



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Rui Nuno Ferreira Pinto

Estudo e avaliação experimental de  
tecnologia IMR (in-mould reinforcement)

Rui Nuno Ferreira Pinto  
Estudo e avaliação experimental de  
tecnologia IMR (in-mould reinforcement)

UMinho | 2013

outubro de 2013





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Rui Nuno Ferreira Pinto

Estudo e avaliação experimental de  
tecnologia IMR (in-mould reinforcement)

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor António Pontes  
Engenheiro Carlos Ribeiro  
Engenheiro Luís Oliveira

# DECLARAÇÃO

## Declaração RepositóriUM: Dissertação Mestrado

Nome: Rui Nuno Ferreira Pinto

Nº Cartão Cidadão /BI: 13797525

Tel./Telem.: 916936145

Correio eletrónico: [ruinfpinto@hotmail.com](mailto:ruinfpinto@hotmail.com)

Curso Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros Ano de conclusão da dissertação: 2013

Escola de Engenharia, Departamento/Centro: Engenharia de Polímeros

### TÍTULO DISSERTAÇÃO/TRABALHO DE PROJECTO:

Título em PT: Estudo e avaliação experimental de tecnologia IMR (in-mould reinforcement)

Título em EN: Study and experimental evaluation IMR technology (in-mould reinforcement)

Orientador: Professor Doutor António José Vilela Pontes

Co-orientador: Eng. Carlos Ribeiro

Nº ECTS da Dissertação \_\_\_\_\_ Classificação em valores (0-20) \_\_\_\_\_

Classificação ECTS com base no percentil (A a F) \_\_\_\_\_

Declaro sob compromisso de honra que a dissertação/trabalho de projeto agora entregue corresponde à que foi aprovada pelo júri constituído pela Universidade do Minho.

Declaro que concedo à Universidade do Minho e aos seus agentes uma licença não-exclusiva para arquivar e tornar acessível, nomeadamente através do seu repositório institucional, nas condições abaixo indicadas, a minha dissertação/trabalho de projeto, em suporte digital.

Concordo que a minha dissertação/trabalho de projeto seja colocada no repositório da Universidade do Minho com o seguinte estatuto (assinale um):

1.  Disponibilização imediata do trabalho para acesso universal;
2.  Disponibilização do trabalho para acesso exclusivo na Universidade do Minho durante o período de  
 1 ano,  2 anos ou  3 anos, sendo que após o tempo assinalado autorizo o acesso universal.
3.  Disponibilização do trabalho de acordo com o **Despacho RT-98/2010 c)** (embargo \_\_\_\_\_ anos)

Braga/Guimarães, \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_



## AGRADECIMENTOS

Não posso começar por apresentar qualquer trabalho realizado sem primeiro agradecer àqueles que tornaram a sua elaboração possível, àqueles sem os quais não me seria dada esta oportunidade e àqueles que, de uma maneira ou outra, contribuíram na formação daquilo que hoje sou.

A minha primeira palavra de apreço vai para o meu orientador, Prof. Dr. António Pontes, que foi o primeiro impulsionador desta oportunidade que me foi dada, sendo que sem a sua paciência e auxílio não teria conseguido elaborar a minha dissertação de tese.

De seguida, gostaria de agradecer ao meu coorientador Eng. Carlos Ribeiro, pela oportunidade de desenvolver o meu trabalho no PIEP, onde tive o maior gosto em trabalhar, e ao meu segundo coorientador Eng. Luís Oliveira, pelos conselhos e transmissão de conhecimentos sempre que problemas ou dúvidas foram surgindo ao longo da elaboração do presente documento, mostrando sempre a maior disponibilidade.

Gostaria de reconhecer nas minhas palavras de apreço a Eng. Marta Gomes por toda a dedicação ao longo destes longos meses, pela disponibilidade cedida no decorrer da vertente experimental do meu trabalho, e de todos os conselhos e chamadas de atenção oportunas quando as coisas não correram tão bem.

Ainda dirigida a minha palavra a colegas de profissão, não posso deixar de agradecer a todas as pessoas com que estive em contato no PIEP, sendo um obrigado muito especial à Eng. Andreia Vilela, ao grupo dos compósitos, em principal destaque para o Eng. Bruno Barros, e às minhas companheiras de gabinete, Judite Amorim, Joana Matos, Catarina Duro, Marta Coelho e Diana Meireles, devido a toda a coragem transmitida por todos, a todo o ânimo e compreensão cedidos e pelo companheirismo diário, tornando a minha experiência no PIEP o mais agradável possível, levando tudo isso comigo no coração. Agradeço ainda a todas as pessoas do DEP, bem como aos colegas de curso que levo como amigos, que tornaram esta minha jornada académica o mais fácil e divertida possível.

Sem nunca esquecer, um enorme e especial obrigado à minha namorada, Filipa Teixeira, por toda a compreensão e ajuda que durante estes meses veio a demonstrar sendo sempre incondicional e imparável. Aproveito também para me desculpar pelos momentos que me ausentei e pelos momentos que em ti descarreguei todo o cansaço acumulado lembrando que ti voglio bene.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer, com todo o apreço, aos meus pais por tornarem o meu percurso académico o mais constante possível, sem demais preocupações para que me pudesse focar nos meus cinco anos de formação. Pelo esforço dedicado a cada dia, pela motivação de continuar sempre em frente e pela oportunidade de formação que deram.

Um muito, e sincero, obrigado a todos.





## MOTIVAÇÃO

Para a indústria atual de compósitos, a implementação de novos avanços tecnológicos na produção torna-se uma necessidade, cada vez maior, dada a grande importância que estes materiais andam a tomar no mercado atual. Como tal, o processamento de compósitos de fibras contínuas secas em grande escala apresenta-se um desafio decisivo, de modo a tornar os compósitos num produto mais competitivo a nível de rácio custo/propriedades com os restantes materiais.

Assim, a produção de materiais reforçados a partir de fibras contínuas secas, através da moldação por injeção, estimula o interesse principal na compreensão e na capacidade de impregnação total das fibras, com a obtenção de produtos finais com propriedades similares aos convencionais, uma vez que, na atualidade, este processo consta com a utilização de três etapas separadas assimiladas a diferentes técnicas.

Apesar de se tratar numa inovação com a combinação de duas áreas distintas a nível de condições de processamento espera-se atingir bons indicadores de que o objetivo pretendido seja possível de modo a fornecer à indústria mais um processo e a história um grande marco.





## RESUMO

O presente trabalho destinou-se a desenvolver um processo que permitisse oferecer a possibilidade de impregnar reforços de fibras contínuas em termoplásticos, através da utilização de mantas secas. Para atingir este objetivo foi utilizado o processo de moldação por injeção e a compressão a quente. Assim, neste trabalho realizou-se o estudo e avaliação de materiais e tecnologias já disponíveis no mercado. Foi feita ainda uma pesquisa detalhada pelas várias áreas individuais identificadas: reforços secos, reforços impregnados e a modelação de processos. Baseado nos resultados desta investigação, definiram-se e executaram-se ensaios de processamento e através de caracterização das propriedades dos materiais resultantes, bem como foram avaliadas as várias soluções e selecionada a solução mais promissora. Tendo em consideração os pontos-chave de desenvolvimento identificados, o projeto implicou um desenvolvimento paralelo em duas áreas tecnológicas distintas e conjugadas: materiais e tecnologias de produção de termoplásticos reforçados com fibras contínuas (CFRT's), moldação por injeção de termoplásticos e moldação por compressão a quente. No que concerne aos materiais, foi estudada a capacidade de um compósito, com matriz – reforço correspondente a polipropileno – fibras de vidro contínuas. Para este estudo foi concluído que o material compósito em questão apresenta, maioritariamente nos processos executados, melhores desempenhos que o PP, sendo estes superiores quando o número de camadas de fibras é quatro ao invés de uma ou duas camadas. No entanto foram apresentados melhores resultados de propriedades mecânicas nas amostras produzidas quando provenientes da compressão a quente. Já para as tecnologias de produção de CFRT's, foram estudadas e avaliadas as variáveis de processamento, bem como a melhor combinação entre elas, dos processos de moldação por injeção e por compressão a quente. Quanto às variáveis da compressão a quente, tem maior influência a variável temperatura do molde, sendo que a condição de processamento ideal varia consoante o número de fibras existentes no compósito e das propriedades que se pretende ver satisfeitas. Por último, no que concerne às variáveis da injeção tem maior impacto a segunda pressão. Desta forma, o objetivo principal de desenvolver um processo que permitisse oferecer a possibilidade de impregnar reforços de fibras contínuas em termoplásticos, através da utilização de mantas secas, tem potencial de ser considerada para a produção de um bom produto impregnado com as características esperadas. No entanto e apesar de não se ter desenvolvido um processo neste trabalho, é conseguido um caminho com potencial para a definição deste novo processo de produção de CFRT's.

**Palavras-chave:** matriz, reforço, impregnação, fibras contínuas, termoplásticos, injeção, compressão a quente





## ABSTRACT

The present study was aimed to developing a process and a product that offers the possibility to impregnate continuous fiber reinforcements in thermoplastics, through the use of dried layer. To obtain the main objective it was use injection molding and hot compression. In this work we carried out the study and evaluation of materials and technologies already available in the science. A detailed investigation was made by the individual identified several areas: dry reinforcements, impregnated reinforcements and modeling processes. Based on the results of this investigation, it was defined and performed assays were through processing and characterization of the properties of the resulting materials, and were evaluated several solutions and selected the most promising solution. Taking into consideration the key points of development and identified, the project involved a parallel development in two distinct and combined technological areas: materials and production technologies CFRT's, thermoplastic injection molding and hot compression molding. When it is intended to material studied was the capacity of a composite, wherein the matrix - reinforcement corresponding to polypropylene - continuous glass fibers, have superior performance than polymers in its simple form. For this study it was concluded that the composite material in question has, mainly in the processes executed is more efficient than PP, which are higher when the number of layers of fiber are four rather than one or two layers. However were presented mechanical properties when coming from hot compression. As for the production technology of CFRT's, were studied and evaluated the processing variables, as well the best combination of them, of the injection molding and hot compression molding. Regarding the variables of hot compression, the one that has more influence is the mold temperature and the optimum processing condition varies depending on the number of fibers in the composite and the properties that you want to see satisficed. Finally, with regard to the variables of the injection, the greatest impact comes from second pressure. Thus, for the primary purpose of developing a process and a product which allow to offer the possibility of impregnating a continuous fiber reinforcements in thermoplastics, through the use of dried layer, is likely to be considered to the production of a good product impregnated with the expected characteristics. However, although a process was not developed in this work, is achieved a successful way to achieve this new production process CFRT 's.

**Keywords:** matrix, reinforcement, impregnated, continuous fibers, thermoplastics, injection, hot compression





# Índice

MOTIVAÇÃO .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
1. Introdução .....	1
1.1 Objetivos .....	4
1.2 Conteúdo .....	4
2. Estado de Arte .....	7
2.1 Materiais .....	10
2.2 Processos .....	16
3. Métodos Experimentais .....	19
3.1 Moldação por Compressão a Quente .....	22
3.1.1 Processo e equipamento .....	22
3.1.2 Procedimento experimental .....	26
3.2 Moldação por injeção .....	28
3.2.1 Processo e equipamento .....	28
3.2.2 Procedimento experimental .....	31
3.3 Planeamento de experiências .....	33
3.3.1 Processo e Equipamento .....	34
3.3.2 Procedimento experimental .....	35
3.4 Ensaio de Caracterização .....	37
3.4.1 Ensaio de tração .....	38
3.4.1.1 Procedimento experimental .....	38
3.4.2 Ensaio Interlaminar <i>Shear Strength</i> .....	40
3.4.2.1 Procedimento experimental .....	40
3.4.3 Equipamentos em ensaios mecânicos .....	41
Ensaio de tração .....	42
Ensaio interlaminar <i>Shear Strength</i> .....	42
3.4.4 Caracterização da Microestrutura .....	42
3.4.4.1 Processo e equipamento .....	43
3.4.4.2 Procedimento experimental .....	44



4. Apresentação e Discussão de Resultados .....	47
4.1 Moldação por compressão a quente .....	49
4.1.1 Caracterização de Microestrutura .....	49
4.1.2 Ensaio de tração .....	53
4.1.3 Ensaio Interlaminar Shear Strength .....	76
4.2 Moldação por injeção.....	83
4.2.1 Caracterização de Microestrutura .....	83
4.2.2 Ensaio de Tração .....	87
5. Conclusões.....	103
.....	103
6. Trabalhos Futuros.....	111
REFERÊNCIAS.....	115
ANEXOS .....	119



## Índice de Figuras

Figura 1 – a) Matriz seca, b) Matriz pré-impregnada [20 e 21]-----	11
Figura 2 – O uso dos compósitos nos automóveis. No lado direito é o exemplo do Porsche.---	12
Figura 3 – Tipos de fibras, a) Fibra de Vidro, b) Fibra de Carbono, c) Fibra de Aramida [24] ----	13
Figura 4 – Fibras de vidro utilizadas nas portas traseiras do SMART [15] -----	14
Figura 5 – Etapas gerais para a produção convencional de um compósito [3]-----	16
Figura 6 – Sistema de arrefecimento (→ ) e aquecimento (→ )-----	23
Figura 7 – Posicionamento do sensor Kistler (1) e termopar (2)-----	23
Figura 8 – Molde mais o sensor <i>Triger</i> -----	24
Figura 9 – Molde dimensionado no <i>SolidWorks</i> -----	24
Figura 10 – Molde utilizado na compressão a quente-----	25
Figura 11 – Microextrusora e unidade de controlo utilizada -----	25
Figura 12 – Etapas do procedimento experimental do processo moldação a quente-----	26
Figura 13 – Exemplo do ciclo térmico e de pressão para as condições máximas-----	28
Figura 14 – Ciclo teórico da injeção [29]-----	29
Figura 15 – Molde e os sistemas de controlo de temperatura -----	30
Figura 16 – Molde com os sistemas de isolamento e fixação da fibra-----	30
Figura 17 – Equipamentos utilizados na injeção-----	31
Figura 18 – Etapas do procedimento experimental do processo moldação por injeção-----	32
Figura 19 - Dimensões das amostras no ensaio da tração-----	39
Figura 20 – Etapas do procedimento experimental do ensaio de tração-----	40
Figura 21 - Suporte de flexão normalizado-----	40
Figura 22 – Etapas do procedimento experimental do ensaio ILSS -----	41
Figura 23 – Máquina Shimadzu AG-X 50kN -----	42
Figura 24 – Suporte de flexão -----	42
Figura 25 – Microscópio ótico -----	43
Figura 26 – Microscópio e a camera digital Leica-----	43
Figura 27 – Máquina de polimento Struers DAP-7 e lupa Olympus SZ4045TR-----	44
Figura 28 – Ciclo experimental da caracterização de microestrutura -----	45
Figura 29 – Imagem de amostras de uma camada de fibra com ampliação 5x1,67-----	50
Figura 30 – Imagem de amostras de 1 fibra com ampliação 10x1,67 -----	51



Figura 31 – Imagem de amostras de quatro camadas de fibra com ampliação 5x1,67 -----	52
Figura 32 - Imagem de amostras de 4 fibras com ampliação 10x1,67-----	52
Figura 33 – Resultados dos ensaios de tração dos compósitos de PP com 1 camada de fibra --	53
Figura 34 – Contribuição das variáveis operatórias para E nas amostras com 1 camada de fibra -----	54
Figura 35 - Contribuição da temperatura do molde para E nas amostras com 1 camada de fibra -----	55
Figura 36 – Relação da temperatura do fundido com temperatura do molde para E em tempos de pressão de 180s nas amostras de 1 camada de fibra-----	56
Figura 37 – Relação das 3 variáveis para E em tempos de pressão de 60s nas amostras de 1 camada de fibra-----	57
Figura 38 – Relação das 3 variáveis para E em tempos de pressão de 180s nas amostras de 1 camada de fibra-----	57
Figura 39 – Módulo de elasticidade para todas as amostras com 1 camada de fibra -----	58
Figura 40 - Contribuição das variáveis operatórias para $\sigma_{max}$ nas amostras com 1 camada de fibra -----	59
Figura 41 - Contribuição da temperatura do molde para $\sigma_{max}$ nas amostras com 1 camada de fibra -----	60
Figura 42 - Relação da temperatura do fundido com tempo de aplicação de pressão para $\sigma_{max}$ em tempos de pressão de 180s nas amostras de 1 camada de fibra -----	60
Figura 43 – Relação das 3 variáveis para $\sigma$ em tempos de pressão de 60s nas amostras de 1 camada de fibra-----	61
Figura 44 – Relação das 3 variáveis para $\sigma$ max em tempos de pressão de 180s nas amostras de 1 camada de fibra -----	61
Figura 45 – Tensão máxima para todas as amostras com 1 camada de fibra-----	62
Figura 46 – Resultados da tração dos compósitos de PP com 4 camada de fibra -----	63
Figura 47 - Contribuição das variáveis operatórias para E nas amostras com 4 fibras -----	64
Figura 48 - Contribuição da temperatura do molde para E nas amostras com 4 fibras-----	65
Figura 49 - Relação da temperatura do fundido com tempo de aplicação de pressão para E nas amostras de 4 fibras -----	66
Figura 50 – Relação das 3 variáveis para E em tempos de pressão de 60s nas amostras de 4fibra -----	66
Figura 51 – Relação das 3 variáveis para E em tempos de pressão de 180s nas amostras de 4fibra -----	67
Figura 52 – Módulo de elasticidade para todas as amostras com 4 fibras -----	68
Figura 53 – Contribuição das variáveis operatórias para $\sigma_{max}$ nas amostras com 4 fibras-----	69



Figura 54 - Contribuição da temperatura do fundido para $\sigma_{\max}$ nas amostras com 4 fibras -----	70
Figura 55 - Relação da temperatura do fundido com tempo de aplicação de pressão para $\sigma_{\max}$ nas amostras de 4 fibras-----	70
Figura 56 - Relação da temperatura do fundido com temperatura do molde para $\sigma_{\max}$ nas amostras de 4 fibras -----	71
Figura 57 – Relação das 3 variáveis para $\sigma$ em tempos de pressão de 60s nas amostras de 4 fibras -----	72
Figura 58 – Relação das 3 variáveis para $\sigma$ em tempos de pressão de 180s nas amostras de 4 fibras-----	72
Figura 59 – Tensão máxima para todas as amostras com 4 fibra-----	73
Figura 60 – Comparação entre os provetes de 1fibra com 4fibras para o E -----	74
Figura 61 – Comparação entre os provetes de 1fibra com 4fibras para a tensão máxima-----	75
Figura 62 – Gráfico resultante do ensaio ILSS para os provetes com uma camada de fibra -----	76
Figura 63 – Relação das variáveis para tempos de pressão de 60 segundos nas amostras de uma fibra de vidro -----	77
Figura 64 – Relação das variáveis para tempos de pressão de 180 segundos nas amostras de uma fibra de vidro -----	77
Figura 65 – Valores atingidos no ensaio ILSS com 1fibra -----	78
Figura 66 – Ponto 11 da norma ISO 14130:1997 referente ao tipo de quebra-----	79
Figura 67 – Gráfico resultante do ensaio ILSS para os provetes com 4fibra -----	79
Figura 68 – Comportamento dos provetes à força aplicada -----	80
Figura 69 – Valores atingidos no ensaio ILSS para provetes com 4 camadas de fibra-----	81
Figura 70– Comparação entre os provetes de 1fibra com 4fibras para o ensaio ILSS -----	82
Figura 71 – Imagem de amostras de uma fibra provenientes da injeção, com ampliação 5x1,67 -----	83
Figura 72 – Imagem de amostras de uma fibra provenientes da injeção, com ampliação 10x1,67 -----	84
Figura 73 – Imagem de amostras de duas fibras provenientes da injeção com diferentes tempos de aplicação de segunda pressão, ampliação 5x1,67-----	85
Figura 74 – Imagem de amostras de duas fibras provenientes da injeção com diferentes tempos de aplicação de segunda pressão, ampliação 10x1,67 -----	86
Figura 75 – Imagem de amostras de duas fibras provenientes da injeção com diferentes valores de temperatura de molde, ampliação 5x1,67 -----	86
Figura 76 – Imagem de amostras de duas fibras provenientes da injeção com diferentes valores de temperatura de molde, ampliação 10x1,67 -----	87



Figura 77 – Gráfico representativo dos resultados da tração dos compósitos de PP com 1 fibra	88
Figura 78 – Contribuição das variáveis e da interação destas no E para as amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro	89
Figura 79 - Efeito da segunda pressão em E para amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro	90
Figura 80 - Efeito do tempo de aplicação de segunda pressão em E para amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro	90
Figura 81 - Efeito da interação velocidade de injeção com temperatura do molde em E para amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro	91
Figura 82 – Módulo de elasticidade (E) para todas as amostras com 1 fibra	91
Figura 83 – Contribuição das variáveis e da interação destas na $\sigma_{\text{máx}}$ para as amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro	92
Figura 84 – Efeito da velocidade de injeção na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro	93
Figura 85 – Efeito da segunda pressão na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro	93
Figura 86 – Efeito do tempo de aplicação da segunda pressão na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro	94
Figura 87 – Efeito da combinação velocidade de injeção com segunda pressão na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro	94
Figura 88 – Efeito da combinação velocidade de injeção com tempo de segunda pressão na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro	95
Figura 89 – Tensão máxima para todas as amostras com 1 fibra	96
Figura 90 – Resultados dos ensaios de tração dos compósitos de PP com 2 camadas de fibra	97
Relativamente à Figura 90, é verificável a presença de um comportamento similar entre as amostras.	97
Figura 91 – Valores de E para amostras a 170°C e 210°C, D6 e D7	98
Figura 92 – Valores de $\sigma_{\text{MAX}}$ para amostras a 170°C e 210°C, D6 e D7	99
Figura 93 – Valores de E para amostras segundo tempo de aplicação de segunda pressão	100
Figura 94 – Tensão Máxima para as amostras de duas fibras	100
Figura 95 – dimensões do molde de injeção	126
Figura 96 – Molde para a moldação injeção-compressão	129
Figura 97 – Sistema de aquecimento e arrefecimento do molde injeção-compressão	130



## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades dos polímeros termoplásticos [7] -----	11
Tabela 2 – Propriedades de matrizes termoplásticas com fibras contínuas [7]-----	12
Tabela 3 – Valores obtidos com a alteração dos materiais [27]-----	16
Tabela 4 – Propriedades reológicas do PP-----	21
Tabela 5 – Característica da prensa -----	22
Tabela 6 – Condições de processamento na compressão a quente -----	27
Tabela 7 – Condições de processamento na injeção para amostra de uma camada de fibra de vidro -----	33
Tabela 8 – Condições de processamento na injeção para amostra de duas camadas de fibra de vidro -----	33
Tabela 9 – Condições utilizadas na compressão a quente-----	35
Tabela 10 – Condições utilizadas na injeção -----	36
Tabela 11 – Fatores e níveis para a compressão a quente -----	37
Tabela 12 – Fatores e níveis para a injeção -----	37
Tabela 13 – Dimensões dos provetes segundo a norma ISO14130:1997-----	41





## Lista de Abreviaturas e Acrônimos

C<sub>n</sub> – Grupo de amostras com uma camada na sua constituição, n = {1,2,3,4,5,6,7,8}

CFRT – Fibras Contínuas Termoplástico Reforçado

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

D<sub>n</sub> – Grupo de amostras com uma camada na sua constituição, n = {1,2,3,4,5,6,7}

DOE – Método de Planeamento de Experiências

E – Módulo de elasticidade

F – Força

GF – Fibra de Vidro

h – Espessura

HM – Alto Módulo

HS – Alta Resistência

ILSS – *Interlaminar Shear Strength*

IM – Módulo Intermediário

IMR – *In Mould Reinforcement*

ISO – International Standardization Organization

L – Comprimento

LM – Baixo Módulo

P – Segunda Pressão

PA – Poliamida

PAN – Poliacrilonitrilo

PC – Policarbonato

PET – Polietilenotereftalato

PP – Polipropileno

PP/FV – Compósito de Polipropileno com Fibra de Vidro

Q<sub>n</sub> – Grupo de amostras com quatro camadas na sua constituição, n = {1,2,3,4,5,6,7,8}

r – Raio

T<sub>f</sub> – Temperatura de Fundido

T<sub>m</sub> – Temperatura do Molde

t – Tempo de aplicação de pressão e da segunda pressão

UHM – Ultra Alto Módulo



UHS – Ultra Alta Resistência

UNIE – Unidirecional Tipo E

$V_{inj}$  – Velocidade de Injeção

$\sigma$  – Tensão

$\sigma_{max}$  – Tensão Máxima

$\varepsilon$  – Deformação

## **1**. Introdução

*“O estudo proposto tem como principal contribuição a utilização de materiais compósitos para produção em grande escala. Este projeto dará um contributo importante para o estado atual de investigação sobre estes compósitos denominados como compósitos do futuro.”*





Segundo *Chris Reiter, Bloomberg*, o uso de novos materiais, compósitos, representa a maior mudança na produção automobilística desde os anos 1980, quando os primeiros carros com estrutura de alumínio foram fabricados. [1] A necessidade desta mudança diz principalmente respeito a preocupações com o meio ambiente, que provavelmente levarão a regulamentações governamentais mais duras sobre emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Estas emissões podem advir da quantidade de energia necessária a fornecer ao motor, que aumenta conforme o peso do veículo. Assim, a tendência industrial é procurar materiais que tornem os produtos mais leves com propriedades iguais ou superiores às dos materiais atualmente utilizados. De salientar que isto permitirá um menor consumo. No entanto, a diminuição de peso nos veículos de transporte nomeadamente no setor automóvel tem bastantes vantagens. Como exemplo, nos automóveis de mercadoria, a diminuição do peso da carroçaria permitiria aumentar a carga a transportar, apresentando o mesmo peso máximo total. Já nos carros desportivos, onde a velocidade é importante, a inovação passa pela melhoria do tempo de aceleração que seria minimizado se o carro fosse mais leve.

À semelhança da utilização de compósitos no setor automóvel, o mesmo acontece no setor desportivo. A presença de um calçado super leve com as mesmas propriedades possibilitaria ao atleta correr uma prova sem sentir o seu peso e desconforto. O mesmo acontece para um tenista no decorrer de um torneio, onde a minimização do peso da raquete levaria a melhores rendimentos dado a ausência de um maior peso a suportar.

Tal como da necessidade de compósitos no setor automóvel, o mesmo está presente no setor aeroespacial. Aviões com menos peso permitiriam menores consumos com as mesmas ou melhores propriedades à corrosão e intempéries. Já para os foguetões poderiam ser beneficiados com o aumento da velocidade de navegação ao serem lançados à mesma velocidade mas com menos peso.

Os exemplos de setores onde a utilização de compósitos seria uma mais-valia são vastos e poderiam ainda estender-se, por exemplo, à produção de instrumentos musicais, dando destaque à estética e sonoridade.

No entanto, a cadência de produção destes materiais, compósitos, apresenta problemas e elevado custo. Assim, este projeto pretende dar um contributo e tem com objetivo principal estudar a impregnação de fibras contínuas secas em polímeros termoplásticos, onde se analisa a compatibilização destes materiais na tentativa de criar um compósito. Para tal, foram utilizadas duas técnicas distintas, a moldação por injeção, sendo, ainda, o estudo suportado, pela moldação por compressão a quente.

Assim, o objetivo será levado a cabo através de processos associados à moldação por injeção com a justificação de este tipo de moldação ser responsável por grande parte da produção em plásticos. Atualmente é seguro dizer que a injeção suporta a maioria das expectativas depositadas na inovação de produtos, bem como é o processo que mais interesse retém na realidade industrial. Outro motivo, e tão importante como o anterior, é o facto da moldação por injeção permitir obter índices produtivos elevados. Desta forma, levaria à eliminação da desvantagem inerente aos tempos longos de produção dos compósitos



convencionais. Logo, é expectável que a utilidade do trabalho desenvolvido traga avanços e contributos de possível aplicabilidade no futuro dos compósitos, a nível industrial.

De salientar que o estudo proposto permitirá aumentar a cadência de produção de materiais compósitos, que na atualidade é uma das grandes desvantagens deste tipo de materiais. Acredita-se ainda que, este projeto contribuirá na evolução do estado de investigação atual sobre estes compósitos denominados como compósitos do futuro. Esta contribuição pode, de facto, ser significativa devido à escassa gama de campos desenvolvidos na área em questão.

### *1.1 Objetivos*

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo e avaliação experimental da tecnologia IMR, que consiste na impregnação de reforços de fibras contínuas com matrizes termoplásticas através da utilização da moldação por injeção. Como tal, há uma necessidade de análise e avaliação aprofundada das tecnologias e processos, gerando conhecimento para aplicação em ambiente industrial. Associado a este objetivo, está também uma análise e revisão de patentes existentes nesta temática.

Tenciona-se definir um novo processo ou adaptar processos existentes através da conjugação de duas áreas de saber distintas (compósitos CFRT's e tecnologias de injeção). Para tal, pretende-se a realização de um conceito de uma ferramenta de moldação para testes de soluções geométricas e de materiais.

Por fim, e não menos importante, é o estudo e avaliação de formas de fixação dos reforços (fibras ou tecidos) no molde de injeção de termoplásticos e da impregnação de tecidos e fibras de reforço utilizando equipamento dedicado, como o caso da avaliação da capacidade de impregnação *in-situ* (molde de injeção de termoplásticos).

### *1.2 Conteúdo*

Com o intuito de atingir todos os objetivos propostos, assim como ter uma base bem sementada para a obtenção destes mesmos, o presente documento é dividido em seis principais capítulos, sendo que o primeiro é o mesmo em que se insere esta descrição do conteúdo de trabalho, a Introdução.

O segundo capítulo designa-se por “Estado de Arte”, e pretende-se identificar o estado atual da área científica em causa. É elaborada uma revisão bibliográfica, com o sentido de perceber qual a evolução atual dos materiais em estudo, quais os avanços existentes em tecnologias/processos adequados, as suas funções e necessidade. Desta forma, é gerado o conhecimento essencial para a aplicação e desenvolvimento de alternativas para o ambiente industrial. Neste capítulo é ainda feita uma análise de patentes existentes nesta temática, bem como uma revisão dos existentes trabalhos científicos mais relevantes.



O terceiro capítulo, com o título “Métodos Experimentais”, é responsável por descrever quais os processos/metodologias empregues na realização da componente prática. Este capítulo encontra-se dividido em quatro itens, sendo cada item correspondente a um procedimento aplicado. Assim, é feita a descrição de cada processo experimental em comparação com o processo teórico e equipamentos, mencionando a diferenças utilizadas, como o caso da compressão a quente e injeção.

No que concerne ao quarto capítulo, acredita-se que seja dos mais relevantes de todo o documento. Neste capítulo são, portanto, apresentados todos os dados relevantes resultantes das metodologias de caracterização dos objetos de estudo. No caso da caracterização de microestrutura, qual ou quais as amostras que se destacam e nos ensaios de caracterização quais as variáveis que apresentam maior influência, quer a nível individual, quer a nível de junção de variáveis.

O quinto capítulo diz respeito às “Conclusões” e é feito um destacamento dos principais resultados do capítulo anterior e do documento todo em si. Desta forma descreve-se cada objetivo que foi atingido e demonstra, por exemplo, o conjunto de variáveis que permitem obter matérias compósitos através de fibras contínuas secas.

Por último, é destinado um capítulo para as propostas de “Trabalhos Futuros”. Neste capítulo são mencionadas oportunidades de melhoria/continuação do estudo, que se acredita que trarão mais-valias à ciência e avanços à área de estudo em questão, como o caso da moldação injeção-compressão.



## 2. Estado de Arte

*“O desenvolvimento de materiais compósitos conquista grande interesse na indústria devido à atual procura de materiais com propriedades similares, ou melhores, às dos materiais convencionais. De salientar que para determinar o nascimento dos compósitos tem que se recuar até à antiguidade onde, a título de exemplo, era feita a combinação de palha com lama para a produção de cimento.”*





O avanço da tecnologia criou uma necessidade na produção de materiais onde as suas propriedades não se restringem apenas às dos materiais convencionais (metálicos, cerâmicos e poliméricos). Para responder a esta necessidade, procedeu-se ao desenvolvimento de materiais compósitos, conquistando estes materiais grande interesse na indústria devido à atual procura de materiais com propriedades similares, ou melhores, às dos materiais convencionais, com a vantagem de serem mais leves.

Desta forma, para definir material compósito, *Gay* [2], em 1991, declara como compósitos “um material formado por diferentes materiais, sendo que quando analisado macroscopicamente o mesmo é homogéneo. Por outro lado, o mesmo possui fibras contínuas ou não, que oferecem resistência mecânica; e, a matriz que dá forma ao produto final.” [3] Esta definição é suportada por *Mendonça* [4], que, em 2005, defende que um material compósito é “um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta.” [3] É ainda dito, por *Callister*, que um compósito se trata de “um material multifásico que é feito artificialmente, em contraste com um material que ocorre ou se forma naturalmente”. [5] Pode-se dizer, então, que um material compósito é definido pela união de dois materiais de naturezas diferentes, possuindo um comportamento superior ao comportamento de cada constituinte.

Contextualizando no tempo, a primeira fibra a ser desenvolvida foi a fibra de vidro, em meados do século XVIII, passando a ser desenvolvida comercialmente no ano de 1939, durante a 2ª Guerra Mundial, visando aplicações elétricas em altas temperaturas. Começando-se, cerca de vinte anos mais tarde, a produzir fibras avançadas, como as fibras de boro (final da década de 1950) e as de carbono (final da década de 1960). Contudo, a evolução de materiais compósitos estagna com o fim da Guerra Fria, no final da década de 80, devido à diminuição das atividades de pesquisa e desenvolvimento destes para a área militar. Porém, os compósitos desenvolvidos durante a guerra tiveram grande utilidade ao serem transferidos para a área civil. [6] E, devido a estes oferecerem propriedades superiores aos dos materiais convencionais, vieram despertar bastante interesse em diferentes indústrias, tais como, a aeroespacial e a automóvel [7], sendo, tendencialmente, a indústria automóvel a maior consumidora. [8]

De salientar que se for para identificar o nascimento dos compósitos neste sector, tem-se que recuar até 1953 onde a *GM Motorama* revelou pela primeira vez o *Chevrolet Corvette*. [9] Aparecendo, posteriormente, em 1981, o primeiro chassi totalmente composto por compósitos num carro de fórmula 1, *McLaren MP4-1*, vulgarizando-se depois em 1983. [10-12] Atualmente, os compósitos são utilizados na produção de capôs, colunas de direção, molas laminadas, painéis, etc. [13] Um excelente exemplo é o *Porsche Carrera GT* [14], onde podemos encontrar grande presença destes materiais, bem como, o novo superdesportivo *Lamborghini Aventador* e o cidadão elétrico BMW i3. [11]



A utilização desta tipologia de materiais é uma necessidade cada vez maior, dada a combinação de rigidez e resistência com baixa densidade, as baixas emissões poluentes, a facilidade em produzir peças com superfícies complexas, e a resistência à corrosão. [15-17] O baixo peso dos compósitos é uma das principais vantagens neste sector, pois consoante a funcionalidade do automóvel, este pode influenciar no seu rendimento geral. Veja-se na perspetiva que em camiões permite aumentar a carga mantendo o total de massa, em carros desportivos viabiliza um aumento do desempenho (aceleração e velocidade máxima) e para carros do quotidiano possibilita a redução do consumo de combustível bem como da emissão de CO<sub>2</sub>. [9]

Segundo a literatura, acredita-se que os materiais compósitos irão ter um papel ainda mais importante na indústria automóvel quando os seus preços forem competitivos com o alumínio e o aço [8] e o seu tempo de processamento for reduzido [9, 12], apesar da empresa têxtil japonesa *Toray Industries* afirmar ter desenvolvido um novo método de processamento de fibra de carbono que molda plataformas de automóveis em 10 minutos, diminuindo, assim, duas horas e meia comparado com os métodos atuais. [18]

### *2.1 Materiais*

Como já mencionado, um compósito é basicamente um sistema que na sua composição introduziu-se, pelo menos, dois materiais diferentes que podem ser classificados em dois tipos, matriz e reforço. A matriz é o que confere estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os materiais reforços e mantendo as suas posições relativas. Já os materiais de reforço são os que realçam maior rigidez, dureza e resistência mecânica. [19]

Os materiais usados nas matrizes poliméricas podem ser de natureza termoendurecível ou termoplástica. As resinas termoendurecíveis são as mais utilizadas na indústria dos compósitos, pois apresentam uma menor viscosidade, facilitando o processamento aquando da inclusão de fibras contínuas (necessidade de impregnação). Contudo, os materiais termoplásticos apresentam maior resistência ao impacto; maior deformação na rotura e ductilidade; ciclos de fabrico mais curtos; maior facilidade de reciclagem, reparação, reprocessamento e elevado rácio desempenho/custo. Assim, os materiais termoplásticos mais utilizados para trabalharem em conjunto com sistemas de fibras contínuas são as poliamidas/nylon (PA), o poliéster termoplástico (PET), o policarbonato (PC) e o polipropileno (PP). [7] Na Tabela 1 é possível verificar as características de cada material identificado.

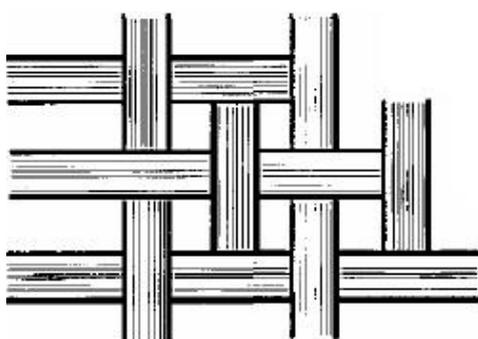


Tabela 1 - Propriedades dos polímeros termoplásticos [7]

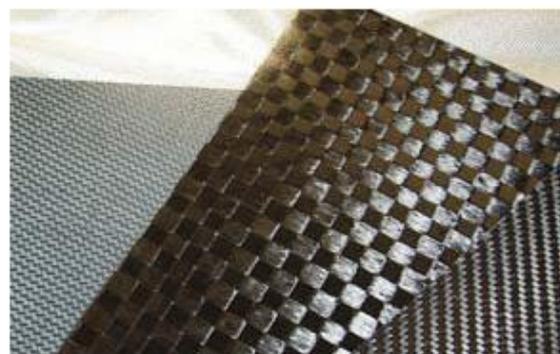
Propriedade	Unidade	Termoplástico			
		Nylon 66	PP	PC	PET
Densidade	-	1.14	0.905	1.15	1.36
Calor Específico	Kg/Kg·K	1.7	2.0	1.2	1.0
Tensão de Ruptura	MPa	70	33	65	75
Módulo à Flexão	GPa	2.8	1.5	2.8	3
Deformação na Ruptura	%	60	150	100	70
Preço	-	3.9	1	4.2	3.0
Condutibilidade Térmica	W/m·K	0.24	0.2	0.2	0.2
Temperatura de Processamento	°C	260	204	270	260-310
Temperatura de Serviço	°C	65-177	120	120	80-120

Usualmente, a poliamida é o termoplástico mais utilizado nos materiais compósitos com uma relação “desempenho mecânico/custo” atraente apesar do seu preço ser mais elevado que o do PP. Isto deve-se, sobretudo, à sua aplicação em peças injetadas para um mercado de tão grande consumo, como é o da indústria automóvel. [7]

No que diz respeito aos reforços utilizados com matrizes termoplásticas, estes podem ser divididos na indústria em dois tipos, secos ou pré-impregnados, Figura 1. Maioritariamente, são os reforços pré-impregnados os mais utilizados devido ao desconhecimento de algum processo onde seja possível a utilização direta dos reforços secos.



a)



b)

Figura 1 – a) Matriz seca, b) Matriz pré-impregnada [20 e 21]



O material pré-impregnado (prepeg) é um produto intermediário, pronto para a ser moldado e é recebido sob a forma de tecido ou tape (com fibra unidirecional). O prepeg é colocado diretamente no molde onde se finaliza a sua consolidação sem a necessidade da adição de resina durante o seu processamento. [22] De referir que existe, já disponível no mercado, uma interessante variedade de pré-impregnados de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas (CFRT). Na Tabela 2 apresentam-se as propriedades genéricas de alguns CFRT's disponíveis comercialmente.

Tabela 2 – Propriedades de matrizes termoplásticas com fibras contínuas [7]

Propriedade	Unidade	PP		Nylon 66		PEEK	
		Vidro E	Carbono	Vidro E	Carbono	Vidro S2	Carbono
Volume de Fibra	%	48	50	51	51	53	53
Peso de Polímero	%	28	34	30	38	32	40
Condutibilidade Térmica	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.69	1.34	1.83	1.45	1.94	1.56
Temperatura de Processamento	$^{\circ}\text{C}$	190-230		250-280		370-390	

Estes materiais têm vindo a ter uma grande utilização na indústria automóvel, [17] como é o caso dos assentos integrados presente nos carros desportivos *Daimler Chrysler*, a viga de suporte transversal no *Porsche*, ou a estrutura de para-choques da *BMW*, e em todos estes exemplos, presentes na

Figura 2, foi utilizado como reforço a fibra de vidro contínua na presença de uma matriz termoplástica. [15]

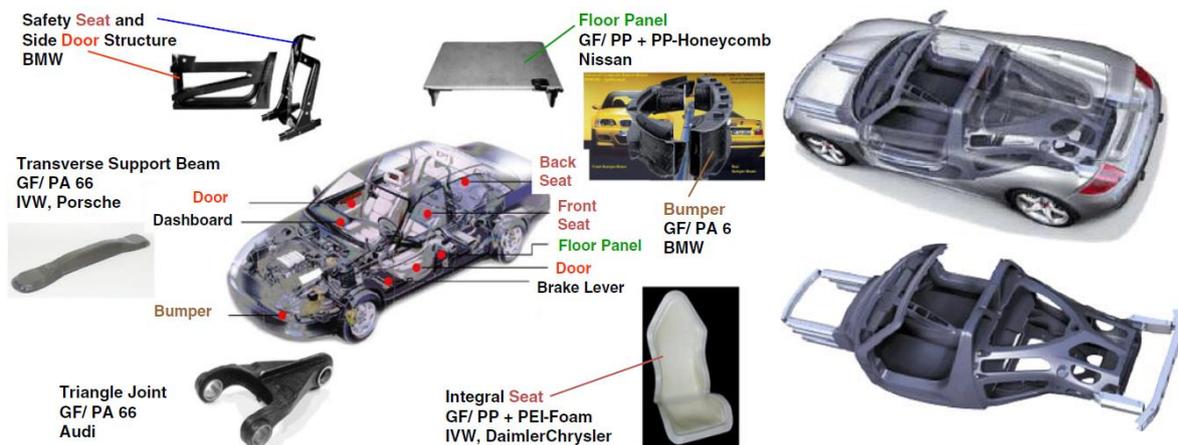


Figura 2 – O uso dos compósitos nos automóveis. No lado direito é o exemplo do Porsche.

Isto deve-se ao facto dos termoplásticos apresentarem excelentes propriedades, tais como, facilidade do potencial construtivo, projeto integrante, reciclabilidade, resistência à corrosão e nível de absorção de energia, igualando, assim, as propriedades principais dos termoendurecíveis. [17, 23]



As fibras de reforço contínuas podem-se organizar em duas classes consoante a sua flexibilidade, isto é, podem ser fibras de reforço pré-impregnadas flexíveis ou com impregnação parcial (não apresentarem as fibras totalmente impregnadas) ou fibras de reforço Pré-impregnadas semirrígidas ou com impregnação total (reforço completamente impregnado). Nos primeiros pré-impregnados, a impregnação do reforço realiza-se durante a sua posterior transformação em conjunto com a consolidação, devido a temperaturas e pressões a que o material é sujeito. No que diz respeito aos semirrígidos, a realização da transformação deve-se somente à necessidade de adquirir a forma do produto final, uma vez que o reforço já se encontrava totalmente impregnado.

Por último, acerca das matrizes é importante referir que devido à elevada viscosidade, a moderadamente baixas temperaturas, é significativamente mais difícil impregnar um reforço com um material termoplástico que com uma resina termoendurecível. Os compósitos termoplásticos são, portanto, normalmente fornecidos numa variedade de formas intermédias prontas a usar, que podem ser processadas através de uma série de técnicas de produção *standard*. Note-se que para a produção de pré-impregnados de matriz termoplástica reforçada com fibras contínuas são normalmente utilizadas quatro técnicas como a utilização do termoplástico em suspensão líquida ou do plástico fundido ou mistura íntima de fibras de reforço quer como fibras termoplásticas quer com polímero em pó. [7]

Passando aos reforços, as fibras de vidro, carbono e aramida são os reforços geralmente usados em todos os compósitos de matriz polimérica. Enquanto as fibras de vidro são as mais utilizadas por apresentarem uma razão desempenho/custo bastante mais competitivo que as restantes, as fibras de carbono empregam-se sobretudo em aplicações avançadas que exigem rigidez elevada. Por fim, as fibras aramidas usam-se, com vantagem e de forma muito mais restrita, em aplicações com elevada exigência da resistência ao impacto e abrasão. Contudo, neste estudo serão apenas utilizadas as fibras de vidro e de carbono. [22]



Figura 3 – Tipos de fibras, a) Fibra de Vidro, b) Fibra de Carbono, c) Fibra de Aramida [24]

As fibras de vidro podem ser contínuas ou descontínuas, com diâmetros de 3 a 20  $\mu\text{m}$ , representando atualmente mais de 50% do mercado de fibras para compósitos de matriz orgânica, sendo, portanto, o reforço mais utilizado nos materiais compósitos. [3, 7, 22] Este fenómeno deve-se às principais



propriedades inerentes às fibras de vidro que permitem que estas apresentem vantagens competitivas em relação às outras fibras disponíveis, sendo elas as seguintes:

- Baixo custo;
- Excelente aderência fibra-matriz;
- Excelentes propriedades elétricas;
- Alto alongamento na rutura;
- Boa resistência ao impacto;
- Facilidade no processamento. [3, 7, 25]

O líder mundial destas fibras é a *OwensCorning*. Contudo a PPG - *Plate Glass Corp.*, é outra empresa norte-americana importante no sector. Já na Europa, a *SaintGobain* (França) e a *Pilkington* (Grã-Bretanha) são os principais produtores, tal como a *Asahi* no Japão. [24]

As fibras de vidro subdividem-se em vários grupos consoante a sua composição, sendo um fator determinante nas suas propriedades finais, assim podem ser classificadas como fibra de vidro A, C, D, E, L, M e S. [7]

De destacar que algumas das principais aplicações das fibras de vidro são as carcaças de automóveis e barcos, tubulações de plásticos, recipientes para armazenamento e pisos industriais. No que diz respeito à sua utilização na indústria automóvel, há um esforço de diminuir o peso dos veículos e aumentar a eficiência dos combustíveis, sendo estas, desta forma, tendencialmente mais utilizadas, [23] como é o exemplo das portas traseiras do SMART [16], Figura 4.



Figura 4 – Fibras de vidro utilizadas nas portas traseiras do SMART [15]



Relativamente às fibras de carbono, estas fibras são muito menos usadas que as de vidro. Embora sejam bastante mais rígidas (três a sete vezes mais) são também muito mais caras (cerca de dez a quinze vezes mais), pelo que são geralmente apenas utilizadas em componentes estruturais em que se exige um módulo muito elevado associado com baixo peso (elevado módulo específico). As fibras de carbono mais utilizadas fabricam-se a partir de fibras precursoras de Poliacrilonitrilo (PAN) ou de resíduos da destilação do petróleo convenientemente tratados (Pitch). [25] No entanto, na indústria automóvel, o material mais utilizado é o PAN, sendo este um polímero derivado do petróleo que, depois de sujeito a processos mecânicos de extensão e térmicos (pirólise), permite obter fibras com um diâmetro entre os 0,005 e os 0,010 milímetros. Estas fibras são agrupadas em feixes de 50 mil, sendo posteriormente matéria para uma “manta” com o aspeto final de um tecido (unidirecional ou multidirecional), estando ainda disponíveis na forma de mechas, tecidos híbridos (vidro-carbono, aramida-carbono) e pré-impregnados com epóxi. [3, 11]

Comparativamente às fibras de vidro, as fibras de carbono podem ser divididas consoante o tipo de módulo de elasticidade, resistência e temperatura de tratamento térmico final, as fibras de carbono podem ser divididas. Tendo em conta o seu módulo de elasticidade temos:

- UHM – Ultra Alto Módulo ( $E > 500$  GPa)
- HM – Alto Módulo ( $300 < E < 500$  GPa)
- IM – Módulo Intermediário ( $E \leq 300$  GPa)
- LM – Baixo Módulo ( $E < 100$  GPa)

No que toca à resistência à tração, as fibras de carbono dividem-se em dois tipos:

- UHS – Ultra Alta Resistência ( $\sigma > 5$  GPa)
- HS – Alta Resistência ( $\sigma > 2,5$  GPa)

Já em relação à temperatura de tratamento térmico final, temos três tipos:

- Tipo I - superior a 2000 °C, sendo associada com fibras de alto módulo de elasticidade.
- Tipo II - em média de 1500 °C, sendo associada com fibras de alta resistência.
- Tipo III; inferior a 1000 °C, sendo fibras de baixo módulo e baixa resistência. [3]

Deste modo, a possibilidade da utilização das fibras de carbono toma inúmeras aplicações, como por exemplo, equipamentos desportivos, carcaças de motores a jato, em vasos de pressão ou em componentes estruturais de aeronaves. Isto também, dado que, as fibras de carbono em comparação com as restantes fibras de reforço apresentam maior módulo específico e maior resistência específica, suas propriedades mecânicas permanecem a altas temperaturas, a temperatura ambiente é resistente a meios corrosivos como humidade, ácidos e dentre outros, processos de fabricação economicamente viáveis. [7, 25]

Um excelente exemplo da utilização de material polimérico, ao invés de metálico, foi um protótipo (LTD) construído pela *Ford* onde se pretende mostrar o potencial das fibras de carbono na indústria automóvel.



Este projeto desenvolvido consistiu numa comparação entre dois protótipos de materiais diferentes (aço e fibra de carbono), sendo que os resultados obtidos neste estudo da *Ford* se encontram na Tabela 3. Por observação da tabela é possível se verificar uma diferença de peso superior a meia tonelada, mantendo, no entanto, a mesma a qualidade e as condições dinâmicas do veículo. [27]

Tabela 3 – Valores obtidos com a alteração dos materiais [27]

Componente	Peso (kg)		
	Aço	CFRP	Redução
Carroçaria	192.3	72.7	115.0
Chassis-suspensão	128.6	93.6	35.0
Rodas	41.7	22.3	19.4
Capô	22.3	7.8	14.7
Piso	19.5	6.5	13.1
Portas	64.1	25.2	38.9
Para-choques	55.9	20.0	35.9
Barra de direção	9.6	6.8	2.8
<b>Peso total do veículo</b>	<b>1705</b>	<b>1138</b>	<b>566</b>

## 2.2 Processos

Com o desenrolar dos anos há uma necessidade de evolução e desenvolvimento da indústria de materiais compósitos levando a um aumento dos procedimentos de moldagem, facilitando desta forma a confecção de peças de forma mais técnica e aprimorada. De modo geral, um material composto por fibras, de modo a ser moldado, passa pelas operações presentes na Figura 5.

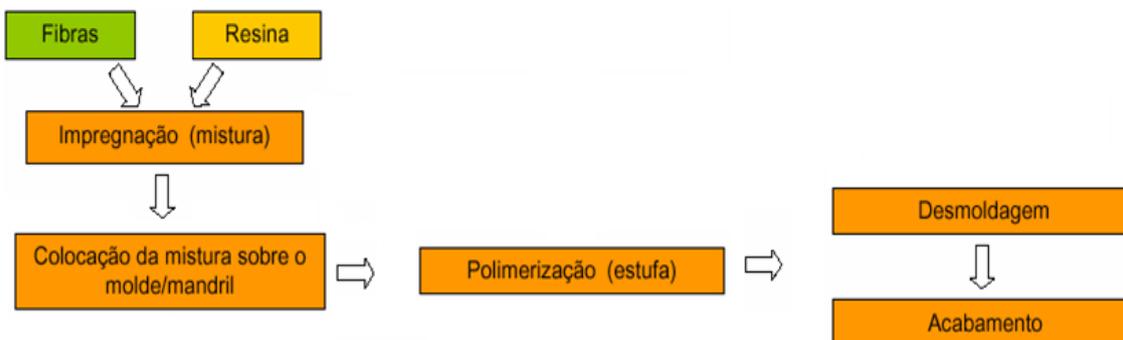


Figura 5 – Etapas gerais para a produção convencional de um compósito [3]

Conforme a geometria, a dimensão e as características mecânicas que se desejam obter, bem como as séries de fabricação, estas operações podem ser efetuadas por diferentes processos. Os mais utilizados na indústria dos compósitos, e principalmente baseada em matrizes termoendurecível, são:



- Moldação por contacto manual ou *hand lay-up* - processo de baixas pressões, sendo o primeiro a ser aplicado na fabricação de plástico reforçado com fibras de vidro;
- Moldação por uso de pistolas ou *spray-up* - primeira evolução da moldagem por contacto manual;
- Moldação a vácuo - obtenção de peças com acabamento superficial em ambos os lados e comparada com a *hand lay-up*, proporciona maior concentração de reforço e melhor adesão entre camadas de reforço;
- Moldação por injeção e vácuo - combina as técnicas RTM a baixa pressão com a moldação a vácuo;
- Moldação a vácuo com moldes rígidos;
- *Sheet molding compound* (SMC) - consiste em três etapas, preparação da pasta-matriz, conformação do pré-impregnado e prensagem ou injeção da peça final
- *Bulk molding compound* (BMC) - junção de fios picados com resina em forma de uma pasta “granulados”, adequado tanto para injeção como compressão;
- Processo de prensagem a quente ou frio;
- Moldação por centrifugação - permite alcançar corpos ocos cilíndricos, em que a força centrífuga possibilita a colocação fixação do reforço no molde e da impregnação da resina no reforço;
- Moldação por enrolamento - quase excepcional no fabrico de peças cilíndricas como tubos, carcaças de motor de foguete ou tanques de armazenamento;
- Moldação por pultrusão - é usada na produção de componentes que possuem comprimentos contínuos e uma forma com seção recta constante como as hastes, tubos e feixes;
- Laminação contínua – obtêm-se um compósito na forma de lâmina, tais como painéis envidraçados claros ou translúcidas, painéis de construção planas e corrugadas e painéis de isolamento elétrico;
- *In-situ* - feixe de fibras contínuas na forma de fios colado sobre uma resina numa superfície plana ou curva a ser reforçada;
- Moldação autoclave - utilizados para processar componentes de alto desempenho, para aplicações de aeronaves e aeroespacial;
- Moldação por injeção – os termoendurecíveis reforçados podem ser moldados por injeção em equipamento semelhantes aos normalmente usados para resinas termoplásticas. A diferença reside no princípio das temperaturas mantidas em várias áreas do sistema. Com termoplásticos, o parafuso de injeção e a câmara são mantidos a uma temperatura relativamente elevada e o molde é arrefecido de modo a peça moldada configura. Em contraste, para os termoendurecíveis, o parafuso e a câmara são arrefecidos de modo que a resina e gel não faça



ligação cruzada, e o molde é aquecido de modo que faça ligação cruzada e cura. Moldagem por injeção oferece alta velocidade de produção e baixos custos de trabalho diretos. Combinando ainda excelentes propriedades mecânicas, com capacidade para grandes volumes de peças complexas, com propriedades que se aproximam das peças moldadas de compressão. [3, 15, 25, 28-29]

Em suma, pode-se dizer que impregnação de fibras secas contínuas na injeção é uma temática ainda pouco abordada devido à grande dificuldade de impregnação dos reforços secos pelos materiais termoplásticos. A utilização de tecnologias como a moldação por injeção, apesar de ser apetecível pelas elevadas cadências que permite, dificulta ainda mais o processo, devido às exigências em termos de temperaturas e pressões. Assim, não existe na literatura casos de estudos semelhantes, acerca deste assunto específico.

Os poucos trabalhos existentes utilizam matrizes de baixa viscosidade, tal como a caprolactona, que consiste na versão não polimerizada da poliamida 6 [30]. Neste caso, um equipamento protótipo foi desenvolvido em que a unidade de injeção da máquina foi alterada de forma a permitir a injeção de materiais com uma viscosidade tão reduzida.

Sendo que os principais desafios impostos neste trabalho estão relacionados com as elevadas temperaturas de fundido e molde necessárias para manter a viscosidade do termoplástico a níveis aceitáveis e também das pressões que se irão impor no fluxo. Outra questão importante prende-se com a forma de fixação do reforço no interior da cavidade. No entanto, o principal desafio a transpor será obviamente a correta impregnação das fibras pela matriz termoplástica, bem como da adesão entre elas, que tem impacto direto nas suas propriedades finais

### 3. Métodos Experimentais

*“Para o desenvolvimento e estudo da impregnação de fibras contínuas secas através de polímeros termoplásticos, utilizou-se dois processos industriais, sendo estes a moldação por compressão a quente e a moldação por injeção.”*





Os materiais termoplásticos mais utilizados para trabalharem em conjunto com o reforço de fibras contínuas, como mencionado no capítulo anterior, são a poliamida/ *nylon* (PA), o policarbonato (PC) e o polipropileno (PP). Como base nesta informação, a escolha do polímero para o presente projeto incidiu no polipropileno PP FPC 100 da SABIC®, com as características expostas na ficha técnica que se encontra no Anexo I.

A seleção deste material deve-se ao facto de este apresentar um índice de fluidez significativamente elevado quando comparado com os restantes termoplásticos, ver na Tabela 4. Sendo a impregnação de fibras contínuas na moldação por injeção o objeto de estudo do projeto, o índice de fluidez torna-se um parâmetro bastante importante dado ter influência direta na capacidade de impregnação do material entre as fibras.

Tabela 4 – Propriedades reológicas do PP

<i>Propriedades Reológicas</i>			
<i>Índice de fluidez (MFI)</i>	100	g/10min	ISO 1133
<i>Temperatura</i>	230	° C	ISO 1133
<i>Peso</i>	2.16	Kgf	ISO 1133

O material de reforço utilizado é a fibra de vidro do tipo E. É uma fibra unidirecional, com uma gramagem de 400 gr/m<sup>2</sup>, fornecida pela *Selcom*, com a referência UNIE400, e as suas características técnicas encontram-se mencionadas na respetiva ficha técnica.

Para o desenvolvimento do presente trabalho utilizaram-se de dois processos industriais, sendo estes a moldação por compressão a quente e a moldação por injeção.

O uso da moldação por compressão a quente surge com o intuito de estudar exaustivamente os parâmetros do processo de moldação, tais como as temperaturas e pressões, eliminando nesta fase os efeitos de fluxo que ocorrem na moldação por injeção.

De salientar que a compressão a quente é um processo bastante utilizado, atualmente, para obtenção em placas de compósitos, devido aos ciclos de fabrico serem relativamente simples e curtos.

A moldação por injeção é o processo que tem principal foco pois, para além do principal objetivo de impregnar fibras contínuas através de polímeros termoplásticos, é um dos processos com maior cadência produtiva.



### 3.1 *Moldação por Compressão a Quente*

A moldação por compressão a quente é um processo muito utilizado comparativamente com os restantes processos de conformação disponíveis para os compósitos termoplásticos. Principalmente devido à possível obtenção de compósito a partir de pré-impregnados, aliada a um custo reduzido e ciclos de fabrico relativamente simples. No entanto, esta técnica tem como desvantagem o ciclo térmico e as cargas mecânicas aplicadas, que podem resultar numa má distribuição da matriz em relação às fibras, ocorrendo o aparecimento de vazios. Este fenómeno está relacionado com a baixa viscosidade da matriz durante o processamento, resultante do défice do ciclo térmico, e com possível excesso de compactação que pode expulsar a matriz devido à pressão exercida. Postos estes dois acontecimentos, as propriedades mecânicas finais do compósito podem ser prejudicadas.

#### 3.1.1 Processo e equipamento

O processo de moldação por compressão a quente, realizado no âmbito deste estudo, consiste essencialmente na colocação do material correspondente ao volume do produto pretendido (reforço e matriz) na cavidade do molde, sendo que a parte superior e inferior do molde se encontram aquecidas a uma temperatura específica, aplicando-se em seguida pressão no material pelo fecho da prensa.

Para além da utilização da prensa (Tabela 5), foi necessário desenvolver uma ferramenta que consiste num molde de compressão e um punção, instrumentados com sensores de pressão e temperatura. Acoplado a este encontra-se ainda uma pequena extrusora a debitar o fundido para o interior da cavidade.

**Tabela 5 – Característica da prensa**

Potência Instalada	1 1500	CV Rpm
Pressão Máxima	250	Bar
Força Máxima	20	Ton
Caudal	3	Lts/min

Trata-se de uma cavidade com dimensões internas de 100x100mm e um punção com as mesmas dimensões, possibilitando assim a compressão sem fuga do material existente na cavidade.

O punção é constituído por um sistema de arrefecimento independente, bem como, um sistema de aquecimento alimentado por duas resistências de cartucho de 250W. O mesmo não aconteceu na cavidade pois, o material estava em contacto directo com a placa inferior e como tal o controlo de temperatura era realizado pelo sistema da placa da prensa, ver Figura 6.

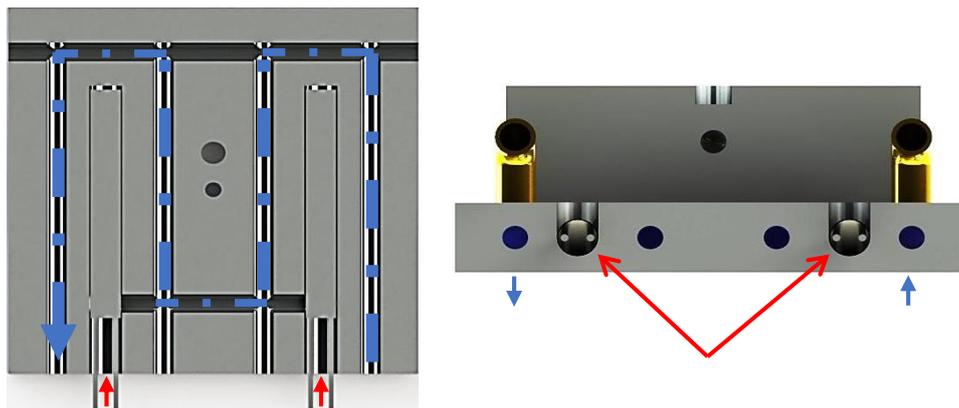


Figura 6 – Sistema de arrefecimento (→) e aquecimento (←)

Para além dos sistemas de regulação da temperatura, o molde está também instrumentado com um termopar, para o controlo da temperatura do punção, e com um sensor Kistler 6190CA, que permite a medição da temperatura e pressão durante o processamento do material, Figura 7. O sensor Kistler, com as características exibidas na ficha técnica apresentada no Anexo II, foi acoplado a um sistema de aquisição de dados Kistler, de modo a ser possível uma leitura *online* do processo, relativamente as condições temperatura e pressão.

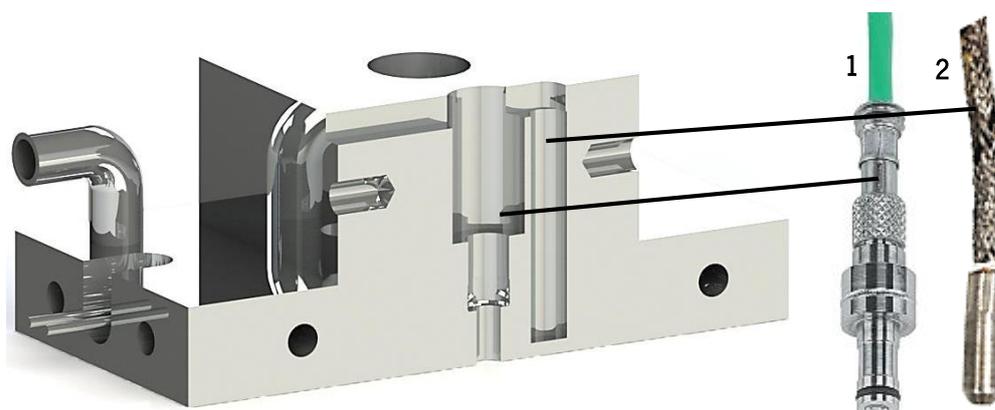


Figura 7 – Posicionamento do sensor Kistler (1) e termopar (2)

A leitura do processo inicia-se pouco antes do fecho do molde através do sensor *Triger* que se encontra sincronizado com o punção, Figura 8. O sensor tem como único objetivo a ativação da leitura do sensor Kistler proveniente do contacto do sensor *Triger* com uma superfície metálica, estando posicionado no punção de modo a que o sensor Kistler fosse ativado antes do contacto com o compósito.

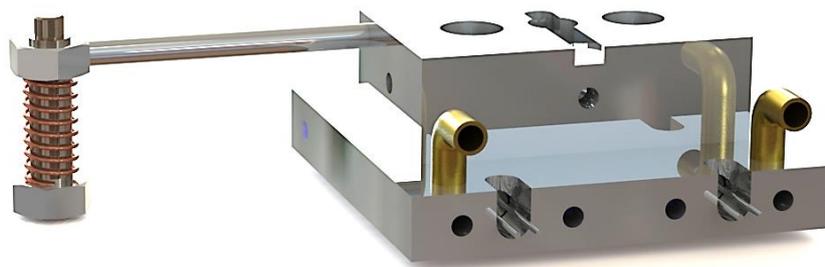


Figura 8 – Molde mais o sensor *Trigger*

Recorreu-se ao *software SolidWorks* para o dimensionamento de todo o molde, onde o resultado final é demonstrado na figura abaixo.

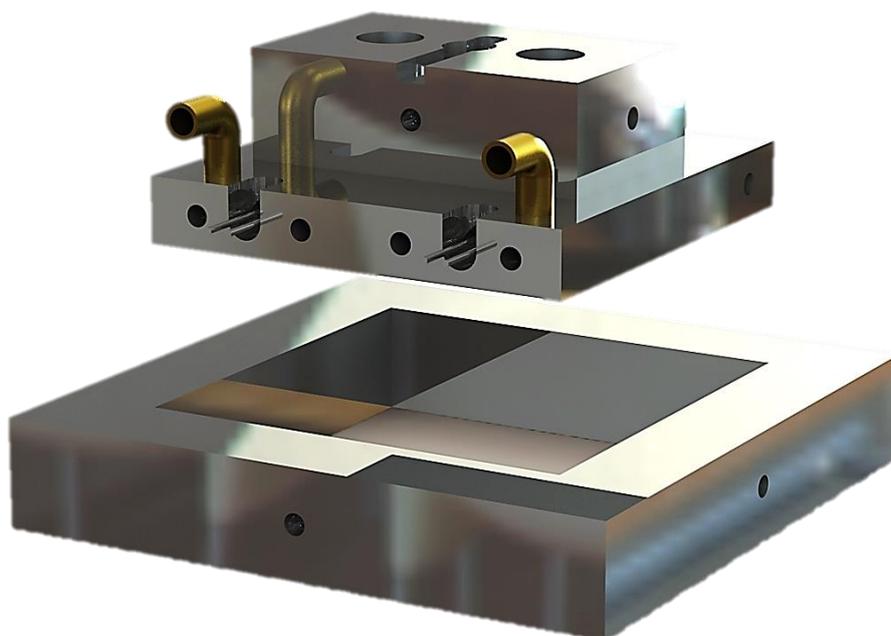


Figura 9 – Molde dimensionado no *SolidWorks*

Após a conclusão do molde virtual no *SolidWorks* procedeu-se à produção do molde físico em aço inox 316. Uma vez que o aço dilata com o calor, apresentando um valor de coeficiente térmico compreendido entre os  $11-19 \times 10^{-6}$ , foi necessário considerar durante o seu dimensionamento. O resultado final pode ser observado na Figura 10.

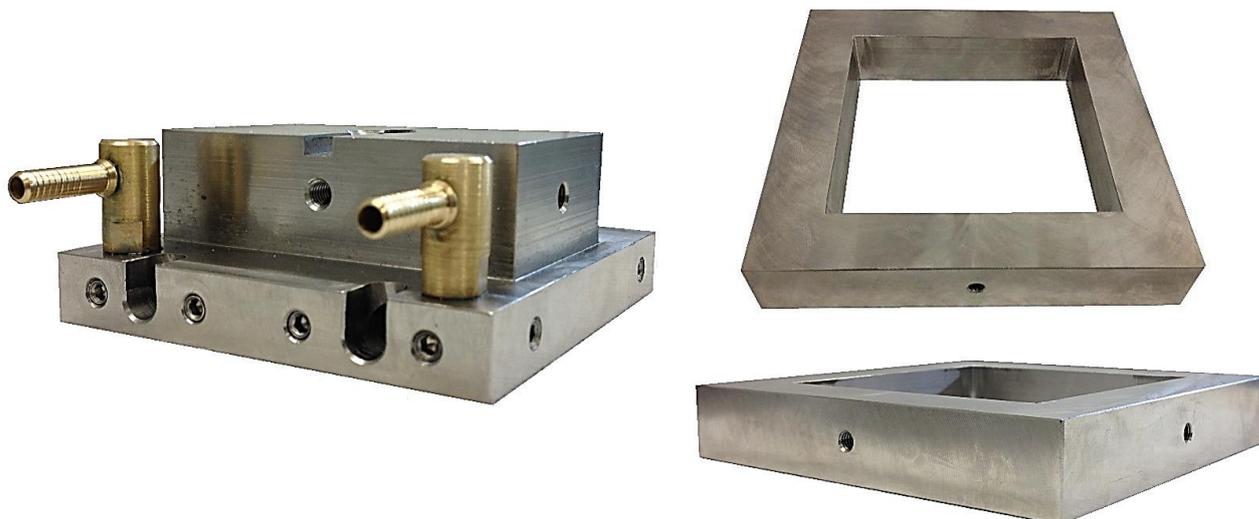


Figura 10 – Molde utilizado na compressão a quente

De forma a controlar também externamente a temperatura do fundido, utilizou-se como foi referido antes, uma mini-extrusora (Figura 11). De outra forma, o material teria de ser colocado na cavidade na forma de grânulos até fundir (estando dependente da temperatura do molde ou da prensa).



Figura 11 – Microextrusora e unidade de controlo utilizada

A extrusora é constituída por três resistências anelares e três termopares correspondentes, posicionados ao longo do cilindro. No interior do cilindro presencia-se a existência de um parafuso de transporte de Arquimedes, acoplado a um motor. Tanto o motor como as resistências e termopares estão ligados a uma unidade de controlo, sendo deste modo possível a monitorização, visualização e controlo da extrusora.



### 3.1.2 Procedimento experimental

O procedimento para a realização dos ensaios consistiu, inicialmente, na colocação do teflon, da cavidade e das fibras, respetivamente, no prato inferior da prensa, bem como, acionamento das resistências da prensa, punção e extrusora. Uma vez que a extrusora não apresentara comprimento do cilindro suficiente para ser um processo contínuo no débito desejado, o polímero teve que ficar em repouso durante algum tempo. Este tempo de espera permitia que o material atinge-se a quantidade de fundido necessário na obtenção de placas de 100x100x3mm, as mesmas que seriam produzidas na injeção. Esta quantidade foi determinada com a aplicação das equações, do Anexo III, e com o conhecimento do débito da extrusora. O débito da extrusora consistiu num menor tempo de repouso do material, evitando a degradação, com a maior velocidade de extrusão possível, evitando por sua vez um gradiente de temperaturas entre o próprio fundido. Quando as temperaturas dos pratos do molde (prato inferior da prensa e o punção) eram as pretendidas, o fundido era extrudido diretamente para o interior da cavidade, onde de seguida se colocava novamente teflon e o punção por cima. O molde era fechado e empregue uma pressão constante. Por fim, ocorria o arrefecimento através da circulação de água no sistema de arrefecimento da prensa e do punção, com ajuda da paragem de fornecimento de energia para as resistências de ambos, até atingir rigidez suficiente que permitisse a extração do compósito sem o danificar. As etapas que constituem este processo podem ser observadas na figura seguinte.

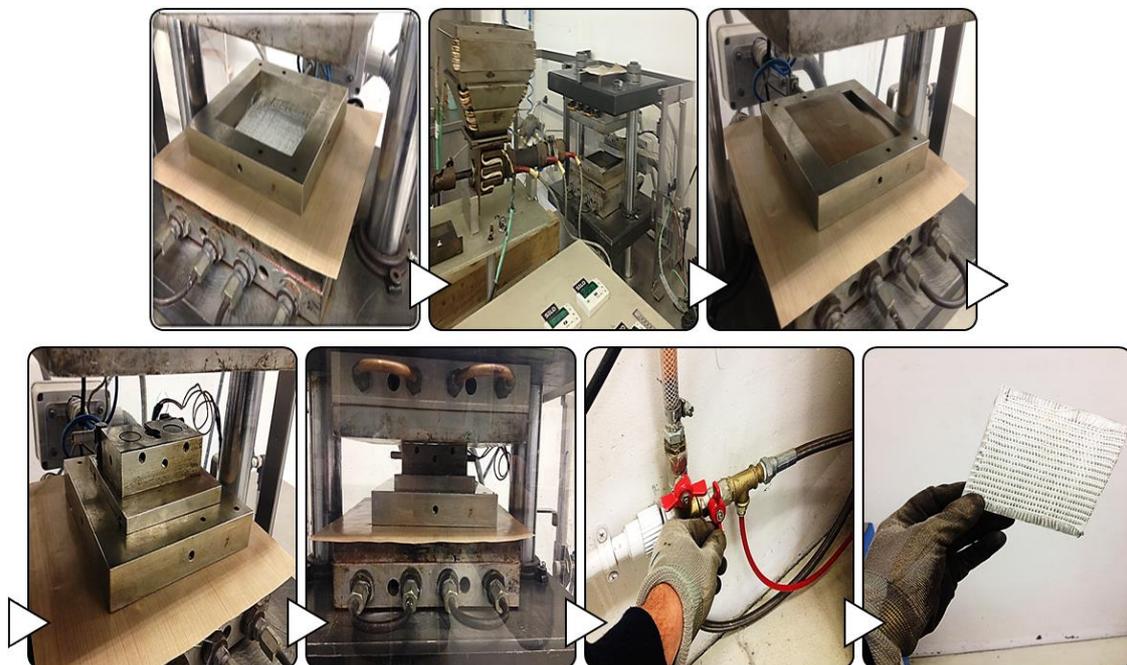


Figura 12 – Etapas do procedimento experimental do processo moldação a quente

Para este procedimento foram realizados dois grupos de processamento impostos pelo número de camadas de fibras contínuas de vidro. Para cada grupo de processamento são provocadas variações na temperatura do fundido, na temperatura do molde e no tempo de aplicação da pressão de consolidação. Os testes



realizados seguiram uma matriz Taguchi ortogonal  $L_8$  a 2 níveis, apresentada na Tabela 6, na qual se variou as seguintes condições do processo consideradas determinantes:

- $T_f$  – temperatura do fundido ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $T_m$  – temperatura do molde ( $^{\circ}\text{C}$ );
- $t_p$  – tempo de aplicação da pressão.

As temperaturas de fundido e do molde tem grande influência no processo devido à sua influência na viscosidade da matriz (que se pretende minimizar). Com este ensaio, pretendeu-se determinar as gamas de temperaturas mínimas, com as quais é possível impregnar o maior número de camadas de reforço. A pressão de consolidação foi constante durante o processo tendo um valor de 50bar variando o tempo da sua aplicação.

Com o planeamento de experiência Taguchi pretende-se reduzir e otimizar o número de testes a realizar. Este planeamento foi repetido para 1 e 4 camadas de fibra (grupo C e Q, respetivamente) de forma a estudar também a influência da percentagem de reforço na peça.

Tabela 6 – Condições de processamento na compressão a quente

	<i>Temperatura Fundido (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i>	<i>Temperatura Molde (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i>	<i>Tempo (s)</i>	<i>Pressão (bar)</i>
<b>1</b>	210	160	60	50
<b>2</b>	210	160	180	50
<b>3</b>	210	220	60	50
<b>4</b>	210	220	180	50
<b>5</b>	240	160	60	50
<b>6</b>	240	160	180	50
<b>7</b>	240	220	60	50
<b>8</b>	240	220	180	50

Aplicando estas condições ao procedimento experimental, gráfico da Figura 13, o aumento da temperatura do molde dá-se até 160/220 $^{\circ}\text{C}$  a partir da temperatura ambiente (23 $^{\circ}\text{C}$ ). Quando a temperatura pretendida é atingida, é introduzido o fundido à temperatura de 210/240 $^{\circ}\text{C}$  para o interior da cavidade. O molde é fechado e é aplicada pressão constante de 50bar durante 60/180s com o molde ainda à mesma temperatura. Após aplicação da pressão, ocorre o arrefecimento do molde até à temperatura de 70 $^{\circ}\text{C}$ , sucedendo, posteriormente, a extração da peça, tal como pode ser observado na figura seguinte.

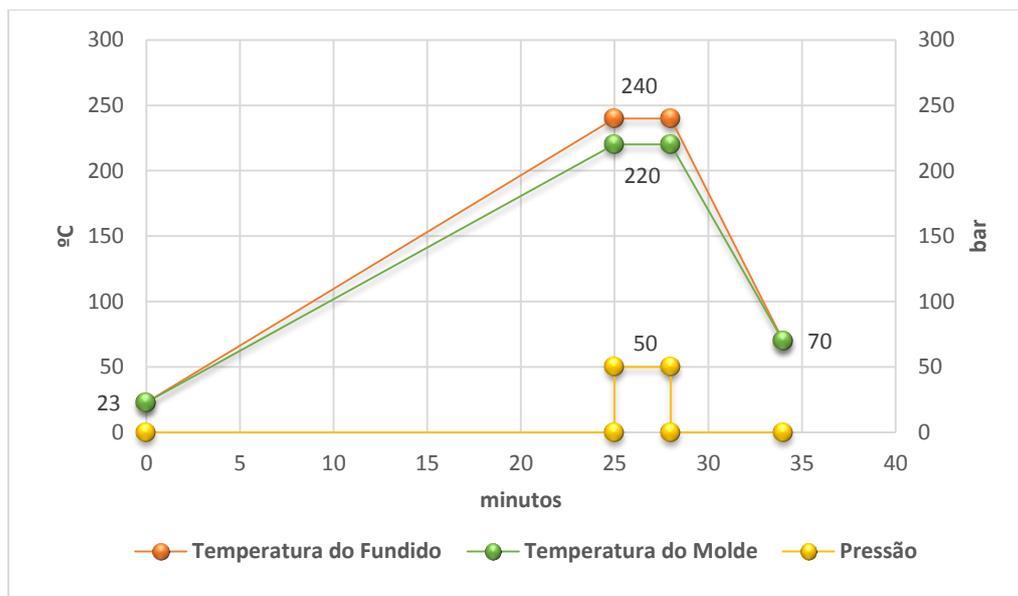


Figura 13 – Exemplo do ciclo térmico e de pressão para as condições máximas

### 3.2 Moldação por injeção

A primeira notícia referente à moldação de material plástico por injeção surge no século XIX onde, em 1872, foi patenteada a primeira máquina de injeção pelos irmãos Hyatt. Apresentava já grandes semelhanças com as máquinas de injeção atuais, apesar de diferir pela utilização para o uso com nitrato de celulose. [29-30]

Presentemente, a moldação de material plástico por injeção é um processo de grande importância na indústria. Este facto deve-se à possibilidade de poder utilizar a maioria dos termoplásticos e à capacidade de originar peças com uma gama de diversidade e complexidade muito grande, com excelentes acabamentos superficiais e tolerâncias dimensionais apertadas.

Esta técnica permite ainda a facilidade de automação do processo e elevada cadência de produção.

#### 3.2.1 Processo e equipamento

Na moldação por injeção o polímero é introduzido, manual ou automaticamente, no estado sólido na tremonha da injetora. Após a introdução, o polímero sofre a passagem para a câmara cilíndrica, geralmente contendo um parafuso sem fim, funcionando como plastificador e homogeneizador da massa polimérica, permitindo que o material seja continuamente aquecido até à sua fundição. Quando o polímero atinge a viscosidade adequada é injetado sob pressão para o interior do molde, tendo este a geometria pretendida do produto final. Após o enchimento do molde ocorre o arrefecimento do polímero fundido até este recuperar a rigidez que lhe possibilite finalizar o ciclo com ejeção. [29] Um novo ciclo inicia-se com o fecho do molde. De forma ilustrativa, e mais perceptível, estão demonstradas todas as etapas do ciclo típico da moldação por injeção na Figura 14.

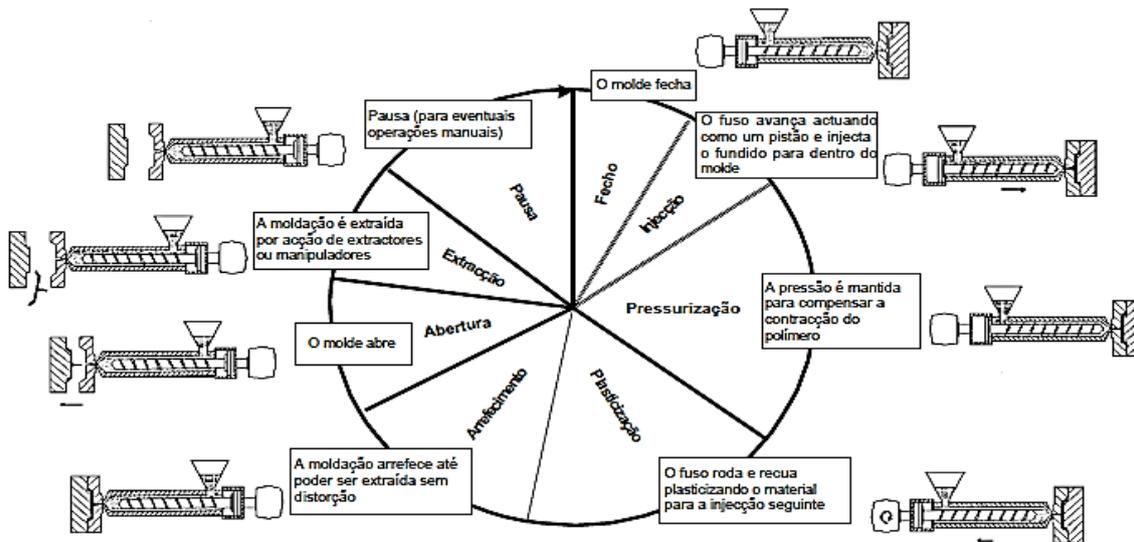


Figura 14 – Ciclo teórico da injeção [29]

No presente trabalho, o equipamento utilizado para a realização da moldação por injeção foi a injetora FERROMATIK ELEKTRA 110. O molde utilizado, Anexo IV, tem um sistema de controlo de temperatura, que consiste em oito resistências de cartucho de 1200W, com termopares tipo J acoplados, divididas pela parte móvel e fixa. Já os canais para o fluido refrigerador (água) são diretos, uma vez que as temperaturas atingidas pelo molde vaporizavam a água, aumentando assim a pressão interna do sistema. A sua finalidade advém da necessidade de manter o fundido a temperaturas elevadas, de modo a apresentar viscosidades menores e, conseqüentemente, maior fluidez. O controlo das resistências do molde é possível através da utilização da unidade de controlo S.I.S.E., modelo M4U-S12, e das resistências do bico através da unidade de controlo MATERMASTIC, modelo DC 550, Figura 15 – Molde e os sistemas de controlo de temperatura

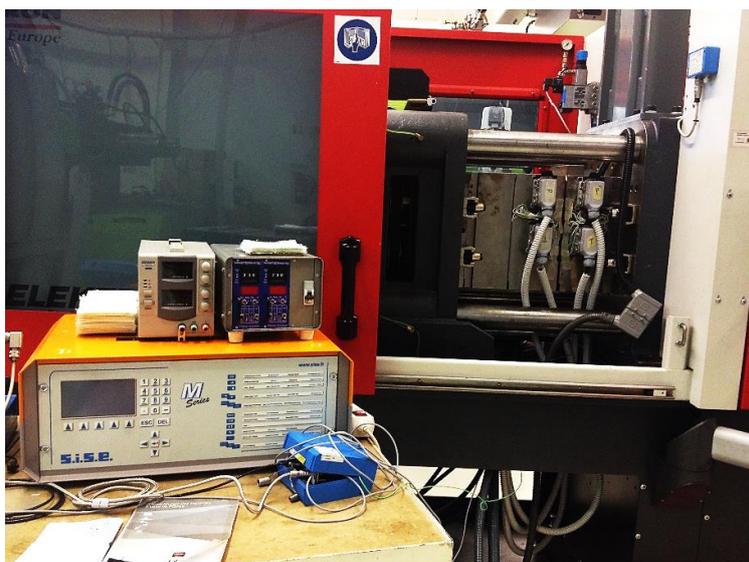


Figura 15 – Molde e os sistemas de controlo de temperatura

Associado ao sistema de aquecimento foi utilizado um sistema de isolamento. Este, por sua vez, tem como objetivo isolar, das temperaturas elevadas, o molde e os seus postigos, sendo estes constituídos por placas de teflon de 5mm.

Para a fixação da fibra, foram construídos quatro pinos cónicos colocados nos cantos da bucha, onde a fibra é colocada.

O molde encontra-se também instrumentado com um sensor Kistler 6190CA. É de referir que este sensor é igual ao utilizado na moldação por compressão a quente, encontrando-se igualmente acoplado ao mesmo sistema de aquisição de dados Kistler 5865A10. Na Figura 16 a está representado o molde com os sistemas de isolamento e fixação.

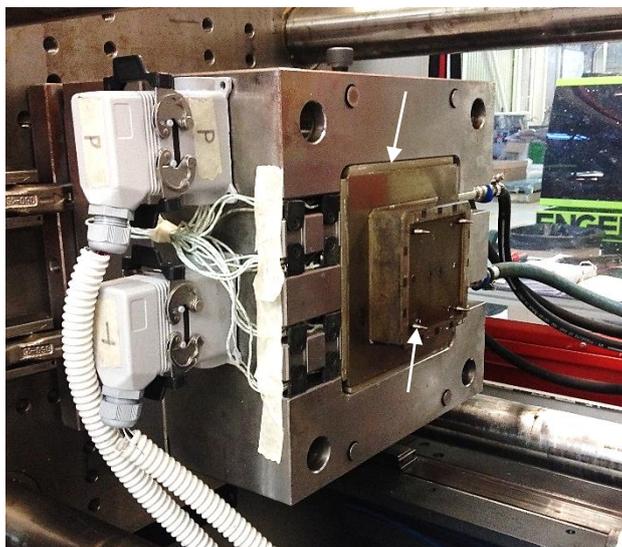


Figura 16 – Molde com os sistemas de isolamento e fixação da fibra



Posto isto, todos os equipamentos utilizados para a moldação por injeção foram identificados e podem ser vistos na Figura 17.



Figura 17 – Equipamentos utilizados na injeção

### 3.2.2 Procedimento experimental

Com a utilização dos equipamentos anteriormente mencionados, o processo de obtenção de fibras secas contínuas impregnadas em termoplásticos, na moldação por injeção, consistiu nas etapas descritas na Figura 18, com adição das atividades de introdução do aquecimento do molde e colocação de fibra neste.

Desta forma, o ciclo inicia-se com o aquecimento do molde, do bico de injeção e do cilindro da injetora. Quando são atingidas as temperaturas desejadas, procede-se à colocação manual das fibras secas na bucha do molde e de seguida ao fecho do mesmo. Com o molde fechado, dá-se início à injeção, pressurização e plasticização, sequencialmente. Posto isto, o molde já se encontra preenchido com material fundido no seu interior e pronto para que ocorra o arrefecimento, através da circulação de água no sistema de arrefecimento do molde. Com o arrefecimento, o material vai conferir a rigidez necessária para que seja possível realizar a ejeção, obtendo-se assim o produto final. O ciclo da injeção dá-se, deste modo, por terminado, sendo necessário realizar novamente todas as etapas, à exceção do aquecimento do bico e do cilindro, para os ciclos seguintes. O procedimento utilizado pode ser visualizado na Figura 18.



Figura 18 – Etapas do procedimento experimental do processo moldação por injeção

A grande vantagem da moldação por injeção para a possível impregnação de tecidos secos reside nas elevadas pressões que podem ser geradas, contribuindo para a ocupação da matriz nos espaços vazios deixados pelas fibras. Assim, a pressão de compactação ( $P_2$ ) e o tempo da sua aplicação ( $t_2$ ) são parâmetros de grande importância a estudar. No entanto, parece evidente que o comportamento do fluxo do material na cavidade e através das fibras também deverá ter grande influência na sua impregnação.

Tal como na moldação por compressão a quente, os testes realizados também seguiram uma matriz Taguchi ortogonal  $L_8$  a 2 níveis, apresentada na Tabela 7, na qual se variaram as seguintes condições do processo consideradas determinantes:

- $T_m$  – Temperatura do molde ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $P_2$  – Pressão de compactação (bar)
- $t_2$  – Tempo de aplicação da pressão de compactação (s)
- $V_{inj}$  – Velocidade de injeção (mm/s)

A temperatura do fundido foi mantida constante, apresentando um valor de, aproximadamente,  $230^{\circ}\text{C}$ . Neste caso foi utilizado apenas um nível de fibra.

Foram também realizados testes com duas camadas de fibra, em que se variou unidimensionalmente o tempo de aplicação da pressão de compactação para diferentes temperaturas do molde, bem como, a variação da temperatura do molde para o mesmo tempo de aplicação da segunda pressão. Este grupo de experiências teve como nomenclatura D, de acordo com o número de fibras.



Tabela 7 – Condições de processamento na injeção para amostra de uma camada de fibra de vidro

	<i>Velocidade de Injeção (mm/s)</i>	<i>2ª Pressão (bar)</i>	<i>Temperatura do Molde (°C)</i>	<i>Tempo da 2ª Pressão (s)</i>
<b>1</b>	10	300	170	60
<b>2</b>	10	300	230	180
<b>3</b>	10	600	170	180
<b>4</b>	10	600	230	60
<b>5</b>	100	300	170	180
<b>6</b>	100	300	230	60
<b>7</b>	100	600	170	60
<b>8</b>	100	600	230	180

Relativamente às variáveis, as mesmas foram estudadas de forma distinta conforme a condição em questão, sendo que para o grupo D as condições de processamento são diferentes das utilizadas até agora. Este grupo destina-se a estudar a influência de duas variáveis, temperatura do molde e tempo de aplicação da segunda pressão, nas propriedades das amostras. Assim, as condições realizadas, segundo os seus parâmetros operatórios encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Condições de processamento na injeção para amostra de duas camadas de fibra de vidro

	<i>Velocidade de Injeção (mm/s)</i>	<i>2ª Pressão (bar)</i>	<i>Temperatura do Molde (°C)</i>	<i>Tempo da 2ª Pressão (s)</i>
<b>1</b>	30	300	170	10
<b>2</b>	30	300	170	20
<b>3</b>	30	300	170	30
<b>4</b>	30	300	170	40
<b>5</b>	30	300	170	50
<b>6</b>	30	300	170	60
<b>7</b>	30	300	210	60

De notar que na presente tabela velocidade de injeção e segunda pressão se mantêm constantes, sendo que apenas existe variação nas variáveis a estudar, temperatura do molde e tempo de aplicação da segunda pressão. De notar ainda, que para as condições de 1 a 6 a temperatura do molde se mantêm com o valor de 170°C, variando apenas o tempo de aplicação da segunda pressão.

### 3.3 Planeamento de experiências

O planeamento de experiências, designado por *Design of Experiments* e conhecido pela sigla DOE, é empregue na decisão entre diferentes processos de produção, diferentes conceitos de produto, bem como no entendimento da influência de determinados fatores e na resolução de problemas de fabricação, entre outros. Para além destas utilizações, esta ferramenta é cada vez mais importante na medida em que se



intensifica a base tecnológica dos produtos e as exigências dos clientes, aumentando a necessidade da sua aplicação durante todas as etapas do ciclo de vida do produto.

Assim, e tal como o próprio nome indica, o DOE é utilizado para planejar as experiências a realizar, definindo variáveis e quantidades, bem como as condições que deverão ser adotadas durante a realização de experiências. Para recorrer a este estudo são necessários conhecimentos sobre os princípios de engenharia e conceitos estatísticos, sendo que a definição de quais os fatores, a que níveis e em que quantidade devem ser utilizados durante uma experiência visa satisfazer a maior possível precisão estatística na resposta e o menor custo associado.

Para melhor entendimento, encare-se o fator como uma variável do produto ou do processo que é modificada na experiência. Devem existir, pelo menos, dois níveis para cada fator.

No final de serem realizadas as experiências recorrendo ao DOE, são obtidas respostas que permitem a caracterização do funcionamento de um processo ou de um produto. Assim, o que torna a técnica de elevada importância na indústria é, para além de menor tempo na identificação de fatores críticos, a possibilidade de se obter resultados mais confiáveis que otimizam a resposta média de um processo, economizando dinheiro sem comprometer a grande precisão estatística.

De salientar que uma das desvantagens desta ferramenta está inerente à quantidade exaustiva de cálculos que é colmatada com a utilização de ferramentas computacionais, facilitando imenso este procedimento. Contudo, só o uso do DOE, com ou sem ferramentas computacionais, não é suficiente para um bom planeamento experimental. É sempre necessário o conhecimento técnico do profissional que com esta ferramenta irá idealizar um plano mais rápido, mais económico e que possibilite obter uma resposta ao seu problema. [31]

### 3.3.1 Processo e Equipamento

Na área do desenvolvimento de novos produtos, que é a situação presente do projeto, a presença de melhor qualidade nos resultados de teste permite apresentar desempenhos superiores, quer a nível das características funcionais quer a nível de robustez do produto. Assim, para o desenvolvimento do planeamento de experiências, de forma eficiente, é necessário proceder a um conjunto de etapas antes de obter conclusões do que se encontra a desenvolver. Como tal, Coleman e Montgomery propõem que DOE industrial recorre às seguintes etapas:

- 1) Caracterização do problema: um relato claro do problema, a partir do qual a boa definição do problema permite a elaboração do objetivo. O objetivo do processo experimental deve ser não tendencioso, específico, mensurável e de resultado prático.



- 2) Escolha dos fatores de influência e níveis: fatores que devem variar, os intervalos sobre os quais esses fatores irão variar e os níveis específicos nos quais cada experiência será feita.
- 3) Seleção das variáveis de resposta: escolha baseada na teoria, no conhecimento e na experiência de especialistas, ou em procedimentos anteriores. Cada variável de resposta deve ter associada o nível normal em que será analisada no processo, bem como o modo, a precisão e a amplitude com que será medida.
- 4) Determinação de um modelo de planeamento experimental: considera o tamanho da amostra, formação de blocos e restrições de aleatoriedade, bem como seleciona um ordem adequada de experiências.
- 5) Realização do planeamento: necessário monitorizar o processo de modo a garantir que tudo é feito de acordo com o planeado. Etapa de maior importância para o processo, dado que um erro na execução do planeamento pode inviabilizar, e invalidar, por completo o sistema de experiência.
- 6) Análise dos dados: devem ser usados métodos estatísticos, de forma a permitir que os resultados sejam objetivos.
- 7) Conclusões e recomendações: conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um plano de ação. [31]

Como mencionado na literatura, o procedimento da análise dos dados requer um uso denso de cálculos. Como tal, de modo a facilitar e simplificar esta etapa de análise, procedeu-se à utilização do software *Design Expert 8*.

### 3.3.2 Procedimento experimental

Tendo como objetivo a obtenção de compósitos na moldação por compressão a quente e por injeção, baseada na impregnação de fibras contínuas secas através utilização de termoplásticos, elaborou-se um DOE onde as características avaliadas são o módulo de elasticidade, tensão máxima e a força, e o onde a intenção é conseguir o máximo de impregnação correlacionado com as melhores propriedades.

Perante o objetivo pretendido e a técnica em questão variaram-se as experiências entre três a quatro fatores, em dois níveis cada. Este planeamento de experiências encontra-se descrito na Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 – Condições utilizadas na compressão a quente

	Fator	Nível -	Nível +
A	Temperatura Fundido (°C)	210	240
B	Temperatura Molde (°C)	160	220
C	Tempo de Pressão (s)	60	180



Tabela 10 – Condições utilizadas na injeção

	Fator	Nível -	Nível +
A	Velocidade de Injeção (mm/s)	10	100
B	2ª Pressão (bar)	300	600
C	Temperatura do Molde (°C)	170	230
D	Tempo da 2ª Pressão (s)	60	180

Estes fatores foram selecionados devido a poderem vir a influenciar, e melhorar, a impregnação do reforço bem como as suas propriedades. Acredita-se que estas correlações existam dado, teoricamente, que:

**Temperatura do fundido ( $T_f$ )** – quanto menos viscoso estiver o fundido maior será a fluidez (mobilidade) e, conseqüentemente, mais facilitada será a impregnação;

**Temperatura do molde ( $T_m$ )** – quanto mais próxima estiver a temperatura do molde da temperatura do fundido, menor será o choque térmico aquando da entrada em contacto do fundido com as paredes do molde, sem que arrefeça rapidamente. Desta forma não se forma precocemente uma camada solidificada quer á superfície da peça, mas principalmente à superfície das fibras, impedindo o material de fluir entre elas;

**Pressão de compactação (P)** – A pressão de compactação no processo convencional de injeção é utilizada numa primeira etapa para terminar o enchimento da cavidade, e posteriormente para compensar a contração do material pela entrada de mais material. No caso deste processo, servirá para forçar o material a atravessar as fibras, obrigando-o a ocupar os vazios entre elas;

**Tempo de aplicação da pressão de compactação (t)** – permite verificar qual o tempo mínimo necessário à impregnação das fibras sem comprometer em demasia o tempo total de ciclo;

**Velocidade de injeção ( $V_w$ )** – durante a fase de enchimento da cavidade o fluxo é paralelo às fibras. Assim, não é evidente, se existe já alguma impregnação nesta fase, e por isso de que forma este parâmetro irá influenciar os resultados finais;

Para a análise estatística dos resultados bem como da percentagem de contribuição de cada variável, recorreu-se ao software DX8 (Design Expert 8).



Tabela 11 – Fatores e níveis para a compressão a quente

Std	Run	Factor 1 A:Tf °C	Factor 2 B:Tm °C	Factor 3 C:t s
1	2	210	160	60
2	6	210	160	180
3	4	210	220	60
4	3	210	220	180
5	1	240	160	60
6	5	240	160	180
7	7	240	220	60
8	8	240	220	180

Tabela 12 – Fatores e níveis para a injeção

Std	Run	Factor 1 A:Vinj mm/s	Factor 2 B:P2 bar	Factor 3 C:Tm °C	Factor 4 D:t2 s
1	2	10	300	170	60
2	3	10	300	230	180
3	7	10	600	170	180
4	8	10	600	230	60
5	1	100	300	170	180
6	5	100	300	230	60
7	4	100	600	170	60
8	6	100	600	230	180

Para a análise estatística dos resultados, foi realizada uma análise de variância designada ANOVA, obtendo-se assim gráficos de interação, presentes no Capítulo 4, onde é possível verificar qual ou quais dos fatores têm maior influência.

### 3.4 Ensaios de Caracterização

De modo a consolidar e validar os produtos obtidos, realizam-se ensaios de caracterização para verificar o sucesso pretendido no objetivo do projeto, impregnação de fibras contínuas secas através da utilização de termoplásticos. Assim, foram efetuados ensaios de caracterização mecânica e de microestrutura.

Os ensaios mecânicos selecionados consistiram em ensaios de tração e interlaminar *shear strength* (ILSS), em que as propriedades do material são caracterizadas pelo modo como este responde às solicitações mecânicas aplicadas, de tensão, deformação ou força. A natureza desta resposta depende da estrutura química, temperatura, tempo e condições de processamento a que o polímero esteve sujeito. Estes ensaios têm, ainda, como finalidade avaliar e comparar os resultados obtidos entre os compósitos produzidos com



o termoplástico que lhe deu origem. De salientar que, os dois ensaios mecânicos a realizar são normalmente os ensaios mais efetuados em compósitos.

Por sua vez, os ensaios de caracterização de microestrutura permitem ampliar o espectro de visualização que o olho humano não consegue alcançar, de modo a facilitar e a permitir a perceção da ocorrência de impregnação do reforço com fibras.

### 3.4.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é o ensaio mecânico mais utilizado na tentativa de colmatar a inexistência de ensaios que permitam prever o desempenho mecânico real do material. A opção pela aplicação do ensaio de tração deve-se à ótima relação entre a sua complexidade/custo e as informações adquiridas na sua realização.

Este ensaio consiste na solicitação de uma força crescente de tração no provete (corpo de prova) em análise até que ocorra a fratura. Permite, ainda, conhecer como o material reage aos esforços aplicados, bem como qual o limite máximo que suporta e a que partir de que valor ocorre a rutura. Quando o ensaio é pode fornecer informações básicas sobre as propriedades mecânicas fundamentais dos materiais empregados na engenharia, tendo aplicação direta no projeto e no dimensionamento de componentes e produtos.

As deformações exercidas no corpo de prova são praticamente uniformemente distribuídas por todo o corpo, mas deixa de o ser quando é atingida a carga máxima suportada pelo material, ocorrendo a diminuição da secção do provete. A rutura ocorre sempre na zona mais estreita do material, salvo a exceção da existência de um defeito interno, fora dessa região, que origine a rutura do mesmo.

#### *3.4.1.1 Procedimento experimental*

Num ensaio de tração, submete-se um provete a uma deformação axial, a uma velocidade constante. Registam-se a força aplicada e a correspondente deformação. Através deste ensaio é medida a resistência do compósito à tração, sendo assim possível caracterizar a rigidez e a deformabilidade do compósito.

Na Figura 19 estão representadas as dimensões gerais dos provetes usados nestes ensaios.

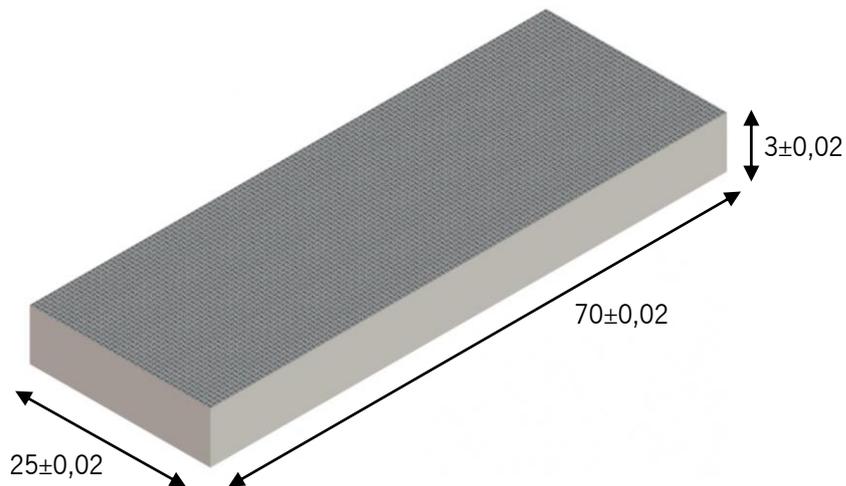


Figura 19 - Dimensões das amostras no ensaio da tração

As dimensões dos provetes utilizados nestes ensaios não são normalizadas, pois estavam restringidos pelas dimensões das placas moldadas (100x100mm). De qualquer forma, a comparação de propriedades é apenas realizada entre as diferentes condições de processamento, logo o facto de as dimensões não serem normalizadas não é crítico.

A tensão ( $\sigma$ ), a deformação ( $\varepsilon$ ) e o módulo de elasticidade (E) foram calculados por:

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

onde:

F - Força aplicada ao material;

A - Área inicial da secção transversal;

$L_0$  - Comprimento inicial de referência;

$\Delta L$  - Diferença entre o comprimento final e inicial.

Os ensaios foram realizados numa máquina universal de ensaios mecânicos Shimadzu AG-X, com uma célula de carga de 50 kN, uma velocidade de 2mm/min, com uma distância entre amarras de 40 mm e com o auxílio de um extensómetro, para determinação do módulo de elasticidade (E), no intervalo de deformação entre 0.05% e 0.25%. Determina-se assim a tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) e a deformação máxima ( $\varepsilon_{\text{máx}}$ ), onde no qual os ensaios foram realizados em condições normais de temperatura e humidade (23 °C e 50 %).

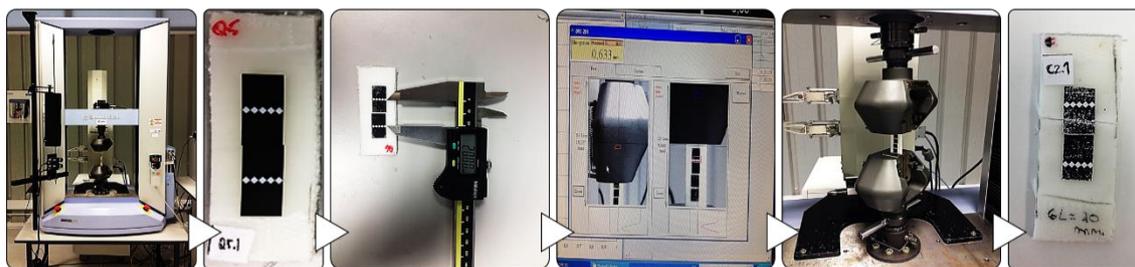


Figura 20 – Etapas do procedimento experimental do ensaio de tração

### 3.4.2 Ensaio Interlaminar *Shear Strength*

O ensaio ILSS é uma técnica bastante utilizada quando se pretende caracterizar a resistência dos compósitos reforçados com fibras à falha interlaminar, ou seja, possibilita a avaliação da resistência interfacial fibra/matriz do compósito em estudo, sendo esta uma característica fundamental na relação do seu desempenho, independentemente do tipo de fibra em uso. [32] De referir que a execução dos ensaios ILSS segue as diretrizes da norma ISO 14130 (1998).

Este ensaio interlaminar *shear strength* consiste num ensaio de flexão em 3 pontos, onde a distância entre apoios, denominada por *span*, é propositadamente reduzida de acordo com a espessura do provete em estudo, por forma a solicitar uma rutura ao corte interlaminar e conseqüentemente a rutura à flexão.

Apesar de apresentar limitações devido à presença dos efeitos de transmissão de carga junto dos suportes, é um ensaio muito empregue no controlo de qualidade uma vez que apresenta um baixo custo e é de fácil execução.

#### 3.4.2.1 Procedimento experimental

O suporte de flexão é constituído por 3 apoios circulares, como demonstra a Figura 21 - Suporte de flexão normalizado, em que o apoio superior tem um raio de 5mm ( $r_1$ ) e os apoios inferiores têm um raio de 2mm ( $r_2$ ).

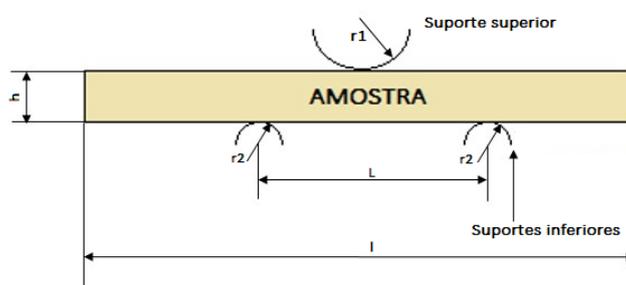


Figura 21 - Suporte de flexão normalizado

A fixação do suporte só é feita depois da medição da espessura do corpo de prova, uma vez que, pelo ponto 9.3 da norma, a distância entre os suportes inferior, designado por *span*, é 5 vezes superior à espessura



(5h). O restante procedimento é demonstrado na Figura 22 – Etapas do procedimento experimental do ensaio ILSS.

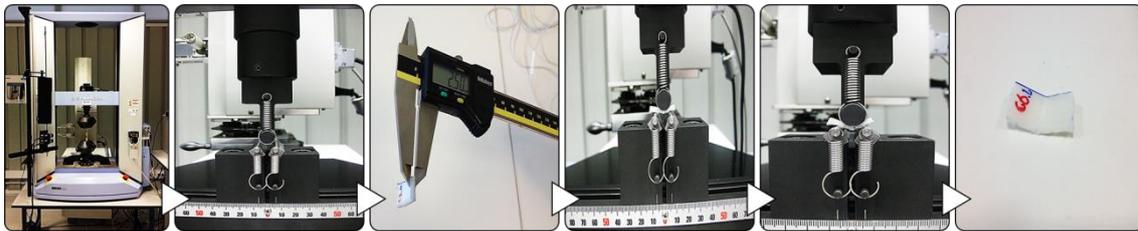


Figura 22 – Etapas do procedimento experimental do ensaio ILSS

Esta caracterização, através do ensaio ILSS, paralelamente comparada à caracterização no ensaio de tração, também foi realizada à temperatura ambiente de 23°C mas com a velocidade de 1mm/min. As dimensões dos provetes foram de acordo o mencionado na norma, estando indicadas na tabela seguinte.

Tabela 13 – Dimensões dos provetes segundo a norma ISO14130:1997

	Espessura, h	Cumprimento, l	Largura, b	
Normalizados	$2 \pm 0,2$	$20 \pm 1$	$10 \pm 0,2$	mm
Não normalizados	H	10h	5h	

### 3.4.3 Equipamentos em ensaios mecânicos

Para a realização dos ensaios mecânicos, tração e ILSS, a máquina de teste utilizada foi a máquina universal Shimadzu Autograph, série AG-X, Figura 23, que apresenta uma velocidade de deslocamento máximo de 500mm/min e uma célula de carga de capacidade máxima de 50kN. A este equipamento está sincronizado o computador e o vídeo extensómetro, que através do *software* Trapézio permite a monitorização, controlo e visualização de todo o processo.





Figura 23 – Máquina Shimadzu AG-X 50kN

#### *Ensaio de tração*

Para além da utilização da máquina de teste Shimadzu, esta caracterização recorreu à utilização de agarras mecânicas manuais, para a fixação dos proves de prova, e vídeo extensómetro DVE.

O rigor a que o ensaio vai depender, logicamente, da precisão do equipamento. Contudo, o erro humano também está associado a esta exatidão, sendo exemplo a má colocação do provete nas amarras, que poderá levar a falsas leituras para o mesmo tipo de carga aplicada.

#### *Ensaio interlaminar Shear Strength*

Tal como no ensaio de tração, este ensaio procedeu-se com o uso da máquina Shimadzu. Contudo os acessórios empregues foi o suporte de flexão em três pontos, Figura 24.



Figura 24 – Suporte de flexão

### 3.4.4 Caracterização da Microestrutura

A caracterização de microestrutura é um ensaio com a finalidade de analisar qualitativamente a microestrutura do material, impossível de examinar a olho nu. Para desempenho das suas funções, a execução deste ensaio exige a utilização de um microscópio capaz de ampliar numa gama de 100 a 1000 vezes superior do tamanho original através da passagem por um feixe de luz. Assim, o equipamento é constituído por um conjunto de lentes, uma ocular e outra objetiva, que são suportadas por um canhão, ou tubo, e pelo revólver, respetivamente. A platina é o local onde a amostra em estudo é colocada, sendo a imagem focada através da presença dos parafusos macro e micrométricos. O sistema de iluminação é constituído pelo condensador, diafragma e a respetiva fonte luminosa, em que todo o equipamento é suportado pela base ou pé. Estes elementos constituintes são fundamentais para a visualização das amostras encontram-se ilustrados na Figura 25.



Figura 25 – Microscópio ótico

#### 3.4.4.1 Processo e equipamento

Os ensaios da caracterização de microestrutura foram efetuados através de um microscópio de reflexão DIC, com as objetivas de 5x1.67 e 10x1.67 de ampliação, e ainda com o auxílio de uma câmara digital *Leica DFC 280*, que possibilitou retirar imagens do que estava a ser observado. A câmara digital *Leica* apresenta uma resolução máxima de 2.9Mpixel, 1920x1536, que através de um *software LAS V4.0* é possível ver e tratar as imagens *online* no computador. Todo o conjunto de equipamentos pode ser visualizado na Figura 26.



Figura 26 – Microscópio e a camara digital Leica

No entanto, para ser possível observar ao microscópio, foi necessário proceder ao polimento dos provetes de modo a obter uma superfície limpa. Para tal, foi usada uma máquina de polimento *Struers DAP-7*, Figura 27, com duas velocidades (125 e 250rpm) e com 4 tipos de lixas (500, 1000, 2400 e 4000). Ainda antes



da sua análise, foi necessário proceder a verificação da superfície para confirmar se esta estaria apta para ser analisada em microscópio. Esta confirmação foi realizada através de uma lupa *Olympus SZ4045TR*.



Figura 27 – Máquina de polimento Struers DAP-7 e lupa Olympus SZ4045TR

#### 3.4.4.2 Procedimento experimental

Para a realização do ensaio de caracterização de microestrutura recorreu-se a três etapas, polimento, verificação da superfície a observar e análise ao microscópio.

A superfície do provete a ser polida foi a transversal às fibras, de modo a ter uma melhor perceção da impregnação do reforço na sua orientação. Esta foi sujeita a 4 tipos de lixas. Inicialmente foi submetido a uma lixa mais grossa (400) até a uma lixa mais fina (4000), com a finalidade de obter uma área limpa e plana. Durante o polimento utilizou-se água de modo a evitar deformação da superfície devido ao aquecimento e amolecimento do polímero.

Depois do polimento, verificou-se na lupa a qualidade de cada superfície. A qualidade da superfície é crucial para uma observação nítida num único foco total da mesma, dado que isto é somente possível caso o provete apresente uma área de visualização limpa, ou seja, sem a presença de riscos, e uma superfície plana. Na hipótese de inexistência de um plano uniforme e/ou com riscos é necessário voltar à fase de polimento.

Por fim, quando o provete se encontra uniformizado, relativamente à área em questão, passa-se para o microscópio de reflexão. Nesta etapa, o provete foi analisado através de duas objetivas (5 e 10x1.67) do microscópio com o auxílio da câmara digital *Leica*. Desta forma, realiza-se a focagem e seleção de uma parte da superfície, de modo a retirar uma fotografia representativa da área em análise. Todas estas etapas da realização da caracterização de microestrutura encontram-se representadas sequencialmente na

Figura 28.

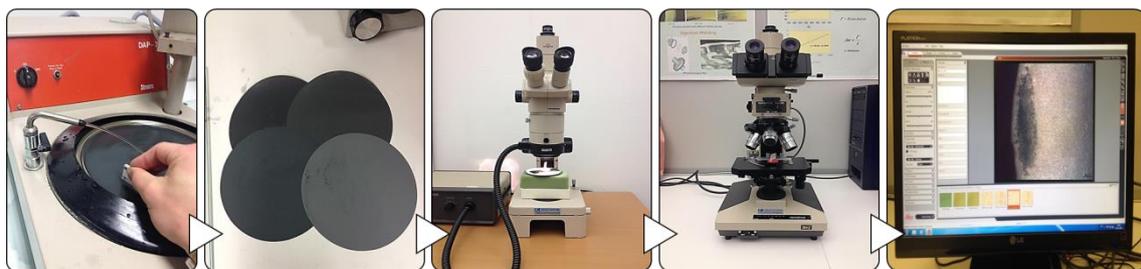


Figura 28 – Ciclo experimental da caracterização de microestrutura



### 4. Apresentação e Discussão de Resultados

*“A viabilidade que se pretende estudar é a criação de compósitos baseados na impregnação de fibras contínuas secas através utilização de termoplásticos, através da moldação por compressão a quente e da moldação por injeção.”*





#### *4.1 Moldação por compressão a quente*

No processo de moldação por compressão a quente, tal como foi dito, as experiências realizadas foram divididas em dois grupos de acordo com a quantidade (camadas) de fibra de vidro contínua secas presente na constituição do compósito de PP. Assim, os ensaios mecânicos e caracterização microestrutural dividem-se igualmente segundo esses dois grupos de experiências.

##### 4.1.1 Caracterização de Microestrutura

Como mencionado no capítulo três, a caracterização da microestrutura possibilitou obter imagens da zona transversal às das fibras de vidro contínuas de modo a verificar a existência de impregnação das mesmas com o termoplástico PP. Como tal, foram utilizadas duas objetivas de ampliação (5x1.67 e 10x1.67) que em simultâneo com a camara digital Leica possibilitaram a visualização das amostras. Em uma primeira análise serão estudadas as amostras com a objetiva 5x1.67, sendo esta complementada, posteriormente, com a objetiva 10x1.67.

Este ensaio serviu para verificarmos a possível impregnação do PP nas fibras de vidro contínuas. Recorde-se que, neste estudo realizado através da caracterização de microestrutura, apenas se analisa a impregnação e não as propriedades intrínsecas ao material formado.



## - Polipropileno com uma camadas de fibra de vidro contínua

Iniciou-se a análise com as amostras de uma camada de fibra de vidro, Figura 29.

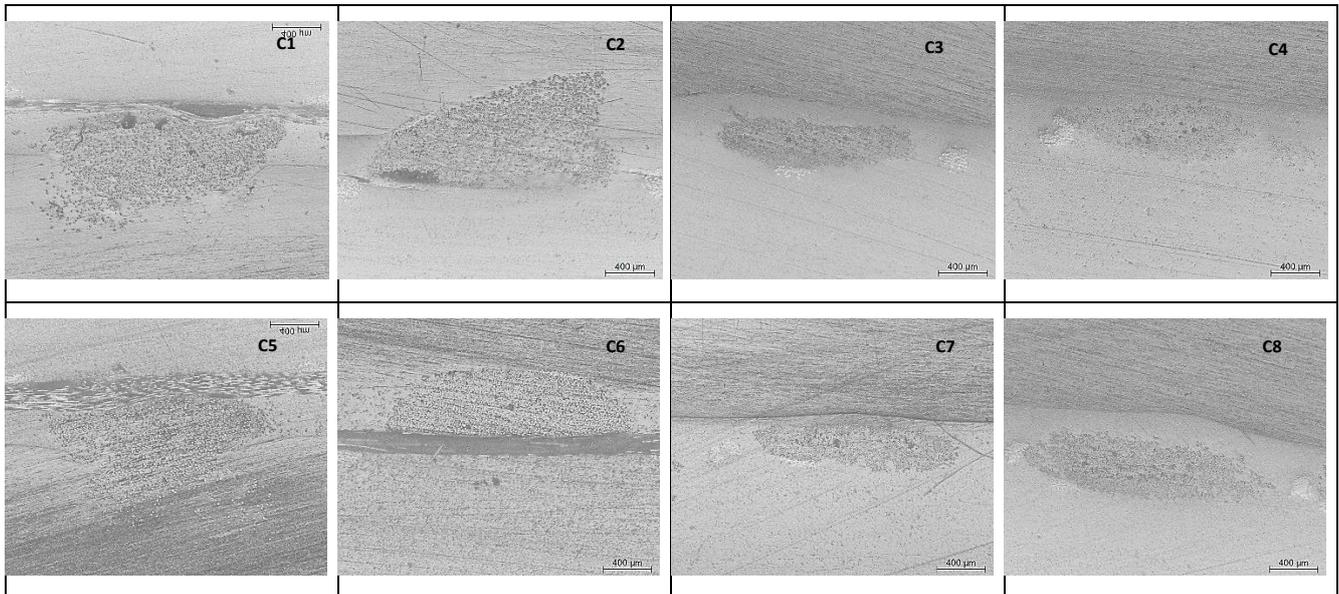


Figura 29 – Imagem de amostras de uma camada de fibra com ampliação 5x1,67

Através da Figura 29 é possível verificar a existência de impregnação da fibra no PP, dado ser notória, em todas as fotografias presentes, uma quantidade considerável de polímero no interior do *roving*. Contudo, a quantidade de material entre fibras e a posição da fibra na amostra variou ao longo das condições a que foram sujeitas.

Por comparação entre as amostras C1 a C4, pode-se observar, que a fibra se situa mais dentro da amostra. A partir da amostra C3 a fibra encontrando-se totalmente no seu interior mas há uma ligeira recessão na amostra C4. O mesmo acontece na comparação C5-8, podendo ser devido à diferença da temperatura do molde entre as condições.

De modo a obter uma visualização mais pormenorizada das amostras com uma fibra, recorreu-se à objetiva de 10x1,67 onde os resultados alcançados são demonstrados na Figura 30.

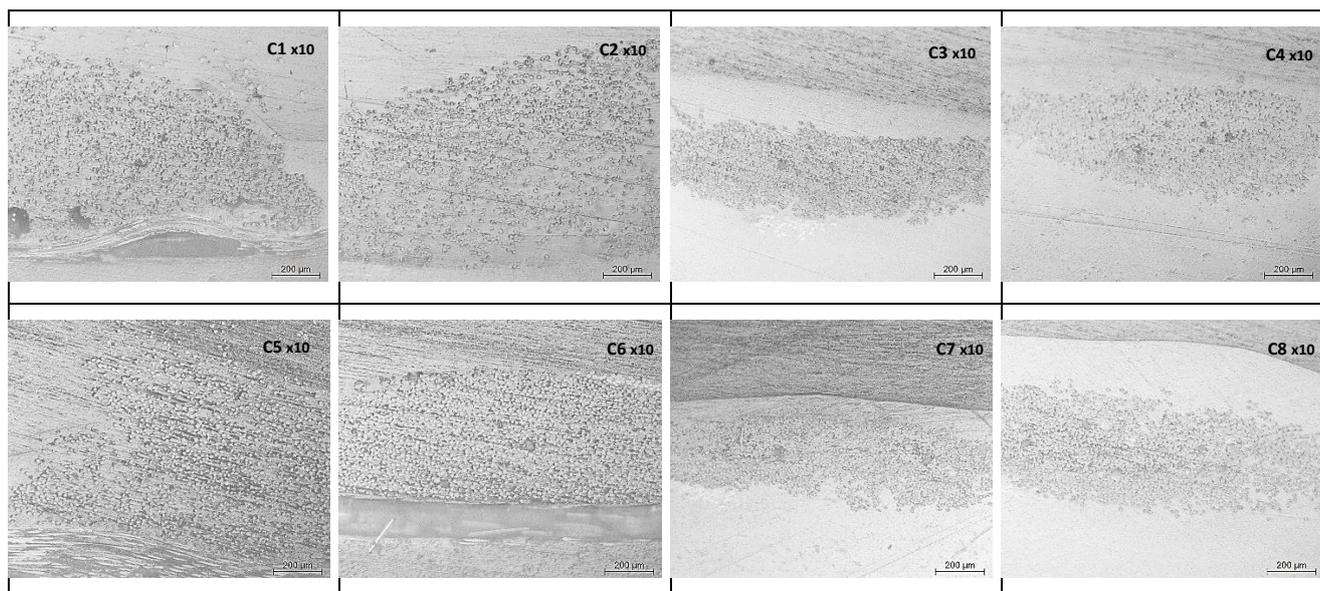


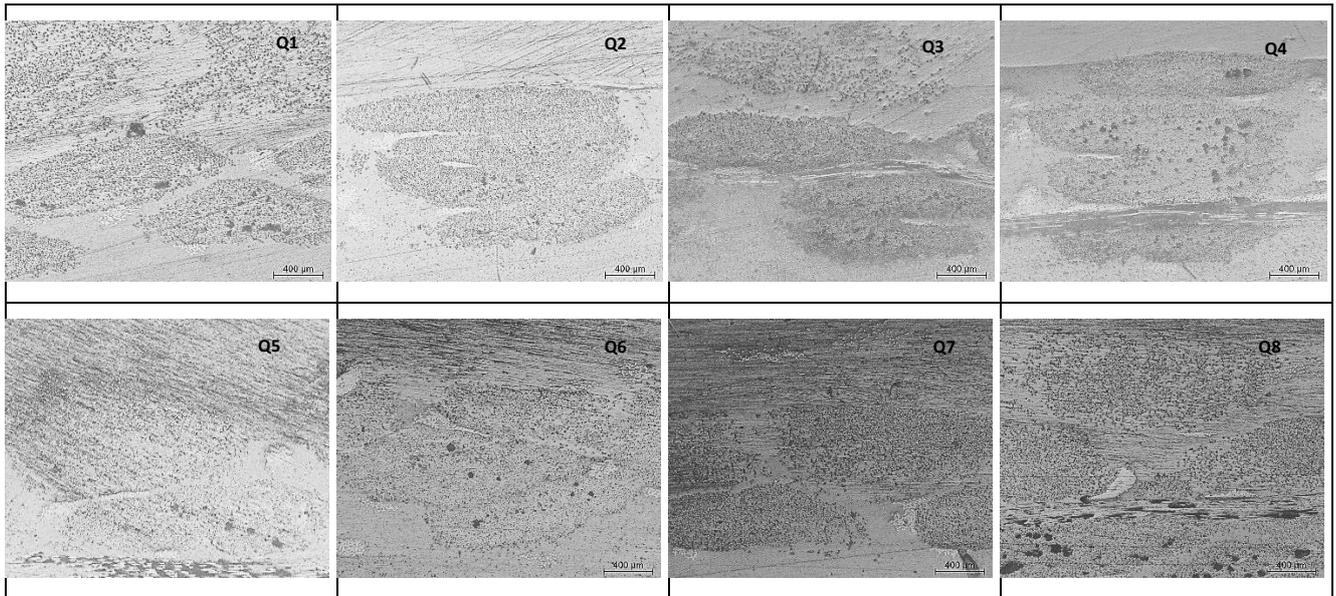
Figura 30 – Imagem de amostras de 1 fibra com ampliação 10x1,67

Tendo agora em conta a Figura 30, com a ampliação de 10x1,67, é de salientar que nas amostras C5-C8 as fibras dentro do roving se encontram mais espaçadas do que nas amostras C1-C4. Isto acontece porque existe mais material no interior do roving, o que poderá estar relacionado com uma menor viscosidade do material, devido à temperatura do fundido ser mais elevada nestas condições.

No entanto, e de acordo com o que é visível a partir da Figura 29 e Figura 30, as condições que melhor impregnação apresenta, aparentemente, são C3, C4, C7 e C8.

**- Polipropileno com quatro camadas de fibras de vidro contínuas**

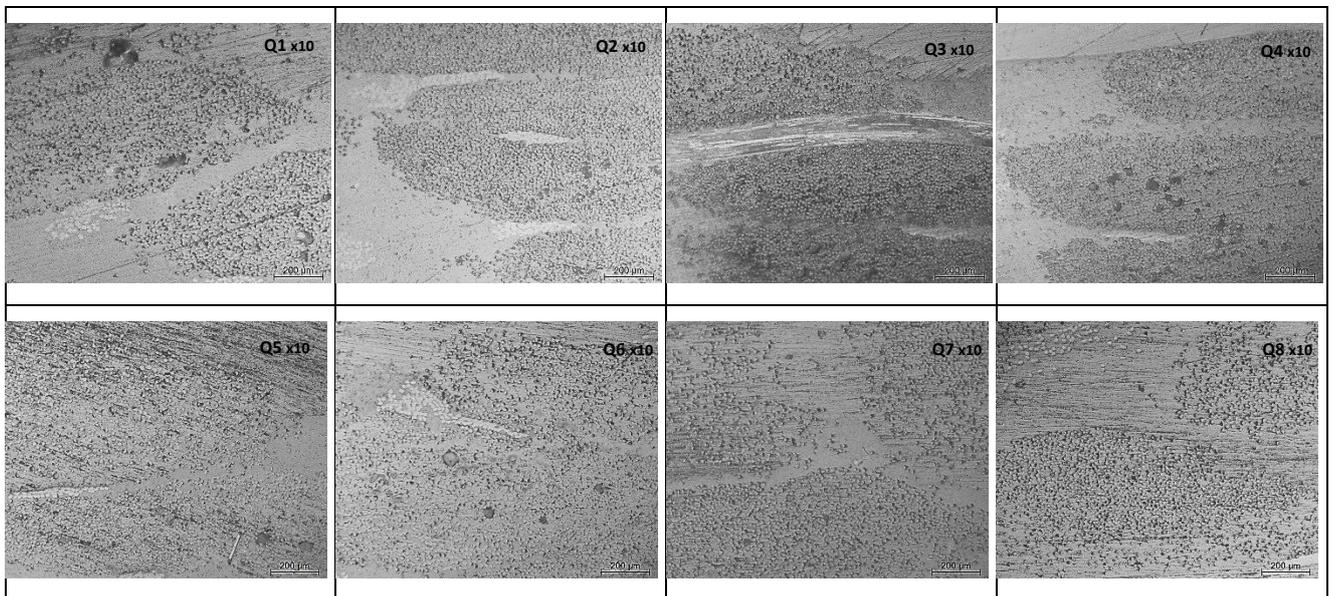
Relativamente à caracterização microestrutural para as amostras constituintes de quatro fibras, apresentada na Figura 31 e executada pela ampliação 5x1,67.



**Figura 31 – Imagem de amostras de quatro camadas de fibra com ampliação 5x1,67**

Através das amostras Q1-Q4, é possível observar que estas apresentam maior número de camadas de fibras no interior do provete do que as amostras Q5-Q8. Esta observação pode estar relacionada com a presença de maior fluidez do polímeros devido à maior temperatura de fundido.

Tal como nas amostras com uma fibra, utilizou-se a objetiva de 10x1,67, Figura 32.



**Figura 32 - Imagem de amostras de 4 fibras com ampliação 10x1,67**

Já na Figura 32 é visível que as amostras Q5-8 exibem um nível de abertura do roving superior que as amostras Q1-4, onde a visualização de uma camada de fibra de vidro torna-se quase impossível. Este acontecimento é compreendido pela fluidez do fundido ser maior, devido à utilização de temperaturas mais altas. Assim, permite que ocorra uma maior penetração entre os filamentos do roving da fibra e consequentemente apresente uma maior abertura.



Pelo que é visível a partir da Figura 31 e Figura 32 e pela análise que foi realizada, as condições que melhor impregnação apresenta, aparentemente, são Q4, Q6 e Q8.

#### 4.1.2 Ensaio de tração

Num gráfico de Tensão vs. Deformação é possível analisar a deformação elástica e plástica de um determinado material, o ponto de viragem entre as duas deformações no material, bem como o ponto de rutura do material devido à tensão exercida.

Através dos comportamentos nos ensaios de tração, é possível verificar as duas componentes responsáveis por esses comportamentos, módulo de elasticidade e tensão máxima ao qual o provete resiste, completando assim o estudo das propriedades de possível análise num ensaio de tração.

##### - Polipropileno com uma camada de fibra de vidro contínua

Tendo como ponto de partida a análise dos compósitos com uma fibra, é apresentado na Figura 33 os resultados obtidos no ensaio de tração.

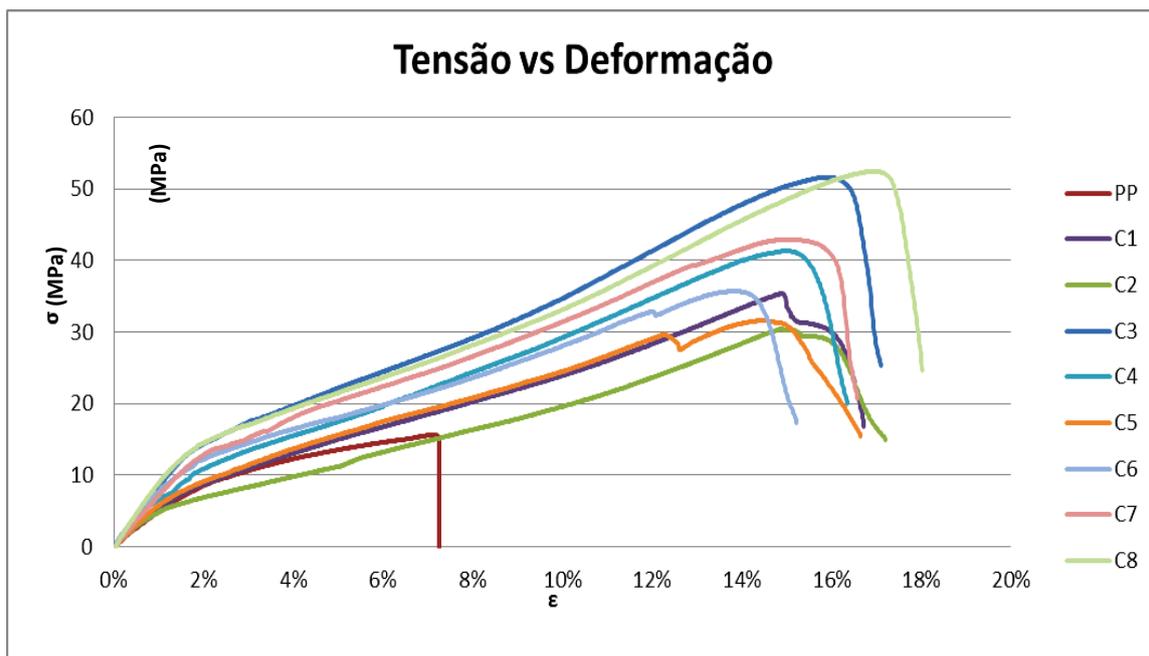


Figura 33 – Resultados dos ensaios de tração dos compósitos de PP com 1 camada de fibra

Antes de efetuar a análise dos resultados, é de realçar que, para todas as condições apresentadas na Figura 33 os provetes dos compósitos apresentam valores de tensão superiores às do PP. Uma vez que o polipropileno foi o termoplástico utilizado, o facto de apresentar propriedades inferiores é um excelente indicador, visto que demonstra que está a ocorrer compatibilização da matriz/reforço e possível impregnação.

Por observação do gráfico, é possível verificar ainda que as condições que apresentam resultados superiores são a condição C3 e C8, uma vez que apresentam tensões máximas.



As propriedades avaliadas neste ensaio foram o módulo de elasticidade (E) e a tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ). Através dos resultados obtidos no ensaio de tração, procedeu-se ao cálculo das propriedades mencionadas através das equações presentes no Capítulo 3, sendo apresentadas de seguida.

Para o caso das amostras C, é apresentado na Figura 34., as contribuições geradas pela influência de cada variável, bem como, a influência que as inter-relações destas variáveis podem ter nas propriedades mecânicas dos compósitos com uma camada de fibra de vidro.

	Term	Stdized Effects	Sum of Squares	% Contribution
	Intercept			
M	A-Tf	21.75	946.13	0.072
M	B-Tm	296.25	1.755E+005	13.37
M	C-t	9.25	171.13	0.013
M	AB	-568.25	6.458E+005	49.20
M	AC	167.75	56280.13	4.29
M	BC	-219.75	96580.12	7.36
M	ABC	410.75	3.374E+005	25.70

Figura 34 – Contribuição das variáveis operatórias para E nas amostras com 1 camada de fibra

Assim, na Figura 34, A corresponde à temperatura do fundido (Tf), B à temperatura do molde (Tm) e C ao tempo de aplicação de pressão (t) no processo de compressão a quente. Relativamente à “% Contribution” corresponde a percentagem de contribuição de cada variável ou conjunto destas no módulo e “Stdized Effects” corresponde ao máximo ou mínimo das variáveis que mais influencia o comportamento elástico.

Desta forma, e tendo como ponto de partida a avaliação individual das variáveis operatórias, é de realçar que a variável com maior destaque é a temperatura do molde, com aproximadamente 13,4%. Uma vez que o índice de efeito apresenta um valor positivo (+296,25) indica que a sua contribuição é influenciada pelo nível máximo empregue na condição, ou seja, pela maximização da temperatura. Já as restantes condições, temperatura de fundido e tempo de aplicação de pressão, são caracterizadas por uma contribuição quase nula, demonstrando pouca influência no valor do módulo de elasticidade.

As restantes variáveis individuais, temperatura de fundido e tempo de aplicação de pressão, não apresentam contribuições significativas de análise, uma vez que apresentam valores de contribuição reduzidos. Logo, não serão alvo de estudo pormenorizado.

Tendo agora em conta a contribuição de duas variáveis conjugadas, o destaque recai sobre a temperatura do fundido com a temperatura do molde (AB), com valores a rondar os 50% (49,2%). Esta contribuição está relacionada com o uso das variáveis de forma distinta, isto é, quando a temperatura de fundido é máxima a temperatura do molde é mínima e vice-versa. Esta conclusão é obtida, novamente, pelo sinal do índice de efeito (-568,25), que neste caso, é influenciado pela combinação da soma dos níveis de cada condição. Para o caso da soma de ambos os níveis máximos ou mínimos, o valor do efeito é representado por sinal +, para o caso da soma de níveis opostos (máximo com mínimo ou mínimo com máximo) o sinal é



representado por -. A segunda melhor contribuição, da combinação das duas variáveis, é influenciada pela temperatura do molde com o tempo de aplicação de pressão (BC) apresentando, no entanto, valores bastantes inferiores que rondam os 7,4% mas também afetada pela junção dos níveis das condições opostos. A relação temperatura de fundido com tempo de aplicação de pressão a tomar valores de 4,3%, que por sua vez já é atingida pela soma do mesmo tipo de nível (+ +/- -). No entanto, estas duas últimas combinações também não serão analisadas. Pois apresentam valores de contribuições baixos quando comparadas com a relação da temperatura de fundido com a temperatura do molde.

Por fim, e a representar a segunda maior contribuição da Figura 34, está a junção de todas as variáveis em estudo (ABC) com uma percentagem de 25,7. Tal como referido nas análises anteriores, esta contribuição é influenciada pelo valor obtido no efeito que está diretamente relacionado com às condições utilizadas.

De modo a cimentar os valores demonstrados na Figura 34, bem como, para uma melhor perceção dos valores obtidos, serão apresentados gráficos representativos dos valores mais significativos sendo, desde já, o caso da Figura 35.

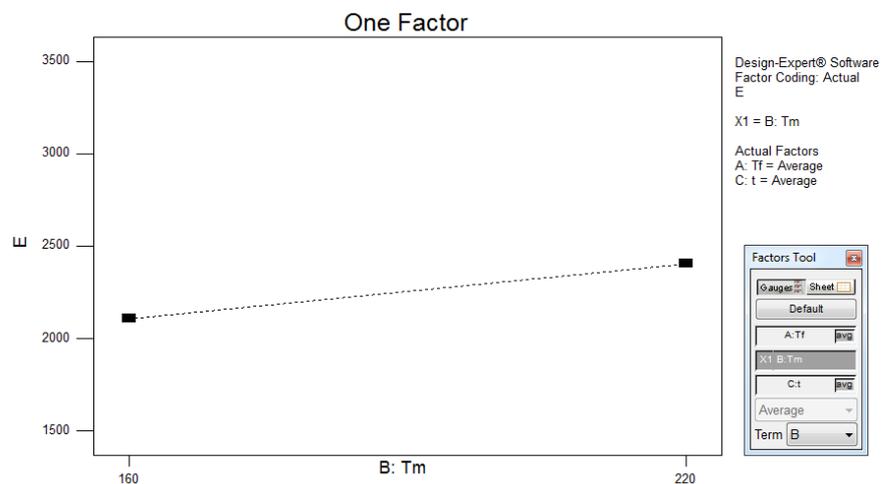


Figura 35 - Contribuição da temperatura do molde para E nas amostras com 1 camada de fibra

Nesta análise, de associação de variáveis operatórias a índices do módulo de elasticidade, foi analisado o parâmetro temperatura do molde. As 8 condições na obtenção de provetes são organizadas em dois grupos, a temperatura mínima (160°C) e a máxima (220°C) e tal como mencionado na Figura 34, o destaque recai pela maximização da temperatura do molde.

É espectável que a maximização da temperatura do molde venha a favorecer o módulo de elasticidade, uma vez que permite que o fundido se mantenha próximo da sua temperatura de injeção. Com o aumento da temperatura a viscosidade é menor e consequentemente a fluidez é maiores, favorecendo uma melhor penetração da matriz na fibra resultando numa melhor impregnação.



De seguida será apresentada a influência que a junção de variáveis tem no módulo de elasticidade. A necessidade deste estudo de conjugação de variáveis deve-se ao facto de, quando analisadas as variáveis separadamente, se acreditar que a influência que cada uma pode exercer dependerá das relações destas com outras variáveis.

Assim, através da Figura 36, é apresentado o gráfico da junção das duas variáveis com maior influência, sendo, também, o termo com maior influência no valor do módulo de elasticidade.

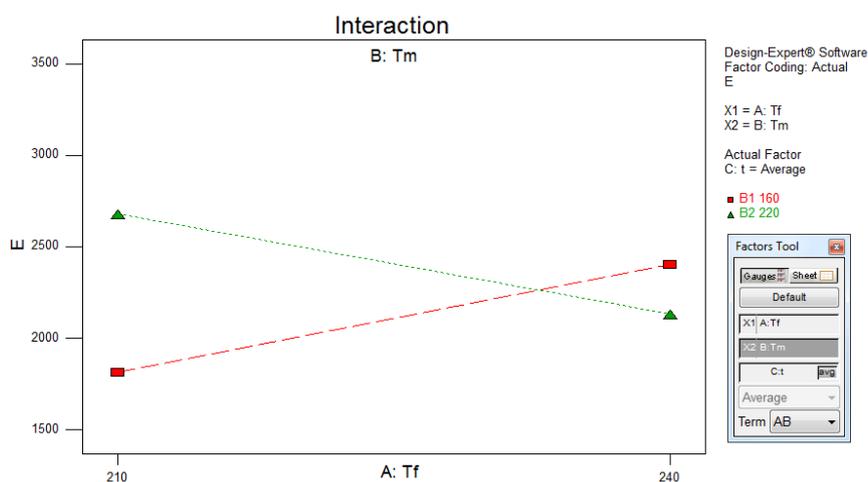


Figura 36 – Relação da temperatura do fundido com temperatura do molde para E em tempos de pressão de 180s nas amostras de 1 camada de fibra

Assim, o termo de maior impacto corresponde à combinação da temperatura de fundido com a do molde, designado pelo termo AB e presente na Figura 36. Desta junção perfazem as combinações da temperatura de fundido máxima e mínima com a temperatura do molde máxima e mínima. Como mencionado na Figura 34, o valor máximo do módulo de elasticidade resulta da combinação de níveis opostos, ou seja, da temperatura do molde máxima com a temperatura de fundido mínima.

Este resultado pode derivar da diminuição da temperatura entre o fundido e molde. Isto é, com a maximização da temperatura do molde e a minimização da temperatura do fundido, a diferença de temperaturas torna-se menor. Assim, o fundido ao ser injetado irá sofrer um choque térmico menor, permitindo que a matriz permaneça com viscosidades menores e, conseqüentemente, maior fluidez. Uma vez que o fundido apresenta maiores índices de fluidez, ocorre uma melhor penetração sobre o reforço, beneficiando a impregnação.

Relativamente à compreensão das iterações entre as variáveis operatórias, bem como, da condição que melhores propriedades apresenta, são exibidas as Figura 37 e Figura 38.

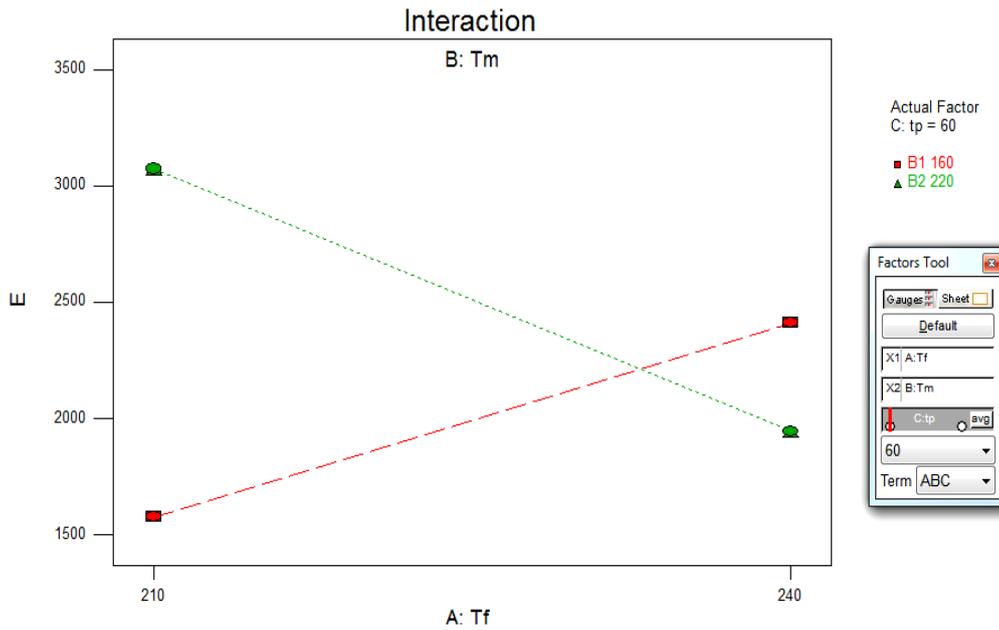


Figura 37 – Relação das 3 variáveis para E em tempos de pressão de 60s nas amostras de 1 camada de fibra

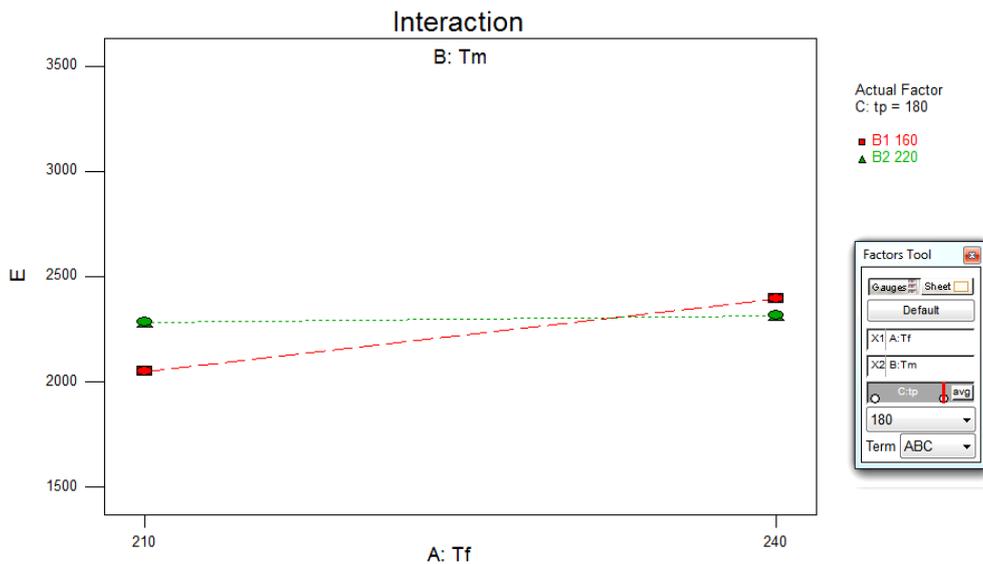


Figura 38 – Relação das 3 variáveis para E em tempos de pressão de 180s nas amostras de 1 camada de fibra

Para melhor entendimento, ambos os gráficos das figuras têm representado no eixo vertical o valor do módulo de elasticidade atingida na presença dos valores da temperatura do molde, do fundido e do tempo de aplicação de pressão no processo de moldação por compressão a quente. O eixo horizontal é referente à temperatura do fundido, enquanto a temperatura do molde é representada pelas cores das retas, ou seja, a reta verde assume uma temperatura de 220°C e a vermelha de 160°C. Já no gráfico da Figura 37, os valores da elasticidade dizem respeito a um tempo de aplicação de pressão de 60 segundos, e no gráfico da Figura 38 a um tempo de 180 segundos.



Assim, numa comparação entre as figuras, é possível comprovar o sinal do valor obtido no parâmetro do índice de efeito da Figura 34. Ou seja, o melhor módulo de elasticidade é atingido quando temperatura do molde é máxima e a temperatura de fundido e tempo de aplicação de pressão são mínimos.

Acredita-se que este conjunto de parâmetros operatórios, representado pela condição C3, seja a melhor devido à diminuição do gradiente de temperaturas entre o molde e o fundido. Esta combinação possibilita que o material contacte as fibras com a temperatura próxima da temperatura de fundido por tempos mais longos, promovendo a impregnação das fibras.

Para um melhor percepção dos valores obtidos no ensaio de tração na componente do módulo de elasticidade, é apresentado, na Figura 39, os valores individuais.

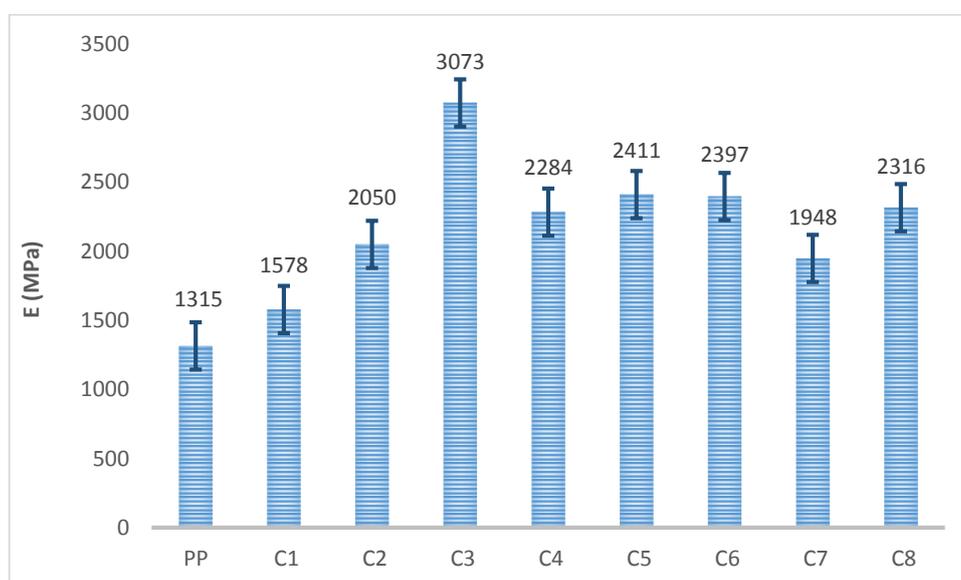


Figura 39 – Módulo de elasticidade para todas as amostras com 1 camada de fibra

Através da análise dos resultados é, uma vez mais, possível comprovar que todas as amostras apresentam valores de módulo superiores às do PP. Já a melhor condição que apresenta um módulo de elasticidade de 3073MPa, sendo superior ao dobro do valor obtido para o PP, pertencendo à condição C3.

Este resultado vem a comprovar a conclusão obtida na Figura 37, sendo ainda suportada pela análise da caracterização de microestrutura da Figura 30.

De seguida, e referente à tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ), é possível verificar na Figura 40 a influência de cada variável, bem como, das interação entre variáveis nos compósitos com uma fibra de vidro.



	Term	Stdized Effects	Sum of Squares	% Contribution
	Intercept			
M	A-Tf	-1.75	6.13	1.49
M	B-Tm	12.15	295.24	71.98
M	C-t	0.35	0.25	0.060
M	AB	1.45	4.20	1.03
M	AC	5.85	68.45	16.69
M	BC	1.25	3.13	0.76
M	ABC	4.05	32.80	8.00

Figura 40 - Contribuição das variáveis operatórias para  $\sigma_{max}$  nas amostras com 1 camada de fibra

Na Figura 40, é possível ver que a maior influência na tensão advém, novamente, da temperatura do molde, assumindo uma percentagem de aproximadamente 72%. É ainda, comprovado, pelo índice de efeito padronizado, que o valor com maior impacto será a maior temperatura do molde.

No que diz respeito às restantes variáveis individuais, tempo de fundido e tempo de aplicação, ambas representam por si só valores muito residuais, na ordem dos 1,5% e 0,06%, respetivamente. A existência de valores contributivos residuais ainda está presente na relação da temperatura do fundido com temperatura do molde e da temperatura do molde com tempo de aplicação de pressão, com valores de 1,03% e 0,76%. Desta forma, não serão alvo de análise.

Em contrapartida, a combinação de variáveis com maior efeito inclui a temperatura de fundido com o tempo de aplicação de pressão, sendo correspondente a um valor de quase 17%. Através do índice de efeito padronizado, é possível comprovar que o valor da tensão máxima é favorecido pela maximização ou minimização de ambas as variáveis, imposta pelo sinal positivo deste indicador (+5,85).

Para terminar, é ainda necessário destacar a ordem de contribuição da relação das três variáveis em simultâneo. É a terceira contribuição mais significativa da Figura 40, com uma contribuição de 8%.

Sendo a temperatura do molde a variável com maior contribuição na tensão máxima, é apresentada a Figura 41 para uma melhor visualização.

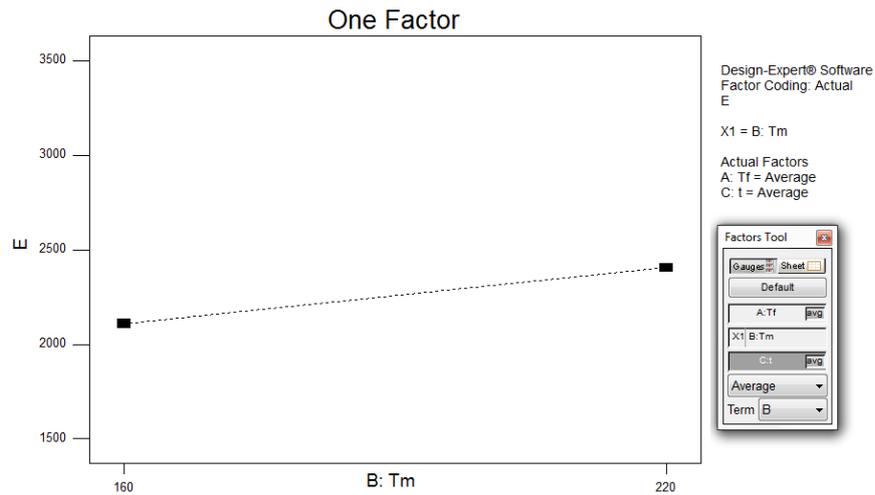


Figura 41 - Contribuição da temperatura do molde para  $\sigma_{\max}$  nas amostras com 1 camada de fibra

Como descrito na Figura 40, a maximização da temperatura do molde vem a favorecer os valores da tensão máxima. Com o aumento da temperatura do molde há uma proximidade à temperatura de fundido garantido que o material apresente menores viscosidades e fluidez maiores por tempos mais longos, beneficiando a impregnação.

De seguida analise-se a junção de variáveis com a maior contribuição, sendo, para o caso da tensão máxima, a temperatura de fundido com o tempo de aplicação de pressão, Figura 42.

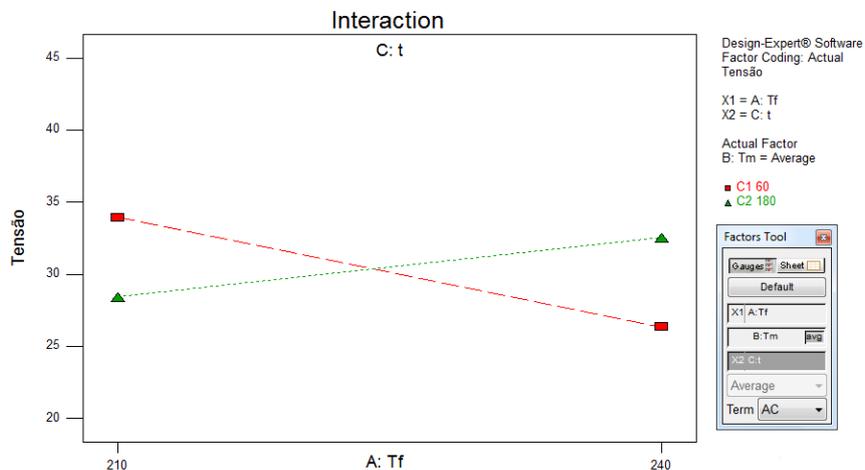


Figura 42 - Relação da temperatura do fundido com tempo de aplicação de pressão para  $\sigma_{\max}$  em tempos de pressão de 180s nas amostras de 1 camada de fibra

Numa primeira instância, é possível verificar que a tensão máxima é atingida quando as variáveis conjugadas são minimizadas. Esta conclusão é assinalada pelo primeiro ponto da reta vermelha.

Agora nas Figura 43 e Figura 44, é possível ter uma melhor compreensão da relação de todos os parâmetros operatórios na tensão máxima que o material suporta.

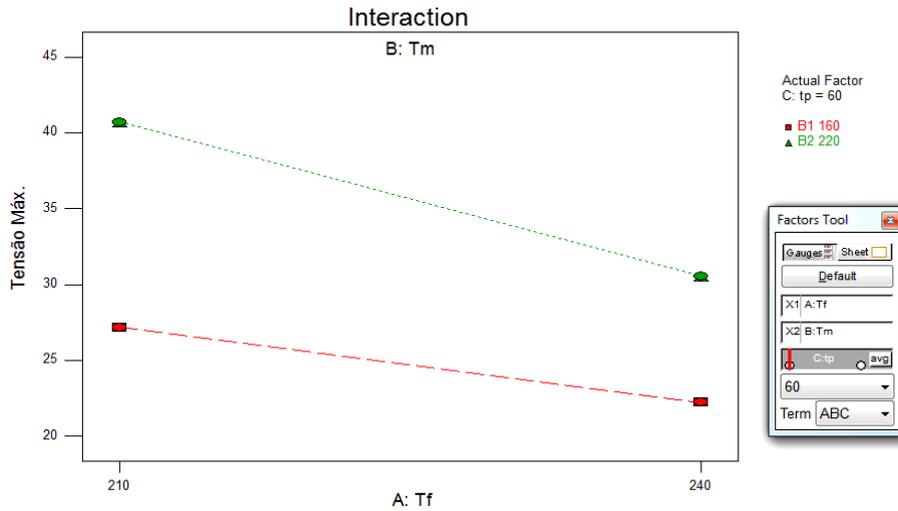


Figura 43 – Relação das 3 variáveis para  $\sigma$  em tempos de pressão de 60s nas amostras de 1 camada de fibra

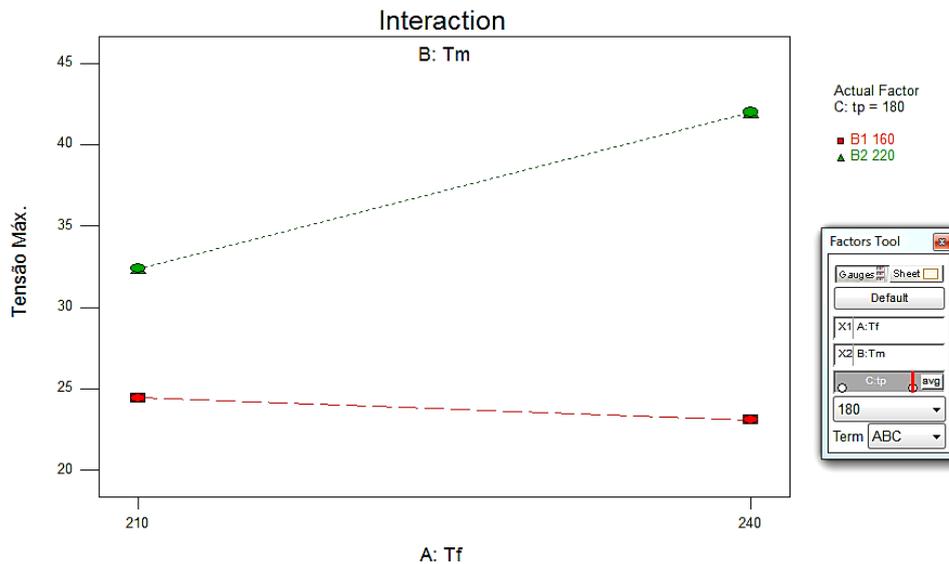


Figura 44 – Relação das 3 variáveis para  $\sigma_{max}$  em tempos de pressão de 180s nas amostras de 1 camada de fibra

Pelo observado em ambas as figuras, é de salientar que a maximização da temperatura do molde vem a favorecer as propriedades da tensão, independentemente do tempo de aplicação da pressão e temperatura do fundido.

Na Figura 43, onde tempo de aplicação de pressão mínimo, o valor máximo de tensão é atingido quando a temperatura de fundido é minimizada. Já na Figura 44, com o tempo de pressão é máximo, a tensão máxima é atingida pela maximização da temperatura de fundido.

Desta forma, é possível afirmar que o tempo de aplicação de pressão, para temperatura do molde máxima, varia diretamente com a temperatura do fundido. No entanto, o valor máximo da tensão foi obtido na Figura 44 com a maximização de todas as variáveis, confirmando o pelo especuladona Figura 40.



A presença da maximização de todas as variáveis irá facilitar a impregnação e, conseqüentemente, obter melhores resultados. A temperatura do fundido máxima permite que a viscosidade do polímero diminua e, desta forma, o material seja mais fluido facilitando a penetração na fibra. Com a temperatura do molde máxima, possibilita que a diferença de temperaturas (molde/fundido) seja menor, reduzindo o choque térmico e que a temperatura do fundido permaneça mais próxima da sua temperatura inicial. Por fim, o tempo de aplicação de pressão máxima, proporciona que polímero seja forçado a penetrar a fibra por intervalos de tempo maiores, favorecendo, assim, a impregnação.

De seguida e referente aos valores individuais da tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ) para cada condição, é possível verificar na Figura 45 o comportamento médio dos provetes.

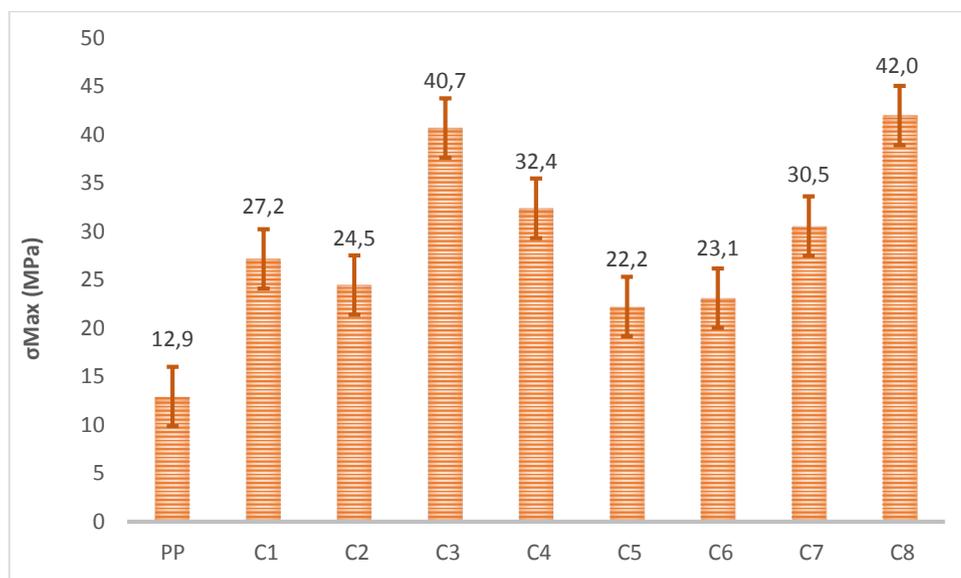


Figura 45 – Tensão máxima para todas as amostras com 1 camada de fibra

É possível concluir, novamente, que o PP possui características estudadas inferiores quando comparado com os compósitos com uma fibra.

As condições com maior importância são C3 e C8, com uma tensão de 40,7Mpa e 42Mpa, respetivamente, destacando-se, pela melhor, a condição C8. Nesta condição está presente a maximização de todos os parâmetros operatórios, vindo a comprovar os resultados obtidos na Figura 40 e na Figura 44. Estas mesmas condições são também evidenciadas na Figura 29 e 30, correspondentes à caracterização de microestrutura, podendo, assim, ser o motivo de destaque para estes valores.



### - Polipropileno com quatro camadas de fibras de vidro contínuas

Após completa a análise dos compósitos FV/PP com uma fibra, são agora analisadas as amostras com a presença de 4 camadas de fibras na sua constituição, designado de grupo Q. Desta forma, é apresentado os resultados do ensaio de tração, Figura 46 – Resultados da tração dos compósitos de PP com 4 camada de fibra.

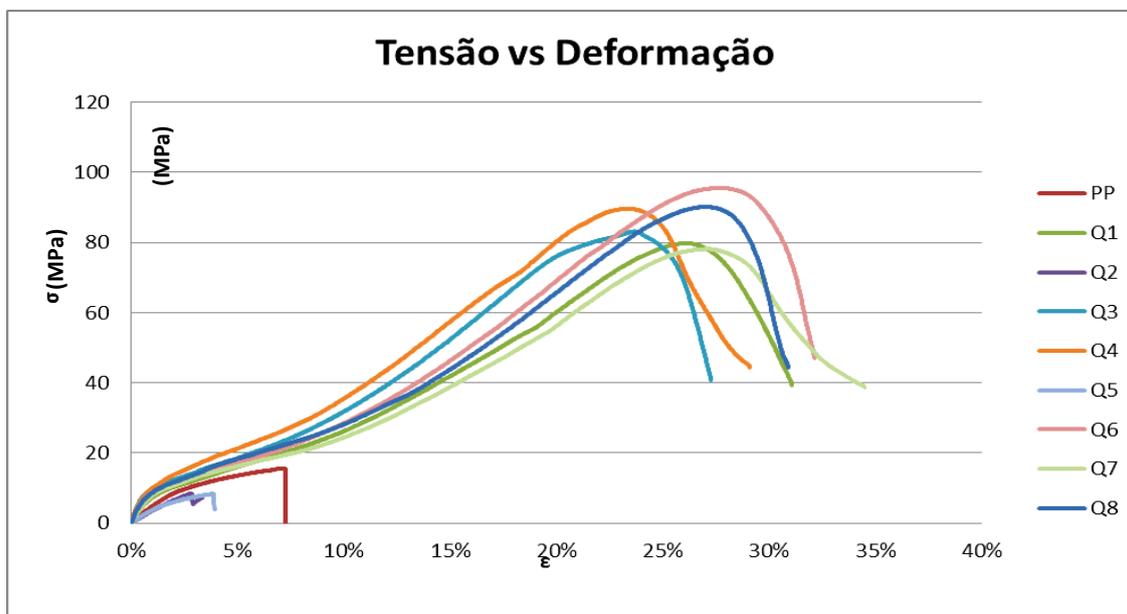


Figura 46 – Resultados da tração dos compósitos de PP com 4 camada de fibra

Relativamente à Figura 46, nem todas as amostras apresentam propriedades superiores às obtidas no PP, onde no qual se destaca negativamente a condição Q2 e Q5. A relação entre estas duas amostras encontra-se apenas na temperatura do molde, apresentando temperaturas de fundido e tempos de aplicação de pressão diferentes.

Os comportamentos das duas condições abrem a hipótese de quando combinada a temperatura do molde máxima com os valores de temperatura do fundido e tempo de aplicação de pressão opostos as propriedades são piores. Ou seja, a combinação da temperatura de fundido máxima com o tempo de pressão mínimo ou a temperatura de fundido mínima com o tempo de pressão máximo. Tendo em conta os ensaios da caracterização de microestrutura, o comportamento da condição Q5 pode ser justificado. Esta não apresentou um bom envolvimento do polímero em relação à fibra, presumindo, consequentemente, uma má impregnação.

As restantes amostras apresentam propriedades substancialmente superiores, com principal destaque para as condições Q4, Q8 e principalmente para Q6. Para todas as amostras, a variável operatória tempo de aplicação de pressão é máxima.



O comportamento elástico, nos valores de tensão compreendidos entre os 0 e 10MPa, é representado pela sobreposição das retas à exceção da condição Q2 e Q5. Estas apresentam um comportamento muito mais próximo da amostra PP. Relativamente ao comportamento plástico, é visível que as condições com maior destaque são Q3 e Q4, dada à maior proporcionalidade entre a tensão e deformação.

No que concerne à influência de cada variável, bem como, da influência da combinação das variáveis podem ter no módulo de elasticidade dos compósitos com quatro fibra de vidro é representada a Figura 47.

	Term	Stdized Effects	Sum of Squares	% Contribution
	Intercept			
M	A-Tf	-722.00	1.043E+006	1.69
M	B-Tm	4170.50	3.479E+007	56.48
M	C-t	1730.50	5.989E+006	9.72
M	AB	-1222.00	2.987E+006	4.85
M	AC	1760.00	6.195E+006	10.06
M	BC	1304.50	3.403E+006	5.53
M	ABC	-1896.00	7.190E+006	11.67

Figura 47 - Contribuição das variáveis operatórias para E nas amostras com 4 fibras

Como é possível observar, a propriedade com maior influência é a temperatura do molde apresentando uma contribuição de sensivelmente 56,5%. A sua contribuição é favorecida pela maximização da temperatura do molde, dada a presença do valor positivo do índice de efeito padronizado (4170,5). Já o tempo de aplicação de pressão, como a temperatura de fundido, apresentam valores bastantes inferiores, correspondendo a 9,7% e 1,7% respetivamente. Contudo, estas contribuições são afetadas de maneira diferente pelos seus índices de efeito. Para o caso da temperatura de fundido é devido à utilização da temperatura mínima (-722) e o tempo de aplicação de pressão a pelo tempo máximo (+1730,5).

A interação entre variáveis com maior impacto não inclui a temperatura do molde. Esta passa pela combinação da temperatura do fundido com o tempo de aplicação de pressão, exibindo valores na ordem dos 10%. Esta contribuição é influenciada pelas combinações das variáveis com o mesmo nível, uma vez que o seu índice de efeito apresenta valor positivo (1760).

Já a união das três variáveis é representada pela contribuição de 11,7%, o que demonstra melhor comportamento do que variáveis aos pares, sendo a segundo melhor contribuição no geral. No entanto, apresenta um valor negativo de índice de efeito padronizado, significa que as combinações, temperatura de fundido e de molde e tempo de aplicação de pressão, -1896.

De seguida, são apresentados os resultados referentes às melhores contribuições no módulo de elasticidade. Assim, inicia-se o estudo pelas variáveis individuais, Figura 48.

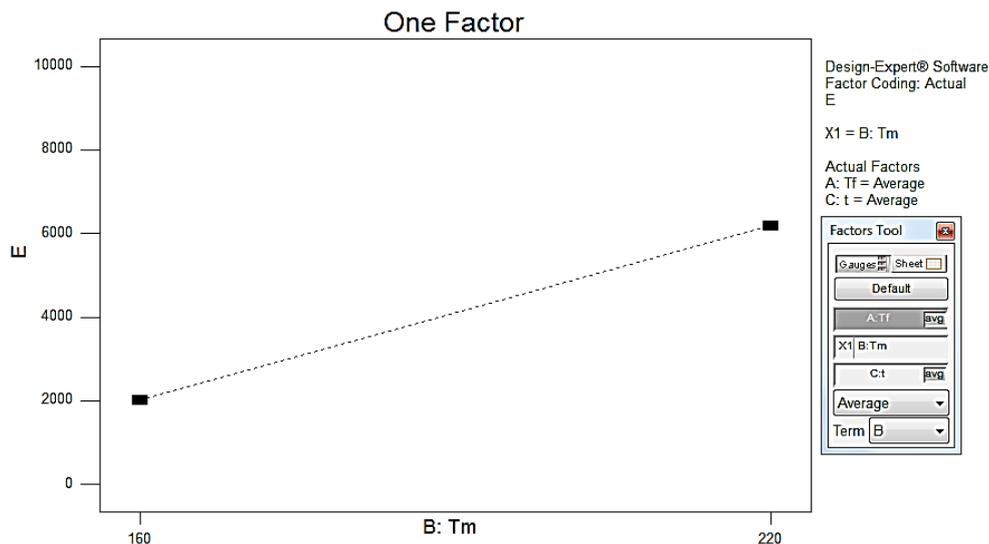


Figura 48 - Contribuição da temperatura do molde para E nas amostras com 4 fibras

Nesta análise, a variável com maior destaque é a temperatura do molde. Como é possível confirmar, o destaque torna a incidir sobre utilização da temperatura do molde máxima.

Acredita-se que este fenómeno ocorra dada à possibilidade de reduzir a diferença de temperatura entre o fundido e o molde. Assim, permite que a temperatura do fundido diminuía mais lentamente, de forma apresentar maior fluidez durante tempos mais longos. Ou seja, obtém-se maiores tempos com temperaturas mais elevadas representando-se em menores viscosidades e maior fluidez, o que facilidade a impregnação.

De seguida, e apresentando a terceira maior contribuição no módulo de elasticidade, encontra-se a junção da temperatura de fundido com o tempo de aplicação de pressão, presente na Figura 49.

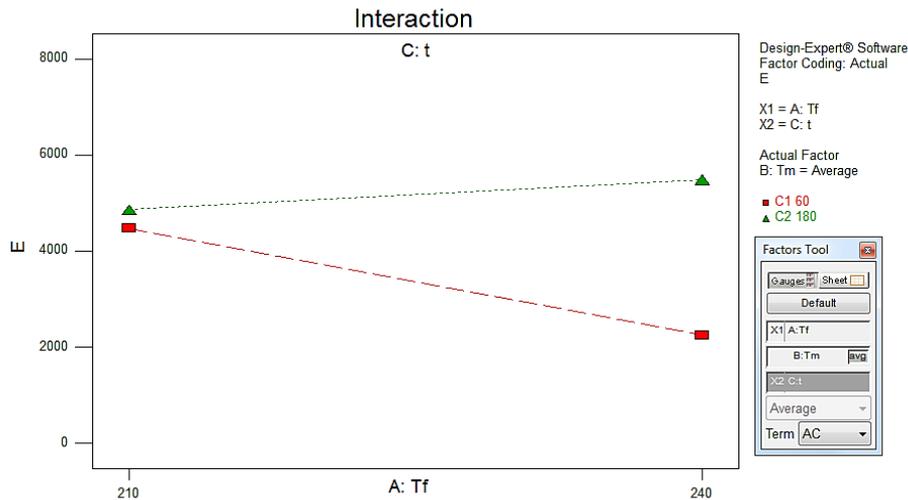


Figura 49 - Relação da temperatura do fundido com tempo de aplicação de pressão para E nas amostras de 4 fibras

Através da Figura 49 é possível concluir que o módulo de elasticidade é maximizado pela temperatura de fundido e tempo de aplicação de pressão máximo, comprovando o facto da Figura 47 mencionar a presença do mesmo nível entre as variáveis.

Este resultado é compreensível na medida que o fundido é pressionado sobre as fibras durante tempos mais longos na presença de maior fluidez. A temperatura de fundido ao ser maximizada origina menor viscosidade da matriz e conseqüentemente maior fluidez. Ao apresentar maior fluidez, a possibilidade de ocorrer uma melhor impregnação é maior, vindo a ser favorecida pelo tempo de aplicação de pressão máximo.

Ainda para o estudo do módulo de elasticidade das amostras com 4 fibras, é demonstrado a relações de todas as variáveis, mencionado na Figura 50 e Figura 51, sendo responsável pela segunda maior contribuição.

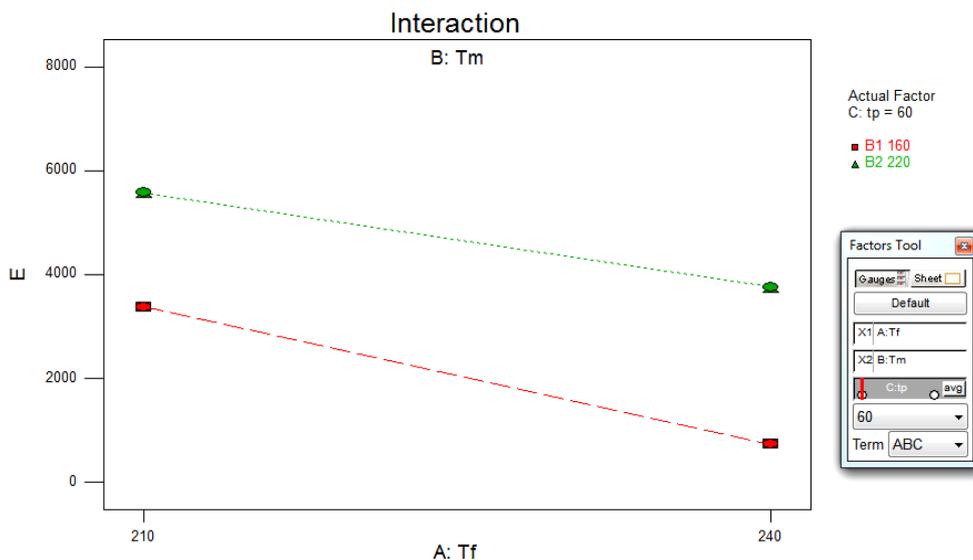


Figura 50 – Relação das 3 variáveis para E em tempos de pressão de 60s nas amostras de 4fibras

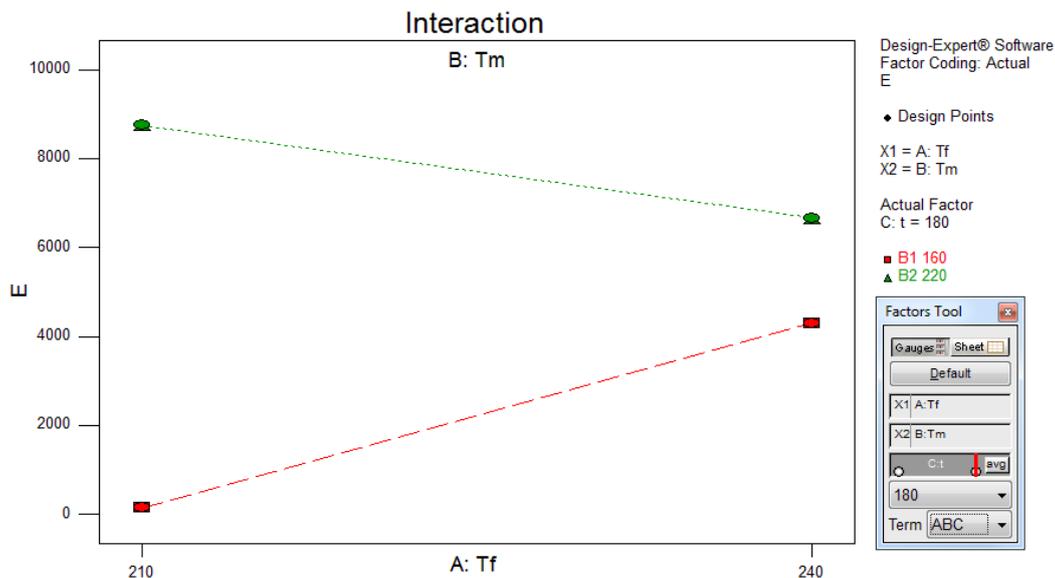


Figura 51 – Relação das 3 variáveis para E em tempos de pressão de 180s nas amostras de 4fibras

Pela Figura 50 é pode-se concluir que, o valor máximo tende para a maior temperatura do molde. No entanto, dado o quase paralelismo entre as retas, a interação entre os fatores é quase nula.

Relativamente à Figura 51, em comparação com a Figura 50, é verificável que a melhor condição de processamento encontrando-se no maior do tempo de aplicação de pressão e temperatura do molde e na temperatura de fundido mínima. No entanto, a presença da temperatura do molde máxima vem a favorecer o módulo de elasticidade independentemente da temperatura de fundido, comprovando a sua contribuição presente na Figura 48.

Esta combinação possibilita que o polímero contacte as fibras com índices de fluidez elevados, dado a temperatura próxima da temperatura de fundido. A presença de tempos maiores favorece a penetração obtendo uma combinação ideal para a impregnação das fibras.

De seguida é quantificado o módulo de elasticidade para cada amostra. Assim, é demonstrado na Figura 52 os valores médios obtidos.

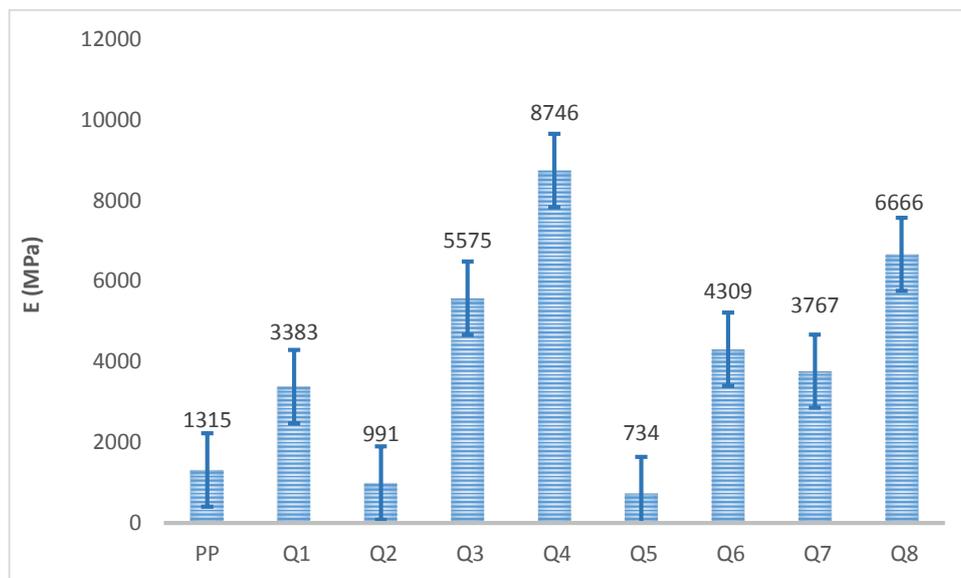


Figura 52 – Módulo de elasticidade para todas as amostras com 4 fibras

Na Figura 52, através de uma primeira leitura, verifica-se que as amostras Q2 e Q5 apresentam módulos de elasticidade inferiores ao do PP, comprovando os resultados presentes na Figura 46. Já a microscopia, Figura 31, vem justificar os baixos valores da condição Q5.

Ainda bastante visível, é o destaque da condição Q4, seguida pela Q8. Ambas as amostras, apresentam o mesmo tempo de aplicação de pressão e temperatura do molde, tal como mencionado na Figura 51.

Desta forma, é possível fazer-se uma comparação direta entre ambas as condições. Ou seja, a utilização da temperatura de fundido mínima permitiu obter melhores propriedades, com uma diferença de aproximadamente 2000MPa. Isto pode ter sido influenciado pelo tempo de arrefecimento a que as amostras tiveram sujeitas. Ou seja, com a utilização da temperatura mais elevadas, o tempo de arrefecimento é superior, logo vai originar uma maior cristalização das amostras que fragilizará as propriedades à tração. No entanto, Q8 evidencia-se como sendo a segunda melhor condição no estudo do módulo de elasticidade.

Por fim, tendo em consideração o estudo da tensão máxima, os resultados do comportamento dos provetes são apresentados na Figura 53. Veja-se, desta forma, a contribuição efetiva das variáveis a nível individual, bem como, das suas junções.



	Term	Stdized Effects	Sum of Squares	% Contribution
	Intercept			
M	A-Tf	12.30	302.58	11.82
M	B-Tm	9.25	171.12	6.68
M	C-t	-10.60	224.72	8.78
M	AB	-17.65	623.04	24.34
M	AC	12.80	327.68	12.80
M	BC	11.85	280.85	10.97
M	ABC	-17.75	630.13	24.61

Figura 53 – Contribuição das variáveis operatórias para  $\sigma_{max}$  nas amostras com 4 fibras

A nível individual, a temperatura de fundido (A) é a variável com maior influência, apresentando uma contribuição de 12%. Esta é persuadida pela temperatura máxima empregue, relacionada com o valor positivo obtido pelo seu índice de efeito padronizado (+12,3).

Já nas interações duplas, a segunda melhor contribuição, destaca-se a utilização da temperatura de fundido com a temperatura do molde. Esta junção é revelada com contribuições na ordem dos 24%. A combinação entre as variáveis é influenciada pelas condições opostas, estando inerente o valor negativo obtido no índice de efeito. Ainda nas interações duplas está representada a terceira melhor contribuição destacada pela maximização ou minimização de ambas as variáveis. Como tal, é influenciada pela combinação da temperatura de fundido com o tempo de aplicação de pressão, com 12,8% de contribuição.

Já a maior contribuição é a conjunção de todas as variáveis, apresentando uma contribuição de, aproximadamente, 25%. Esta representando pelo índice de efeito padronizado negativo (-17.75). À combinação está presente a junção de duas variáveis maximizadas e uma minimizada ou todas minimizadas.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos é demonstrado os seguintes gráficos. Através destes é possível verificar a relação das variáveis que poderão influenciar a tensão máxima. Assim inicia-se o estudo com a temperatura de fundido, Figura 54, que apresenta a maior contribuição a nível individual.

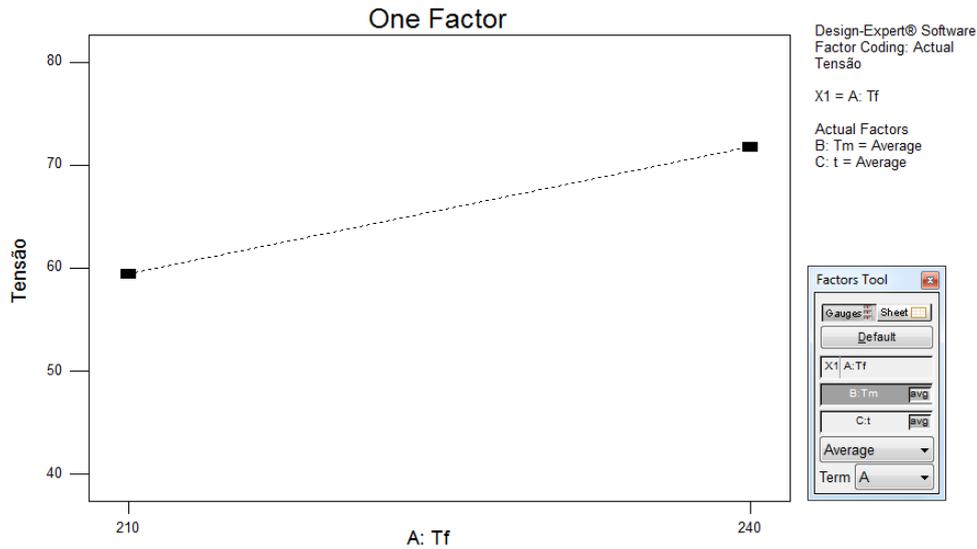


Figura 54 - Contribuição da temperatura do fundido para  $\sigma_{max}$  nas amostras com 4 fibras

É possível observar uma clara distinção entre os extremos, onde a temperatura máxima vem a favorecer a tensão máxima, tal como mencionado na Figura 53. Este fenómeno deve-se à maior fluidez do fundido derivado da utilização de temperaturas mais elevadas. Assim, o fundido apresenta menor viscosidade e, em contrapartida, maior fluidez promovendo uma melhor impregnação.

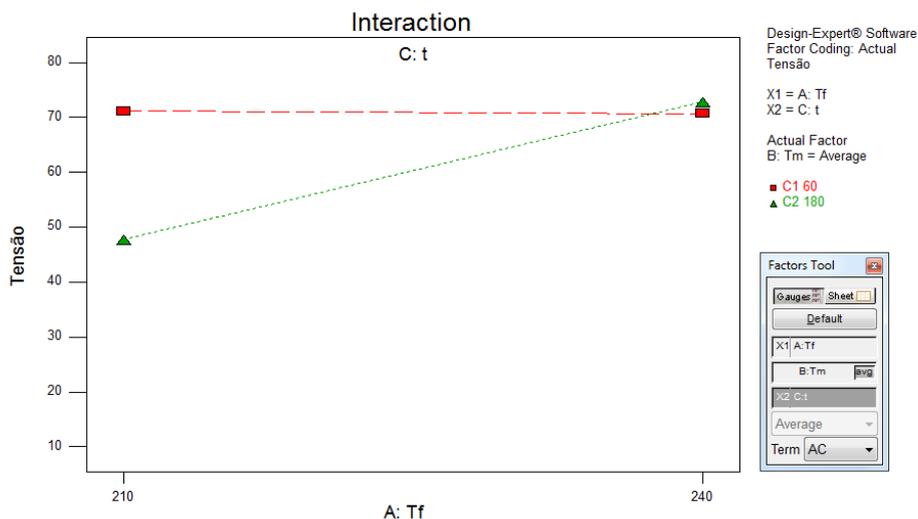


Figura 55 - Relação da temperatura do fundido com tempo de aplicação de pressão para  $\sigma_{max}$  nas amostras de 4 fibras

Tal como mencionado na Figura 53, a combinação que favorece a tensão máxima é a maximização da temperatura de fundido e o tempo de aplicação de pressão. Já a utilização de tempos mínimos, pouca alteração provoca no valor da tensão, onde variação da temperatura de fundido indica pouca interação entre as variáveis.

Assim, é comprovado que a presença da maior temperatura de fundido com o tempo de aplicação de pressão máxima é obtido melhorias significativas na tensão. Pois, a utilização de temperaturas mais



elevadas, promove maior fluidez ao fundido que com o prolongamento do tempo de aplicação de pressão, aumenta a probabilidade de penetrar mais as fibras, obtendo melhor impregnação.

A junção temperatura de fundido com a temperatura do molde é demonstrada na Figura 56, sendo a terceira maior contribuição para a tensão máxima.

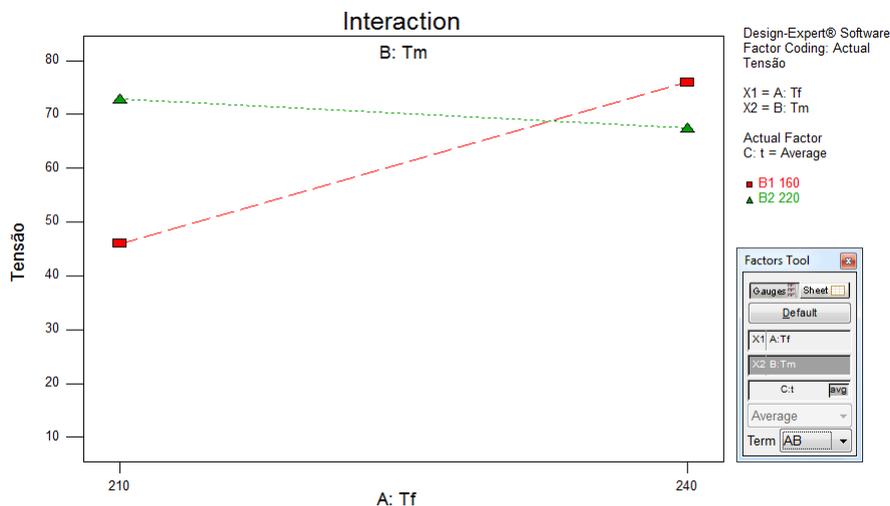


Figura 56 - Relação da temperatura do fundido com temperatura do molde para  $\sigma_{max}$  nas amostras de 4 fibras

A partir da Figura 56 é notória a influência da maior temperatura de fundido quando combinada com a utilização da temperatura mínima do molde. Esta conclusão vem em conta ao mencionado na Figura 53, comprovando-se como a melhor combinação.

Apesar de ter havido um aumento da diferença de temperaturas entre o fundido e o molde, poderá ser justificada pelo aumento da fluidez inerente à temperatura máxima, que colmata o choque térmico sofrido junto às paredes do molde.

Por fim, é mencionado a relação de todas as variáveis, através da Figura 57 e da Figura 58, onde é possível verificar o conjunto com maior influência.

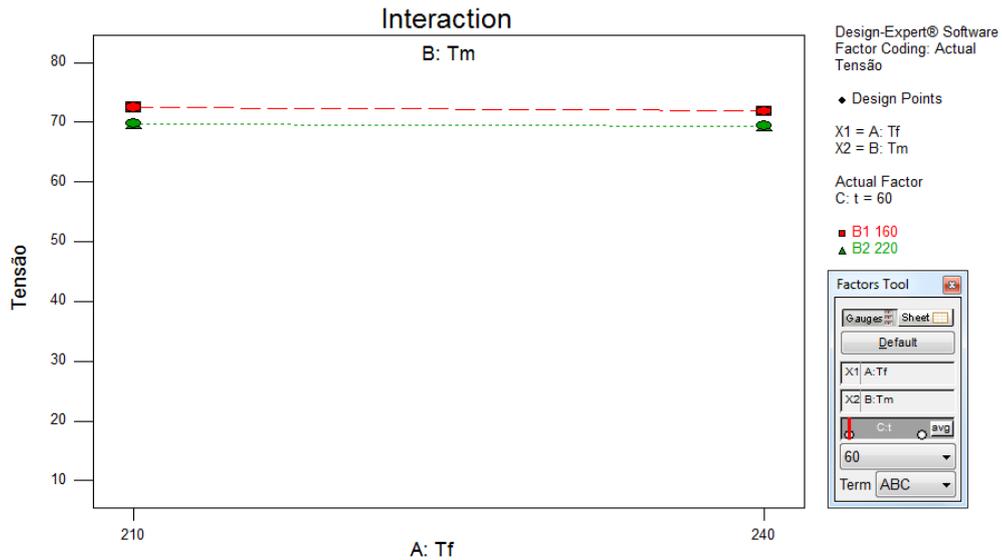


Figura 57 – Relação das 3 variáveis para  $\sigma$  em tempos de pressão de 60s nas amostras de 4 fibras

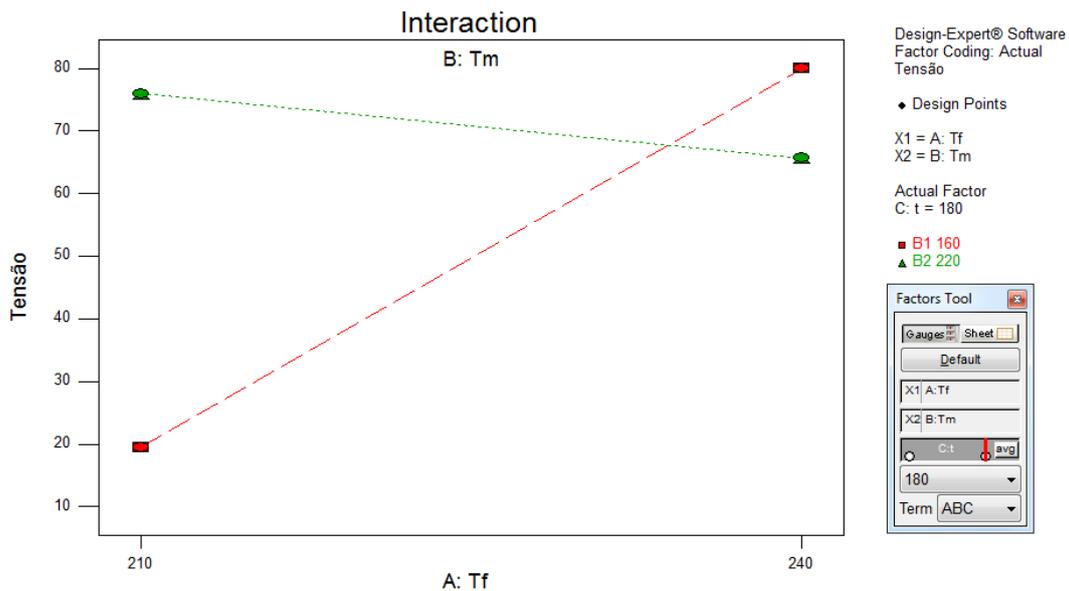


Figura 58 – Relação das 3 variáveis para  $\sigma$  em tempos de pressão de 180s nas amostras de 4 fibras

Nesta avaliação, a temperatura do molde mínima teve maior influência, onde o tempo da pressão aplicada varia diretamente com a temperatura do fundido na Figura 58. Na Figura 57 é perceptível que a temperatura do molde pouco influencia independentemente da temperatura de fundido, caracterizada pelo paralelismo entre as retas.

A melhor condição é obtida na Figura 58, onde o tempo da pressão e temperatura de fundido são máximos e a temperatura do molde mínima. A presença da maior temperatura de fundido permite que o polímero apresente maior fluidez e uma menor viscosidade. Já o tempo de aplicação máximo possibilita que o polímero, com o índice de fluidez máximo, contacte as fibras por tempo maior, colmatando a presença da temperatura do molde menor, permitindo uma boa impregnação.



Tendo em consideração o estudo para a tensão máxima à tração, os resultados individuais das amostras são apresentados na Figura 59.

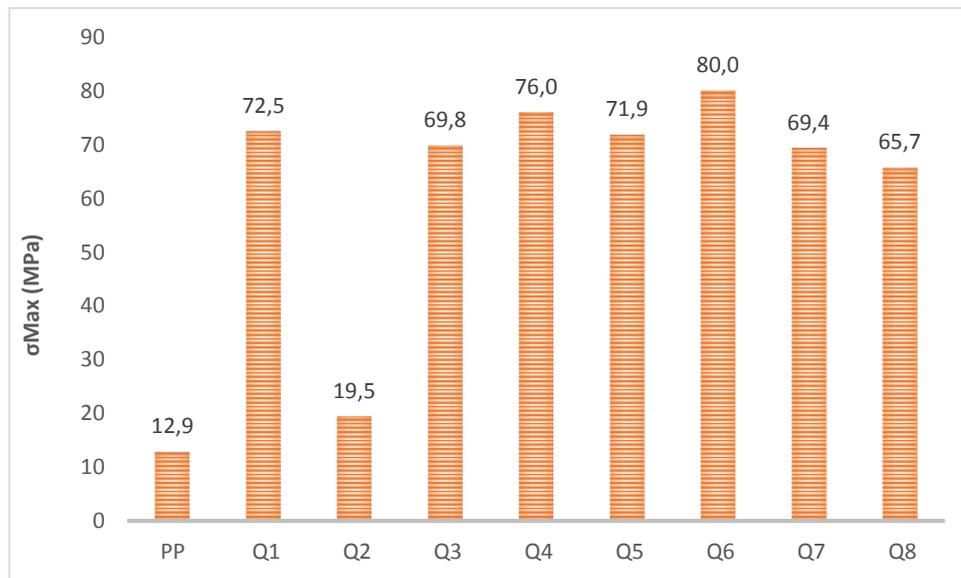


Figura 59 – Tensão máxima para todas as amostras com 4 fibra

É possível observar, todas as amostras apresentam valores superiores ao PP, indicando a impregnação das fibras. No entanto, o valor a destacar diz respeito à condição Q6, tendo conseguido resistir até ao maior valor de tensão, 86,7MPa. Esta condição vem a comprovar os valores obtido na Figura 58, uma vez que está inerente a utilização da temperatura de fundido e tempo de aplicação de pressão máximo e a temperatura do molde mínima. Relativamente à caracterização de microestrutura também veio a comprovar os bons resultados apresentados.

De salientar ainda que, apesar de se conseguir destacar uma condição como a melhor, os valores obtidos pelas restantes condições pouco se afastam do valor máximo desta, nomeadamente a condição Q4. Tal como Q6, esta também apresentou bons indícios de impregnação na caracterização de microestrutura sendo refletido pelos bons resultados obtidos.

#### - Comparação do estudo de polipropileno com uma camada de fibra e de polipropileno com quatro camadas de fibras de vidro contínuas

Após a análise individual das amostras consoante a quantidade de fibra na constituição é agora interessante proceder a uma comparação entre ambas. Neste sentido, invés de estudar as variáveis operatórias que influenciam o rendimento das propriedades do compósito, será analisada a relevância da quantidade de fibras de vidro contínuas na sua composição.



Como tal, serão comparadas as duas componentes inerentes ao comportamento dos provetes no ensaio de tração, sendo elas, o módulo de elasticidade e a tensão máxima.

Por intermédio da Figura 60, é possível começar a comparação pelos valores obtidos no módulo de elasticidade das amostras.

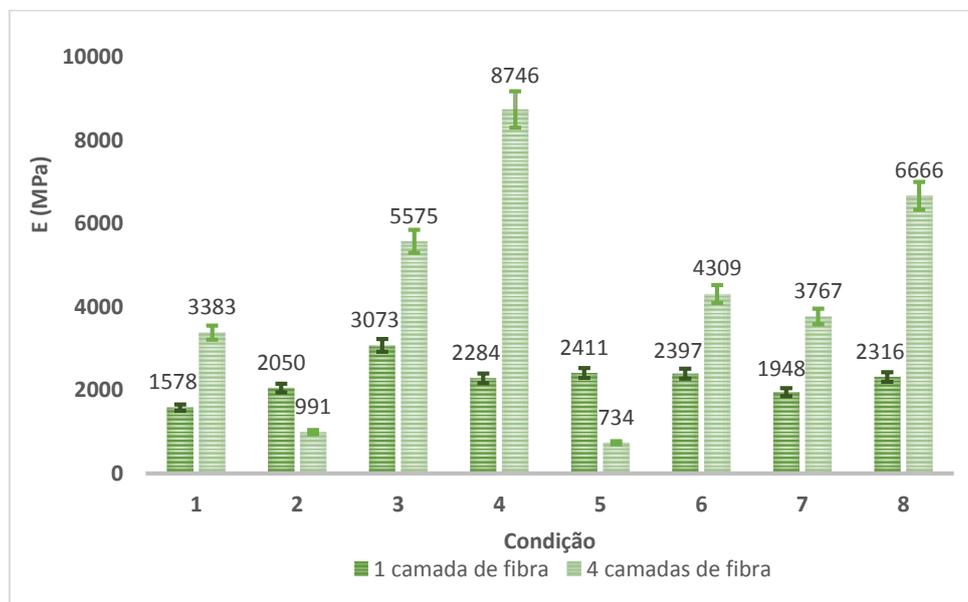


Figura 60 – Comparação entre os provetes de 1fibra com 4fibras para o E

Numa visualização geral da Figura 60, é notório que os valores com maior impacto são resultantes dos provetes com quatro camadas de fibras de vidro. De frisar que estas amostras apresentam um valor médio do módulo de elasticidade de 4271MPa, sendo, aproximadamente, duas vezes superior à média originada pelas amostras de apenas uma fibra (2257MPa). Apesar do valor médio, dos compósitos com quatro camadas de fibras, ser constituído pelas duas piores amostras consegue ser superior à melhor amostras com uma fibra, 3073MPa.

O destaque alcançado pelas amostras com quatro camadas deve-se à maior fração volúmica de fibras de vidro. Isto é, os provetes com uma camada de fibra apresentam uma composição volúmica de 5% de fibra e 95% de PP, enquanto os provetes com quatro camadas é aproximadamente 20% de fibra e 80% de PP. Assim é compreensível que o seu módulo de elasticidade seja superior. Pois, quanto mais camadas impregnadas, maior resistência é conferida ao material, e, conseqüentemente, melhores propriedades.

É, ainda, relevante transcrever a informação relativa ao módulo de elasticidade teórica do PP e da fibra de vidro, sendo eles de 1300MPa e 70000MPa, respetivamente. Através de uma proporção direta, é de esperar que o módulo de elasticidade teórica das amostras com quatro camadas de fibra seja realmente superior, tal como é comprovado a nível prático.

De salientar que ao ser utilizada a analogia do módulo de elasticidade teórico, é possível comprovar a incompleta impregnação das fibras pelo PP, como concluído através dos ensaios da caracterização de



microestrutura. Ou seja, quando a impregnação teórica dos provetes é completa, equivale a 4735Mpa e 15040MPa para uma e quatro camadas, respetivamente. Assim, por observação da Figura 60, é possível comprovar que esses valores não foram atingidos em nenhum dos grupos em análise.

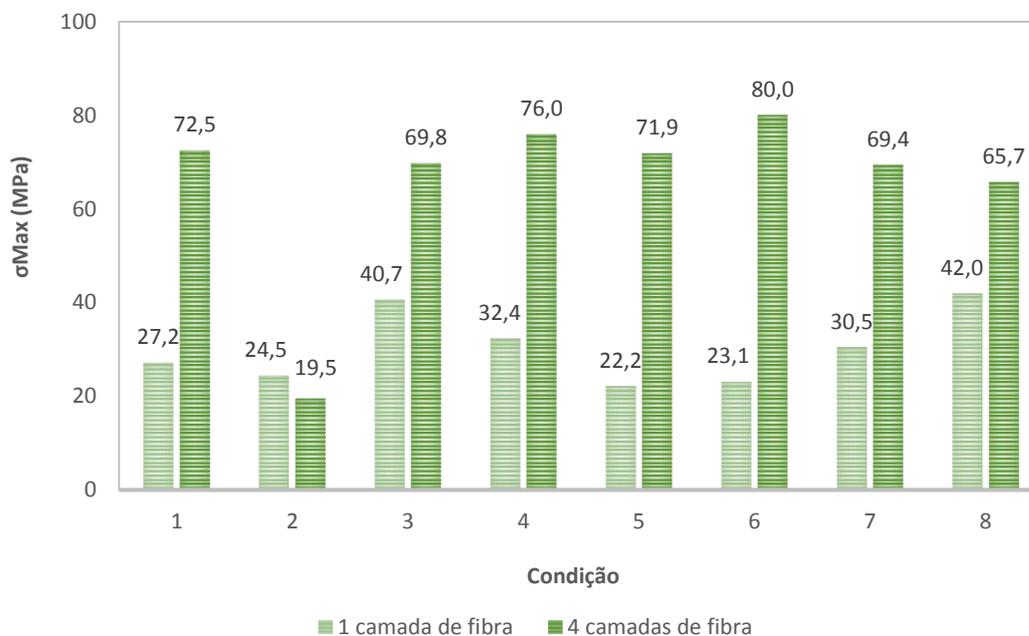


Figura 61 – Comparação entre os provetes de 1fibra com 4fibras para a tensão máxima

Globalmente, as amostras constituídas por quatro camadas de fibras de vidro apresentam melhores valores, com um valor médio de 65.1MPa. Contudo, este valor médio é denegrido pela presença da pior condição de todas, condição 2, apresentando valor de 19.5MPa.

Já as amostras com uma camada de fibra apresentam uma tensão máxima média de 30MPa, demonstrando um défice considerável, tanto a nível individual como a nível coletivo. Estes resultados não são surpreendentes uma vez que as fibras apresentam melhores resultados que o PP. Ou seja, a presença do maior número de camadas vem a favorecer a resistência à tração proveniente das fibras.

Tendo agora em consideração ambas as figuras, Figura 60 e Figura 61, é aplausível concluir que, independentemente da propriedade em estudo, os valores máximos são sempre atingidos nas amostras com quatro camadas de fibras de vidro. No entanto, é neste mesmo grupo que são obtidas também as piores propriedades pela presença das condições Q2 e Q5. Este acontecimento pode advir de erros de processo, associados ao próprio processamento e/ou à caracterização.



#### 4.1.3 Ensaio Interlaminar Shear Strength

Relativamente aos ensaios de Interlaminar *Shear*, a propriedade avaliada no ensaio é a força à resistência à falha,

##### - Polipropileno com uma camada de fibra de vidro contínua

O estudo dos resultados obtidos inicia-se pelas amostras com uma camada de fibra de vidro, onde os valores obtidos são demonstrados na Figura 62.

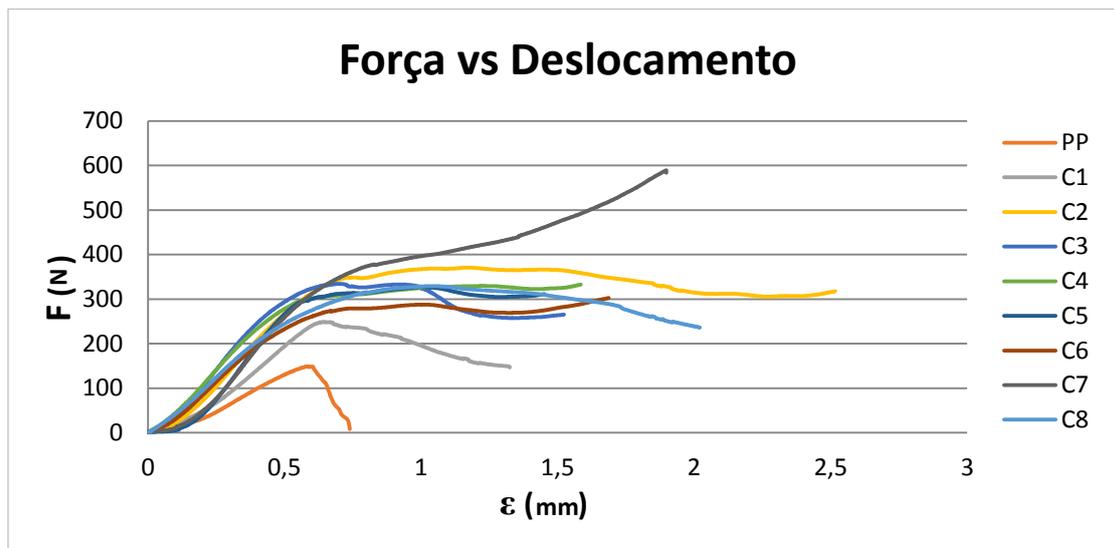


Figura 62 – Gráfico resultante do ensaio ILSS para os provetes com uma camada de fibra

Através da Figura 62, é observável que todas as condições apresentam propriedades superiores ao PP. Para além de apresentarem um pico da curva mais elevado, correspondente à força máxima capaz de suportar, estas apresentam a parte inicial das suas curvas mais acentuadas, que se traduz na melhoria da rigidez comparativamente à matriz. A resposta das amostras à solicitação empregue durante o ensaio indica que a combinação fibra/termoplástico é uma forte e possível consequência da impregnação de ambos.

Iniciando a análise das interações das condições que permitiriam obter melhores propriedades, são apresentadas as Figura 63 e a Figura 64.

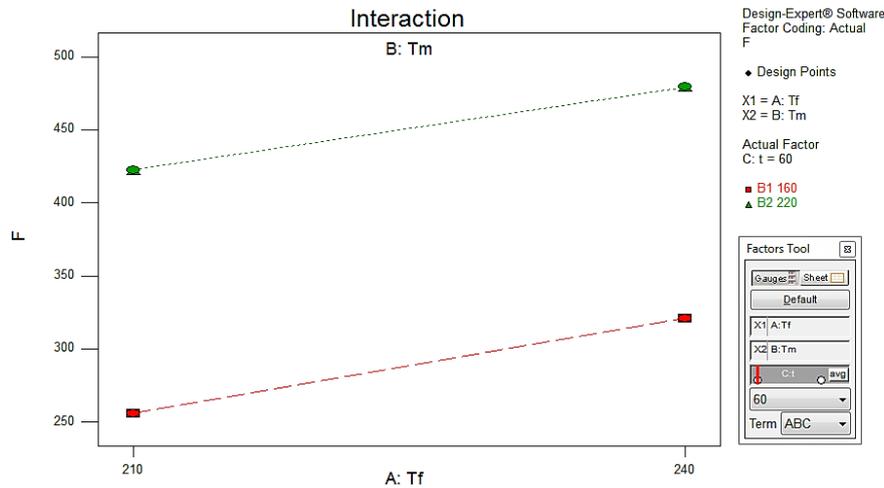


Figura 63 – Relação das variáveis para tempos de pressão de 60 segundos nas amostras de uma fibra de vidro

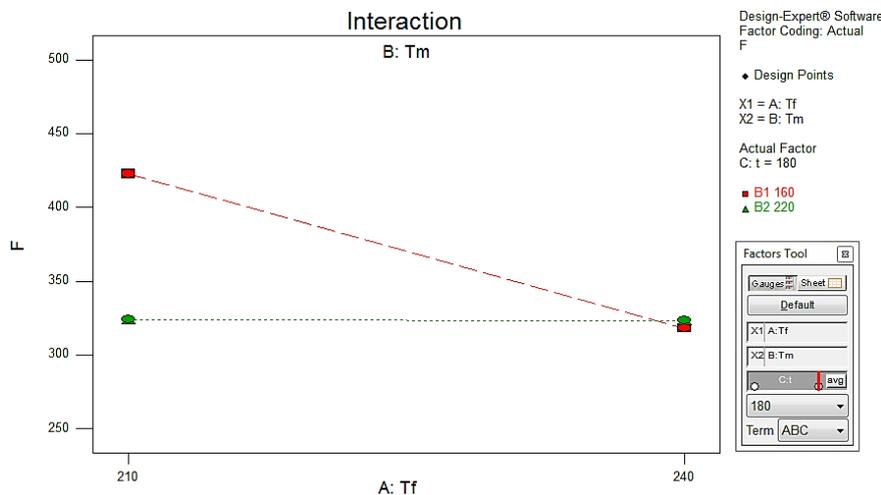


Figura 64 – Relação das variáveis para tempos de pressão de 180 segundos nas amostras de uma fibra de vidro

Através da Figura 63 e da Figura 64, é possível verificar que independentemente da temperatura do molde, o valor máximo é obtido consoante o valor da temperatura de fundido utilizada. Na Figura 63, o valor da força é maximizado pela presença da temperatura de fundido máxima e na Figura 64, pela utilização da temperatura de fundido mínima.

No entanto, o valor maior de força está presente na Figura 63, através da temperatura de fundido e do molde máxima e do tempo de aplicação de pressão mínimo. Isto deve-se ao facto da diminuição da temperatura do fundido/molde, permitindo que o fundido apresente maior fluidez e consequentemente origine uma melhor impregnação.

Estes resultados são comprovados através da Figura 65, onde a força atingida para cada amostra é apresentada.

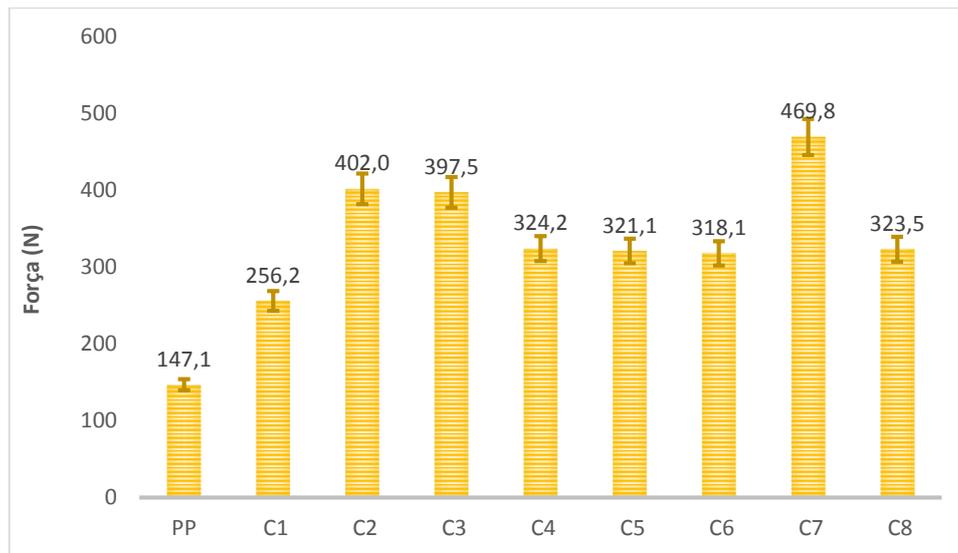


Figura 65 – Valores atingidos no ensaio ILSS com 1fibra

Por observação direta do gráfico da Figura 65, é possível comprovar a superioridade de todas as amostras comparativamente ao PP. Onde é visível que a pior condição apresenta uma diferença superior a 100N, correspondente a C1.

Contudo, o valor máximo da força é atingido pela condição C7. Nesta condição está presente a temperatura de fundido e do molde máxima e o tempo de aplicação de pressão mínimo, comprovando os resultados obtidos na Figura 63 e Figura 65.

Isto deve-se ao facto da diferença entre temperaturas ser reduzida, minimizando o choque térmico a que o fundido está sujeita quando contacta o molde. Assim, o fundido apresenta maior índice de fluidez dado a presença de temperaturas próximas da do fundido. A temperatura de fundido máxima vem ainda a favorecer a impregnação. Ou seja, o fundido ao contactar as fibras na presença de temperaturas maiores apresenta menor viscosidade que se traduz em maior fluidez. Desta forma, a probabilidade de penetrar as fibras é maior melhorando a impregnação do compósito.

No entanto, dado o tipo de falha apresentada por as todas amostras e recorrendo à norma ISO 14130:1997, no ponto 11, os resultados obtidos tornando-se inaceitáveis uma vez que apresentam uma quebra do tipo da alínea c), tal como pode ser observado na Figura 66.

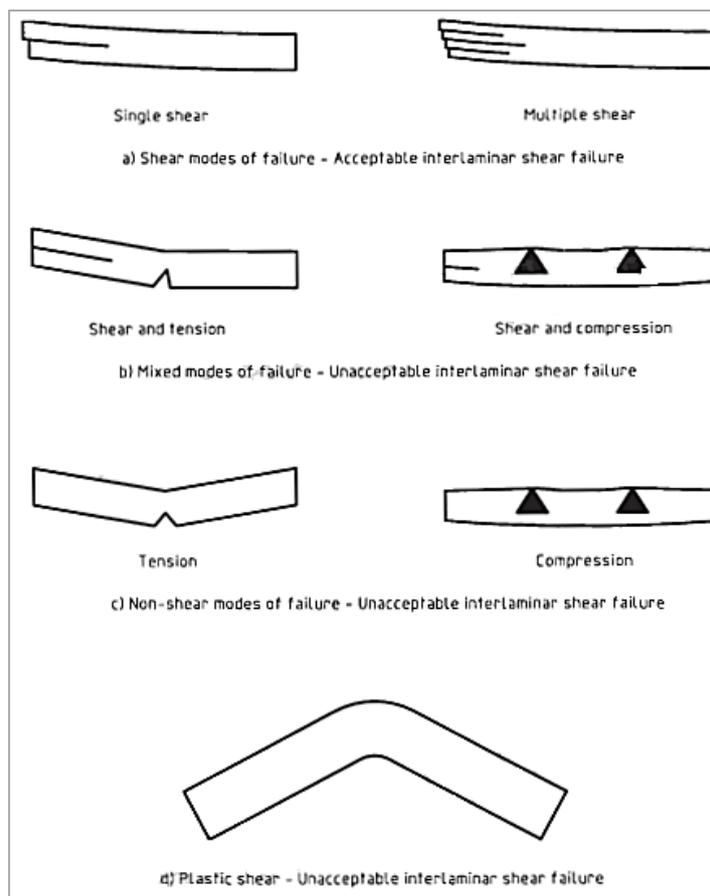


Figura 66 – Ponto 11 da norma ISO 14130:1997 referente ao tipo de quebra

- Polipropileno com quatro camadas de fibras de vidro contínua

Foi realizado o mesmo ensaio às amostras com quatro camadas de fibras de vidro contínuas, sendo que a relação Força vs. Deslocamento se encontra representada na Figura 67.

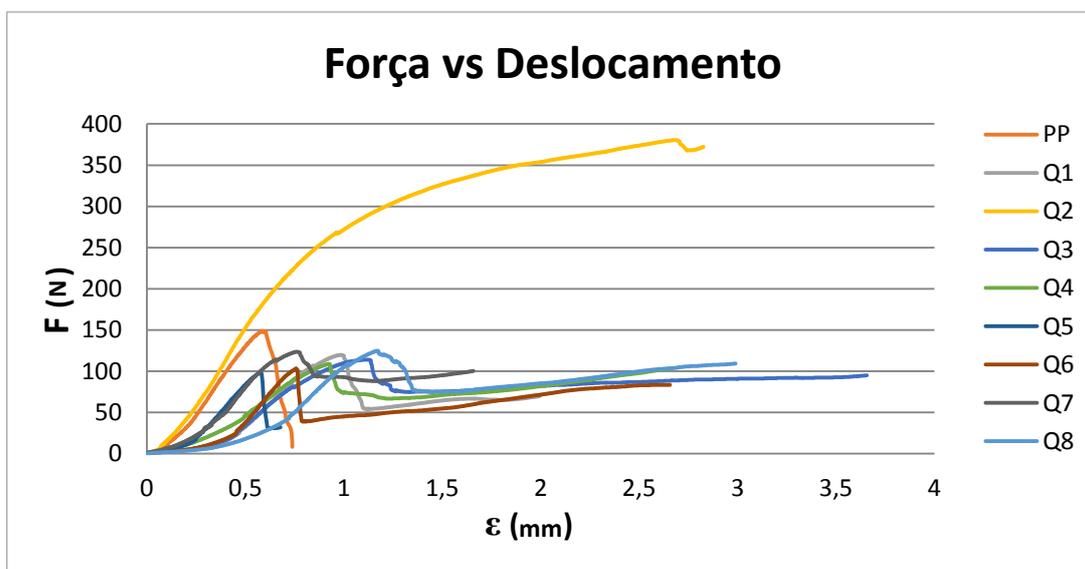


Figura 67 – Gráfico resultante do ensaio ILSS para os provetes com 4fibras



Na Figura 67, a curva que maior destaque apresenta é caracterizada pela condição Q2. Contudo, esta foi a única condição apresentar valores superiores ao PP, onde as restantes são caracterizadas por valores inferiores.

Relativamente a parte inicial das curvas, tendo como o valor de deslocamento até 0,2mm, é visível que todas as curvas, com a exceção de Q2, apresentam uma inclinação inferior que o PP. A nível de propriedade traduz-se na rigidez inerente a cada amostra. Assim, é possível concluir que há uma diminuição desta propriedade quando combinados os dois matérias (PP e fibra de vidro). A diminuição de propriedades pode indicar que está ocorrer uma má compatibilização entre as fibras, presumindo uma má impregnação.

No entanto, o realce alcançado pela amostra Q2 deve-se ao facto das restantes amostras terem sidas caracterizadas com uma metodologia diferente durante o ensaio. Enquanto Q2 foi submetida com as fibras na parte inferior, as restantes amostras foram submetidas com as fibras na parte superior. Ou seja, para a condição Q2 o comportamento a que as fibras ficaram sujeitas foi de tração e o polímero compressão, beneficiando do comportamento ideal de ambos os constituintes. Já as restantes condições foram sujeitas à compressão para o caso das fibras e à tração para o caso do polímero. Para melhor compreensão, veja-se a Figura 68.

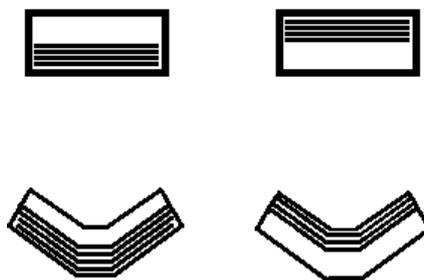


Figura 68 – Comportamento dos provetes à força aplicada

Na Figura 68, o lado direito da imagem corresponde ao posicionamento inferior das fibras e o lado esquerdo ao posicionamento superior. Assim Q2 esta presente no posicionamento do lado esquerdo. Este posicionamento favorece a obtenção de melhores propriedades na medida que, tanto o polímero como as fibras são sujeitos a esforços na direção preferencial e que melhor toleram. Assim, o provete Q2 não pode ser considerado na comparação entre as restantes amostras por se encontrar em minoria.

Através da Figura 69 é ilustrada de forma mais perceptível a força máxima inerente ao ensaio Interlaminar para cada amostra com quatro camadas de fibras de vidro.

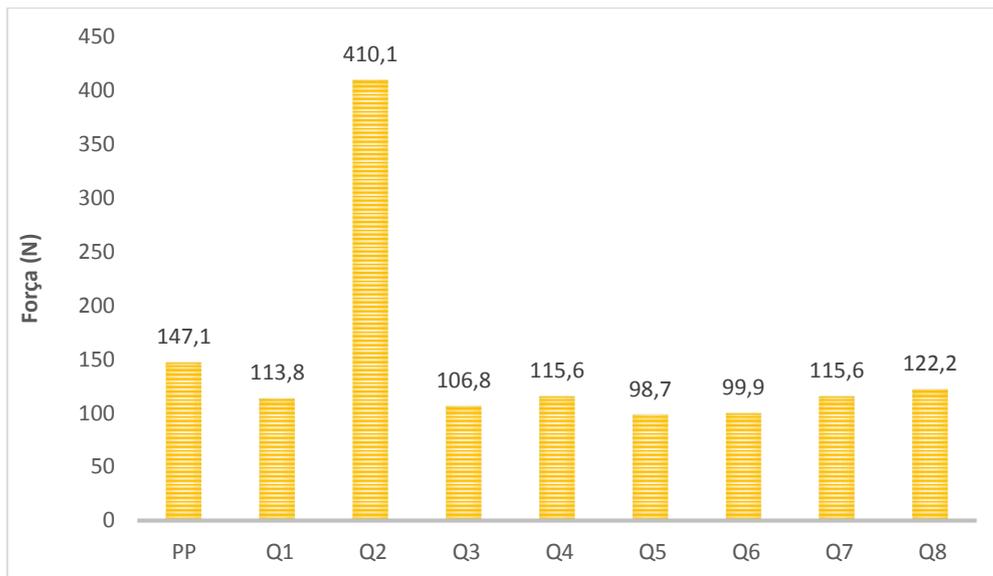


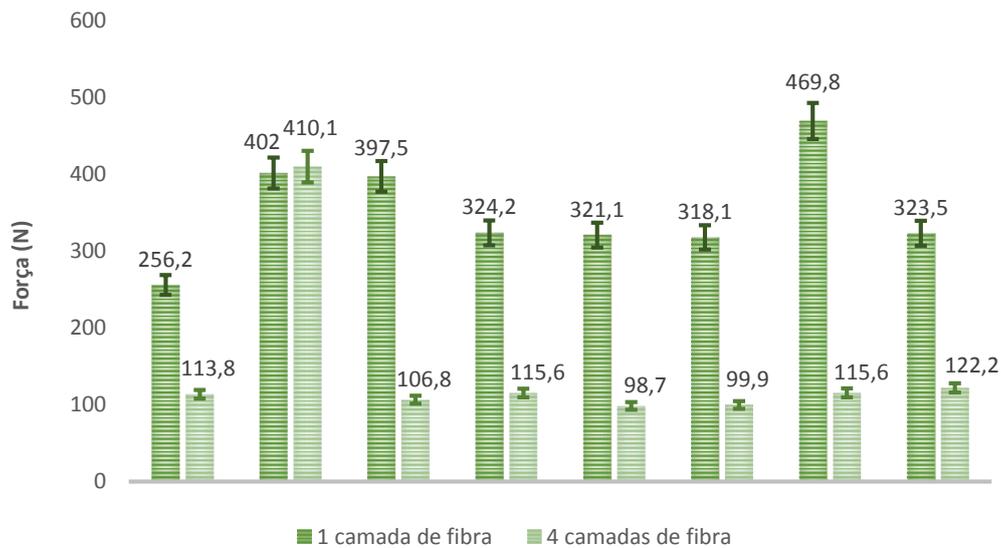
Figura 69 – Valores atingidos no ensaio ILSS para provetes com 4 camadas de fibra

Através da Figura 69, e como mencionado na Figura 67, o destaque recai na amostra Q2, pois foi a única amostra que apresentou valores superiores a PP. Já as restantes condições apresentam propriedades inferiores comparativamente com as da matriz termoplástico PP, compreendidas em diferenças entre os 33 e 25N. A razão para os baixos valores encontrados na maioria das amostras advém, como já mencionado, da metodologia utilizada durante o ensaio, onde as fibras se encontram sobre compressão e o polímero sobre tração, sendo as suas zonas de desconforto e onde apresentam piores rendimentos.

Contudo, e tal como nas amostras com uma fibra, a quebra obtida por estes provetes do tipo da linha c) do ponto 11 são desprezados pela norma ISO 14130:1997, tornando os resultados obtidos insatisfatórios.

#### - Comparação do estudo de polipropileno com uma camada de fibra e de polipropileno com quatro camadas de fibras de vidro contínuas

Veja-se na Figura 70 o gráfico comparativo dos valores obtidos nos ensaios de ILSS para os dois conjuntos de provetes, uma e quatro fibras de vidro contínuas secas.



**Figura 70– Comparação entre os provetes de 1fibra com 4fibras para o ensaio ILSS**

Apesar da norma ISO 14130:1997 menosprezar os resultados obtidos no ensaio ILSS, é possível observar, através da Figura 70, que as amostras que são constituídas por uma fibra de vidro apresentam valores superiores, à exceção da amostra Q2. Esta exceção advém da metodologia usada durante o ensaio, que foi a mesma empregue nas amostras com uma fibra.

Desta forma, conclui-se que a utilização da mesma metodologia nas restantes amostras levaria a valores superiores nos provetes constituintes de quatro camadas de fibras. Apesar de ter havido apenas uma melhoria de 8N entre C2 e Q2, é um indicador da possível obtenção de valores superior aos obtidos nas amostras com uma fibra de vidro.



#### 4.2 Moldação por injeção

A moldação por injeção é um dos processos com maior relevância a nível industrial e pode garantir aos compósitos a elevada cadência.

##### 4.2.1 Caracterização de Microestrutura

Na primeira fase de análise das amostras, são caracterizadas a microestrutura de modo a antever ilações sobre a possível impregnação do PP nas fibras de vidro contínuas. De salientar ainda que neste estudo apenas se analisa a impregnação e não propriedades mecânicas do material formado.

##### - Polipropileno com uma camadas de fibra de vidro contínua

Na Figura 71 estão analisadas as amostras de uma fibra de vidro com uma ampliação de 5x1.67.

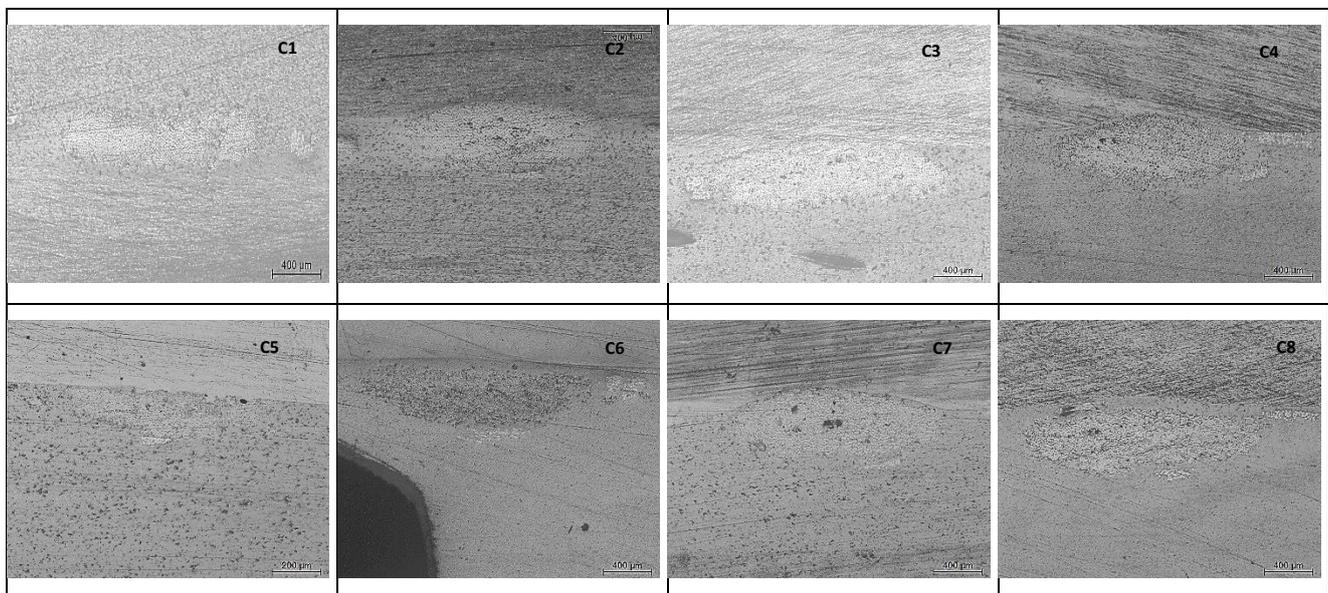


Figura 71 – Imagem de amostras de uma fibra provenientes da injeção, com ampliação 5x1,67

Através da Figura 71 é possível verificar existência de impregnação das fibras, dado ser visível um envolvimento total do reforço por intermedio do termoplástico PP. Já a amostra C3 é a exceção do observado. Contudo, a quantidade de matriz entre os filamentos de fibras e a posição da fibra na amostra vão variando ao longo das condições a que foram sujeitas.

No entanto, as amostras que mais se destacam pelo melhor envolvimento e, aparentemente, melhor impregnação das fibras contínuas secas são C5 e C8. Em ambas as amostras é visível uma abertura maior do *roving*, que é um indicador de uma maior quantidade de material entre os filamentos de fibra. Já a localização do *roving* é mais interna ao longo da espessura, que demonstra um melhor envolvimento do fundido.



Na Figura 72 encontram-se as amostras com uma maior ampliação, 10x1,67, onde é possível ter um melhor percepção.

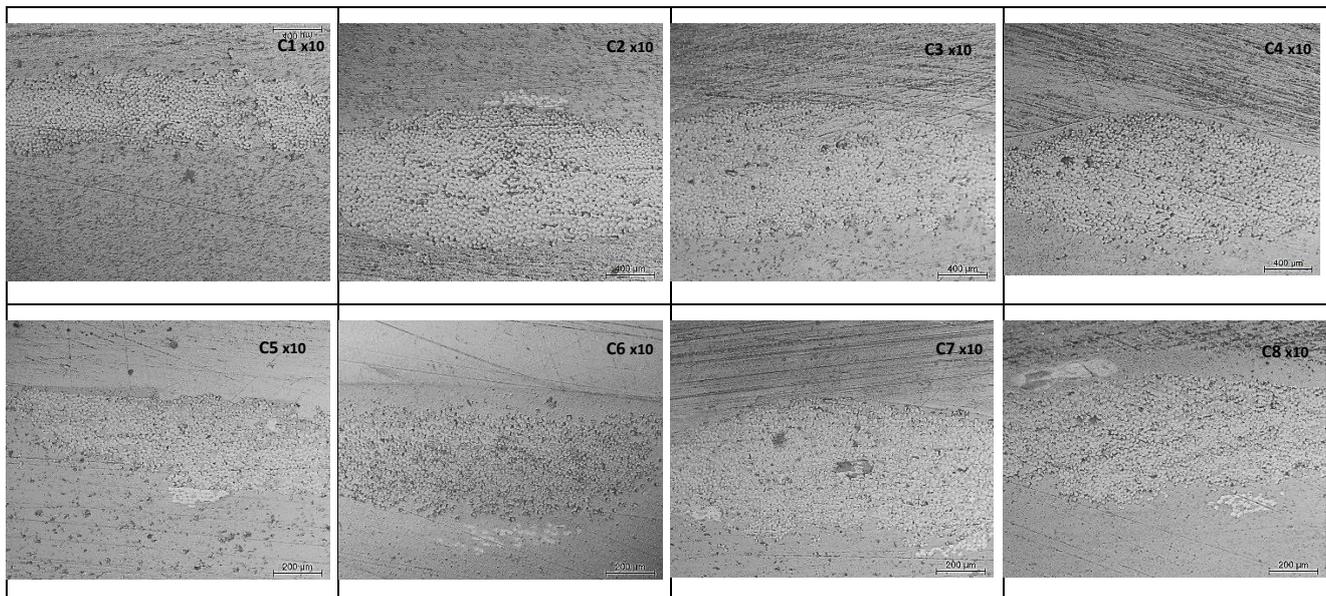


Figura 72 – Imagem de amostras de uma fibra provenientes da injeção, com ampliação 10x1,67

Através da Figura 72 é possível verificar que abertura do *roving* é influenciada pela existência de maior quantidade de material entre a fibra. É ainda visível que o *roving* encontra-se mais dentro da amostra na condição C8, vindo a comprovar o que foi mencionado na figura anterior.

#### - Polipropileno com duas camadas de fibra de vidro contínua

Para as amostras do grupo D, com duas camadas de fibra de vidro, as imagens representativas do seu estado físico encontram-se entre a Figura 73 e a Figura 76.

Dentro do grupo de amostras D, existem as amostras com diferentes tempos de aplicação de segunda pressão e as amostras com diferentes temperaturas de molde no seu processo de formação. Na Figura 73, estão representadas as imagens respetivas às amostras com diferentes tempos de aplicação de segunda pressão, amostras C1 a C6, sendo que a variação entre elas é um incremento de 10 segundos.

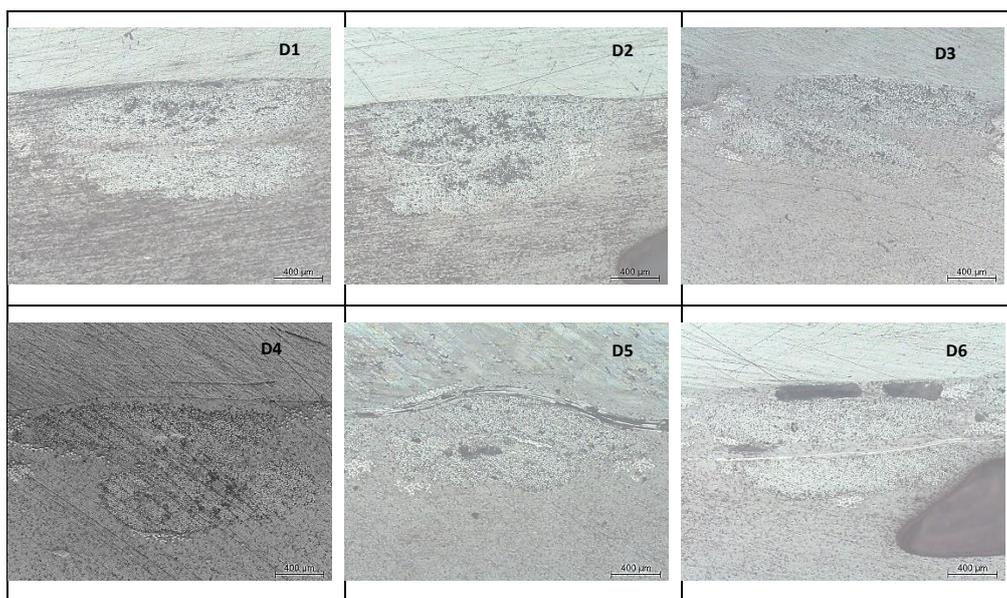
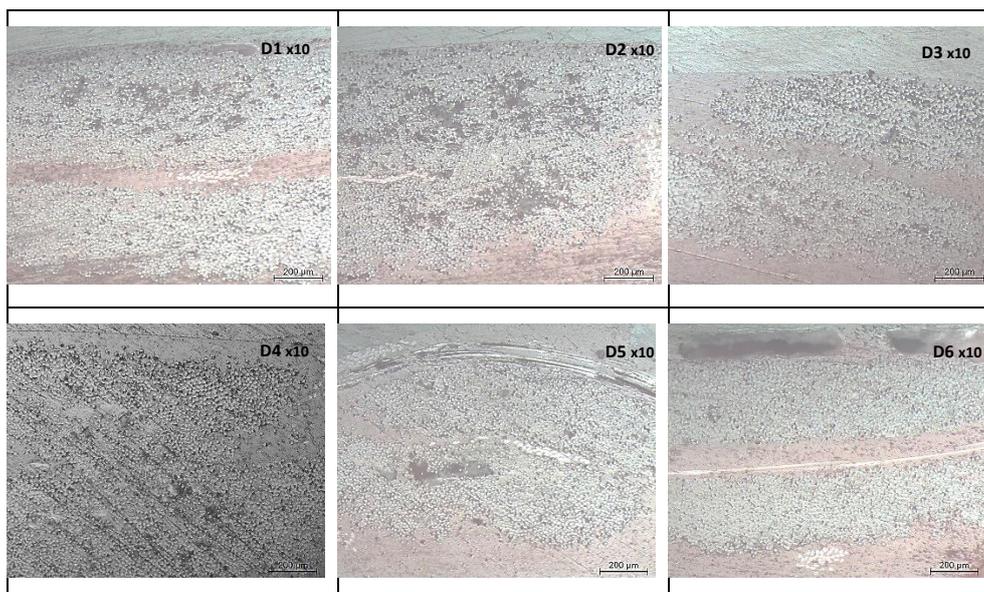


Figura 73 – Imagem de amostras de duas fibras provenientes da injeção com diferentes tempos de aplicação de segunda pressão, ampliação 5x1,67

Através da Figura 73, é possível observar que a impregnação e o envolvimento total de pelo menos uma camada de fibra de vidro estão presente em todas as amostras. Este facto realça possibilidade de impregnar, pelo menos uma camada, na presença da temperatura de molde a 170°C e a segunda a pressão a 300bar.

Contudo, a camada mais próxima da superfície apresenta diferenças entre as amostras. Na condição D2 verifica-se a presença da fibra à superfície, demonstrando que não houve o envolvimento total da mesma. Já as restantes amostras apresentam o envolvimento das duas camadas de fibra, onde se destacam D3 e D5. Estas apresentam as duas camadas mais no interior em relação à espessura da placa, bem como, a abertura do *roving* maior, influenciada pela penetração de uma maior quantidade de fundido.

Na Figura 74 as amostras estão apresentadas a uma escala de ampliação microscópica 10x1.67.

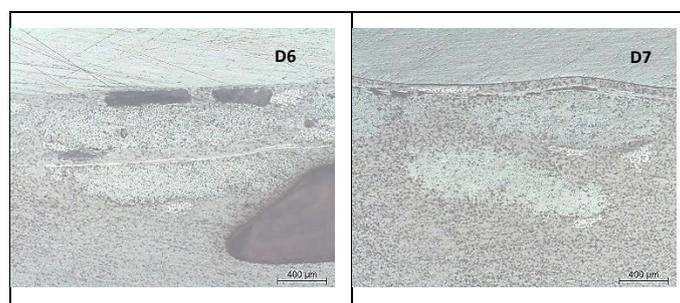


**Figura 74 – Imagem de amostras de duas fibras provenientes da injeção com diferentes tempos de aplicação de segunda pressão, ampliação 10x1,67**

Pela Figura 74 é possível confirmar que em todas as amostras há um envolvimento das duas camadas de fibras, apresentando uma melhoria significativa a partir da condição D4.

Na Figura 74 é possível ver a diferença da abertura do roving da fibra para cada amostra. Tanto na condição D1 como na D6 é possível observar uma linearidade das camadas de fibras. Este comportamento pode ser influenciado pela pouca presença de polímero entre os filamentos, no caso de D1, e pelo excesso de tempo de segunda pressão traduzindo-se num subcompactação, para a amostra D6.

Na Figura 75 estão apresentadas as imagens das amostras com diferentes temperaturas de molde, amostras da condição 6 e condição 7. A variação entre elas é um incremento de 40°C, onde D6 é presenciada pela temperatura do molde a 170°C e D7 a 210°C.



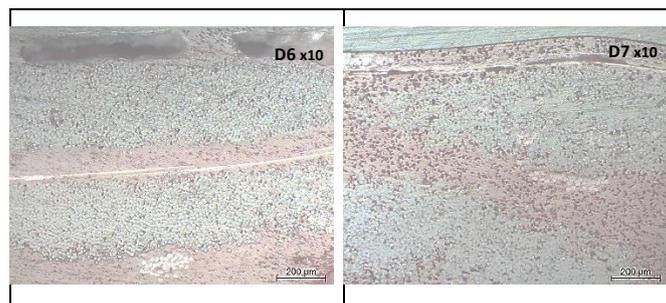
**Figura 75 – Imagem de amostras de duas fibras provenientes da injeção com diferentes valores de temperatura de molde, ampliação 5x1,67**

Relativamente à Figura 75, é notório o envolvimento total de ambas as fibras e conseqüentemente a possível impregnação das mesmas. No entanto, com a utilização da temperatura do molde a 210°C, representado pela amostra D7, ocorre uma melhoria significativa na penetração do fundido. Este acontecimento é visível



pela distância entre os *roving*, bem como, pela espessura dos mesmos. Isto pode ser explicado pelo facto de o molde estar a temperaturas mais próximas da temperatura do fundido, diminuindo o choque térmico ou arrefecimento sofrido pelo fundido ao entrar no molde. Ou seja, durante a injeção, o fundido ao contactar as paredes do molde irá sofrer um decréscimo muito menos acentuado, permitindo que o fundido permaneça no interior do molde com temperatura mais elevadas e consequentemente apresente índices de fluidez mais elevados. Assim, possibilita com que haja uma melhor penetração e envolvimento do fundido com o reforço.

Veja-se estas duas condições, numa maior ampliação microscópica, 10x1.67, na Figura 76.



**Figura 76 – Imagem de amostras de duas fibras provenientes da injeção com diferentes valores de temperatura de molde, ampliação 10x1,67**

Através desta comparação visual é bem visível a diferença de material entre as fibras e a superfície entre as condições D6 e D7, confirmando o que foi dito anteriormente em relação à Figura 75.

Assim, é possível concluir que a utilização de temperaturas do molde maiores pode favorecer a impregnação, dado que foi a única condição a variar. Desta forma, vem novamente a confirmar que proximidade com a temperatura do fundido, diminuindo o arrefecimento sofrido quando o polímero contacta o molde. O fundido ao contactar as fibras a temperaturas mais elevadas, favorece de uma menor viscosidade e consequentemente maior fluidez, fluidez essa que permitirá à matriz obter melhores resultados na impregnação do reforço.

A presença de maiores índices de fluidez no fundido também pode ser caracterizada pela abertura dos *roving* de D7 ser superior a D6.

#### 4.2.2 Ensaio de Tração

O ensaio de avaliação de propriedades mecânicas realizado para as amostras injetadas é o ensaio de tração. Pretende-se com este ensaio averiguar, mais uma vez, quais as variáveis do processo que se refletem em melhores comportamentos mecânicos.



## - Polipropileno com uma camada de fibra de vidro contínua

O estudo do ensaio de tração, proveniente da análise dos provetes obtidos pelo processo de injeção, começa com as amostras de uma única camada de fibra de vidro contínua na sua composição.

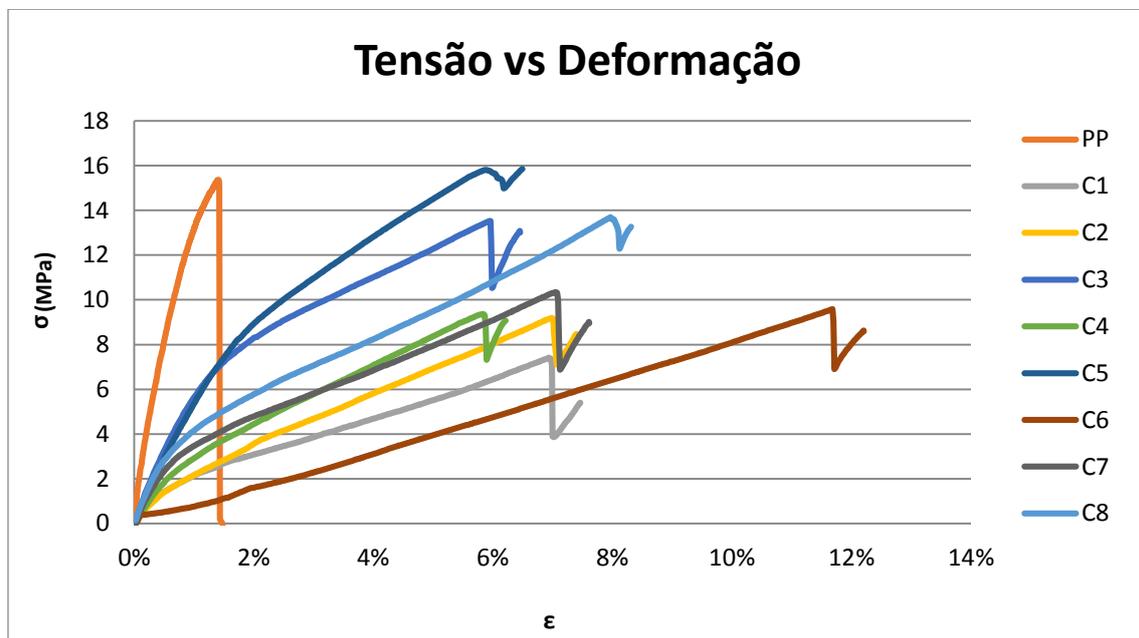


Figura 77 – Gráfico representativo dos resultados da tração dos compósitos de PP com 1 fibra

É de realçar que, em praticamente todas as condições presentes Figura 77, os provetes apresentam propriedades mecânicas inferiores às do PP. O facto de polipropileno apresentar propriedades superiores às dos compósitos pode indicar que não está a ocorrer uma boa compatibilização da matriz/reforço, representando uma má impregnação.

No que respeita à análise figura, é perceptível que para uma tensão compreendida no intervalo de 0 a aproximadamente 3MPa, os provetes encontram-se numa fase de deformação elástica. Já C6 é a exceção, dado que apresenta a deformação plástica muito prévia.

É ainda possível verificar que as condições que apresentam melhor relação entre deformação e tensão são a condição C3, C8 e C5. As duas primeiras possuem, na parte inicial do gráfico, uma deformação com menor grau de proporcionalidade com a tensão e a terceira apresenta uma maior resistência à tensão, atingindo o maior pico de tensão máxima.

As propriedades avaliadas neste ensaio foram, então, o módulo de elasticidade ( $E$ ) e a tensão máxima ( $\sigma_{max}$ ), tal como foi realizado para a moldação por compressão a quente. Como tal, através dos resultados obtidos no ensaio de tração, procedeu-se ao cálculo destes parâmetros operatórios, sendo estes demonstrados nas figuras seguintes.

De modo a quantificar, em termos globais, a contribuição das variáveis (individuais e conjugadas) para o módulo de elasticidade é apresentada a Figura 78, referente às contribuições de cada.



	Term	Stdized Effects	Sum of Squares	% Contribution
	Intercept			
M	A-Vinj	-87,75	15400,13	1,89
M	B-P2	368,25	2,712E+005	33,28
M	C-Tm	-44,75	4005,13	0,49
M	D-t2	494,25	4,886E+005	59,95
M	AB	-4,25	36,13	4,433E-003
M	AC	-122,25	29890,13	3,67
M	AD	-54,25	5886,13	0,72

Figura 78 – Contribuição das variáveis e da interação destas no E para as amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro

Na Figura 78, a variável A corresponde a velocidade de injeção, B à segunda pressão, C à temperatura do molde e D como o tempo de segunda pressão. Fazendo agora a análise da figura, é visível, quer a nível individual, quer a nível global, que o tempo de aplicação de pressão (D) é a variável com maior influência. A sua contribuição é de 60% persuadida pelo tempo de aplicação máximo, como comprova pelo valor positivo obtido do índice de efeito padronizado, +429,25. Ainda a nível de variáveis individuais, é destacada a segunda pressão, com a segunda maior influência a nível global. O valor positivo do índice de efeito padronizado, +368,25, indica que os melhores resultados são também obtidos pela maximização da variável.

Para as interações duplas, apenas é de realçar a interação entre velocidade de injeção e a temperatura do molde, com uma contribuição reduzida de 3,70%. Já na conjunção de variáveis, a interação apresenta maior efeito quando as duas variáveis apresentam níveis opostos. Ou seja, o módulo de elasticidade é melhorado pela combinação pela velocidade de injeção mínima com a temperatura do molde máxima ou vice-versa.

No que concerne às restantes variáveis individuais e duplas, todas possuem um valor demasiado residual para serem alvo de análise.

No entanto, de modo a comprovar os resultados da Figura 78, onde se estima que quanto maior a segunda pressão maior o valor do módulo de elasticidade, é apresentada a Figura 79.

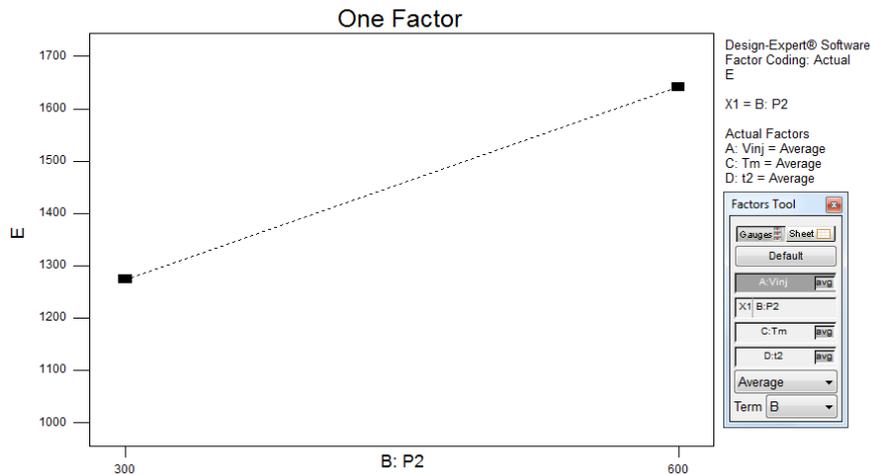


Figura 79 - Efeito da segunda pressão em E para amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro

Na Figura 79, é possível comprovar que o ponto máximo do módulo de elasticidade correspondente à segunda pressão máxima. Dado que, a compactação exercida vem a favorecer a penetração no reforço beneficiando de uma maior pressão aplicada no fundido. Desta forma, a impregnação vem a ser também maximizada.

Por último, como variável individual, analisa-se o tempo da segunda pressão, presente na Figura 80.

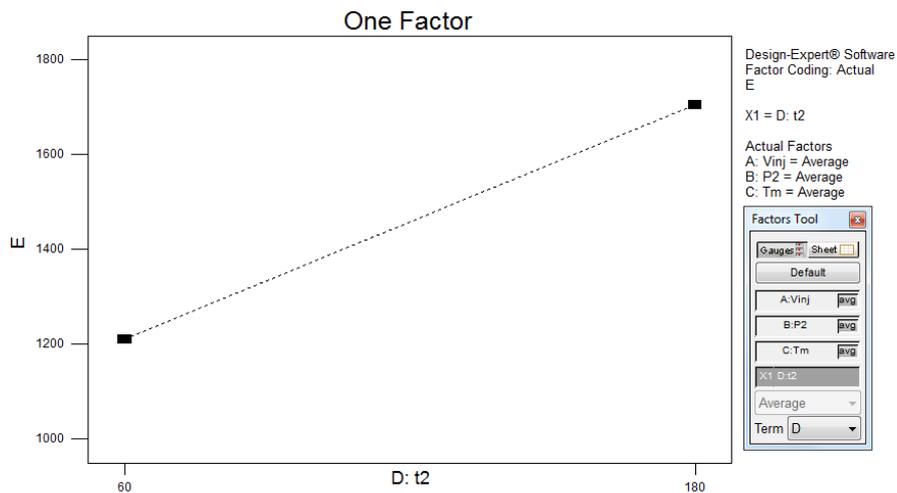


Figura 80 - Efeito do tempo de aplicação de segunda pressão em E para amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro

Na Figura 80 é possível confirmar que a variável apresenta uma influência bastante significativa. No entanto, o módulo de elasticidade é maximizado quando o tempo de segunda pressão é máxima. Ou seja, a possibilidade de o fundido estar em contacto com a fibra sobre a presença de pressão por tempos mais longos beneficia o módulo. Desta forma, a utilização do tempo de segunda pressão maior prima com o contacto prolongada entre a matriz e o reforço, permitindo que ocorra uma melhor impregnação.

No que concerne à interação entre variáveis, inicia-se o estudo da influência entre a velocidade de injeção e temperatura do molde.

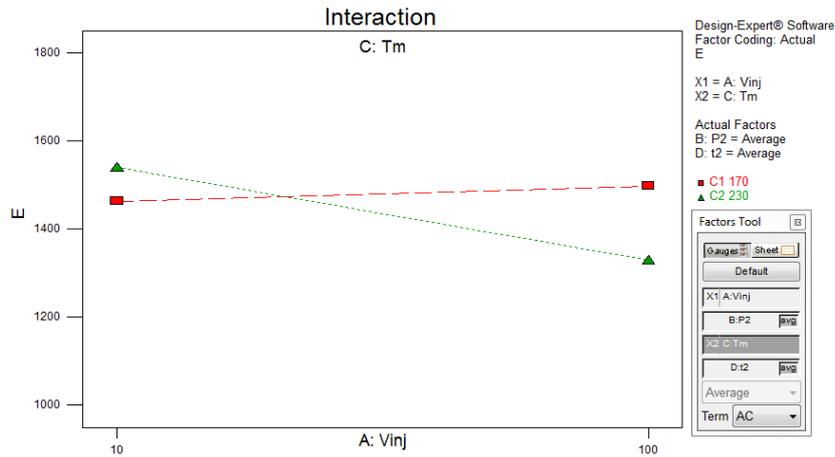


Figura 81 - Efeito da interação velocidade de injeção com temperatura do molde em E para amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro

Na Figura 81, é possível verificar a proporcionalidade inversa entre as variáveis, destacando-se a velocidade de injeção mínima com e a temperatura do molde máxima. Esta interação é influenciada pelo choque menos acentuado entre as fibras e o fundido, que minimiza o envolvimento dos filamentos e favorece a penetração do reforço, dada a menor velocidade de injeção. Já a temperatura do molde máxima diminui a diferença entre a temperatura de fundido e do molde permitindo que o fundido apresente melhores índices de fluidez. Assim, esta combinação resulta numa melhor impregnação.

No entanto, é perceptível que a variação da velocidade de injeção com a temperatura do molde mínima não apresenta variações consideráveis no módulo de elasticidade.

Posto isto, é demonstrado o módulo de elasticidade (E) a nível individual, estando na Figura 82 os valores médios de cada amostra.

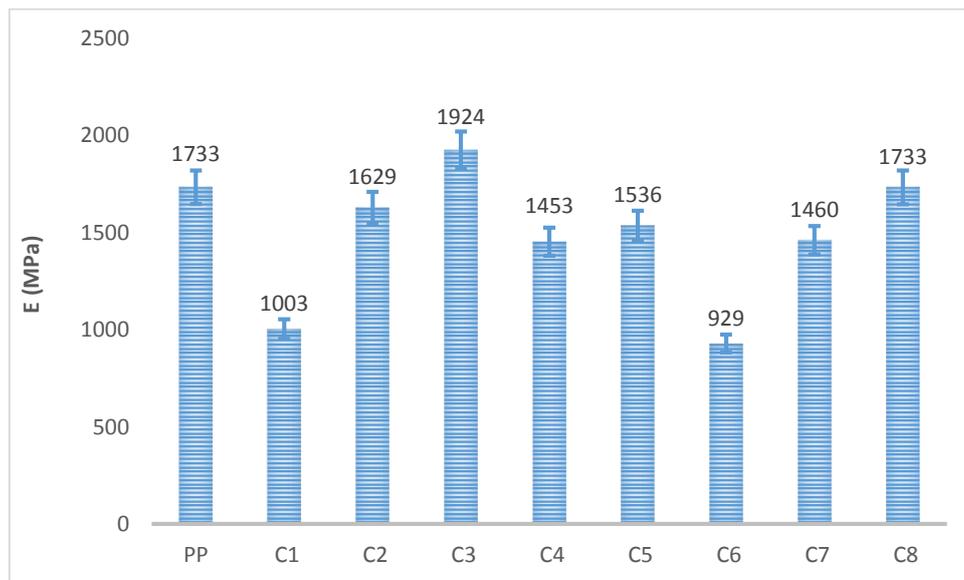


Figura 82 – Módulo de elasticidade (E) para todas as amostras com 1 fibra



É possível observar que o PP apresenta resultados superiores face ao panorama geral, dado ao módulo de elasticidade de 1733MPa. No entanto, a condição C3 consegue obter valores superiores, 1924MPa, sendo também é igualada pela condição C8, 1733MPa. A condição C3 vem a comprovar os resultados obtidos nas variáveis individuais na Figura 78, uma vez que foi processada com a segunda pressão e tempo de segunda pressão máximos e velocidade de injeção e temperatura do molde mínimas. No que concerne às restantes condições, nenhuma apresenta resultados superiores às do PP.

Já na Figura 83 são demonstradas as contribuições individuais e as combinações entre as variáveis de processamento inerente à tensão máxima.

	Term	Stdized Effects	Sum of Squares	% Contribution
	Intercept			
M	A-Vinj	2,12	9,03	16,39
M	B-P2	2,32	10,81	19,62
M	C-Tm	-0,78	1,20	2,18
M	D-t2	2,62	13,78	25,01
M	AB	-2,17	9,46	17,17
M	AC	0,025	1,250E-003	2,269E-003
M	AD	2,33	10,81	19,62

Figura 83 – Contribuição das variáveis e da interação destas na  $\sigma_{m\acute{a}x}$  para as amostras injetadas com uma camada de fibra de vidro

Pela Figura 83 verifica-se que a variável com maior contribuição na tensão é o tempo de segunda pressão, assumindo uma percentagem de aproximadamente 25%. Através do índice de efeito padronizado comprova-se que o maior valor da tensão máxima é proveniente do maior tempo de segunda pressão.

A segunda maior contribuição advém de uma variável individual e de uma interação entre variáveis, dado que ambas têm o mesmo valor percentual, 19,62%. A variável individual é a segunda pressão e a interação corresponde à junção da velocidade de injeção com o tempo de aplicação de pressão. Ambos os termos apresentam valor positivo no índice de efeito padronizado, sendo +2.32 e +2.33, respetivamente. Assim, a segunda pressão máxima permite que o fundido contacte as fibras com uma maior pressão, aumentando a possibilidade de penetrar as fibras. Já a combinação da velocidade de injeção com o tempo de segunda pressão origina melhores valores da tensão quando ambas as variáveis são máximas ou mínimas.

Relativamente às restantes variáveis individuais, está presente a velocidade de injeção com uma contribuição de 16,4%. Pelo seu índice de efeito padronizado a tensão é maximizada através da velocidade de injeção máxima. Já a temperatura do molde apresenta contribuições reduzidas, afetada pela temperatura mínima (-0,78).

Nas restantes interações entre variáveis, destaca-se a velocidade de injeção conjugada com a segunda pressão. Esta exhibe contribuições na ordem dos 17,2% com o sinal do índice de efeito negativo. Por fim e demonstrando que não há interação entre as variáveis, está a velocidade de injeção e a temperatura do molde.



De modo a confirmar os resultados obtidos na Figura 83, são apresentados as variáveis individuais e conjugas com maior contribuição. Assim, inicia-se a análise pela velocidade de injeção representada na Figura 84.

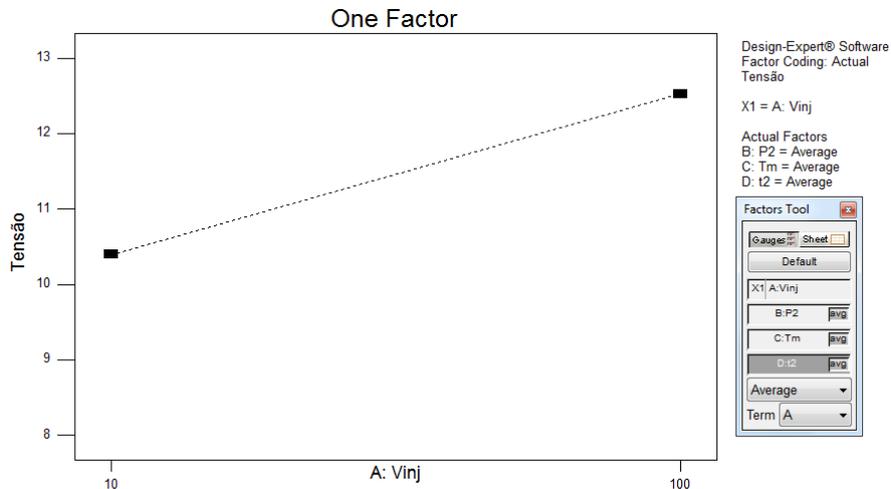


Figura 84 – Efeito da velocidade de injeção na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro

Analisando a Figura 84, é possível comprovar que valores máximos de tensão são atingidos quando a velocidade de injeção é máxima. Isto pode ser explicado com base no menor tempo a que o fundido está em contacto com as paredes do molde até contactar as fibras. Desta forma, contribui com uma diminuição da temperatura do fundido junto das paredes do molde. Já o fundido ao contactar o reforço com velocidades maiores, irá criar maior pressão permitindo uma melhor penetração e envolvimento das fibras.

Relativamente à Figura 85 é demonstrado o efeito da segunda pressão no valor da tensão.

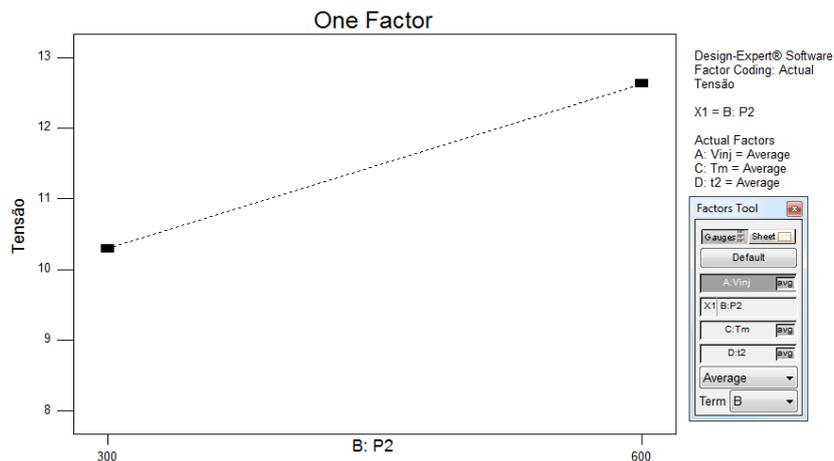


Figura 85 – Efeito da segunda pressão na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro

Através da Figura 85 é comprovado que o melhor valor de tensão é obtido pela pressão máxima, tal como mencionado na Figura 83. Pois, quando é aplicada uma maior força, o fundido é forçado a penetrar a fibras obtendo-se uma melhor impregnação.



Para a última análise das variáveis individuais é demonstrado o efeito do tempo da segunda pressão através da Figura 86.

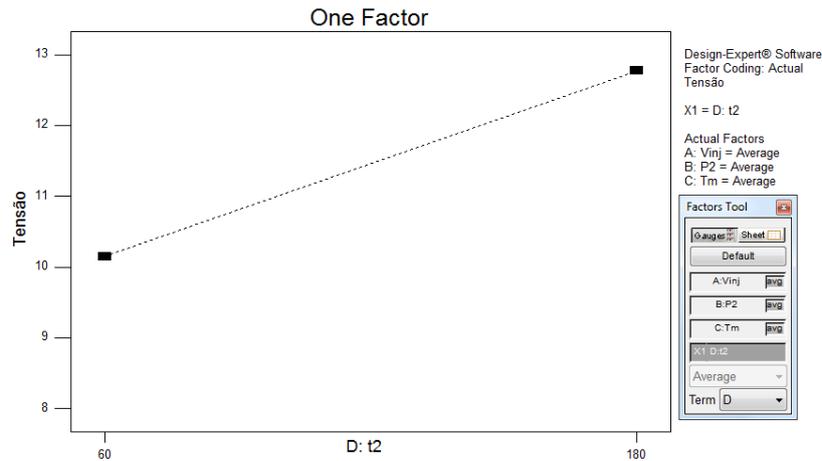


Figura 86 – Efeito do tempo de aplicação da segunda pressão na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro

Pela Figura 86 é possível comprovar que o tempo de segunda pressão máximo permite maximizar os valores de tensão. Este acontecimento é fundamentado por uma compactação mais longa, inerentes a maiores tempos do fundido a contactar as fibras sobre a forma de pressão.

Terminada a análise do efeito das variáveis individuais, estudar-se-á agora a influência que a junção dupla de variáveis pode ter. Assim, inicia-se a análise pela combinação da velocidade de injeção com a segunda pressão, Figura 87.

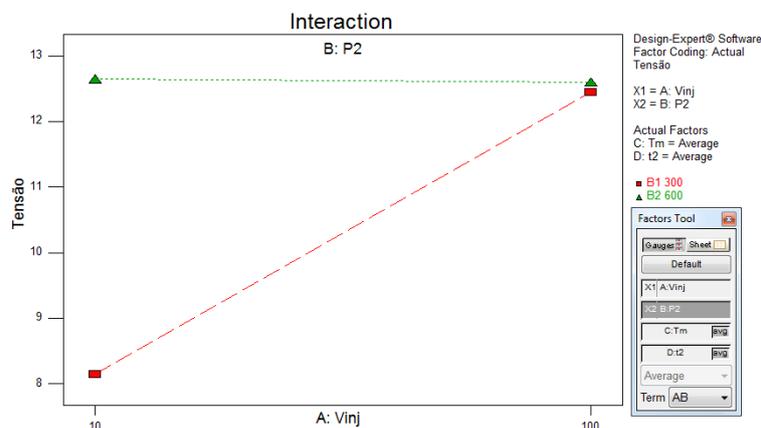


Figura 87 – Efeito da combinação velocidade de injeção com segunda pressão na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro

Através da Figura 87, verifica-se que o aumento da segunda pressão, conjugado com a velocidade de injeção mínima permite obter o valor máximo de tensão. Esta conclusão vem a comprovar o sinal negativo do índice de efeito padronizado mencionado na Figura 83. Este resultado é devido a uma penetração mais minuciosa do fundido, inerente à reduzida velocidade de injeção, que quando combinada com uma maior



pressão, o contacto da matriz sobre o reforço apresenta uma melhor impregnação. De realçar, que a tensão máxima é sempre atingida para os valores de segunda pressão máximos.

Já a interação da junção da velocidade de injeção com o tempo de segunda pressão é demonstrado na Figura 88.

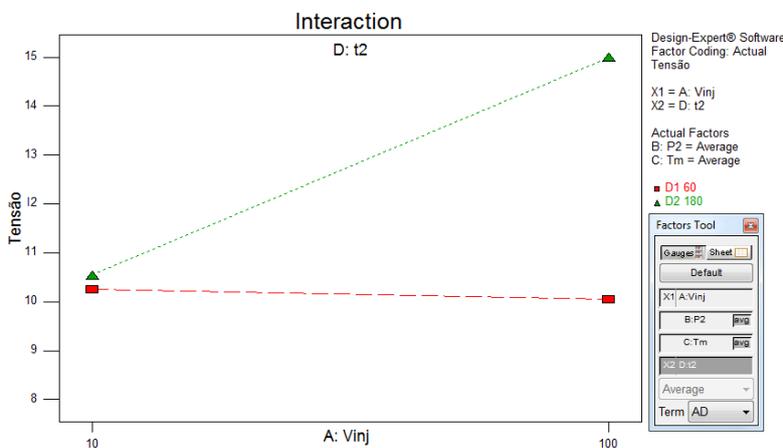


Figura 88 – Efeito da combinação velocidade de injeção com tempo de segunda pressão na tensão máxima das amostras de 1 camada de fibra de vidro

Na Figura 88, é possível verificar que a maximização de ambas as variáveis permite obter o valor máximo de tensão, comprovando o sinal do índice de efeito da Figura 83. A velocidade de injeção máxima permite que o fundido seja menos afetado pelas temperaturas das paredes do molde. Assim, a temperatura média da frente de fluxo é maior e apresenta maior fluidez ao contactar as fibras. A maior velocidade de injeção permite ainda o contacto com as fibras sobre maior pressão, ocorrendo uma maior abertura do roving que facilita a penetração do fundido. Já o tempo máximo da segunda pressão permite que o fundido esteja em contacto com as fibras por tempos mais longos, o que favorece também a penetração e origina uma melhor impregnação.

Para finalizar o estudo da tensão máxima, são apresentado na Figura 89 os valores médios atingidos em cada condição.

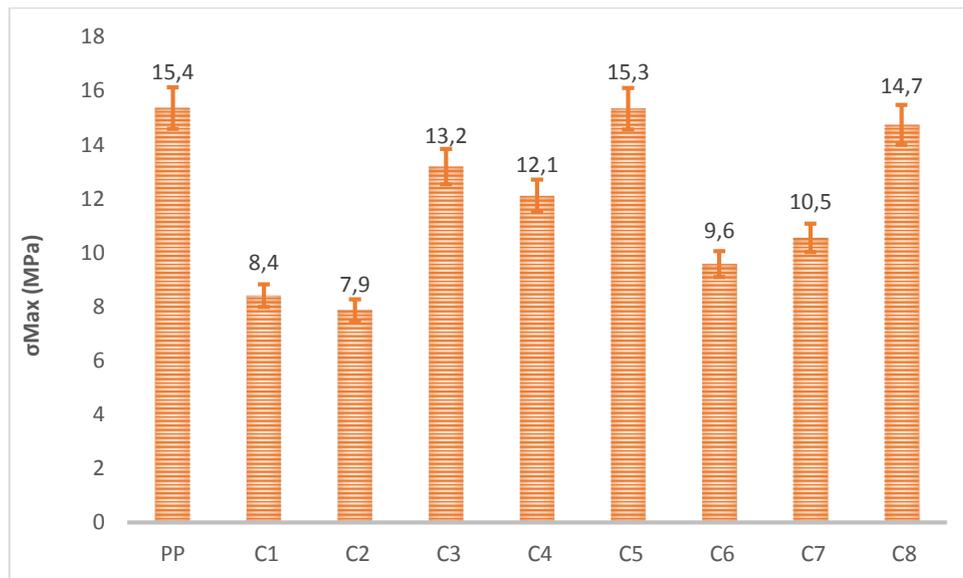


Figura 89 – Tensão máxima para todas as amostras com 1 fibra

Por análise da Figura 89, é verificada a ausência de condições com valores de tensão superiores ao do PP. No entanto, a condição C5 apresenta valores muito próximos, com uma diferença de apenas 0,1MPa.

A ausência de resultados superiores ao do PP, tanto na tensão máxima como no módulo de elasticidade, advém da presença de vazios nos provetes. Este defeito originou a existência de pontos frágeis nos provetes resultando em propriedades inferiores.

#### - Polipropileno com duas camadas de fibra de vidro contínua

A injeção de amostras com duas camadas de fibra contínuas (grupo D) apresenta diferentes condições de processamento. Desta forma, o ensaio de tração tem como objetivo o estudo da influência que a temperatura do molde e tempo de segunda pressão exibem nas propriedades mecânicas.

Assim, o estudo do ensaio de tração inicia-se Figura 90, onde são demonstrados o desempenho das amostras com duas camadas de fibra de vidro.

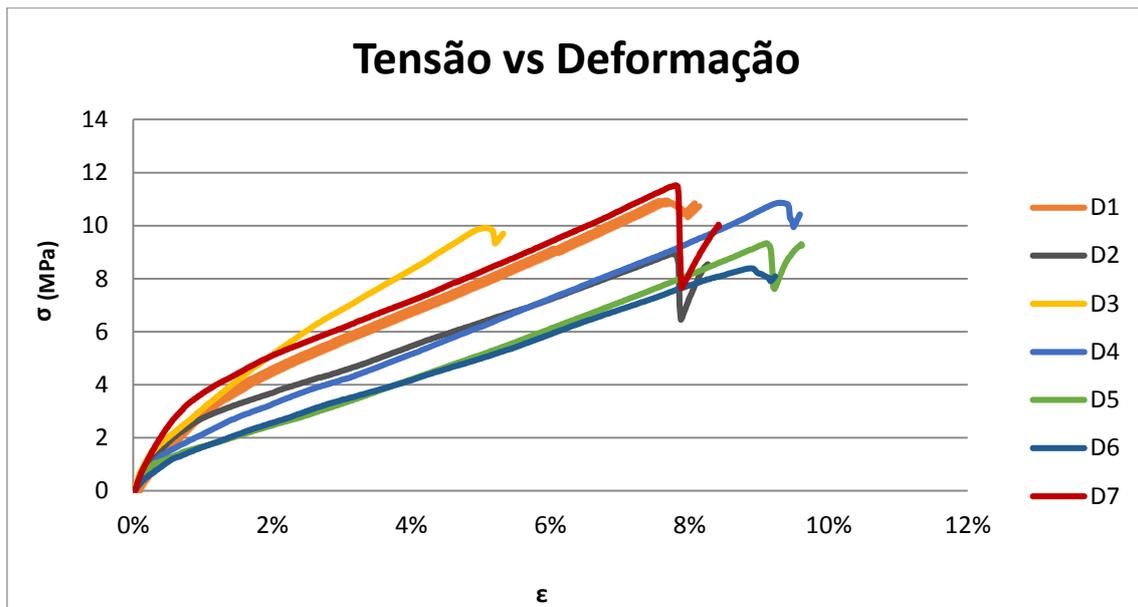


Figura 90 – Resultados dos ensaios de tração dos compósitos de PP com 2 camadas de fibra

Relativamente à Figura 91, é verificável a presença de um comportamento similar entre as amostras.

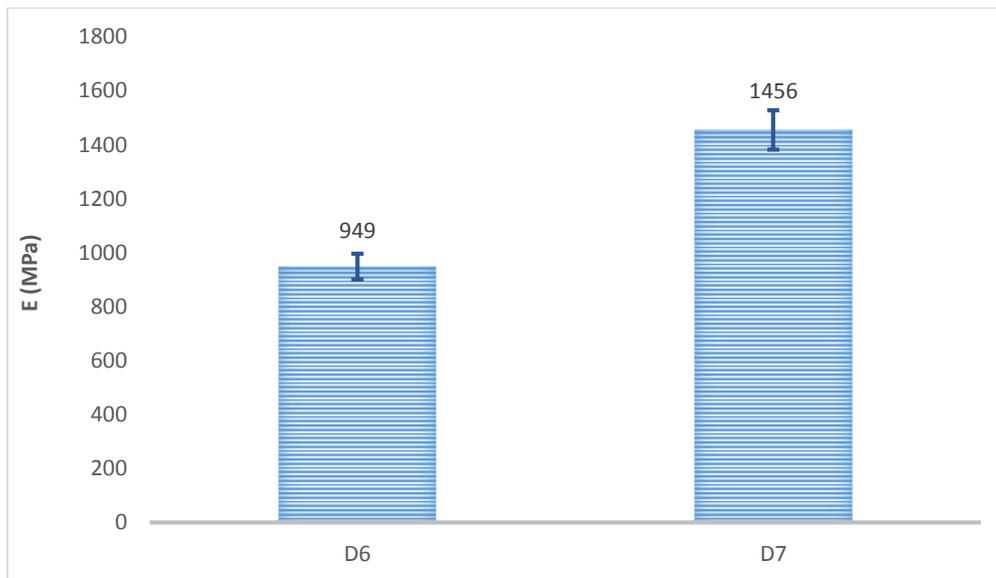
Contudo, a nível do comportamento elástico, são ligeiras as diferenças entre as amostras, como é o caso de D3 e D7. Estas destacam-se com a presença de maior linearidade entre a tensão e a deformação na parte inicial da figura, onde demonstram um declive maior.

Comparativamente ao comportamento plástico, caracterizado pela tensão máxima, as amostras que mais se evidenciam são D7 e D4. Ambas as condições são representadas, nas suas curvas, pelo maior pico de valores.

### *Temperatura do Molde*

Para o estudo individual da temperatura do molde, as amostras em análise são D6 e D7. Ambas as amostras apresentam o mesmo valor de velocidade de injeção (30mm/s), de segunda pressão (300bar) e do tempo de segunda pressão (60s). Já a temperatura do molde da amostra D6 é de 170°C e da amostra D7 de 210°C.

A primeira componente em estudo é o módulo de elasticidade adquirido pelas amostras, onde são apresentados na Figura 92 os valores médios.



**Figura 92 – Valores de E para amostras a 170°C e 210°C, D6 e D7**

Através da Figura 92 é notória a influência do aumento da temperatura do molde, apresentando uma diferença superior a 500Mpa. O valor máximo é assim atingido pela presença da temperatura do molde máxima.

A utilização da temperatura do molde máxima permite minimizar a diferença entre a temperatura do molde e do fundido, ocorrendo a diminuição do choque termico do fundido ao contactar o molde. Desta forma, o fundido apresenta uma maior temperatura e conseqüentemente menor viscosidade e maior fluidez. Na presença de maiores índices de fluidez a penetração das fibras é beneficiada ocorrendo uma melhor impregnação.

Posto isto, é analisada a tensão máxima, onde é possível visualizar na Figura 93 os valores médios das duas amostras.

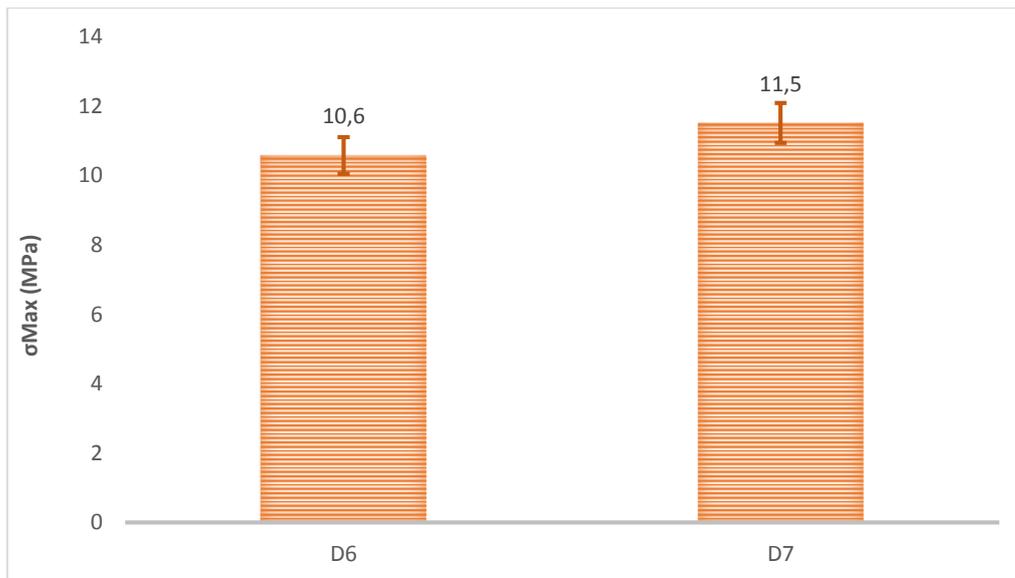


Figura 93 – Valores de  $\sigma_{\text{Max}}$  para amostras a 170°C e 210°C, D6 e D7

Pela Figura 93 é visível que a tensão máxima é obtida, novamente, pelo aumento da temperatura do molde, sendo que a análise é paralela e coincidente com a análise realizada no módulo de elasticidade. Ou seja, a minimização da diferença de temperaturas entre o molde e fundido representa-se pela diminuição do choque térmico do fundido e melhores índices de fluidez. Desta forma, obtém-se uma melhor impregnação das fibras, e quanto maior a impregnação maior as propriedades do compósito.

De salientar que os resultados da Figura 92 e da Figura 93 são comprovados pela caracterização da microestrutura, Figura 75. É verificável que a presença da temperatura do molde máxima se obtém uma melhor penetração e envolvimento das fibras que resulta numa melhor impregnação.

#### *Tempo de Segunda Pressão*

O estudo do tempo de segunda pressão consiste na análise das primeiras seis condições do grupo D, ou seja, de D1 a D6. Todas as amostras são processadas com a velocidade de injeção de 30 mm/s, a temperatura do molde a 170°C e a segunda pressão de 300bar. Já a variação do tempo de segunda pressão resulta de um aumento de 10segundos para cada condição. Portanto, a condição D1 é realizada com um tempo de segunda pressão equivalente a 10segundos e a condição D6 de 60 segundos.

Inicia-se o estudo do tempo de segunda pressão através da análise dos valores médios do módulo de elasticidade atingidos para cada condição, Figura 94.

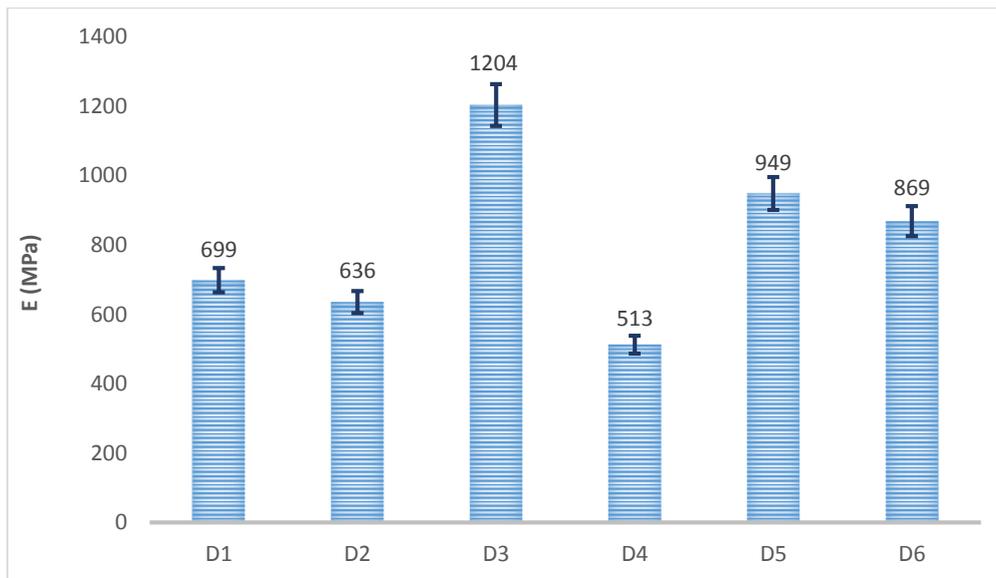


Figura 94 – Valores de E para amostras segundo tempo de aplicação de segunda pressão

Pela Figura 94 é possível concluir que o maior módulo de elasticidade é atingido pela amostra D3 (1204MPa), seguida da amostra D5 (949MPa), tal como mencionado na análise da Figura 90. A caracterização da microestrutura também vem a suportar o valor máximo obtido na amostra D3 pela Figura 73.

No estudo da tensão máxima, são apresentados na Figura 95 os valores médios obtidos em cada amostra.

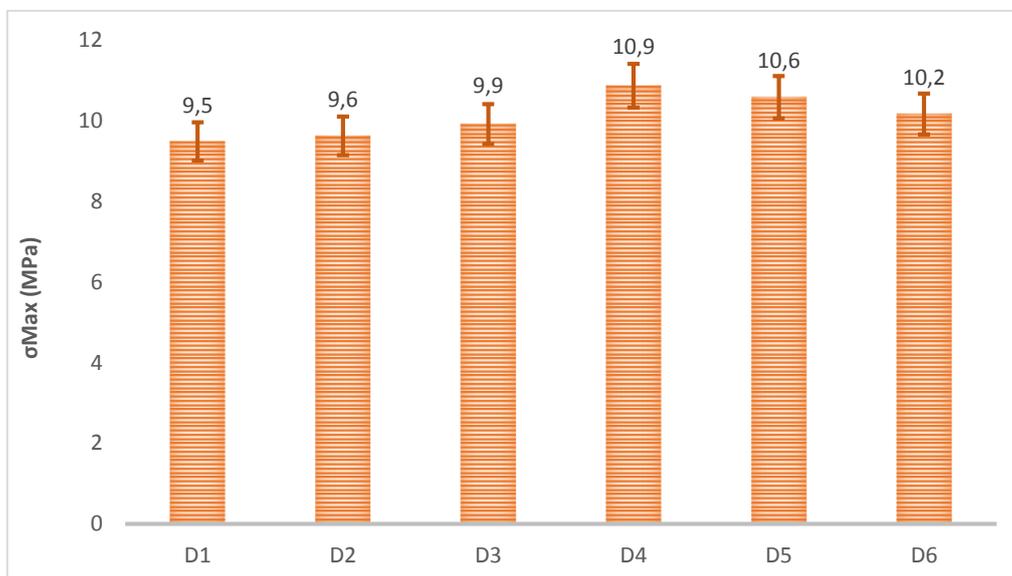


Figura 95 – Tensão Máxima para as amostras de duas fibras

Pela Figura 95 é possível concluir que os melhores resultados são obtidos pela amostra D4, que corresponde ao tempo de segunda pressão de 40 segundos. No entanto, a amostra D5 demonstra valores muito similares a D4, com uma diferença apenas de 0.3MPa.



A Figura 95 vem a comprovar os resultados proveniente de caracterização da microestrutura, Figura 74, onde se esperava que a amostra D4 se destaca pela estrutura apresentada.

Em ambos as propriedades em estudo, módulo de elasticidade e tensão máxima, a segunda melhor amostra foi representada por D5. Tal como as amostra D3 e D4, esta vem a comprovar os resultados presentes na Figura 73.



### 5. Conclusões

*“Este trabalho teve como principal objetivo o estudo e avaliação experimental da tecnologia IMR, nomeadamente estudar a impregnação de reforços de fibras de vidro contínuas com matrizes termoplásticas, polipropileno, através da utilização da moldação por injeção e moldação por compressão a quente. Assim, no presente capítulo irão ser apresentadas as principais conclusões deste trabalho.”*





Este trabalho teve como principal objetivo o estudo e avaliação experimental da tecnologia IMR. Pretendeu-se ainda estudar a impregnação de fibras contínuas secas com matrizes termoplásticas através da utilização da moldação por compressão a quente e por injeção. De salientar que, o conjunto matriz termoplástica – reforço de fibra contínua utilizado ao longo de todo o estudo foi o Polipropileno e a Fibra de Vidro (PP/FV).

O primeiro objetivo, ao qual se tentou responder, surgiu com a necessidade de analisar e avaliar profundamente as tecnologias e processos, numa perspetiva de gerar conhecimentos necessários à vertente experimental. Foi feita também uma análise e revisão de patentes existentes nesta temática. Através da realização de uma revisão bibliográfica sobre o estado atual da arte conclui-se que, apesar de os compósitos não terem surgido na atualidade dos nossos dias, e serem dos materiais mais antigos da história, a sua utilização na injeção não é ainda significativa a nível industrial.

Esta realidade deve-se ao facto do seu manuseamento ser ao nível industrial ainda muito inconstante e complexo. Ou seja, as condições ideais de processamento, bem como, os melhores processos para se transformar este tipo de materiais em produtos acabados, não são ainda uma realidade industrial, devido às exigências em termos de temperaturas e pressões que estes processamentos impõem. A carência de condições ideais vem, ainda, da complexidade de se obter uma válida impregnação de fibras secas contínuas na injeção. O grande obstáculo advém da dificuldade de impregnar reforços secos através materiais termoplásticos, que apresentam viscosidades bastantes superiores aos termoendurecíveis utilizados nos compósitos convencionais.

É ainda de realçar que, aquando à realização da revisão do estado da arte, foi extremamente difícil encontrar trabalhos já desenvolvidos e com alguma aplicabilidade industrial. Assim, o trabalho que tem vindo a ser desenvolvido na área em questão ainda se encontra numa fase muito embrionária, sem a presença de qualquer patente.

Através dos ensaios experimentais de processamento e de caracterização, foi possível concluir que:

1. Número de camadas de fibra na constituição do material PP/FV:

Relativamente ao número de camadas presentes nas amostras em estudo é possível concluir que, independentemente da propriedade analisada, os compósitos com maior fração volúmica de fibra apresentam melhores resultados. Ou seja, os compósitos com o maior número de camadas de fibra de vidro beneficiam de melhores propriedades. Isto deve-se ao facto das fibras apresentarem propriedades superiores às do termoplástico. Desta forma, a combinação de ambos os materiais com maior quantidade de fibra origina um compósito com propriedades finais melhores.

2. Variável de processamento “temperatura do fundido”:



A influência que esta condição apresenta a nível individual, pouca importância demonstra nas amostras com uma fibra de vidro. No entanto, a tensão máxima é melhorada pela diminuição da temperatura de fundido, mas de forma pouco significativa

Nos compósitos com quatro camadas há uma oscilação do valor a tomar. No caso do módulo de elasticidade, o seu valor máximo é quando há uma diminuição da temperatura de fundido. Já para a tensão máxima, onde a variável apresenta maior contribuição, a temperatura deve ser maior. Assim, possibilita que o fundido apresente uma menor viscosidade e conseqüentemente maior fluidez, beneficiando numa maior capacidade de impregnação.

### 3. Variável de processamento “temperatura do molde”:

Independentemente do número de camadas do compósito, a temperatura do molde apresenta uma grande contribuição no valor obtido.

O aumento das propriedades verifica-se quando a temperatura do molde é maior. Pois, com o aumento da temperatura do molde a diferença entre a temperatura do fundido e do molde é minimizada, permitindo que o fundido sofra uma descida de temperatura menos acentuada e repentina. Assim, o fundido contacta as fibras à temperatura próxima de fundido, traduzindo-se em índices de fluidez mais elevados. Inerente aos melhores índices de fluidez está a melhor capacidade do fundido penetrar as fibras, resultando em melhores propriedades.

### 4. Variável de processamento “tempo de aplicação de pressão”:

Tal como na temperatura de fundido, o tempo de aplicação para os provetes de uma fibra, apresenta uma contribuição pouco significativa. No entanto, tende a exibir melhores propriedades, para ambas as propriedades mecânicas, quando no processamento o tempo de aplicação de pressão foi maior.

De forma mais representativa verifica-se para as amostras de quatro fibras que os valores máximos das propriedades são atingidos quando os tempos de pressão são menores.

### 5. Conjunto das condições ideais de processamento:

No fim da realização da moldação por compressão a quente, é de notar que o grupo de condições que melhores propriedades apresentam, para uma fibra de vidro, variam consoante a propriedades em análise.

Para o módulo de elasticidade, o conjunto das variáveis operatórias ideais é constituído pela minimização da temperatura de fundido e do tempo de aplicação de pressão, com a temperatura do molde maximizada. Já para a tensão máxima, o que favorece esta propriedade é maximização de todas as variáveis operatórias.

Nas amostras constituintes de quatro camadas, a variável tempo de aplicação de pressão maximizada favorece a as propriedades mecânicas. Relativamente à temperatura de fundido, esta deve ser minimizada,



e a temperatura do molde maximizada. Para o módulo de elasticidade apresenta tendência oposta, ou seja, a maximização da temperatura de fundido e a minimização da temperatura do molde favorecem esta propriedade

6. Impregnação obtida:

De acordo com o que foi mencionado anteriormente é possível afirmar que as amostras, sujeitas da combinação do reforço de fibra de vidro com a matriz termoplástica PP, apresentaram impregnação. No entanto, e como mencionado na comparação do módulo de elasticidade, a impregnação total teórica não foi atingida.

Na moldação por injeção, por sua vez, foram desenvolvidos compósitos com uma camada e duas camadas de fibra de vidro contínua secas. As variáveis de processamento usadas foram a temperatura do molde, 170°C ou 230°C; a velocidade de injeção, 10mm/s ou 100mm/s; a segunda pressão exercida, 300bar ou 600bar; e o tempo de aplicação desta segunda pressão, 60 ou 180segundos, a uma temperatura do fundido constante de 230°C.

Nas amostras com uma camada de fibra de vidro contínua, foram estudadas a influência que cada variável poderia ter na impregnação ocorrida do material e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas do produto injetado. Nas amostras com duas camadas de fibra, foram estudadas apenas a influência que a variável temperatura de molde, 170°C e 230°C, e tempo de aplicação da segunda pressão, 60segundos e 180 segundos. Já a segunda pressão foi mantida a um valor constante de 300bar e a uma velocidade de injeção de 30mm/s.

No entanto, devido à presença de vazios nas amostras, os resultados obtidos na injeção não são totalmente credíveis e aproximando-se assim dos valores alcançados no PP.

Assim através dos ensaios de caracterização, foi possível concluir que:

1. Variável de processamento “velocidade de injeção”:

Relativamente ao módulo de elasticidade apresenta melhores valores quando a velocidade de injeção é mínima. Em relação à tensão máxima, está melhora quando a velocidade de injeção é máxima.

2. Variável de processamento “temperatura do molde”:

Relativamente à temperatura do molde, esta veio a comportar-se na mesma ordem, tanto para as amostras com uma camada como para amostras com duas camadas fibras de vidro, representada pela temperatura mínima.

3. Variável de processamento “segunda pressão”:

A segunda pressão contribui para uma melhor obtenção de ambas as propriedades através da utilização de pressão maiores. A segunda pressão ao ser maximizada possibilitou que o contacto entre a matriz e o



reforço ocorre-se sobre maior força. Ao estar presente maior pressão sobre o fundido, a penetração dos filamentos da fibra é aumentada permitindo uma melhor impregnação.

#### 4. Variável de processamento “tempo de segunda pressão”:

Tanto para o módulo de elasticidade como para a tensão máxima, o tempo de segunda pressão que se destacou foi o tempo máximo. O prolongamento do tempo de aplicação consente maior tempo ao fundido para contactar a fibra sobre a presença de pressão. Deste modo, prima-se com uma melhor penetração.

Já para os provetes com duas camadas de fibra, há variação do tempo de segunda pressão. Para o módulo de elasticidade o tempo ideal é o intermédio, sendo de 30s. No entanto, a tensão máxima representa-se por outro valor intermédio mas superior, sendo, desta vez, de 40s de segunda pressão.

#### 5. Conjunto das condições ideais de processamento:

Do estudo referente à injeção, é possível concluir através do *software* de planeamento de experiências a condição ideal. No módulo de elasticidade é representada pela minimização da velocidade de injeção e da temperatura do molde e pela maximização da segunda pressão e tempo de segunda pressão. Relativamente à tensão máxima apresenta-se pela maximização da velocidade de injeção, da segunda pressão e tempo de segunda pressão e pela minimização da temperatura do molde. Às restantes condições apresenta-se pela maximização

Como é possível comprovar no módulo de elasticidade, as condições operatórias mencionadas referem-se à condição C3. No entanto, para tensão máxima esta condição já não foi realizada. Isto é devido ao uso de uma matriz Taguchi  $L_8$ , onde apenas é possível realizar oito experiências.

#### 6. Impregnação obtida:

Relativamente à impregnação obtida, esta ficou aquém da expectativa na medida que se idealizava obter propriedades relativamente superiores. Porém, algumas condições não foram alvo de estudo. A impregnação poderá tomar valores diferentes e superiores aos obtidos. Um outro problema observado foi a existência de vazios, que ocorreram durante o processamento.

Posto isto, não é ainda possível responder ao objetivo que incidia na definição de um novo processo através da conjugação de duas áreas de saber distintas os CFRT's e a moldação por injeção.

Com o processo de moldação por injeção os resultados foram aquém dos esperados devidos provavelmente à existência de vazios presentes nas amostras. No entanto, o facto de se ter obtido resultados próximos das amostras PP/FV, e com valores superiores, ao PP, os resultados obtidos são um bom indício.

Relativamente às dificuldades encontradas na componente experimental conclui-se que o processo por compressão a quente poderá ser interessante se houver alterações ao molde usado. Esta pode-se destacar pela ejeção, sendo esta a principal dificuldade obtida. Já no processo por moldação por injeção, a melhoria



do molde também deve ser uma medida a ter em conta. Neste caso deve-se melhorar o isolamento da junta da bucha e no redimensionamento do sistema de fixação das fibras. No que consta a junta do molde, apresentou folgas após alguns ensaios que afetavam diretamente o bom funcionamento do ciclo, bem como na obtenção de amostras com melhores propriedades. Contudo, uma das causas para o desgaste da junta está relacionado com o posicionamento da fibra. Por vezes, tendia a ficar fora dos limites da bucha. Este acontecimento deve-se aos limites dos pernos de fixação estarem muito próximo dos limites da bucha. Como tal, também a melhoria do sistema de fixação das fibras pode levar a melhores resultados.



### 6. Trabalhos Futuros

*“Durante a realização do presente projeto emergiu a existência de pontos frágeis, transformando-se estes em oportunidades de melhoria e de continuação do estudo, acreditando-se que trarão mais-valias à ciência e avanços à área de estudo em questão.”*





Durante a realização do presente projeto, deparou-se com a existência de alguns pontos frágeis. A melhoria e/ou o desenvolvimento alternativos poderiam tornar-se numa mais-valia para o estudo em questão.

Como tal, uma das alternativas que surge interesse de realização é uma nova técnica de processamento, a moldação por injeção-compressão. Com a realização das técnicas de moldação por compressão a quente e por injeção pressupõem-se que o aparecimento da moldação por injeção-compressão seria conveniente, na medida que consta com a combinação das vantagens de ambos os processos. Para tal, já foi dimensionado um molde, Anexo VI, que possibilitará empregar esta técnica num estudo futuro próximo e que vise o objetivo de impregnação de fibras secas contínuas com a utilização de termoplásticos.

Relativamente às melhorias dos aspetos inerentes ao processo de injeção, propõem-se a melhoria ou redimensionamento do sistema de fixação das fibras. Esta necessidade advém dado o atual sistema apresentar dificuldades no decorrer do processo como a colocação das fibras. Este sistema deve primar pela melhoria da facilidade e consequentemente pela rapidez da colocação das fibras, bem como, garantir o posicionamento igual do reforço em todos os ciclos. Pois orientações diferentes resultam em propriedades diferentes.

Em relação aos materiais empregues no projeto, surge a ideia da utilização de fibras de vidro aquecidas. Uma vez que se deduz que ao aumentar a temperaturas das fibras irá permitir que o choque térmico reforço/matriz seja minimizada e que possibilite, desta forma, uma melhoria na impregnação das fibras.

Por fim, e para ambas as técnicas utilizadas, suscita a necessidade de melhoramento dos moldes, como já mencionado no capítulo anterior. No caso da moldação por compressão a quente, surge a necessidade de melhorar o sistema de ejeção. Este foi o aspeto mais negativo e que maior dificuldade trouxe ao processo. Já na moldação por injeção é necessário melhorar ou retificar o sistema da junta da bucha. Este veio apresentar imperfeições no decorrer dos ensaios com rebarbas e, a nível interno, com vazios nas amostras injetadas.

Acredita-se assim, que estas oportunidades de melhoria/continuação do estudo serão uma mais-valia à ciência que possibilitaram melhores avanços à área de estudo em questão.





## REFERÊNCIAS

- [1.] **Chris Reiter**, “BMW i3 feito com fibra de carbono traz mudança na indústria”, *Revista Exame*, Novembro de 2013.
- [2.] **GAY, D.** - Matériaux Composites - Editions Hermès, Paris, 1991.
- [3.] **Renata Carla T. S. Felipe**, “Materiais Compostos”, *Centro Federal de Educação Tecnológica do RN*.
- [4.] **MENDONÇA, P. T. R.** – Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiches – Barueri, SP: *Manoele*, 2005.
- [5.] **CALLISTER, Jr. William D.**. Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução, 7ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [6.] **Andreza Menezes Lima, João Victor Ferreira Carvalho, Thiago Liberato Girão**, “Introdução à Compósitos”, *Trabalho de Pesquisa*, Novembro 2008.
- [7.] **João Francisco Machado Gomes da Silva**, “Pré-impregnados de Matriz Termoplástica: Fabrico e Transformação por Compressão a Quente e Enrolamento Filamentar”, *Dissertação*, 2005.
- [8.] **Mirabel C. Rezende**, “O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial”, *Ciência e Tecnologia*, vol 10, nº 2, 2000.
- [9.] **Enrico Mangino, Joe Carruthers, Giuseppe Pitarresi**, “The future use of structural composite materials in the automotive industry”.
- [10.] **Manuel Freitas, Arlindo Silva**, “Materiais Compósitos”, *Desing Studio*
- [11.] *in “Carros de Carbono”, Super Interessante: Tecnologias.*
- [12.] **António Gonçalves, Nuno Ferreira**, “Inversão interna de tubos em alumínio - aplicação num chassis automóvel”, *Tecnologia Mecânica*, Maio 2005.
- [13.] **José Carlos Pereira**, “Curso de Projecto Estrutural com Materiais Compostos”, *Grante*.
- [14.] **Francisco Satkunas**, “Fibra de carbono na mobilidade”, *Trabalho de Pesquisa*
- [15.] **Klaus Friedrich & Abdulhakim A. Almajid**, “Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications”, *Appl Compos Mater*, DOI 10.1007/s10443-012-9258-7, Janeiro 2012.
- [16.] **Isabel Carvalho**, “A utilização de termoplásticos e compósitos na indústria automóvel”, *Programa PRODEP*, Setembro 1993.
- [17.] **Michael P. Knox, Saint-Gobain Vetrotex America, Inc.**, “Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites in the Automotive Industry”



- [18.] **Alberto Antoniazzi**, “Applications of Carbon Fiber in the Construction Industry Mechanics”, *Trabalho de Pesquisa*, Setembro, 2009.
- [19.] **José Carlos Lopes da Rocha Ferreira**, “Postes Estruturais em Sistemas Compósitos Comparação de tecnologias”, *Inovação para Postes de matriz termoplástica (towpreg)*, Dezembro 2009.
- [20.] **HEXCEL CORPORATION**. Hexcel prepreg technology, Fevereiro 2010.
- [21.] **PARDINI, L. C.; PERES, R. J. C.**, Tecnologia de fabricação de pré-impregnados para compósitos estruturais utilizados na indústria aeronáutica. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, p.32-42, 1996.
- [22.] **Evandro Luís Nohara**, “Estudo do Processamento de Compósitos Termoplásticos a partir de Pré-impregnados PEEK/Fibra de Carbono por Moldagem por Compressão a Quente”, *Dissertação*, Taubaté-SP 2010.
- [23.] **P. Mitschang\*, M. Blinzler, A. Wo” ginger**, “Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends”, *Composites Science and Technology*, 63 (2003) 2099–2110.
- [24.] **Maxwell Lambda**, “Técnicas de Reforço com Materiais Compósitos em Estruturas de Concreto”, *PUC-Rio*, 0510727/CA.
- [25.] **Alonso Pinho Ribeiro, Bruno Turmina Guedes, Fábio José Camargo, Gregori Picoletto Conterato**, “Compósitos Reforçados com Partículas e Compósitos Reforçados com Fibras”, *Trabalho de Pesquisa*, 2012.
- [26.] **Paulo Sá**, “Estratégia dos Grandes Grupos no Domínio dos NovosMateriais”, *Cetem*, 0103-6319.
- [27.] **Marcelo Ribeiro de Araujo, Ricardo Manfredi Naveiro**, “Desenvolvimento de Novos Materiais e Novos Produtos na Indústria Automobilística”, CEP: 21945-970.
- [28.] **Molded Fiber Glass Companies**, “Designing with Fiber Reinforced Plastic/Composites”, *Techniques & technologies for cost effectiveness*.
- [29.] **Francisco Sávio Gomes Pereira**, “Polímeros – Fundamentos Científicos e tecnológicos”, *Recife*, Outubro 2009.
- [30.] **COMPOSITES WORLD**, ENGEL desenvolvimento polimerização in-situ para permitir moldagem por injeção de formas de fibras contínuas, Janeiro 2013.
- [31.] **Isabel Maria de Barros**, “Modelação do comportamento térmico de moldes de injeção”, *Dissertação*, 1997
- [32.] **Ana Raquel Antunes Carvalho**, “Injeção de polímeros – Peças técnicas”, *Dissertação*, 2009
- [33.] **Daniel Amaral**, “DOE – Conceitos básicos”, 1999

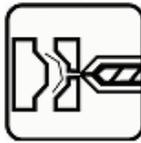


- [34.] Felipe H. de Oliveira<sup>1\*</sup>, Sandro C. Amico<sup>1</sup>, Ana L. Helfer<sup>2</sup>, André C. Garay<sup>2</sup>, “*Influência do teor de fibras na resistência short-beam em compósitos unidirecionais de caruuá ou vidro*”, Porto Alegre, 2011



## ANEXOS

### Anexo I – Ficha técnica do Polipropileno FPC 100



#### **SABIC® PP FPC100 Provisional** PP block copolymer FLOWPACT for Injection moulding

##### Description:

This grade has been developed as a new member of the SABIC® PP FLOWPACT range dedicated to the thin wall packaging market. It is nucleated and is characterized by a high crystallization temperature and excellent flow behaviour in combination with a stiffness to impact balance.

This grade was designed for high-speed injection moulding and it enables very cost efficient processing on the basis of easy mould filling and very short cycle times. It has a very good antistatic performance and permits easy demoulding.

This material is typically used in thin wall packing applications both for food and non-food segments. This includes yellow fats/margarine tubs, dairy packaging and housewares. The grade has an excellent dimensional stability what is crucial for the thin wall packaging market.

##### Health, Safety and Food Contact regulations:

Material Safety Data Sheets (MSDS) and Product Safety declarations are available on our Internet site <http://www.SABIC-europe.com>

The product mentioned herein is in particular not tested and therefore not validated for use in pharmaceutical/ medical applications.

##### Typical values

Revision 2011 0608

Properties	Unit (SI)	Values	Test methods
<b>Polymer properties</b>			
Melt flowrate (MFR) at 230 °C and 2.16 kg	g/10 min	100	ISO 1133
Density	kg/m <sup>3</sup>	905	ISO 1183
<b>Mechanical properties</b>			
Flexural test			ASTM D 790
Flexural modulus	MPa	1550	
Izod impact notched at 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	5	ISO 180/4A
at 0 °C	kJ/m <sup>2</sup>	3.5	
<b>Thermal properties</b>			
Heat deflection temperature at 1.80 MPa (HDT/A)	°C	60	ISO 75/A
at 0.45 MPa (HDT/B)	°C	110	ISO 75/B
Vicat softening temperature at 10 N (VST/A)	°C	147	ISO 306/A
at 50 N (VST/B)	°C	70	ISO 306/B



## SABIC® PP FPC100 Provisional

### PP block copolymer FLOWPACT for Injection moulding

#### Quality:

SABIC Europe is fully certified in accordance with the internationally accepted quality standard ISO9001.

#### Storage and handling:

Avoid prolonged storage in open sunlight, high temperatures (<50 °C) and/or high humidity as this could well speed up alteration and consequently loss of quality of the material and/or its packaging. Keep material completely dry for good processing.

**Disclaimer.** The information contained herein may include typical properties of our products or their typical performances when used in certain typical applications. Actual properties of our products, in particular when used in conjunction with any third party material(s) or for any non-typical applications, may differ from typical properties.

It is the customer's responsibility to inspect and test our product(s) in order to satisfy itself as to the suitability of the product(s) for its and its customers particular purposes. The customer is responsible for the appropriate, safe and legal use, processing and handling of all product(s) purchased from us.

Nothing herein is intended to be nor shall it constitute a warranty whatsoever, in particular, warranty of merchantability or fitness for a particular purpose.

SABIC Europe as referred to herein means any legal entity belonging to the SABIC Europe group of companies.

internet [www.sabic-europe.com](http://www.sabic-europe.com)  
email [pp.info@sabic-europe.com](mailto:pp.info@sabic-europe.com)



## Anexo II – Sensor Kistler 6190CA

### Pressure



### p-T-Sensor

Type 6190CA...

#### for Mold Cavity Pressure and Temperature with Front $\varnothing 4$ mm

Sensor for the combined measurement of mold cavity pressure up to 2 000 bar and contact temperature in the cavity during the injection molding of plastics. Design without diaphragm and with flat front.

- Pressure sensor with integral thermocouple for pressure and temperature measurement
- Mounting dimensions compatible with Kistler pressure sensors Types 6157B... and 6177A...
- Replaceable connecting cable

#### Description

The sensor for mold cavity pressure and temperature measurement has a front face of 4 mm diameter.

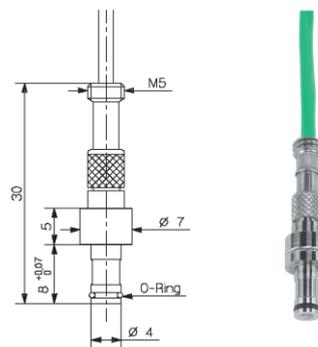
The pressure acts directly on the entire front face of the sensor and is transferred to the crystal force link, which produces an electric charge ( $pC = \text{picocoulomb}$ ) proportional to the pressure. This is converted by an amplifier into a voltage of 0 ... 10 V which is available at the amplifier output.

The contact temperature of the melt is measured on the front side of the sensor by a thermocouple pair Type K (NiCr-Ni). The front face of the sensor cannot be machined. The small sensor dimensions result in a quick temperature-sensor response time. The rugged combi-cable feeds both the pressure signal and the temperature signal to two connectors. The cable is screwed behind the sensor with a union nut and can be exchanged.

Sensors without connectors Type 6190CAG are available for multi-cavity molds. The charge cable can then be connected to the multi-channel connector Type 1708A... or 1710A... and the two temperature conductors to the temperature amplifier Type 2205A...

#### Application

The sensor measures the mold cavity pressure and the contact temperature of the molding in the cavity. It is suitable in industrial applications for optimising monitoring and controlling the injection molding of thermoplastics and elastomers. The additional temperature data provides valuable process information.



This is particularly useful in the analysis of the surface of the molding, as well as in the evaluation of knit lines in components with long flow paths.

#### Technical Data

Range	bar	0 .. 2 000
Overload	bar	2 500
Sensitivity	pC/bar	-9
Linearity, all ranges	%FSO	$\leq \pm 1$
Thermocouple Type K		NiCr-Ni
Leads		
positive	+	green
negative	-	white
Operating temperature range		
Mold (sensor, cable, connector housing)	$^{\circ}C$	*0 ... 200
Melt (at the front of the sensor)	$^{\circ}C$	<450
Insulation resistance		
at 20 $^{\circ}C$	$\Omega$	$>10^{12}$
at 200 $^{\circ}C$	$\Omega$	$>10^{12}$

\* During machine down-time, the mold temperature may be allowed to rise to 240  $^{\circ}C$  without damaging the sensor. However, measuring errors may occur.

6190CA\_000-680e-04\_11

**QUALITY MOLDING**  
powered by Kistler

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2008 .. 2011, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com  
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

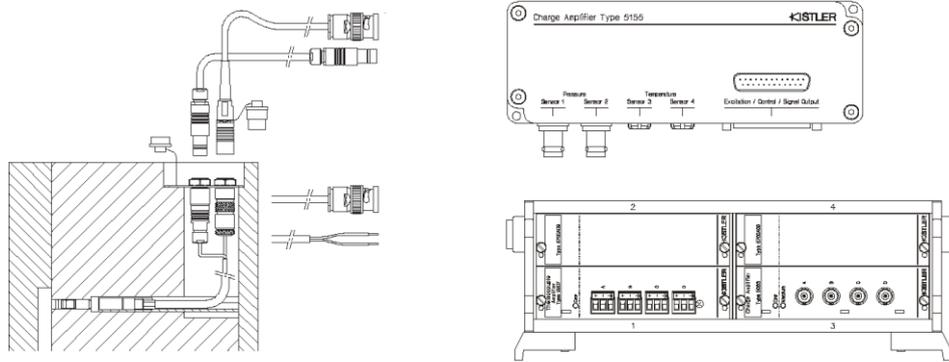
Page 1/4



p-T-Sensor for Mold Cavity Pressure and Temperature with Front  $\varnothing 4$  mm, Type 6190CA...

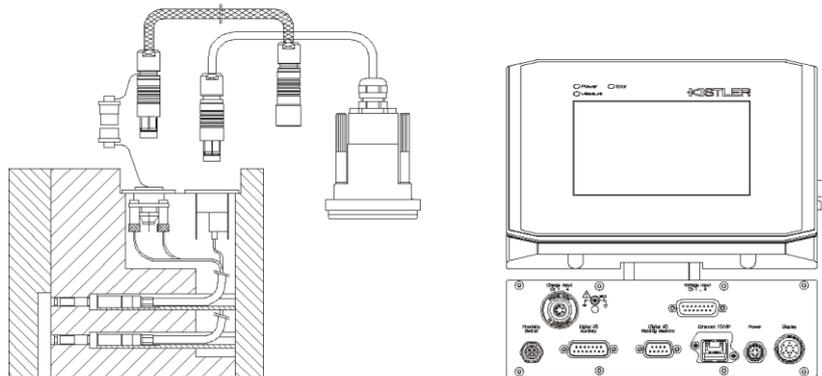
**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

**Cable and Amplifier for Measuring Chains with Sensor Type 6190CA...**



Cable Type 1667B... (BNC connector) for charge	Cable Type 1672B... (TNC connector) for charge	Compensating line Type 2295A... for temperature	Compensating line Type 2290A... (open ends) for temperature
Type 5155AxxBx/AxxDx	Type 5155AxxAx	Type 5155AxxAx/AxxBx	Type 2207A in Type 2859A...
Type 5063A1 in Type 2859.../2865...	Type 5155AxxCx	Type 5155AxxCx/AxxDx	Type 2207A in Type 2865A...

Fig. 1: Sensor Type 6190CA... with charge and temperature amplifier Type 5155A... or signal conditioner Type 2859A.../2865A...



4-channel cable Type 1995A... to connector Type 1708A... for charge	4-channel cable Type 1457A1A... to temperature amplifier Type 2205A... for temperature
Type 2869A0xx	Type 2869A1xx
Type 2869A1xx	

Fig. 2: Sensor Type 6190CA... with monitoring system CoMo Injection Type 2869A...

6190CA\_000-680e-04.11



p-T-Sensor for Mold Cavity Pressure and Temperature with Front  $\varnothing 4$  mm, Type 6190CA...

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

Mounting Examples

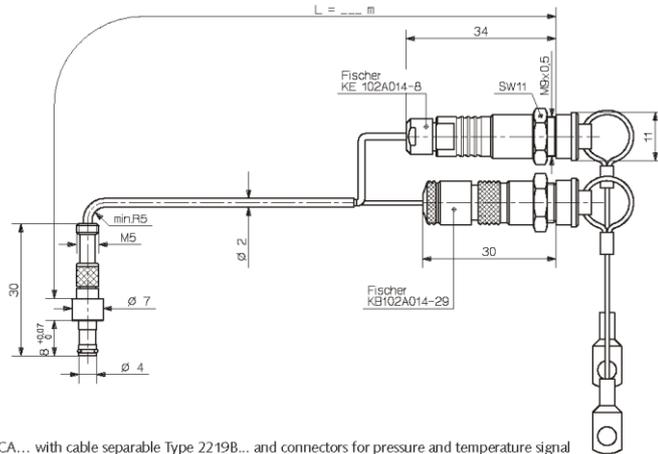


Fig. 3: Sensor Type 6190CA... with cable separable Type 2219B... and connectors for pressure and temperature signal

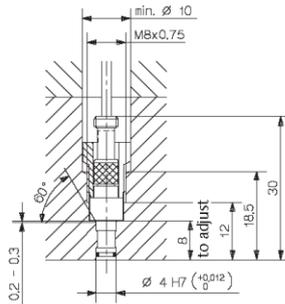


Fig. 4: Mounting with mounting nut Type 6457

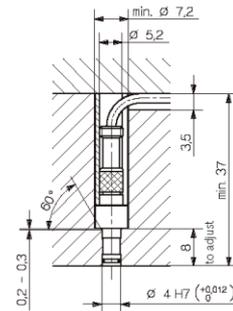


Fig. 5: Mounting with spacer sleeve Type 6459

6190CA\_000-680e-04.11

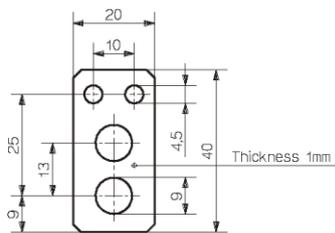


Fig. 6: Mounting plate Art. No. 3.520.1015



p-T-Sensor for Mold Cavity Pressure and Temperature with Front  $\varnothing 4$  mm, Type 6190CA...

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

#### Mounting

The sensor is normally installed in the mounting hole with a mounting nut Type 6457. A spacer sleeve Type 6459 can also be used. Since the sensor forms part of the cavity wall, it must be mounted in such a way that its front face is exactly flush. The sensor is therefore center aligned in the hole with 4mm/H7 diameter.

The cable must be mounted completely in the mold. The two connectors are attached in the mounting plate which is inserted in the mold. The multiconductor cable uses the single-wire technique, that is the pressure signal is fed via a single cable and the mold acts as a shield.

Accessories Included	Type/Art. No.
• Mounting nut	6457
• Mounting plate (only for sensor with cable)	3.520.1015
• Connector (charge)	5.511.364
• Connector (temperature)	5.511.246
• Cap	7.621.115
• Identification plate	3.520.1016
• O-ring	1100A57

Optional Accessories	Type
Sensor connecting cable with connectors as spare cable	
• Length l = 0,4 m	2219B0,4
• Length l = 0,8 m	2219B0,8
• Length l = 1,2 m	2219B1,2
• Length l = 1,6 m	2219B1,6
• Length l = 2 m	2219B2
• Length l = 5 m for special cable length	2219Bsp

Sensor connecting cable without connector as spare cable	
• Length l = 2 m	2219BG
• Length l = 5 m for special cable length	2219BG1

High temperature extension cable (pressure) Fischer SE102 A014 – BNC pos.	
• Length l = 2 m	1667B2
• Length l = 5 m	1667B5

High temperature extension cable (pressure) Fischer SE102 A014 – TNC pos.	
• Length l = 2 m	1672B2
• Length l = 5 m	1672B5

Temperature compensation cable for connection to Type 5155A...	
• Length l = 2 m	2295A2
• Length l = 5 m	2295A5

Optional Accessories	Type
Temperature compensation cable One way open ended	
• Length l = 2 m	2290A2
• Length l = 5 m	2290A5
• Extraction tool	1315A
• Socket wrench for mounting nut	1383
• Dummy sensor	6545
• Spacer sleeve (length l = 50 mm)	6459
Optional connectors and temperature amplifiers To be used only with Type 6190CAG/G1	
• 4-channel connector (charge)	1708A...
• 8-channel connector (charge)	1710A...
• 2-channel temperature amplifier	2205A...2...
• 4-channel temperature amplifier	2205A...4...
• Adapterplatte für 2 Stecker	5700A25
• Cable stripping tool	1367

Checking Tools	Art. No.
• Limit plug gage, diameter 4 H7	5.210.162
• Checking tool	7.110.300

#### Ordering Key

Cable Length	Type 6190CA
Length l = 0,4 m	0,4
Length l = 0,8 m	0,8
Length l = 1,2 m	1,2
Length l = 1,6 m	1,6
Length l = 2 m	2
Combi-cable with special length, specify cable length L in m (L <sub>min</sub> = 0,15 m/L <sub>max</sub> = 5 m)	sp
Sensor without connector, Cable length l = 2 m	G
Sensor without connector, Cable length l = 5 m	G1

6190CA\_000-680e-04.11

Page 4/4

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2008 ... 2011, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com  
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.





## Anexo IV – Molde da moldação por injeção

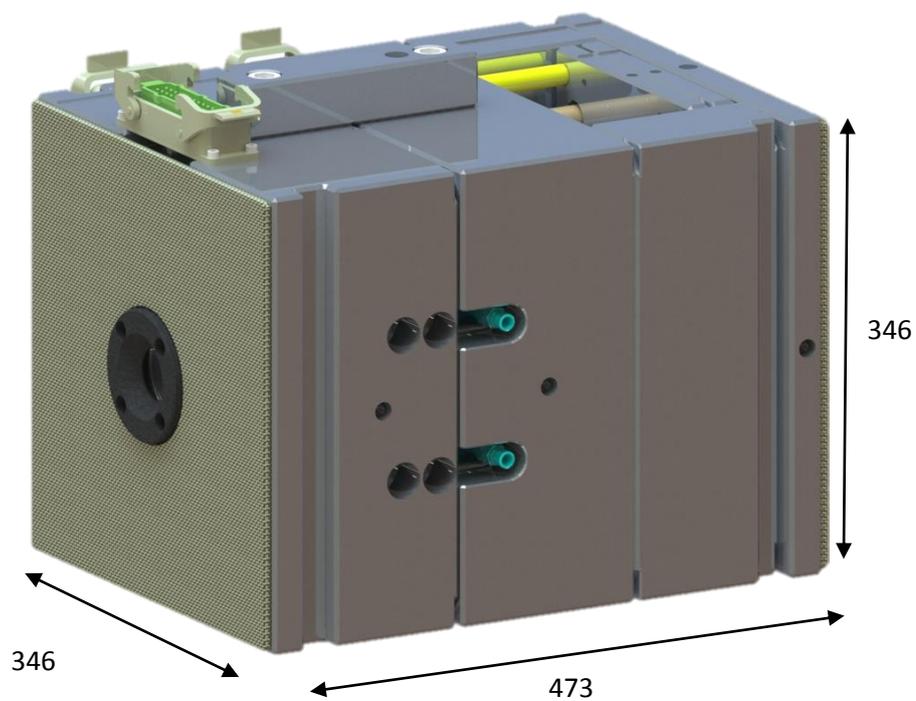


Figura 96 – dimensões do molde de injeção



## Anexo V – Gráfico tipo obtido pelo *software* Trapézio

### Título

Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo do ensaio	dve f50 f16_GL20_20130726_1 607.xtak	Nome do arquivo do método	dve f50 f16_GL20.xmak
Data do relatório	26-07-2013	Data do ensaio	26-07-2013
Modo de ensaio	Simples	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	2mm/min	Placa	Placa
Lote No:	4	Sub-Lote No:	1

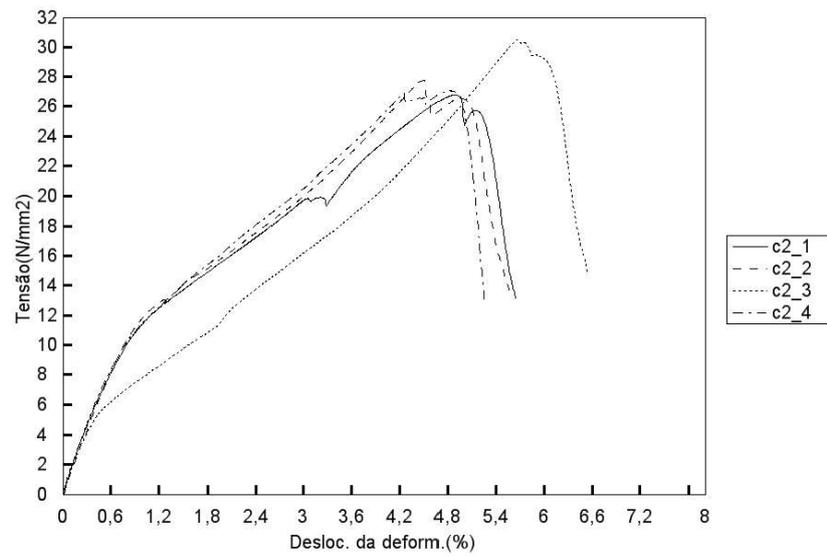
Nome	Elástico	Máx_Força	Máx_Tensão	Máx_Ext.2 (Deformação)
Parâmetros	Ext.1(Deformação)	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	0,1 - 0,3 %	N	N/mm2	%
c2_1	2207,98	1489,82	19,8643	0,80049
Média	2207,98	1489,82	19,8643	0,80049
DesvioPadrão	--	--	--	--
c2_2	2683,66	1733,88	27,7420	0,82032
Média	2683,66	1733,88	27,7420	0,82032
DesvioPadrão	--	--	--	--
c2_3	2045,59	1905,24	30,4839	1,08099
Média	2045,59	1905,24	30,4839	1,08099
DesvioPadrão	--	--	--	--
c2_4	2588,48	1681,60	26,9056	0,92236
Média	2588,48	1681,60	26,9056	0,92236
DesvioPadrão	--	--	--	--
TotalMédia	2381,43	1702,64	26,2490	0,90604
TotalDesvioPadrão	303,911	171,034	4,52250	0,12827

Nome	Máx_ext1+ext2	Ruptura_Tensão	Ruptura_Desloc. da deform.	Máx_Desloc. da deform.
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Sensibilidade: 10	Sensibilidade: 10	Cálculo de áreas completas
Unidade	mm	N/mm2	%	%
c2_1	0,15761	26,7359	4,91779	3,04446
Média	0,15761	26,7359	4,91779	3,04446
DesvioPadrão	--	--	--	--
c2_2	0,16276	26,4586	5,01113	4,50446
Média	0,16276	26,4586	5,01113	4,50446
DesvioPadrão	--	--	--	--
c2_3	0,21841	30,4839	5,66446	5,66446
Média	0,21841	30,4839	5,66446	5,66446
DesvioPadrão	--	--	--	--
c2_4	0,18158	27,0537	4,83783	4,25113
Média	0,18158	27,0537	4,83783	4,25113
DesvioPadrão	--	--	--	--
TotalMédia	0,18009	27,6830	5,10780	4,36613
TotalDesvioPadrão	0,02755	1,88301	0,37780	1,07468

Nome	Ruptura_Ext.2 (Deformação)
Parâmetros	Sensibilidade: 10
Unidade	%
c2_1	0,78150
Média	0,78150



DesvioPadrão	--
c2_2	0,68037
Média	0,68037
DesvioPadrão	--
c2_3	1,08099
Média	1,08099
DesvioPadrão	--
c2_4	0,74168
Média	0,74168
DesvioPadrão	--
TotalMédia	0,82114
TotalDesvioPadrão	0,17816



Comentário



Anexo VI – Molde da moldação por injeção-compressão

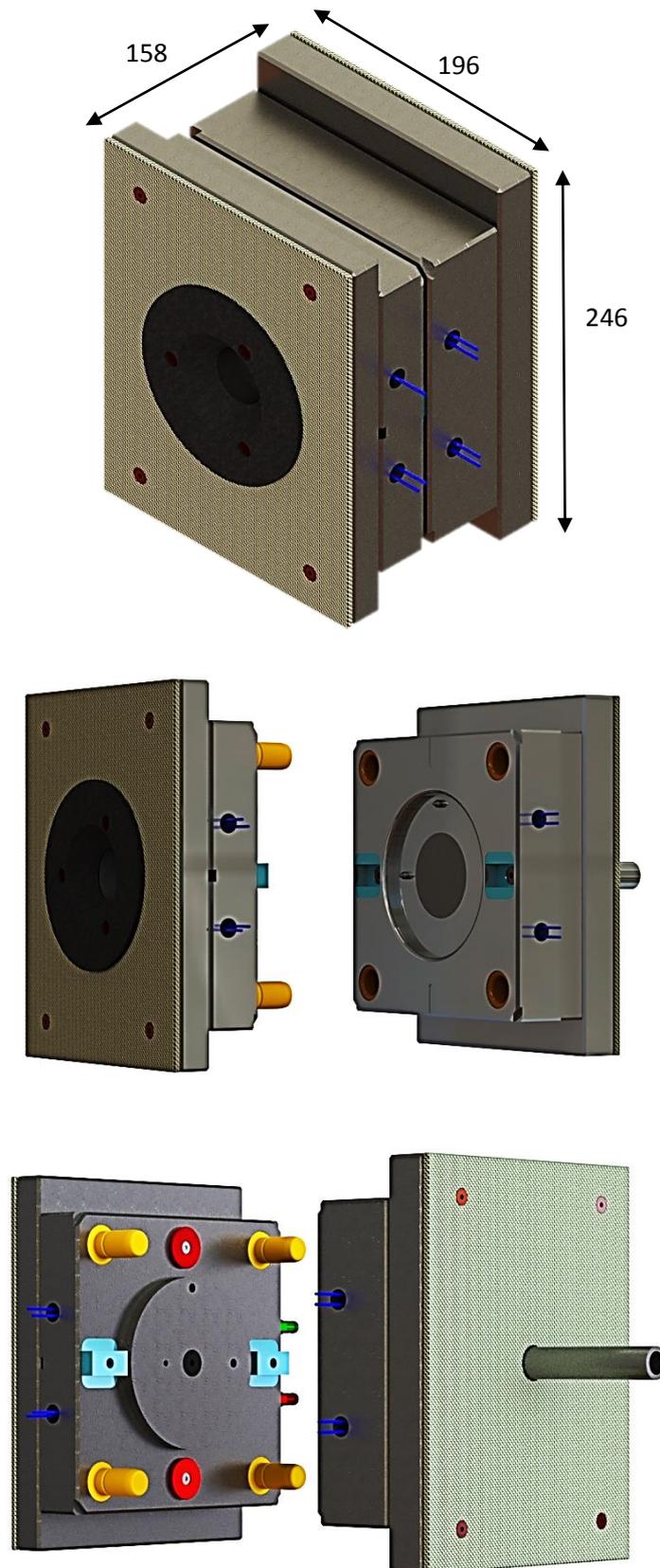


Figura 97 – Molde para a moldação injeção-compressão

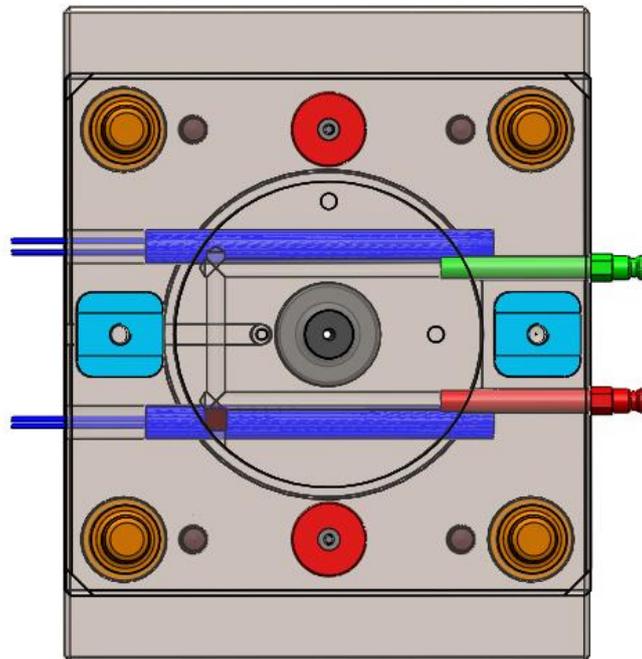
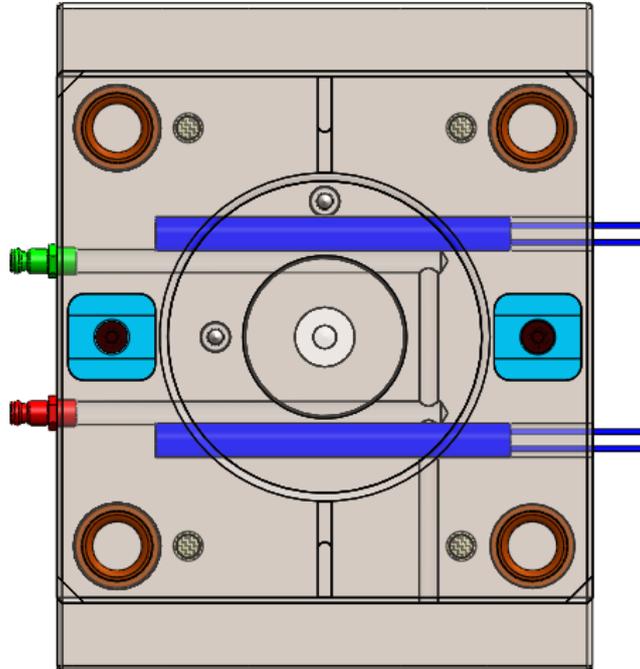


Figura 98 – Sistema de aquecimento e arrefecimento do molde injeção-compressão