

Simulação numérica da dispersão de cargas na moldação por injeção para a cromagem de peças em ABS

Bruno Ribeiro

UMinho | 2024



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Miguel Costa Ribeiro

Simulação numérica da dispersão de cargas na moldação por injeção para a cromagem de peças em ABS

Dezembro de 2024

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Miguel Costa Ribeiro

Simulação numérica da dispersão de cargas na moldação por injeção para a cromagem de peças em ABS

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do/da/de
Professor Doutor Fernando Moura Duarte
Engenheiro Paulo Pereira

Dezembro de 2024

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-CompartilhaIgual
CC BY-NC-SA
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

AGRADECIMENTOS

A realização desta tese só foi possível com o apoio e contribuição de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de expressar minha profunda gratidão.

À FEHST Componentes, Lda, pela oportunidade de realização da dissertação nas suas instalações e pela disponibilização de todas as condições necessárias para a efetuar.

Ao Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho, pelo equipamento necessário para a realização dos ensaios práticos.

Ao Eng. Tiago Fernandes, por todo o auxílio na Universidade do Minho.

Agradeço ao meu professor, Fernando Moura Duarte, pela orientação, paciência e valiosas sugestões ao longo deste trabalho. A sua dedicação e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Eng. Pedro por toda a partilha de conhecimento, da sua experiência e disponibilidade que demonstrou ser fulcral para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Eng. Paulo Pereira, meu orientador, agradeço profundamente pela paciência, dedicação e confiança depositada em mim ao longo de todo o processo. Todos os conselhos valiosos e disponibilidade para discutir ideias e resolver questões foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial à minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio incondicional, incentivo e compreensão ao longo de todo o percurso académico. Sem vocês, nada disso seria possível.

A todos, o meu 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

A metalização de peças plásticas na indústria é predominantemente realizada por um processo que envolve duas etapas principais: a aplicação de uma camada metálica sem o uso de corrente elétrica, com o objetivo de tornar a superfície do plástico condutora e a deposição metálica com a aplicação de corrente elétrica. A primeira fase, essencial para transformar a superfície isolante do plástico numa condutora, requer o uso de diversos produtos químicos que podem ser prejudiciais tanto ao meio ambiente quanto à saúde pública. Este estudo visa explorar a possibilidade de eliminar essa etapa inicial por meio do uso de polímeros condutores, especificamente compósitos com cargas condutoras, que proporcionariam às peças a condutividade elétrica necessária.

De modo a estudar o efeito da dispersão de cargas e taxas de corte em peças injetadas em ABS na capacidade de metalização de peças por *Direct Eletroplating*. recorreu-se à moldação por compressão, tecnologia sujeita a taxas de corte praticamente nulas observando que a metalização é satisfatória, comprovando que o material utilizado era capaz de metalizar. De seguida, com o auxílio do programa de simulação, Moldex3D® estudou-se a correlação entre distribuição de cargas a diferentes taxas de corte, variando diferentes parâmetros do processo de forma a tentar observar uma vinculação entre os resultados na simulação e a metalização no caso real. Concluímos que na moldação por injeção, com as condições presentes, não é possível reduzir as taxas de corte o suficiente para apresentar uma metalização satisfatória.

Palavras-chave: Eletrodeposição; Polímeros Condutores; Simulação; Taxas de corte

ABSTRACT

The metallization of plastic parts in the industry is predominantly carried out by a process that involves two main stages: the application of a metallic layer without the use of electric current, with the aim of making the plastic surface conductive, and metallic deposition with the application of electric current. The first phase, which is essential for transforming the plastic's insulating surface into a conductive one, requires the use of various chemical products which can be harmful to both the environment and public health. This study aims to explore the possibility of eliminating this initial stage using conductive polymers, specifically composites with conductive fillers, which would provide the parts with the necessary electrical conductivity.

In order to study the effect of load dispersion and shear rate in ABS injection moulded parts on the metallization capacity of parts by Direct Electroplating, compression moulding was used, a technology subject to practically zero shear rates, observing that the metallization was satisfactory, proving that the material used was capable of metallizing. Next, we used the Moldex3D® simulation programme to study the correlation between load distribution at different shear rates, varying different process parameters in order to try to observe a link between the simulation results and metallization in the real case. We concluded that in injection moulding, with the present conditions, it is not possible to reduce the shear rates enough to achieve satisfactory metallization.

Keywords: Electroplating; Conductive Polymers; Simulation; Shear rate

ÍNDICE

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros ii

Agradecimentos iii

Declaração de Integridade iv

Resumo v

Abstract vi

Lista de Abreviaturas e Siglas ix

Lista de Figuras x

Lista de Tabelas xii

1. Introdução 1

1.1 Empresa 1

1.2 Enquadramento 2

1.3 Objetivos 3

2. Estado de Arte 4

2.1 Moldação por Injeção 4

2.2 Processo de metalização atual na Fehst Componentes 8

2.3 Polímeros Condutores 9

2.4 Teoria da percolação 10

2.5 Moldex3D® 10

2.6 Método de Elementos Finitos (FEM) 12

2.7 Estudos realizados 13

3. Apresentação e discussão de resultados 16

3.1 Validação da matéria-prima 16

3.2 Moldação por injeção – Aprovação do Modelo 19

3.2.1 Procedimento Numérico 19

3.2.2 Procedimento Experimental 22
3.3 Influência da forma de cargas na sua distribuição e taxas de corte 28
3.4 Influência de diferentes condições de processamento na distribuição de cargas e taxas de corte nas peças 32
3.5 Provetes 40
4. Conclusão 48
Referências 50
Anexo I – Parâmetros malha BLM 52
Anexo 2 – Ficha Técnica ABS POLYLAC PA-726 da Chi Mei 53
Anexo 3 – Propriedades mecânicas do Polímeros teóricos 54
Anexo 4 – Ficha Técnica ABS ESD C 600 55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
CAD	*Computer Aided Design*
CAE	*Computer Aided Engineering*
CNT	*Carbon nanotubes*
DOE	*Design of Experiments*
EMI	*Electromagnetic interference*
FEM	*Finite Element Methods*
IGES	*Initial Graphics Exchange Specification*
MFI	*Melt flow Index*
MWCNT	*Multi-wall carbon nanotubes*
OEM	*Original equipment manufacturer*
PA12	*Polyamide 12*
STEP	*Standard for the Exchange of Product Data*
SWCNT	*Single-Wall carbon nanotubes*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Instalações da empresa FEHST Componentes. 1
Figura 2 - Unidades de uma injetora [5] 5
Figura 3 - Ciclo de Injeção [6] 6
Figura 4 - Processo de metalização na Fehst Componentes 8
Figura 5 - Fases de desenvolvimento de projeto 12
Figura 6 - Discretização de um domínio por elementos finitos [12]. 12
Figura 7 - Placa moldação por compressão 16
Figura 8 - Prensa Moore 1 17
Figura 9 - Prensa Moore 2 17
Figura 10 - Placa compressão metalizada com mordentado 18
Figura 11 - Placa compressão metalizada sem mordentado 18
Figura 12 - Espessura placa 1 e 2 19
Figura 13 - Espessura placa 3 e 4 20
Figura 14 - Superfície da peça em ambas as placas 20
Figura 15 - Modelos placa 1 e 2 e placa 3 e 4, respetivamente 21
Figura 16 - Representação de uma malha BLM 22
Figura 17 - Máquina de Injeção BOY 22A 23
Figura 18 - Peças placa 1 e 2 Polylac PA 726 24
Figura 19 - Peças placa 3 e 4 Polylac PA 726 24
Figura 20 - Gráfico Pressão Tempo placa 1 e 2 25
Figura 21 - Gráfico Pressão Tempo placa 3 e 4 26
Figura 22 - Frente de fluxo real e simulada, respetivamente 27
Figura 23 - Dependência das taxas de corte do tempo de injeção e formato das cargas 29
Figura 24 - Distribuição das cargas por volume - tempo de injeção = 0,8s 30
Figura 25 - Distribuição das cargas por volume - tempo de injeção = 1,1s 31
Figura 26 - Distribuição das cargas por volume - tempo de injeção = 1,4s 31
Figura 27 - Dependência das taxas de corte do tempo de injeção e da viscosidade do material 33
Figura 28 - Taxas de corte placa 1 e 2 34
Figura 29 - Concentração de fibras por volume placa 1 e 2 34

Figura 30 - Tentativa de Metalização sem mordentado. A) Menor taxa de corte; B) Maior taxa de corte 36
Figura 31 - Distribuição de cargas na espessura (Escala 10,3% Máx) 36
Figura 32 - Distribuição de cargas na espessura (Escala 10,0% Máx) 37
Figura 33 - Menor taxa de corte (run 12) 38
Figura 34 - Maior taxa de corte (run 3) 38
Figura 35 - Resposta de qualidade DOE placas 3 e 4 39
Figura 36 - Peças injetadas placa 3 e 4 40
Figura 37 - Máquina de Injeção Engel spex victory 50 41
Figura 38 - Taxas de corte baixas (Esquerdo) E Taxas de corte altas (Direita) no caso real 43
Figura 39 - Modelo provete pequeno 44
Figura 40 - Modelo provete grande 45
Figura 41 - Taxas de corte no provete pequeno 46
Figura 42 - Taxas de corte provete grande 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos realizados que se demonstram relevantes para a tese em questão. 14
Tabela 2 -Parâmetros de processo moldação por compressão 17
Tabela 3 - Parâmetros de processo 24
Tabela 4 - Runs e respetivas formas de carga 32
Tabela 5 - Materiais e parâmetros escolhidos para simulação da placa 1 e 2 32
Tabela 6 - Parâmetros de injeção maior taxa de corte 35
Tabela 7 - Parâmetros de injeção menor taxa de corte 35
Tabela 8 - Materiais e parâmetros escolhidos para a simulação da placa 3 e 4 39
Tabela 9 - Parâmetros de processo dos provetes 42

1. INTRODUÇÃO

1.1 Empresa

Fundado em 1995, o grupo Fehst é constituído por várias empresas, Enancer Electrónica S.A., Siroco – Soc. Ind. de Robótica e Fehst Componentes, Lda, sendo esta a maior do grupo.

A Fehst Componentes, Lda, situada em Braga, Portugal, tem como foco principal a produção de peças estéticas para interiores de automóveis. Apresenta no seu portefólio OEMs (*Original equipment manufacturer*s) de renome mundial, como por exemplo, Audi, Mercedes e Seat. Apresenta opções de desenvolvimento, inovação, logística e gestão de projetos para potenciar o desenvolvimento de produto total na empresa.

É certificada pela ISO9001, ISO14001 e IATF16949, norma da Qualidade, Gestão Ambiental e Gestão da Qualidade Automóvel, respetivamente. A empresa apresenta na produção máquinas de injeção até 3K, linha de cromagem eletrolítica de peças plásticas, linha de pintura com tinta à base de água, tintas de dois componentes, tinta de alto brilho (piano black), tinta de endurecimento UV e linha de montagem, cravação, estampagem e outros processos. De modo a garantir a qualidade dos produtos a Fehst Componentes, Lda. conta com zonas de inspeção que utilizam sistemas de visão artificial e de laser para auxílio da inspeção humana.



Figura 1 - Instalações da empresa FEHST Componentes.

1.2 Enquadramento

Para competir no mercado global emergente, as indústrias mostram um interesse crescente no desenvolvimento de materiais avançados com propriedades atrativas. A deposição de camadas metálicas em produtos feitos de plásticos e materiais compósitos é um dos exemplos a este respeito, uma vez que os produtos de plástico são mais leves, têm baixo custo, tempo de produção e podem ser moldados em formas geométricas complexas reduzindo o custo de fabrico de produtos complexos [1].

A primeira investigação sobre o revestimento de materiais poliméricos com camadas metálicas foi realizada nos anos 50, quando foram desenvolvidos os primeiros banhos de eletrodeposição para permitir a aplicação de revestimentos de cobre e níquel, no entanto, os primeiros revestimentos metálicos apresentavam uma fraca adesão aos substratos poliméricos. A técnica de metalização por eletrodeposição pode ser dividida em dois processos, fase química ou *electroless* e fase de eletrodeposição com aplicação de corrente elétrica.

- **Tratamento superficial, *eletroless*** - processo eletrolítico é um método autocatalítico em que a redução de iões metálicos na solução e a deposição da película podem ser realizadas através da oxidação de um elemento de metal.
- **Tratamento superficial, eletrodeposição** - princípio utilizado consiste em conduzir eletricamente átomos de metais, como o cobre, o níquel e o crómio, para fora dos ânodos que foram colocados no banho de eletrodeposição e que são submetidos a uma corrente elétrica. Quando a corrente é aplicada, os iões metálicos da solução são depositados nas peças de plástico.

Devido ao efeito negativo (como a inalação de vapores tóxicos, o possível contacto de agentes químicos com a pele possivelmente causando queimaduras, a contaminação dos solos caso exista um problema no sistema de tratamento dos banhos químicos) dos agentes químicos e metais nobres como paládio ou prata da fase *eletroless* para o ambiente e saúde dos trabalhadores surgiu a necessidade de procurar outras alternativas. Como já demonstrado em materiais poliméricos condutores é possível aplicar metalização direta das peças sem qualquer etapa prévia, visto que os materiais compósitos condutores já incorporam partículas metálicas ou não metálicas que lhes conferem condutividade [2][3]. Esta alternativa ao *Eletroless Plating* é o conceito denominado de *Direct Eletroplating*. A dispersão das cargas na matriz é de extrema importância para a metalização direta. Para que a peça apresente condutividade é necessário existir uma rede condutora entre cargas, no entanto visto que a metalização ocorre à superfície a migração das cargas para a superfície da peça na moldação por injeção traria vantagens relativamente à dispersão uniforme em todo o seu volume. Com o auxílio do programa de

simulação numérica Moldex3D® será possível estudar a influência da moldação por injeção e seus parâmetros, assim como outros fatores, por exemplo, forma e tamanho das cargas na sua dispersão e orientação. As cargas condutoras mais utilizadas são as partículas metálicas, as fibras metálicas, o negro de fumo, a grafite, o grafeno, os nanotubos de carbono e as fibras de carbono.

1.3 Objetivos

O trabalho tem como principal objetivo tornar o processo de metalização da Fehst Componentes mais sustentável. Para tal, estudar-se-á a possibilidade de eliminar a fase *eletroless* do processo de metalização e com o auxílio da simulação numérica por elementos finitos (FEM), estudar a dispersão de diferentes cargas em peças injetadas em ABS de modo a avaliar o efeito da orientação e dispersão das cargas nas peças injetadas com a capacidade de metalização de peças por *Direct Eletroplating*.

Metodologia:

- Estudo da capacidade de metalização da matéria-prima recorrendo à moldação por compressão.
- Simulação do processo de injeção com cargas de diferentes tamanhos e formas de modo a estudar a influência na sua distribuição na matriz polimérica.
- Estudo da influência de vários parâmetros de processo, nomeadamente; velocidade de injeção, temperatura do molde e do fundido, na separação de fase entre o polímero e as cargas, com o auxílio do programa de simulação Moldex3D®.
- Estudo da influência da espessura da peça na distribuição de cargas com o auxílio do programa de simulação Moldex3D®.
- Aplicação da metalização direta em peças injetadas com cargas de modo a avaliar a capacidade de metalizar de acordo com diferentes parâmetros de processo.
- Estipulação de métricas para os efeitos da dispersão e orientação de cargas no defeito de peças cromadas.

2. ESTADO DE ARTE

2.1 Moldação por Injeção

Atualmente a moldação por injeção ocupa aproximadamente 30% do plástico transformado, sendo de extrema importância económica [4]. Devido ao aumento da exigência do mercado o processo de moldação por injeção tem sofrido progressivamente mudanças com o intuito de o tornar cada vez mais ecológico e eficiente. O avanço das máquinas de injeção, o aumento da variedade de fusos, a automação do processo, a facilidade de controlo dos parâmetros e a transição de máquinas hidráulicas para elétricas são alguns exemplos a este respeito.

A moldação por injeção é normalmente definida como um processo no qual um ou mais materiais, normalmente em forma de grãos, são inseridos através da tremonha na máquina e posteriormente aquecidos sequencialmente de modo a fundir e plasticizar os mesmos. Através da pressão exercida pelo fuso é forçado a entrar para a cavidade do molde, adquirindo a forma desejada. Devido à diferença de temperatura entre o material fundido e o molde, há transferência de calor, até a peça estar a uma temperatura desejada para ser dada a extração. A temperatura de ejeção da peça depende de vários fatores como material e geometria.

Uma máquina de injeção é constituída por algumas unidades principais com funções distintas:

- Unidade de injeção/plasticização: responsável pelo transporte, aquecimento, plasticização, homogeneização, injeção e pressurização;
- Unidade de fecho: garante a fixação, movimentação e fecho do molde, como também aciona a extração;
- Unidade de potência: encarregue de fornecer energia aos diversos sistemas da máquina;
- Unidade de Controlo/Comando: Promove a interface máquina-operador, sendo possível controlar e monitorizar as variáveis do processo.

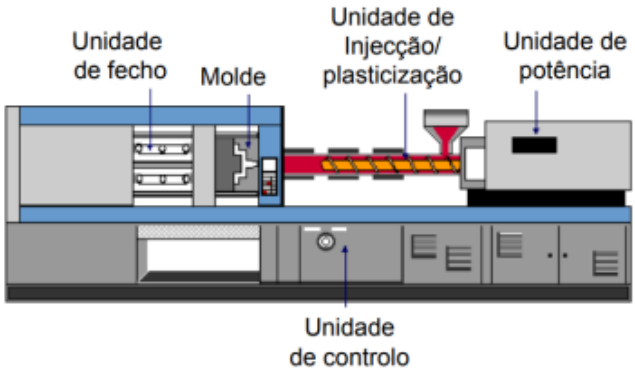


Figura 2 - Unidades de uma injetora [5]

O ciclo de injeção apresenta diversas fases desde o fecho do molde até o momento em que a peça moldada é retirada.

Fecho do Molde - Operação correspondente ao início do ciclo. Há a necessidade de o encosto das duas partes do molde ser suave para evitar a danificação das superfícies. É de elevada importância esta fase ser o mais rápida possível, para isso reduz-se a separação das placas do molde ao intervalo mínimo necessário para possibilitar a ejeção do ciclo anterior da moldação.

Injeção - O fundido é obrigado a fluir para dentro do molde através do movimento do fuso. O perfil de velocidades deve corresponder a um compromisso entre velocidade e a qualidade do produto final.

Pressurização – Quando o nível de enchimento da cavidade é igual ou superior a 95%, normalmente 98%, dá-se início à fase de pressurização. Nesta fase há alteração do regime de funcionamento, onde ocorre a passagem de uma fase de controlo de velocidade de injeção para uma fase de controlo de pressão.

Plasticização – O fuso inicia um movimento rotacional.

Arrefecimento – Logo que ocorra a solidificação do ataque, o parafuso é retraído começando o processo de dosagem para a próxima injeção e o arrefecimento. Esta fase termina após a peça atingir a temperatura de ejeção desejada. A otimização desta fase corresponde a um tempo de ciclo mais curto, visto que, o arrefecimento corresponde à fase mais demorada do mesmo. No entanto, tendencialmente, um aumento do tempo de arrefecimento permite reduzir a intensidade das tensões internas.

Abertura e extração – O tempo desta operação é dependente da máquina utilizada e da espessura da peça.

Pausa - é o período que decorre desde o momento em que a peça é removida do molde e o início do novo ciclo.

Na Figura 3 está representado esquematicamente o ciclo de injeção.

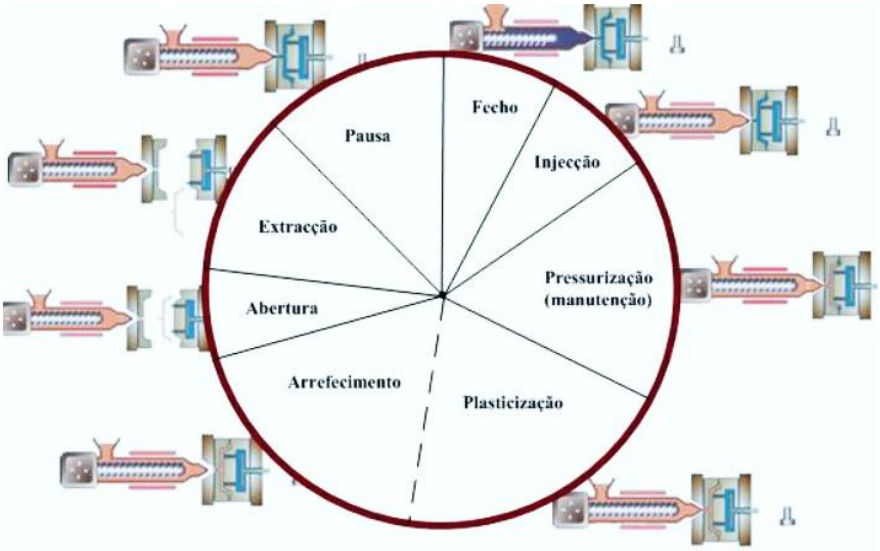


Figura 3 - Ciclo de Injeção [6]

Durante o processo de moldação por injeção podem desenvolver-se defeitos nas peças injetadas e alguns deles mesmo que muitas vezes não sejam visíveis, quando aplicados tratamentos superficiais, como pintura e cromagem, tornam-se mais percetíveis. Os parâmetros de processo, o material e o projeto de peça são fatores determinantes para a qualidade das mesmas. Os principais defeitos superficiais no processo de injeção são:

- O preenchimento incompleto ocorre quando uma peça injetada não possui material suficiente para gerar corretamente sua geometria. Isso ocorre quando o polímero fundido não consegue preencher todo o molde de injeção, geralmente nas secções mais finas, onde o polímero fundido solidifica antes de preencher completamente o molde.
- O defeito de ar aprisionado ocorre quando uma certa quantidade de ar não consegue escapar do molde durante a injeção, resultando numa pequena área sem material na peça injetada. Num projeto de molde bem desenvolvido, o ar é extraído através de ventilação. Uma causa comum do defeito de ar aprisionado é um tamanho insuficiente do escape de gases do molde. Outra causa frequente ocorre devido à tendência de o polímero fluir preferencialmente em secções mais espessas, deixando as áreas de menor espessura com ar aprisionado o que resultará em espaços vazios e bolhas dentro da peça de plástico moldada, em um preenchimento incompleto ou em defeitos superficiais, como manchas ou marcas de queimaduras.

- Uma linha de soldadura é formada quando dois fluxos de polímero fundido em direções opostas se encontram. Por outro lado, uma linha de junção é criada se esses dois fluxos fluem paralelamente um ao outro. Tradicionalmente, o ângulo de junção entre os dois fluxos é usado para diferenciar as linhas de soldadura das de junção. Um ângulo de junção menor que 135° produz uma linha de soldadura, enquanto um ângulo superior a 135° é definido como uma linha de junção. Em geral, a marca de uma linha de soldadura desaparece quando o ângulo de junção está entre 120° e 150°. As linhas de soldadura são consideradas mais críticas do que as de junção tanto em aspetos estéticos quanto em propriedades mecânicas. Linhas de soldadura e de junção podem ser causadas por furos ou inserções na peça, múltiplos pontos de injeção, ou devido a zonas de espessura de parede variável onde ocorre o fenômeno de hesitação. Se as linhas de soldadura ou de junção não puderem ser evitadas, uma boa prática é tentar gerá-las em áreas de baixa visibilidade ou mecanicamente pouco críticas.
- A rebarba é um defeito que ocorre quando parte do polímero fundido flui através de fissuras existentes no molde de injeção, como plano de separação, áreas de ventilação, etc.
- O defeito de jato, ocorre quando o polímero fundido é pressionado em velocidade excessiva através de uma área reduzida, como o bico de injeção para acessar uma área muito mais ampla. Esse defeito cria uma fragilidade mecânica na peça, imperfeições na superfície e vários defeitos internos [6].

2.2 Processo de metalização atual na Fehst Componentes

O processo de metalização na Fehst Componentes, para cromagem de peças injetadas em ABS, como representado na Figura 4 pode ser descrito pelas seguintes etapas:

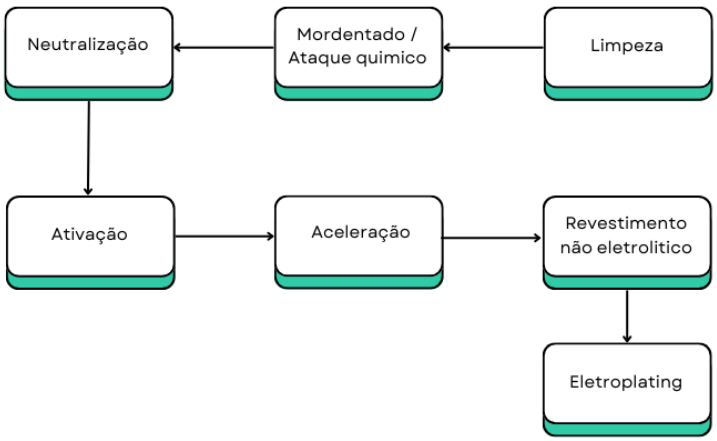


Figura 4 - Processo de metalização na Fehst Componentes

Numa fase inicial as peças previamente injetadas são imersas em reservatórios com o intuito de proceder à limpeza das mesmas. Neste processo toda a sujidade como por exemplo óleos, gorduras e óxidos metálicos são removidos reduzindo as tensões superficiais na peça prevenindo o desenvolvimento de bolhas de ar na sua superfície. De seguida as peças sofrem um ataque químico denominado mordentado. Como referido previamente o polímero utilizado é o ABS e devido a ser constituído por duas fases, (acrilonitrilo-estireno e butadieno), quando imersos a este banho de crómio e ácido sulfúrico as partículas de butadieno dissolvem-se formando porosidades na superfície da peça permitindo uma melhor aderência entre o metal a depositar e o polímero. Em seguida dá-se o banho neutralizador. Este tem como objetivo reduzir o crómio hexavalente a trivalente da superfície da peça. A etapa de ativação tem como propósito a produção de uma superfície catalítica para uma posterior deposição química. Segue-se o banho de acelerador, onde a camada catalítica fica ativa para iniciar a deposição de níquel químico. De seguida, na etapa de revestimento não eletrolítico é criada uma camada condutora que proporciona condutividade à peça. Nesta etapa existem dois banhos, níquel químico e cobre químico. O níquel cobre toda a superfície da peça funcionando como catalisador. De seguida, dá-se a deposição da peça em cobre químico. Dependendo do tipo de plástico utilizado os parâmetros deste banho podem ser ajustados de modo a otimizar o processo de cromagem.

Por fim, existe a fase de eletrodeposição. A eletrodeposição metálica consiste num processo eletroquímico, onde o metal é depositado num substrato através da passagem de uma corrente elétrica,

por uma solução aquosa que contém iões do metal [4]. Esta fase é dividida em três banhos distintos, de cobre, de níquel e de crómio. O depósito de cobre tem ação niveladora da superfície de forma a proporcionar um acabamento mais brilhante na peça final. O cobre gera uma camada elástica que irá suportar esforços produzidos durante os ciclos térmicos. O níquel, atribui boa aderência à superfície da peça para a deposição das posteriores camadas. Existem três depósitos de níquel, o brilhante, o semi-brilhante e o micro-poroso. Por fim, dá-se a deposição da camada de crómio com um banho prévio de ativação crómica. Esta camada final irá proporcionar a aparência desejada.

2.3 Polímeros Condutores

A utilização de eletrodeposição geralmente não é possível sem tratamentos prévios devido à natureza do isolamento elétrico dos polímeros. No entanto, com a incorporação de cargas na matriz polimérica, verificou-se que a resistência se tornava menor.

Os polímeros condutores podem ser de dois tipos: polímeros condutores intrínsecos e polímeros condutores extrínsecos. Os polímeros condutores intrínsecos são polímeros que possuem uma estrutura molecular que, por si só, permite a condução elétrica, já os polímeros condutores extrínsecos tornam-se condutores quando são adicionados na matriz polimérica materiais condutores, como metais, óxidos metálicos ou partículas de carbono.

Para a tese em questão apenas faz sentido estudar os polímeros condutores extrínsecos [6].

A capacidade de condutividade de um compósito polimérico depende de vários fatores, como por exemplo:

- Fração de volume da carga condutora e condutividade da carga. Pequenas partículas do material de enchimento resultam em grandes distâncias entre os seus centros, o que significa que a condutividade de todo o compósito está limitada à condutividade elétrica da matriz polimérica. O aumento do número de partículas de carga reduz as distâncias entre os centros destas partículas até atingir um determinado valor crítico, no qual se verifica um aumento abrupto da condutividade elétrica. Este valor crítico é designado por limiar de percolação. A condutividade elétrica pode variar em várias ordens de grandeza para pequenas diferenças no teor de carga. Apenas quando o seu conteúdo é suficientemente grande, numerosas áreas condutoras formam uma rede tridimensional. Assim, um aumento adicional no volume do material de enchimento não causa alterações significativas na condutividade.

- Distribuição das cargas, sendo estas fortemente influenciadas por alguns parâmetros de processo como: pressão de injeção, pressão de compactação, velocidade de injeção, perfil de temperaturas no cilindro e temperatura do molde.
- As cargas condutoras mais utilizadas são as partículas metálicas, as fibras metálicas, o negro de fumo, a grafite, o grafeno, os nanotubos de carbono e as fibras de carbono [2].

2.4 Teoria da percolação

Na discussão teórica de mecanismos de condução em compósitos poliméricos, a teoria da percolação desempenha um papel significativo. A teoria da percolação é aplicada para entender como a conectividade das partículas afeta a condutividade elétrica do material compósito. A ideia central é que, à medida que a fração volumétrica das partículas condutoras aumenta, há um ponto crítico denominado "limiar de percolação" no qual surge uma rede condutora contínua dentro do compósito. Abaixo desse limiar, não há uma rota condutora efetiva que percorra o material. Acima do limiar, a condutividade elétrica aumenta drasticamente devido à formação de uma rede interconectada de partículas condutoras. A teoria da percolação ajuda a modelar e entender o comportamento elétrico desses compósitos poliméricos, fornecendo uma abordagem quantitativa para descrever a transição de um estado isolante para um estado condutor. Parâmetros importantes incluem a concentração crítica de partículas, o expoente crítico e outros fatores que caracterizam essa transição [8].

2.5 Moldex3D®

Como referido previamente de modo a estudar a dispersão e orientação de cargas na moldação por injeção será utilizado o programa de simulação numérica por elementos finitos, Moldex3D®.

O Moldex3D® é um programa CAE (*Computer Aided Engineering*). Estas ferramentas permitem demonstrar características de material, acabamento processo de fabrico e design. O Moldex3D® oferece recursos como a modelação de fluxo de material, enchimento e compactação de cavidades moldantes, solidificação e análise de defeitos. É utilizado para prever falhas de projeto de peça e condições de processamento, reduzindo defeitos e aumentando a eficiência do processo. Além disso, o programa ajuda na otimização do projeto de moldes, identificando e corrigindo potenciais problemas. Promove um melhor entendimento das inter-relações entre parâmetros. Isto contribui para uma melhor habilidade de

controlo. O uso dos CAE, resultou num aumento da qualidade das peças, assim como uma produção mais automatizada [9].

Na sua base de dados, dispõe vários materiais comerciais, com reologias distintas, assim como a parametrização técnica de diferentes máquinas de injeção utilizadas no mercado com possibilidade de utilização de condições de processamento. É possível, através deste software, modelar canais de alimentação, frios, quentes e híbridos, assim como canais de controlo de temperatura complexos.

Contudo, apesar do presente estudo focar-se na moldação por injeção convencional, o Moldex3D® apresenta também capacidade de simulação de distintos processos de transformação de materiais poliméricos, nomeadamente:

- Moldação por injeção
- Bi-injeção, Co-injeção
- Moldação por injeção de espuma
- Moldação por injeção de pó
- Moldação por injeção assistida a gás
- Moldação por injeção assistida a água
- Injeção por Compressão
- Moldação de espuma química
- Moldação por compressão
- Moldação por transferência de resina
- Encapsulamento

O programa deve ser utilizado na fase de desenvolvimento do produto e na fase de desenvolvimento de projeto de molde. Na fase de desenvolvimento do produto são apenas efetuadas simulações de injeção, enchimento e compactação, recorrendo às iterações necessárias para analisar a eficácia do sistema de alimentação, capacidade de escoamento e localização de linhas de soldadura. De seguida, depois desta fase inicial estar terminada, é feita uma nova simulação, agora com distintos objetivos, nomeadamente: i) aprovar o sistema de alimentação da(s) peça(s), verificando por exemplo a localização e extensão das linhas de soldadura das frentes de fluxo, ii) aprovação dos sistema de controlo de temperatura, verificando a eficiência energética e os tempos previstos de congelação do material e iii) avaliar quais as prováveis deformações térmicas e/ou mecânicas da peça(s) e perceber quais serão os

empenos finais, de modo a otimizar o projeto de moldes. Esta fase tem o nome de fase de Desenvolvimento de Projeto de Molde. Por fim avança-se para o fabrico do molde.

Na Figura 5 estão representadas as fases de desenvolvimento de projeto.



Figura 5 - Fases de desenvolvimento de projeto

2.6 Método de Elementos Finitos (FEM)

O método dos elementos finitos (FEM) é uma técnica numérica utilizada para resolver problemas complexos de engenharia e física. A ideia central do FEM é dividir um domínio complexo em partes menores, intituladas de "elementos". Cada elemento é uma representação simplificada da geometria real e é definido por um conjunto de pontos designados de "nós" [10].

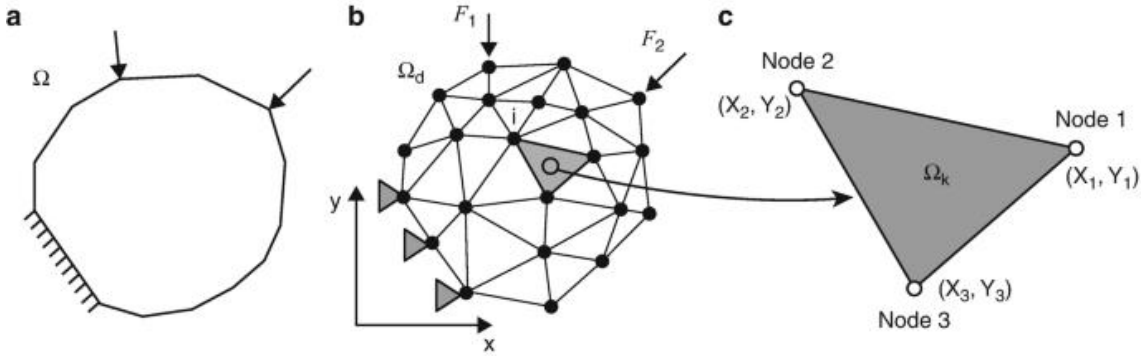


Figura 6 - Discretização de um domínio por elementos finitos [12].

Há a possibilidade de os elementos finitos assumirem diferentes formas geométricas, tanto 2D como 3D. Caso seja um estudo em 2D, podem ter a forma de triângulos ou quadriláteros, caso seja em 3D podem assumir uma forma de tetraedros, pentaedros ou hexaedros. Caso o estudo seja efetuado para o cálculo em formas geométricas 2D, utiliza-se subdomínios de área, ou seja, sem o eixo Z. Caso seja em 3D é utilizado o eixo X,Y e Z [10], [11]. Em seguida, são utilizados modelos matemáticos para formular e resolver um sistema de equações, com o objetivo de encontrar as respostas no domínio de interesse. Isso geralmente envolve o uso de métodos de integração numérica para calcular as respostas dentro de cada elemento e a montagem de um sistema global de equações para obter as soluções no domínio completo. Para já muitos métodos numéricos foram desenvolvidos com o intuito de governar sistemas de PDEs (equação diferencial parcial). Estes sistemas envolvem o cálculo de mais do que uma variável, sendo utilizados para o estudo de escoamentos, transferência de calor, empenos, entre outros [10].

De modo a ser possível efetuar um estudo utilizando a técnica do método de elementos finitos é necessário o desenvolvimento de uma malha, ou seja, uma representação da divisão de um domínio em elementos. A qualidade da malha utilizada em qualquer estudo de simulação é de elevada importância visto que dita a veracidade dos resultados. Quanto mais elementos compuserem a malha, maior a precisão dos resultados da simulação, até um valor de estabilização, no entanto, mais recursos informáticos serão necessários para a realização do estudo. Em cada caso de estudo nas zonas de elevada área e sem zonas particularmente problemáticas utiliza-se dimensões de malha maiores, visto que a necessidade de elevada precisão nessas zonas é menor. Em pequenas áreas, *edges,* ou zonas arredondadas, a necessidade de precisão é maior.

2.7 Estudos realizados

Nos últimos anos, têm sido realizados diversos estudos relativos à influência de diferentes tipos e percentagens de cargas na condutividade, propriedades mecânicas e térmicas de materiais poliméricos, assim como estudos quanto à influência dos parâmetros de processamento na sua dispersão. Na Tabela 1 são apresentados alguns objetivos, variáveis e conclusões dos trabalhos realizados por diversos autores.

Tabela 1 - Estudos realizados que se demonstram relevantes para a tese em questão.

Título	Autor/es	Data	Ref	Materiais utilizados e variáveis estudadas	Conclusão
Review on the effects of injection moulding parameters on the electrical resistivity of carbon nanotube filled polymer parts	Jyri Tiusanen, Daniel Vlasveld e Jyrki Vuorinen	2012	[12]	Foi estudada a influencia dos parâmetros de processamento da moldação por injeção na condutividade de matrizes amorfas e semi-cristalinas carregadas com nano tubos de carbono. Foram utilizadas variáveis como velocidade de injeção, temperatura do molde e temperatura do fundido.	A baixa resistência elétrica das peças injetadas pode ser conseguida utilizando uma temperatura de fundido elevada e uma velocidade de injeção baixa.
Correlation of mechanical and electrical properties with processing variables in MWCNT reinforced thermoplastic nanocomposites	Saeed Doagou-Rad, Aminul Islam e Jakob Søndergaard Jensen	2018	[13]	Utilizou-se uma poliamida 6 carregada com nano tubos de carbono de várias paredes (MWCNTs). Estudou-se a influência do método de mistura, dos parâmetros do processo de moldação por injeção e percentagem de MWCNTs utilizada.	O aumento da velocidade de injeção ou da segunda pressão aumentou as propriedades mecânicas e elétricas. Parâmetros como o estado de dispersão, o alinhamento das cadeias poliméricas, a viscosidade, o comportamento de relaxação e a cristalização determinam o comportamento dos nanocompósitos.
Effects of the Nanofillers on Physical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanocomposites: Comparison of Graphene Nanoplatelets and Multiwall Carbon Nanotubes	Sithiprumnea Dul, Alessandro Pegoretti e Luca Fambri	2018	[14]	Foram estudadas as propriedades mecânicas, elétricas e processabilidade do ABS com percentagens de CNT de 0% a 8% e do ABS com percentagens de Grafeno de 0% a 30%.	Os nanocompósitos ABS/CNT apresentaram uma resistência elétrica muito inferior à da composição ABS/GNP. No caso dos CNT, a melhoria relevante da condutividade dos nanocompósitos é acompanhada por um aumento acentuado da viscosidade do fundido, o que pode ser problemático no processamento.
Influence of Different Carbon-Based Fillers on Electrical and Mechanical Properties of a PC/ABS Blend	Eleonora, Elisabetta Cagnin, Carlo Boaretti, Martina, Alessandra Lorenzetti e Michele Modesti	2019	[15]	Foi estudada a influência de diferentes cargas como grafeno, nano tubos de carbono e fumo negro numa matriz de policarbonato e ABS na morfologia e propriedades elétricas e mecânicas. Utilizaram-se percentagens de carga entre 0% e 5%.	Os resultados da comparação de três cargas à base de carbono sugerem que os CNT são a melhor opção de carga em termos de desempenho elétrico e mecânico. Em comparação com as outras cargas, os CNT obtiveram o limiar de percolação mais baixo.
A review on the direct electroplating of polymeric materials	Piotr Augustyn, Piotr Rytlewski, Krzysztof Moraczewski e Adam Mazurkiewicz	2021	[2]	Foram apresentados vários métodos de metalização. Foram reunidos vários dados de diferentes tipos de cargas e a sua condutividade.	Comparação da condutividade elétrica de compósitos condutores e comparação da condutividade relativamente á dimensão das partículas. Concluiu-se que é possível metalizar diretamente um polímero com cargas condutoras.

Investigation of the Effects of Multi-Wall and Single-Wall Carbon Nanotubes Concentration on the Properties of ABS Nanocomposites	Brenda Janett Alonso Gutierrez, Sithiprumnea Dul, Alessandro Pegoretti, Jaime Alvarez-Quintana e Luca Fambri	2021	[16]	Foi estudado o efeito de dois tipos de nano tubos de carbono no ABS, MWCNTs e SWCNTs com percentagens de 5% a 10%. Comparara-se parâmetros como a condutividade, o MFI e propriedades mecânicas.	Foi observada uma redução mais consistente do MFI com o aumento de MWCNTs em vez de SWCNTs. Em particular, os nanocompósitos ABS/SWCNT com teores de 7,5% e 10% apresentaram uma resistência elétrica que era 3-5 vezes inferior à das composições correspondentes de ABS/MWCNT.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1 Validação da matéria-prima

O material foi selecionado com o objetivo de responder à necessidade de condutividade elétrica, por isso, foi escolhido um ABS carregado com cargas de grafeno.

Recorreu-se à moldação por compressão, uma tecnologia caracterizada pela produção de peças a taxas de corte praticamente nulas, uma vez que, o processo se baseia na aplicação de uma força compressiva uniforme sobre o material, ao contrário de, por exemplo, a moldação por injeção ou o processo de extrusão que devido ao escoamento da matéria prima apresentam gradientes de velocidade. Assim, visto que o pressuposto é que a qualidade de metalização é dependente das taxas de corte, através das peças produzidas recorrendo a esta tecnologia é possível validar se apenas a matéria prima é passível de metalização.

A placa escolhida para o estudo, ilustrada na Figura 7, possui as seguintes dimensões: 150 mm de comprimento, 100 mm de largura e 5 mm de espessura.

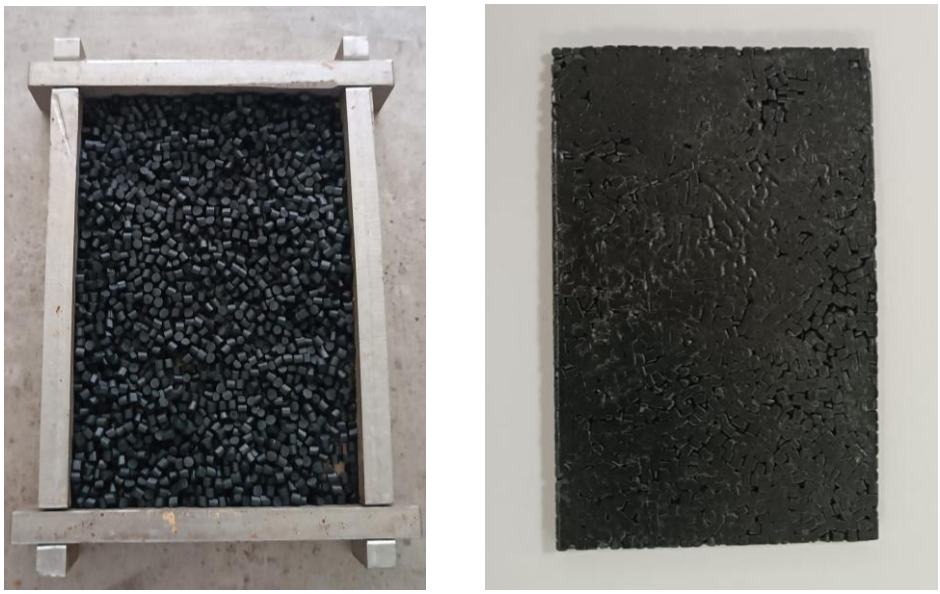


Figura 7 - Placa moldação por compressão

Para iniciar o processo de moldação por compressão, foi necessário utilizar duas prensas Moore, disponíveis no Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho. A prensa Moore 1, ilustrada na Figura 8, foi utilizada para fundir e comprimir o material. Em seguida, a prensa Moore 2, na

Figura 9, foi empregue para arrefecer o molde sob efeito de pressão, assegurando a qualidade e integridade da peça final.

O material utilizado, RTP C 600 ESD, foi previamente estufado a uma temperatura de 80°C por um período de 4 horas, a fim de garantir a eliminação de qualquer humidade residual e preparar adequadamente o material para o processo de moldação.



Figura 8 - Prensa Moore 1



Figura 9 - Prensa Moore 2

As condições de processamento para a compressão encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2 -Parâmetros de processo moldação por compressão

Temperatura	**Tempo de compressão**	**Gramagem**
280°C	8 minutos	100 g

A placa moldada por compressão foi cortada em duas partes para análise. Uma parte foi submetida ao processo de mordentado antes da metalização, enquanto a outra foi diretamente metalizada.

A parte submetida ao mordentado mostrou uma metalização completa, Figura 10, embora com alguns defeitos, possivelmente decorrentes do processo de fabrico inicial. Em contraste, a parte que não

passou pelo mordentado, à semelhança das peças injetadas não apresentou nenhuma metalização, como pode ser observado na Figura 11.

Para análise da metalização não foi realizado nenhum teste quantitativo, recorreu-se apenas a uma análise visual.



Figura 10 - Placa compressão metalizada com mordentado



Figura 11 - Placa compressão metalizada sem mordentado

Estas observações indicam a importância do mordentado na preparação das superfícies para a metalização, evidenciando que o processo de mordentado é crucial para assegurar a adesão do metal à superfície da peça e também possibilita aprovar a hipótese de qualidade de metalização ser dependente das taxas de corte. Durante a moldação por injeção apesar da variação de taxas de corte não é possível apresentar um valor suficientemente perto de zero destas para que seja possível observar diferença de metalização.

3.2 Moldação por injeção – Aprovação do Modelo

3.2.1 Procedimento Numérico

Na empresa, diversas peças são submetidas ao processo de cromagem, porém, muitas delas possuem geometrias complexas. Numa segunda fase, para estabelecer métricas referentes aos efeitos da dispersão e orientação de cargas, foram escolhidas peças disponíveis no Departamento de Engenharia de Polímeros, representadas nas Figuras 12, 13 e 14.

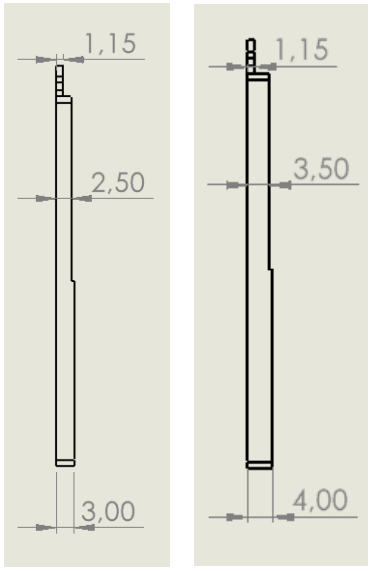


Figura 12 - Espessura placa 1 e 2

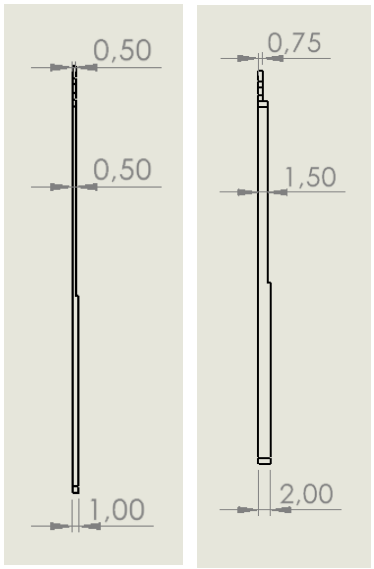


Figura 13 - Espessura placa 3 e 4

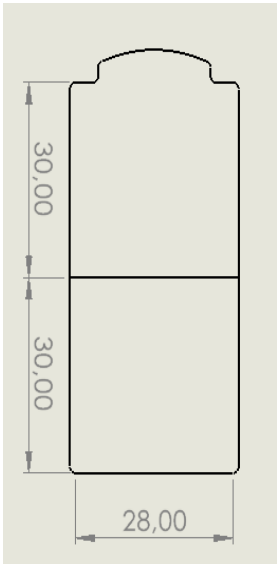


Figura 14 - Superfície da peça em ambas as placas

Como é possível observar, existem quatro peças diferentes agrupadas em duas placas, ou seja, são injetadas aos pares. A primeira placa moldante contém peças com espessuras variando entre 2,5 mm e 4 mm, enquanto a segunda placa contém peças com espessuras entre 0,5 mm e 2 mm sendo a superfície das peças iguais variando apenas as espessuras.

No software SolidWorks®, foram traçadas linhas representativas dos canais de alimentação, neste caso apenas canais frios, bem como as linhas do sistema de controlo de temperatura. As peças e as linhas foram importadas nos formatos *STEP* e *IGES* para o programa de simulação Moldex3D®, respetivamente.

Para evitar erros de malha, utilizando um *add-on* do Moldex3D® designado CadDoctor, em modelos mais complexos é realizado uma simplificação do modelo CAD. Aqui remove-se as bordas das peças, assim como por exemplo letras e outros pormenores que aumentam muito o número de nós e elementos e consequentemente a complexidade e o tempo de processamento da simulação.

Com a importação da peça, das linhas representativas do sistema de alimentação e do sistema de controlo de temperatura, foi necessário atribuir o seu valor no programa, ou seja, *part*, *cold runner* e *cooling channel* respetivamente. De seguida é também necessário criar uma base de molde (domínio), com dimensões suficientes para alocar todas as geometrias previamente atribuidas sendo que todas as partes suscetíveis ao processamento da simulação numérica necessitam de estar representadas dentro desta base. Na Figura 15 é apresentado o modelo de simulação.

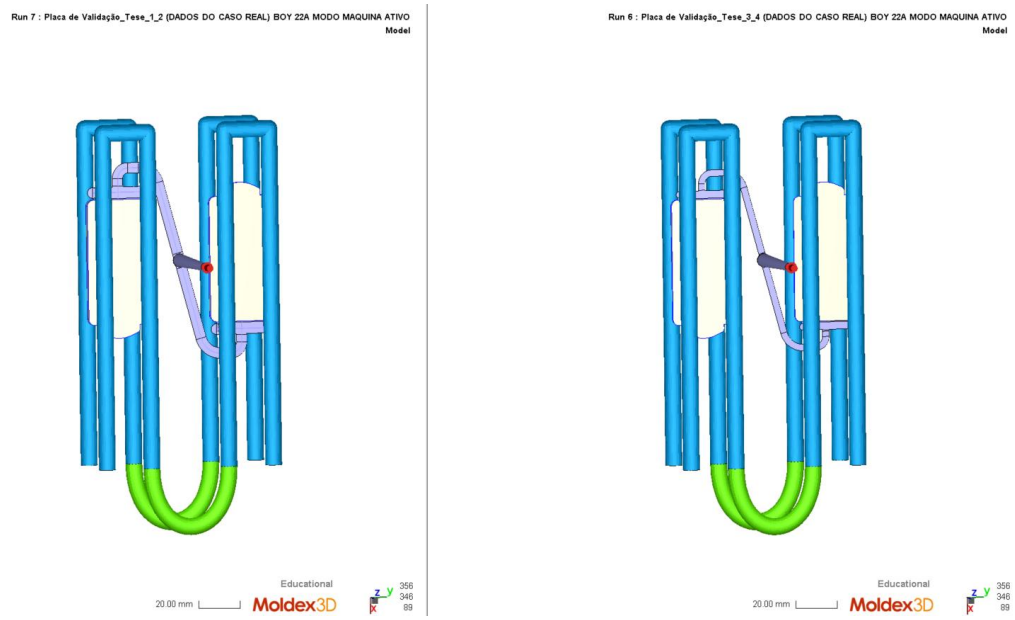


Figura 15 - Modelos placa 1 e 2 e placa 3 e 4, respetivamente

Como é possível observar para além da diferença de espessura das peças os canais de alimentação também apresentam dimensões diferentes.

Por fim, no que toca à modelação do modelo de simulação é necessário desenvolver uma malha que, como referido no estado de arte desta tese é a divisão de um domínio complexo em partes menores. É importante dividir o domínio em subdomínios suficientes para extrair o máximo de potencial dos modelos de simulação, no entanto, caso esta divisão apresentar subdomínios a mais, a carga computacional torna-se contraprodutiva aos eventuais ganhos em qualidade de previsão de resultados. Primeiramente é desenvolvida a malha superficial para que posteriormente seja possivel criar a malha na espessura da

peça. Esta malha superficial é de elevada importância, uma vez que dita toda a malha tridimensional interna. Na formação da mesma o Moldex3D® apresenta a opção da sua formação por camadas (BLM), sendo a superfície composta por elementos prismáticos e o centro por elementos tetraédricos. Por defeito o programa apresenta cinco camadas, no entanto para o caso de estudo foram escolhidas 9. Na Figura 16 é apresentado um exemplo do BLM (*Boundary Layer Mesh*). Para o caso de estudo, os parâmetros da malha BLM encontram-se apresentados no Anexo 1.

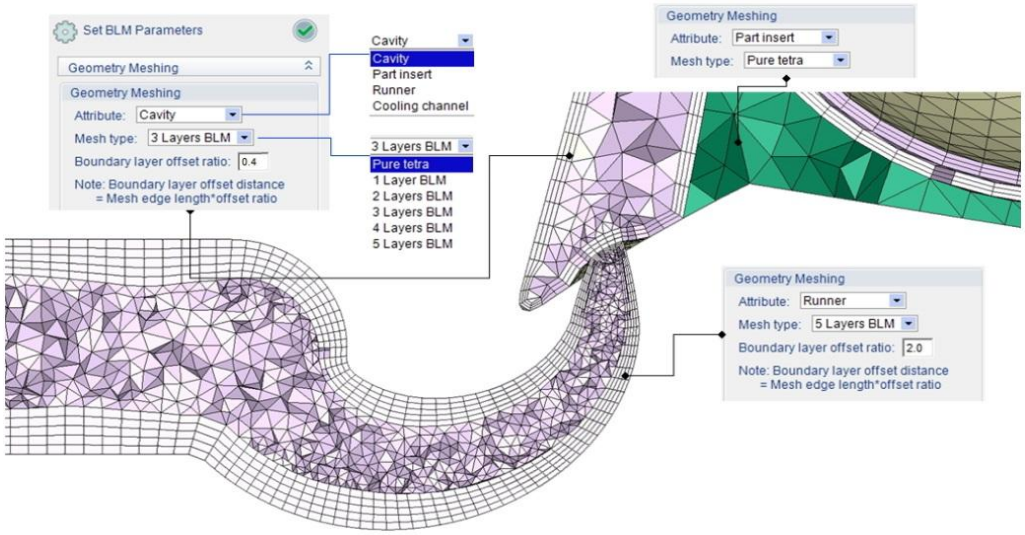


Figura 16 - Representação de uma malha BLM

A validação do modelo é um passo essencial no processo, de modo a, quando se realizarem simulações com diferentes condições de processamento e materiais a qualidade do modelo não seja um fator significativo nos resultados obtidos. O material escolhido para comparar os resultados da simulação como processo real foi o ABS POLYLAC PA-726 da Chi Mei (ficha técnica no Anexo 2). Existem alguns métodos principais de validação de modelos de simulação: a comparação das curvas de pressão ao longo do tempo para analisar as tendências dessas variações, comparação da relação entre posição do fuso e a frente do fundido, a comparação do peso das peças simuladas com as peças reais, verificação dos valores de pressão dos sensores de pressão dentro da cavidade moldante, e comparação dos valores de contração simulados e real.

3.2.2 Procedimento Experimental

Foram injetadas 30 peças de cada placa, totalizando 60 injeções, utilizando a máquina de injeção BOY 22 A, demonstrada na Figura 17, disponível no Departamento de Engenharia de Polímeros da

Universidade do Minho. Todos os parâmetros utilizados no processo de injeção foram registados (Tabela 3), bem como o gráfico de pressão ao longo do ciclo, com o objetivo de compará-lo ao gráfico obtido na simulação.

Esses dados são cruciais para validar a precisão do modelo de simulação e garantir que este reflita adequadamente o comportamento do material e do processo no terreno.



Figura 17 - Máquina de Injeção BOY 22A

À semelhança do processo utilizado na empresa Fehst Componentes, antes de iniciar a moldação por injeção o material, POLYLAC PA-726 foi colocado numa estufa disponibilizada no Departamento de Engenharia de Polímeros a 80°C durante um período de 4 horas.

Durante o processo de injeção, houve um desafio significativo em obter uma qualidade consistente para ambas as peças na mesma placa. É importante destacar que o fluxo de material nas placas é desequilibrado. Cada placa contém duas peças com espessuras diferentes, porém, os canais de alimentação e os pontos de injeção possuem exatamente as mesmas dimensões. Esta configuração resultou em dificuldades consideráveis, especialmente nas placas 3 e 4, onde as peças possuem espessuras mais finas.

A peça mais espessa tendia a apresentar rebarbas, enquanto a peça mais fina frequentemente não era completamente preenchida. No entanto, foi possível injetar o material com o mínimo de rebarbas possível, garantindo que a cavidade da peça mais fina fosse completamente preenchida.

Este equilíbrio delicado entre minimizar rebarbas e assegurar o preenchimento completo das cavidades finas foi crucial para obter peças injetadas com a qualidade desejada.

De seguida iniciou-se a simulação numérica com os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de processo

	Tempo de injeção	**Tempo de compactação**	**Dosagem**	***V/P switch***	**Velocidade de injeção**	**Temperatura do fundido**
Placa 1 e 2	1 s	8 s	75 mm	5 mm	80 mm/s	230℃
Placa 3 e 4	0.41 s	1 s	38 mm	3.1 mm	150 mm/s	230℃

Como referido, previamente, para a placa 1 e 2, Figura 18, é possível uma injeção admissível, no entanto como é possível observar na Figura 19 na placa 3 e 4 uma peça não enche completamente e a outra já apresenta rebarba.



Figura 18 - Peças placa 1 e 2 Polylac PA 726



Figura 19 - Peças placa 3 e 4 Polylac PA 726

O método escolhido, para este estudo, de verificação do modelo é a comparação das curvas de pressão ao longo do tempo. Quando finalizada a moldação por injeção retirou-se da máquina os valores de pressão no fuso ao longo do ciclo de injeção e transitaram-se os dados para uma folha de excel permitindo criar uma curva de pressão ao longo do tempo.

Depois recorreu-se ao Moldex3D® para verificar a aproximação do modelo simulado ao real. Com a finalidade de aproximar as condições de simulação o mais possível ao caso real utilizou-se o modo máquina disponibilizado pelo programa onde é possível caracterizar toda a máquina de injeção.

Foram retirados os dados de tempo, em segundos e pressões, em bar do gráfico de pressão tempo do caso real e simulados apresentados na Figuras 20 e 21.

Como é possível observar apesar do modo máquina do Moldex3D® existem discrepâncias nos valores de pressão. A simulação numérica não deixa de ser uma aproximação do caso real e, portanto, de modo a validar o modelo a tendência da curva é o mais importante e não apenas os valores absolutos de pressão de injeção. Foram feitas 2 iterações do modelo, na primeira as curvas não se demonstraram satisfatórias por isso, voltou-se a medir todos as dimensões das peças e canais de alimentação e foram feitas pequenas alterações no diâmetro dos canais, voltando de seguida a simular. Desta forma percebemos que para a placa 1 e 2 ou seja, para as peças com maior espessura percebe-se claramente tendências semelhantes. No entanto para a placa 3 e 4, mesmo na segunda iteração existem demasiadas discrepâncias e, portanto, terá de se validar de outra maneira.

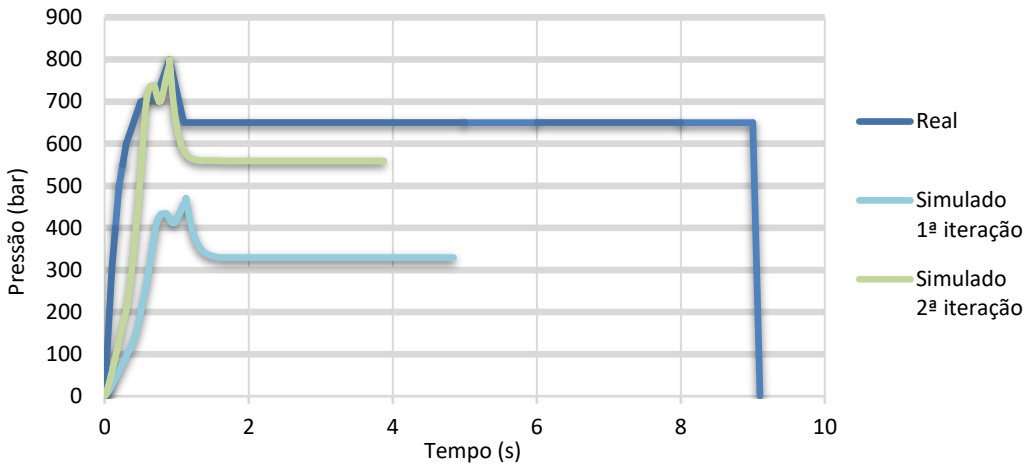


Figura 20 - Gráfico Pressão Tempo placa 1 e 2

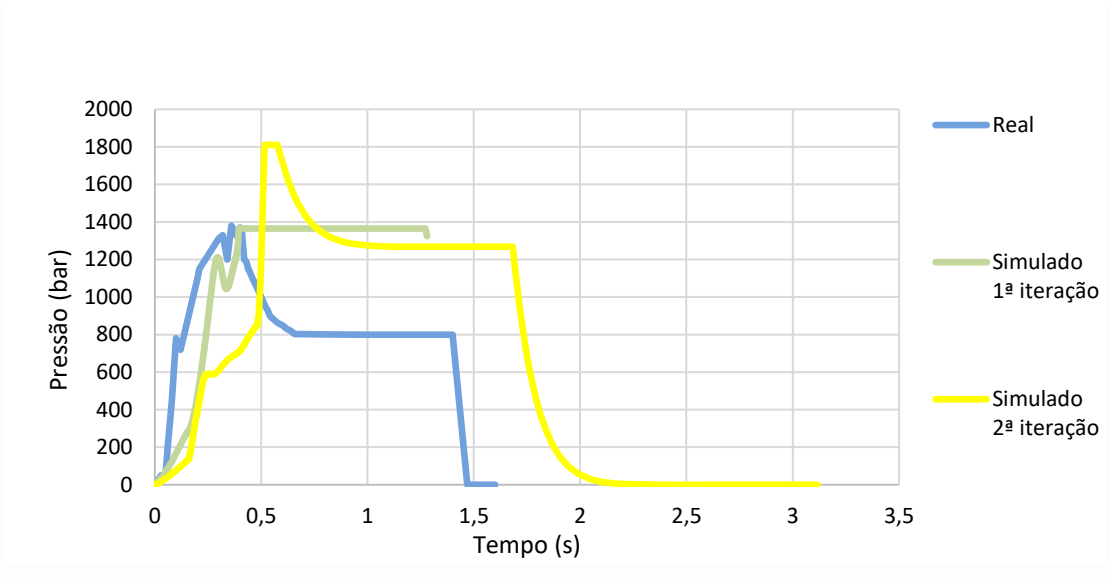


Figura 21 - Gráfico Pressão Tempo placa 3 e 4

Utilizou-se o método da comparação entre posição do fuso e a posição de enchimento entre o caso real e simulado (designado por método de *short-shots*), ou seja, verificação passo-a-passo do processo de enchimento tendo em consideração o avanço do fuso durante o ciclo de injeção. No caso real, foi variada a dosagem utilizada entre 100% do valor para aquela peça, até 10% do valor de dosagem inicial. Na Figura 22 são apresentados os resultados com 10% de dosagem, 40% e 90%.

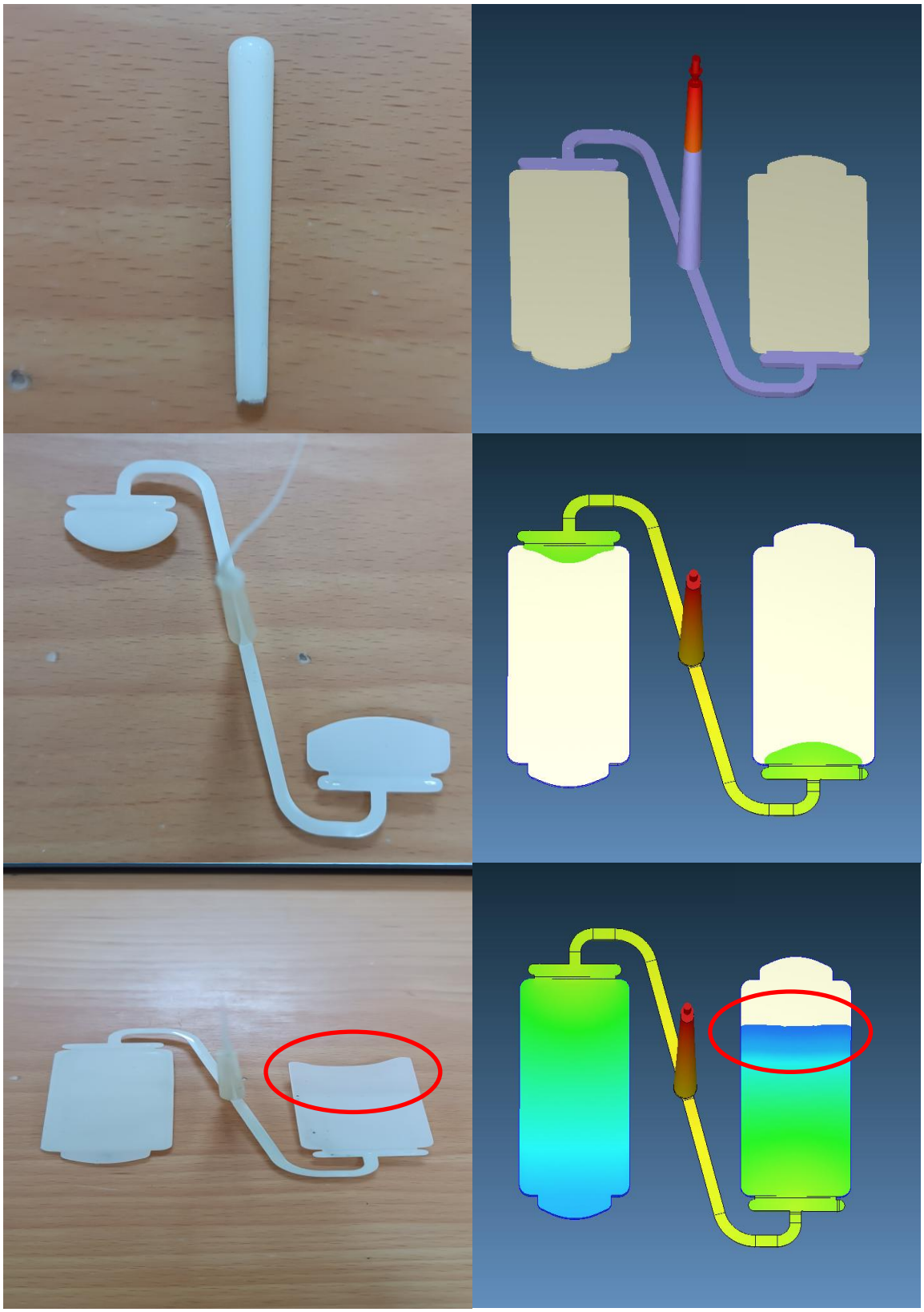


Figura 22 - Frente de fluxo real e simulada, respetivamente

É possível observar, principalmente a 90% do enchimento que a frente de fluxo se demonstra diferente, como demonstrado na figura rodeado a vermelho. A velocidade nas paredes no caso real demonstra-se superior há velocidade no centro da peça, já na simulação esta velocidade apresenta-se uniforme.

Para além do comparativo de pressão ao longo do tempo, e da posição do fuso com a frente de fluxo foi analisado o peso das peças quando 100% preenchidas. Como é possível observar, na Tabela 4, o peso das peças não apresenta desvios significativos. Desta forma assume-se que o modelo, para todas as peças está validado.

Tabela 4 - Comparativo do peso das peças simuladas e reais

	Simulado	**Real**
Peça 1	1,496 **g**	1,666 **g**
Peça 2	3,413 **g**	3,478 **g**
Peça 3	5.051 **g**	5,253 **g**
Peça 4	6,816 **g**	6,866 **g**

3.3 Influência da forma de cargas na sua distribuição e taxas de corte

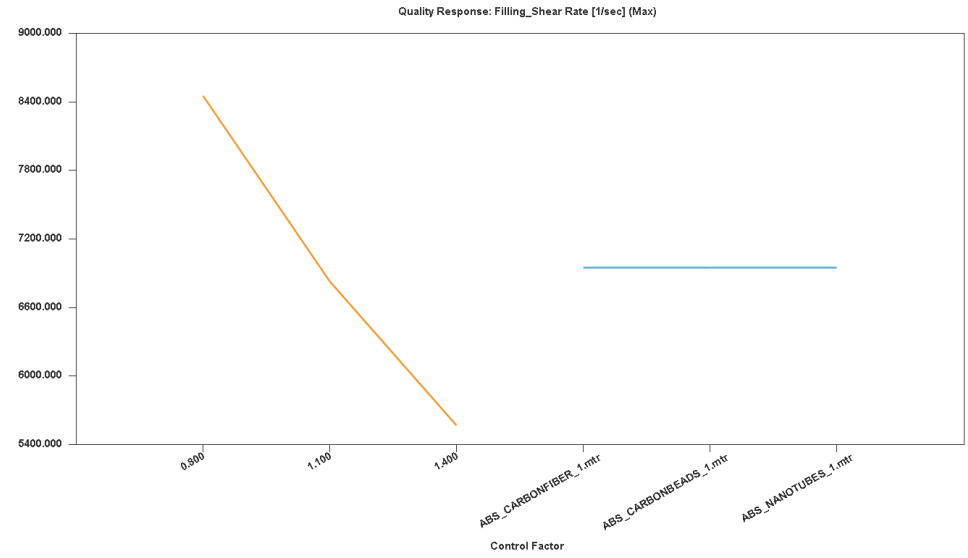
De modo a estudar a influência do formato das cargas a taxas de corte diferentes na distribuição das mesmas nas peças previamente foi necessário entender se o Moldex3D® teria capacidade de prever diferentes morfologias com alteração dos parâmetros de processo. Para tal, recorreu-se à base de um ABS POLYLAC PA 726, da **Chi Mei**, editou-se o material adicionando 10% de fibras. Mantiveram-se todas as especificações do material, como MFI, densidade, curvas PVT, entre outros. Esta metodologia é a única forma de isolar o efeito de adição da mesma quantidade de carga (10% GF) com diferentes morfologias.

De seguida adicionaram-se três tipos de cargas diferentes denominadas de fibras de carbono, esferas de carbono e nanotubos de carbono, com as mesmas propriedades mecânicas, mas com rácios entre o comprimento e diâmetro da carga distintos. As fibras de carbono apresentam uma razão de 20, para os nanotubos de carbono uma razão de 5 e para as esferas uma razão de 1(sendo importante realçar que apesar das denominações utilizadas estes apresentam exatamente a mesma escala). Esta era a única metodologia avaliar o efeito de isolar a morfologia da carga na distribuição e posteriormente das taxas de corte.

No Anexo 3 estão apresentados todos os valores de propriedades mecânicas dos materiais compósitos caracterizados digitalmente na base de dados do Moldex3D® e utilizados nestas simulações.

Depois de criados digitalmente estes materiais recorreu-se a um *Design of Experiments* (DOE). Este consiste na realização de sucessivos ensaios com alterações controladas e premeditadas dos parâmetros do processo com o objetivo de identificar os seus respetivos efeitos em uma dada resposta. O objetivo é determinar quais variáveis de

entrada apresentam maior impacto sobre a variável de saída, de maneira a definir a melhor configuração para otimizar o resultado de interesse.



Setting **Summary**

DOE Table

Control Factor	Filling Time [sec]	Material	Quality Factor	Filling_Shear Rate [1/sec] (Max)	Add Quality Factor
Level	3	3	Target	Global	
Min	0.8		Goal	Smaller	
Max	1.4		Weighting	1	0
1. Run03	0.8	ABS_CARBONFIBER_1.mtr	1. Run03	8451.37	
2. Run04	0.8	ABS_CARBONBEADS_1.mtr	2. Run04	8451.37	
3. Run05	0.8	ABS_NANOTUBES_1.mtr	3. Run05	8451.37	
4. Run06	1.1	ABS_CARBONFIBER_1.mtr	4. Run06	6827.4	
5. Run07	1.1	ABS_CARBONBEADS_1.mtr	5. Run07	6827.4	
6. Run08	1.1	ABS_NANOTUBES_1.mtr	6. Run08	6827.4	
7. Run09	1.4	ABS_CARBONFIBER_1.mtr	7. Run09	5568.33	
8. Run10	1.4	ABS_CARBONBEADS_1.mtr	8. Run10	5568.33	
9. Run11	1.4	ABS_NANOTUBES_1.mtr	9. Run11	5568.33	
Run12*	**1.4**	**ABS_CARBONFIBER_1.mtr**	**Run12***	**5568.33**	
Prediction					
Setting	1.4	ABS_CARBONFIBER_1.mtr	Predicted Value	5568.33	

Figura 23 - Dependência das taxas de corte do tempo de injeção e formato das cargas

O DOE foi idealizado com os três tipos de materiais e três tempos de injeção diferentes com o objetivo de reduzir as taxas de corte no enchimento. Os resultados indicam taxas de corte absolutamente iguais independente do formato de carga utilizado como apresentado na Figura 23, onde o eixo vertical

representa o valor nominal das taxas de corte e no eixo horizontal o tempo de injeção e tipo de carga respetivamente. Demonstrou-se que as taxas de corte sofrem enormes influências apenas pelo tempo injeção utilizado.

Foi também analisada a dependência da distribuição das cargas da forma das mesmas. Nas Figuras 24, 25 e 26 são apresentadas as distribuições das cargas por volume e na Tabela 4 o tipo de carga em cada iteração realizada.

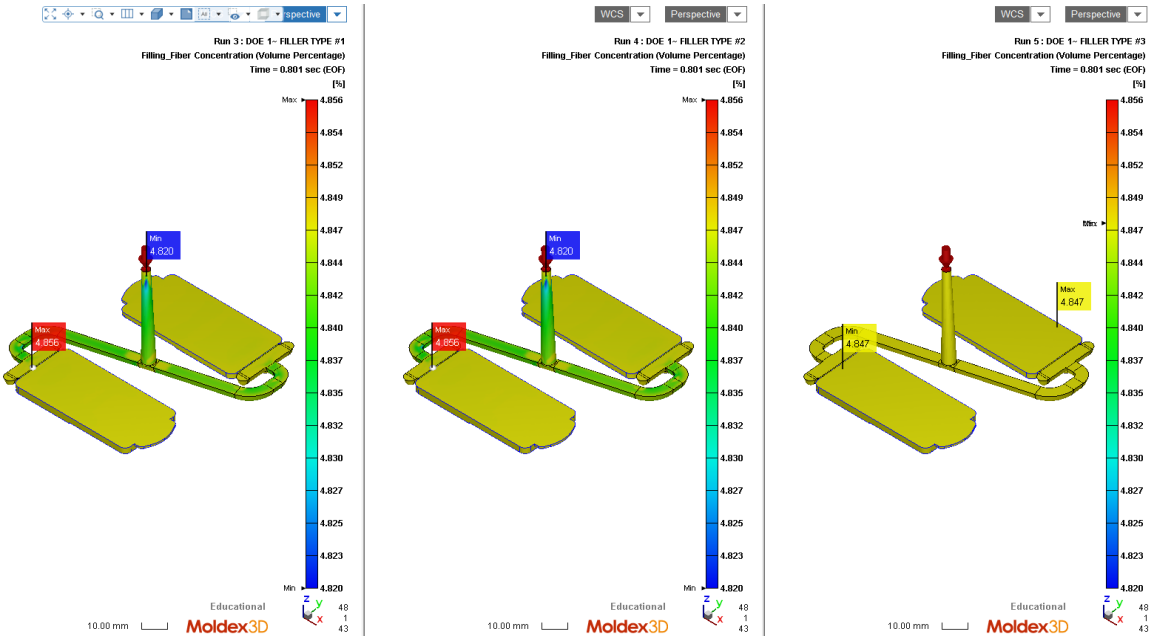


Figura 24 - Distribuição das cargas por volume - tempo de injeção = 0,8s

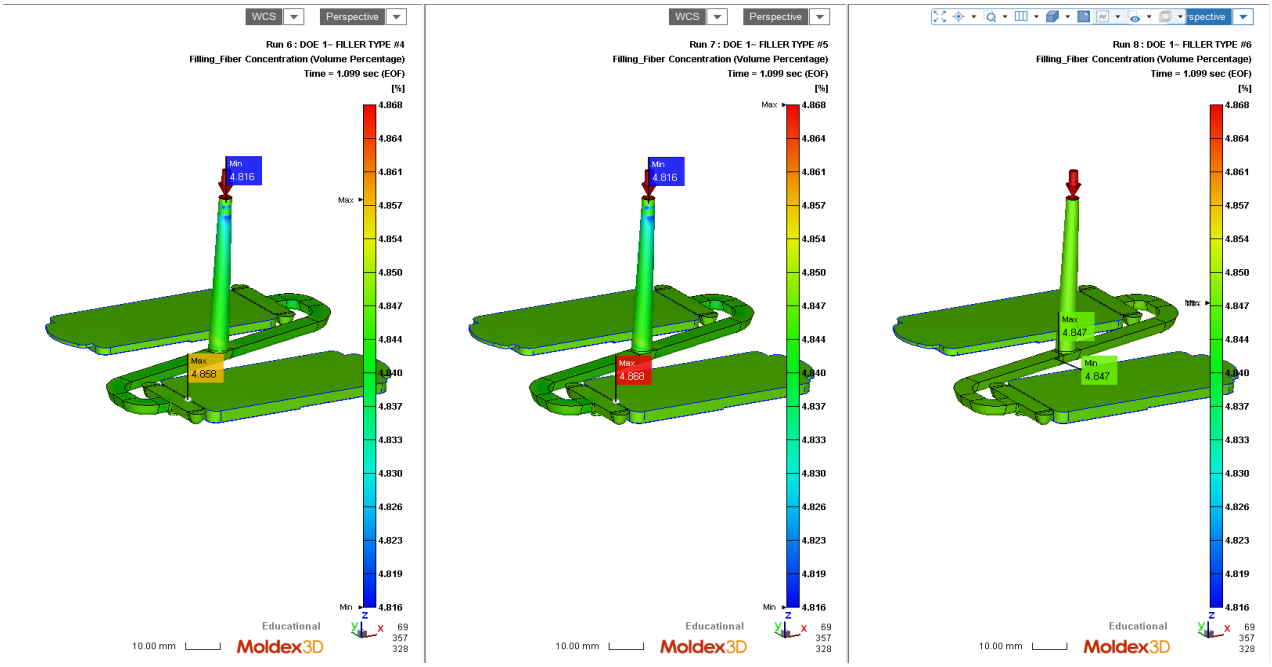


Figura 25 - Distribuição das cargas por volume - tempo de injeção = 1,1s

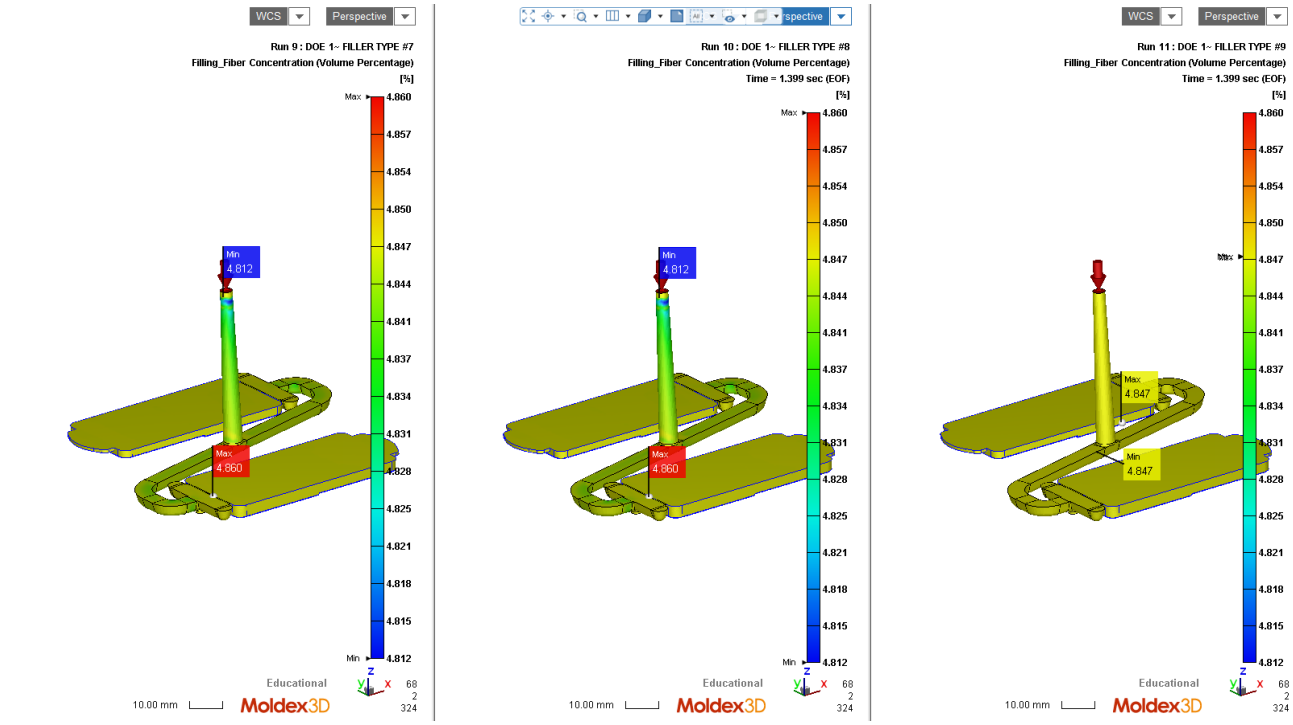


Figura 26 - Distribuição das cargas por volume - tempo de injeção = 1,4s

Nas simulações, à semelhança dos resultados obtidos para as taxas de corte, a tipologia das cargas parece não apresentar significativas diferenças de valores. No entanto, num caso real, se tal acontecesse todas as características do material, como por exemplo as curvas PVT seriam alteradas logo não é possível retirar conclusões válidas deste método.

Tabela 4 - Runs e respetivas formas de carga

Run 3,6 e 9	Fibras (L/D = 20)
Run 4,7 e 10	Esferas (L/D = 1)
Run 5,8 e 11	Nanotubos (L/D = 5)

3.4 Influência de diferentes condições de processamento na distribuição de cargas e taxas de corte nas peças

Para estudar a influência de diferentes condições de processamento na distribuição de cargas e taxas de corte nas peças, foi realizado um DOE utilizando três tipos de ABS, reforçados com 20% de fibras de vidro e com diferentes viscosidades nomeadamente: ABS STAREXGR-4020 (MFI 4 g/10 min), ABS STAREXGR-4820 (MFI 14 g/10 min) e ABS STAREXGR-4920 (MFI 20 g/10 min). Além disso, foram estudadas três temperaturas diferentes do molde e três tempos de enchimento distintos.

O DOE foi calculado com o objetivo de identificar a combinação de material e parâmetros de processamento que resultasse na menor taxa de corte possível. Os materiais e parâmetros de processo escolhidos estão detalhados na Tabela 5 para as placas 1 e 2.

Esta abordagem permitiu uma análise sistemática e abrangente das variáveis envolvidas, fornecendo informações valiosas sobre como otimizar o processo de injeção para minimizar as taxas de corte e melhorar a qualidade das peças moldadas.

Tabela 5 - Materiais e parâmetros escolhidos para simulação da placa 1 e 2

Material	MFI 4g/10min	MFI 14g/10min	MFI 20g/10min	**Fator de qualidade**	**Objetivo**
Temperatura do Molde	40℃	50℃	60℃	Taxas de corte no enchimento	diminuir
Tempo de enchimento	0.8 s	1.1 s	1.4 s		

Na Figura 27, para a placa 1 e 2, a combinação otimizada das variáveis, ou seja, que apresenta taxas de corte mais baixas (eixo vertical), apresentadas na Tabela 5 são: temperatura do molde a 60℃, 1.4s para o tempo de enchimento e o ABS STAREXGR-4020, ou seja, o que apresenta maior viscosidade.

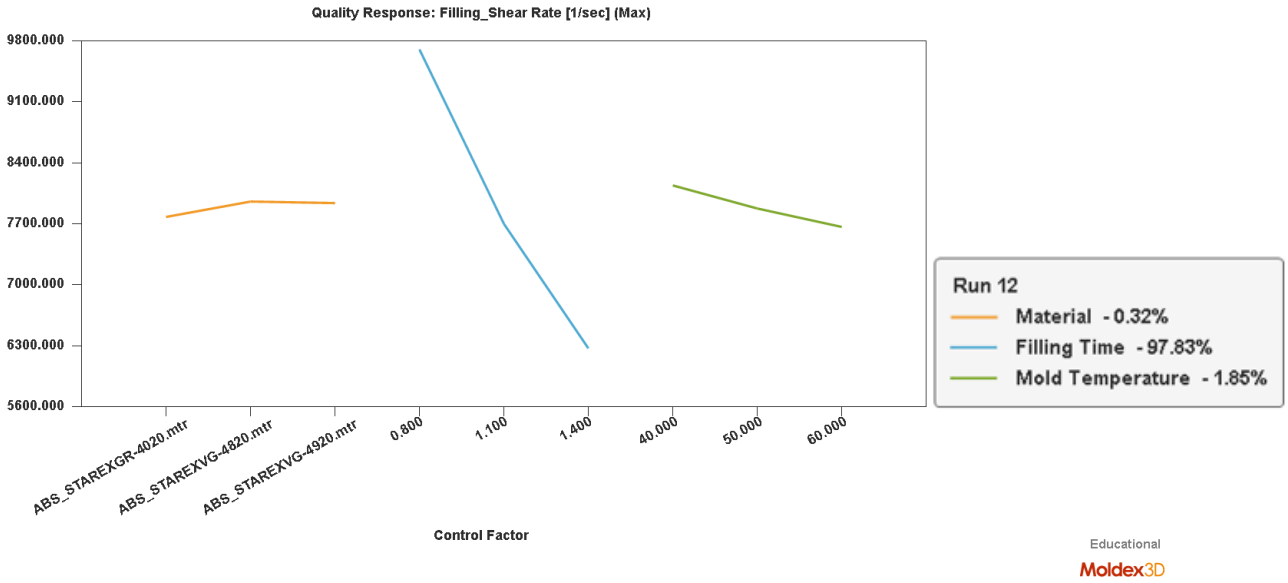


Figura 27 - Dependência das taxas de corte do tempo de injeção e da viscosidade do material

Como podemos observar, o tempo de enchimento é o fator de controlo que mais afeta a variação de taxas de corte seguido da temperatura do molde e por fim o material.

Para o caso real, vão ser injetadas peças com os parâmetros de processo apresentados em cima, para a maior taxa de corte e para a menor taxa de corte de modo a analisar qual a verdadeira influência da mesma na metalização.

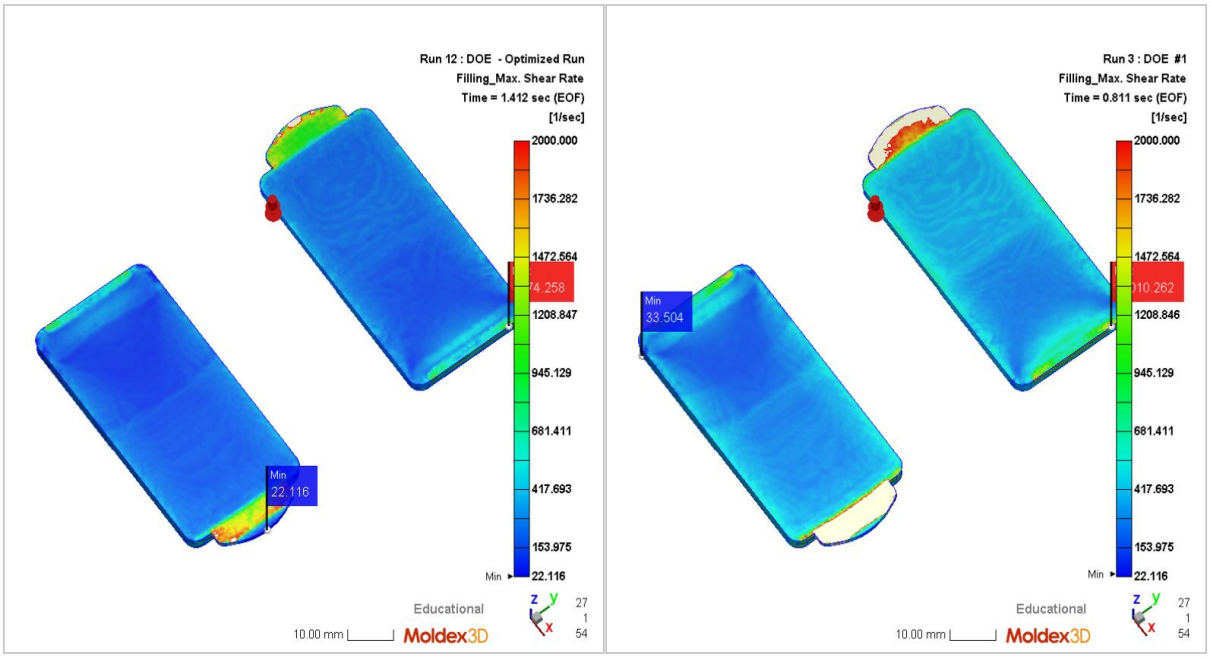


Figura 28 - Taxas de corte placa 1 e 2

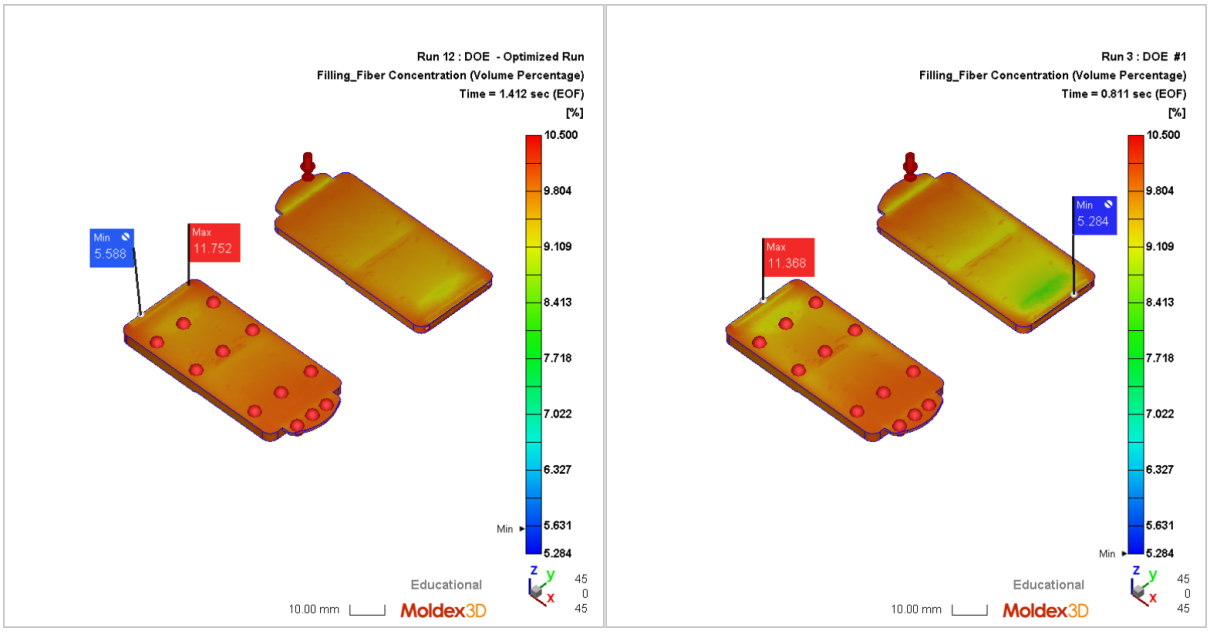


Figura 29 - Concentração de fibras por volume placa 1 e 2

Devido às diferenças nas taxas de corte entre a Iterações 12 e 3 a concentração de fibras na peça é diferente, como é ilustrado na Figura 29. A simulação mais otimizada, ou seja, a que apresenta menor taxas de corte tem um desvio de concentração menor em todo o volume da peça. Na simulação, os pontos onde a concentração de cargas é menor não são necessariamente os pontos onde a taxa de corte é maior contrariamente ao que seria expectável.

Para o caso real o material utilizado foi um RTP ESD[1] C 600, um ABS natural com diferentes cargas, nomeadamente de negro fumo e outras cargas metálicas não identificadas pelo fornecedor. No Anexo 4 encontra-se a ficha técnica do material.

Foram injetadas trinta peças para cada condição de processo (menores e maiores taxas de corte). Os parâmetros de processo utilizados estão representados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Parâmetros de injeção maior taxa de corte

Tempo de injeção 0,8 s	**Tempo de compactação** 8 s	**Temperatura do fundido** 230℃	**Temperatura do molde** 40℃
Dosagem 80 mm	***VP switch*** 10 mm	**Velocidade de injeção** 100 mm/s	**Pressão máxima máquina** 130 bar

Tabela 7 - Parâmetros de injeção menor taxa de corte

Tempo de injeção 1,4 s	**Tempo de compactação** 8 s	**Temperatura do fundido** 230℃	**Temperatura do molde** 60℃
Dosagem 80 mm	***VP switch*** 10 mm	**Velocidade de injeção** 55 mm/s	**Pressão máxima máquina** 130 bar

Como referido previamente o principal objetivo do trabalho a ser desenvolvido seria terminar com a necessidade de processos químicos prévios à cromagem nomeadamente o mordentado. No entanto como é possível observar na Figura 30 para a placa 1 e 2, independentemente dos parâmetros de injeção utilizados, as peças não apresentam uma deposição do filme metálico com qualidade satisfatória. Podemos descrever metalização satisfatória como a metalização completa da superfície das peças. Sem recorrer ao mordentado não existem sinais de metalização da superfície.

[1] A sigla ESD, da empresa RTP, representa materiais compósitos electrostaticamente dissipativos.



Figura 30 - Tentativa de Metalização sem mordentado. A) Menor taxa de corte; B) Maior taxa de corte

Recorrendo à simulação é possível observar que quando se efetuam injeções com materiais carregados a tendência das cargas é migrarem para o interior da peça deixando a superfície com uma espécie de casca apenas de polímero. Sem o ataque químico que crie poros na superfície permitindo assim as cargas com condutividade fiquem expostas não é possível metalizar. Nas Figuras 31 e 32 faz-se um re-escalamento da distribuição das cargas para a escala de distribuição de cargas para 10,3% e 10%, respetivamente, é percetível a diferença entre a casca e o centro da peça.

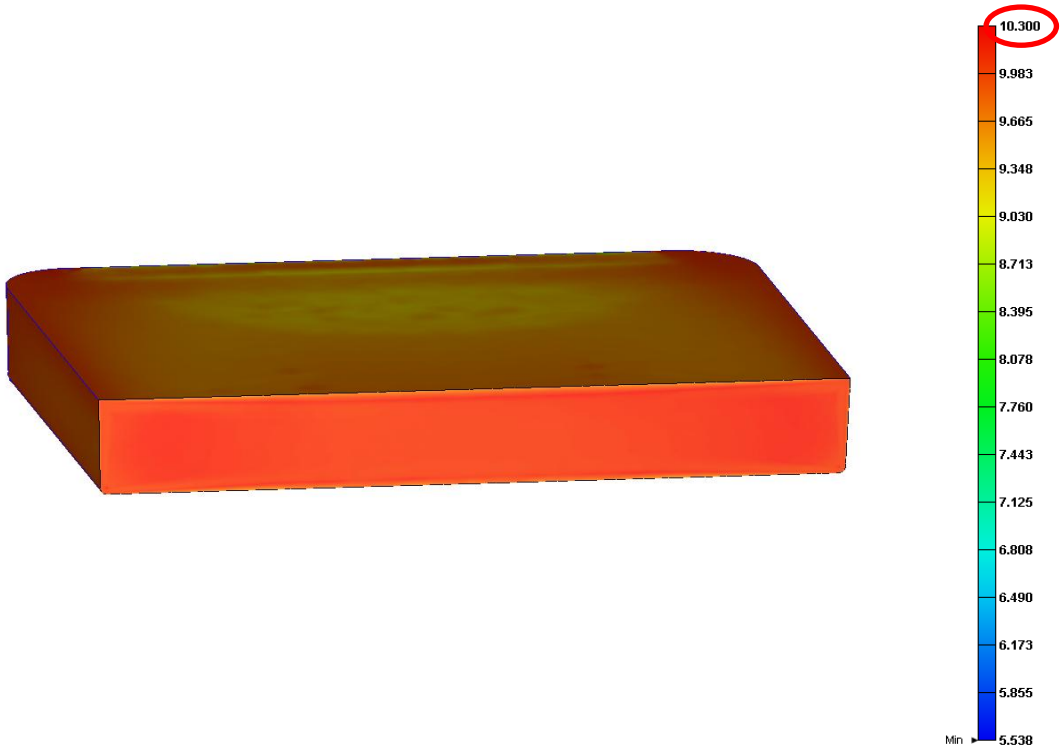


Figura 31 - Distribuição de cargas na espessura (Escala 10,3% Máx)

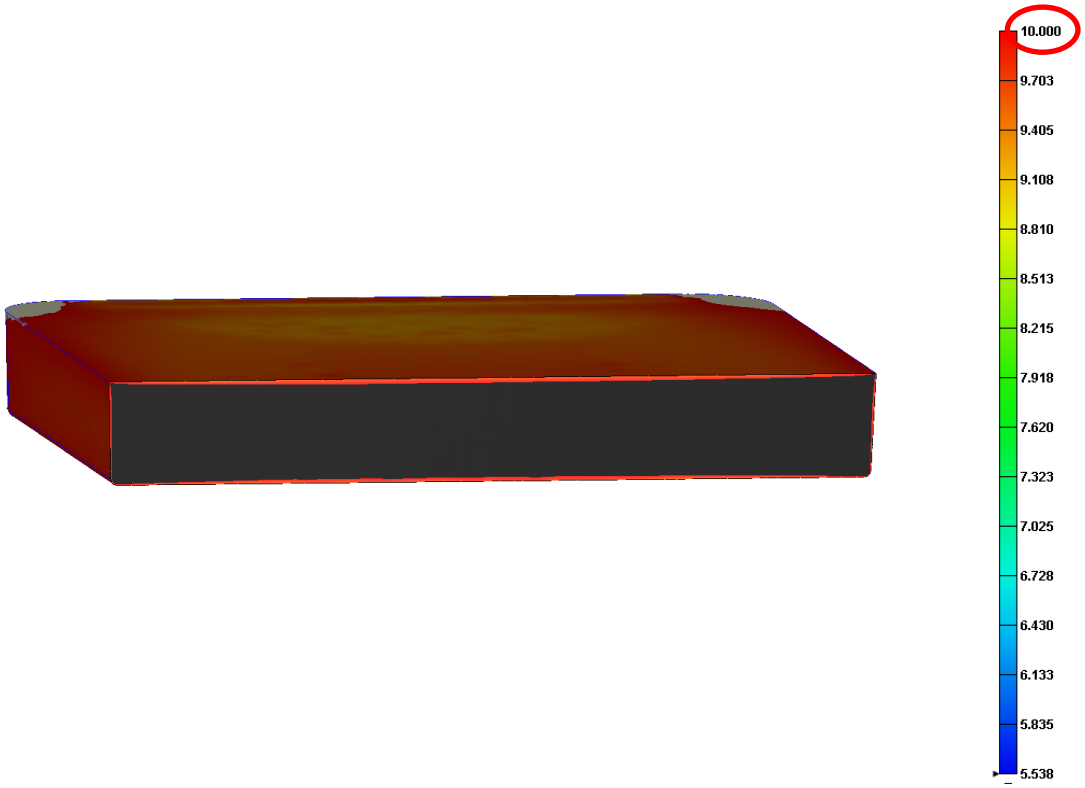


Figura 32 - Distribuição de cargas na espessura (Escala 10,0% Máx)

Devido a esta adversidade furou-se a peça de forma a expor o centro da mesma, no entanto, como foi visível na Figura 30, nem recorrendo a este método a peça apresenta sinais de metalização. Era por isso necessário, recorrer ao mordentado.

Na Figura 33 e 34 são apresentadas as peças expostas primeiramente ao mordentado e só depois foram metalizadas. No entanto, como é possível observar apesar de submetidas ao ataque químico a metalização não é satisfatória, apresentado vários defeitos e seções sem metalização. Algumas destas secções demonstram defeitos possivelmente da hesitação do fundido na moldação por injeção. Tanto para taxas de corte mais elevadas como para as mais baixas, não existe diferença significativa na metalização, concluído que pelo menos com a máquina Boy 22A, limitada a 22ton. de força de fecho, não é possível reduzir o suficiente as taxas de corte para observar um aumento na qualidade de metalização.



Figura 33 - Menor taxa de corte (run 12)

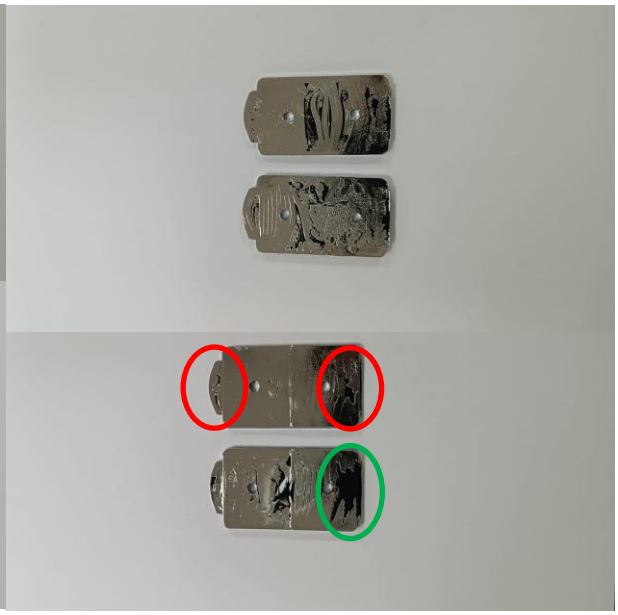


Figura 34 - Maior taxa de corte (run 3)

Nas formas com contorno verde são percetíveis algumas semelhanças quanto às concentrações de carga e taxas de corte apresentadas no DOE da Figura 34, fortalecendo a hipótese da metalização estar diretamente relacionada com as taxas de corte que o material é submetido durante o processo de enchimento da cavidade moldante no entanto a simulação demonstra que a peça mais fina, nas figuras acima rodeadas com formas de contorno vermelho, apresenta maior taxa de corte e menor concentração de cargas em algumas partes logo seria previsível que obtivessem pior metalização. Na Figura 33 e 34 é percetível que pelo menos numa face da peça a metalização é bem mais consistente nestas peças não permitindo retirar conclusões válidas sobre a hipótese em cima referida.

À semelhança da placa 1 e 2 os parâmetros de processo para a placa 3 e 4 de modo a desenvolver o método DOE são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Materiais e parâmetros escolhidos para a simulação da placa 3 e 4

Material	MFI 4g/10min	MFI 14g/10min	MFI 20g/10min		**Fator de qualidade**	**Objetivo**
Temperatura do Molde	40℃	50℃	60℃		Taxas de corte no enchimento	diminuir
Tempo de enchimento	0.3 s	0.6 s	0.9 s			

Nas placas 3 e 4, a combinação otimizada das variáveis apresentadas na Tabela 8 são: temperatura do molde a 50℃, 0.9 segundos de injeção e o ABS STAREXGR-4920. Comparativamente às placas 1 e 2, o material que apresenta menor taxas de corte é o extremo oposto às placas 3 e 4.

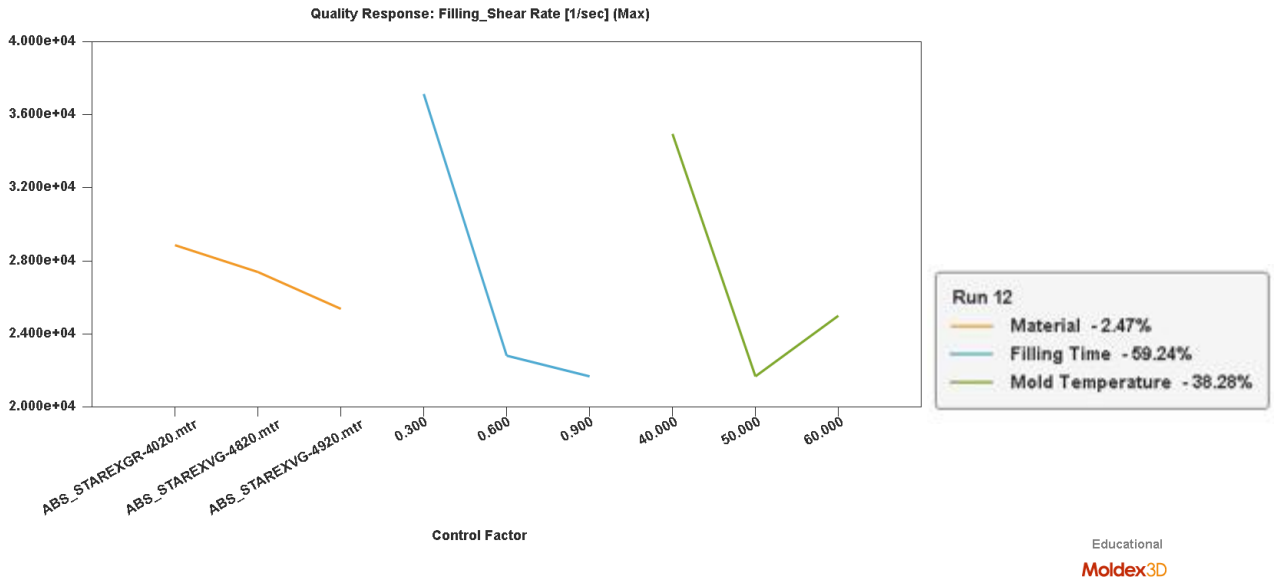


Figura 35 - Resposta de qualidade DOE placas 3 e 4

O tempo de injeção continua a ser o parâmetro que aparenta mais afetar a variação de taxas de corte, de seguida a temperatura do molde e por fim o material. Apesar das iterações realizadas no Moldex3D®, através do DOE, apresentarem o enchimento total das cavidades moldantes, no caso real isso não verifica. Com os parâmetros de processo que apresentam maiores taxas de corte, não foi possível encher as cavidades moldantes. O mesmo acontece para o processo com parâmetros que

resultam nas menores taxas de corte. Na Figura 36 são apresentadas as peças com falta de enchimento completo, com os seguintes parâmetros de processo: 0,3 segundos de injeção e a temperatura do molde a 40℃.



Figura 36 - Peças injetadas placa 3 e 4

3.5 Provetes

Devido à limitação da força de fecho da máquina de injeção Boy 22A utilizada previamente, com um valor máximo de 22 toneladas, recorreu-se a outra máquina que dispunha de mais força. Esta máquina disponibilizada também no Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho é uma Engel Spex Victory 50, com 50 toneladas de força de fecho, ilustrada na Figura 37.



Figura 37 - Máquina de Injeção Engel spex victory 50

Estudou-se a possibilidade de transferência do molde para esta máquina, no entanto, era necessário adaptar várias partes como o anel de centragem, o extrator da máquina e o injetor o que se demonstrou inviável para o projeto. Devido as estas limitações técnicas, recorreu-se a um novo molde de dois provetes de diferentes dimensões, através de postiços moldantes que implicariam injetar separadamente. Denominou-se de provete pequeno a peça com faces em formato de paralelogramas e provete grande a peça que apresenta uma geometria com curvatura. Secou-se o material (RTP ESD C 600), na estufa por 2 horas a 80℃, de seguida foram escolhidos alguns parâmetros de processo fixos como a temperatura do fundido, o curso total, comutação, entre outros variando a velocidade de injeção visto que como referenciado no estudo prévio esta é a variável que apresenta maior influência nas taxas de corte. Teve início com o valor máximo permitido pela máquina (193,9mm/s) sendo reduzido progressivamente até que as peças apresentarem defeitos derivados da dificuldade de enchimento. Deste modo obtivemos um valor máximo e mínimo de taxas de corte para os parâmetros de processo fixos apresentados. Os parâmetros de processo de ambos os provetes são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de processo dos provetes

	Tempo de injeção	**Tempo de compactação**	**Dosagem**	**Comutação**	**Velocidade de injeção**	**Temperatura do fundido**
Provete pequeno Menor taxa de corte	0,125 s	10,123 s	32,5mm	4,3 mm	127,3 mm/s	230℃
Provete pequeno Maior taxa de corte	0.102 s	10,101 s	32,5 mm	4,3 mm	193,9 mm/s	230℃
Provete grande Menor taxa de corte	0.186 s	10,185 s	34,5 mm	5 mm	127,3 mm/s	230℃
Provete grande Maior taxa de corte	0,130 s	10,134 s	34,5 mm	5 mm	193,9 mm/s	230℃

Depois de injetadas colocaram-se as peças nas linhas de metalização galvánica, que foram previamente aos banhos dos estágios iniciais de mordentado.

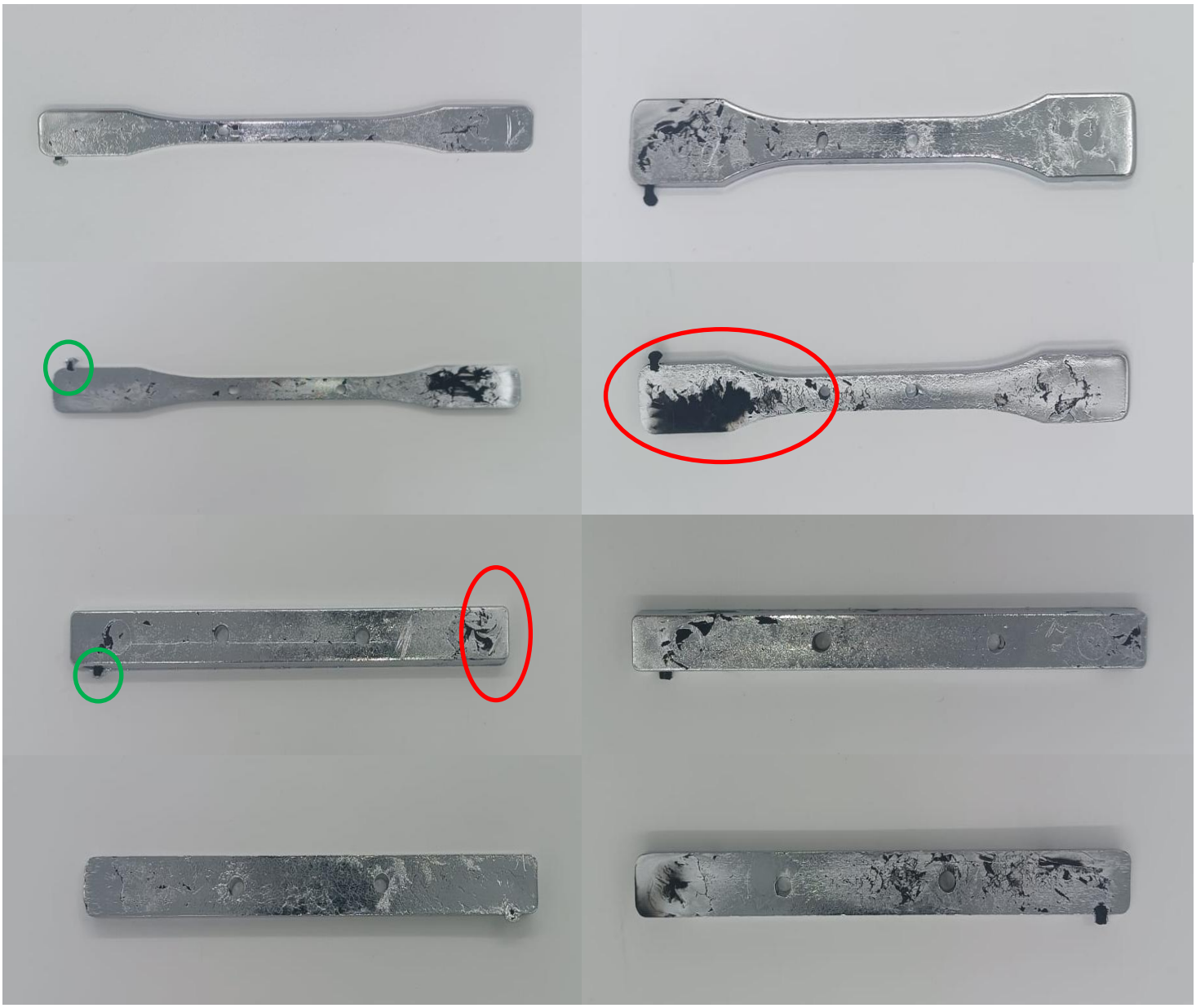


Figura 38 - Taxas de corte baixas (Esquerdo) E Taxas de corte altas (Direita) no caso real

Como é possivel observar todas as peças, independentemente da velocidade de injeção utilizada apresentam uma qualidade de metalização bastante semelhante. Como forma de avaliar se as hipóteses já discutidas anteriormente teriam alguma validade científica, recorreu-se novamente à simulação de modo verificar a intensidade e distribuição das taxas de corte que se geravam durante a fase de enchimento destas peças.

Como com o material simulado previamente não foi possivel criar métricas entre as taxas de corte e respetiva satisfação de metalização com o caso real recorreu-se a outro, sem cargas indicado pelo fornecedor da nova matéria prima. O material utilizado na simulação foi desenvolvido por uma empresa externa, obtendo resultados bastante verossívemeis quando comparando os casos reais às iterações simuladas. Ressalvando que este não tem cargas na sua matriz apenas é possivel analisar onde na simulação em que seções dos provetes as taxas de corte são mais altas e comparar nessas seções a qualidade de metalização.

À semelhança das peças previamente referidas para o ambiente do Moldex3D® importaram-se os canais de alimentação e de controlo de temperatura, assim como o modelo CAD dos provetes. Os modelos de simulação estão representados nas Figuras 39 e 40.

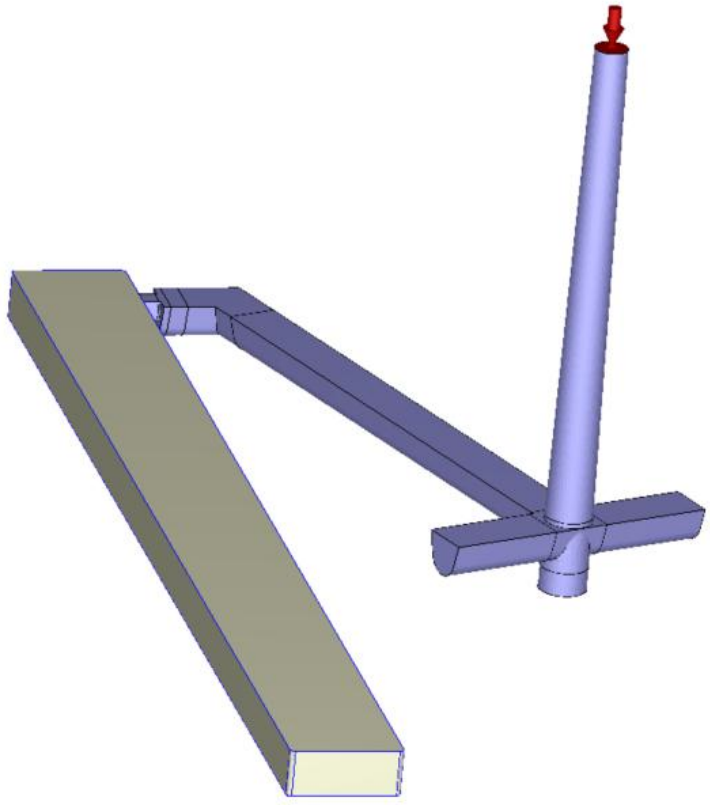


Figura 39 - Modelo provete pequeno

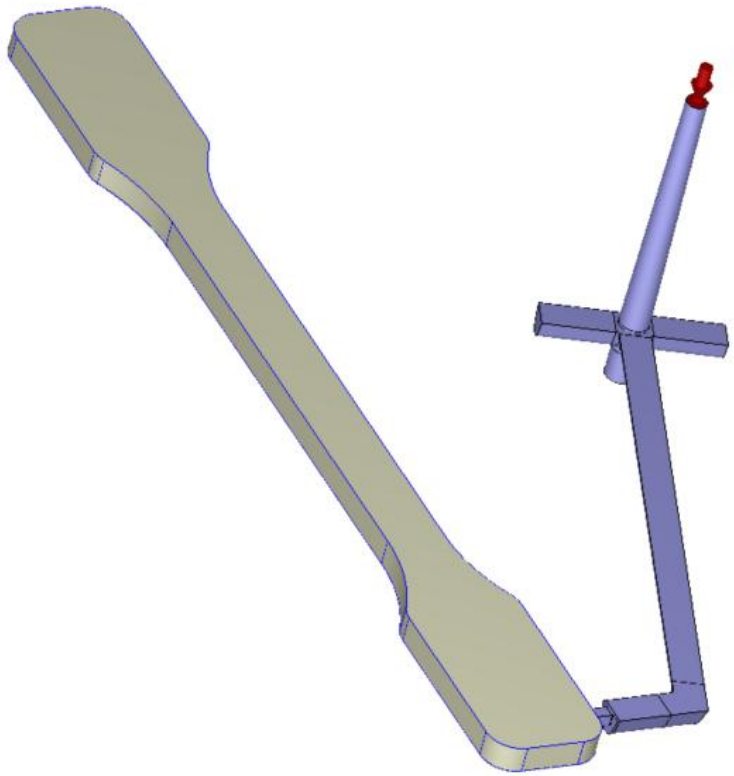


Figura 40 - Modelo provete grande

Desenvolveu-se a malha para cada um dos provetes sendo que para os parâmetros da malha BLM foram os mesmos que nas peças anteriormente estudadas. Finalmente, de modo a aproximar o caso real à simulação, caracterizou-se toda a máquina de injeção Engel Spex Victory 50 no Moldex3D®. Resta analisar as taxas de corte obtidas nas 4 condições de modo a tentar encontrar semelhanças com as falhas de metalização no caso real.

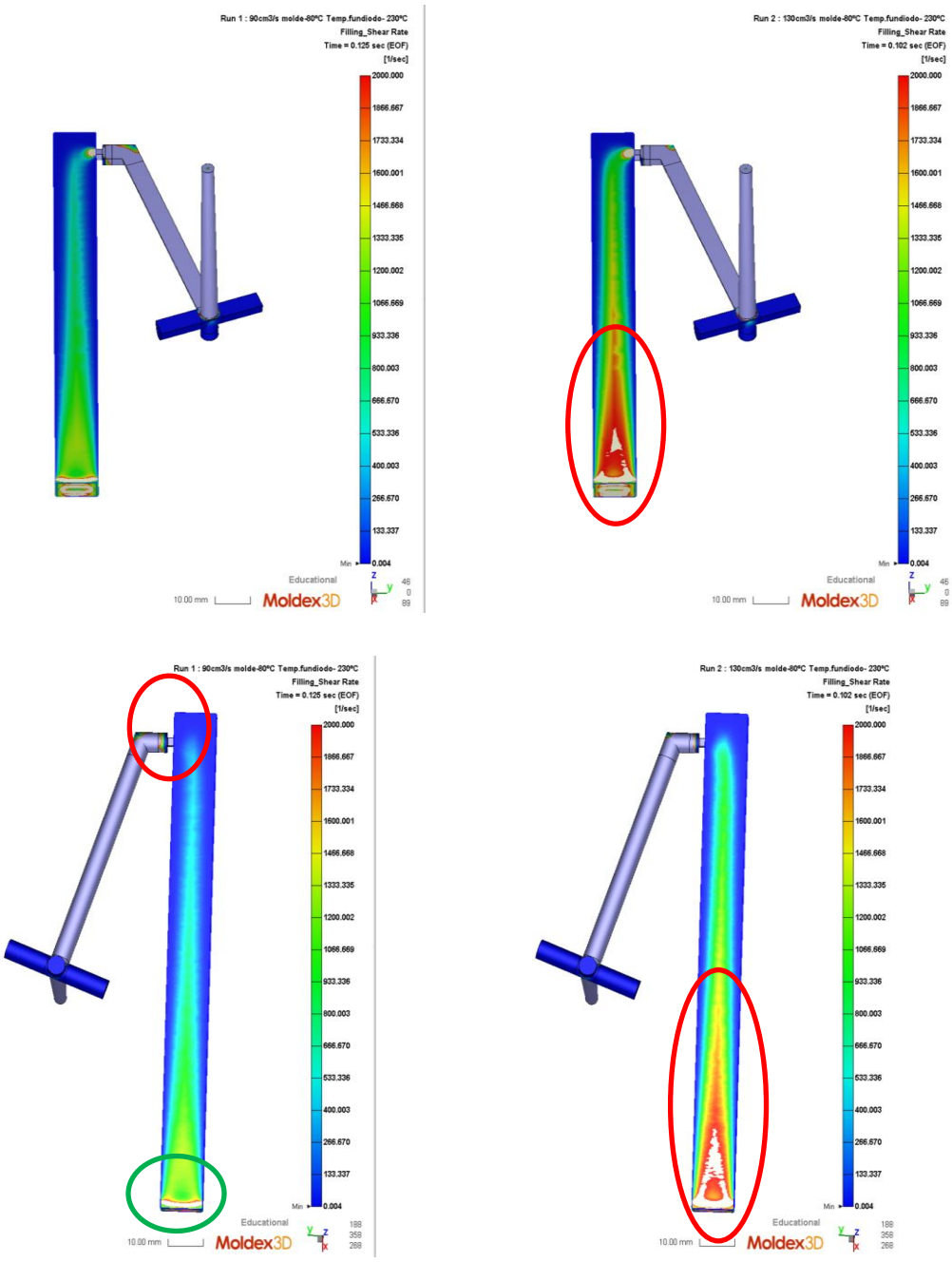


Figura 41 - Taxas de corte no provete pequeno

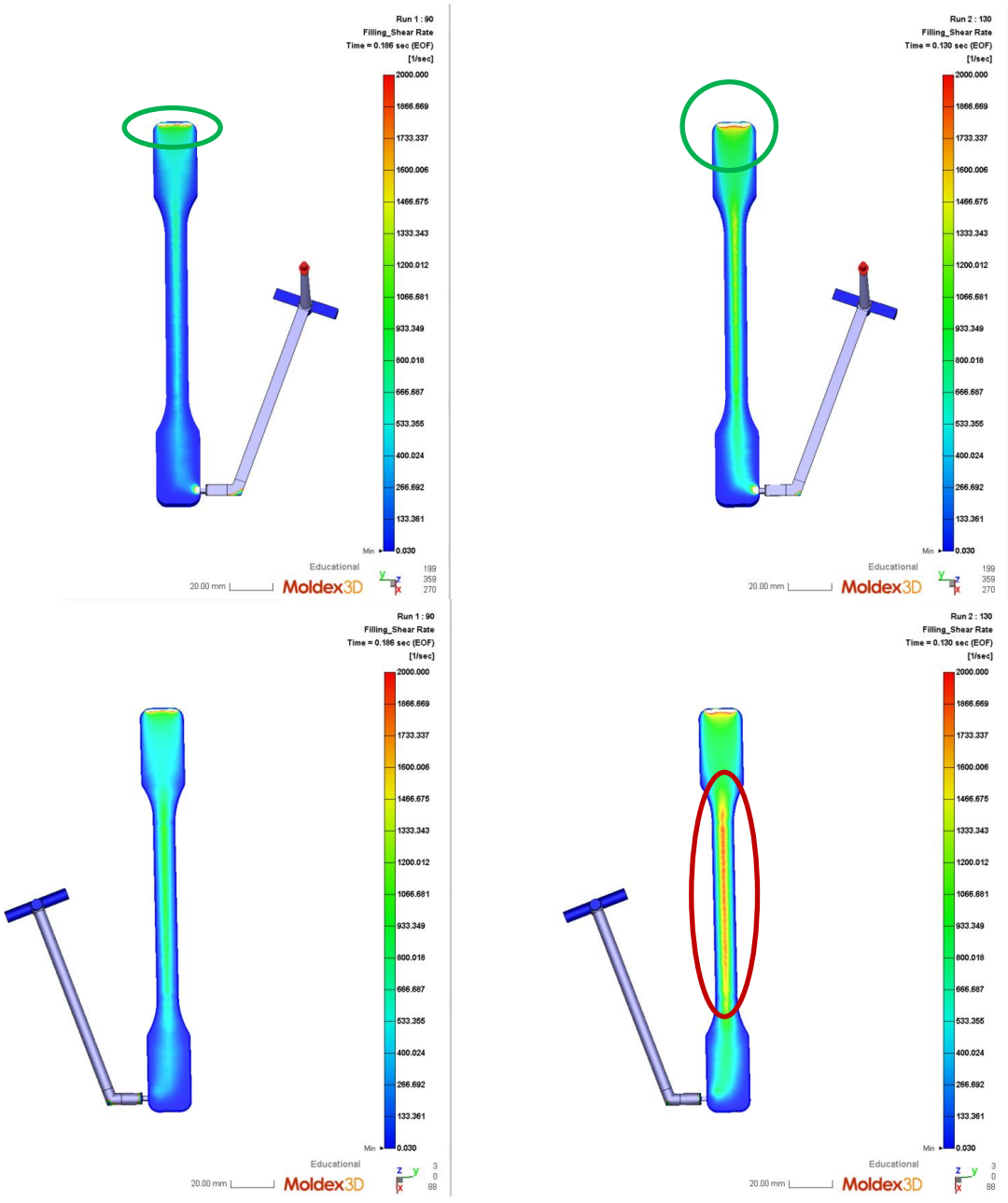


Figura 42 - Taxas de corte provete grande

Como é possível observar, nas formas com contorno verde é discutível que se perceba algumas semelhanças entre a simulação e o caso real, nomeadamente nas zonas do ataque onde as taxas de corte são tendencialmente mais elevadas observamos consistentemente falta de metalização, no entanto nas formas com contorno vermelho, onde era expetável ocorrer alguma diferença na qualidade de metalização no entanto ela mantém-se.

Neste caso não é possível retirar resultados finais e irrefutáveis, visto que em vários testes e com várias condições diferentes a qualidade da metalização não demonstrou um padrão com a variação das taxas de corte.

4. Conclusão

Concluímos que a possibilidade de eliminar a etapa onde é aplicação de uma camada metálica sem o uso de corrente elétrica, com o objetivo de tornar a superfície do plástico condutora por meio do uso de polímeros condutores, não é inteiramente possível. Para ambas tecnologias de moldação utilizadas, as peças de modo a apresentarem algum tipo de metalização apresentam sempre a necessidade de serem expostas aos estágios iniciais da metalização galvânica, designado por mordentado. Na moldação por injeção apesar da variação das taxas de corte, através da alteração de diversos parâmetros de processo, os resultados obtidos na qualidade de metalização não se mostram dependentes das mesmas. No entanto, visto que na moldação por compressão, que é uma tecnologia que apresenta taxas de corte praticamente nulas, a metalização apresenta-se completa e praticamente sem defeitos, concluindo que não é apenas a taxa de corte que é importante, mas também a tecnologia de processamento utilizada. Recomenda-se que para o material utilizado, RTP ESD C 600, na moldação por injeção se utilize um molde com tecnologia de variação térmica imposta pelo utilizador, de modo aumentar a temperatura no fim do ciclo anterior e no início do novo para que a temperatura do molde seja alta o suficiente para diminuir a velocidade de injeção drasticamente sem que o polímero solidifique antes do total preenchimento e posterior pressurização da cavidade moldante. Assim com uma velocidade baixa, a distribuição de cargas em todo o volume da peça apresenta-se mais uniforme conseguindo obter uma metalização com menos defeitos. Outra possibilidade seria o estudo com diferentes cargas condutoras no caso real e a posterior caracterização destes materiais de modo a importar as suas propriedades para o programa de simulação. Assim seria possível perceber, de forma

mais ponderada e científica, qual a real da qualidade de metalização de materiais compósitos condutivos/dissipativos com a variação de taxas de corte.

REFERÊNCIAS

[1] Sood, A. K., Equbal, A., & Dixit, N. K. (2013). Electroless Plating on Plastic. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, *4*(8). http://www.ijser.org

[2] Augustyn, P., Rytlewski, P., Moraczewski, K., & Mazurkiewicz, A. (2021). A review on the direct electroplating of polymeric materials. In *Journal of Materials Science* (Vol. 56, Issue 27, pp. 14881–14899). Springer. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06246-w

[3] Supervisor, A., & Bendikiene, R. (n.d.). *MECHANICAL ENGINEERING AND DESIGN FACULTY Ajaykumar Narayampalliyalil Ravikumar CHROME PLATING ON ABS PLASTICS Final project for Bachelor/Master degree*.

[4] *Mariana Guerreiro da Silva Desenvolvimento de uma embalagem natural para contacto alimentar por termoformação*. (n.d.).

[5] *High-Quality Scientific Molding Plastics | All-Plastics*. (n.d.). Retrieved December 4, 2024, from https://www.all-plastics.com/scientific-molding-ensures-zero-defects/

[6] *Injeção de plástico: Principais Defeitos em Peças Injetadas - Moldblade*. (n.d.). Retrieved December 4, 2024, from https://moldblade.com/pt-pt/injecao-de-plastico-principais-defeitos-em-pecas-injetadas/

[7] A.M. Cunha e A.S.Pouzada. Processo de Moldação por Injeção - Cap. 1 O Processo e o respectivo Ciclo de moldação. Portugal: Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho.

[8] Da, P. H., & Coelho, S. L. (2014). *"ESTUDOS DO LIMIAR DE PERCOLAÇÃO ELÉTRICA DE NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS HÍBRIDOS DE PMMA COM NANOTUBOS DE CARBONO E NEGRO DE FUMO."*

[9] Huamin. Zhou, Computer modeling for injection molding*:* simulation, optimization, and control. Wiley, 2013.

[10] Manuel, J., Tavares, R. S., Profile, S., & Padilha, A. J. (1998). *Introdução ao método dos elementos finitos*. https://www.researchgate.net/publication/37649859

[11] Azevedo, Á. F. M. (2003). *MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS*. http://www.fe.up.pt/~alvaro

[12] Tiusanen, J., Vlasveld, D., & Vuorinen, J. (2012). Review on the effects of injection moulding parameters on the electrical resistivity of carbon nanotube filled polymer parts. *Composites Science and Technology*, *72*(14), 1741–1752. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.07.009

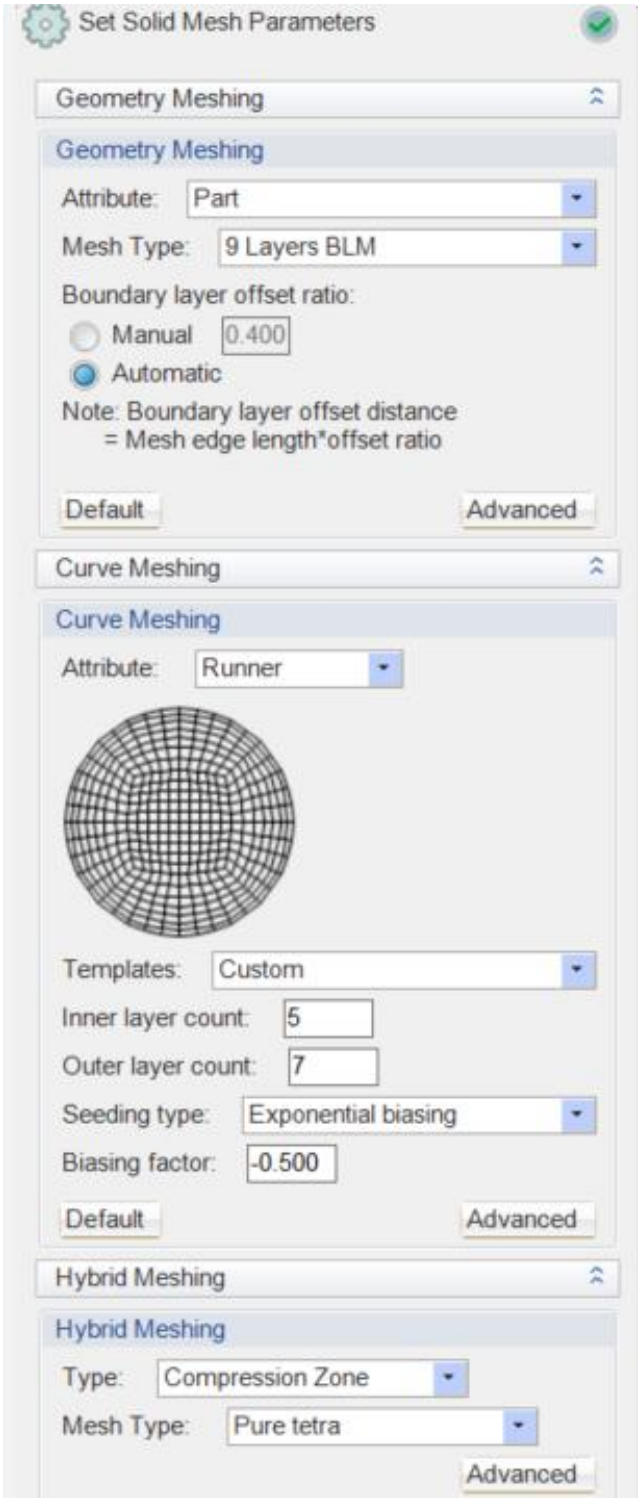
[13] Doagou-Rad, S., Islam, A., & Søndergaard Jensen, J. (2018). Correlation of mechanical and electrical properties with processing variables in MWCNT reinforced thermoplastic nanocomposites. *Journal of Composite Materials*, *52*(26), 3681–3697. https://doi.org/10.1177/0021998318768390

[14] Dul, S., Pegoretti, A., & Fambri, L. (2018). Effects of the nanofillers on physical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene nanocomposites: Comparison of graphene nanoplatelets and multiwall carbon nanotubes. *Nanomaterials*, *8*(9). https://doi.org/10.3390/nano8090674

[15] dal Lago, E., Cagnin, E., Boaretti, C., Roso, M., Lorenzetti, A., & Modesti, M. (2020). Influence of different carbon-based fillers on electrical and mechanical properties of a PC/ABS blend. *Polymers*, *12*(1). https://doi.org/10.3390/polym12010029

[16] Gutierrez, B. J. A., Dul, S., Pegoretti, A., Alvarez-Quintana, J., & Fambri, L. (2021). Investigation of the Effects of Multi-Wall and Single-Wall Carbon Nanotubes Concentration on the Properties of ABS Nanocomposites. *C*, *7*(2), 33. https://doi.org/10.3390/c7020033

ANEXO I – PARÂMETROS MALHA BLM



ANEXO 2 – FICHA TÉCNICA ABS POLYLAC PA-726 DA CHI MEI

Material Notes:
Electro-plating

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.04 g/cc	0.0376 lb/in³	ISO 1183

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Ball Indentation Hardness	99.0 MPa	14400 psi	H358/30; ISO 2039-1
Tensile Strength at Break	35.0 MPa	5080 psi	50 mm/min; ISO 527
Tensile Strength, Yield	44.0 MPa	6380 psi	50 mm/min; ISO 527
Elongation at Break	40 %	40 %	50 mm/min; ISO 527
Flexural Strength	64.0 MPa	9280 psi	2 mm/min; ISO 178
Flexural Modulus	2.10 GPa	305 ksi	2 mm/min; ISO 178
Izod Impact, Notched (ISO)	24.0 kJ/m²	11.4 ft-lb/in²	ISO 180/1A
Izod Impact, Unnotched (ISO)	NB	NB	ISO 180/1C
Charpy Impact Unnotched	NB	NB	ISO 179
Charpy Impact, Notched	2.60 J/cm²	12.4 ft-lb/in²	ISO 179
Impact	18.0	18.0	Impact Flexural Test Notched (KJ/m²)
	NB	NB	Impact Flexural Test Unnotched (KJ/m²)

Thermal Properties	Metric	English	Comments
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	87.0 °C	189 °F	unannealed; ISO 75
	96.0 °C	205 °F	annealed; ISO 75
Vicat Softening Point	94.0 °C @Load 5.00 kg	201 °F @Load 11.0 lb	50°C/hr; ISO 306
	96.0 °C @Load 5.00 kg	205 °F @Load 11.0 lb	120°C/hr; ISO 306
	103 °C @Load 1.00 kg	217 °F @Load 2.20 lb	50°C/hr; ISO 306
	103 °C @Load 1.00 kg	217 °F @Load 2.20 lb	120°C/hr; ISO 306
Flammability, UL94	HB @Thickness 1.59 mm	HB @Thickness 0.0625 in	UL 94

ANEXO 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLÍMEROS TEÓRICOS

Data Type: Theoretical

Polymer

Item	Value	Unit
Polymer Density	1.04	g/cc
Polymer Modulus E	2.6e-7	MPa
Polymer Poisson's Ratio	0.38	-
Polymer CLTE	9.4e-5	1/K

Filler

Filler Type: Fiber

Item	Value	Unit
Fiber Length/Diameter (L/D)	20	-
Fiber Weight Percentage	10	%

Filler Material: T300 (Carbon)

Filler/Reinforcement Mechanical Properties

Item	Value	Unit
Fiber Density	1.78	g/cc
Modulus E1 (Fiber Direction)	2.3e+5	MPa
Modulus E2 (Transverse Direction)	23,000	MPa
Poisson's Ratio v12	0.26	-
Poisson's Ratio v23	0.26	-
Shear Modulus G12	9,000	MPa
CLTE a1	-1.5e-6	1/K
CLTE a2	1.5e-5	1/K

ANEXO 4 – FICHA TÉCNICA ABS ESD C 600

RTP Co.
Imagineering Plastics®

Product Data Sheet & General Processing Conditions

ESD C 600
Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
ESD Protection
Electrically Conductive

PROPERTIES & AVERAGE VALUES OF INJECTION MOLDED SPECIMENS

PERMANENCE	English	SI Metric	ASTM TEST
Specific Gravity	1.13	1.13	D 792
Molding Shrinkage			
1/8 in (3.2 mm) section	0.0050 in/in	0.50 %	D 955
MECHANICAL			
Impact Strength, Izod			
notched 1/8 in (3.2 mm) section	0.6 ft-lbs/in	32 J/m	D 256
unnotched 1/8 in (3.2 mm) section	6.0 ft-lbs/in	320 J/m	D 4812
Tensile Strength	6300 psi	43 MPa	D 638
Tensile Elongation	3.0 %	3.0 %	D 638
Tensile Modulus	0.44 x 10^6 psi	3034 MPa	D 638
Flexural Strength	10600 psi	73 MPa	D 790
Flexural Modulus	0.45 x 10^6 psi	3103 MPa	D 790
ELECTRICAL			
Volume Resistivity	< 1E3 ohm.cm	< 1E3 ohm.cm	D 257
Surface Resistivity	< 1E6 ohm/sq	< 1E6 ohm/sq	D 257
Surface Resistance	< 1E5 ohm	< 1E5 ohm	ESD STM11.11
Static Decay			
MIL-PRF-81705D, 5kV to 50 V, 12% RH	< 2.00 s	< 2.00 s	FTMS101C 4046.1
THERMAL			
Ignition Resistance*			
Flammability**	HB @ 1/16 in	HB @ 1.5 mm	D 635

PROPERTY NOTES

Data herein is typical and not to be construed as specifications.
Unless otherwise specified, all data listed is for natural or black colored materials. Pigments can affect properties.
* This rating is not intended to reflect hazards of this or any other material under actual fire conditions.
** Values per RTP Company testing.

GENERAL PROCESSING FOR INJECTION MOLDING

	English	SI Metric
Injection Pressure	10000 - 15000 psi	69 - 103 MPa
Melt Temperature	400 - 460 °F	204 - 238 °C
Mold Temperature	145 - 185 °F	63 - 85 °C
Drying	2 hrs @ 180 °F	2 hrs @ 82 °C
Moisture Content	0.10 %	0.10 %
Dew Point	0 °F	-18 °C

PROCESSING NOTES