,111h. Seguidamente, sabendo que por cada hora de funcionamento, a máquina custa à empresa 14,35€, sabe-se que para funcionar 0,111h (100 peças) custaria 1,59€. Estes cálculos foram realizados através de regras de três simples, como descrito abaixo:

Tabela 3 - Custo da máquina de Zamak para produção de 100 peças

Tempo necessário para produzir 100 peças: 0,111h

Custo hora-máquina de Zamak: 14,35€/h

Custo da máquina para produzir 100 peças: 1,59€

Custo da matéria-prima

Para o cálculo do gasto associado à matéria-prima, pesaram-se os respetivos jitos (0,87g) e através do desenho 2D do projeto obteve-se a massa do terminal em Zamak (0,28g). Ou seja, a cada injeção está associado um gasto de 1,15g de material. Sabendo que cada quilograma de material virgem de Zamak custa 4€, o custo de 100 peças (115g) representa um gasto à empresa de 0,46€ em material. Ver cálculos:

Tabela 4 - Custo de material Zamak para produção de 100 peças

Massa de material em cada injeção: 1,15g

Massa de material para 100 peças: 115g

Custo da matéria-prima: 4€/kg

Custo do material por 100 peças: 0,46€

Custo por 100 peças de Zamak = 1,59€ + 0,46€ = 2,05€



Custo do processo de injeção de POM (máquina e matéria-prima)

Custo da máquina

Para este cálculo, recorreu-se ao mesmo método utilizado anteriormente para definir o custo do processo de Zamak. Neste processo, existe a diferença que o tempo de ciclo é responsável pela injeção de quatro peças ao invés de uma, portanto foi necessário definir o tempo de ciclo para uma peça apenas. Convertendo então os 12,1s de tempo de ciclo para horas e multiplicando por 25 para se obter o valor equivalente à produção das 100 peças obteve-se 0,084h.

Sabendo o custo hora-máquina da injetora Babyplast (24,23€/h), obteve-se o custo associado à utilização da máquina durante 0,084h (tempo necessário para produzir 100 peças), 2,04€.

Tabela 5 - Custo da máquina Babyplast para produção de 100 peças

Tempo necessário para produzir 100 peças: 0,084h

Custo hora-máquina Babyplast: 24,23€/h

Custo da máquina para produzir 100 peças: 2,04€

Custo da matéria-prima

O custo associado aos gastos de material POM encontra-se na ordem dos 0,14€, devido à sua menor massa específica que faz com que o gasto seja menor, comparativamente ao terminal em Zamak, e também devido ao reduzido custo de aquisição do material. A massa total de cada injeção é 1,96g, sendo que 1,48g são referentes ao jito, e as restantes 0,48g referem-se às 0,12g de massa de POM injetada em cada uma das quatro cavidades. A massa de POM necessária para produzir 100 peças é então 49g e representam um gasto de 0,14€, tendo em conta o custo por quilograma do material de 2,77€/kg.



Tabela 6 - Custo de material POM para produção de 100 peças

Massa de material em cada injeção: 1,96g

Massa de material em 25 injeções (100 peças): 49g

Custo da matéria-prima: 2,77€/kg

Custo de material por 100 peças: 0,14€

Custo por 100 peças de POM = 2,04€ + 0,14€ = 2,18€

Sendo assim, o custo total associado à produção de 100 peças são 4,23€ (2,05€ do processo de Zamak e 2,18€ do processo de injeção de POM).

3.3. Análise de custos associada à produção de peças em plástico

Assumindo que se eliminariam os encargos associados à injeção do terminal em Zamak, há uma margem de cerca de 50% para a aquisição da nova matéria-prima. O custo hora-máquina será o mesmo (24,23€/h), pois a máquina a utilizar é a Babyplast e não há custos associados à aquisição de novas ferramentas (o molde já foi adquirido anteriormente). Foi realizado um cálculo para calcular o custo máximo da matéria-prima e perceber até que valores esta poderá ser adquirida, garantindo sempre que o novo custo do processo em 100 peças não ultrapasse o custo atual que são 4,23€.

Tal como representado no Anexo 1, foi desenvolvida uma folha de cálculo que contempla informações como a massa volúmica do novo material e o volume total da peça. Uma vez que a peça será toda preenchida em plástico, a massa específica do novo material definirá a massa de material que será gasta em cada injeção e o seu custo por 100 peças. Analisando a massa volúmica do POM, aplicou-se o valor de 1,41 g/cm³, considerando o volume total da cavidade 0,13 cm³ (volume da peça anterior em POM mais o volume que seria preenchido com Zamak).

Equação 1 - Cálculo da massa específica

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}};$$

Fazendo um cálculo simples, obteve-se a massa de material necessária para cada peça como sendo 0,18g. O molde possui quatro cavidades, portanto este valor aumenta para 0,72g, o que somado



à massa do jito (1,48g) perfaz uma massa de material por cada *shot* e por 100 peças de 2,20g e 55g, respetivamente. Uma vez que os restantes parâmetros se mantêm, nomeadamente o custo hora-máquina e o tempo de ciclo, o custo associado à utilização da máquina na produção de 100 peças será o mesmo, 2,04€. Resta saber qual o gasto monetário em material, uma vez que a massa de material necessária na injeção de 100 peças aumentou 6g, para 55g. O preço a que o POM é adquirido junto do fornecedor é 2,77€/kg, portanto representa um custo de 0,15€, acrescentando 0,01€ na produção de 100 peças. O custo final situa-se então nos 2,19€ (os mesmos 2,04€ de trabalho da máquina mais os 0,15€ em material), um custo cerca de 50% abaixo do custo anterior do processo.

Este ficheiro serviu apenas como base, pois o material utilizado nos ensaios será uma poliamida 6.6 reforçada com 50% de fibra de vidro, com uma massa específica de 1,57 g/cm³ (irá ser gasta uma maior quantidade de material para o mesmo volume de injeção), possuindo um custo de aquisição significativamente maior do que o POM. O objetivo será consultar este ficheiro na fase de escolha do material, alterando os parâmetros mencionados (massa específica, custo de aquisição e tempo de ciclo) e perceber se o custo final do processo será inferior aos atuais 4,23€. Por exemplo, uma matéria-prima com um custo de aquisição de 20€/kg e uma massa específica de 1,6 g/cm³ aumenta o custo da produção de 100 peças para 3,20€, cerca de 1€ acima do valor considerado para o POM, no entanto continuaria a tratar-se de um ganho económico bastante relevante quando consideradas elevadas produções, uma vez que a linha produz cerca de 20.000 peças por dia.

3.4. Seleção de materiais

Para a seleção da matéria-prima recorreu-se ao *software* de bases de dados poliméricas Omnexus, que pesquisa matérias-primas dentro de milhares de *datasheets*, tendo em conta as diferentes especificações inseridas pelo utilizador. Os requisitos foram os seguintes: ser termoplástico e processável através de moldação por injeção, ser recomendado para aplicações na indústria automóvel, apresentar elevada resistência à tração e tensão de cedência. Uma vez que as propriedades mecânicas do Zamak que se pretende substituir excedem em larga escala a única especificação do cliente para este projeto (que o terminal seja capaz de suportar esforços de tração de 800N), procura-se então um material polimérico que consiga responder a este requisito, não sendo expectável que apresente melhores propriedades mecânicas que o Zamak, mas sim que cumpra o requisito de produção. As características mecânicas e físicas do Zamak encontram-se representadas nas Tabelas 7 e 8.



Tabela 7 - Propriedades físicas das ligas de Zamak

Propriedades físicas	Zamak 2	Zamak 3	Zamak 5	Zamak 7
Temperatura de fusão (°C)	385	384	383	384
Massa específica (g/cm³)	6,6	6,6	6,6	6,6
Coefficiente de expansão térmica (µm/m.°C)	27,7	27,4	27,4	27,4
Condutividade térmica	105	113	109	113
Condutividade elétrica (%)	25	27	26	27

Tabela 8 - Propriedades mecânicas das ligas de Zamak

Propriedades mecânicas	Zamak 2	Zamak 3	Zamak 5	Zamak 7
Resistência à tração (MPa)	359	283	331	283
Tensão de cedência (MPa)	283	221	269	221
Módulo de elasticidade (GPa)	85	96	96	85
Alongamento máximo (%)	7	10	6,5	13
Resistência à compressão (MPa)	641	414	600	414
Resistência ao cisalhamento (MPa)	317	214	265	214

O passo seguinte foi realizar uma tabela de ponderação com diferentes requisitos e especificações relevantes para o projeto em questão e perceber quais teriam uma maior preponderância na escolha da matéria-prima. A lista de requisitos/especificações foi a seguinte:

1. Processável por moldação por injeção;
2. Baixo custo;
3. Resistência à tração elevada (>331 MPa);
4. Módulo de Elasticidade elevado (>96 GPa);
5. Amplitude térmica entre -40°C e 80°C, em serviço.



De seguida comparam-se todas as especificações definidas entre si com base em 3 graus de comparação, sendo sempre Linha vs. Coluna: 1 – mais importante, 0,5 – igualmente importante, 0 – menos importante. Importante referir que os valores definidos para a resistência à tração e módulo de elasticidade são os valores associados ao material Zamak, não é expectável encontrar um material polimérico que apresente estes valores, mas sim que se aproximem o máximo possível, pois o requisito máximo do projeto é que as peças sejam capazes de suportar 800 N quando tracionadas.

Os resultados obtidos para as ponderações de cada fator estão representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Tabela de ponderação de requisitos e especificações

	1	2	3	4	5	Total	Proporção
1		0,5	0	0	0	0,5	0,05
2	0,5		0	0	0	0,5	0,05
3	1	1		0,5	0,5	3	0,3
4	1	1	0,5		0,5	3	0,3
5	1	1	0,5	0,5		3	0,3

É então possível concluir que os três requisitos com maior ponderação são: resistência à tração, módulo de elasticidade e amplitude térmica, com uma ponderação de 30%. Com uma menor ponderação (5%) ficaram então os requisitos de associados a um baixo custo de aquisição e de que o material seja processável por moldação por injeção.

Após esta pesquisa foi possível recolher dados de três materiais reforçados com quantidades entre 40-50% de fibra de vidro, sendo eles: PEEK [poli(éter-éter-cetona)], PP (polipropileno) e PA 6.6 (poliamida 6.6).

O próximo passo foi comparar os diferentes materiais selecionados com base nestas ponderações e definir qual será a matéria-prima selecionada. A seleção de materiais pode ser identificada na Tabela 10, onde os materiais foram avaliados de 1 a 5, conforme a capacidade destes materiais responderem aos requisitos definidos, onde 1 é a pior classificação e 5 a melhor.



Tabela 10 - Seleção de materiais

	1(5%)	2(5%)	3(30%)	4(30%)	5(30%)	Total (100%)
PA 6.6	5	4	3,5	3,5	5	4,05
PP	5	5	3	3	5	3,8
PEEK	1	1	4	4	5	4

Realizada a seleção de materiais, a informação obtida foi que os materiais PA 6.6 e PEEK apresentavam pontuações muito semelhantes, a opção recaiu sobre a PA 6.6 devido ao custo elevado do PEEK que anulava grande parte do ganho económico que este projeto traria com a eliminação do Zamak e também devido às dificuldades associadas à moldação por injeção de PEEK, o que pode trazer custos indesejáveis em manutenção das ferramentas produtivas, como máquinas e moldes.

O material selecionado foi uma poliamida 6.6 reforçada com 50% de fibra de vidro da fabricante alemã Lanxess, *grade* Durethan AKV50H 2.0. Este material foi selecionado devido ao seu elevado módulo de Young (16 GPa) e à sua tensão de cedência (230 MPa), onde se pretende que os terminais injetados com esta matéria-prima sejam capazes de suportar tensões superiores. No Anexo 2 podem ser encontradas as restantes características deste material. Na Tabela 11 é possível observar algumas das propriedades mecânicas e térmicas deste material.

Tabela 11 - Algumas propriedades do material DURETHAN AKV50H

Resistência à tração (MPa)	230
Módulo de elasticidade (GPa)	16
Módulo de flexão (GPa)	14,7
Temperatura de fusão, T_m (°C)	261
Absorção de água, a 23°C (%)	4,5



4. Materiais e Métodos Experimentais

4.1. Materiais

Durante a realização deste trabalho, foram utilizadas 2 poliamidas aromáticas. Numa primeira fase de testes foi utilizado o material Durethan AKV50H 2.0 (ver ficha técnica em Anexo 2 e propriedades referidas no capítulo anterior) e, numa fase mais adiantada do projeto e devido à dificuldade desta poliamida em apresentar resultados capazes de suportar uma possível substituição do Zamak, optou-se por um segundo material, com o nome ROTEC HPPA. A ficha técnica deste material encontra-se no Anexo 3.

As matérias-primas em questão são poliamidas 6.6 reforçadas com 50% de fibra de vidro. São classificadas como materiais de elevada performance. O ROTEC HPPA oferece algumas vantagens, como: maior resistência e menor taxa de absorção de água. Estas características permitem definir este material como adequado a aplicações em diferentes áreas como a automóvel, aeronáutica ou em acessórios de equipamentos de desporto.

4.2. Processamento por moldação por injeção

A produção de peças em material termoplástico foi realizada através de moldação por injeção. Para o efeito, foi utilizada uma máquina injetora da marca Arburg (Figura 17), modelo *ALLROUNDER 270 M 350-90*. Esta máquina possui uma força de fecho de 35 toneladas e uma distância entre colunas de 270 X 270mm. Na Tabela 12 são apresentadas outras características importantes desta máquina:

Tabela 12 - Características do equipamento de injeção

Força de abertura (ton)	9
Diâmetro do parafuso (mm)	25
Pressão máxima de injeção (bar)	1860
Curso máximo do parafuso (mm)	100
Volume de injeção (cm³)	49



Figura 17 - Máquina de injeção ARBURG ALLROUNDER 270M 350-90

4.3. Cabo metálico e produção de flor

Nas linhas de produção da FICOSA são utilizadas diferentes referências de cabos metálicos. Recorreu-se então a 2 referências (68C e 68CK) para serem produzidas flores na sua extremidade.

Ambos os cabos são constituídos por 19 filamentos singulares, distribuídos helicoidalmente, possuindo um diâmetro total de 1,25mm. A referência de cabo 68CK possui ainda um revestimento externo em PE (polietileno) com o intuito de reduzir as vibrações e ruídos no interior do veículo, isto faz com que o seu diâmetro final seja de 1,8mm. Este cabo será denominado por “cabo revestido”.

A referência 68C (cabo inox) é fabricada em aço inoxidável e não passa pelo processo de co-extrusão para revestimento uma vez que é entregue pelo fornecedor com um banho a óleo, o que diminui a adesão entre os 2 materiais.

Relativamente à produção da flor na extremidade do cabo, este processo apresenta uma tolerância associada à dificuldade em garantir flores iguais num lote de cabos. O processo de medição da flor é realizado pelo operador da máquina, com o auxílio de um paquímetro, fazendo a medição em três posições diferentes, se uma dessas três medições estiver dentro da tolerância de 0,2mm sobre o valor pretendido a flor é aprovada. Na Figura 18 estão representados alguns dos controlos de qualidade efetuados pela empresa relativamente à geometria da flor e ao seu posicionamento dentro do molde, de modo a garantir uma correta moldação.



Figura 18 - Manual de Qualidade da Ficoso: a) Flor OK; b) Posicionamento da flor no molde

A dificuldade em obter flores iguais prende-se com o facto de as flores serem fabricadas através da aplicação de pressão na extremidade do cabo, uma vez que este é constituído por 19 filamentos metálicos singulares, torna-se muito difícil de garantir que estes se comportem sempre da mesma forma aquando da realização da pressão na extremidade do cabo. Na Figura 19 verifica-se este efeito na diferença visual entre duas flores produzidas no mesmo lote de 100 cabos, com flores de 5mm de diâmetro. Além do defeito verificado com 1 filamento solto, observa-se que as duas flores apresentam uma “geometria” distinta, aglomerando os filamentos de forma diferente entre ambas.



Figura 19 - Defeito na produção de flores



4.4. Produção dos terminais em material plástico

As condições operatórias utilizadas para a produção dos terminais revestidos em PA66, pelo processo de injeção, devem ser adaptadas ao material em questão, devendo ser sempre analisada a ficha técnica dos materiais e seguir a recomendação do fabricante.

Assim, na Tabela 13 são referidas as condições de processamento para a PA66 Durethan AKV50H e na Tabela 14 as condições para a PA66 ROTEC HPPA.

Tabela 13 - Parâmetros de injeção (Durethan AKV50H)

Temperatura do cilindro (°C)	270		280		285		310		320
Temperatura do molde (°C)	Ambiente 60								
Caudal de injeção (cm³/s)	60								
Pressão de injeção (MPa)	130								
2ª Pressão (MPa)	90								
Tempo de 2ª Pressão (s)	1,5								

Tabela 14 - Parâmetros de injeção (ROTEC HPPA)

Temperatura do cilindro (°C)	270		280		290		310		300
Temperatura do molde (°C)	80								
Caudal de injeção (cm³/s)	60								
Pressão de injeção (MPa)	100								
2ª Pressão (MPa)	90								
Tempo de 2ª Pressão (s)	1,5								

Os moldes encontravam-se à temperatura ambiente, uma vez que é a condição utilizada nos projetos da empresa, com o objetivo de obter um ganho económico com a redução dos tempos de ciclo. Num dos ensaios testou-se a injeção com molde aquecido, a 60°C, como será descrito adiante. O ensaio



com o material ROTEC HPPA foi feito com uma temperatura de molde de 80°C como condição imposta pelo fabricante da matéria-prima.

4.5. Moldes utilizados

4.5.1. Molde A

O molde utilizado nos ensaios possui um sistema de canais frios e oito cavidades, tratando-se de um molde protótipo.

Este molde realiza sobreinjeção de uma “capa” de plástico sobre um terminal previamente injetado em Zamak. Retirando o Zamak da equação, foi necessário aumentar a dosagem da máquina de forma que fosse possível preencher toda a cavidade com material.



Figura 20 - a) Canais de alimentação; b) Molde utilizado nos ensaios

Pretendeu-se, então, estudar as seguintes variáveis neste ensaio: posicionamento da flor no molde, diâmetro da flor e criação de uma gola de plástico no cabo metálico para aumentar a adesão do conjunto, com o aumento da área de contacto entre materiais.

a) Posicionamento da Flor no Molde

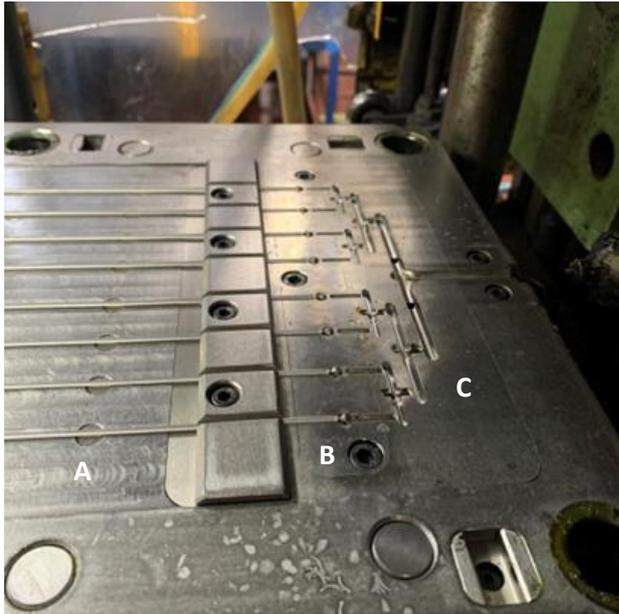
Testaram-se dois parâmetros: uma condição em que a flor se encontra totalmente centrada no molde (Figura 21) e outra em que foi posicionada ligeiramente mais próxima da zona do ataque de injeção. Com esta variação procurou-se perceber se com o afastamento de alguns milímetros da flor em



direção ao centro da cavidade seria obtida uma maior resistência à tração, uma vez que o volume de material existente na zona inferior da peça onde ocorre a rotura do conjunto cabo-terminal seria maior.

Foram realizados quatro *shots* em cada uma das condições, finalizando um total de 32 peças injetadas em cada experiência.

Neste ensaio utilizaram-se cabos com o diâmetro de flor de 2,5mm, por ser o tamanho padrão das flores utilizadas na FICOSA.



- A) Cabo metálico
- B) Posicionamento da flor na cavidade
- C) Canais de alimentação

Figura 21 - Posicionamento das flores

b) Diâmetro da Flor

Por norma, no fabrico de terminais de Zamak, a flor no seu interior apresenta um diâmetro de 2,5mm, com uma tolerância de 0,2mm. Como neste caso de estudo, a área que envolve a flor passará a apresentar dimensões superiores, devido à “absorção” do Zamak, será possível testar diferentes dimensões relativas ao diâmetro da flor, pois esta é responsável pela elevada resistência associada aos terminais de bloqueio de cabo metálico.

Uma vez terminada a experiência anterior, foi lançada uma ordem de produção de cerca de 300 cabos, onde se requisitou que fossem produzidas flores numa das extremidades com três diâmetros distintos: 2,5mm, 3mm e 3,5mm, fazendo questão de aproveitar o máximo de volume possível do terminal. Foi acrescentada uma condição sem flor, onde se realizou a sobreinjeção diretamente na



extremidade do cabo e, sabendo que não iria ter resultados de todo desejáveis, permitem uma melhor compreensão acerca da importância da flor nesta tipologia de peças.

Estes ensaios foram efetuados posicionando a flor centrada na cavidade do molde, com base no ensaio anterior como será explicado na secção de análise de resultados.

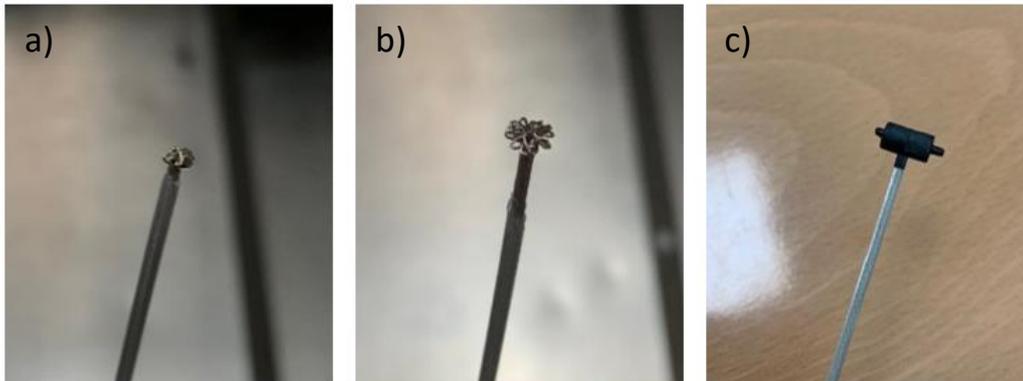


Figura 22 - a) Flor 2,5mm; b) Flor 3,5mm; c) Terminal injetado

Gola de Plástico em Torno do Cabo Metálico

O molde não se encontrava projetado para a criação de uma gola em cabos da referência 68CK (cabo revestido) com um diâmetro de 1,8mm devido ao revestimento externo. Para criação de uma gola fez-se uma decapagem aos cabos com auxílio de uma lâmina, reduzindo o diâmetro total do cabo para o diâmetro real do cabo metálico, 1,25mm, permitindo que algum material “escapasse” propositalmente da zona moldante e se formasse a pretendida gola, como se ilustra na Figura 23-b). Espera-se que a gola aumente a área de contacto entre o material e o cabo após a sobreinjeção, melhorando a resistência mecânica dos terminais quando forem sujeitos aos esforços de tração.

Nesta experiência, testaram-se diferentes diâmetros de flor, nomeadamente 2,5mm, 3mm e 3,5mm, e ainda uma flor com diâmetro de 4,4mm.

Na Figura 23 (a, b e c) pode-se observar o aspeto visual do cabo após realização da decapagem e consequentemente a formação da gola que, por vezes, fica incompleta, como ilustrado na Figura 23-c).

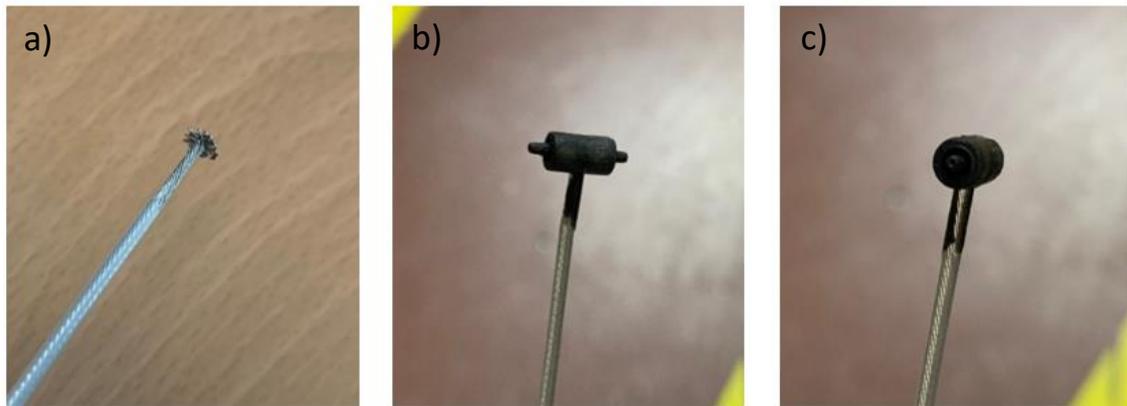


Figura 23 - a) Decapagem do revestimento do cabo; b) Preenchimento da zona decapada com plástico; c) Enchimento incompleto da gola

A segunda fase de ensaios de injeção, com um molde com centrador de cabo, surgiu devido ao aparecimento do defeito observado na Figura 23-c), onde se verifica que não ocorreu uma moldação total em volta do cabo. Isto ocorreu devido ao facto de o cabo não se encontrar centrado na cavidade moldante. O molde utilizado não possuía centradores, logo, o cabo encontrava-se encostado numa das suas superfícies e acontecia que essa zona não era preenchida com material, originando uma gola incompleta, que poderia reduzir a resistência mecânica das peças.

4.5.2. Molde B

Nesta fase, recorreu-se a um segundo molde, cuja peça produzida apresenta uma geometria ligeiramente diferente da anterior, como observado na Figura 24. Este molde apresenta a vantagem de possuir centradores de cabo metálico, através de um postigo que guia o cabo desde a sua entrada no molde até a zona de moldação e também de centradores magnéticos que não permitem que o cabo se desloque para fora da zona desejada.

Este ensaio foi realizado recorrendo a um novo cabo, constituído em material inox, denominado por “cabo inox”, que possui uma flexibilidade maior comparativamente ao cabo revestido e que pode permitir produzir flores com maior reprodutibilidade geométrica.

Observando a Figura 24 verifica-se uma ligeira diferença na geometria do novo terminal comparativamente à peça reproduzida na primeira fase de ensaios, desta feita com um terminal de maiores dimensões e um molde com posicionadores de cabo.

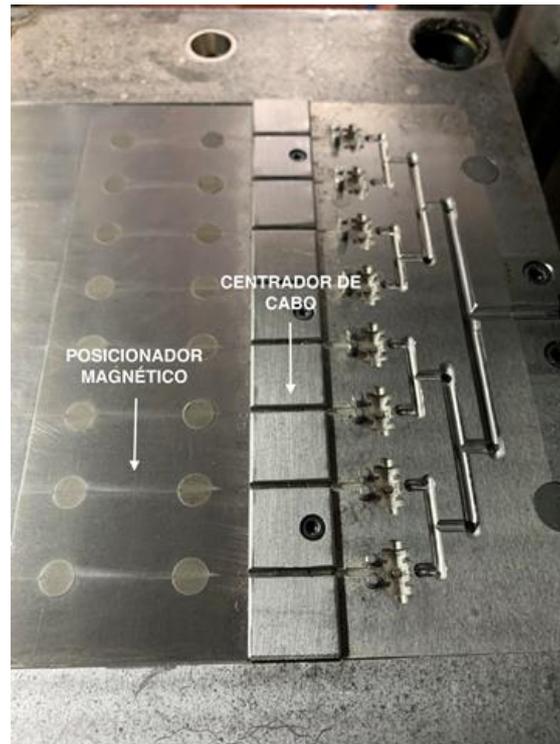


Figura 24 - Molde com centradores de cabo

Com este novo molde, foram estudadas novas variáveis que possam ter influência na resistência mecânica dos terminais, tais como: produção de uma gola adequada, tempo de estágio do material (2 semanas), estudo com molde aquecido por termorreguladores e análise de incidência por cavidade que consistiu em comparar 2 lotes de 80 cabos das duas referências e analisar a incidência de terminais com baixa resistência mecânica e a sua localização no molde, o que poderia indicar algum tipo de deficiência nos canais de alimentação.

Antes de se dar início aos ensaios, testou-se o balanceamento do molde, que consiste em realizar injeções com uma dosagem de material reduzida, preferencialmente a 30% e depois a 50% da dosagem, de modo a permitir uma melhor percepção da evolução do enchimento da peça. As peças devem ser pesadas numa balança e avaliar se existe algum desfasamento na massa das peças produzidas em alguma das cavidades. Se existir esse desfasamento, pode indicar que o molde não é balanceado e as cavidades estarão a ser preenchidas em tempos diferentes, devendo proceder-se a uma retificação do molde.

Procedeu-se então a uma análise visual do preenchimento das cavidades como representado na Figura 25, devido à presença do cabo metálico no interior dos terminais. Foi apenas realizado o teste a 50% da dosagem pois verificou-se que 30% não injetava material suficiente para garantir adesão ao cabo metálico, fazendo com que as peças se soltassem no momento da extração.



Figura 25 – Peças obtidas durante o estudo de balanceamento do molde

Na Figura 25, encontram-se exemplos das peças, verificando-se desvios mínimos no seu enchimento. Sendo assim, considerou-se o molde como balanceado. Na Figura 26 ilustram-se os novos terminais que se pretende injetar, com uma massa superior aos do ensaio anterior.



Figura 26 - Geometria do novo terminal

Produção de Gola com Centramento do Cabo

Este novo terminal apresenta um tamanho ligeiramente superior, o que permitiu novamente aumentar o tamanho das flores aplicadas no cabo, fazendo um ajuste da flor às dimensões do terminal. Realizou-se então a sobreinjeção em flores com os seguintes diâmetros: 3mm, 4mm e 5mm, como se observa na Figura 27. Estas flores, quando definidos valores de diâmetro superiores começam a obter



uma aparência mais achatada, como um disco, quando vista lateralmente, ao invés das habituais flores de 2,5mm que possuem uma forma mais arredondada.

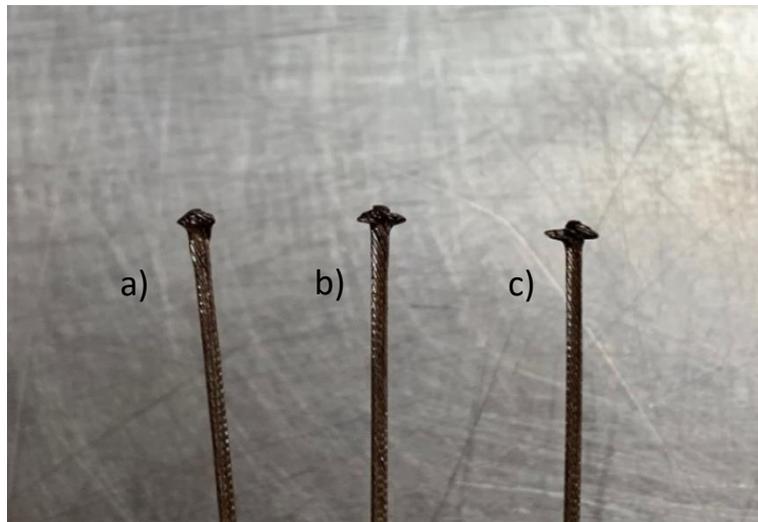


Figura 27 - Diferentes dimensões das flores utilizadas no ensaio: a) 3mm; b) 4mm; c) 5mm)

Foi também incluída nestes ensaios, a título de curiosidade, uma série de injeções onde o cabo não possuía qualquer flor, onde se pretendeu demonstrar a importância da realização da flor nesta tipologia de produtos.

Tempo de Estágio do Material

As poliamidas aromáticas reforçadas caracterizam-se por possuírem uma absorção de água ligeiramente superior a outros materiais poliméricos conhecidos e utilizados industrialmente (cerca de 4% de absorção de água a uma temperatura de 23°C, no ponto de saturação). Esta absorção de água, em condições mínimas e controladas pode beneficiar a peça mecanicamente, fornecendo-lhe uma resistência adicional devido ao preenchimento de alguns vazios interiores da peça, por pequenas partículas de água.

De modo a avaliar o efeito do tempo de estágio do material nas peças produzidas, fez-se a injeção de 96 peças de cada condição de flor (3mm, 4mm e 5mm). Definiu-se que as peças seriam testadas mecanicamente no próprio dia da injeção e nas duas semanas seguintes em dois momentos de ensaio, um em cada semana, de modo a permitir observar uma evolução nos resultados. Em cada semana foram testadas 32 peças de cada condição, sendo que as restantes foram mantidas à temperatura



ambiente durante as duas semanas seguintes. Após este período foram recolhidos e analisados os resultados.

Molde Aquecido

Neste ensaio, aqueceu-se o molde até à temperatura de 60°C e comparou-se com os resultados da primeira semana de tempo de estágio, uma vez que os terminais foram injetados e tracionados no mesmo dia, apenas com a diferença no aquecimento do molde. Este molde possui um sistema de aquecimento através de um circuito de água, tendo sido necessário ligar as respetivas mangueiras e o termorregulador de temperatura (Anexo 4), que normalmente não são utilizados.

Espera-se que com esta alteração seja diminuído o choque térmico entre o material a 310°C e o molde a temperatura ambiente.

4.6. Cabo 68C vs Cabo 68CK – Incidência por Cavidade

Decidiu-se então incluir uma terceira fase de ensaios onde se separaram as peças por cada *shot* e respetiva cavidade, à qual foram posteriormente recolhidos os valores do ensaio de tração tendo em conta a cavidade onde cada peça foi produzida. Este ensaio surgiu com o intuito de perceber se a variação nos resultados se deveria realmente à dificuldade em produzir flores nos diferentes cabos com as mesmas características ou se seria devido a algum defeito em alguma das cavidades do molde que devesse ser retificado. Foram, ao mesmo tempo comparados ambos os cabos testados até então. Produziram-se dois lotes de cabos: um lote de 100 cabos da referência 68C e 100 cabos da referência 68CK, denominado na empresa de “cabo revestido” devido ao revestimento externo com uma camada transparente de polietileno que lhe fornece melhores propriedades acústicas, no sentido da melhor absorção de ruídos no interior da porta do automóvel. Estes dois tipos de cabos são provenientes de fornecedores diferentes, mas apresentam uma matriz semelhante, sendo ambos constituídos por aço inoxidável. Apresentam, no entanto, uma diferença visual perceptível, como esquematizado na Figura 28, possuindo o cabo 68C uma tonalidade ligeiramente mais escura, devido a um banho num óleo que lhe fornece essa tonalidade. Este cabo é também mais quebradiço, sendo que na altura de corte de cabo, este deve ser realizado através de um elétrodo, onde se faz o corte e se queima a extremidade ao mesmo tempo. Quando o corte é realizado com o auxílio de uma serra elétrica os filamentos separam-se e o cabo fica inutilizável. Por este mesmo motivo, é também impossível revestir o cabo 68C, pois o corte com elétrodo iria danificar o revestimento do cabo.

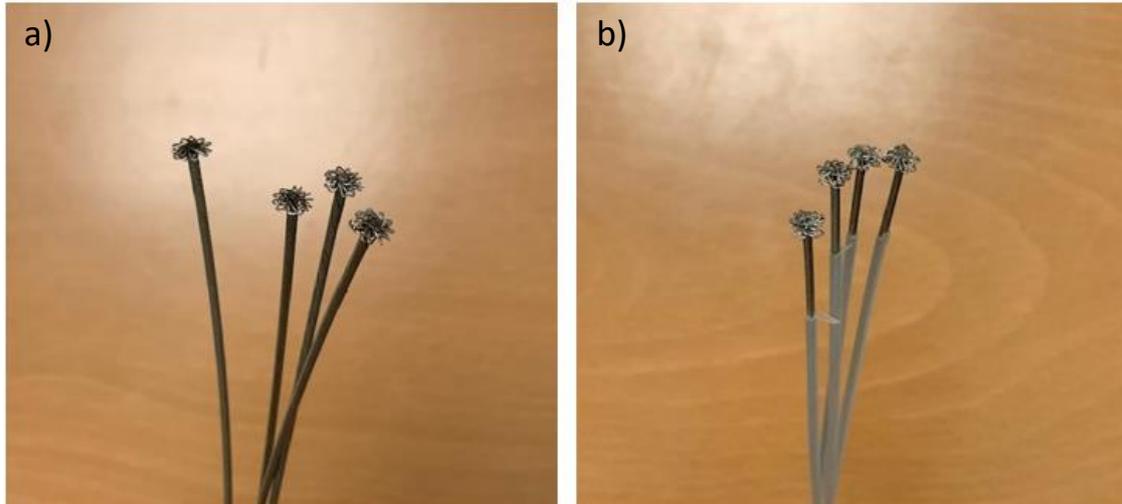


Figura 28 - Referências de cabo utilizadas no ensaio prático: a) 68C; b) 68CK

Repetiu-se o ensaio de igual forma para ambos os cabos. Todas as flores foram requisitadas com 5mm de diâmetro visto ter sido a condição com melhores resultados para este terminal, neste molde (com gola).

No momento da receção dos cabos, foi possível verificar um dos fatores de ruído deste projeto, que são as dimensões e geometria das flores. Uma vez que a flor é afinada por tentativa-erro, modificando apenas a posição inicial da placa deformadora até esta produzir flores com o diâmetro aproximado ao desejado, é possível, visualmente, verificar pequenas diferenças geométricas entre as flores, tendo algumas um maior aglomerado de cabos numa zona preferencial e algumas não possuindo uma forma circular.

4.7. Avaliação com nova Matéria-Prima

A matéria-prima em questão trata-se de uma poliamida 6.6 reforçada com 50% de fibra de vidro de alto desempenho. Apresenta características bastante superiores às poliamidas reforçadas com fibra de vidro comuns. Esta matéria-prima, chamada ROTEC HPPA caracteriza-se por ser indicada em aplicações de substituições metálicas, destacando-se algumas propriedades como uma maior resistência mecânica sob tensão e menor taxa de absorção de água, permitindo assim a sua utilização em diferentes áreas, desde a automóvel à aeronáutica.



Na figura seguinte encontra-se esquematizado o ganho em características físicas e mecânicas da utilização deste material, em comparação com outras poliamidas, tendo como principais características o módulo de elasticidade de 22 GPa e a resistência à tração de 280 MPa.

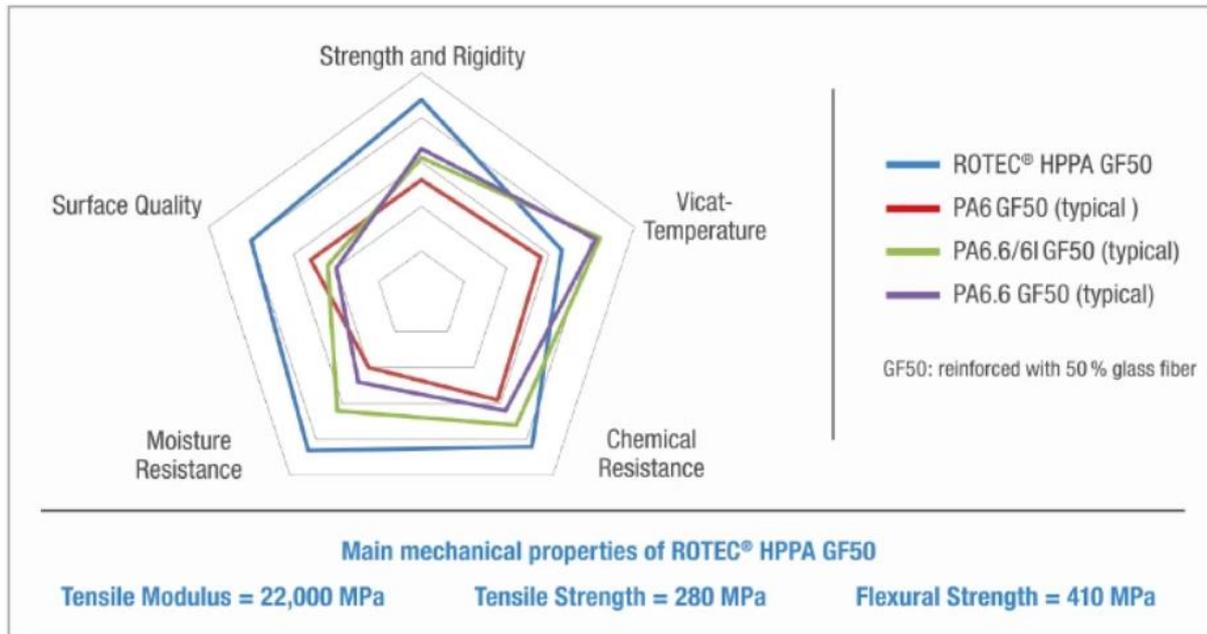


Figura 29 - Características do material ROTEC HPPA comparativamente com outras poliamidas

Foi preparado um lote de 80 cabos da referência 68C (cabo sem revestimento) para sobreinjeção dos terminais e posteriormente foram sujeitos aos ensaios de rebentamento para avaliação da matéria-prima. Neste ensaio as condições de processamento foram ajustadas relativamente às recomendadas pelo fabricante do matéria-prima e também às características do equipamento de injeção. Relativamente à temperatura do molde, a ROMIRA tem como recomendação colocar o molde a uma temperatura entre 140-150°C e um tempo de arrefecimento de 30-35s de modo a garantir que ocorre uma cristalização adequada e que as peças possuem uma boa estabilidade dimensional. Uma vez que os termorreguladores existentes na FICOSA não possuem circuitos de aquecimento a óleo, mas sim a água, não foi possível elevar a temperatura do molde até à desejada. Sendo assim, aplicou-se uma temperatura de 80°C e um tempo de arrefecimento de 12s, adequado à temperatura das paredes do molde.

Como preparação do material, foi colocado na estufa (Anexo 5) durante 7h a uma temperatura de 90°C, como indicado pelo fabricante.



4.8. Ensaios de Caracterização

4.8.1. Caracterização Mecânica – Ensaios de Tração

Para comparar a influência dos diferentes parâmetros que foram sendo alterados ao longo deste estudo, realizaram-se ensaios de tração aos cabos com terminais. A máquina utilizada é da marca ADVANTECH e encontra-se na FICOSA, podendo ser observada na Figura 30. Trata-se de um equipamento especializado no rebentamento de cabos onde se pode recolher a força necessária ao rebentamento (em Newton). Sendo este parâmetro o ponto sobre o qual o cliente estabeleceu o requisito mínimo para funcionamento destes terminais, foi sobre esse mesmo valor (800 N) que se definiu o requisito interno para que as diferentes condições fossem (ou não) aprovadas.

No total, foram tracionadas 32 peças de cada condição, ao longo de todos os ensaios, com exceção dos ensaios realizados na análise de incidência por cavidade, onde se rebentaram 10 peças por cada cavidade do molde, ou seja, 80 peças. No ensaio com a nova matéria-prima foram compilados os resultados também para 80 cabos porque não estava em estudo nenhuma comparação entre condições, mas sim uma comprovação do potencial do material, aumentando assim para um número de amostras que forneça mais informação acerca do comportamento do material.

A velocidade do ensaio foi de 6 mm/s, tendo sido realizados a temperatura ambiente.



Figura 30 - Máquina de tração



Antes de se iniciar o ensaio, é necessário fixar ambas as extremidades do cabo em dois dispositivos metálicos, como se observa na Figura 31. Estes sistemas estão projetados para fixarem terminais de bloqueio, portanto, na extremidade livre do cabo, procedeu-se de igual forma à realização de flores e à injeção de terminais de Zamak, de forma a garantir que o terminal a rebentar seria o terminal injetado com plástico. Após o cabo estar corretamente colocado é necessário premir dois botões de acionamento (dois de forma a evitar o acionamento involuntário da máquina) e um dos braços irá iniciar um movimento axial, exercendo tensão no terminal até este partir, enquanto o outro braço da máquina permanece imóvel.

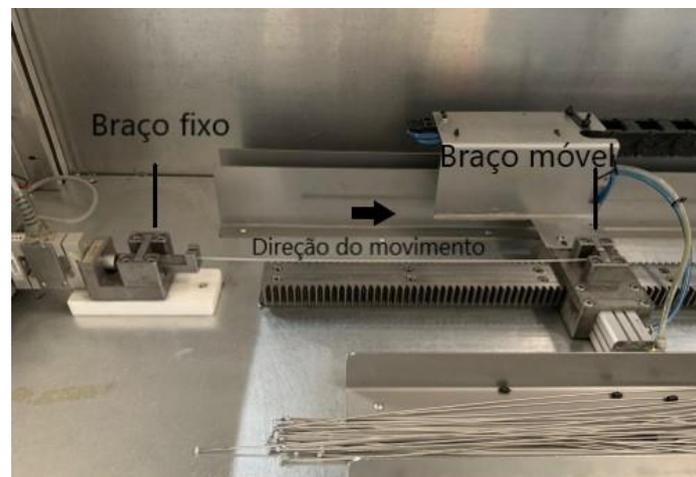


Figura 31 - Modo de funcionamento da máquina de tração

Uma vez que o *software* da máquina utilizada não permite a exportação dos dados que permitam reproduzir os gráficos tensão-deformação, o parâmetro utilizado como comparação das diferentes condições foi força necessária para a rotura das peças (em Newton), que representa o ponto máximo de resistência que as peças conseguem suportar sob forças de tração.

4.8.2. Caracterização Estrutural

No laboratório de microscopia do DEP – Universidade do Minho, realizaram-se ensaios de microscopia ótica a algumas peças, com o intuito de verificar qual a influência do diâmetro da flor no preenchimento do volume da peça com o material injetado, assim como o posicionamento da flor após a injeção e existência de possíveis defeitos. Para este efeito foram selecionadas duas amostras de cada uma das três condições de flor. Selecionaram-se peças antes e após ser realizado o ensaio de tração,



com o intuito de avaliar a estrutura da peça, orientação das fibras de vidro e possíveis defeitos, como vazios.

Procedeu-se ao embebimento das peças em resina epóxi. Para isso, as peças foram mergulhadas numa mistura de 25ml de resina epóxi e 3ml de endurecedor. As amostras foram colocadas em moldes juntamente com a mistura de resina + endurecedor como se pode visualizar na Figura 32. Esperou-se 12 horas para a resina curar até se poderem seccionar as amostras. Em cada um dos moldes encontravam-se, respetivamente: duas peças com flor de 3mm, duas com flor de 4mm e duas com flor de 5mm. O quarto molde possuía duas amostras com 3mm de flor após o ensaio de tração.

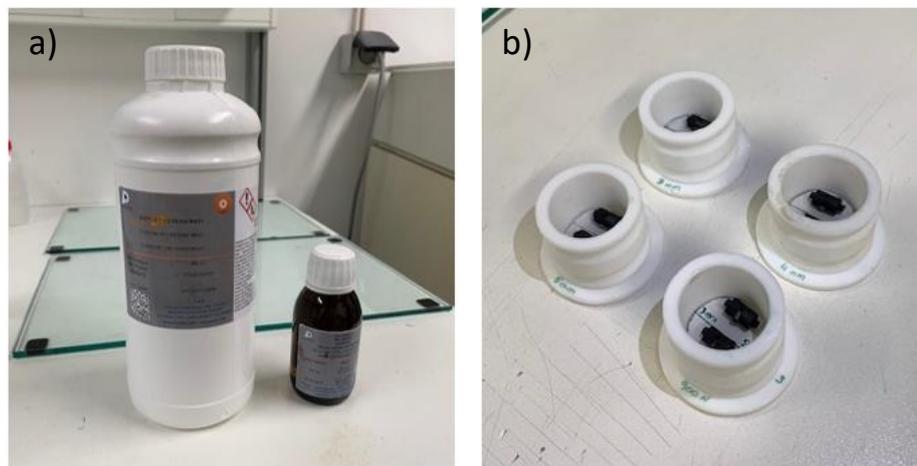


Figura 32 - Material utilizado na preparação de amostras: a) Resina epóxi e endurecedor; b) Moldes para enchimento com resina

Após cura, recorreu-se a uma serra de fio de diamante, da marca WELL, modelo 3242 “Precision Diamond Wire Saw” (Anexos 6 e 7) no grau de velocidade 7 para cortar as amostras nas posições de observação. Esta serra realiza um corte relativamente demorado à amostra, onde se obtém a face que se pretende observar. Simultaneamente poliu-se a amostra tracionada (sem cabo metálico no seu interior) na polideira PRESI Minitech 233 com velocidade de rotação de 200 rpm (rotações por minuto). Para o polimento utilizaram-se lixas de granulometrias sucessivamente decrescentes, sendo que o seu grau de polimento aumenta com a diminuição da granulometria. As lixas utilizadas foram as seguintes: P120, P320, P500, P1000, P2500 e P4000. Na Figura 33 observa-se a polideira utilizada para polir a amostra.



Figura 33 - Polideira Presi Minitech 233

De seguida procedeu-se à observação das diferentes amostras por técnicas de microscopia ótica de reflexão, no microscópio OLYMPUS BH 2 (Anexo 8). Este tipo de microscopia é recomendado quando se pretende caracterizar a microestrutura de materiais poliméricos duros reforçados com alto teor de cargas minerais/fibras ou que não possam ser seccionados para observação em microscopia ótica de transmissão.

Este tipo de microscopia permite que seja observada a dispersão e orientação das fibras de vidro no interior da peça. Caso as fibras se encontrem com uma dispersão/orientação inadequada podem estar a causar o modo de falha elevado dos terminais, o que pode indicar que o material em questão talvez não seja adequado para este tipo de produto. Além disso, pretende-se também inferir acerca do preenchimento da zona interna da flor com material, caso o material não preencha devidamente esta zona da peça, acontece que esta acaba por não apresentar a resistência desejada. Para este efeito foi utilizada a lupa estereoscópica OLYMPUS SZ-PT (Anexo 9) que permite observar com mais exatidão a zona de contacto entre os dois materiais, bem como a possível existência de vazios no interior da peça.

Num outro momento, foi repetido todo o processo de preparação de amostras descrito anteriormente, mas desta vez para as amostras provenientes do último ensaio realizado com a matéria-prima ROTEC HPPA, foram preparados 3 moldes com 2 amostras cada (apenas foram utilizadas flores com 5mm de diâmetro neste ensaio) com flor no seu interior e também 2 amostras pós-ensaio de rebentamento onde se pretendeu estudar a zona de corte deixada após arrancado o cabo metálico, procurando perceber de que forma a nova matéria-prima demonstrou ser uma escolha eficaz na execução deste trabalho.



4.8.3. Ensaio de Fadiga

Estes ensaios foram efetuados no laboratório da FICOSA e são geralmente realizados no início de cada projeto, de modo a validar junto do cliente a resistência do produto. Consiste na introdução do produto completo (cabo de comando) numa estrutura metálica que irá simular o esforço a que o terminal estará sujeito durante o tempo de vida do automóvel.

Os sub-conjuntos previamente injetados foram colocados numa linha de montagem para serem acoplados os diferentes componentes que constituem um cabo de comando para que este possa ser fixado na estrutura utilizada para o efeito.

Como modelo *standard* deste ensaio, está estipulado que os terminais devem ser capazes de suportar 100.000 ciclos de acionamento com um peso de 50N sob diferentes condições de temperatura, nomeadamente:

- 80.000 ciclos à temperatura ambiente;
- 10.000 ciclos a -40°C;
- 10.000 ciclos a 80°C.

Pretende-se então simular as condições de temperatura a que um automóvel estará sujeito durante o seu funcionamento, conforme as estações do ano e as diferentes áreas geográficas onde podem vir a ser utilizados.

Para este estudo, e uma vez que a estrutura suporta o acionamento mecânico de cinco cabos ao mesmo tempo, foi este o número de amostras que se utilizou. A máquina produz este acionamento a uma taxa de seis ciclos por minuto, tendo sido programada para trabalhar durante o tempo equivalente a dois turnos por dia (16h), sendo que o tempo total deste ensaio foi de cerca de duas semanas. A estrutura metálica foi colocada dentro de uma câmara climática capaz de exercer todas as condições de temperatura pretendidas.

Ao realizar este tipo de ensaios é importante que o *layout* do cabo completo seja o mais aproximado possível ao real durante a sua utilização. Neste sentido, foi construída uma estrutura de forma a aplicar uma “deformação” ao cabo, fazendo com que este exerça o seu trabalho sob uma certa inclinação.

Na figura seguinte observa-se a estrutura metálica utilizada para este ensaio.



Figura 34 - Estrutura utilizada na realização do ensaio de fadiga



5. Apresentação, análise e discussão de resultados

5.1. Caracterização Mecânica

Numa primeira fase estudou-se a influência da geometria da flor, do seu posicionamento e da extensão do terminal (gola) pelo cabo metálico na resistência mecânica das peças. A resistência máxima suportada pelas peças encontra-se representada na Tabela 15, em Newton, e faz referência a uma média obtida numa totalidade de 32 amostras por ensaio, assim como o seu desvio-padrão.

Tabela 15 - Resultados mecânicos da 1ª Fase

Planeamento de ensaios		Força de rotura média (N)	Desvio-padrão
Posicionamento (diâmetro 2,5 mm)	Normal	459,2	138,4
	Próxima do ataque	424,4	125
Diâmetro da flor (mm)	2,5	372,6	213,8
	3	552,0	216,6
	3,5	532,9	261,5
	Sem flor	58,10	32,4
Cabo com gola de plástico	Flor 2,5mm	393,0	134,2
	Flor 3mm	558,8	210,7
	Flor 3,5mm	723,9	135,2
	Flor 4,4mm	829,9	99,4

Analisando os resultados percebe-se de imediato que a variação do posicionamento da flor não surtiu qualquer efeito. A flor posicionada ligeiramente próxima do ataque apresentou valores de resistência mecânica superiores, no entanto, tendo em conta o desvio-padrão de ambas as condições, é possível observar que estes se encontram dentro do mesmo intervalo. Assim sendo, optou-se por manter a flor centrada no molde como já é boa prática quando se realiza moldação desta tipologia de produtos na FICOSA.



No ensaio relativo ao diâmetro da flor foi possível tirar diferentes informações. Salta de imediato à vista o valor muito reduzido de resistência mecânica associado aos terminais injetados sem flor no cabo, possuindo estes terminais uma resistência à tração cerca de 90% inferior aos restantes. A área de contacto entre material e cabo criada pela flor é benéfica para a resistência do cabo. Percebeu-se também que as flores com diâmetro de 3mm e 3,5mm apresentaram resultados muito semelhantes entre si, mas relativamente superiores à flor padrão de 2,5mm.

Com a criação de uma gola em material plástico, efetuada através da decapagem do revestimento do cabo e o preenchimento dessa zona com o mesmo material do terminal, foi possível aumentar a resistência suportada pelas peças com flores de maiores dimensões, não apresentando a mesma eficácia nas flores de menores dimensões, nomeadamente as de 2,5mm e de 3mm, cujos resultados não sofreram grande variação comparativamente ao modelo sem gola.

Por fim, a flor de 4,4mm apresenta uma força máxima superior ao requisito de 800N. No entanto, mesmo este valor sendo ligeiramente superior ao requisito, apresentando um desvio-padrão de cerca de 100N não permite concluir que estes resultados são os desejados.

Nas figuras 35 e 36 apresentam-se as distribuições normais dos resultados de ambas as condições (com e sem gola). É possível observar uma diferença clara na resistência suportada pelas peças, assim como nos respetivos desvios-padrão, tendo em conta o diâmetro das respetivas flores. As distribuições normais encontram-se representadas de seguida e respeitam uma relação de $\pm 3\sigma$ (desvio-padrão).

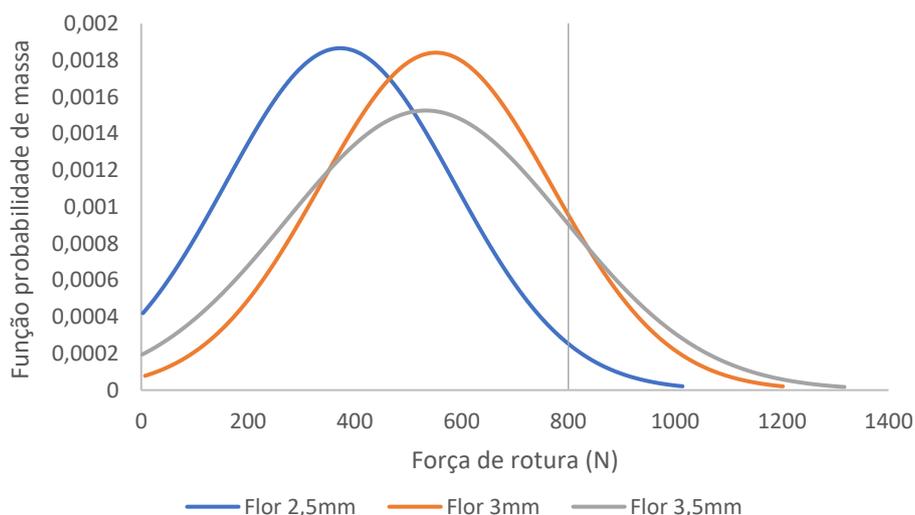


Figura 35 - Distribuição normal dos ensaios da 1ª Fase

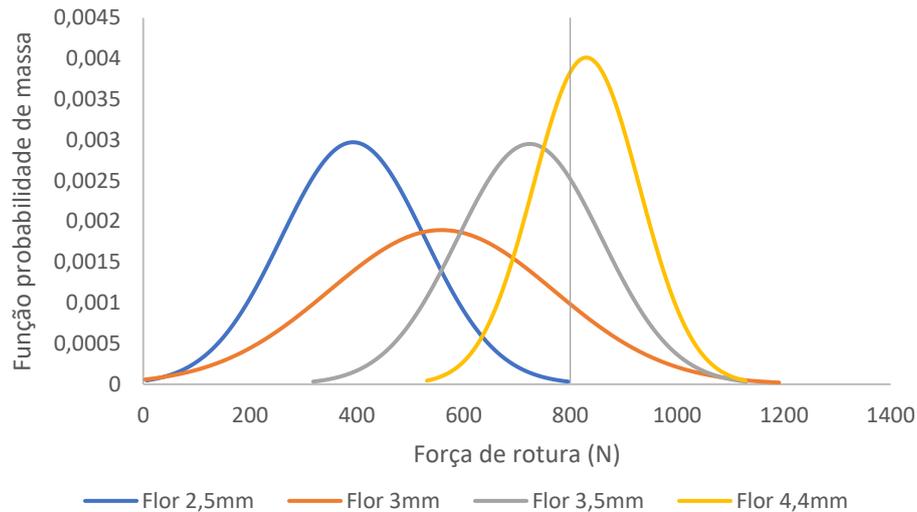


Figura 36 - Distribuição normal dos ensaios da 1ª Fase (com gola)

Estudando as curvas de distribuição normal, é perceptível a diferença entre cada um dos grupos de amostras. Relativamente aos terminais sem gola (Figura 35), observa-se que ambas possuem um desvio-padrão demasiado elevado, significando que a dispersão nos resultados é acentuada, uma vez que a concentração de resultados próximo ao valor médio é muito reduzido, originando curvas de distribuição normal alargadas. Este fator é ainda mais agravado na amostra com flor de 2,5mm, onde o valor do desvio-padrão se encontra muito próximo do valor médio de resistência suportada pelas peças, o que resulta em distribuições normais deformadas. Uma vez que o valor médio do desvio-padrão deste grupo é quase da mesma ordem de grandeza da média dos resultados, acontece que fazendo uma relação de $\pm 3\sigma$ o gráfico irá absorver valores negativos, foi necessário eliminar este intervalo para que o início da curva coincida com a origem do gráfico. Verifica-se também que nenhuma das condições apresenta um valor médio dentro do requisito dos 800N, indicado pela linha vertical.

Analisando as amostras com presença de gola, observa-se que as amostras com flor de menor dimensão, nomeadamente a de 2,5mm e de 3mm, apresentam uma curva igualmente larga, o que indica uma variabilidade muito grande nos resultados obtidos. Quanto às amostras de 3,5mm, o valor médio aproxima-se dos 800N, mas, ainda assim, há registo de amostras com valores próximos a 300N, que é um valor significativamente baixo, ou seja, a dispersão de resultados ainda se encontra bastante presente. Por fim, a amostra de 4,4mm é a única que consegue apresentar um valor médio superior a 800N, mas, apesar de possuir o desvio-padrão mais reduzido de todos os ensaios realizados (99,4N), mantém uma dispersão que absorve valores na casa dos 500N, o que não é aceitável para que esta



condição seja reproduzida. Como se pode verificar, apesar de se obter alguma população com valores superiores a 800N, a maior parte da população não o consegue atingir, pelo que as condições de cabo utilizadas não são válidas.

Os resultados obtidos foram sendo cada vez melhores à medida que se aumentou o diâmetro da flor e, ainda melhores, quando aliados ao aumento da área de contacto na interface dos dois materiais com a presença de uma gola.

Relativamente à produção de uma gola de plástico num molde com centradores de cabo, foi possível obter peças de melhor qualidade. No entanto, durante os ensaios de tração, foi possível verificar que as peças apresentavam diferentes modos de falha consoante o diâmetro da flor que o respetivo cabo possuía. Na Figura 37 é visível este efeito, onde estão representados os terminais da esquerda para a direita com flores de 3, 4 e 5mm de diâmetro, respetivamente.



Figura 37 - Diferenças nos modos de falha dos terminais consoante o diâmetro da flor no interior

A análise da Figura 37 permite perceber a importância da flor em todo este processo, e o porquê de as peças injetadas sobre flores de maiores dimensões apresentarem sucessivamente resultados à tração superiores às peças injetadas em flores menores.

As dimensões das flores após a tração podem aparentar uma dimensão menor à real, uma vez que durante o ensaio de tração estas são forçadas a passar por entre a ranhura de um fixador de cabos, com uma espessura de cerca de 2,5mm, portanto é expectável que quanto maior o diâmetro da flor, maior será a deformação que esta apresentará após o ensaio. Esta deformação ocorre após a quebra do terminal, não afetando a sua resistência mecânica, tratando-se apenas de uma continuação do movimento do braço móvel da máquina que deforma a flor.



As flores de maiores dimensões apresentam um modo de falha relativamente semelhante, com a gola a ser “arrancada” da base do terminal, sendo perceptível a olho nu que a de 5mm dá origem a um corte menos abrasivo na base do terminal. Por outro lado, o modelo de 3mm criou uma deformação mínima no terminal, tendo sido diretamente retirada pelo canal cilíndrico da gola. Em ambas as condições, com base na deformação sofrida pelo terminal, com o cabo a ser “arrancado” da sua base, pode-se afirmar que a adesão presente no conjunto plástico/metal é puramente mecânica, não existindo qualquer adesão química entre os dois materiais.

Tabela 16 - Resultados mecânicos (2ª Fase)

Diâmetro da flor (mm)	Força de rotura (N)	Desvio padrão
3	859,1	121,3
4	869,4	169,1
5	946,0	193,5

Na Tabela 16, verifica-se novamente que as peças com a flor maior continuam a apresentar os valores mais elevados em média de força de rutura. No entanto, a produção de uma gola com cabo centrado aumentou significativamente a resistência mecânica dos cabos com flores menores, quando comparados os valores com os da primeira fase, onde a gola se encontrava incompleta após a injeção. Invariavelmente, todas as amostras continuam a apresentar um desvio-padrão muito elevado, o que obriga a realizar mais ensaios para dissecar todos as combinações de fatores de controlo. Neste momento, pode-se concluir que a utilização de um molde com centradores de cabo permite aumentar a resistência em todas as amostras. Sendo assim, devido ao elevado valor associado ao desvio -padrão das amostras, ainda não é possível definir as condições sob as quais o material polimérico é capaz de substituir o Zamak nos terminais sobreinjetados. Na representação de distribuição normal, observam-se três curvas muito similares, sendo a principal diferença a gama de valores abrangidos pela curva referente às flores de 5mm, devido a possuir um desvio-padrão elevado, apesar de apresentar o maior valor em média de resistência mecânica.

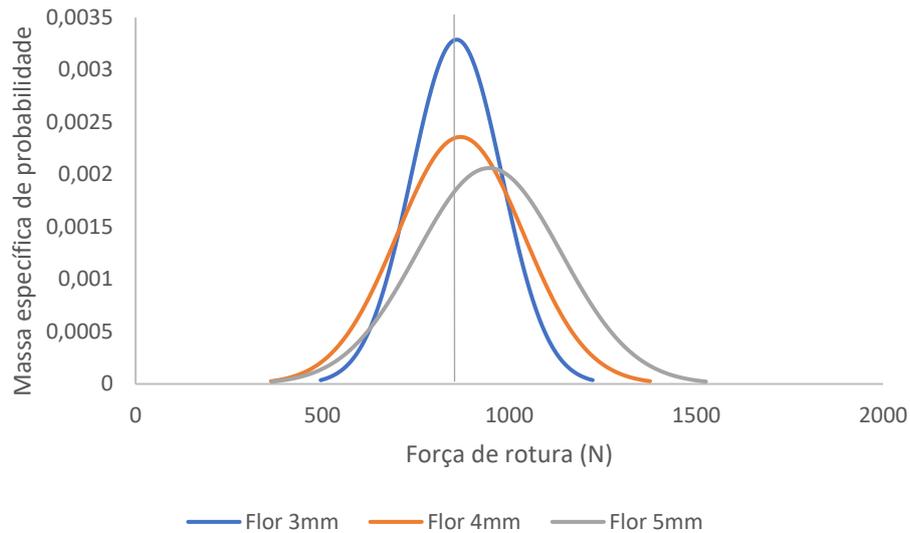


Figura 38 - Distribuição normal dos ensaios em molde com centramento de cabo

Uma vez que a poliamida é um material suscetível à absorção de humidade e esta pode ter influência no seu desempenho mecânico, testaram-se peças produzidas no mesmo lote, em semanas diferentes. Procurou-se avaliar o tempo de estágio do material após injeção e se este fator poderia melhorar a desempenho dos terminais. Mantiveram-se os testes aos três diâmetros de flor com o objetivo de manter a reprodutibilidade da primeira parte do ensaio. Os resultados são apresentados na Figura 39.

Os valores da primeira semana foram obtidos no mesmo dia da injeção dos terminais, portanto a primeira semana encontra-se denominada por “Semana Zero”, logo, os resultados nesta semana correspondem aos mesmos do ensaio anterior, visto tratar-se das mesmas peças.

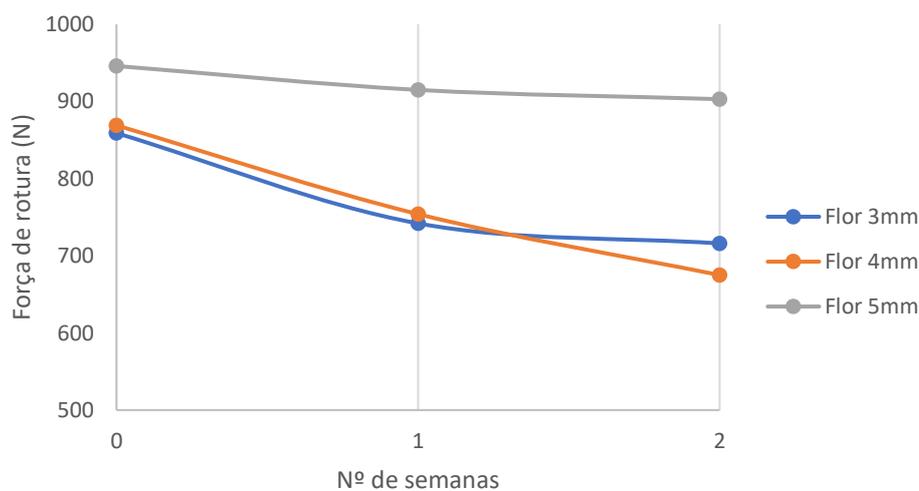


Figura 39 - Evolução da resistência das peças ao longo de 3 semanas de estágio



As peças que tiveram um menor tempo de estágio são as que apresentam a melhor resistência mecânica.

Nas duas semanas seguintes observou-se uma diminuição sucessiva nas médias de resistência suportada pelas peças. Estes resultados são suportados uma vez que esta diminuição nos valores de força máxima ocorreu sucessivamente em todas as condições de flor, assim como nos valores de desvio-padrão. Apenas a amostra de 5mm apresenta um valor acima de 800N. É então possível concluir que o tempo de estágio do material causa um efeito negativo na resistência das peças, o que se torna bastante problemático num componente a ser utilizado na indústria automóvel, onde os tempos de vida são bastante longos. Com isto, haverá necessidade de, no futuro, testar uma nova matéria-prima que permita dissipar este problema associado à perda de resistência dos terminais ao longo do tempo, por absorção de humidade.

Relativamente ao ensaio com o molde aquecido a 60°C, não foi possível melhorar a *performance* dos terminais como de esperado, estando ainda presente uma incidência de peças com um rendimento mecânico abaixo do requisitado muito elevada para validação dos resultados. Os valores de média e desvio-padrão são de 862,5N e 187,0N (Tabela 17), respetivamente, portanto continuam dentro do intervalo que tem vindo a ser obtido, não tendo surtido uma melhoria significativa. Com isto, observa-se, como tem vindo a repetir-se em todos os ensaios, uma curva de distribuição normal bastante alargada que acaba por abranger valores muito baixos de resistência mecânica, como se verifica na Figura 40.

Tabela 17 - Resultados mecânicos com molde aquecido (60°C)

Diâmetro da flor (mm)	Força de rotura (N)	Desvio padrão
5	862,5	187,0

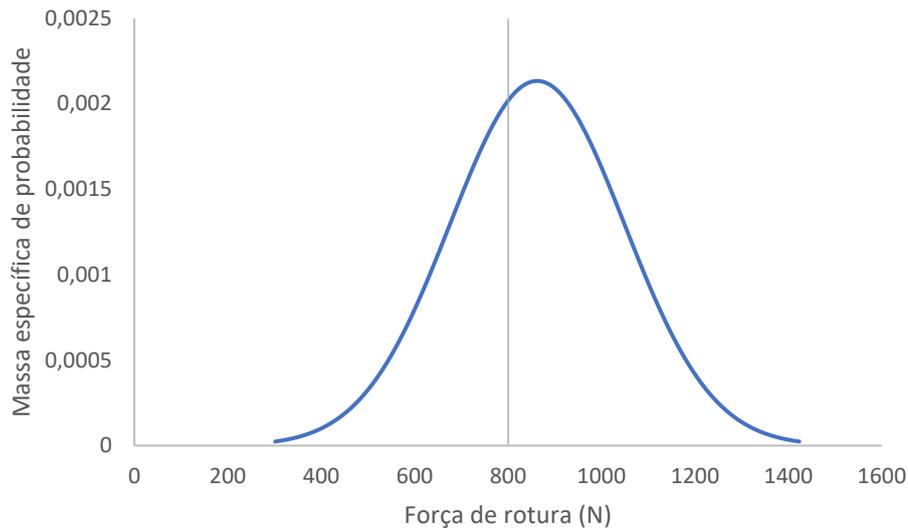


Figura 40 - Distribuição normal dos ensaios realizados em molde a 60°C

Para o efeito da resistência mecânica, pode-se concluir que utilizar molde aquecido a 60°C ou à temperatura ambiente não tem influência nesta propriedade. Permitindo, no entanto, obter um ganho em tempo de ciclo quando se utiliza molde sem aquecimento, devido ao arrefecimento mais rápido da peça.

Até ao momento, foi possível apurar uma variabilidade presente em todos os ensaios realizados. Apesar de em algumas condições ter sido obtido o requisito médio de 800N no ensaio de tração, também se presencia um desvio-padrão muito elevado que compromete a aprovação destes resultados.

Uma vez que já foram testadas diferentes condições que possam ter influência na resistência mecânica das peças injetadas, nomeadamente o posicionamento da flor dentro do molde, o diâmetro da flor, a criação de uma gola de plástico em volta do cabo metálico, o tempo de estágio do material injetado e cabos metálicos de diferentes constituições, decidiu-se então testar qual a influência do projeto do molde.

Neste ensaio, foram realizados 10 *shots* no total com cada um dos cabos acima mencionados e as amostras foram recolhidas e separadas por *shot* para serem posteriormente tracionadas por cavidade, de modo a perceber se a incidência de peças que não cumprem o requisito se foca em alguma das zonas do molde, o que poderá indicar uma possível debilidade no sistema de refrigeração do molde ou nos canais de alimentação, uma vez que se trata de um molde protótipo que pode não receber a manutenção recomendada regularmente.

As Tabelas 18 e 19 compilam todos os dados de força de rotura dos 80 terminais de cada uma das condições de cabo em estudo, da referência de cabo 68C e 68CK, respetivamente.



Tabela 18 – Força necessária à rotura do terminal em função da respetiva cavidade (cabo 68C)

Shot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cav1	871	745,8	844,4	851,7	935,3	874,5	924,1	811	819,5	825,2
Cav2	889,8	718,4	948,2	955,7	823,2	868,6	822,2	921,8	850,7	779,7
Cav3	625,9	525,2	703,5	756	52,7	908,5	467,5	694,4	742,4	621,3
Cav4	837,6	547,9	747,2	810,1	937,1	745,8	865	519,1	768,3	847,9
Cav5	788,6	554,7	706,8	848,3	886,9	775,4	687,7	527,5	807,8	873,7
Cav6	901,3	897	927,2	973,7	974,2	931,2	882,1	894,3	843,5	917,6
Cav7	853,7	911,9	1004,4	897,2	1000,3	952,9	951,2	997,2	786,6	996,8
Cav8	934,6	903,3	906,3	835,9	925,5	837,9	682,1	769,2	975,6	853

Tabela 19 - Força necessária à rotura do terminal em função da respetiva cavidade (cabo 68CK)

Shot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cav1	804,4	903,2	866,8	967,5	905,6	920,1	927,9	926,1	964,5	823
Cav2	928,4	861,8	892,9	834	900,9	917,3	803,4	874,7	878,6	902,5
Cav3	795,1	898,6	852,3	989,2	966,7	841,1	922,6	911,4	881,6	927,3
Cav4	926,5	931,3	983,6	865,8	851,2	919,7	880,7	967	905,8	849,6
Cav5	826,2	1026,3	890,8	894	949,1	852,3	759,1	928,1	1043,4	999,2
Cav6	901,7	876,4	941	1035,5	889,6	984,8	945,5	885,5	978,4	849,6
Cav7	929,9	860,6	875,3	916	918,8	1007	853,1	878,9	1052,3	986,3
Cav8	882,3	973,9	795,7	814,7	912,2	862,3	853,2	851,1	976,4	843,9

Analisando a Tabela 18, referente aos terminais sobreinjetados no cabo 68C, verifica-se imediatamente uma incidência muito elevada de peças com resistência mecânica abaixo dos 800N (26 peças num total de 80), especialmente nas cavidades 3, 4 e 5. Este fator poderia indicar que o molde não está balanceado. No entanto, num total de 80 cabos da referência 68CK (Tabela 19), apenas 3 se



encontram na condição NOK, sendo todos eles em cavidades distintas, inclusive a cavidade 4 que no primeiro ensaio apresentou 5 terminais NOK, no segundo produziu 10 peças todas elas na condição desejada.

Para explicar esta diferença de comportamento em ambos os cabos de aço inoxidável, é necessário recuar até ao seu processo de fabrico. Como referido anteriormente, as duas referências possuem a mesma matriz de aço inoxidável de 19 filamentos enrolados entre si, no entanto provêm de fornecedores diferentes. A referência 68C é produzida pela empresa STRONGROPE enquanto a referência 68CK é pela KOS WIRE. A referência 68C, apresenta, como descrito anteriormente, uma tonalidade mais escura. Isto deve-se a um tratamento a óleo que o cabo sofre na sua produção. Este óleo impede o seu revestimento na FICOSA devido a atuar como um lubrificante na sua superfície, inclusive após o seu manuseio sem luvas é visível a sujidade deixada pelos cabos. Uma vez que o cabo apresenta esta condição, crê-se ser devido a este fator que os terminais sobreinjetados em plástico tendem a quebrar com maior facilidade. O lubrificante reduzirá a adesão entre plástico e metal a uma relação meramente mecânica, aumentando a facilidade do cabo em “escorregar” pelo terminal quando forçado na máquina de tração. O cabo 68CK demonstra ser o mais indicado para sobreinjeção de plástico diretamente na superfície metálica.

Sendo assim, conclui-se que apesar de ambos os cabos serem fabricados em aço, com o mesmo número de filamentos, o produto de um fornecedor consegue ser melhor a garantir adesão a material plástico do que o outro, devido ao seu processo de fabrico e à inexistência de óleos na sua superfície.

Após inúmeros ensaios, começou a ser perceptível o aumento de força para valores acima dos especificados, mas ainda assim com uma variabilidade muito elevada. Por conseguinte, decidiu-se proceder à alteração da matéria-prima em questão, por uma que possuísse um módulo de elasticidade mais elevado (permitindo que sejam aplicadas tensões mais altas às peças sem que estas quebrem) e que permitisse obter uma maior adesão entre o conjunto material-cabo.

Através de consulta à empresa MADIPLASTE, fornecedora de matérias-primas da FICOSA, obteve-se a informação da existência de um novo material com um elevado módulo de elasticidade e recomendado em aplicações de substituições metálicas. Este material foi adquirido de forma gratuita, juntamente da fabricante alemã ROMIRA, tendo sido proposto realizar alguns ensaios à matéria-prima para validar a sua aplicação na substituição de peças em Zamak.

O último ensaio de injeção consistiu numa alteração de matéria-prima polimérica. Com a alteração de material, foi finalmente possível cumprir com o requisito do produto. Num total de 80 cabos em estudo, foi possível obter uma média de resistência suportada de cerca de 1300N e um desvio-



padrão de 144N, como se verifica na Tabela 20. Simultaneamente, a condição com a *performance* mais baixa de todo o ensaio não foi inferior a 1000N, confortavelmente acima de 800N.

Tabela 20 - Resultados mecânicos (ROTEC HPPA)

Ref. Cabo	Diâmetro da flor (mm)	Força de rotura (N)	Desvio padrão
68CK	5mm	1307,4	144,0

Analisando a Figura 41, de distribuição normal, percebe-se de imediato que foi possível garantir que, como uma distribuição de Gauss indica numa relação de média $\pm 3\sigma$, 99,7% das amostras se encontram acima de 800N. Assim sendo, cumpriu-se com o requisito definido para este projeto, sendo que a alteração de matéria-prima permitiu aumentar a resistência mecânica dos cabos e, aliada ao cabo 68CK e uma flor com 5mm de diâmetro, ultrapassar a barreira definida para este caso de estudo.

Como modelo *standard* da indústria automóvel, é uma boa prática sujeitar os cabos de controlo completos a ensaios de fadiga antes do arranque de cada projeto, no qual estes devem estar aptos para suportar um total de 100.000 ciclos de acionamento com um peso de 50N, sob diferentes condições de temperatura, portanto será este o modelo a adotar num ensaio futuro, como validação do projeto.

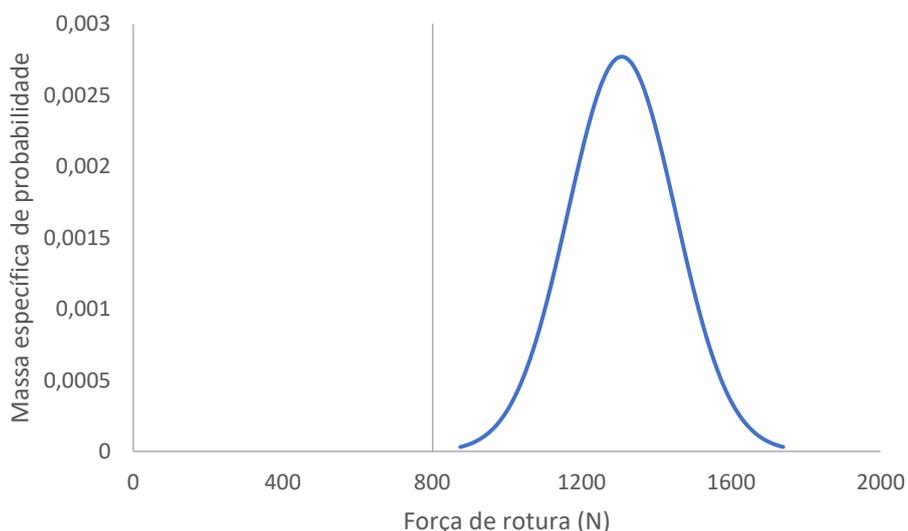


Figura 41 - Distribuição normal dos ensaios realizados com material ROTEC HPPA



5.2. Caracterização Estrutural

A análise que se segue corresponde à observação da estrutura contida nas peças que utilizaram o material Durethan AKV50H.

Realizada a análise das imagens representadas de seguida, é possível verificar a existência de alguns defeitos presentes nos terminais, que podem ajudar a explicar as variações nos resultados dos ensaios realizados até ao momento, tais como porosidades e deslocamentos do cabo metálico no interior do terminal.

Durante a fase de microtomia com fio de diamante, as amostras foram posicionadas no braço da máquina de forma que o fio pudesse seccionar os terminais ao longo do seu plano médio, permitindo assim obter uma imagem intermédia da flor e do seu posicionamento em relação ao material plástico.

Na Figura 42, para uma melhor compreensão, observa-se a orientação do corte que foi aplicado nas peças.



Figura 42 - Amostra embebida em resina epóxi no plano de corte que será observado

As imagens obtidas por observação na lupa estereoscópica podem ser observadas de seguida, para as três dimensões de flor aplicadas: 3mm, 4mm e 5mm, respetivamente (Figuras 43, 44 e 45). Salienta-se que as imagens são meramente exemplificativas, já que foi selecionado apenas 1 exemplar de cada caso em estudo.



Figura 43 - Flor de 3mm em material Durethan

A primeira imagem é referente à amostra injetada sobre uma flor metálica de 3mm de diâmetro e salta imediatamente à vista um preenchimento de material muito pobre na zona inferior do terminal, onde se pode observar uma falha de injeção em volta do cabo metálico (na zona superior da Figura 43). Este acontecimento terá consequências diretas no desempenho do terminal sob funcionamento, uma vez que uma falha de injeção desta dimensão causará uma quebra precoce do terminal. Além disso, outro defeito que se observa está relacionado com o descentramento da flor na imagem, uma vez que a zona central da flor deveria coincidir com o centro do terminal. Este descentramento poderá ocorrer aquando da entrada do material sob pressão na cavidade do molde, fazendo com que o cabo seja “empurrado”, pois o posicionamento do ataque de injeção direciona o material contra o topo da flor, causando um recuo do cabo.

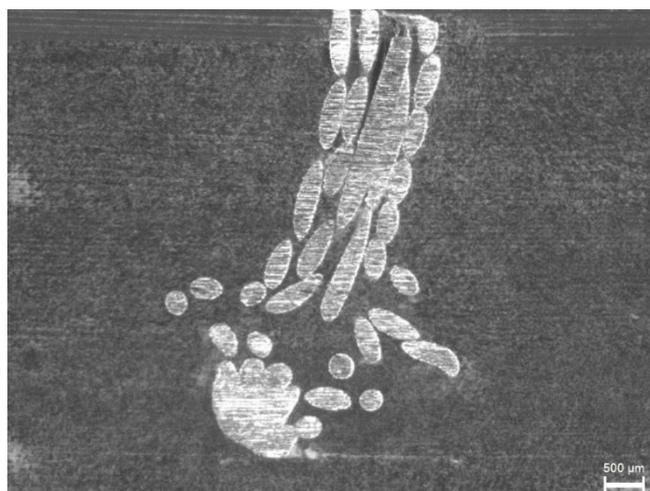


Figura 44 - Flor de 4mm em material Durethan



A análise do plano médio da amostra de 4mm, representada na Figura 44, permite visualizar uma ocorrência diferente no interior da amostra. Neste caso o cabo metálico sofreu uma inclinação após a pressão exercida pelo fluxo de material para dentro da cavidade e, após o arrefecimento da peça, manteve-se nessa posição. De modo a evitar que ocorra de novo, sugere-se projetar uns posicionadores internos para limitar o movimento da flor dentro da cavidade e assim tentar garantir que esta se mantém de igual forma após a sobreinjeção. Outro motivo deste empeno poderá ser a velocidade de injeção que, quanto mais alta estiver, maior será a pressão que a extremidade do cabo irá sofrer. Alterando este parâmetro poderiam ocorrer outros defeitos, como por exemplo moldação incompleta ou o aparecimento de linhas de fluxo na superfície do terminal.

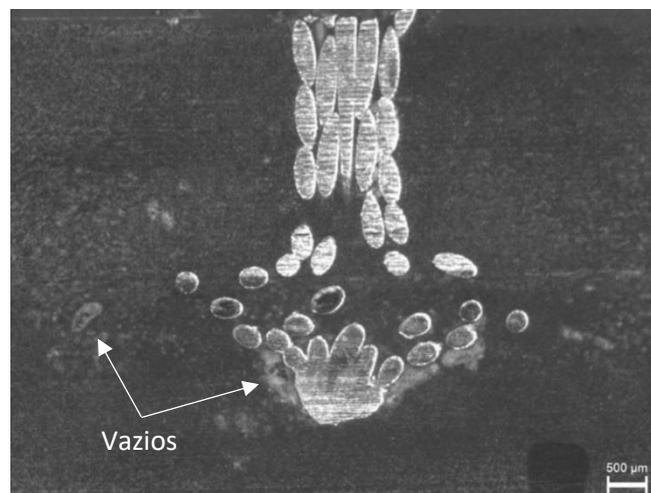


Figura 45 - Flor de 5mm em material Durethan

A última amostra desta análise faz referência ao terminal sobreinjetado em flor de 5mm que é a condição que tem apresentado as melhores propriedades mecânicas. Na Figura 45 verifica-se a existência de alguns vazios de dimensões relativamente elevadas para o tamanho do terminal em questão, junto ao topo da flor e alguns espalhados ao longo do terminal. Na moldação de peças plásticas o aparecimento de poros/vazios ocorre devido ao aprisionamento de gases dentro da cavidade durante a fase de arrefecimento. Os moldes de injeção possuem sistemas de escape de gases responsáveis por expelir grande parte dos gases através de um sistema projetado para o efeito, no entanto, caso seja definido um tempo de arrefecimento muito baixo ou o molde esteja a uma temperatura muito reduzida, vai acontecer que o material vai ser forçado a arrefecer rapidamente e vai acabar por aprisionar gases no interior da peça que não tiveram tempo de ser expelidos. Relativamente à matéria-prima, se esta não for corretamente estufada e acondicionada, pode desenvolver o mesmo efeito na peça.



Na amostra em questão, devido à quantidade e dimensões dos vazios presentes, seria expectável que, num ensaio de tração, rebentasse com relativa facilidade e contribuísse assim para a variabilidade de resultados que foi obtida com a matéria-prima PA 6.6 DURETHAN.

De seguida estarão representadas as imagens referentes aos terminais tracionados, já sem cabo metálico no seu interior. Esta análise foi realizada no microscópico ótico de reflexão, observando 3 zonas distintas de ambas as peças, nomeadamente a zona inferior do terminal, e ambas as zonas laterais ao posicionamento da flor, tanto à esquerda como à direita. As imagens encontram-se agrupadas duas a duas, de modo a ser possível comparar as duas amostras, que suportaram, respetivamente, 500N e 900N num ensaio de tração.

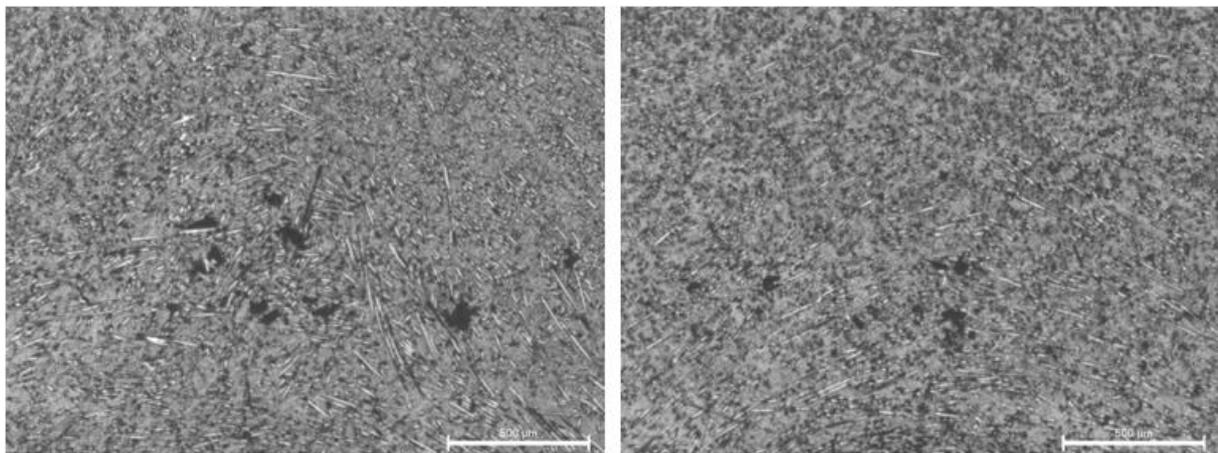


Figura 46 - Ampliação da zona central da amostra (20x): a)500N; b)900N

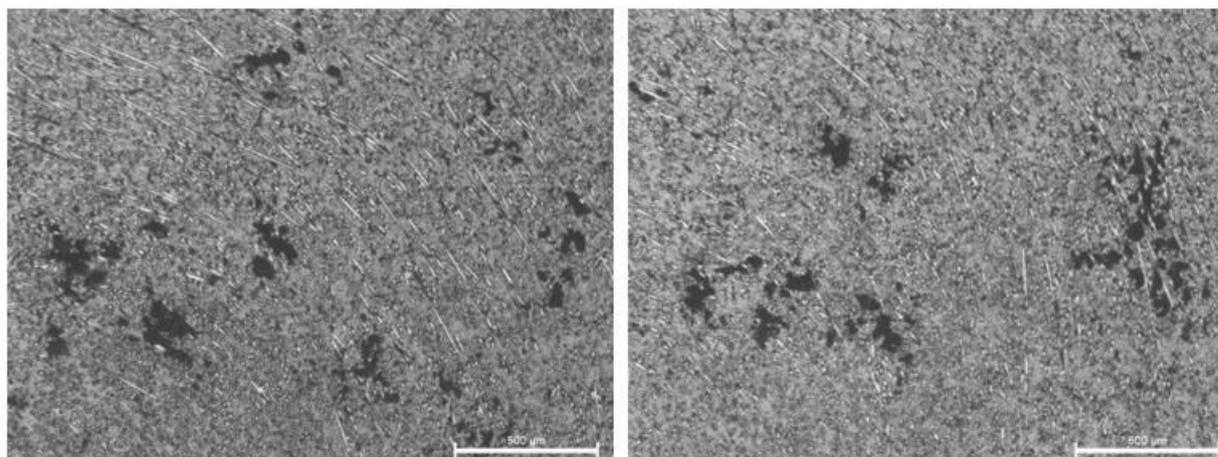


Figura 47 - Ampliação da zona lateral esquerda da amostra (20x): a)500N; b)900N

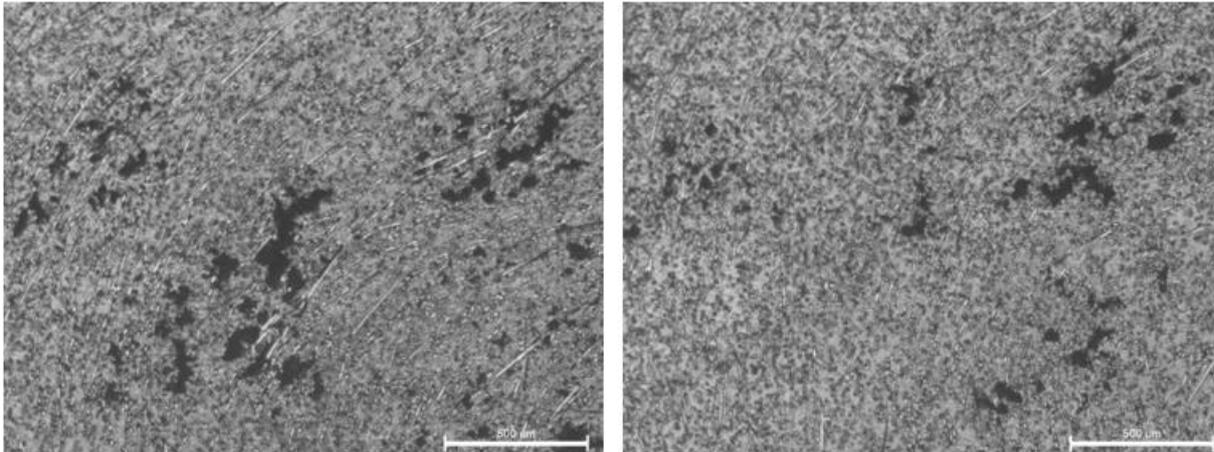


Figura 48 - Ampliação da zona lateral direita da amostra (20x): a)500N; b)900N

A Figura 46 diz respeito a uma ampliação na zona central das amostras onde é possível observar que a peça que suportou apenas 500N de esforço apresenta uma quantidade maior de vazios na sua estrutura, assim como de dimensões também superiores. Este defeito verifica-se na generalidade em todas as zonas representadas, com exceção da Figura 48, que fazem referência à área mais à direita da peça, onde ambas as amostras possuem uma quantidade similar de vazios. Esta análise microscópica ajuda a corroborar o facto de as amostras terem resistido a diferentes valores de esforço mecânico, uma vez que apresentam porosidades diferentes.

Relativamente à dispersão e orientação das fibras, sabe-se que estes são resultado de uma fase de plasticização eficiente dentro do parafuso, responsável por uniformizar o fundido e envolver as fibras de vidro ao longo de todo o canal, mas também do fluxo de material dentro do molde, sendo que a frente de fundido tem um movimento elongacional que privilegia a orientação das fibras e das cadeias ao longo do fluxo. Nas zonas mais periféricas da peça, onde o material contacta com as paredes frias com o molde e as fibras “congelam” nessa posição, este efeito faz com que a orientação das fibras seja naturalmente superior nas zonas externas da peça do que no seu interior, onde a frente de fundido continua a propagar-se. Em peças desta tipologia, onde a espessura da peça é significativamente superior ao ataque, o enchimento dá-se mais lentamente, acontecendo que nas zonas mais internas da peça, as fibras vão-se orientando mais aleatoriamente, devido ao choque entre cadeias que dispõem as fibras de forma diferente no espaço. Este fenómeno é visível na generalidade das imagens, onde se vê nitidamente que a zona inferior da peça, mais próxima da parede do molde, existe uma maior orientação das fibras comparativamente com as restantes imagens, respetivamente de zonas mais centrais da peça.



As imagens que se seguem, referem-se a peças produzidas com o material ROTEC HPPA.

Na Figura 49 apresentam-se imagens do conjunto matriz/flor observado em 3 terminais distintos.

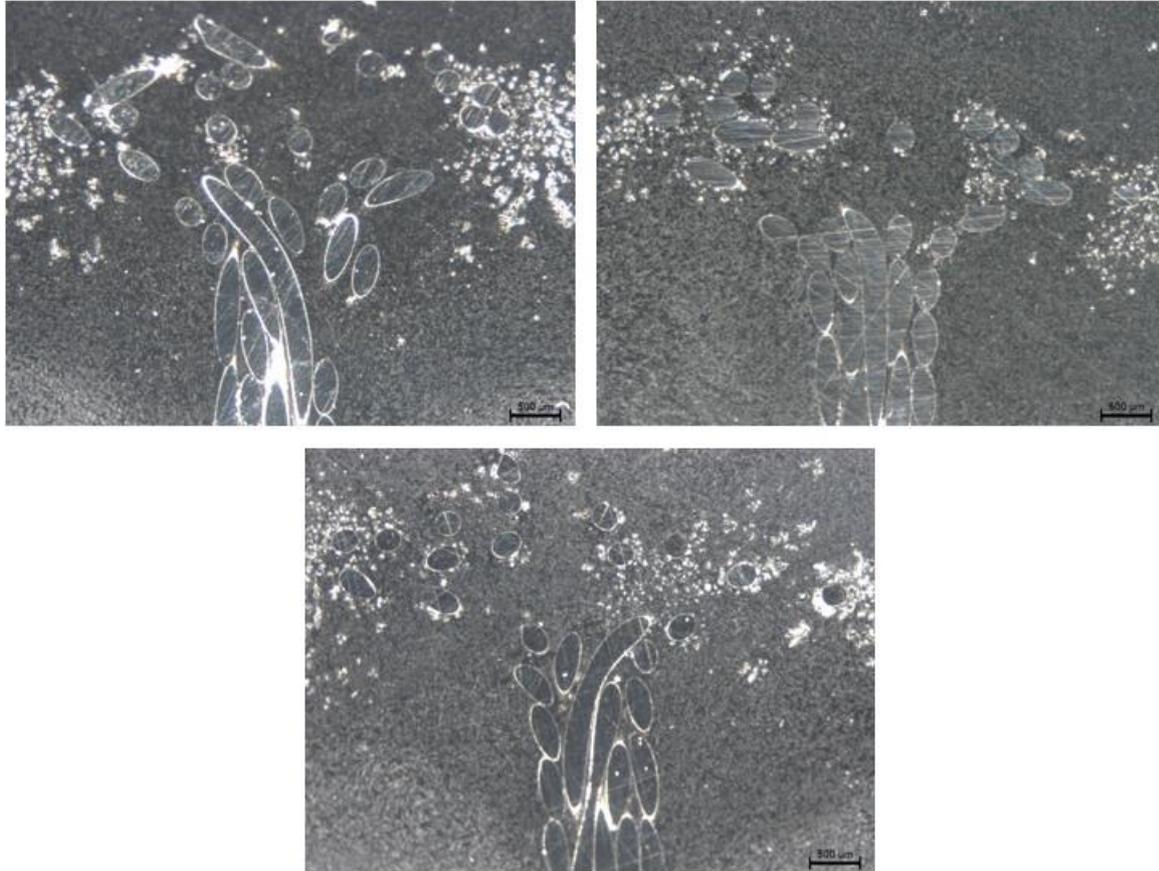


Figura 49 - Amostras de terminais fabricados em ROTEC HPPA com flor de 5mm

Após o corte das amostras na serra de fio de diamante, estas ainda sofreram uma fase de polimento pela qual as amostras anteriores não foram sujeitas. Por este motivo, são mais visíveis alguns microvazios na zona interna da peça.

Todas as amostras possuem uma flor no seu interior com 5mm de diâmetro e, como se pode visualizar, não apresentam todas a mesma geometria, existindo pequenas diferenças entre elas, principalmente na sua zona superior, que se apresenta mais ou menos achatada. Isto permite indicar, mais uma vez, a dificuldade em garantir flores com a mesma geometria, apesar de possuírem as mesmas dimensões.

Nestas amostras, não há vestígios de vazios com dimensões que coloquem em questão a estabilidade mecânica da peça, existindo apenas presença de vazios de pequenas dimensões em zonas



afastadas do local de entrada do cabo, não sendo, por isso, crítico. Esta melhoria na libertação de gases deve-se a um maior tempo de arrefecimento aquando da injeção, assim como o facto de a matéria-prima utilizada ser característica por ter uma absorção de água quase nula, cerca de 1,4% (a 23°C), ao contrário das poliamidas típicas que possuem valores na ordem dos 4%.

A nível de enchimento, não existem falhas de injeção visíveis, tanto no interior da flor, como nos espaços internos entre os filamentos do cabo.

A Figura 50 faz referência a duas peças, observadas na lupa estereoscópica, após ensaio de tração.

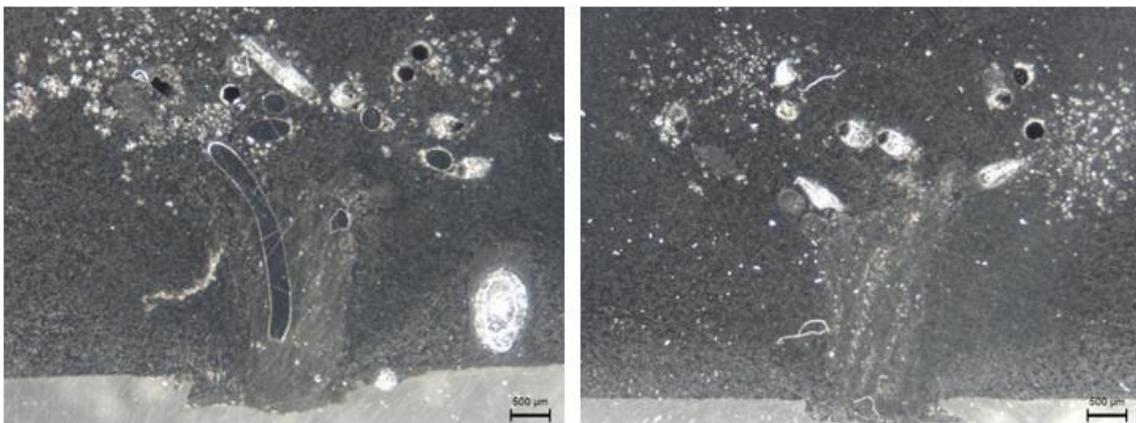


Figura 50 - Análise à zona de corte de amostras em ROTEC HPPA após o ensaio de tração

Como se pode observar, há a presença de alguns filamentos metálicos no interior da peça, mesmo após o ensaio de rebentamento. Este acontecimento suporta a escolha por esta matéria-prima, pois até este momento, os cabos metálicos eram puxados pela base do terminal, originando um corte limpo, sem vestígios de filamentos. A presença de pequenos filamentos metálicos no interior das peças pode indicar que houve um aumento de adesão entre o metal e o plástico com a utilização desta matéria-prima. Sendo assim, o material ROTEC HPPA parece ser o mais adequado para substituição de Zamak em componentes de pequenas dimensões.

No momento do seccionamento das amostras, eram visíveis vestígios de metal também na segunda amostra, no entanto acabaram por desaparecer durante a fase de polimento após a passagem com as lixas de maior granulometria, não sendo então possível visualizá-los na segunda imagem da Figura 50. No final, continua a ser possível observar os espaços internos deixados pelos filamentos de cabo e algumas poeiras de resina epóxi que foram sendo libertadas e se depositaram nos espaços vazios da peça.



Com esta análise microscópica foi possível compreender de melhor forma o diferente comportamento demonstrado por estes terminais no ensaio de tração e o motivo de terem sido capazes de incrementar a resistência mecânica do subconjunto.

5.3. Ensaio de Fadiga

O ensaio de fadiga revela ser de muita importância quando considerado como foco do projeto a indústria automóvel. Sendo um ensaio de extrema relevância na aprovação de projetos relacionados com sistemas de transmissão de movimento como os cabos de porta.

Os terminais foram então capazes de suportar os 100.000 ciclos de acionamento requisitados, sendo que 80.000 ciclos foram realizados à temperatura ambiente, 10.000 a uma temperatura de 80°C e 10.000 a -20°C.

Permitiu então concluir que as peças seriam capazes de suportar o tempo de vida estimado para a sua função, incluindo amplitudes térmicas elevadas.

5.4. Análise económica final

Terminada a parte prática e analisados todos os resultados, seria já possível concluir que o material ROTEC HPPA é uma solução viável na substituição de Zamak em terminais de cabo, principalmente pela sua capacidade proporcionar adesão ao cabo metálico, permitindo assim ao conjunto suportar grandes tensões sem quebrar, o que se torna imprescindível quando se trata de uma aplicação para uma indústria tão exigente como a automóvel.

Ficaria a faltar o fator determinante na substituição de material, que é a análise económica para perceber se efetivamente existiria um ganho monetário com esta alteração e se sim, qual a sua dimensão.

Para efeitos de cálculo foi considerado uma produção da máquina anual exclusiva para este projeto, o que não acontece efetivamente na realidade. Considerou-se uma produção diária de 3 turnos (24h) e anual de 260 dias úteis (valor que a empresa labora num ano), já descontados os dias de férias, feriados, fins de semana, etc.

Obtiveram-se os dados de que este projeto possui uma cadência de produção de 900 peças por hora, ou seja, 7.200 por turno, 21.600 diárias e 5.616.000 anuais.



Como descrito no Capítulo 3, o custo do processo para a produção de 100 peças situa-se nos 4,23€/hora, ou seja, 237.446,8€/ano, sendo este o valor máximo para a produção peças com terminais em plástico.

Recorrendo à folha de cálculo (Anexo 1) criada para o efeito, inserindo a massa específica do material ROTEC HPPA (1,64 g/cm³) e o custo de aquisição que, para grandes quantidades, seria por volta dos 7€/kg. Obtém-se então o custo por 100 peças de 2,97€. Quando considerada a produção das 5.616.000 peças anuais este valor acresce para 166.795,20€.

Como demonstrado por estes cálculos, o custo de alteração de matéria-prima apresenta um ganho económico considerável no seio da empresa, sustentado principalmente pela eliminação do processo de Zamak que apresenta um custo de produção elevado e que terá tendência para aumentar com a subida dos custos energéticos em todo o mundo.

A substituição de material permitiria então à empresa uma poupança de cerca de 70.761,60€ anuais. Este valor poderia ainda ser aumentado com a reciclagem de jitos de plástico, permitindo reduzir o desperdício de material, aplicando cerca de 10-20% de material reciclado nas peças.



6. Conclusões

Este trabalho consistiu no estudo de uma possível alteração de material num componente para a indústria automóvel. A peça em questão é um terminal de bloqueio, inserido num cabo de comando, que deve cumprir a função de transmitir uma força aplicada num ponto A até um ponto B, em inúmeros sistemas dentro de um veículo, desde cabos de porta, cabos de capô/mala, de travão, etc. O objetivo principal deste trabalho foi conseguir obter uma matéria-prima que fosse capaz de substituir o material Zamak nestes terminais e garantir uma força de rotura superior a 800N, em ensaios de tração.

A injeção de terminais em cabos com diferentes diâmetros de flor permitiu concluir que quanto maior o seu tamanho, maior será a resistência fornecida ao conjunto. Este fator é incrementado quando se estende a área de contacto entre terminal e cabo, com a aplicação de uma “gola”. Esta característica exige que o molde possua centradores de cabo para que ocorra uma distribuição de material em toda a sua volta.

Por outro lado, a variação de posicionamento da flor no molde e o aumento da temperatura do molde, não permitiram obter nenhum ganho na resistência das peças. Por conseguinte, não há necessidade de alterar os parâmetros atuais do processo, a este respeito.

O ensaio de incidência por cavidade permitiu concluir que ocorrem variações nos resultados quando se aplicam diferentes cabos metálicos no produto. O cabo 68C apresentou resultados muito pobres, pois este cabo apresenta um revestimento em óleo que não favorece a adesão do polímero à flor e por conseguinte, a sua resistência é reduzida. O cabo 68CK, sem presença de óleo, apresentou apenas 3 situações em que os terminais possuíram valores de força de rotura inferiores a 800N. Estes estudos foram efetuados considerando o revestimento da flor com o material plástico Durethan AKV50H. A variabilidade destes resultados é muito grande, sendo justificada pela presença de vazios superior à desejada, bem como falhas no preenchimento da flor.

Pretendendo obter somente valores superiores a 800N, decidiu-se testar a matéria-prima ROTEC HPPA. Pela utilização deste material no revestimento de cabos 68CK, com flores de grande dimensão (5mm) e uma gola de plástico, conseguiu-se obter os resultados desejados. Em 80 cabos, obteve-se uma média de força de rotura de cerca de 1300N, com um desvio padrão de 144N e nenhuma amostra com uma força de rotura abaixo dos 1000N. A caracterização à estrutura destes terminais, feita por microscopia ótica, permitiu observar que houve um melhor enchimento da peça, havendo uma redução significativa de vazios. Nas peças analisadas após-ensaio de tração, verificou-se a presença de pequenos filamentos metálicos agarrados na matriz, o que poderá indicar um aumento da adesão entre os dois



materiais. Este facto é também comprovado pelo rebentamento mais agressivo do terminal aquando dos ensaios de tração, ao contrário do observado com o material Durethan, onde se verificou que o rebentamento originava um corte limpo na base dos terminais.

Por último, foram efetuados ensaios de fadiga aos terminais produzidos em ROTEC HPPA. Os terminais foram colocados numa câmara climática com um peso de 50N na base do cabo, sendo sujeitos a 80.000 ciclos de acionamento à temperatura ambiente, 10.000 a -40°C e 10.000 a 80°C, fazendo um total de 100.000 ciclos, valor padrão exigido por grande parte dos fabricantes quando se trata de produtos deste género. Todos os cabos testados se mantiveram intactos após o ensaio de fadiga, onde se conclui que o terminal produzido neste novo material polimérico está apto para substituir os terminais de Zamak. Viabiliza-se assim o material ROTEC HPPA para a aplicação pretendida.

A substituição de material permite um ganho anual na ordem dos 70.000€ e demonstra ser uma opção viável no futuro para esta tipologia de produtos.



7. Bibliografia e Webgrafia

- [1] Wu, X., Zhang, C., Du, W., An Analysis on the Crisis of “Chips shortage” in Automobile Industry, Journal of Physics: Conference Series, 1971: 012100 (2021).
- [2] Automotive Industry (7 de fevereiro de 2022). Retirado de <https://www.britannica.com/technology/automotive-industry>
- [3] Happian-Smith, J. (2002). An Introduction to Modern Vehicle Design. (J. Happian-Smith, Ed.) (Fisrt). Woburn: Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford. ISBN: 9780080523040
- [4] Automotive Plastics & Composites, Elsevier Advanced Technology, Oxford 1999. ISBN 1-85617-349-6
- [5] Portugal Global nº87 (2016). Indústria automóvel e componentes. AICEP, Lisboa.
- [6] Indústria Automóvel e Componentes Setor Fortemente Exportador (16 de março). Retirado de <https://afia.pt/industria-automovel-e-componentes-setor-fortemente-exportador/>
- [7] Associação Nacional da Indústria de Moldes, “A Indústria Portuguesa de Moldes,”, Marinha Grande, 2013.
- [8] Pradeep, S., A., iyer, R., K., Kazan, H., Pilla, S., Automotive Applications of Plastics: Past, Present and Future, Applied Plastics Engineering Handbook. 30: 651-673 (2017).
- [9] Patil, A., Patel, A., Purohit, R., An overview of Polymeric Materials for Automotive Applications, Materials Today: Proceedings. 4: 3807-3815 (2017).
- [10] Bouzouita, A., Elaboration of polyactide-based materials for automotive application: study of structure-process-properties interactions. Tese de Doutoramento em Ciências da Engenharia Universidade de Valenciennes (2016).
- [11] Sehanobish K., Engineering Plastics and Plastic Composites in Automotive Applications. 2009: SAE International, Warrendale, PA. ISBN: 978-0-7680-1933-9
- [12] Product Catalog. Cablecraft. Indiana, 2017.
- [13] D. Chen, Y. Yun and A. D. Deshpande, Experimental characterization of Bowden cable friction, IEEE International Conference on Robotics and Automation (*ICRA*), 2014, pp. 5927-5933.
- [14] Systems for doors and seats, FICOSA. (4 de abril de 2022). <https://www.ficosa.com/products/systems-for-doors-and-seats/>



- [15] Hélder Alexandre Gonçalves Pinto, Estudo e Desenvolvimento de Moldes de Terminais de Cabo em Ligas Zamak. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto (2018).
- [16] Suzuki, S., Fukumoto, R., Ohhashi, M., Yamada, K., Development of Power Sliding Door (PSD) System with Push-Pull Cable Driving Method. 2000: SAE International, Detroit. ISSN: 0148-7191.
- [17] CMA Cable Manufacturing & Assembly CO. INC (2015). Control Cables Design Guide, Atlanta. 1.800.586.8404
- [18] Sousa, V., F., C., Braga, E. et al, Improving the design of Nozzles used in Zamak High-pressure Die-Casting Process, FME Transactions. 49:1005-1013 (2021).
- [19] Costello, G.A., Theory of Wire Rope. 1997: Springer Science & Business Media, New York. ISBN: 0-387-98202-7
- [20] Manual Técnico de Cabos. 2012: CIMAF, São Paulo.
- [21] Shaws Wire Ropes, Product Catalogue, Nova Zelândia, 2017.
- [22] Parâmetros de Zamak. Dossier de Terminais a Injetar (1ª Injeção). Fico Cables Lda., 2020.
- [23] CMA Cable Manufacturing and Assembly Co. Inc., Whitepapers, Swaged vs. Die Cast Cable Components.
- [24] QIT 617. Dossier Técnico de Qualidade. Fico Cables Lda., 2013.
- [25] <https://www.lenntech.com/periodic/elements/zn.htm> (15 de março)
- [26] Pola A, Tocci M, Goodwin FE. Review of Microstructures and Properties of Zinc Alloys. Metals; 10(2):253 (2020).
- [27] Rollez, D., Pola, A., Prenger, F., Zinc alloy family for foundry purposes. World Metall, 68:354-358 (2015).
- [28] Lynch, R., F., Zinc: Alloying, Thermomechanical Processing, Properties, and Applications, Encyclopedia of Materials: Science and technology, Elsevier: 9869-9883 (2001).
- [29] Campbell, J., Complete Casting Handbook, 1st ed., Butterworth-Heinemann, Oxford UK, 2011. ISBN-13: 978-1-85617-809-9.
- [30] Steven Richard Pires de Oliveira, High Pressure Die Casting of Zamak alloys. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2018).



- [31] Pinto, H., A., Silva, F., J., G., Martinho, R., P., Campilho, R., D., S., G., Pinto, A., G., Improvement and validation of Zamak die casting moulds, *Procedia Manufacturing* 38:1547-1557 (2019).
- [32] Zinc Alloys: Properties, Production, Processing and Applications (11 de abril de 2022). Retirado de <https://matmatch.com/learn/material/zinc-alloy>
- [33] ASTM-B86-13 Standard Specification for Zinc and Zinc-Aluminium (ZA) Alloy Foundry and Die Castings, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2013.
- [34] Zinc Casting Metals (11 de março de 2022). Retirado de <https://www.dynacast.com/en/knowledge-center/material-information/zinc-casting-metals>
- [35] Joaquim Barbosa, Introdução à Tecnologia da Fundição. Guimarães, 2003.
- [36] Catarina Ferreira (2017). Mitigação das Causas Geradoras de Defeitos em Peças Metálicas Injetadas de Caráter Estético. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2017).
- [37] Prof. Rundman, K., B., Metal Casting, Dept. of Materials Science and Engineering, Michigan Tech. University,
- [38] Hurst, S. (1999). Metal Casting Appropriate Technology. Intermediate Technology Publications; London. ISBN-10: 1853391972, ISBN-13: 978-1853391972
- [39] Rodrigo Sá Morais Campos Costa, Aumento de fiabilidade e redução de defeitos numa indústria de fundição injetada. Dissertação de Mestrado em Engenharia e gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2018).
- [40] What's the Difference Between Hot-Chamber and Cold-Chamber Die Casting? (24 de janeiro de 2022). Retirado de <https://monroeengineering.com/blog/hot-chamber-vs-cold-chamber-die-casting-whats-the-difference/>
- [41] Eduardo Miguel Guimarães Ferreira Braga, Otimização do Processo de Injeção de Zamak. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto (2015).
- [42] M., N., AURAS. A., P., Processos de fabricação - Fundição. Florianópolis, SC: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. 2007. 27p.
- [43] Vinarcik, E. J., High Integrity Die Casting Processes. John Wiley & Sons, New York, 2003. ISBN: 0-471-20131-6



- [44] American Foundry Society, International Atlas of Casting Defects, Des Plaines Illinois. 1974. ISBN: 978-087-4330533.
- [45] Bil, C., Stjepandic, J. Wognum, N., Peruzzini, M., Pellicciari, M. Transdisciplinary Engineering Methods for Social Innovation of Industry 4.0, 2018. ISBN: 978-1-61499-898-3.



8. Anexos

Anexo 1 – Folha de cálculo do custo do processo POM + Zamak

Massa específica material (g/cm ³)	1,41
Volume total (cm ³)	0,1292
Massa total peça (g)	0,182172
Peso jito (g)	1,48
Massa total shot (g)	2,208688
Massa 100 pcs (g)	55,2172
Custo hora-máquina Baby (€/h)	24,23
Tempo de ciclo 4 pcs (s)	12,1
Tempo de ciclo 100 pcs (h)	0,084027778
Custo máquina 100 pcs (€)	2,035993056
Preço matéria-prima (€/kg)	2,77
Custo matéria-prima 100 pcs (€)	0,152951644
Custo total 100 pcs (€)	2,1889447
Custo 100 pcs POM (€)	2,18
Custo 100 pcs Zamak (€)	2,05
Custo total 100 pcs atual (€)	4,23



Anexo 2 – Ficha técnica do material Durethan AKV50H 2.0

Durethan AKV50H2.0 901510

PA 66, 50 % glass fibers, injection molding, heat-aging stabilized

ISO Shortname: ISO 16396-PA 66,GF50,GHR,S14-160

Property	Test Condition	Unit	Standard	guide value ¹ <small>g.u.m. cond.</small>	
Rheological properties					
C Molding shrinkage, parallel	60x60x2; 290 °C / MT 80 °C; 600 bar	%	ISO 294-4	0.35	
C Molding shrinkage, transverse	60x60x2; 290 °C / MT 80 °C; 600 bar	%	ISO 294-4	0.9	
Post- shrinkage, parallel	60x60x2; 120 °C; 4 h	%	ISO 294-4	0.05	
Post- shrinkage, transverse	60x60x2; 120 °C; 4 h	%	ISO 294-4	0.1	
Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)					
C Tensile modulus	1 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	16000	10200
C Tensile Stress at break	5 mm/min	MPa	ISO 527-1,-2	230	160
C Tensile Strain at break	5 mm/min	%	ISO 527-1,-2	2.6	4
C Charpy impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	95	95
C Charpy impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eU	100	100
C Charpy notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	15	23
C Charpy notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 179-1eA	13	15
Izod impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1U	90	90
Izod impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1U	90	85
Izod notched impact strength	23 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	15	20
Izod notched impact strength	-30 °C	kJ/m ²	ISO 180-1A	13	13
Flexural modulus	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	14700	10000
Flexural strength	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	360	250
Flexural strain at flexural strength	2 mm/min	%	ISO 178-A	3.2	4.5
Flexural stress at 3.5 % strain	2 mm/min	MPa	ISO 178-A	230	
C Puncture maximum force	23 °C	N	ISO 6603-2	1100	1200
C Puncture maximum force	-30 °C	N	ISO 6603-2	1000	
C Puncture energy	23 °C	J	ISO 6603-2	4	5
C Puncture energy	-30 °C	J	ISO 6603-2	3	
Ball indentation hardness		N/mm ²	ISO 2039-1	246	150
Thermal properties					
C Melting temperature	10 °C/min	°C	ISO 11357-1,-3	261	
C Temperature of deflection under load	1.80 MPa	°C	ISO 75-1,-2	247	
C Temperature of deflection under load	0.45 MPa	°C	ISO 75-1,-2	250	
Vicat softening temperature	50 N; 120 °C/h	°C	ISO 306	>240	
C Coefficient of linear thermal expansion, parallel	23 to 55 °C	10 ⁻⁴ /K	ISO 11359-1,-2	0.2	
C Coefficient of linear thermal expansion, transverse	23 to 55 °C	10 ⁻⁴ /K	ISO 11359-1,-2	0.8	
C Burning behavior UL 94	1.5 mm	Class	UL 94	HB	
C Burning behavior UL 94	0.75 mm	Class	UL 94	HB	
C Oxygen index	Method A	%	ISO 4589-2	27	
Resistance to heat (ball pressure test)		°C	IEC 60695-10-2	258	
Glow wire test (GWFI)	2.0 mm	°C	IEC 60695-2-12	600	
Burning behavior US-FMVSS302	>=1.0 mm		ISO 3795	passed	



Anexo 3 – Ficha técnica do material ROTEC HPPA

TECHNICAL DATA SHEET ROTEC[®] HPPA GF50 EXP3121

ROMIRA

HPPA, injection moulding grade, 50% glass fibre reinforced, high strength, low moisture absorption, easy-flowing, high surface quality

PROPERTY	Test Method	Condition	Unit	Value*	
MECHANICAL.....					
				Dry as molded	Conditioned**
Tensile Modulus	DIN EN ISO 527	1 mm/min 23 °C	MPa	20,000	-
Tensile Strength	DIN EN ISO 527	5 mm/min 23 °C	MPa	275	-
Elongation at Break	DIN EN ISO 527	5 mm/min 23 °C	%	7	-
Flexural Modulus	DIN EN ISO 178	2 mm/min 23 °C	MPa	17,700	-
Flexural Strength	DIN EN ISO 178	2 mm/min 23 °C	MPa	400	-
Notched Impact Strength (Charpy)	DIN EN ISO 179/1eA	80 x 10 x 4 mm 23 °C	kJ/m ²	12	-
Impact Strength (Charpy)	DIN EN ISO 179/1eU	80 x 10 x 4 mm 23 °C	kJ/m ²	70	-
PHYSICAL.....					
Density	DIN EN ISO 1183	23 °C	g/cm ³	1.64	-
Moisture Absorption (equilibrium)	DIN EN ISO 62	23 °C, 50 % r.h.	%	-	0.8 - 1.0
Water Absorption (saturation in water)	DIN EN ISO 62	23 °C	%	1.0 - 1.2	-
THERMAL.....					
Heat deflection temperature (HDT/A)	DIN EN ISO 75-1	1,8 MPa	°C	227	-
Vicat Softening Temperature (B 50)	DIN EN ISO 306	50 N, 50 °C/h	°C	-	-
Melt Mass-Flow Rate (MFR)	DIN EN ISO 1133	275 °C, 5 kg	g/10 min	12	-
Processing Shrinkage	DIN EN ISO 294-4	23 °C	%	-	-
Flammability (own test)	UL94	1.5 mm	--	HB	-



Anexo 4 – Mangueiras para aquecimento do molde

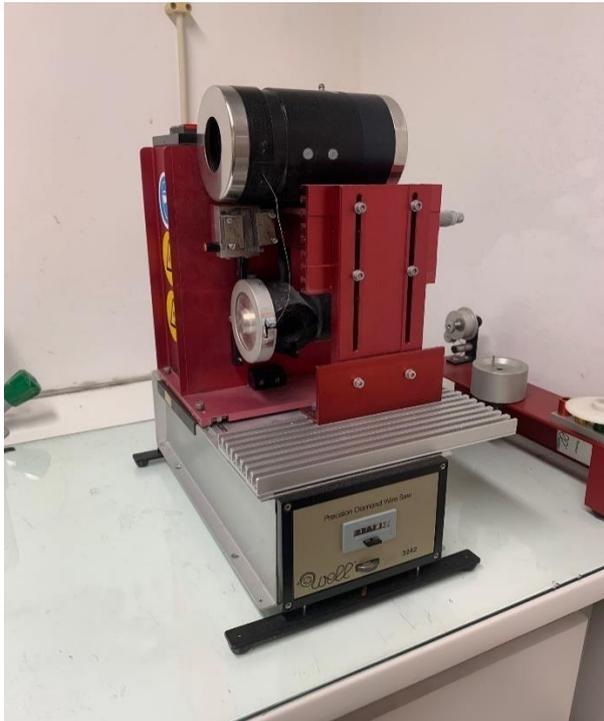


Anexo 5 – Estufa





Anexo 6 – Serra de fita de diamante do DEP



Anexo 7 – Orientação de corte da amostra

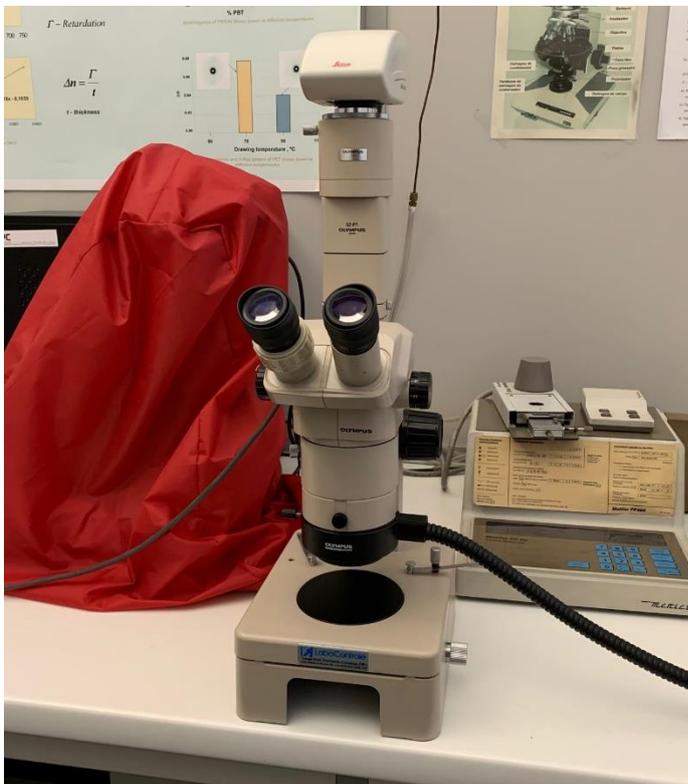




Anexo 8 – Microscópio ótico OLYMPUS BH 2



Anexo 9 – Lupa estereoscópica OLYMPUS SZ-PT



**Anexo 10 – Valores obtidos no ensaio da 1ª Fase**

Ensaio	Posicionamento da flor	
	Intermédio	Avançado
1	341,8	409,8
2	617,5	350,7
3	603,3	591,5
4	424,4	382,9
5	382,2	393,6
6	348,5	334,4
7	629,3	373,9
8	379	361,7
9	554,5	491,4
10	463	441,3
11	339	318,4
12	323,5	360,2
13	400,6	322,6
14	577,1	361,8
15	641,8	338,7
16	362,1	422
17	493	502,9
18	543,5	379,1
19	573,7	408,9
20	366	415,9
21	353,8	314,4
22	409	503,7
23	407,8	364,1
24	422,6	401,2
25	625,7	379,7
26	457,3	611,7
27	659,2	761,9
28	658,9	684,8
29	654,4	738,8
30	61,2	311,1
31	303,8	282,6
32	315,2	264,1



Ensaio	Tamanho da flor (mm)		
	2,5	3	3,5
1	771,6	756,6	599,6
2	36,5	429,2	175,3
3	104,6	612,4	546,4
4	408	458,2	144,3
5	307,9	102,5	825,9
6	566,7	362,5	835,7
7	638,7	661,6	800
8	271,2	738,3	772
9	264,2	683,8	720,3
10	671,5	802,9	395,2
11	167,2	700,6	752
12	199,9	699,6	356,3
13	0,2	229,5	204,6
14	18,7	134,9	712,1
15	479,4	157,5	723,9
16	417	478,1	709,1
17	504,7	152,2	476
18	617	348,1	195,5
19	85,3	734	786,6
20	49,1	800	884,5
21	459,3	491,7	286,2
22	470,9	726,3	836,9
23	717,9	778,3	287,2
24	416,7	695,2	811,1
25	345,4	777,9	363,4
26	252,3	410,9	443
27	473	676,5	852,1
28	689	701,3	265,4
29	418,9	648,1	137,5
30	368,2	367,2	770,5
31	447,6	657,6	141
32	283	690,9	242



Ensaio	Cabo com gola de plástico			
	2,5mm	3mm	3,5mm	4,4mm
1	412,6	474,6	643,5	904,5
2	384,3	678,4	760,4	588,9
3	563,3	168,6	793,8	886,3
4	536,8	727,6	788,1	744,2
5	152,2	783,1	823,3	918,5
6	416,5	781,9	298,1	911,7
7	374,9	760,1	627,5	858,4
8	300	596,8	779,9	707,9
9	286,8	697,8	528,8	786,7
10	517,8	234,6	693,7	855
11	340,7	143,9	506,5	828,4
12	230,2	665,1	757,1	689,1
13	380	175,2	846,7	1020,7
14	246	169,4	838,7	536,7
15	501,2	747,7	610,4	889
16	254,6	623,6	911,9	826,6
17	452	745,9	691,9	897,2
18	401,6	815,8	793,5	935,2
19	421,3	754,2	781,8	742,9
20	511,1	674,7	805,9	876,2
21	571,9	688,9	726,1	806,5
22	225,5	319,8	798,1	892,4
23	696,5	442,1	797,8	836,9
24	230,7	251	571,7	869,8
25	396,8	704,2	786,7	760
26	177,1	689	485,8	761,7
27	485,1	528,9	638,4	863
28	655,5	668,6	661,3	829,1
29	225,5	701,7	860,9	859,3
30	428,3	567,3	900,8	829,8
31	400	442,3	770,3	878
32	400	459,9	886	966,2



Anexo 11 – Valores obtidos nos ensaios da 2ª Fase

Flor 3mm (semana 1)		Flor 3mm (semana 2)		Flor 3mm (semana 3)	
Ensaio	Resistência à tração (N)	Ensaio	Resistência à tração (N)	Ensaio	Resistência à tração (N)
1	928,3	1	837,1	1	553,3
2	920,8	2	689,9	2	700,9
3	898,4	3	786,6	3	832,9
4	328,4	4	452	4	774
5	766,5	5	745,7	5	791,4
6	829,3	6	729,7	6	714,8
7	885,2	7	674,6	7	856,4
8	820,6	8	866	8	741,7
9	758,6	9	736,2	9	827,9
10	966,5	10	828,4	10	757,8
11	794,2	11	813	11	758,7
12	859,3	12	650,2	12	780,1
13	732	13	840,5	13	610,9
14	857,7	14	713,6	14	690,1
15	812,2	15	740	15	833,2
16	847,6	16	544	16	783,4
17	756,9	17	890,1	17	808,9
18	882,9	18	778,5	18	610,5
19	955,9	19	886,3	19	401,4
20	1004,9	20	630	20	788,3
21	941,7	21	662,7	21	778,9
22	911,6	22	596,5	22	764,4
23	760,7	23	908,3	23	540,2
24	977,6	24	700	24	792,6
25	907,6	25	872,9	25	728,7
26	835,1	26	832,6	26	639,5
27	994,8	27	634,1	27	853,6
28	956,1	28	469	28	568,5
29	918,2	29	706,8	29	522,8
30	911	30	840,8	30	589,6
31	956	31	787,6	31	802,9
32	815,6	32	897	32	716,3



Flor 4mm (semana 1)		Flor 4mm (semana 2)		Flor 4mm (semana 3)	
Ensaio	Resistência à tração (N)	Ensaio	Resistência à tração (N)	Ensaio	Resistência à tração (N)
1	1001,2	1	581	1	772,3
2	946,5	2	953,1	2	736
3	975,8	3	900,2	3	400,7
4	1031,2	4	996	4	524,4
5	848,7	5	436,4	5	955,5
6	766,4	6	959,3	6	416,3
7	1105,9	7	655,5	7	781,3
8	1039,7	8	710,8	8	350,2
9	785,2	9	947,9	9	869,6
10	957,6	10	438	10	865,9
11	560,4	11	570,2	11	529,4
12	698,3	12	483,7	12	955,7
13	689,7	13	772,6	13	717
14	628,9	14	924,8	14	775,8
15	926,1	15	1049,2	15	945,1
16	1027,7	16	888,1	16	817,6
17	981,3	17	535,4	17	788,1
18	1020,4	18	631,9	18	667,2
19	1124,5	19	958,4	19	566,4
20	969,5	20	853,2	20	765,4
21	1006,4	21	859,9	21	424,6
22	580,1	22	842,4	22	576,5
23	865,7	23	891,9	23	519,9
24	403,2	24	741,1	24	856,7
25	819,4	25	512,7	25	925
26	848,5	26	975	26	744,6
27	891,5	27	788,4	27	425,3
28	921,1	28	575	28	402,1
29	966,8	29	575,4	29	534,2
30	960,8	30	692,2	30	606,2
31	663	31	877,8	31	547,3
32	810,7	32	546,3	32	823,5



Flor 5mm (semana 1)		Flor 5mm (semana 2)		Flor 5mm (semana 3)	
Ensaio	Resistência à tração (N)	Ensaio	Resistência à tração (N)	Ensaio	Resistência à tração (N)
1	1089,6	1	1096,2	1	1063,9
2	1092,2	2	560,9	2	987,2
3	1130,7	3	534,1	3	996,6
4	1091,2	4	1008,8	4	990,1
5	1038,8	5	522,4	5	822,7
6	1180,4	6	1016,5	6	949
7	1193,2	7	1095,2	7	948,2
8	812,7	8	1039,3	8	964,3
9	623,2	9	850,1	9	1030,5
10	1106,1	10	760,1	10	594
11	1175,5	11	972,6	11	966,5
12	1015,1	12	1037,4	12	985,7
13	769,4	13	686,7	13	450,9
14	662	14	829,3	14	1017,6
15	701,8	15	1060,5	15	479,2
16	838,9	16	858,4	16	1039,5
17	501,8	17	1044,6	17	935,1
18	988,7	18	1014,6	18	946,1
19	810,7	19	887,7	19	1034,2
20	835	20	885,3	20	1020
21	1135,6	21	961,8	21	1037,8
22	1104,7	22	591,2	22	1026,7
23	967,1	23	1074,2	23	550,6
24	1183,1	24	1134,3	24	811
25	1165,3	25	920,1	25	843,4
26	826,9	26	1157,3	26	1029
27	777,6	27	951,8	27	897,2
28	592,4	28	931,4	28	509,2
29	877,5	29	989,6	29	1080,4
30	1086,7	30	976,1	30	1060,5
31	950,2	31	915,6	31	900,7
32	947,6	32	914,1	32	920,4

**Anexo 12 – Valores obtidos no ensaio com molde aquecido**

Ensaio	Resistência à tração (N)
1	960,7
2	714,2
3	831,5
4	1026,6
5	1023,8
6	605
7	1036,7
8	1032,6
9	1033,3
10	471
11	540
12	1032,6
13	1092,3
14	1029,3
15	1008,2
16	1036,6
17	980,3
18	964,6
19	1011
20	993,8
21	735,9
22	717,1
23	776,3
24	852,2
25	1042,4
26	964,7
27	980,1
28	994,5
29	585,2
30	1056,5
31	648,9
32	678,6
33	682,4
34	1067,7
35	1023,7
36	503,7
37	1024,7
38	641,3
39	1013,9
40	611,9



41	1041,1
42	980,7
43	905
44	858
45	750,1
46	1039,1
47	659,5
48	602,9
49	801,6
50	664,6
51	992,7
52	1022,1
53	1018,7
54	990,5
55	970,9
56	480,6
57	921,7
58	969,5
59	632,3
60	689,4
61	979
62	485,3
63	1071,3
64	1061,4
65	614,4
66	806,7
67	1002,8
68	675,8
69	983
70	965,4
71	987,1
72	733,5
73	523,7
74	600,7
75	537,2
76	1022,6
77	1013,5
78	967
79	958,4
80	993,6

**Anexo 13 – Valores obtidos com matéria-prima ROTEC HPPA**

Cabo 68C	
Ensaio	Resistência à tração (N)
1	1246,8
2	1185,7
3	1129,6
4	1316,2
5	1064,6
6	803,2
7	1300,8
8	1367
9	1312,5
10	1205
11	1253,8
12	693,9
13	1219,5
14	775,7
15	1067,8
16	1183,4
17	1385,6
18	954,5
19	791,9
20	1310,8
21	1157,6
22	1281,6
23	854,2
24	1176,2
25	1105
26	1080,5
27	905,7
28	1496,2
29	1332,1
30	1167,8
31	716,2
32	595,8
33	1195,7
34	836,8
35	1335,3
36	1118,3
37	1222,3



38	1381,7
39	1210,3
40	1177
41	1176,9
42	815,9
43	1121,5
44	1164,5
45	1113,4
46	1111,4
47	1055,9
48	482,7
49	1112,3
50	1280,8
51	1128,4
52	1418,4
53	482,2
54	1251,9
55	1060,5
56	786
57	1372,6
58	965,4
59	1176,8
60	1203
61	1159,9
62	1132,4
63	1288,2
64	1281,5
65	1370,9
66	1183
67	1183,1
68	1224,4
69	1113
70	1110
71	1085
72	899,4
73	1351
74	1160,3
75	1318,8
76	749,9
77	1266,9
78	1137,7
79	961,7
80	1073,4



Cabo 68CK	
Ensaio	Resistência à tração (N)
1	1217,1
2	1342,7
3	1229,8
4	1079,1
5	1292,9
6	1103,8
7	1172,4
8	1174,7
9	1206,3
10	1212,1
11	1207,2
12	1226,1
13	1441,9
14	1365,5
15	1155,6
16	1021,2
17	1323,1
18	1342,5
19	1274,8
20	1020,3
21	1012,8
22	1219,9
23	1476,1
24	1235,3
25	1231
26	1178,5
27	1328,1
28	1230,2
29	1355,3
30	1367,7
31	1101,9
32	1217,7
33	1264,7
34	1438,6
35	1292,6
36	1183,7
37	1064,6
38	1309,3
39	1376,8



40	1448,8
41	1415,1
42	1592,4
43	1556,4
44	1430,8
45	1234,2
46	1486,8
47	1440,3
48	1331,4
49	1444,5
50	1570
51	1522,6
52	1442,4
53	1253,7
54	1399,6
55	1465,4
56	1369,3
57	1463,6
58	1194,6
59	1288,9
60	1396,8
61	1451,5
62	1199,7
63	1525
64	1501,9
65	1366,6
66	1447,8
67	1126
68	1508,2
69	1112,7
70	1207
71	1249,3
72	1283,3
73	1380,9
74	1291,8
75	1484,9
76	1205,6
77	1521,1
78	1007,1
79	1242,5
80	1439,2



Anexo 15 – Condições de processamento com ROTEC HPPA



