



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Rafael Gomes Fernandes

**Simulação Computacional do Escoamento do
Plastisol no Processo de Recobrimento
Indireto por Faca**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Miguel Nóbrega

Engenheiro Gonçalo Silveira

Janeiro 2020

Despacho RT – 31/2019 – Anexo 3

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

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



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

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

Agradecimentos

Em primeiro de tudo e mais importante, um agradecimento à Dr.^a Isabel Furtado e à Eng.^a Elizabete Pinho por me proporcionarem a oportunidade de realizar a minha dissertação de mestrado neste ambiente fabril de uma empresa conceituada como a TMG Automotive, reunindo e fornecendo todas as condições necessárias para a realização do meu projeto.

A toda a equipa do IDI (Investigação Desenvolvimento e Inovação) por me terem integrado da melhor e mais rápida forma, proporcionando assim uma partilha de conhecimentos necessários à minha aprendizagem.

Um agradecimento especial ao Engenheiro Gonçalo Silveira responsável pela minha orientação na empresa, pelo apoio fornecido ao longo de todo o estágio e por me ter apresentado ao mundo industrial da melhor forma, sempre com o cuidado para que ficasse tudo perceptível e sempre disponível para qualquer tipo de dúvidas e discussão de resultados. Ainda, por me ter transmitido conhecimentos importantes no âmbito industrial integrando-me nos seus projetos.

Um agradecimento também ao Professor Doutor Miguel Nóbrega, responsável pela minha orientação na Universidade do Minho, por todo o tempo dispensado no esclarecimento de dúvidas, assim como toda a sua disponibilidade para orientar o meu projeto.

Um importante agradecimento aos meus pais, irmão e avó pois sem eles nada disto seria possível, por me proporcionarem a hipótese de frequentar um curso superior.

Um obrigado especial à Sandrine Gonçalves por todo o apoio durante estes 5 anos de formação.

A todos, muito obrigado!

Despacho RT – 31/2019

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

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

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

Resumo

A TMG – Tecidos Plastificados e Outros Revestimentos para a Indústria Automóvel, S.A., é uma empresa que, como o próprio nome indica, produz diversos tipos de produtos cuja principal aplicação é o interior dos automóveis. O material usado para produção é o plastisol de PVC que é definido pela suspensão de partículas de PVC num plastificante que juntamente com outros aditivos formam o produto final.

Nesta dissertação é apresentada uma caracterização reológica aprofundada para determinar o comportamento de três plastissóis de PVC selecionados, através de dois tipos de reómetros, um de pratos paralelos e um de cilindros concêntricos. Os plastissóis de PVC estudados no processo de recobrimento indireto por faca apresentam um comportamento reofluidificante, ainda, apresentam um comportamento predominantemente elástico para frequências reduzidas. A sua viscosidade apresenta alterações face ao processo de vácuo efetuado e tempo a que os plastissóis se encontram armazenados, contudo, a temperatura estudada não apresentam influência no comportamento reológico.

Este trabalho integra também um conjunto de simulações numéricas cujo objetivo é o conhecimento do comportamento do plastisol de PVC no caleiro durante o seu escoamento. As simulações foram efetuadas através do *software OpenFOAM* com principal foco em determinar parâmetros capazes de alterar o comportamento do escoamento do fluido. Foi observado que o escoamento do plastisol no caleiro é alterado de forma impactante motivado pela viscosidade a que o mesmo é processado, ainda o valor de taxa de corte a que o plastisol é sujeito na zona mais restrita da faca é determinado pelas condições de processamento empregues nomeadamente velocidade de processamento, geometria da faca e valor do entreferro. Verificou-se ainda uma dependência da espessura do filme formado com a variação de alguns fatores como velocidade de processamento e viscosidade do plastisol processado.

Palavras-chave: Plastisol de PVC, recobrimento por faca, reologia, caracterização reológica, reofluidificante *OpenFOAM*.

Abstract

TMG - Plastified Fabrics and Other Coatings for the Automotive Industry, S.A., is a company that, as the name implies, produces several types of products whose main application is the interior of automobiles. The material used for production is PVC plastisol, which is defined by the suspension of PVC particles in a plasticizer that together with other additives form the final product.

This dissertation presents an in-depth rheological characterization to determine the behavior of three selected PVC plastisols, through two types of rheometers, one of parallel plates and one of concentric cylinders. The PVC plastisols studied in the knife coating process have a shear-thinning behavior, yet they present a predominantly elastic behavior at reduced frequencies. Its viscosity changes due to the vacuum process carried out and the time the plastisols are stored, however, the temperature studied has no influence on the rheological behavior.

This work also integrates a set of numerical simulations whose objective is the knowledge of the behavior of PVC plastisol in the machine during its flow. The simulations were carried out using the OpenFOAM software with the main focus on determining parameters capable of altering the fluid flow behavior. It was observed that the flow of plastisol in the gutter is changed in an impacting way motivated by the viscosity to which it is processed, yet the shear rate to which plastisol is subjected in the most restricted area of the knife is determined by the processing conditions, processing velocity, knife geometry and air gap value. There was also a dependence on the thickness of the film formed with the variation of some factors such as processing speed and viscosity of the processed plastisol.

Key words: PVC plastisol, knife coating, rheology, rheological characterization, shear-thinning, *OpenFOAM*.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vi
Índice.....	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de abreviaturas.....	xiv
Lista de Símbolos	xiv
1. Introdução	15
1.1. Apresentação da empresa	15
1.2. Enquadramento.....	18
1.3. Motivação e objetivos	19
1.4. Estrutura da dissertação	20
2. Fundamentos teóricos.....	22
2.1. História e obtenção do PVC	22
2.2. Reologia de fluidos	25
2.3. Plastisol de PVC	28
2.3.1. Composição	28
2.3.2. Preparação	30
2.3.3. Processamento	31
2.4. Modelação computacional.....	35
2.4.1. Metodologia	36
2.4.2. Método dos Volumes Finitos.....	38
3. Estado da arte	39
3.1. Reologia de plastissóis de PVC	39
3.1.1. Taxa de corte	39
3.1.2. Temperatura.....	42
3.1.3. Distribuição de tamanho de partículas	43
3.1.4. Efeito do tempo de armazenamento.....	45
3.1.5. Efeito de processo de vácuo.....	47
3.2. Estudos computacionais e experimentais do processo	49

4.	Materiais e métodos	55
4.1.	Materiais e formulações	55
4.1.1.	Métodos de composição	55
4.2.	Ensaio de caracterização reológica.....	58
4.2.1.	Reometria de cilindros concêntricos.....	58
4.2.2.	Reometria de pratos paralelos	62
4.2.3.	Ajuste de modelos reológicos.....	65
4.2.4.	Processos e condições de processamento	69
4.2.5.	Medição de temperaturas no processo de recobrimento	71
4.3.	Modelação computacional.....	74
5.	Apresentação e discussão de resultados.....	96
5.1.	Comportamento reológico do plastisol de PVC	96
5.1.1.	Temperatura	98
5.1.2.	Processo de vácuo	100
5.1.3.	Tempo de armazenamento	102
5.2.	Ajuste de modelos reológicos	105
5.3.	Variação de temperatura no processo de recobrimento	111
5.4.	Modelação computacional do processo	115
5.4.1.	Estudo de refinamento da malha	115
5.4.2.	Taxa de corte	117
5.4.3.	Recirculações	119
5.4.4.	Viscosidade.....	130
5.4.5.	Pressão na faca	134
5.4.6.	Espessura do filme formado.....	142
6.	Conclusões.....	146
7.	Propostas de trabalho futuro	149
8.	Bibliografia.....	150
9.	Anexos.....	153

Lista de Figuras

Figura 1-Cronograma ilustrativo da história da Têxtil Manuel Gonçalves.	15
Figura 2- Principais clientes da TMG Automotive.	16
Figura 3-Constituição típica de um material produzido por recobrimento por faca.....	16
Figura 4- Constituição típica de um material produzido por co-extrusão.....	17
Figura 5-Etapas de produção de um artigo na TMG Automotive.	17
Figura 6- <i>Reação de obtenção do cloro, imagem adaptada de [2].</i>	23
Figura 7- <i>Reação de obtenção do DCE por cloração direta, imagem adaptada de [2].</i>	24
Figura 8- <i>Reação de obtenção do DCE por oxicloração, imagem adaptada de [2].</i>	24
Figura 9- <i>Reação de obtenção do VCM [2].</i>	24
Figura 10- <i>Processo de produção de resinas de PVC por emulsão, imagem adaptada de [5].</i>	25
Figura 11- <i>Classificação do comportamento reológico de fluidos.</i>	26
Figura 12- <i>Curva de viscosidade em função da taxa de corte para diferentes tipos de fluidos, imagem adaptada de [14].</i>	26
Figura 13- <i>Curva de tensão de corte em função da taxa de corte. Imagem adaptada de [14].</i>	27
Figura 14- <i>Constituição típica de um plastisol de PVC.</i>	29
Figura 15- <i>Ilustração de todas as fases do processo de recobrimento por imersão. Imagem adaptada de [22].</i>	31
Figura 16- <i>Ilustração do processo de recobrimento por spray. Imagem adaptada de [21].</i>	32
Figura 17- <i>Ilustração do processo de recobrimento, Air-knife. Imagem adaptada de [24].</i>	33
Figura 18- <i>Ilustração do processo de recobrimento por faca, knife-over-roll. Imagem adaptada de [19].</i>	33
Figura 19- <i>Ilustração do fenómeno de gelificação e fusão no plastisol; a) Estado inicial da mistura; b) Pré-Gelificação; c) Gelificação completa; d) Início da fusão; e) Fusão completa. Imagem adaptada de [26].</i>	34
Figura 20- <i>Estrutura típica de um caso de estudo em OpenFOAM, imagem adaptada de [30].</i>	36
Figura 21- <i>Comportamento reológico típico de um plastisol de PVC para valores de taxas de corte até 20 s⁻¹. Imagem adaptada de [8].</i>	40
Figura 22- <i>Comportamento reológico típico de um plastisol de PVC para valores de taxas de corte até 400 s⁻¹. Imagem adaptada de [17].</i>	40
Figura 23- <i>Viscosidade em função da taxa de corte para taxas de corte até 1000 s⁻¹. Imagem adaptada de [35].</i>	41
Figura 24- <i>Comportamento reológico típico de um plastisol de PVC para valores de taxas de corte até 10000 s⁻¹. Imagem adaptada de [36].</i>	42
Figura 25- <i>Curva de viscosidade em função da temperatura: A) resina de emulsão; B) resina de micro-suspensão. Imagem adaptada de [37].</i>	42
Figura 26- <i>Distribuição do tamanho de partículas da resina base do plastisol. P1 (esquerda) P2 (direita). Imagem adaptada de [8].</i>	44
Figura 27- <i>Efeito da distribuição de tamanho de partículas na viscosidade: A) referente a P1; B) referente a P2. Imagem adaptada de [8].</i>	44
Figura 28- <i>Influência do tempo de armazenamento do Plastisol 1 na viscosidade em função da taxa de corte [35].</i>	46
Figura 29- <i>Influência do tempo de armazenamento do Plastisol 2 na viscosidade em função da taxa de corte [35].</i>	46
Figura 30- <i>Influência do tempo de armazenamento do Plastisol 3 na viscosidade em função da taxa de corte [35].</i>	46
Figura 31- <i>Influência da presença de ar no comportamento reológico do plastisol: Curva azul) representa o plastisol submetido a vácuo; Curva vermelha) representa o plastisol não submetido a vácuo.</i>	48
Figura 32- <i>Geometria usada no estudo da literatura a) Geometria usada na simulação; b) condições de fronteira.</i>	50
Figura 33- <i>Resultados provenientes da simulação: a) Fluido Newtoniano; b) F1; c) F2 [40].</i>	51
Figura 34- <i>Distribuição de pressões debaixo da faca [40].</i>	51
Figura 35- <i>Geometria utilizada no estudo [43].</i>	52
Figura 36- <i>Linhas de fluxo correspondente a um angulo de 8°: a) fluido newtoniano; b) fluido reofluidificante; c) fluido elástico. Imagem adaptada de [43].</i>	52
Figura 37- <i>Linhas de fluxo correspondente a um angulo de 22°: a) fluido newtoniano; b) fluido reofluidificante; c) fluido elástico. Imagem adaptada de [43].</i>	53
Figura 38- <i>Fluxo correspondente a um angulo de 32°: a) fluido newtoniano; b) fluido reofluidificante; c) fluido elástico. Imagem adaptada de [43].</i>	54
Figura 39- <i>Processo de preparação de um plastisol de PVC.</i>	56
Figura 40- <i>Equipamentos utilizados para a produção dos plastissóis de PVC utilizados no estudo: A) Balança; B) Misturador; C) Equipamento de vácuo.</i>	57
Figura 41- <i>Picnómetro usado para cálculo da densidade do plastisol.</i>	58
Figura 42- <i>Instrumento de controlo do reómetro de cilindros concêntricos: A) Reómetro de cilindros concêntricos; B) Sistema de controlo de temperatura; C) Sistema de controlo do ensaio.</i>	59
Figura 43- <i>Procedimento de ensaio do reómetro de cilindros concêntricos.</i>	60
Figura 44- <i>Curva típica de viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.</i>	61
Figura 45- <i>Reómetro de pratos paralelos utilizado.</i>	62

Figura 46- Curva típica da viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.	63
Figura 47- Curva típica de um varrimento de deformações efetuado para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.	64
Figura 48- Curva típica de um varrimento de frequências efetuado para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.	65
Figura 49- Curva típica obtida através da compilação de dados para um dos plastissóis estudados: A) Gráfico com dados distintos; B) Gráfico com os dados compilados.	66
Figura 50- Ajuste típico de um modelo para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.	68
Figura 51- Representação da máquina de recobrimento da TMG Automotive, imagem adaptada de [47].	69
Figura 52- Representação do momento onde o fluido passa na faca.	70
Figura 53- Representação da cuba (vista de cima).	72
Figura 54- Representação dos locais de medição no caleiro e no filme formado.	72
Figura 55- Valores típicos de temperatura na 1ª cabeça de aplicação.	73
Figura 56- Representação da medição de temperaturas do substrato na primeira cabeça de aplicação.	73
Figura 57- Representação do substrato na segunda e terceira cabeça de aplicação.	74
Figura 58- Caso geral de estudo, processo de recobrimento indireto por faca.	75
Figura 59- Geometria ilustrativa do processo de recobrimento utilizada nos estudos computacionais.	76
Figura 60- Geometrias presentes na TMG Automotive; A) Faca 1; B) Faca 2.	76
Figura 61- Geometria e dimensões dos caleiros, unidade de medida em cm.	76
Figura 62- Geometria e dimensões da faca: a) 1ª cabeça de aplicação; b) 2ª cabeça de aplicação, unidade de medida em cm.	77
Figura 63- Fases de construção de uma geometria.	77
Figura 64- Pontos usados para criação da geometria da Faca 2, plano frontal. Existe um corte efetuado na imagem, devido ao elevado comprimento desta.	78
Figura 65- Parametrização da geometria.	78
Figura 66- Pontos definidos no OpenFOAM.	79
Figura 67- Representação dos blocos definidos para a Faca 2.	79
Figura 68- Definição dos blocos da geometria.	80
Figura 69- Esquema explicativo do processo de definição de blocos.	80
Figura 70- Parametrização dos blocos criados na geometria.	80
Figura 71- Esquema explicativo do processo de definição de arcos.	81
Figura 72- Código referente a definição de arestas curvas e a respetiva parametrização.	81
Figura 73- Processo exemplo de definição de uma fronteira.	82
Figura 74- Representação e identificação de todas as fronteiras da geometria.	82
Figura 75- Código referente à definição do modelo viscoso.	84
Figura 76- Definição do controlo do tempo de simulação.	85
Figura 77- Código referente à definição espacial do fluido.	85
Figura 78- Esquema explicativo do processo de definição de uma box.	86
Figura 79- Representação do fluido no caleiro.	86
Figura 80- Malhas usadas no estudo de refinamento da malha: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4.	87
Figura 81- Zonas de avaliação para o estudo de refinamento da malha.	88
Figura 82- Resultados provenientes do estudo de refinamento da malha.	88
Figura 83- Aplicação da função Threshold.	89
Figura 84- Exemplo típico da avaliação de refluxos no caleiro para o plastisol 1 a 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.	90
Figura 85- Zonas de medições de espessura.	90
Figura 86- Exemplo típico de uma medição de espessura.	91
Figura 87- Zona mais restrita de medição.	91
Figura 88- Exemplo de obtenção de valores de pressão e taxa de corte para a zona da faca em que a espessura é menor.	92
Figura 89- Ilustração do processo de recobrimento, zona onde será avaliado o comportamento do fluxo.	92
Figura 90- Ilustração de diferentes alturas de plastisol no caleiro; 1) 6 cm; 2) 12 cm; 3) 14 cm.	93
Figura 91- Geometrias testadas; A) Faca 1; B) Faca 2.	93
Figura 92- Diferentes ângulos empregues no estudo para a Faca 2.	94
Figura 93- Diferentes quantidades de plastisol aplicados: A) 120 g/m ² ; B) 250 g/m ² ; C) 750 g/m ²	94
Figura 94- Curva mestra de viscosidade em função da taxa de corte dos três plastissóis em estudo para uma temperatura de 25°C e instante t=0 (logo após a produção).	97
Figura 95- Varrimento de frequências do plastisol 1 para uma temperatura de 25°C e instante de tempo de t=216 horas.	97
Figura 96- Curva de viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 1.	98
Figura 97- Curva de viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 2.	98
Figura 98- Curva de viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 3.	98
Figura 99- Avaliação do módulo elástico e viscoso face à gama de temperaturas em estudo.	99

Figura 100- Avaliação da influência do processo de vácuo no comportamento reológico dos plastissóis de PVC para a temperatura de 25°C: A) t=0 horas; B) t=216 horas.	100
Figura 101- Avaliação do módulo elástico e viscoso face ao processo de vácuo.	101
Figura 102- Influência do tempo de armazenamento no plastisol 3: A) Plastisol 1; B) Plastisol 2; C) Plastisol 3.	102
Figura 103- Avaliação dos módulos com influência do tempo de armazenamento, para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C.	103
Figura 104- Avaliação dos módulos com influência do tempo de armazenamento, para o plastisol 2 a uma temperatura de 25°C.	104
Figura 105- Avaliação dos módulos com influência do tempo de armazenamento, para o plastisol 3 a uma temperatura de 25°C.	104
Figura 106- Ajuste do modelo de Carreau-Yasuda.	105
Figura 107- Ajuste do modelo de Cross.	105
Figura 108- Ajuste do modelo de Herschel-Bulkley.	106
Figura 109- Ajuste do modelo Lei de Potência (Ostwalde-de-wale).	106
Figura 110- Ajuste do modelo de Sisko.	106
Figura 111- Ajuste do modelo de Carreau para o plastisol 2 a 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.	107
Figura 112- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 1 para a temperatura de 25°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.	108
Figura 113- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 2 para a temperatura de 25°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.	109
Figura 114- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 3 para a temperatura de 25°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.	109
Figura 115- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 1 para a temperatura de 30°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.	110
Figura 116- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 2 para a temperatura de 30°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.	110
Figura 117- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 3 para a temperatura de 30°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.	110
Figura 118- Valores de temperatura com que o substrato chega a cada cabeça de aplicação.	111
Figura 119- Perfil de Temperaturas na 1ª cabeça de aplicação, avaliando a temperatura desde que o material sai da cuba.	112
Figura 120- Perfil de Temperaturas na 2ª cabeça de aplicação, avaliando a temperatura desde que o material sai da cuba.	113
Figura 121- Perfil de Temperaturas na 3ª cabeça de aplicação, avaliando a temperatura desde que o material sai da cuba.	114
Figura 122- Faca da cabeça 2, usada como padrão.	115
Figura 123- Resultados do refinamento da malha zona 2 para o plastisol 1 a 25°C com tempo de armazenamento de 0 horas.	116
Figura 124- Perfil de taxas de corte nas duas geometrias de faca utilizadas no processamento de plastissóis; A) Faca 1; B) Faca 2.	117
Figura 125- Valor de taxa de corte face aos parâmetros impactantes estudados.	118
Figura 126- Influência da velocidade de processo no perfil de recirculações de fluido: A) 15 m/min; B) 25 m/min; C) 35 m/min.	119
Figura 127- Linhas de fluxo para as velocidades estudadas: A) 15 m/min; B) 25 m/min; C) 35 m/min.	120
Figura 128- Influência da altura de plastisol presente no caleiro no perfil de recirculações de fluido: A) 6 cm; B) 12 cm; C) 14 cm.	120
Figura 129- Linhas de fluxo para diferentes alturas de plastisol no caleiro: A) 6 cm; B) 12 cm; C) 14 cm.	121
Figura 130- Influência da geometria da faca no perfil de recirculações de fluido: A) Faca 1; B) Faca 2.	121
Figura 131- Perfil de recirculações na zona mais restrita da Faca 2.	122
Figura 132- Zonas de avaliação do perfil de velocidade para a Faca 2.	122
Figura 133- Perfil de velocidades para 3 zonas ao longo da faca.	123
Figura 134- Linhas de fluxo: A) Faca 1; B) Faca 2.	123
Figura 135- Influência do ângulo da faca no perfil de recirculações de fluido: A) Padrão; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.	124
Figura 136- Ponto de estagnação face aos 3 ângulos de faca estudados: A) Referência; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.	124
Figura 137- Linhas de fluxo para diferentes ângulos de faca: A) Referência; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.	125
Figura 138- Influência do valor da dosagem aplicada no perfil de recirculações: A) 120 g/m ² ; B) 250 g/m ² ; C) 750 g/m ²	125
Figura 139- Perfil de recirculações debaixo da faca: A) 120 g/m ² ; B) 250 g/m ² ; C) 750 g/m ²	126
Figura 140- Linhas de fluxo para diferentes dosagens de plastisol aplicado: A) 120 g/m ² ; B) 250 g/m ² ; C) 750 g/m ²	126
Figura 141- Influência do tempo de armazenamento na recirculação de fluido: A) 0 horas; B) 216 horas.	127
Figura 142- Linhas de fluxo para dois tempos de armazenamento: A) 0 horas; B) 216 horas.	127
Figura 143- Movimento dos plastissóis no caleiro: A) 0 horas; B) 216 horas.	128
Figura 144- Influência do processo de vácuo no perfil de recirculações de fluido: A) com vácuo; B) sem vácuo.	128
Figura 145- Linhas de fluxo para o plastisol: A) submetido ao processo de vácuo; B) não submetido ao processo de vácuo.	129
Figura 146- Movimento dos plastissóis no caleiro: A) vácuo; B) sem vácuo.	129
Figura 147- Influência do tempo de armazenamento na viscosidade do fluido: A) 0 horas; B) 216 horas.	131
Figura 148- Influência do processo de vácuo na viscosidade do fluido: A) com vácuo; B) sem vácuo, viscosidade apresentada em Pa.s.	132
Figura 149- Avaliação da viscosidade face á recirculação: A) Direção do fluxo; B) Perfil de viscosidade.	133
Figura 150- Perfil de viscosidade logo após a passagem pela faca para o plastisol 2 com tempo de armazenamento de 0 horas e uma temperatura de 25°C.	133
Figura 151- Avaliação do perfil de pressões ao longo da faca.	134
Figura 152- Influência da velocidade de processo no valor de pressão à passagem pela faca: A) 15 m/min; B) 25 m/min; C) 35 m/min.	134
Figura 153- Valores de pressão ao longo da faca para as diferentes velocidades lineares de processamento.	135
Figura 154- Influência da geometria de faca na pressão à passagem pela faca: A) Faca 1; B) Faca 2.	135
Figura 155- Valores de pressão ao longo da faca para as diferentes geometrias de faca.	136
Figura 156- Influência de diferentes ângulos de faca na pressão à passagem pela faca: A) Padrão; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.	136

Figura 157- Valores de pressão ao longo da faca para os diferentes ângulos de faca.	137
Figura 158- Influência de diferentes dosagens de plastisol aplicado na pressão à passagem pela faca: A) 120 g/m ² ; B) 250 g/m ² ; C) 750 g/m ²	137
Figura 159- Valores de pressão em função do comprimento da faca para as diferentes dosagens de plastisol aplicado.	138
Figura 160- Influência da temperatura do plastisol na pressão à passagem pela faca: A) 25°C; B) 30°C.	138
Figura 161- Valores de pressão em função do comprimento da faca para as diferentes temperaturas de processamento do plastisol.	139
Figura 162- Influência do tempo de armazenamento do plastisol na pressão à passagem pela faca: A) 0 horas; B) 216 horas.	139
Figura 163- Valores de pressão em função do comprimento da faca para diferentes tempos de armazenamento de plastisol.	140
Figura 164- Resultados compilados do valor de pressão para cada parâmetro.	141
Figura 165- Variação do alfa em função da espessura para diferentes velocidades de processamento.	142
Figura 166- Variação do alfa em função da espessura para diferentes facas; A) Faca 1; B) Faca 2.	143
Figura 167- Variação do alfa em função da espessura para diferentes temperaturas.	143
Figura 168- Variação do alfa em função da espessura para diferentes tempos de armazenamento.	143
Figura 169- Distribuição do alfa em função da espessura avaliando a influência do processo de vácuo.	144
Figura 170- Valores de espessura dos filmes formados.	144
Figura 171- Avaliação do processo de vácuo no comportamento reológico dos plastissóis de PVC para a temperatura de 30°C: a) t=0 horas; b) t=216 horas.	153
Figura 172- Avaliação do módulo elástico e viscoso face ao processo de vácuo.	154
Figura 173- Influência do tempo de armazenamento para uma temperatura de 30°C: a) Plastisol 1; b) Plastisol 2; c) Plastisol 3 ...	155
Figura 174- Avaliação dos módulos com influência do tempo de armazenamento, para uma temperatura de 30°C.	156
Figura 175- Estudo de refinamento da malha para a zona 1.	157
Figura 176- Estudo de refinamento da malha para a zona 3.	158
Figura 177- Estudo de refinamento da malha para a zona 4.	159
Figura 178- Estudo de refinamento da malha para a zona 5.	160
Figura 179- Avaliação da influência dos parâmetros na taxa de corte.	161
Figura 180- Influência da velocidade de processamento na viscosidade do fluido no caleiro; A) 15 m/min; B) 25 m/min; C) 35 m/min.	162
Figura 181- Influência da geometria da faca na viscosidade do fluido no caleiro; A) Faca 1; B) Faca 2.	162
Figura 182- Influência do ângulo da faca na viscosidade do fluido no caleiro; A) Referência; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.	162
Figura 183- Influência da dosagem de plastisol aplicado na viscosidade do fluido no caleiro; A) 120 g/m ² ; B) 250 g/m ² ; C) 750 g/m ²	162
Figura 184- Influência da temperatura na viscosidade do fluido no caleiro; A) 25°C; B) 30°C.	163

Lista de Tabelas

Tabela 1- <i>Identificação da formulação dos plastissóis em estudo.</i>	56
Tabela 2- <i>Composição das diferentes formulações utilizados no estudo.</i>	56
Tabela 3- <i>Condições de processamento a utilizar no reômetro de cilindros concêntricos.</i>	60
Tabela 4- <i>Tabela para tratamento de dados.</i>	61
Tabela 5- <i>Condições de ensaio a utilizar no reômetro de pratos paralelos.</i>	63
Tabela 6- <i>Modelos reológicos empregues no ajuste.</i>	66
Tabela 7- <i>Valores exemplo de um ajuste de um modelo reológico.</i>	67
Tabela 8- <i>Tipo de fronteira aplicada a cada região.</i>	82
Tabela 9- <i>Condições de fronteira definidas para cada fronteira.</i>	83
Tabela 10- <i>Número de células presente em cada uma das malhas.</i>	87
Tabela 11- <i>Condições presentes na simulação referência.</i>	95
Tabela 12- <i>Simulações a efetuar.</i>	95
Tabela 13- <i>Avaliação do erro quadrático dos modelos estudados.</i>	107
Tabela 14- <i>Parâmetros ajustados para o modelo de Carreau.</i>	108
Tabela 15- <i>Avaliação da influência dos parâmetros estudados na taxa de corte.</i>	119
Tabela 16- <i>Avaliação da influência dos parâmetros estudados nas recirculações</i>	130
Tabela 17- <i>Parâmetros com influência na viscosidade do plastisol.</i>	131
Tabela 18- <i>Parâmetros com influência no valor de pressão.</i>	141
Tabela 19- <i>Grau de influência de todos os parâmetros estudados.</i>	145

Lista de abreviaturas

TMG	Têxtil Manuel Gonçalves
PVC	Policloreto de vinilo
PUR	Poliuretano
TPE	Elastômero Termoplástico
TPO	Olefina Termoplástica
TPU	Uretano Termoplástico
UV	Ultravioleta
VCM	Monômero de Cloreto de Vinilo
E-PVC	Policloreto de Vinilo de emulsão
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional

Lista de Símbolos

G'	Módulo Elástico
G''	Módulo Viscoso
η_{inf}	Viscosidade para taxas de corte infinitas
η_0	Viscosidade para taxas de corte nulas
$\dot{\gamma}$	Taxa de corte
λ	Tempo de relaxação
p	Pressão
ρ	Massa específica
g	Aceleração gravítica
n	Índice de Lei da Potência
τ_0	Tensão de cedência
T	Tensor de tensões de origem viscosa
u	Campo de velocidade
k	Índice de consistência do material
a	Transição da curva entre o patamar newtoniano e a região newtoniana
τ_0	Tensão de cedência

1. Introdução

Este capítulo contém uma breve introdução ao trabalho desenvolvido nesta dissertação de mestrado. Para isso será efetuada uma breve descrição da empresa (TMG Automotive), apresentadas as principais inovações implementadas desde a data da sua criação, identificados os seus principais produtos, processos de fabrico e clientes. Posteriormente será exposto o enquadramento do trabalho no âmbito da atividade da empresa, apresentadas as motivações e os principais objetivos com a elaboração deste projeto.

1.1. Apresentação da empresa

A TMG Automotive é uma empresa cuja atividade está centrada na indústria automóvel, com produtos destinados a diversas aplicações em interiores de automóveis. Neste setor a TMG é reconhecida como o 2º maior produtor e fornecedor europeu destes produtos e trabalha com as principais marcas do ramo automóvel, tendo como principais clientes a BMW, Mercedes, Toyota e Volvo.

Inicialmente denominada como Fábrica de Fiação e Tecidos do Vale, a TMG foi fundada por Manuel Gonçalves, em 1937. Desde a criação da fábrica têxtil até aos dias de hoje foram implementados processos de inovação para que fosse possível se adaptar aos mercados alvo. Na Figura 1 está retratada, na forma de cronograma, as datas mais impactantes para o processo de expansão da empresa, desde a entrada no mercado automóvel até ao aumento da capacidade de produção.

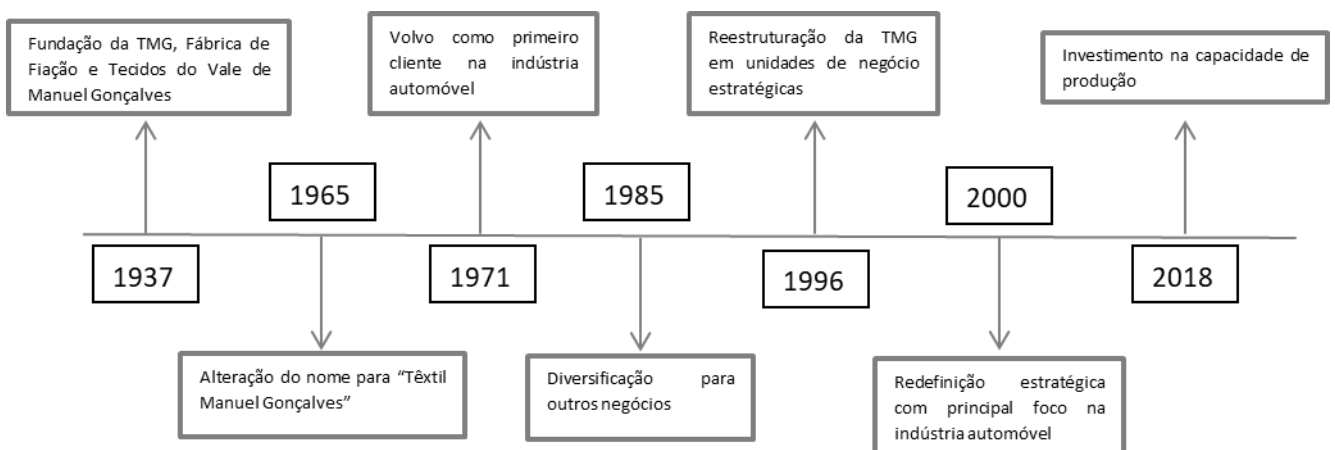


Figura 1-Cronograma ilustrativo da história da Têxtil Manuel Gonçalves.

A TMG Automotive fornece um grande conjunto de clientes sediados em diversas partes do mundo, principalmente na Europa, América do Norte, China, Brasil e África do Sul, como é possível observar na Figura 2.



Figura 2- Principais clientes da TMG Automotive.

Atualmente, a empresa produz pele artificial para aplicações em componentes do interior de automóveis, como são o caso dos assentos, painéis de instrumentos, painéis de portas, apoios de braços, entre muitos outros.

A TMG integra as tecnologias principais de processamento de tecidos plastificados, sendo elas recobrimento indireto por faca e co-extrusão. O material resultante de cada uma das técnicas presentes tem aplicações diferentes no interior dos automóveis.

O processo de recobrimento indireto por faca é utilizado majoritariamente no processamento de plastissóis de policloreto de vinilo (PVC) e, também de uma percentagem reduzida de dispersões de poliuretano (PUR), este processo necessita de uma preparação prévia das matérias-primas, nomeadamente a pesagem, adição e mistura de todos os componentes necessários para a obtenção da receita. O equipamento de processamento é constituído por 3 cabeças de aplicação podendo produzir artigos com 3 camadas distintas e ainda um substrato têxtil, este processo será descrito com detalhe no Capítulo 4, contudo na Figura 3 encontra-se um material típico obtido por recobrimento.

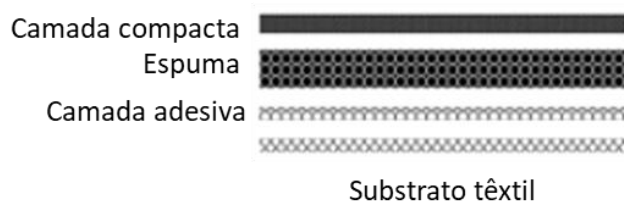


Figura 3-Constituição típica de um material produzido por recobrimento por faca.

Os plastissóis de PVC são a escolha principal para aplicação em assentos devido às propriedades que o material é capaz de conferir, apresentando ainda o custo de matéria-prima mais reduzido quando comparado com os outros materiais produzidos pela empresa. Como todos os materiais, os plastissóis de PVC também apresentam desvantagens, sendo as principais as relacionadas com o impacto ambiental, resultante da libertação de ácido clorídrico durante a degradação do PVC [1][2].

O processo de co-extrusão é empregue maioritariamente no processamento de elastómeros termoplásticos (TPE), mais propriamente olefinas termoplásticas (TPO) e uretanos termoplásticos (TPU) ao contrário do processo de recobrimento, este não necessita de preparação prévia das matérias-primas, sendo utilizada a matéria-prima fornecida em forma de granulado. Este é constituído por duas extrusoras duplo-fuso, sendo possível produzir até 3 camadas distintas em simultâneo. A Figura 4 ilustra um material típico proveniente do processo de co-extrusão.

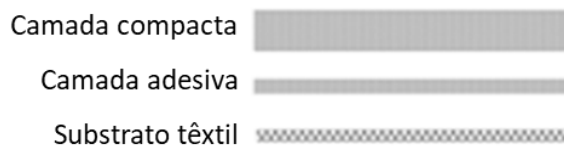


Figura 4- Constituição típica de um material produzido por co-extrusão.

Na Figura 5 encontra-se uma representação esquemática dos processos de produção de pele artificial presente na TMG Automotive.

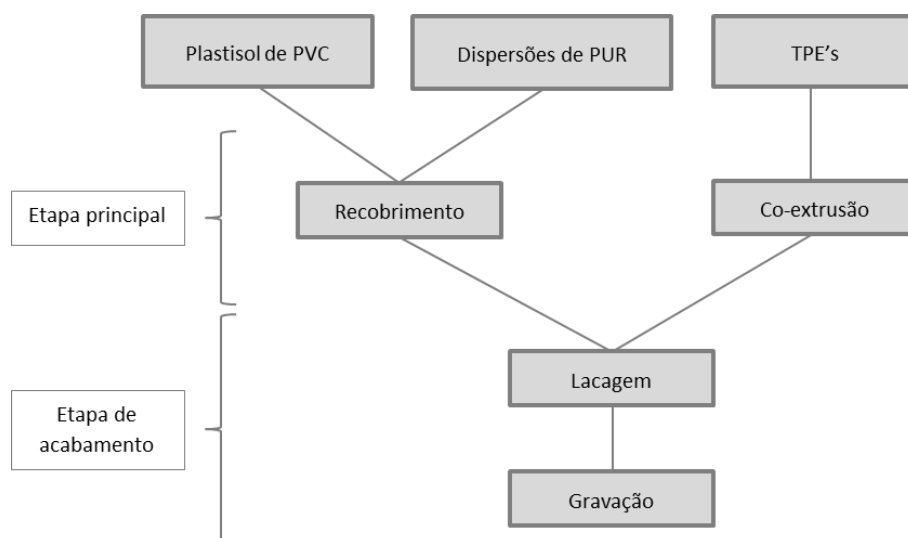


Figura 5- Etapas de produção de um artigo na TMG Automotive.

Em conformidade com o indicado na Figura 8, após a produção do artigo, estes podem ser submetidos a diferentes etapas de acabamento, nomeadamente à lacagem e à gravação.

O processo de lacagem consiste na aplicação de dispersões de poliuretano na superfície do produto, com o principal objetivo de aumentar a durabilidade do mesmo, conferindo um aumento de resistência à radiação UV, abrasão e a agentes químicos, proporcionando também um aspeto brilhante ao artigo.

Por sua vez, o processo de gravação é responsável por conferir uma textura ao artigo, o que pode mimetizar a pele natural ou outros gravados geométricos. Este processo é realizado na TMG Automotive através da aplicação de cargas de compressão, exercidas por dois cilindros em que um deles possui o negativo da textura desejada, no artigo previamente aquecido, para assegurar a durabilidade da textura conferida.

1.2. Enquadramento

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida na empresa TMG Automotive, como projeto de conclusão do curso Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros.

Na atualidade, os veículos constituem o modo preferencial de transporte de pessoas e mercadorias, cuja produção tem vindo a crescer, o que tem requerido aumento de produção por parte de empresas que estejam diretamente ligadas a este setor, como é o caso da TMG Automotive no respeitante aos tecidos plastificados. Os tecidos plastificados produzidos na empresa são de extrema importância no setor automóvel podendo constituir e revestir quase a totalidade dos interiores do automóvel. A utilização da pele artificial tem tido um crescimento exponencial devido às suas inúmeras vantagens quando comparadas com a pele de origem animal, nomeadamente aspeto superficial bastante idêntico podendo ainda ser de melhor qualidade, boas propriedades mecânicas e ainda custo bastante reduzido.

Associado a este crescimento está um aumento da competitividade por parte das empresas, que se esforçam pela obtenção de melhorias da qualidade e, simultaneamente, pela redução do preço dos seus produtos, o que normalmente são objetivos contraditórios. Este enquadramento tem motivado empresas para aumentar

o conhecimento sobre os materiais e processos de transformação que utilizam, pois, eventuais inovações podem resultar numa melhor qualidade dos produtos e, ao mesmo tempo, na redução de custo, o que se traduz em claras vantagens competitivas relativamente à concorrência.

De entre os diversos processos de fabrico e materiais processados empregues na empresa, o principal foco desta dissertação é o recobrimento indireto por faca na produção de pele artificial resultante da transformação do plastisol de PVC.

Atualmente, a TMG Automotive enfrenta um conjunto de problemas crónicos associados à produção de pele artificial, que devido à sua elevada complexidade ainda não foram totalmente compreendidos e resolvidos. Estes problemas, que têm origem na operação de recobrimento, originam defeitos nos artigos produzidos, defeitos estes que não são facilmente resolúveis devido à falta de conhecimento existente do que poderá ser a sua causa raiz, nomeadamente o comportamento dos plastissóis de PVC quando processados.

1.3. Motivação e objetivos

Dados os problemas descritos na secção anterior, identificou-se a necessidade de procurar uma solução ou informação que suportasse a resolução dos mesmos. À semelhança do que acontece noutros processos industriais, a simulação numérica poderá ser útil para alcançar os objetivos pretendidos, pois permite analisar com elevado detalhe todo o processo e, conseqüentemente, ajudar a identificar e prevenir as causas dos diferentes problemas associados ao escoamento do plastisol de PVC no processo de recobrimento indireto por faca.

Para a realização da simulação numérica é necessária a caracterização reológica dos materiais/fluidos a simular, neste caso os plastissóis de PVC, para obter modelos constitutivos capazes de descrever com rigor o comportamento do fluido durante o processo.

Com base no exposto, esta dissertação integrou dois objetivos principais. Numa fase inicial foi realizada a caracterização reológica dos plastissóis de PVC em estudo. Esta atividade, para além de ser necessária para a obtenção dos modelos constitutivos dos materiais, permite também o aumento do conhecimento relativo ao comportamento

reológico dos plastissóis antes de serem processados nomeadamente, influência do tempo de armazenamento, processo de vácuo e temperatura do plastisol.

Posteriormente, foram efetuados estudos numéricos sobre o processo de recobrimento indireto por faca com o propósito de avaliar a influência de diferentes parâmetros de processo (diferentes velocidades, geometrias de faca, valor do entreferro e ângulo da faca) e condições do plastisol (impacto do tempo de armazenamento e do processo de vácuo).

Neste enquadramento o modelo de simulação numérica pode ser uma ferramenta útil para suportar a determinação de propriedades ideais do plastisol de PVC e das condições ótimas de processamento.

O *software* escolhido para realização dos estudos numéricos foi a biblioteca computacional OpenFOAM [3]. Esta escolha foi influenciada pelo fato deste ser um *software* aberto e de distribuição livre, que possui as valências necessárias para a realização dos estudos desejados.

1.4. Estrutura da dissertação

Esta secção descreve sumariamente a estrutura desta dissertação de mestrado.

O **Capítulo 2** apresenta o material empregue em todos os estudos realizados, o plastisol de PVC. Este capítulo inicia pela descrição de processos de obtenção da resina de PVC e, posteriormente, o método de preparação e principais componentes na produção de um plastisol.

O **Capítulo 3** centra-se na análise do estado da arte, em particular, pela apresentação de estudos da literatura referentes aos parâmetros que influenciam a reologia dos plastissóis de PVC e, ainda, estudos de modelação computacional de processos de fabrico semelhantes ao processo de interesse para este projeto.

No **Capítulo 4** apresenta os materiais e métodos empregues neste trabalho. Inicia com uma descrição do método de produção de um plastisol de PVC, seguindo-se a descrição dos ensaios de caracterização reológica efetuados, o ajuste de modelos reológicos e as condições a que estes são processados. Por fim, apresenta-se uma secção

referente à modelação computacional onde é descrito o *solver* empregue nas simulações numéricas, modelos utilizados e os estudos caso.

O **Capítulo 5** foca-se na apresentação e discussão dos resultados, onde se apresenta a influência dos parâmetros estudados na reologia dos plastissóis e os ajustes efetuados para os modelos constitutivos. Neste capítulo, é ainda apresentado um estudo com o objetivo de determinar se ocorre variações de temperatura do plastisol de PVC durante o processo de recobrimento indireto por faca e, por fim são apresentados os resultados provenientes da simulação numérica.

No **Capítulo 6** são apresentadas as conclusões obtidas pelo trabalho realizado na dissertação e as propostas de trabalhos futuros.

2. Fundamentos teóricos

Este capítulo expõe um conjunto de informações relevantes para a compreensão do trabalho efetuado, o qual é descrito nos capítulos seguintes. Assim, é apresentada uma introdução teórica de conceitos relacionados com o material em estudo, isto é, plastisol de PVC, o seu processamento e, ainda, uma descrição do software usado para a realização das simulações.

Em primeiro lugar será contextualizada historicamente a resina de PVC, sendo esta o elemento base para a produção de um plastisol de PVC. Esta abordagem começa por uma referência histórica ao material, seguindo-se do processo de obtenção do monómero de cloreto de vinilo e, posteriormente, dos diferentes tipos de polimerização existentes. Após isto, descreve-se a reologia dos materiais e, por fim, será definido e detalhado o material em estudo desde a sua composição até à sua preparação. Desta forma, estando o leitor familiarizado com os conceitos abordados, este capítulo é de leitura facultativa.

2.1. História e obtenção do PVC

Em 1835, *Justus von Liebig* e *Regnault* impulsionaram o estudo e o desenvolvimento do monómero de cloreto de vinilo (VCM do inglês *Vinyl Chloride Monomer*) quando nesta data reportaram a existência do monómero [4][5][2]. A descoberta de *Liebig* ocorreu através de uma reação de dicloroetileno com hidróxido de potássio em solução alcoólica [2].

A primeira polimerização do VCM ocorreu em 1872, quando *E. Baumann*, motivado pela incidência de luz solar, observou a mudança do monómero para um material branco [4][2][6]. Mais tarde em 1912, *Fritz Klatt* conseguiu implementar um procedimento para a produção do PVC através da reação do acetileno com o cloreto de hidrogénio, como é possível observar mais à frente [4][5][2].

Apesar da resina de PVC ter sido sintetizada pela primeira vez, em 1835, só foi processada em 1926, obtendo o denominado nos dias de hoje por plastisol de PVC, quando o cientista americano *Waldo Semon* conseguiu misturar a resina de PVC com um plastificante, que a tornou extremamente flexível e permitiu o seu processamento [2].

O PVC é um termoplástico baseado em duas fontes naturais distintas presentes na Terra, o cloreto de sódio (comumente designado por sal) e o petróleo. A sua constituição é de aproximadamente 57% de cloreto de sódio e 43% de petróleo [4][2] e é o segundo termoplástico com maior índice de consumo do mundo [2].

O PVC é dos materiais mais importantes de toda a indústria de processamento e transformação de plásticos devido ao seu elevado número de aplicações [4]. Estas aplicações podem variar desde o PVC rígido para tubagens até ao PVC flexível para embalagens, indústria automóvel, piscinas, cabos elétricos, e ainda é aplicado na indústria alimentar e médica [4][2]. Para uma percentagem de aproximadamente 60% das aplicações deste tipo de materiais contém tempo de vida de mais de 40 anos [4].

Quando comparado com outro tipo de plásticos, o PVC tem uma boa relação qualidade/preço [4]. Como principais vantagens apresenta, quando usado na forma rígida, a resistência ao impacto e ao contacto com químicos e, ainda, uma elevada resistência a condições climatéricas adversas [4]. Já na forma flexível a sua principal aplicação é em cabos elétricos motivado pela elevada flexibilidade [4]. Contudo, como todos os materiais, este também apresenta desvantagens e limitações, como por exemplo, a dificuldade de processar, uma vez que a janela de processamento é consideravelmente reduzida devido à sua baixa estabilidade térmica [4].

Para a obtenção do PVC, é necessário numa primeira fase obter o VCM que resulta da reação do cloro com o etileno.

O cloro é obtido por meio da eletrólise do cloreto de sódio em meio aquoso. Da reação resulta ainda a produção de soda cáustica e hidrogénio (Figura 6) [5][2].

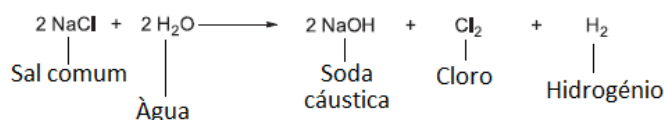


Figura 6- Reação de obtenção do cloro, imagem adaptada de [2].

Uma vez obtido o cloro, é necessário a obtenção do etileno, o que é conseguido através de uma fonte natural, como são os casos do petróleo, gás natural ou o etanol. Por processos de quebra de ligações destas fontes naturais forma-se um composto gasoso, que na sua composição contém etileno [2][6][7].

Apesar de haver diversos processos para obtenção do VCM, será apenas descrito o processo de obtenção do VCM através do recurso ao etileno e ao cloro sendo este o mais utilizado [6]. Este pode ser efetuado de duas formas, uma denomina-se por cloração direta e a outra por oxicloração. Ambos os processos apresentam como produto intermediário o 1,2-Dicloroetano (DCE) [6].

O processo de cloração direta apresenta somente como reagentes o cloro e o etileno, como é possível observar na Figura 7 [2].

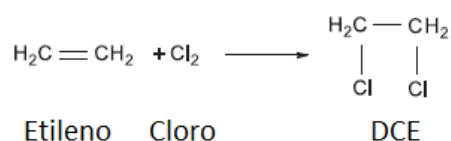


Figura 7- Reação de obtenção do DCE por cloração direta, imagem adaptada de [2].

Por outro lado, o processo de oxicloração é caracterizado pela reação entre o etileno e o cloreto de hidrogénio na presença de oxigénio (Figura 8) [2].

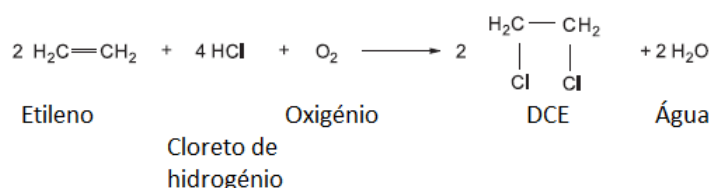


Figura 8- Reação de obtenção do DCE por oxicloração, imagem adaptada de [2].

Uma vez obtido o DCE, por meio de processos de quebra de moléculas, resulta o VCM e o cloreto de hidrogénio (figura 9) [2].

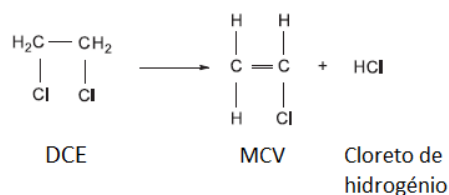


Figura 9- Reação de obtenção do VCM [2].

Como resultado da polimerização do VCM, é obtido o PVC. De entre os processos de polimerização mais revelantes e utilizados destacam-se o processo de polimerização por suspensão, por emulsão e por micro-suspensão [5][8]. O PVC de suspensão representa aproximadamente 80% do mercado atual de PVC [8], sendo que apenas 10 a 15% correspondem a PVC produzido por emulsão e micro-suspensão [5][8]. A restante percentagem corresponde a PVC produzido a partir de outras formas de polimerização

como por exemplo, polimerização em massa e polimerização em solução [5][2][8]. Contudo, para este estudo, os únicos processos de polimerização relevantes são emulsão e micro-suspensão.

No processo de polimerização por emulsão, o monómero é polimerizado na presença de água, um iniciador solúvel em água e de um ou mais emulsionantes. O emulsionante é o componente mais importante da reação, pois este é capaz de controlar a distribuição do tamanho de partículas [5][2]. A Figura 10 ilustra o processo de produção de uma resina de PVC por emulsão.

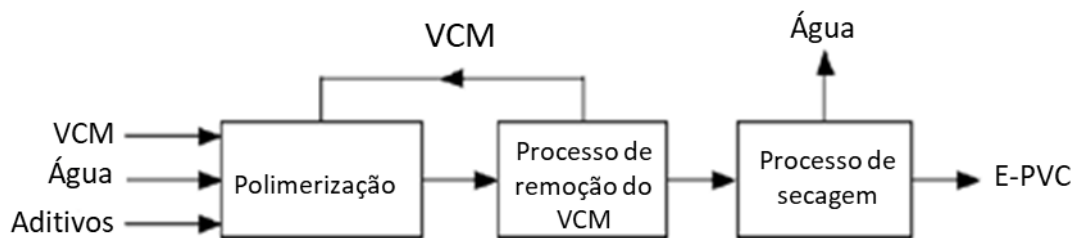


Figura 10- Processo de produção de resinas de PVC por emulsão, imagem adaptada de [5].

O processo de polimerização por micro-suspensão é idêntico ao processo de emulsão, diferenciando-se no facto que o iniciador em vez de ser solúvel em água passa a ser solúvel no monómero [5][2].

2.2. Reologia de fluidos

Entende-se por reologia a ciência que tem como objetivo principal o estudo do escoamento e deformação dos materiais, de forma a estudar e caracterizar polímeros termoplásticos [9][10][11].

Define-se por fluido, um material que deforma continuamente quando sujeito a uma tensão de corte, isto é, como resposta à tensão imposta estes fluem. No entanto, para fluidos com tensão de cedência é necessário impor uma tensão superior ao valor de tensão de cedência para que escoem [10][12][13]. Na Figura 11 encontram-se ilustrados os diferentes comportamentos reológicos de fluidos.

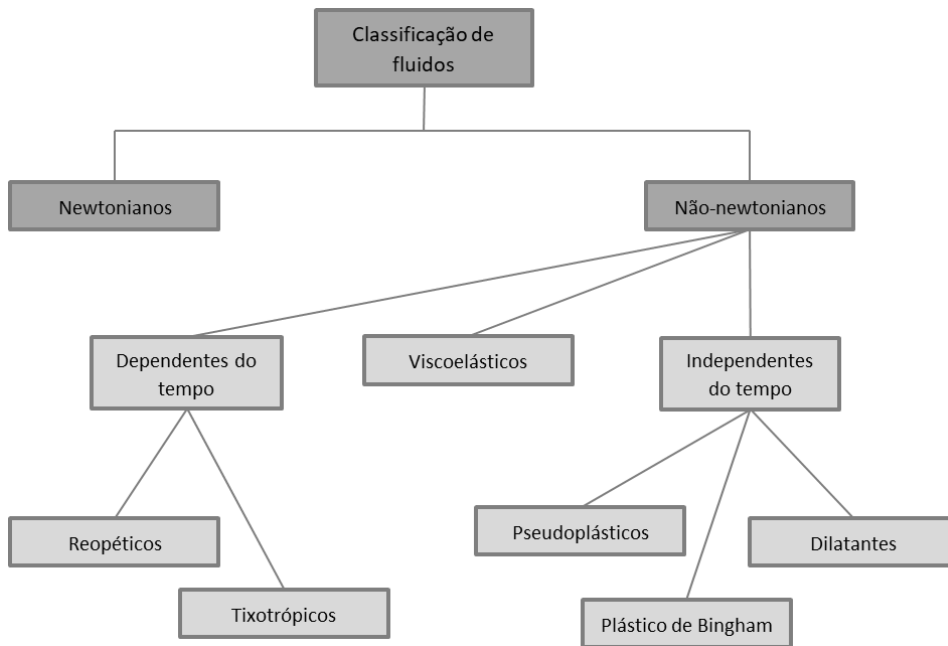


Figura 11- Classificação do comportamento reológico de fluidos.

A classificação de fluidos divide-se em duas grandes classes, sendo elas, fluidos newtonianos e fluidos não-newtonianos. Os fluidos newtonianos apresentam uma viscosidade que não depende da taxa de deformação imposta. Por outro lado, todos os fluidos que apresentem uma variação do valor da viscosidade com a taxa de deformação são classificados como fluidos não-newtonianos [12]. Os dois tipos de comportamento reológico previamente referidos encontram-se representados na Figura 12.

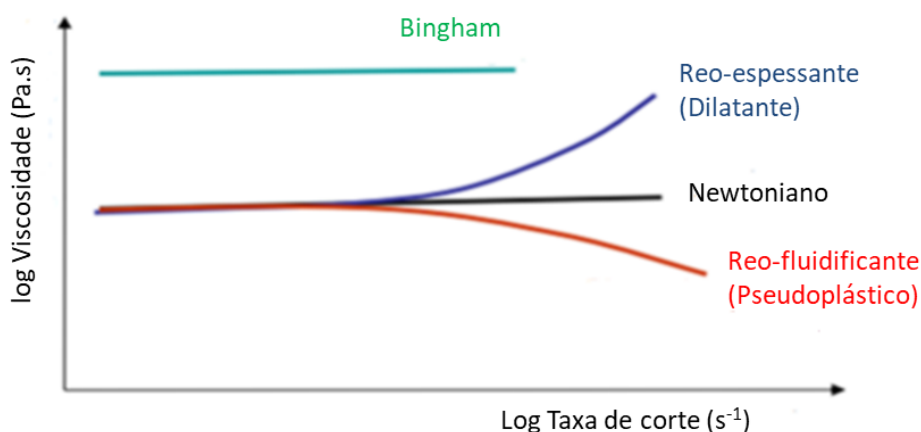


Figura 12-Curva de viscosidade em função da taxa de corte para diferentes tipos de fluidos, imagem adaptada de [14].

Ainda, relativamente à viscosidade, pela observação da Figura 12, dentro da classe dos fluidos não-newtonianos podem-se observar dois tipos de fluidos com comportamento distinto. Um fluido reo-fluidificante é caracterizado por uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de corte, ao passo que um fluido dilatante é caracterizado por

um aumento da viscosidade com o aumento da taxa de corte [12]. A Figura 13 apresenta a tendência da tensão de corte em função da taxa de corte para os fluidos apresentados.

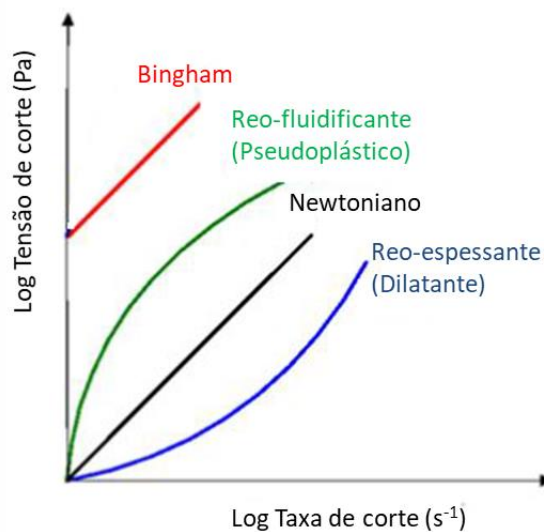


Figura 13- Curva de tensão de corte em função da taxa de corte. Imagem adaptada de [14].

Analisando a Figura 13, é possível observar a proporcionalidade direta entre a tensão de corte e a taxa de corte de um fluido newtoniano. O mesmo não acontece para os fluidos não-newtonianos.

Para além do que já foi referido, é ainda possível observar um outro tipo de comportamento, nomeadamente no que diz respeito ao plástico de *Bingham*. Trata-se de um fluido com comportamento ligeiramente diferente dos demais, devido à existência de uma tensão de cedência, ou seja, ele comporta-se como um sólido para valores de tensão de corte abaixo da tensão de cedência e, para valores superiores de tensão, o seu comportamento é semelhante ao de um fluido newtoniano [12]. Estes fluidos com tensão de cedência podem ainda apresentar comportamento reofluidificante e reoespessante [12].

Dentro da classe dos fluidos não-newtonianos existe ainda uma categoria de fluidos em que a viscosidade é dependente do tempo, isto é, fluidos cuja viscosidade varia com o tempo. Estes fluidos são denominados por fluidos tixotrópicos, quando a viscosidade diminui quando deformados, e fluidos reopéticos, nos quais a viscosidade aumenta quando imposta uma deformação [12].

Por fim, quanto aos fluidos viscoelásticos, estes apresentam um comportamento distinto dos demais, pois não se comportam totalmente como um sólido perfeito nem

como um fluido. Estes são caracterizados por recuperarem parcialmente o seu estado original após sofrerem uma deformação [12].

2.3. *Plastisol de PVC*

Para obter um plastisol de PVC, tendo como base a resina de PVC obtida pelos processos descritos na Subsecção 2.1, existe a necessidade de mistura da mesma com um conjunto de aditivos para obtenção do produto final (plastisol de PVC).

O plastisol de PVC é definido como uma suspensão de partículas de PVC num plastificante, sendo adicionados diversos aditivos de forma a conferir as propriedades desejadas ao produto final [15][16].

Dependendo da distribuição do tamanho de partículas da resina, do tipo de resina e dos aditivos, podem ser obtidos plastissóis com comportamentos reológicos muito distintos, distinguindo-se como plastissóis de viscosidade baixa, média e alta [16]. Estes são caracterizados por apresentar comportamentos distintos dependendo da taxa de corte aplicada e da formulação empregue [17]. Os plastissóis de PVC são caracterizados por apresentar um comportamento tipicamente reofluidificante [17]. Em função da taxa de corte, o comportamento reológico destes materiais inicia-se por apresentar um patamar newtoniano para baixas taxas de corte (podendo este ser em taxas de corte muito reduzidas e não ser observado), seguido do comportamento reofluidificante e novamente um patamar newtoniano [17]. Ainda, dependendo da formulação empregue este pode ainda apresentar um comportamento reoespessante para altas taxas de corte (normalmente mais incidente em formulações cujo tamanho de partículas apresente uma distribuição pequena) [17].

Estes comportamentos distintos refletem-se no método de processamento do plastisol de PVC, diferentes métodos de processamento requerem comportamentos reológicos específicos [16].

2.3.1. *Composição*

O plastisol de PVC é composto por uma ou mais resinas de PVC e por uma combinação de aditivos que, após o processamento, resultam no produto desejado [5].

Na Figura 14 são apresentados os principais componentes constituintes de uma formulação típica de um plastisol de PVC.

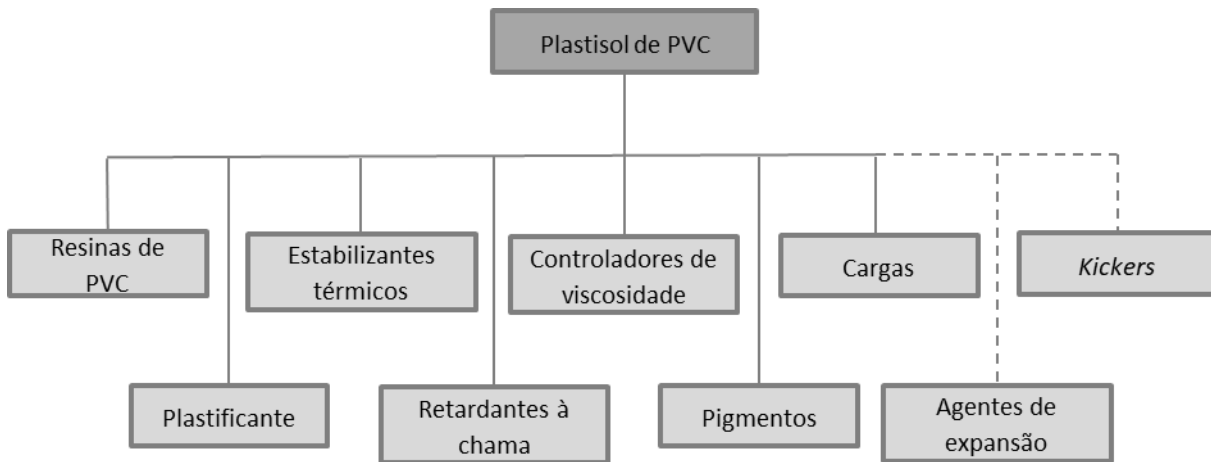


Figura 14- Constituição típica de um plastisol de PVC.

O tracejado presente na Figura 14 corresponde à não obrigatoriedade de utilização desses componentes, ou seja, os *kickers* e agentes de expansão são utilizados quando o objetivo é a produção de um expandido.

O plastificante é um dos aditivos mais importantes da formulação de um plastisol de PVC. O principal mecanismo deste componente consiste na penetração entre as cadeias do polímero de forma a aumentar a distância entre elas, tendo como função conferir flexibilidade desejada ao produto final [16]. A seleção deste componente é feita de forma cuidada tendo em conta aspetos como compatibilidade com a resina, estabilidade térmica, natureza química entre outros [16].

A incidência de calor e radiação UV provoca a libertação de cloreto de hidrogénio (HCl) do PVC e uma conseqüente mudança para uma cor amarelada, denominada de degradação [2][16], como forma de contenção, são adicionados estabilizantes térmicos, estes são responsáveis, como o próprio nome indica, por aumentar a estabilidade térmica, alargando desta forma a janela de processamento e prevenindo a degradação térmica [16].

O retardante à chama tem como principal função diminuir a probabilidade de propagação de chama em caso de combustão [2]. Os controladores de viscosidade são usados para facilitar o processamento de materiais cuja viscosidade não esteja dentro dos limites impostos face o tipo de processamento empregue [2].

Para colorir os plastissóis de PVC empregues, são adicionados à formulação pigmentos cuja principal funcionalidade deste é a coloração dos materiais [2].

No que diz respeito às cargas, estas são incorporadas na formulação com a finalidade de reduzir o custo do material e de incrementar algumas propriedades no material, como por exemplo, a estabilidade térmica, a rigidez e a dureza [2].

Por último, os agentes de expansão e os *kickers* apenas são utilizados quando o objetivo principal é a produção de um expandido, sendo a principal função da utilização do *kicker* a diminuição da temperatura de decomposição do agente de expansão [2].

2.3.2. Preparação

A preparação de um plastisol de PVC resume-se à junção de todos os componentes a utilizar na formulação para, posteriormente, ser efetuado o processo de mistura dos mesmos anteriormente pesados. A mistura é efetuada com uma velocidade e tempo de mistura determinado face à formulação empregue. O principal objetivo deste é a homogeneização da mistura, fazendo com que todos os componentes sejam dispersos de forma a obter com isto um fluido com propriedades uniformes [16].

No processo de mistura, são incorporadas no plastisol grandes quantidades de ar, que, se não for removido, pode apresentar um impacto muito significativo nas propriedades do material, como por exemplo a redução do desempenho mecânico devido à presença de poros provocados pelo ar presente no plastisol [18]. Apesar do ar incorporado no plastisol ser expelido ao longo do tempo de armazenamento, este processo pode ser acelerado através da colocação do composto numa câmara de vácuo [18].

Durante a preparação do plastisol, pequenas impurezas podem ser incorporadas na pasta, estas podem originar consequências desastrosas quando pronto o produto final. Por esse motivo, depois de produzido, o plastisol é submetido a um processo de filtragem em que este é forçado, por ação da gravidade, à passagem por uma malha removendo assim todas as impurezas e objetos não desejáveis, com dimensão superior ao tamanho dos orifícios da malha [18].

2.3.3. Processamento

Dependendo da aplicação final dos produtos à base de plastisol de PVC, estes fluidos podem ser processados por diferentes técnicas, nomeadamente [19]:

- *Recobrimento por imersão*

O recobrimento por imersão, também conhecido por *Dip Coating*, resume-se na imersão de uma determinada peça num reservatório com plastisol de PVC. A quantidade de plastisol que se agrega às paredes da peça pode ser controlada através, por exemplo, da viscosidade ou do tempo de imersão [20]. Trata-se de um processo que requer uma elevada exigência e rigor para que seja possível obter a qualidade desejada no produto final [20]. Este processo pode ser efetuado por imersão a quente ou a frio, sendo que para a primeira é necessário um pré-aquecimento do molde antes da imersão no plastisol [2][21]. O processo pode ser observado na Figura 15.

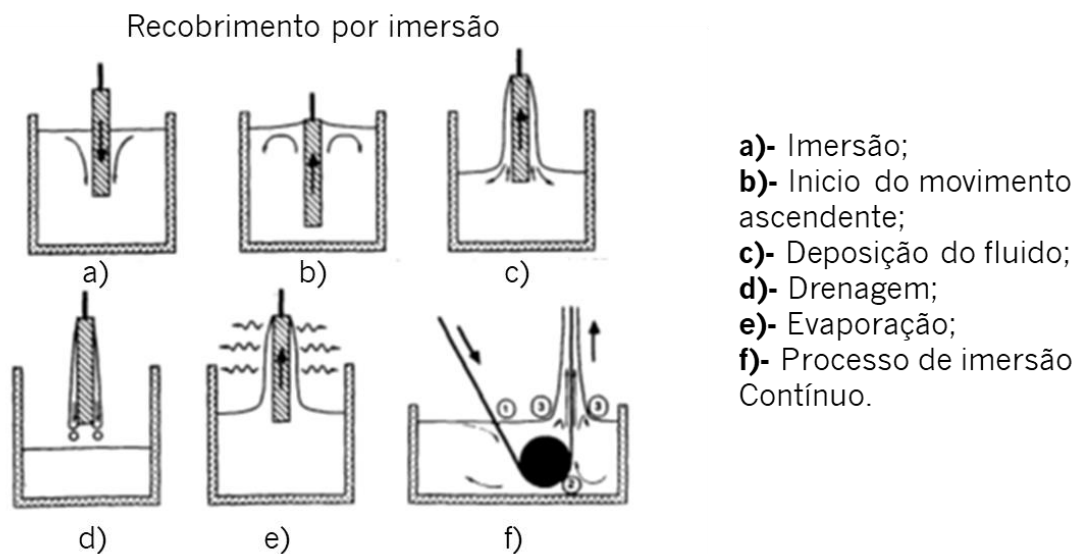


Figura 15- Ilustração de todas as fases do processo de recobrimento por imersão. Imagem adaptada de [22].

- *Recobrimento por spray*

Esta técnica apresenta como principais aplicações a pintura e a aplicação de plastisol de PVC em materiais com geometria complexa. Consiste na aplicação do fluido através de um orifício de pequenas dimensões, sob a ação de ar altamente pressurizado [20]. Os plastissóis aplicados por esta técnica devem ter viscosidades baixas e não apresentar um comportamento reoespessante, pois à saída do orifício desenvolvem-se elevadas taxas de corte, podendo causar dificuldades no fluxo do mesmo devido à

viscosidade proporcionada pela elevada taxa de corte, como resultado, poderá ter um acabamento não-homogêneo e de baixa qualidade [2][21]. A Figura 16 representa um exemplo de aplicação de plastisol de PVC com recobrimento por spray.



Figura 16- Ilustração do processo de recobrimento por spray. Imagem adaptada de [21].

- *Recobrimento por faca*

O recobrimento por faca é a técnica de processamento de plastissóis mais conhecida, antiga e mais usada devido à sua simplicidade e elevada precisão de recobrimento [23][19][24]. Trata-se uma técnica extremamente versátil quando o objetivo é recobrir num substrato [21][23].

Este processo consiste na aplicação de um determinado material num substrato, em que o material é depositado em excesso num substrato sendo a quantidade final aplicada determinada por uma faca [24][25]. Dependendo do tipo de material polimérico a recobrir e as suas propriedades reológicas, este pode ser aplicado mediante diferentes sistemas de recobrimento, como é o exemplo do recobrimento por faca situada entre dois rolos (comumente denominado por *Air-knife*, Figura 17) e recobrimento sobre um rolo (comumente denominado por *knife-over-roll*, Figura 18) [25].

No caso do *Air-knife*, este sistema é composto por dois rolos com distâncias compreendidas entre 25-40 cm aproximadamente, estando assim a faca situada no meio desses dois rolos. Uma vez depositando a pasta no substrato, a aplicação desta é fortemente determinada pela tensão e velocidade do substrato [24][25].

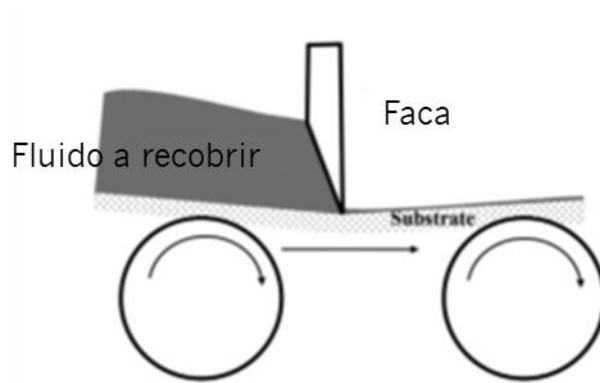


Figura 17- Ilustração do processo de recobrimento, Air-knife. Imagem adaptada de [24].

O processo de recobrimento por faca apresenta duas alternativas: direto e indireto [19][25]. Numa fase inicial, em ambos os processos, o plastisol é depositado no substrato, posto isto, a grande diferença existente entre os dois processos reside no facto de no processo de recobrimento direto a camada visível é a última a ser aplicada enquanto no processo indireto a camada visível é a primeira. Isto porque, no caso de ser necessário a existência de um substrato têxtil no artigo, no processo direto o plastisol pode ser aplicado nesse mesmo substrato têxtil, enquanto no processo indireto este tem que ser aplicado durante a aplicação de uma das camadas [19][25].

No processo de recobrimento por faca, esta encontra-se suspensa por cima de um rolo, podendo este ser de aço ou de borracha. A espessura do filme formado é controlada maioritariamente pelo valor do entreferro, podendo esta ter elevada precisão [19][24][25]. Esta configuração de processamento encontra-se apresentada na Figura 18.

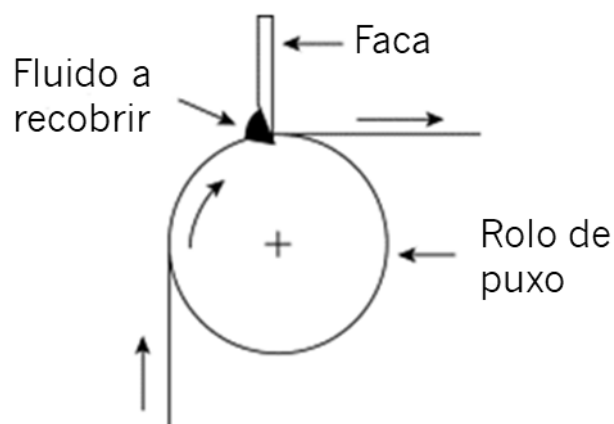


Figura 18- Ilustração do processo de recobrimento por faca, knife-over-roll. Imagem adaptada de [19].

Neste tipo de processo existem vários fatores capazes de determinar a qualidade do material recoberto, sendo eles os seguintes:

- Faca: esta é responsável pela formação do filme e pelo seu aspeto final.
- Velocidade linear de processamento: esta é determinante no valor da taxa de corte aplicada no plastisol, estando este diretamente relacionado com o comportamento reológico do plastisol.
- Reologia do plastisol: quando não adequada ao tipo de processamento empregue, a viscosidade do material pode traduzir-se em dificuldades no escoamento do plastisol.
- Entreferro: este é responsável por determinar a espessura do filme produzido.
- Unidades de estufa: responsável por, através de energia fornecida garantir a completa fusão do material. Caso a velocidade do ar seja elevada, a incidência deste sobre o material, ainda não fundido, pode induzir defeitos neste nomeadamente covas e efeito areado [23].

Após a passagem do plastisol de PVC na faca, o filme é introduzido numa estufa sofrendo dois fenómenos, gelificação e fusão do plastisol, com o incremento de temperatura, como é possível observar na figura 19 [26].

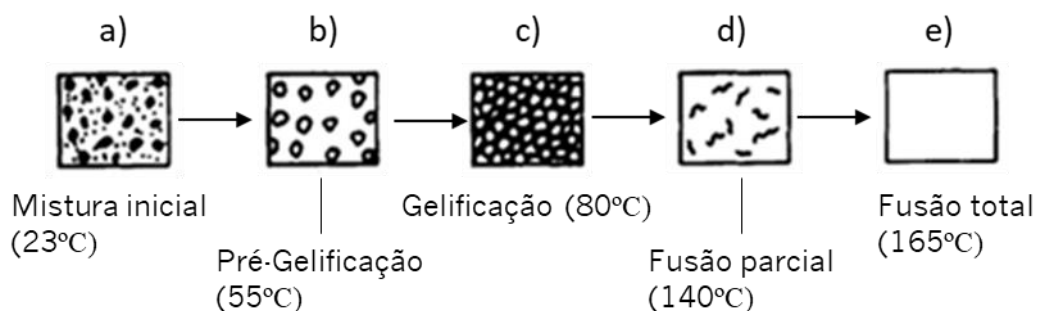


Figura 19- Ilustração do fenómeno de gelificação e fusão no plastisol; a) Estado inicial da mistura; b) Pré-Gelificação; c) Gelificação completa; d) Início da fusão; e) Fusão completa. Imagem adaptada de [26].

O processo de gelificação e fusão, ilustrado na Figura 19, decorre ao longo das seguintes etapas. As temperaturas apresentadas resultam de um estudo efetuado a um plastisol típico usado neste tipo de processo:

- Em (a) as partículas de PVC encontram-se dispersas no plastificante. Esta fase representa o material desde o seu armazenamento até a passagem pela faca, nesta fase

ocorre a solvatação parcial das partículas de PVC, sendo esta proveniente da absorção de pequenas quantidades de plastificante pelas partículas de PVC resultado do armazenamento dos plastissóis. Esta primeira fase ocorre à temperatura ambiente [26];

- Em (b) é possível observar uma pré-gelificação (absorção parcial de plastificante pelas partículas de PVC) à temperatura aproximada de 55°C. Nesta etapa, o aumento de temperatura promove a entrada de plastificante nas partículas de PVC [26];

- Em (c) é completo o processo de gelificação, isto é, as partículas de PVC absorvem na totalidade a quantidade de plastificante existente no meio. Este processo é finalizado à temperatura de 80°C, aproximadamente, iniciando-se a fase de fusão do material [26];

- Em (d), à temperatura de 140°C, ocorre uma fusão parcial das partículas motivado pelo aumento de temperatura. Nesta fase ainda é possível verificar a existência de algumas fronteiras entre as partículas [26];

- Em (e), ocorre a fusão total, ou seja, o material torna-se numa massa homogênea sem que seja observado qualquer tipo de fronteira entre as partículas. A fusão total do material ocorre aproximadamente aos 165°C [26].

Após a fusão completa do material, este encontra-se conforme o produto final desejado e projetado [26][27]. As temperaturas acima descritas representam as temperaturas aproximadas de gelificação e fusão, as quais dependem principalmente do tipo de resina e de plastificante [27].

2.4. *Modelação computacional*

Define-se por simulação Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) a análise da dinâmica de fluidos, nomeadamente o fluxo de um fluido, a transferência de calor e as reações químicas por meio de um estudo numérico. Esta, é uma ferramenta com a capacidade de abranger inúmeras áreas de aplicação, como por exemplo, a engenharia biomédica, a hidrodinâmica naval, a engenharia elétrica, a engenharia automóvel, entre outros [28].

Nesta dissertação, a simulação numérica será realizada através de um *software* designado *OpenFOAM*, sendo um software livre para a realização de simulações CFD, entre outras aplicações. Inicialmente foi criado por *Henry Weller* e *Hrvoje Jasak*, em

1989, com o nome inicial de *FOAM* e, mais tarde, em dezembro de 2004, tornou-se um *software* aberto e de distribuição livre. Desde então, o *OpenFOAM* tem sido trabalhado e melhorado por uma vasta comunidade de utilizadores, sendo atualmente atualizado duas vezes por ano [29].

2.4.1. Metodologia

Para a resolução numérica de uma simulação em *OpenFOAM* é necessário que cada caso possua uma estrutura pré-definida que, é responsável pelo armazenamento de dados referentes à simulação em si, nomeadamente, a geometria, malha computacional, as condições de fronteira, os métodos de resolução das equações, os métodos de discretização dos termos das equações diferenciais, os dados de controlo do processo de cálculo, as propriedades do fluido, entre outros.

A Figura 20 ilustra um caso típico de estudo em *OpenFOAM*.

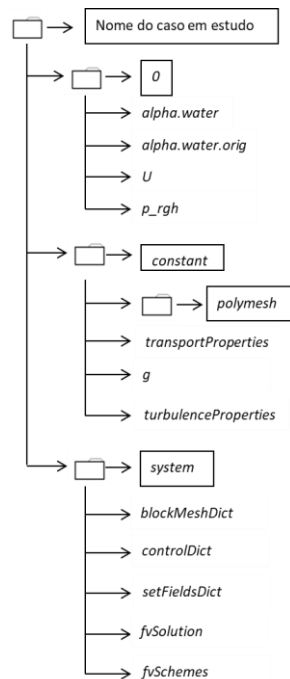


Figura 20-Estrutura típica de um caso de estudo em *OpenFOAM*, imagem adaptada de [30].

A realização de uma simulação requer a divisão da mesma em 3 etapas principais e fundamentais, sendo elas as seguintes:

- Pré-processamento: Esta fase é caracterizada por ser a mais importante devido à elevada dependência dos resultados com as condições que aqui são impostas. São definidos todos os parâmetros e fornecidas as ferramentas necessários para a solução da simulação em *OpenFOAM* [30].

Esta fase inicia-se com a construção da geometria através do ficheiro (*blockMeshDict*), este permite a definição completa de toda a geometria assim como o refinamento da mesma. Posto isto, são definidas as condições de simulação nomeadamente controlo do processo de cálculo (*controlDict*), métodos de discretização dos termos das equações governativas (*fvSchemes*) e o método de resolução do sistema de equações resultante (*fvSolution*). Todos os ficheiros referidos encontram-se na pasta “*system*”. As propriedades físicas do material em estudo são definidas na pasta “*constant*”, nomeadamente através dos ficheiros, “*transportProperties*” responsável por definir o modelo reológico capaz de descrever o comportamento do fluido, em “*g*” é definido a aceleração gravítica e, o ficheiro “*turbulenceProperties*” é responsável por definir o tipo de escoamento [30]. Após a geometria criada, na pasta “*0*” define-se as condições para o instante inicial de cálculo, no caso do exemplo ilustrado e como é possível observar na Figura 20, define-se as condições de fronteira de velocidade “*U*” e pressão “*p_rgh*” e ainda o ficheiro capaz de introduzir o fluido na zona desejada [30]. Após definidas todas as condições necessárias para a simulação deve ser efetuado um estudo de refinamento da malha. Este estudo consiste na execução de simulações com malhas de diferentes níveis de refinamento conferindo a malha à qual os resultados já não se encontram alterados motivados pelo refinamento da malha.

- Cálculo numérico: esta etapa é responsável pela resolução numérica da simulação. O *OpenFOAM* possui um conjunto de *solvers* adequados a diferentes processos físico-químicos, tendo como o exemplo o *interFoam* (estudo entre dois fluidos incompressíveis e imiscíveis), o *icoFoam* (estudo para fluido newtoniano incompressível em escoamento laminar) e *simpleFoam* (estudo para fluido incompressível em escoamento turbulento), entre outros [30].

- Pós-processamento: após a conclusão da simulação numérica, são analisados os resultados obtidos. Para a visualização dos resultados, é habitualmente empregue o *software paraView* [30]. Esta ferramenta permite não só a apresentação dos resultados obtidos, mas também a manipulação dos mesmos por parte do utilizador. Nesta etapa

são ainda utilizados utilitários para avaliação de propriedades após a simulação efetuada, tendo como exemplo *wallShearStress* para cálculo de tensão de corte para todas as paredes [30].

2.4.2. Método dos Volumes Finitos

Para a discretização das equações, o *OpenFOAM* utiliza o MVF (Método Volumes Finitos) para a resolução das equações governativas.

O MVF consiste num método de discretização que permite transformar as equações diferenciais de derivadas parciais governativas de um processo num sistema de equações algébricas. O domínio é dividido em vários volumes de controlo e, o MVF permite obter uma equação algébrica para cada célula, que envolve as incógnitas da mesma e das células vizinhas resultando num sistema de equações. Posto isto, o sistema de equações algébricas é resolvido de forma a calcular os valores das variáveis dependentes para cada volume de controlo [31]. A precisão dos resultados obtidos por meio dos cálculos é tanto maior quanto maior seja o refinamento da malha, como consequência o tempo de cálculo será aumentado.

Quando comparado com outros métodos, o MVF representa um método robusto e pouco dispendioso para a discretização das leis da conservação [32]. Este método tem como principal aplicação a resolução de problemas que envolvam transferência de calor ou massa e ainda mecânica de fluidos [31].

3. Estado da arte

Este capítulo é composto por uma revisão bibliográfica face ao comportamento reológico de plastissóis de PVC e sobre estudos numéricos e/ou experimentais disponíveis na literatura relativos aos processos de fabrico semelhantes ao recobrimento indireto por faca estudado no presente trabalho.

3.1. Reologia de plastissóis de PVC

A reologia é definida como a ciência que estuda o fluxo e a deformação dos materiais, sendo de extrema importância orientar tarefas de conceção e monitorização associadas aos mesmos, uma vez que permite prever o seu comportamento quando processados [33].

A pesquisa bibliográfica sobre plastissóis permitiu concluir que estes materiais apresentam um comportamento reológico muito diversificado. O plastisol de PVC é caracterizado por apresentar um comportamento complexo face à sua reologia, este comportamento reológico pode facilmente ser alterado dependendo da formulação empregue, por exemplo, tipo de resina e plastificante assim como as quantidades, e ainda, a presença de aditivos [8][34][17].

O comportamento reológico destes materiais pode ser alterado face à variação de alguns fatores, sendo estes descritos nas subsecções seguintes, nomeadamente a taxa de corte, temperatura, a distribuição de tamanho de partículas, o efeito do tempo de armazenamento e ainda o processo de vácuo.

3.1.1. Taxa de corte

Como já explicito na Secção 2.2, dependendo da taxa de corte a que for sujeito, os plastissóis podem apresentar comportamentos diferentes, podendo ocorrer o aparecimento de dois tipos de comportamentos neste tipo de materiais, sendo eles reofluidificante e reoespessante [17].

Contudo, os plastissóis de PVC podem ter estes comportamentos, anteriormente descritos, atenuados face ao tipo de formulação empregue [8][34][17]. A natureza destes comportamentos, reofluidificante e reoespessante podem ser observados com detalhe na Figura 12 da Secção 2.2.

Através da análise de um estudo da literatura, foi observada a variação da viscosidade em função da taxa de corte de um plastisol de PVC, como é possível observar na Figura 21 [8].

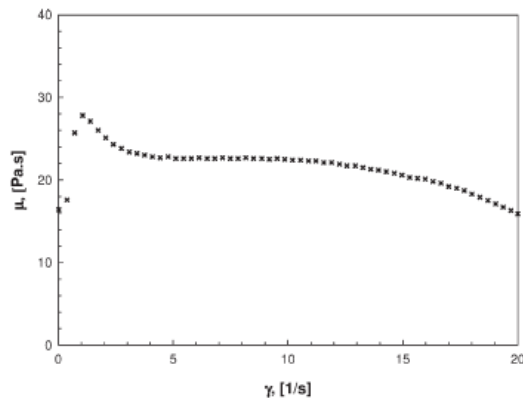


Figura 21- Comportamento reológico típico de um plastisol de PVC para valores de taxas de corte até 20 s^{-1} . Imagem adaptada de [8].

Pela análise da Figura 21 denota-se o aparecimento de um patamar newtoniano, surgindo este para taxas de corte compreendidas entre 5 e 10 s^{-1} aproximadamente, seguido do início de um comportamento reofluidificante, não abrangido na gama de taxas de corte testadas [8].

Em outro estudo da literatura avaliou-se o comportamento reológico de um outro plastisol, mas para valores de taxas de corte superiores às anteriormente observadas, como ilustrado na Figura 22 [17].

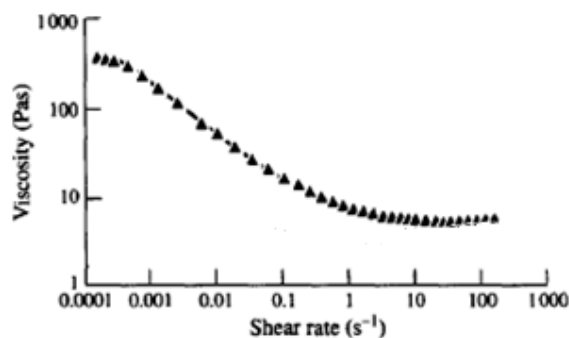


Figura 22- Comportamento reológico típico de um plastisol de PVC para valores de taxas de corte até 400 s^{-1} . Imagem adaptada de [17].

Analisando a Figura 22, é observado o comportamento reofluidificante apresentando um patamar newtoniano para baixas e outro para altas taxas de corte. Com a formulação empregue, não é visível o aparecimento do comportamento reoespassante uma vez que este comportamento pode também ser atenuado ou até

eliminado através do uso de aditivos com essa função específica ou ainda pela utilização de mais do que um tipo de resina de PVC de forma a alargar a distribuição de tamanho de partículas. Quanto menor for a distribuição do tamanho de partículas maior será a probabilidade de formação de estruturas que impeçam o movimento das partículas resultando num aumento de viscosidade [8][17].

De forma a compreender o comportamento dos plastissóis processados na TMG Automotive foi efetuado um estudo prévio de forma a determinar o comportamento reológico dos mesmos. Este encontra-se ilustrado na Figura 23.

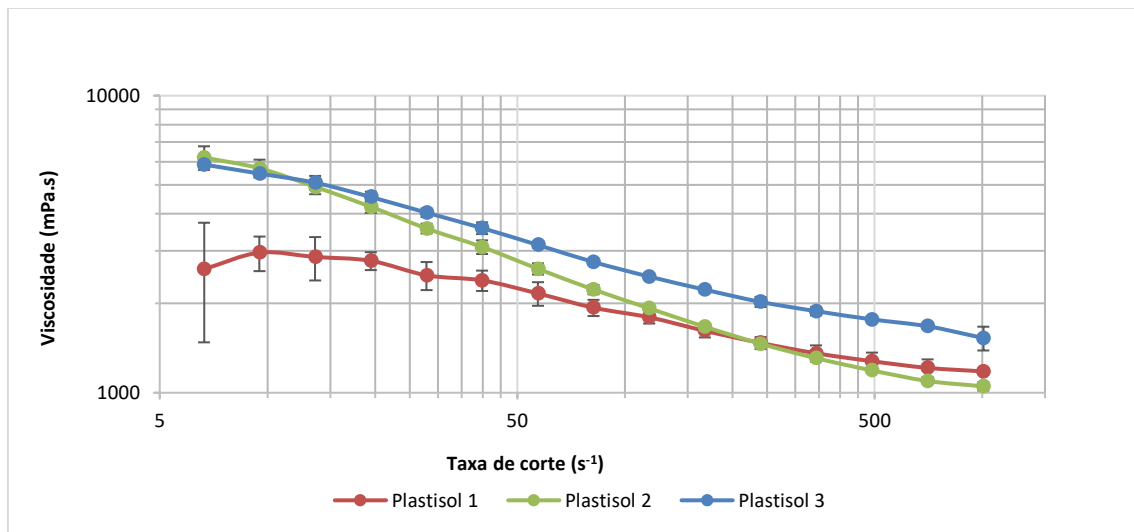


Figura 23-Viscosidade em função da taxa de corte para taxas de corte até 1000 s^{-1} . Imagem adaptada de [35].

Analisando a Figura 23, os plastissóis processados na TMG Automotive são caracterizados por apresentar um comportamento reofluidificante [35].

Uma vez que o comportamento reológico dos plastissóis de PVC para taxas de corte superiores a 1000 s^{-1} não se encontrava documentado na literatura, a TMG Automotive subcontratou um estudo externo através da *Anton Paar* capaz de caracterizar uma formulação utilizada em produção para taxas de corte de até 10000 s^{-1} , para conhecer o comportamento do plastisol a taxas de corte semelhantes às do processo industrial. Os resultados provenientes desse estudo podem ser observados na Figura 24 [36].

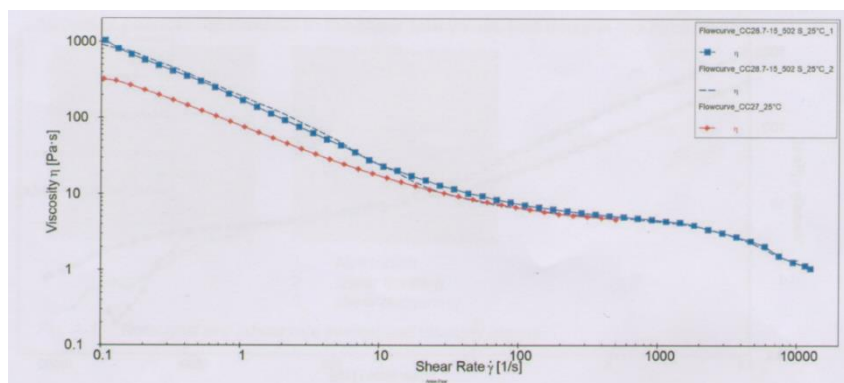


Figura 24- Comportamento reológico típico de um plastisol de PVC para valores de taxas de corte até 10000 s^{-1} . Imagem adaptada de [36].

Pela análise da Figura 24 é observado um decréscimo de viscosidade para taxas de corte superiores a 1000 s^{-1} . As três curvas existentes no gráfico são provenientes de ensaios efetuados com diferentes distâncias entre os pratos.

Com isto, é possível concluir que o comportamento reológico destes materiais é muito dependente da formulação empregue e das condições em que são operados. Por esta razão torna-se tão importante o conhecimento reológico do material para que seja possível perceber em que condições este se encontra a ser processado.

3.1.2. Temperatura

A temperatura é o fator responsável pela transição de um plastisol de PVC desde a fase líquida até o artigo final, após gelificação e fusão do mesmo. Contudo, a relevância deste trabalho resume-se ao comportamento do plastisol de PVC durante a fase líquida, sendo esta a fase em que o mesmo é recoberto.

Na Figura 25 é possível observar um varrimento de temperatura efetuado dois plastissóis produzidos com duas resinas diferentes.

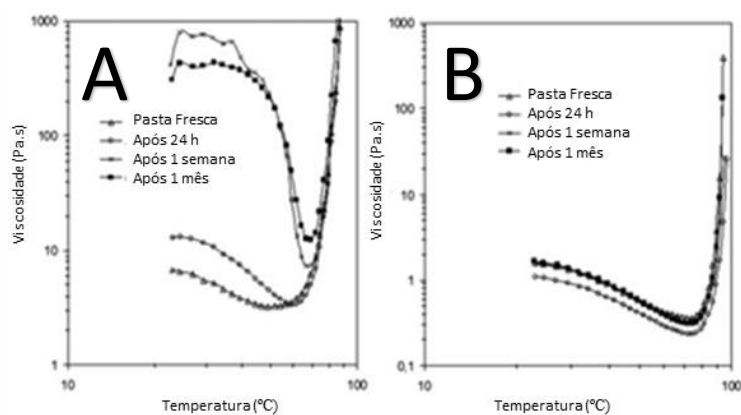


Figura 25- Curva de viscosidade em função da temperatura: A) resina de emulsão; B) resina de micro-suspensão. Imagem adaptada de [37].

Através da análise da Figura 25, observa-se uma diminuição da viscosidade dos dois plastissóis, um produzido com resina de emulsão (Figura 25-A) e outro com resina de micro-suspensão (Figura 25-B). A diminuição de viscosidade apresentada é justificada pela expansão térmica das moléculas na fase líquida, resultando num aumento de volume, maior mobilidade entre as moléculas e conseqüentemente uma diminuição de viscosidade [38].

A partir de um certo valor de temperatura, é iniciado o processo de gelificação e fusão do plastisol, sendo que este valor limite de temperatura está dependente da formulação empregue [6][37], como é possível observar na Figura 25, os dois plastissóis testados apresentam valores de temperatura limite (temperatura à qual se inicia o processo de gelificação) diferentes, em A o valor de temperatura limite encontra-se numa gama compreendida entre os 60 e 70°C, por outro lado em B a gama de temperaturas situa-se entre os 75 e 85 °C aproximadamente.

Na Figura 25 encontra-se ainda um estudo paralelo efetuado aos dois plastissóis produzidos sendo este o efeito do tempo de armazenamento abordado com detalhe na subsecção 3.1.4.

3.1.3. Distribuição de tamanho de partículas

A distribuição do tamanho de partículas é um fator com uma contribuição relevante para o comportamento reológico dos plastissóis de PVC [34], ainda, o tamanho de partículas do plastisol processado deve ser conhecido de forma a garantir que o valor máximo da maior partícula seja inferior ao valor do entreferro no processo de recobrimento indireto por faca. A distribuição de tamanho de partículas pode ainda ser alterada pela adição de aditivos, como por exemplo cargas [34].

De forma a avaliar o impacto da distribuição do tamanho de partículas no comportamento reológico do plastisol foi efetuado um estudo relacionando dois plastissóis com diferentes distribuições de tamanho de partículas, esta distribuição pode ser observada na Figura 26 [8].

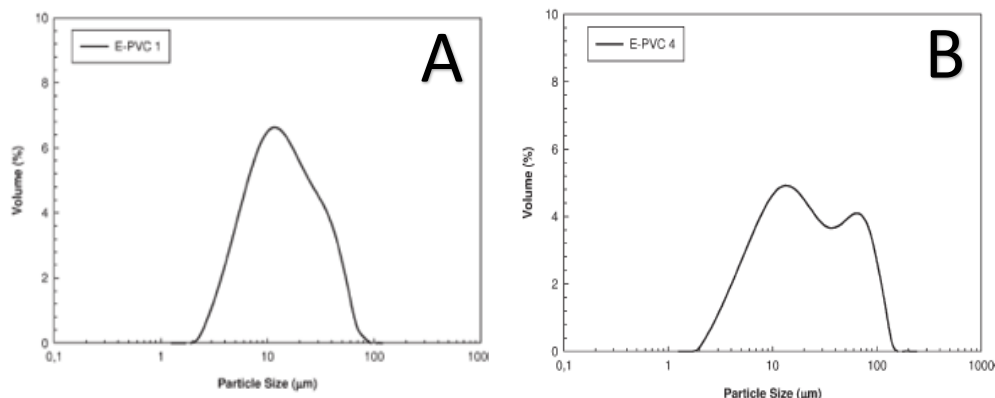


Figura 26- Distribuição do tamanho de partículas da resina base do plastisol. P1 (esquerda) P2 (direita). Imagem adaptada de [8].

Pela análise da Figura 6 observa-se um valor de tamanho médio de partículas (d_{50}) muito próximo, no entanto a grande diferença entre os plastissóis testados reside na distribuição de tamanho de partículas (d_{90} - d_{10}) [8]. Posto isto, foi avaliado o comportamento reológico de cada um dos plastissóis, este encontra-se ilustrado na Figura 27 [8].

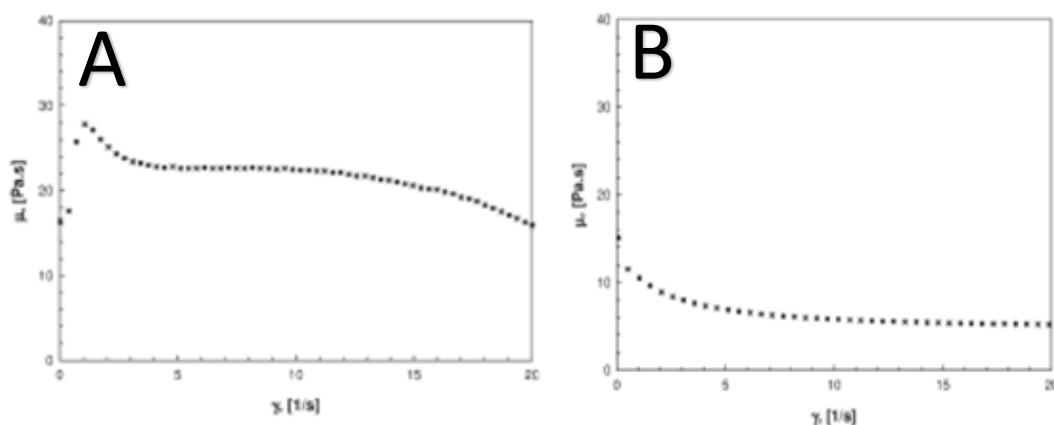


Figura 27- Efeito da distribuição de tamanho de partículas na viscosidade: A) referente a P1; B) referente a P2. Imagem adaptada de [8].

Através da análise das Figuras 26 e 27 é possível perceber a relevância deste fator no comportamento reológico dos plastissóis, sendo que quanto mais ampla a distribuição de tamanho de partículas menor será a viscosidade do plastisol [8].

Ainda, quanto menor for a distribuição do tamanho de partículas, maior será a tendência para que o material apresente um comportamento reoespessante [17], motivado pelo aumento das colisões entre partículas e formação de aglomerados que impeçam o movimento do fluido resultando num aumento de viscosidade [8][17].

3.1.4. *Efeito do tempo de armazenamento*

Os plastissóis de PVC são produzidos para serem utilizados nos processos de fabrico, mas, devido a algumas limitações pode não haver a possibilidade de processar os materiais imediatamente após a sua produção. Desta forma, é também relevante o conhecimento relativo ao efeito do tempo de armazenamento nas propriedades reológicas do plastisol.

Estudos prévios permitiram concluir que as alterações de comportamento motivadas pelo tempo de armazenamento são também dependentes da formulação usada, nomeadamente do tipo de resina e do tipo de plastificante presente na formulação [6]. Com isto, a viscosidade dos plastissóis de PVC tende a aumentar com o tempo de armazenamento, sendo este fenómeno denominado por envelhecimento [34][17][37][39]. O aumento de viscosidade nos primeiros dias é elevado e rápido, sendo que, à medida que o tempo passa o aumento de viscosidade é atenuado, ao fim de um determinado tempo a viscosidade tende a estabilizar para um determinado valor [37][39]. Estes efeitos podem ser explicados pela solvatação parcial das partículas de PVC, estas quando armazenadas absorvem alguma quantidade de plastificante provocando um aumento da dimensão da partícula de PVC [37][39]. A magnitude do aumento de viscosidade depende do plastificante usado, sendo alguns mais suscetíveis a este fenómeno, e da temperatura à qual o material é armazenado, quanto maior a temperatura maior será a quantidade de plastificante absorvido pela partícula de PVC [34][17][37]. Importa referir que, este fenómeno é ainda mais acentuado em resinas produzidas por emulsão do que por micro-suspensão, pois resinas produzidas por emulsão tem baixa permeabilidade permitindo a penetração de plastificante na partícula de forma mais facilitada [37]. O aumento de viscosidade nas duas resinas pode ser observado na Figura 25 da Subsecção 3.1.2 em que dois plastissóis foram testados logo após a sua produção, 24 horas, 1 semana e 1 mês após [37]. Analisando a Figura 25, o plastisol produzido com resina de emulsão apresenta um aumento bastante significativo de viscosidade contrariamente à resina de micro-suspensão, não sendo este acentuado [37].

O fenómeno de envelhecimento no comportamento reológico do material encontra-se ilustrado pelas Figuras 28 a 30 abaixo apresentadas, representando um estudo efetuado a 3 plastissóis testados a cada 24 horas durante um período de 216

horas. O envelhecimento destes materiais foi estudado por um tempo compreendido desde o dia em que foram produzidos até 216 horas após a sua produção.

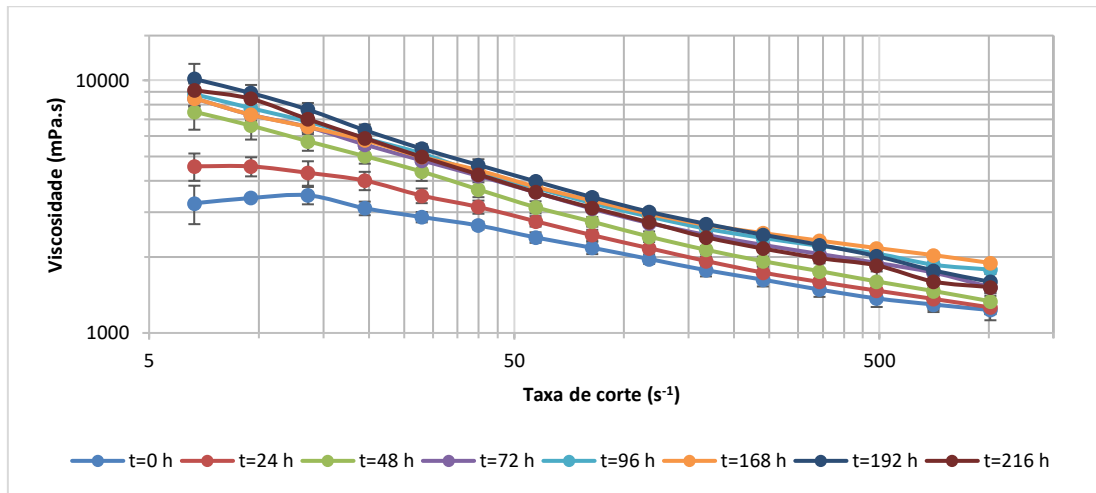


Figura 28- Influência do tempo de armazenamento do Plastisol 1 na viscosidade em função da taxa de corte [35].

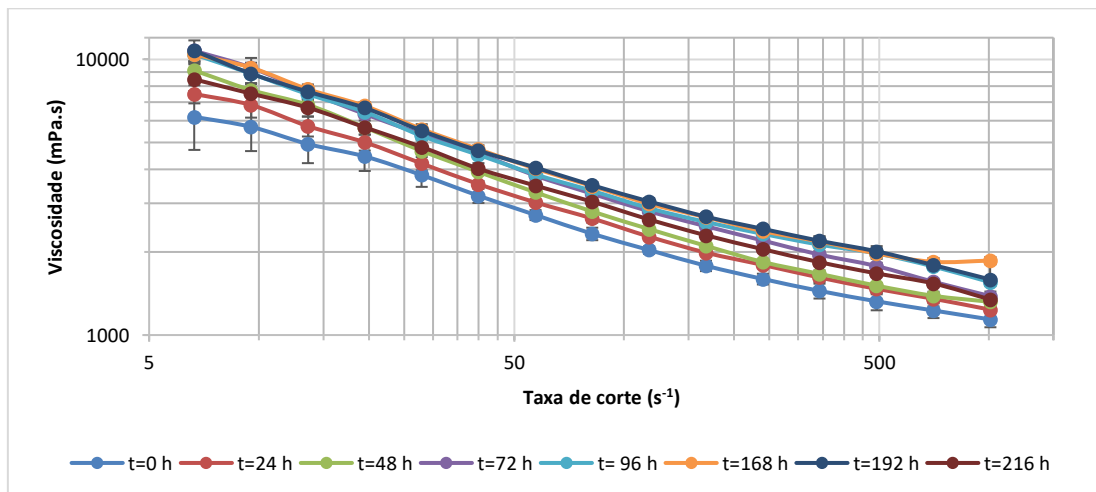


Figura 29- Influência do tempo de armazenamento do Plastisol 2 na viscosidade em função da taxa de corte [35].

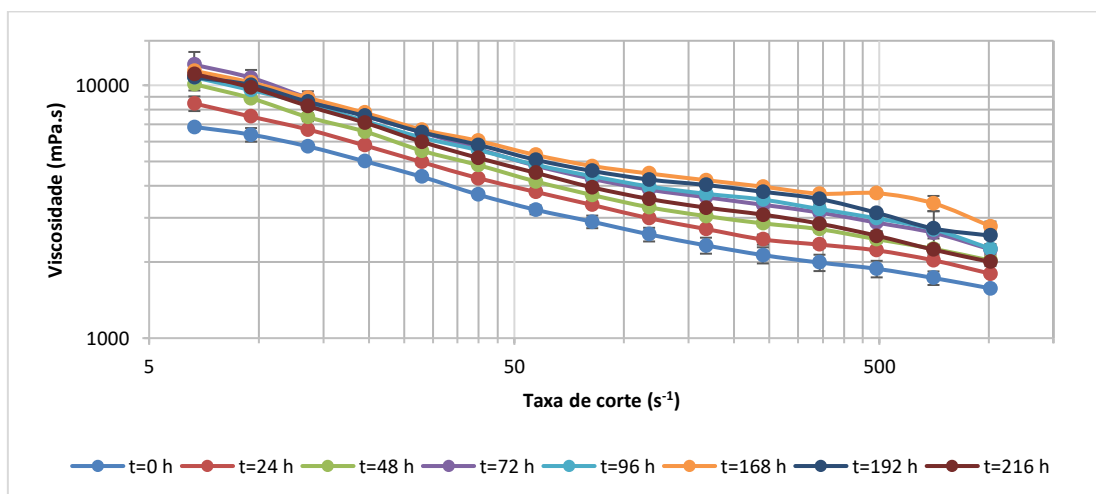


Figura 30- Influência do tempo de armazenamento do Plastisol 3 na viscosidade em função da taxa de corte [35].

Pela análise das figuras, conclui-se que o efeito de envelhecimento apresenta um impacto muito acentuado nos primeiros dias justificada pela entrada de plastificante nas partículas diminuindo drasticamente a quantidade de volume livre de líquido e, conseqüentemente, aumentando a viscosidade. O efeito é atenuado passado alguns dias pois as partículas de PVC apenas conseguem absorver uma certa quantidade de plastificante, ao fim de um determinado tempo elas (partículas de PVC) já não são capazes de absorver mais plastificante levando com isto a um ponto de estabilização.

Denote-se que os plastissóis 1 e 2 estudados começam a estabilizar 72 horas após a sua produção, enquanto o plastisol 3 estabiliza a partir das 96 horas aproximadamente [35].

3.1.5. Efeito de processo de vácuo

O processo de vácuo é uma etapa pós-produção cuja principal finalidade é a remoção do ar que possa ter sido incorporado na pasta através do processo de mistura. Na Figura 31 encontra-se ilustrado um conjunto de gráficos com as curvas reológicas de dois plastissóis com a mesma formulação e com as mesmas condições de preparação, mas, a diferença entre os dois plastissóis reside no processo de vácuo a que o plastisol 1 (curva azul) foi submetido. Com isto, o objetivo deste estudo resume-se à influência do processo de vácuo no comportamento reológico dos plastissóis, avaliado durante 216 horas.

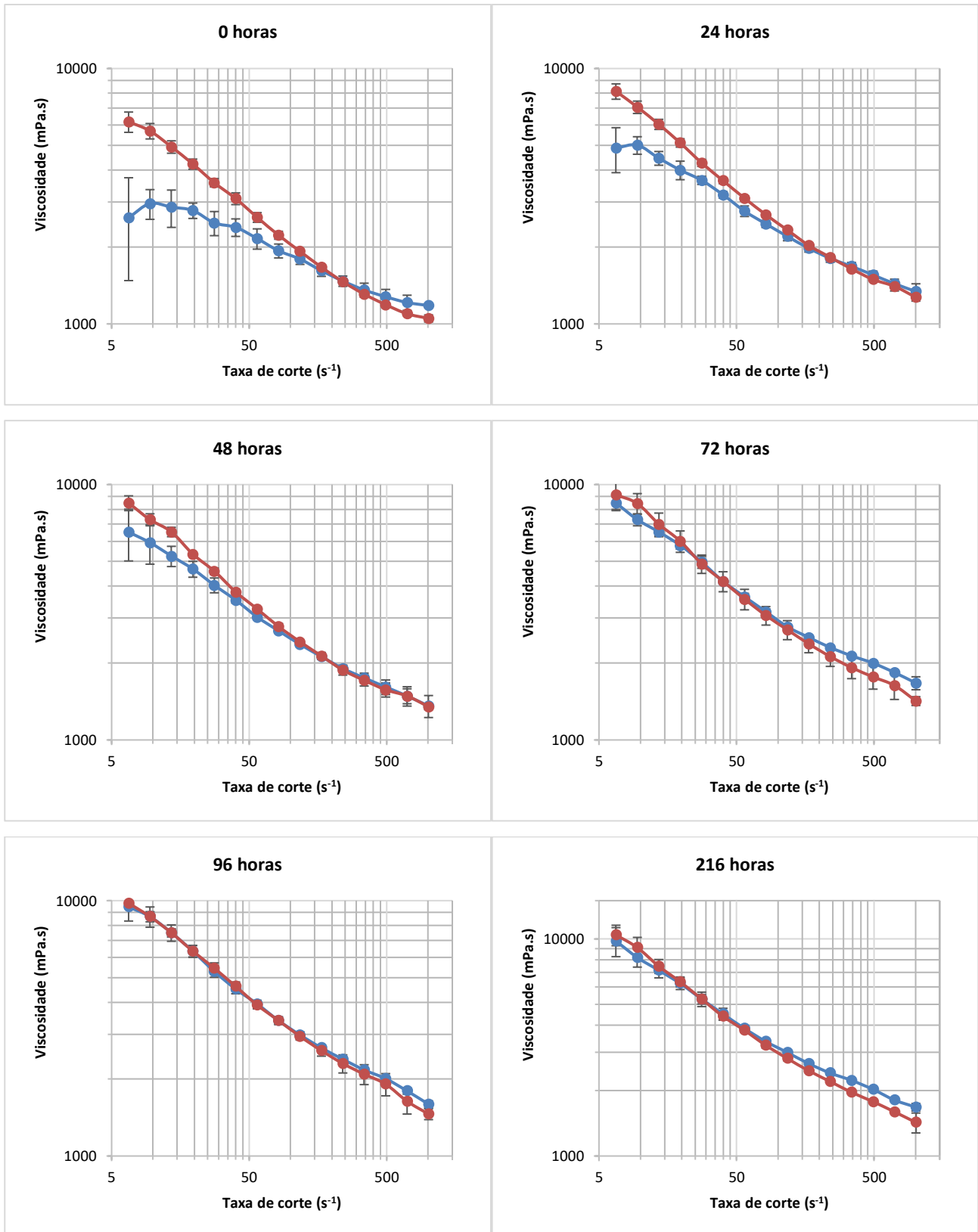


Figura 31- Influência da presença de ar no comportamento reológico do plastisol: Curva azul) representa o plastisol submetido a vácuo; Curva vermelha) representa o plastisol não submetido a vácuo.

Através da análise da Figura 31 verifica-se um impacto significativo do processo de vácuo no comportamento reológico do plastisol para baixas taxas de corte, contudo

para altas taxas os plastissóis têm um comportamento reológico praticamente igual. Uma vez que no processo abrangido por este trabalho o plastisol é submetido a taxas de corte superiores às apresentadas na Figura 11, não são expectáveis diferenças no processamento de um plastisol submetido a vácuo e outro que não seja submetido uma vez que os comportamentos de ambos para elevadas taxas de corte igualam-se.

Ainda, é observado uma aproximação de comportamento dos plastissóis após as 48 horas.

Como conclusão, o processo de vácuo torna-se um processo extremamente importante na remoção de ar presente no plastisol. Este processo deve ser usado quando a intenção é processar o plastisol logo imediatamente a sua produção, caso contrário, sendo o ar menos denso do que o plastisol, este irá se deslocar do interior do plastisol para a superfície e posteriormente se difundir para o ambiente circundante.

3.2. *Estudos computacionais e experimentais do processo*

O processo de recobrimento por faca tem inúmeras vantagens na indústria, como já referido em subsecções anteriores, no entanto, também contém desvantagens e bastantes complexidades. Para o trabalho desenvolvido, uma das principais complexidades do processo a abordar é a passagem do fluido pela faca. A espessura do filme criado através da passagem da faca não resulta apenas da distância a que a faca está alocada face ao substrato utilizado [40]. Esta espessura pode ser afetada por diversos fatores, nomeadamente, a geometria da faca, as condições de operação, a reologia do fluido empregue no processo e, ainda, o tipo de material usado como substrato [40][41].

De forma a relacionar a dependência da espessura do filme formado à saída da faca com o comportamento reológico dos materiais processados, foi efetuado um estudo numérico por *Sullivan* [41] em que foram testados dois fluidos, um newtoniano e um reofluidificante. Posteriormente, no mesmo estudo de forma experimental foram testados fluidos newtonianos com contribuições elásticas (fluido de *Boger*). A geometria típica de recobrimento utilizada no estudo numérico pode ser observada na Figura 32.

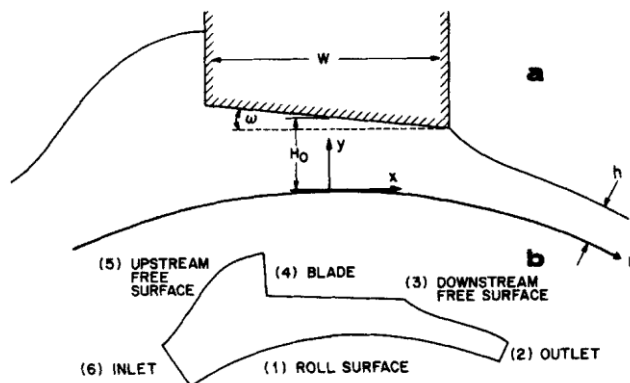


Figura 32- Geometria usada no estudo da literatura a) Geometria usada na simulação; b) condições de fronteira.

Como conclusão, o autor reporta que, para as mesmas condições de processamento, o fluido reofluidificante (inelástico) apresenta um aumento de espessura do filme produzido à saída da faca quando comparado com o fluido newtoniano [41].

De forma experimental, relativamente aos fluidos viscoelásticos, foi observado que, à medida que se aumentavam as contribuições elásticas ocorria uma diminuição da espessura do filme formado [41]. Num estudo prévio efetuado por *Sullivan e Middleman* [42], foi ainda determinado que, ao contrário dos fluidos newtonianos, os fluidos viscoelásticos apresentam uma ligeira dependência da espessura do filme criado com a velocidade de processamento, sendo observada uma diminuição de espessura dos mesmos com o aumento da velocidade [42].

Posteriormente, de forma a relacionar as contribuições elásticas dos fluidos no processo de recobrimento, *Mitsoulis* apresentou um estudo numérico cujo principal objetivo se resumia à determinação da variação de espessuras deste tipo de fluidos [40]. Para isto, o autor utilizou a mesma geometria apresentada por *Sullivan* [41], estando esta apresentada na Figura 32.

Neste estudo foram testados quatro fluidos, sendo que um fluido é newtoniano e os outros são fluidos viscoelásticos caracterizados pelo modelo *K-KBZ*. Para facilitar a interpretação das figuras os fluidos viscoelásticos serão identificados por F1, F2 e F3, sendo que a numeração representa a menor (1), a intermédia (2) e a maior (3) contribuição elástica do fluido [40].

Como resultado, foi observado o comportamento do plastisol através de linhas de fluxo e valores de pressão debaixo da faca. A Figura 33 representa as linhas de fluxo para os diferentes fluidos.

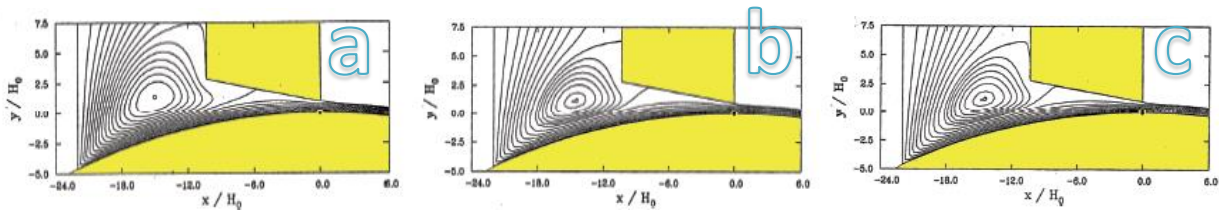


Figura 33- Resultados provenientes da simulação: a) Fluido Newtoniano; b) F1; c) F2 [40].

Pela análise da Figura 33 é observado a presença de recirculações de fluido antes da entrada da faca. A recirculação existente para o fluido newtoniano (Figura 23-a) é maior do que para os fluidos viscoelásticos, mas, a recirculação vai diminuindo à medida que o carácter elástico do fluido vai aumentando, ou seja, a viscoelasticidade reduz o tamanho e a intensidade da recirculação [40].

Relativamente à distribuição de pressões debaixo da faca, na Figura 34 encontra-se apresentado valores de pressão (adimensionais) para os fluidos em estudo (viscoelásticos) e ainda, relacionando-os com um fluido inelástico caracterizado pelo modelo de *Carreau*.

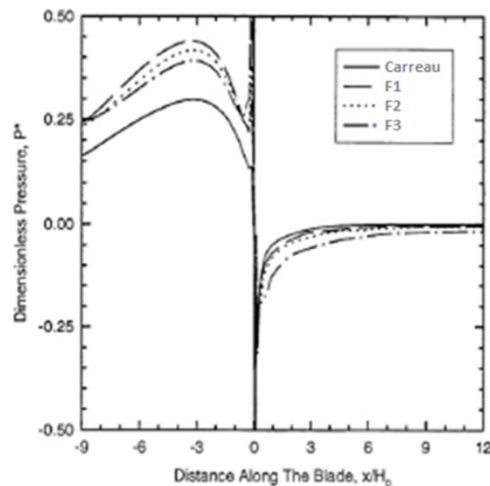


Figura 34- Distribuição de pressões debaixo da faca[40].

Como é possível observar pela Figura 34, quando comparado com um fluido reofluidificante (representado pelo modelo de *Carreau*), os fluidos viscoelásticos apresentam valores de pressão mais elevados debaixo da faca, quanto maior a pressão,

mais facilidade terá o fluido de escoar, isto porque, a pressão atua no fluido de forma a empurrá-lo para fora da faca [40].

Neste estudo, avaliando a espessura do filme formado, à medida que o carácter elástico do fluido aumenta, foi observada uma diminuição desta [40]. Foi ainda observado uma dependência da espessura do filme formado, através de fluidos viscoelásticos, com a velocidade de processamento [40], indo de encontro ao reportado por *Sullivan* [41].

As linhas de fluxo, como já observado pelo estudo numérico da Figura 33 [40], são influenciadas pela reologia do fluido a processar. De forma a visualizar experimentalmente as linhas de fluxo avaliando o impacto de diferentes ângulos (8, 22 e 32°) para a mesma geometria da faca e velocidade de processamento, *Davard* [43] utilizou os mesmos fluidos presentes nos estudos acima apresentados, nomeadamente um newtoniano, um reofluidificante e um fluido viscoelástico. A geometria empregue no estudo encontra-se ilustrada na Figura 35.

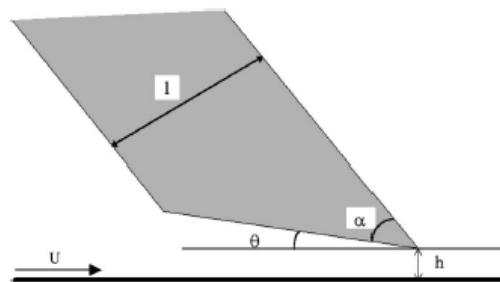


Figura 35- Geometria utilizada no estudo [43].

Inicialmente foi avaliado o perfil de recirculações para um ângulo de faca de 8°, o perfil pode ser observado na Figura 36.

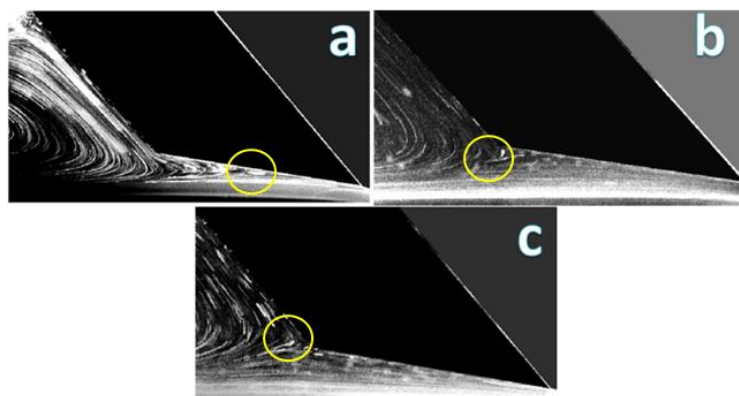


Figura 36- Linhas de fluxo correspondente a um ângulo de 8°: a) fluido newtoniano; b) fluido reofluidificante; c) fluido elástico. Imagem adaptada de [43].

Pela análise da Figura 36 facilmente observa-se a presença de grandes recirculações para todos os fluidos. Ainda, os fluidos apresentam pontos de estagnação (representados na Figura 36 com um círculo a amarelo), estando estes representados pela região circular em cada uma das imagens, este ponto é responsável por determinar a zona onde o fluido começará a percorrer o sentido inverso ao fluxo dando início à recirculação. Para o fluido newtoniano, o ponto de estagnação situa-se debaixo da faca no meio da mesma (Figura 16-a), enquanto para um fluido reofluidificante este descola-se para trás, zona de entrada da faca (Figura 16-b), aumentando a contribuição elástica, o ponto de estagnação deixa de se encontrar debaixo da faca [43].

Estas conclusões aproximam-se com as retiradas do estudo apresentado por Mitsoulis [40] em que a contribuição elástica do fluido implica uma diminuição do tamanho e da intensidade da recirculação do mesmo.

Para um ângulo de 22° , os resultados encontram-se ilustrados na Figura 37.

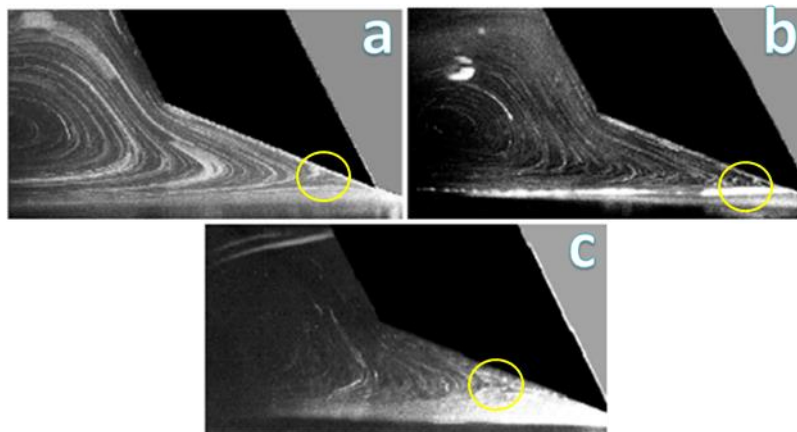


Figura 37- Linhas de fluxo correspondente a um ângulo de 22° : a) fluido newtoniano; b) fluido reofluidificante; c) fluido elástico. Imagem adaptada de [43].

Com o aumento do ângulo da faca observa-se um deslocamento do ponto de estagnação em direção à saída da faca (Figura 37), intensificando a recirculação de fluido debaixo da faca [43].

Por último, os resultados para um ângulo de faca de 32° podem ser observados na Figura 38.

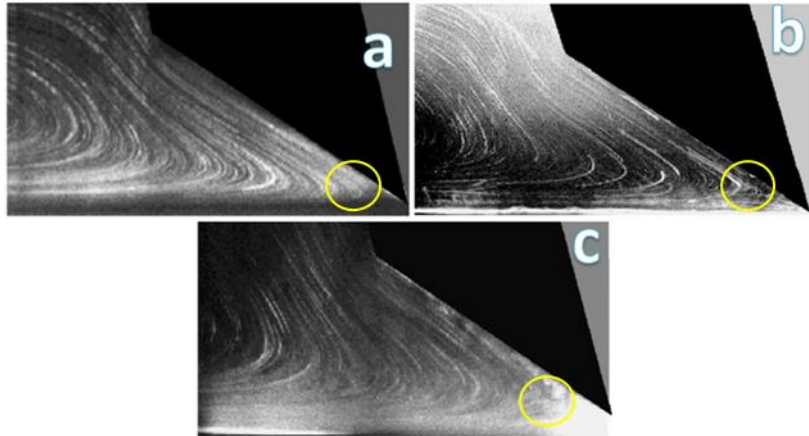


Figura 38- Fluxo correspondente a um ângulo de 32° : a) fluido newtoniano; b) fluido refluidificante; c) fluido elástico. Imagem adaptada de [43].

À semelhança do reportado anteriormente, para o ângulo de 32° observou-se ainda um novo aumento da amplitude de recirculação nos fluidos debaixo da faca. O ponto de estagnação para o ângulo observado situa-se quase à saída da faca [43].

Quando comparado as recirculações existentes no fluido refluidificante e no fluido viscoelástico, observa-se que o perfil de recirculações do fluido viscoelástico não é tão intenso nem existente para baixos ângulos de faca, isto porque a sua elasticidade impede que o fluido flua por canais muito estreitos.

4. Materiais e métodos

Neste capítulo serão apresentados e descritos todos os materiais e métodos, experimentais e numéricos abordados no decorrer da dissertação. Numa fase inicial serão abordados os materiais utilizados na preparação dos plastissóis assim como os componentes utilizados na sua formulação.

Para além do que já foi referido, serão também apresentadas as técnicas de caracterização reológica empregues para o estudo destes materiais. Após os métodos de caracterização apresentados, serão descritos os métodos de produção destes materiais. Para efeitos de simulação numérica, serão apresentados os métodos empregues nos estudos numéricos. Na fase final, serão abordados os casos em estudo.

4.1. Materiais e formulações

A existência de um elevado número de plastissóis de PVC na TMG Automotive proporcionou uma escolha cuidada dos quais seriam abordados no estudo. Os três plastissóis escolhidos para esta tese de dissertação tem como motivação a necessidade de conhecimento acerca do seu comportamento estando estes presentes num leque alargado de artigos de importância elevada.

4.1.1. Métodos de composição

De forma a estudar e caracterizar os plastissóis escolhidos, estes necessitam de uma preparação prévia, nomeadamente a sua produção. Para que fosse representativo com a escala industrial, os plastissóis de PVC foram produzidos à escala laboratorial na TMG Automotive, sendo constituídos principalmente por um ou dois tipos de resinas de PVC, plastificante, estabilizantes térmicos, retardantes à chama, agentes de expansão, carga e catalisadores de degradação (*kickers*).

A utilização de diferentes tipos de resina de PVC com diferentes tamanhos de partículas tem como principal objetivo o controlo de viscosidade do plastisol. Os plastificantes utilizados em todas as formulações são da família dos ftalatos.

Assim sendo, na Tabela 1 encontra-se ilustrada a designação da formulação empregue em cada um dos plastissóis estudado.

Tabela 1- Identificação da formulação dos plastissóis em estudo.

Plastisol	Plastisol 1	Plastisol 2	Plastisol 3
Formulação	A	A	B
Notas de Produção	Com vácuo	Sem vácuo	Sem vácuo

A incidência da mesma formulação em dois plastissóis diferentes é justificada pelo facto da necessidade de entender o impacto do processo de vácuo no comportamento reológico quando comparada com a mesma formulação sem que seja submetida ao processo de vácuo.

A composição das formulações empregues pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2- Composição das diferentes formulações utilizados no estudo.

Formulação A	Formulação B
1 tipo de plastificante (ftalato)	2 tipos de plastificantes (ftalatos)
1 tipo de resina de PVC (K70)	2 tipos de resina de PVC (K70)
2 Estabilizantes	-
-	Presença de <i>kicker</i> e carga
Difrentes retardantes à chama	
Mesmo sistema de expansão utilizado	

Devido a questões de confidencialidade a formulação empregue não poderá ser mais detalhada. A preparação de um plastisol de PVC pode dividir-se por fases. A Figura 39 representa as fases necessárias para a produção de um plastisol de PVC.

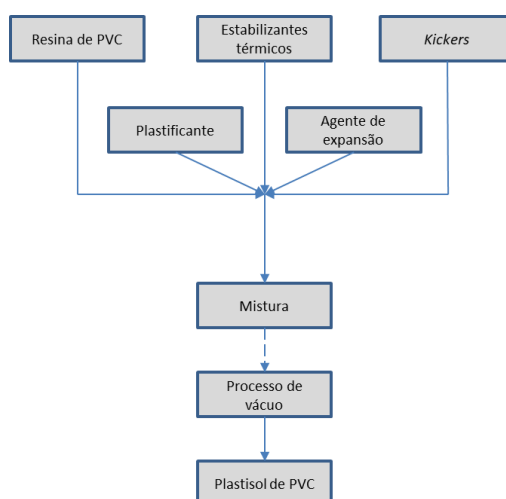


Figura 39- Processo de preparação de um plastisol de PVC.

Como é possível observar na Figura 39, a produção dos plastissóis de PVC resumiu-se à pesagem de todos os componentes da formulação e, posteriormente, à sua mistura. No caso do plastisol 1 foi realizado o processo de vácuo logo após a mistura, de forma a permitir uma remoção mais rápida do ar incorporado durante a mistura.

Para a produção dos plastissóis apresentados na Tabela 1, foi utilizado um conjunto de ferramentas para auxílio da sua produção, nomeadamente uma balança (Figura 40-A), um recipiente, uma espátula, um misturador (Figura 40-B) e o equipamento para realização do processo de vácuo (Figura 40-C).



Figura 40- Equipamentos utilizados para a produção dos plastissóis de PVC utilizados no estudo: A) Balança; B) Misturador; C) Equipamento de vácuo.

Após a pesagem de todos os componentes, procedeu-se à mistura dos mesmos. A mistura foi realizada durante um período de 5 minutos no misturador (Figura 40-B) a uma velocidade de 1500 rpm, de maneira a garantir a homogeneidade do plastisol, destruindo assim a presença de aglomerados. Estas condições de processamento garantiram a replicação em laboratório de um plastisol produzido à escala industrial.

O processo de vácuo do Plastisol 1 foi realizado durante um período de 15 minutos, tempo ao qual foi observada a completa remoção de ar nele incorporado.

A densidade dos plastissóis produzidos foi calculada através de um picnómetro (Figura 41).



Figura 41- Picnómetro usado para cálculo da densidade do plastisol.

Após determinado a massa e volume por meio do picnómetro, a densidade foi calculada através da Equação 1.

$$\rho = \frac{\text{massa (kg)}}{\text{volume (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

Após a produção dos plastissóis concluída, os plastissóis que assim o requeriam, foram armazenados numa sala com uma temperatura controlada de 25°C e com humidade relativa de 50% durante 216 horas, sendo posteriormente utilizados nos ensaios de caracterização reológica.

4.2. *Ensaio de caracterização reológica*

Os principais objetivos delineados para os ensaios de caracterização reológica consistiram no aumento do conhecimento existente relativo ao comportamento reológico dos plastissóis e da influência de diferentes parâmetros no seu comportamento. Para obtenção das curvas características de viscosidade em função da taxa de corte foram realizados dois ensaios distintos: reometria de cilindros concêntricos e reometria de pratos paralelos.

4.2.1. *Reometria de cilindros concêntricos*

O ensaio de caracterização reológica foi realizado no reómetro de cilindros concêntricos existente na TMG Automotive e segundo a norma interna existente na empresa.

Este equipamento é constituído por 3 componentes fundamentais: o reómetro, o sistema de controlo de temperatura e o instrumento de controlo.

O reómetro é responsável pela realização do ensaio, sendo constituído por dois cilindros (um interior e um exterior), este pode ser observado na Figura 42-A). O sistema de controlo de temperatura, como o próprio nome indica, faz o controlo de temperatura aos materiais em teste, tendo na sua constituição um reservatório com água e uma resistência elétrica, que permite o aquecimento do líquido e, conseqüentemente, o controlo da temperatura, Figura 42-B). No sistema de controlo, Figura 42-C), são impostos os parâmetros relevantes ao ensaio, nomeadamente o módulo de velocidade. É ainda responsável pela transmissão do valor de binário medido para o operador.



Figura 42- Instrumento de controlo do reómetro de cilindros concêntricos: A) Reómetro de cilindros concêntricos; B) Sistema de controlo de temperatura; C) Sistema de controlo do ensaio.

As condições de processamento utilizadas neste ensaio estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3- Condições de processamento a utilizar no reômetro de cilindros concêntricos.

	Plastisol	Temperatura (°C)	Tempo de armazenamento (horas)
Ensaio 1	1	25	0
Ensaio 2	2	25	0
Ensaio 3	3	25	0
Ensaio 4	1	30	0
Ensaio 5	2	30	0
Ensaio 6	3	30	0
Ensaio 7	1	25	216
Ensaio 8	2	25	216
Ensaio 9	3	25	216
Ensaio 10	1	30	216
Ensaio 11	2	30	216
Ensaio 12	3	30	216

Desta forma, o método de ensaio pode ser resumido por etapas, seguindo a estrutura da Figura 43 abaixo apresentada.

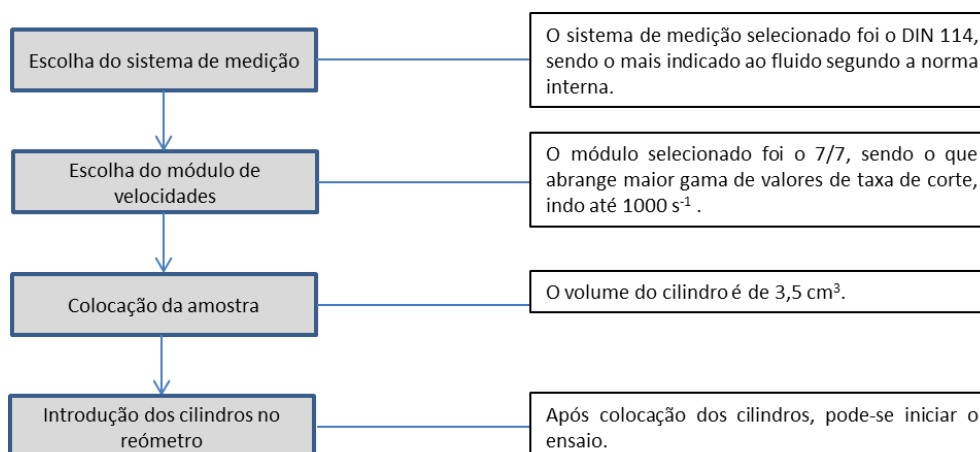


Figura 43- Procedimento de ensaio do reômetro de cilindros concêntricos.

Após a escolha do sistema de medição, do módulo de velocidades e a amostra inserida nos cilindros, é iniciado o ensaio.

As velocidades do equipamento estão divididas em 15 patamares, ou seja, 15 valores de velocidade. Sendo o incremento de velocidade efetuado manualmente através do sistema de controlo, segundo o procedimento interno este incremento de velocidade é efetuado com intervalos de 15 segundos até ao final do ensaio.

A viscosidade foi determinada para uma gama de taxas de corte compreendida entre 6,65 e 1000 s⁻¹. Para coerência de resultados, os ensaios realizados foram repetidos 3 vezes (na mesma amostra) para cada condição, calculando ainda a média e o desvio-padrão para cada ponto.

O processo de tratamento de dados inicia-se a partir do valor fornecido pelo equipamento, representando este o valor de binário. O valor da viscosidade é obtido através da Equação (2).

$$\text{Viscosidade} = \text{Binário} * \text{Fator de conversão} \quad (2)$$

O fator de conversão são valores pré-definidos pelo equipamento para cada patamar, estes podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 4- Tabela para tratamento de dados.

Patamar	Taxa de corte (1/s)	Fator de conversão
1	6.65	977.44
2	9.51	683.49
3	13.61	477.59
4	19.48	333.68
5	27.9	232.97
6	39.9	162.91
7	57.2	113.64
8	81.8	79.46
9	117.1	55.51
10	167.6	38.78
11	240	27.08
12	343	18.95
13	492	13.21
14	704	9.23
15	1008	6.45

Com base na informação recolhida nos ensaios realizados e os valores de viscosidade obtidos, construíram-se as curvas de fluxo. Na Figura 44 é possível observar uma curva típica obtida através de um dos ensaios realizados.

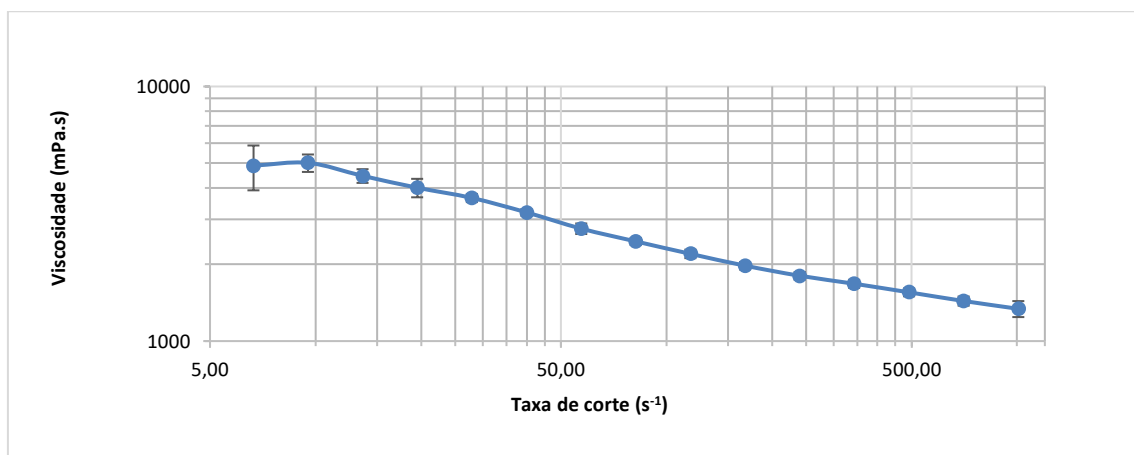


Figura 44- Curva típica de viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.

4.2.2. Reometria de pratos paralelos

A reometria de pratos paralelos foi realizada no PIEP (Polo de Inovação em Engenharia de Polímeros) segundo a norma interna da mesma instituição. Este reómetro é constituído pelos pratos paralelos e por uma câmara térmica responsável pelo controlo de temperatura do material a ensaiar. Na Figura 45 está apresentado o equipamento utilizado neste ensaio, sendo que a camara térmica está acoplada ao equipamento.

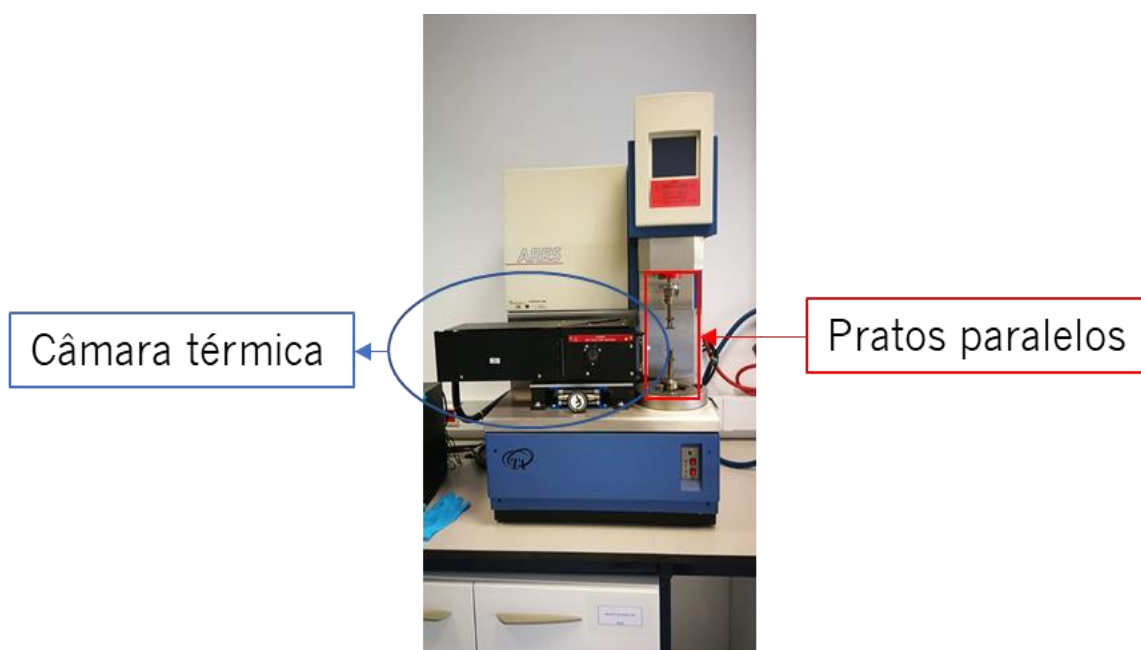


Figura 45- Reómetro de pratos paralelos utilizado.

Devido à elevada versatilidade do equipamento utilizado, foram efetuados dois tipos de ensaios de caracterização, em fluxo e em regime oscilatório. A caracterização em fluxo foi efetuada de maneira a obter informação referente ao comportamento reológico dos Plastissóis para taxas de corte inferiores às quais foram testadas internamente, nomeadamente de 0.1 a 100 s^{-1} . A caracterização em regime oscilatório teve como principal objetivo a recolha de informação referente ao caracter viscoelástico dos plastissóis.

As condições de processamento podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5- Condições de ensaio a utilizar no reómetro de pratos paralelos.

		Plastisol	Temperatura (°C)	Tempo de acondicionamento (horas)
Dia 1	Ensaio 1	1	25	0
	Ensaio 2	2	25	0
	Ensaio 3	3	25	0
	Ensaio 4	1	30	0
	Ensaio 5	2	30	0
	Ensaio 6	3	30	0
Dia 9	Ensaio 1	1	25	216
	Ensaio 2	2	25	216
	Ensaio 3	3	25	216
	Ensaio 4	1	30	216
	Ensaio 5	2	30	216
	Ensaio 6	3	30	216

Os plastissóis anteriormente produzidos e acondicionados foram testados nas mesmas condições que a caracterização reológica de cilindros concêntricos de forma a ser possível correlacionar resultados. Perante estas condições, as diferentes amostras foram colocadas nos pratos, acondicionadas até que atingissem a temperatura desejada e de seguida foi dado início ao ensaio

Para o ensaio em fluxo, o equipamento fornece os valores de viscosidade em função da taxa de corte. Estes valores são calculados em função da relação da tensão de corte com a taxa de corte.

Após obtidos os valores provenientes do ensaio, foram criadas as curvas de fluxo. Na Figura 46 encontra-se ilustrada uma curva de fluxo obtida por este método de ensaio.

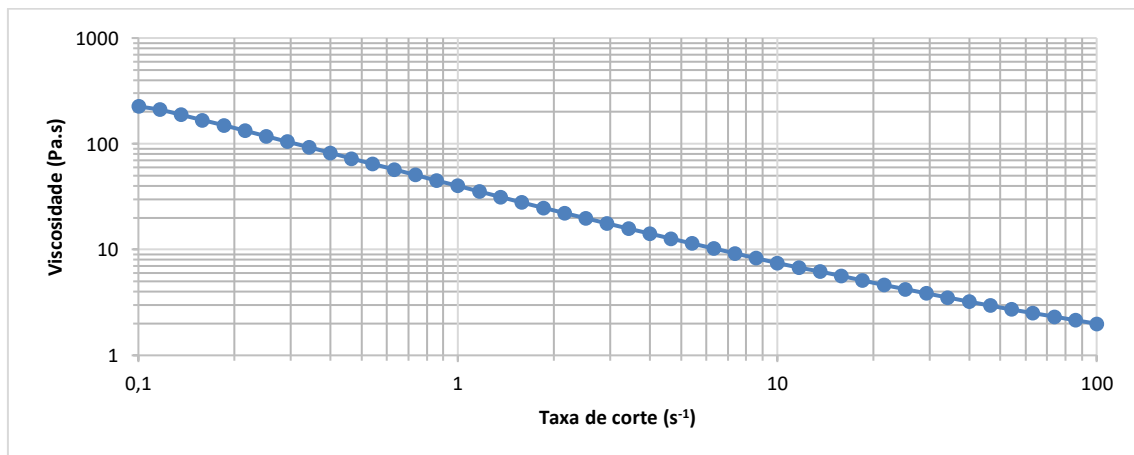


Figura 46- Curva típica da viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.

Para avaliação das propriedades elásticas foi utilizado o mesmo equipamento (reómetro de pratos paralelos) mas, efetuando o ensaio em regime oscilatório.

O procedimento de ensaio assemelhou-se ao regime em fluxo desde colocação da amostra nos pratos e armazenamento na camara térmica, diferenciando-se na escolha do método de ensaio empregue.

Para avaliar estas propriedades foram efetuados dois ensaios, um varrimento de amplitude de deformação e de seguida um varrimento de frequências. O varrimento de deformação teve como principal objetivo a determinação da percentagem de deformação máxima situada no regime linear. Este foi realizado a uma frequência fixa de 1Hz.

Após a conclusão do ensaio, o equipamento fornece os resultados do módulo elástico (G') e viscoso (G'') em Pascal para cada valor de deformação imposta.

Através dos resultados obtidos foram construídos os gráficos, avaliando os módulos em função da deformação, a Figura 47 ilustra um dos gráficos típico obtido no varrimento de deformações efetuado.

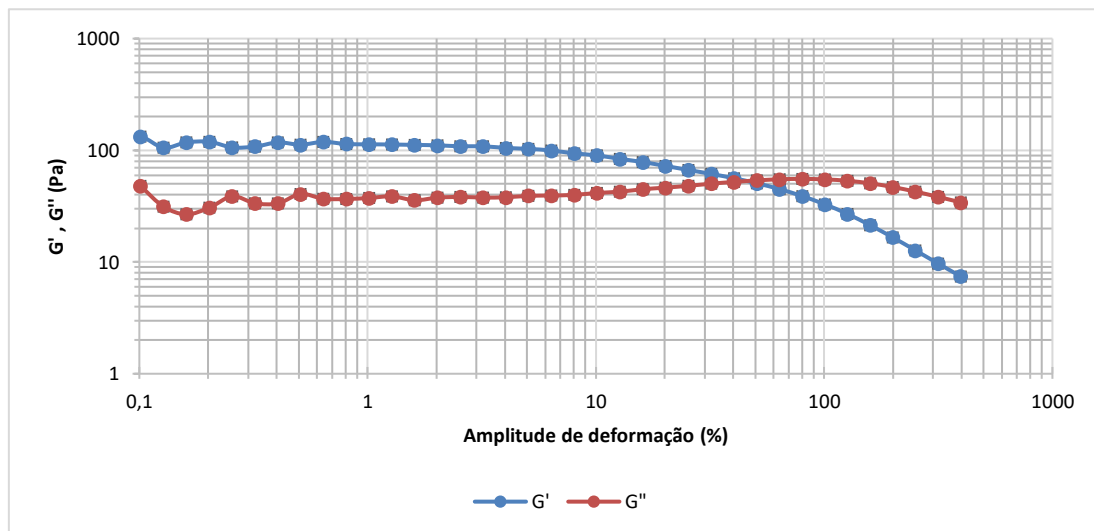


Figura 47- Curva típica de um varrimento de deformações efetuado para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.

Pela observação do gráfico, seria expectável a utilização de uma amplitude de deformação de 10%, no entanto, de maneira a garantir que a deformação utilizada se encontrava situada dentro do regime linear foi selecionada uma deformação de 1%. O aparecimento de ruído para valores de deformação abaixo dos 0.6% indica que o reómetro utilizado não tem sensibilidade para medir valores nessa gama. O

procedimento de ensaio repetiu-se para o varrimento de frequências, sendo apenas alterado o método de ensaio.

Neste ensaio foram obtidos valores do módulo elástico (G') e viscoso (G'') em função da frequência, na Figura 48 é possível observar um gráfico típico obtido através da realização deste ensaio.

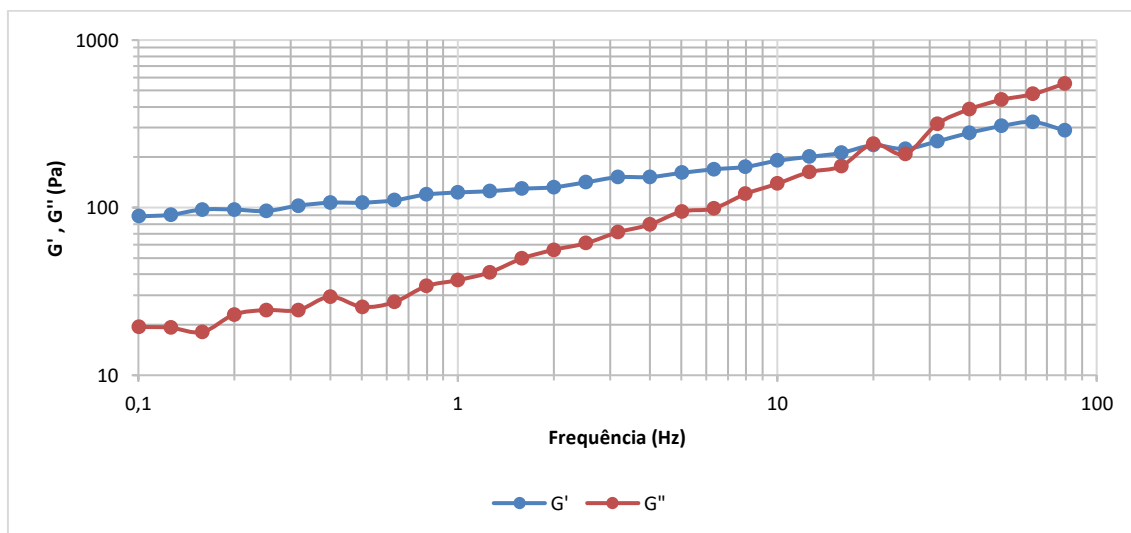


Figura 48- Curva típica de um varrimento de frequências efetuado para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.

As oscilações observadas na figura anterior, mais preponderantes no módulo viscoso (G'') podem ser justificadas pelo valor de deformação usado para efetuar os varrimentos de frequências ser demasiado reduzido.

4.2.3. Ajuste de modelos reológicos

Para efeitos de simulação foi necessário realizar um ajuste às curvas de fluxo obtidas, aproximando-as a um modelo reológico. Este modelo reológico é de importância notável para os cálculos numéricos efetuados no âmbito do trabalho.

Uma vez que a caracterização reológica foi efetuada através de dois equipamentos distintos, avaliando-se a viscosidade a taxas de corte entre 0.1 e 100 s^{-1} (reómetro de pratos paralelos) e 6.65 a 1000 s^{-1} (reómetro de cilindros concêntricos), existiu a necessidade de ligação entre os dados provenientes dos dois ensaios e, posteriormente, a criação de uma curva capaz de compilar todos os dados. Para criação da curva, os dados foram compilados e sobrepostos através de uma folha *Excel* em que

primeiramente foram adicionados os dados distintos em um gráfico, Figura 49-A), e posteriormente eliminou-se os dados sobrepostos e obteve-se uma curva apenas, Figura 49-B).

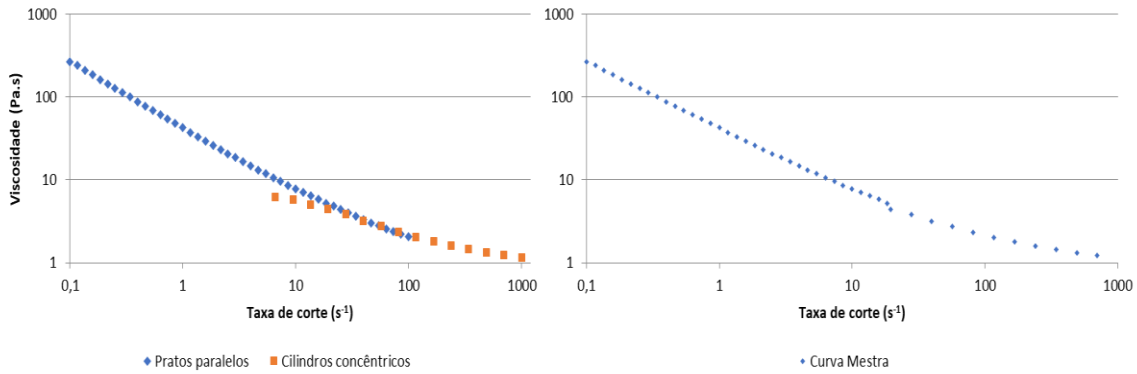


Figura 49- Curva típica obtida através da compilação de dados para um dos plastissóis estudados: A) Gráfico com dados distintos; B) Gráfico com os dados compilados.

A fase seguinte passou por ajustar os modelos reológicos à curva mestra. Em primeiro lugar, foram selecionados alguns modelos que possibilitaram a representação de comportamentos semelhantes ao do fluido em estudo e outros como fator de comparação. Os modelos reológicos escolhidos podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6- Modelos reológicos empregues no ajuste.

	Identificação do modelo	Equação Constitutiva	Parâmetros
Modelos reológicos	Careeau	$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}}$	λ - Constante de tempo para o fluido. n - Índice de lei da Potência.
	Careeau-Yasuda	$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}}$	a - Transição da curva entre o patamar Newtoniano e a região newtoniana. λ - Constante de tempo para o fluido. n - Índice de lei da Potência.
	Cross	$\frac{\eta - \eta_{inf}}{\eta_0 - \eta_{inf}} = \frac{1}{1 + (k\dot{\gamma})^m}$	k - Constante de tempo (s). m - Índice de Lei da Potência.
	Herschel-Bulkley	$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	τ_0 - Tensão de cedência do material; k - Índice de consistência do material; n - Índice de Lei da Potência.
	Ostwald-de-Waele	$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	n - Índice de Lei da Potência.
	Sisko	$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} + \eta_{inf}$	n - Índice de Lei da Potência.

A escolha dos modelos de *Carreau* e *Carreau-Yasuda* tiveram como motivação a sua elevada eficácia para descrever comportamentos não-newtonianos devido à quantidade alargada de parâmetros ajustáveis [9][44]. O modelo de *Cross* caracteriza o comportamento de um fluido pseudoplástico, apresentando patamares newtonianos para baixas e a altas taxas de corte [45]. O modelo de *Herschel-Bulkley* é capaz de representar o comportamento de fluidos com tensão de cedência e ainda comportamentos pseudoplástico [9][45]. O modelo de *Ostwald-de-Waele* (Lei da Potência) traduz a viscosidade de um fluido puramente viscoso, sendo esta proporcional à taxa de corte. À semelhança deste, o modelo de *Sisko* descreve o mesmo, com a particularidade de adição de um novo parâmetro [9][44][45].

Os ajustes do modelo às curvas obtidas foram efetuados por meio de uma interface no *Excel*. Através de cada equação que caracteriza cada modelo, na Equação (3) encontra-se exemplificado para o modelo de *Carreau*.

$$\eta = \eta_{inf} + (\eta_0 - \eta_{inf}) \left[1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (3)$$

Sendo que, η_{inf} representa a viscosidade para taxas de corte elevadas, η_0 a viscosidade para taxas de corte reduzidas, λ o tempo de relaxação do material e $\dot{\gamma}$ representa a taxa de corte. Através da equação característica do modelo foram calculados os novos valores de viscosidade estes podem ser observados na Tabela 7 designados por “Viscosidade calculada”.

Tabela 7-Valores exemplo de um ajuste de um modelo reológico.

Taxa de corte (s^{-1})	Viscosidade teórica (Pa.s)	Viscosidade calculada (Pa.s)	Erro ²	Parâmetros do modelo	
0,1	573,35	579,74	40,85	n	0,059
0,11659	531,00	523,74	52,59	Const. Tempo	14,34
0,13594	472,69	469,12	12,74	η_{inf} (Pa.s)	1,5
0,15849	417,93	417,18	0,56	η_0 (Pa.s)	979,44
0,18478	367,96	368,78	0,68	RQUAD	0,9999
0,21544	322,53	324,44	3,67		
0,25119	282,30	284,37	4,31		
0,29286	246,64	248,55	3,65		
0,34145	214,93	216,77	3,38		
0,39811	187,41	188,75	1,80		
0,46416	163,70	164,18	0,23		
		Erro	124,45		

De maneira a obter a aproximação mais adequada do modelo reológico à curva, é necessário calcular numa primeira fase o erro associado entre os valores de viscosidade teóricos e os valores de viscosidade calculados, este é calculado através da Equação (4) e encontra-se também representado na Tabela 7.

$$Erro = (\eta_{calculada} - \eta_{reómetro})^2 \quad (4)$$

Por fim, foi calculado o somatório para todos os pontos medidos, Tabela 7. Posto isto, para um melhor ajuste à curva o principal objetivo foi a diminuição do valor do somatório do erro. De forma a cumprir essa finalidade foi utilizado o *solver* existente no Excel no qual foi definido este objetivo (diminuir o valor do erro), por meio da variação de todos os parâmetros de cada modelo em simultâneo. Assim, obteve-se a melhor aproximação aos pontos do gráfico e também os valores dos parâmetros para posteriormente utilizar na simulação.

Um exemplo típico de um modelo ajustado à curva encontra-se ilustrado na Figura 50.

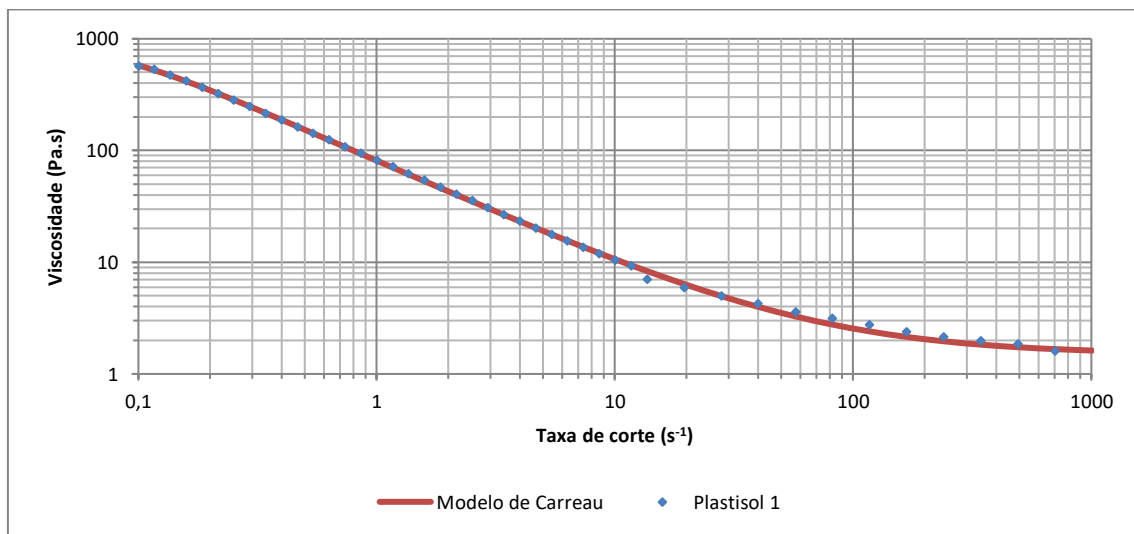


Figura 50- Ajuste típico de um modelo para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.

Após a aproximação efetuada, a precisão do ajuste pode ser verificada através da equação RQUAD presente no Excel, esta representa o quadrado do coeficiente de correlação (usado para determinar a relação entre duas propriedades). Importa referir que o valor mais aproximado de 1 é o que representa uma melhor aproximação [46].

4.2.4. Processos e condições de processamento

Todas as ferramentas e estudos paralelos empregues nesta dissertação tiveram como principal objetivo o estudo do processo de recobrimento indireto por faca presente na TMG Automotive.

A máquina de recobrimento presente na empresa é uma máquina tripla, ou seja, ela tem 3 cabeças de aplicação de pasta, como é possível observar pela Figura 51.

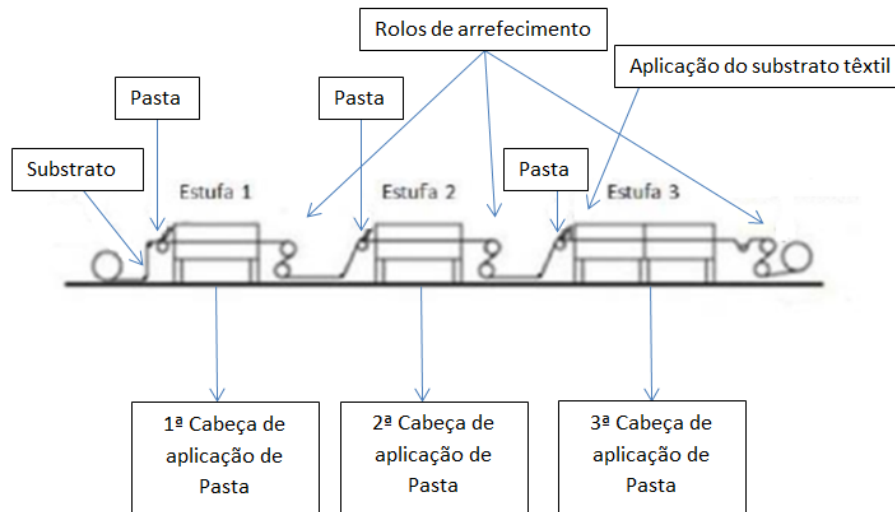


Figura 51- Representação da máquina de recobrimento da TMG Automotive, imagem adaptada de [47].

Numa fase inicial o substrato passa numa estufa pequena com temperaturas que rondam os 70 e 90°C, dependendo da formulação, em que a principal função desta é a secagem do substrato. Trata-se de um processo necessário para se eliminar a possível presença de água no substrato que poderia inviabilizar o produto final.

Após a passagem na estufa, o substrato percorre um conjunto de rolos e cilindros que contém escovas. Esta estação é responsável pelo arrefecimento e limpeza do substrato. Posto isto, o substrato chega à primeira cabeça de aplicação onde está situada a faca. Nesta fase, o plastisol de PVC é bombeado e depositado num caleiro entrando em contacto com o substrato e, pela ação do substrato em movimento, o plastisol é forçado a passar na faca (Figura 52).

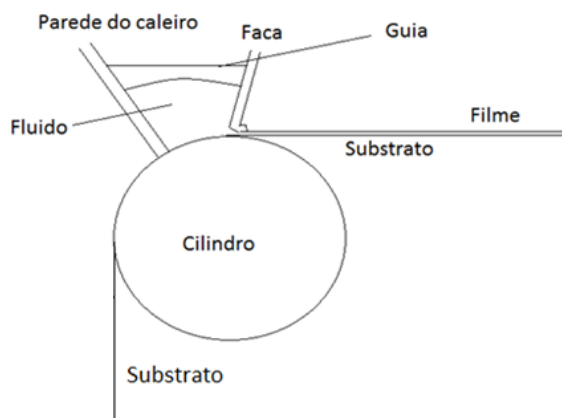


Figura 52- Representação do momento onde o fluido passa na faca.

O valor do entreferro é responsável por conferir a espessura desejada nessa respectiva camada.

De seguida, o material entra novamente num conjunto de estufas com o objetivo de gelificar e fundir o material. À saída das estufas, encontram-se um conjunto de cilindros para arrefecer o material garantindo que este chega à próxima cabeça de aplicação com temperatura aproximada à temperatura ambiente, Figura 51.

Após isto, o material chega à segunda cabeça de aplicação e o processo repete-se, contendo já uma primeira camada aplicada no substrato.

A terceira cabeça de aplicação tem uma particularidade que não existe nas outras duas, sendo ela a aplicação de um substrato têxtil nos artigos que assim o requerem. Este substrato têxtil está situado no topo da máquina em forma de rolo, como é possível observar na Figura 51. Pela ação de cilindros o substrato têxtil é forçado a colar na terceira camada de plastisol, sendo esta adesiva.

Após a saída da terceira cabeça de aplicação, o artigo encontra-se finalizado. Depois do seu arrefecimento, ele é sujeito à última etapa, a descolagem do artigo do substrato, enrolando-o em bobines. Nesta fase o artigo encontra-se numa bobine pronto para ser submetido aos processos de lacagem e gravação.

Os materiais em estudo nesta dissertação são habitualmente processados com velocidades compreendidas entre 15 e 35 m/min, com temperaturas pré-estabelecidas compreendidas entre 180-210°C, dependendo da temperatura a que o plastisol funde. As condições de processamento são adaptadas às formulações processadas.

4.2.5. *Medição de temperaturas no processo de recobrimento*

De forma a determinar as distribuições de temperatura no processo de recobrimento foi efetuado um estudo com principal incidência na passagem do plastisol pela faca. Para avaliar o impacto da introdução do material no caleiro por meio de uma bomba de vácuo, foram ainda avaliadas as distribuições de temperatura na passagem da cuba para o caleiro. A motivação deste estudo passa pela necessidade de quantificar o impacto, determinando se ocorre variações de forma a saber se é necessária a inclusão deste fenómeno na simulação.

É de salientar que, quando a pasta é movimentada da cuba para o caleiro, podem acontecer dois fenómenos relevantes associados às variações de temperaturas: um aumento de temperatura por dissipação viscosa, motivado pelo arrasto do fluido nas paredes da bomba durante o bombeamento da cuba para o caleiro, e/ou o arrefecimento da pasta quando esta entra em contacto com as paredes da bomba. Dessa forma, foi considerado pertinente quantificar qual dos fenómenos tem mais impacto.

Relativamente ao filme, a sua temperatura pode também ser influenciada por diversos fatores desde convecção do ar circundante e condução de calor do substrato para o plastisol. Mais uma vez, mostrou-se necessário fazer o balanço e avaliar qual dos fatores apresentaria maior impacto na temperatura do filme.

Dependendo de cada pasta e das suas propriedades reológicas, o fenómeno de aquecimento ou arrefecimento pode ser mais ou menos acentuado.

Para determinar o perfil de temperaturas foram efetuadas medições em três locais diferentes:

- Cuba
- Caleiro
- Filme

Para além disso, em cada um dos locais foram realizadas medições em 3 pontos distintos, de maneira a obter uma distribuição de temperaturas. Estas medições efetuadas foram ainda repetidas 5 vezes de maneira a obter resultados mais fiáveis nas

3 diferentes cabeças de aplicação da máquina de recobrimento. Sendo a cuba circular, a Figura 53 apresenta os locais de medição na cuba.

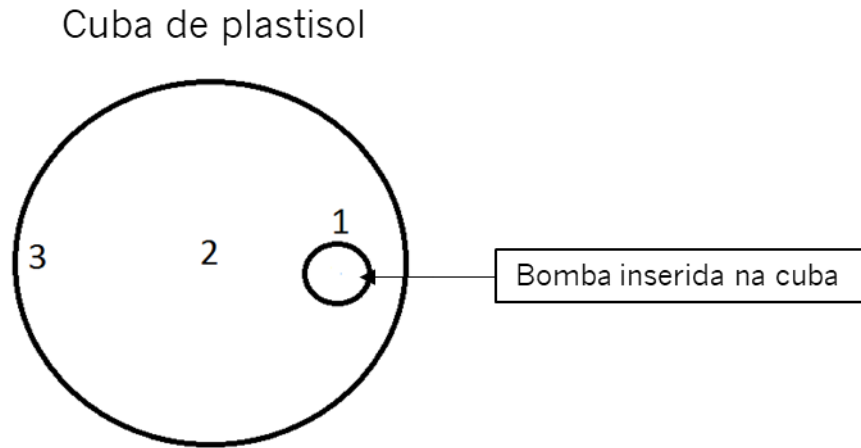


Figura 53- Representação da cuba (vista de cima).

Na Figura 54 encontra-se ilustrado os locais de medição efetuados no caleiro e no filme produzido.

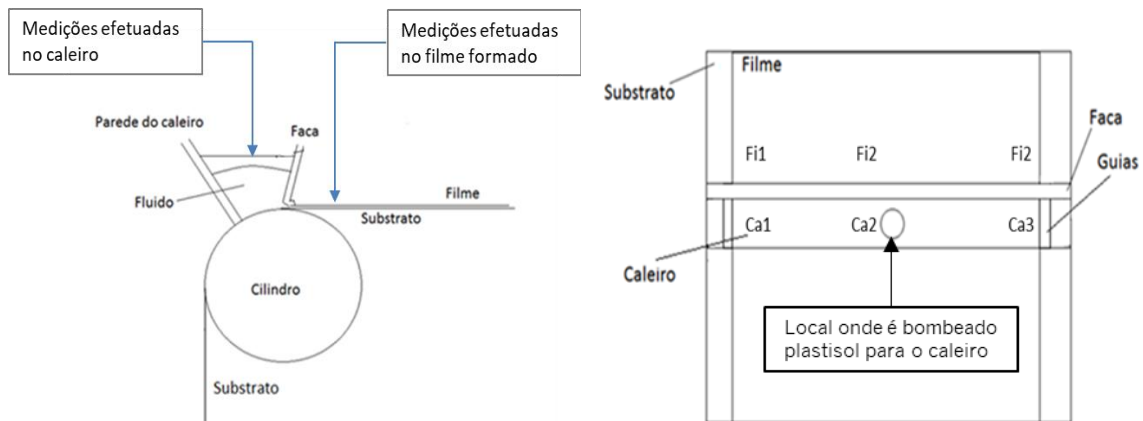


Figura 54- Representação dos locais de medição no caleiro e no filme formado.

Os pontos representados na Figura 54 representam Ca1 (ponto 1 no caleiro) e Fi1 (ponto 1 no filme).

As medições foram efetuadas com um pirómetro *INFRARED THERMOMETER*, este aparelho consegue ler gamas de temperaturas compreendidas entre -50 e 380°C, com erro associado de 2 °C.

Após cada medição, foram utilizados a média dos valores de temperatura de cada um dos pontos de medição assim como o seu desvio-padrão, para a construção dos diferentes gráficos. A Figura 55 apresenta um gráfico típico obtido nestas medições.

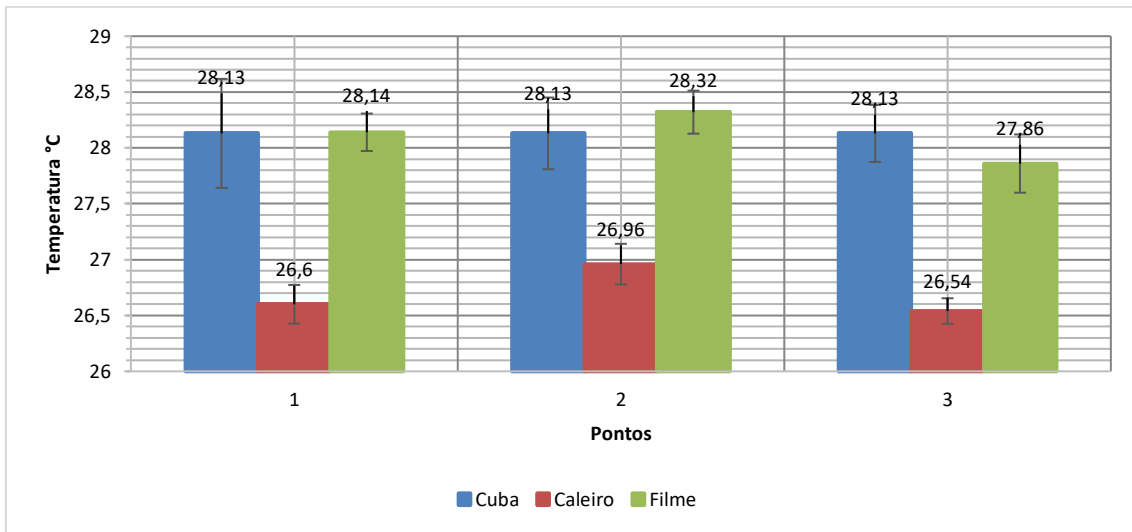


Figura 55- Valores típicos de temperatura na 1ª cabeça de aplicação.

Uma vez que a dosagem de material aplicado em cada camada (cerca de 250 g/m²), o que resulta numa espessura (aproximadamente 0.2 mm), a temperatura do substrato pode ter uma contribuição relevante para a temperatura do filme à saída da faca. De forma a quantificar este efeito, foi avaliado o perfil de temperaturas do substrato em três pontos, um no meio e dois nas extremidades, como é possível observar na Figura 56.

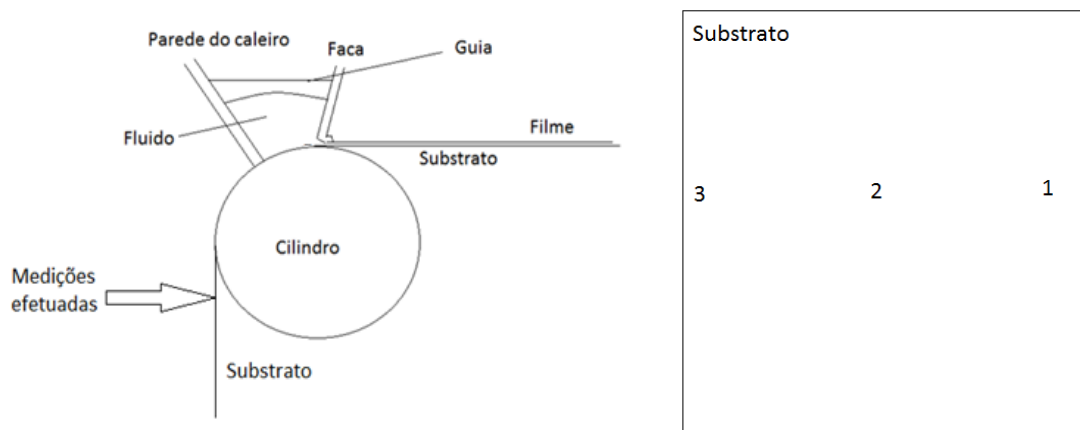


Figura 56- Representação da medição de temperaturas do substrato na primeira cabeça de aplicação.

Relativamente à segunda e terceira cabeça de aplicação, o substrato chega ao caleiro, respetivamente, com uma ou duas camadas de filme depositadas. Nestes casos

a temperatura do substrato foi medida à superfície do filme, como é possível observar na Figura 57.

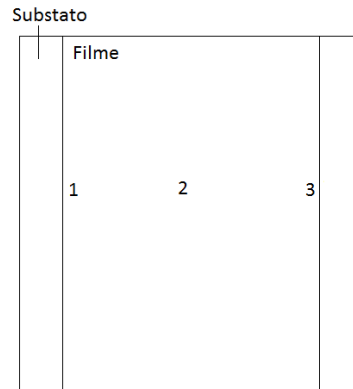


Figura 57- Representação do substrato na segunda e terceira cabeça de aplicação.

4.3. Modelação computacional

Para efetuar a simulação computacional do processo de recobrimento indireto por faca presente na TMG Automotive, foi utilizado o *solver interFoam* da biblioteca computacional OpenFOAM [48]. O algoritmo empregue no *interFoam* baseia-se no método VOF (*volume of fluid*), no qual, uma equação de transporte é usada para determinar o volume de fluido em cada célula computacional [48]. Este solver permite calcular o escoamento de 2 fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis, laminar ou turbulento. As equações empregues no solver são abaixo apresentadas [48][49]:

Equação da conservação da massa para um fluido incompressível;

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

\mathbf{u} - Representa o campo de velocidade;

Equação da conservação da quantidade de movimento;

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{g} \quad (6)$$

p – Pressão no elemento;

\mathbf{T} - Tensor de tensões de origem viscosa;

ρ - Representa a massa específica do fluido;

\mathbf{g} – Aceleração gravítica no elemento por unidade de volume.

Método de VOF;

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\alpha(1 - \alpha) \mathbf{u}_r) = 0 \quad (7)$$

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad (8)$$

ρ - Representa a massa específica do fluido;

$0 < \alpha < 1$ - adotando o valor 0 para um fluido e 1 para o outro.

Tratando-se de um escoamento isotérmico, não é resolvida a equação da energia [49].

Para que se iniciasse a modelação computacional foram necessários estudos preliminares do processo de recobrimento indireto por faca. Estes estudos, como a criação da geometria, estão apresentados neste subcapítulo.

i) Pré-processamento

Nesta fase inicial de pré-processamento foram detalhadas todas as condições e ferramentas necessárias para efetuar a simulação. Numa primeira abordagem foi pensado e decidido qual o caso geral de estudo, sendo este o processo de recobrimento indireto por faca, como é possível observar na Figura 58.

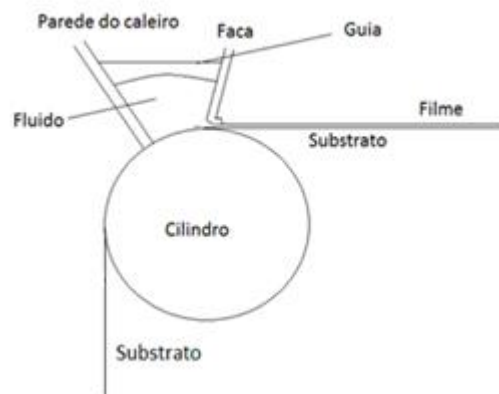


Figura 58- Caso geral de estudo, processo de recobrimento indireto por faca.

O processo de recobrimento indireto por faca estudado através das simulações computacionais teve como base a geometria apresentada pela Figura 59.



Figura 59- Geometria ilustrativa do processo de recobrimento utilizada nos estudos computacionais.

Devido ao desconhecimento total acerca do comportamento dos fluidos durante o processamento, nesta dissertação a simulação será apenas abordada em duas dimensões (2D). Posto isto, foi efetuado um estudo referente à geometria em estudo, como na TMG Automotive estão presentes duas facas com geometrias diferentes, as duas serão utilizadas em um dos casos de estudo, estas podem ser observadas na Figura 60.

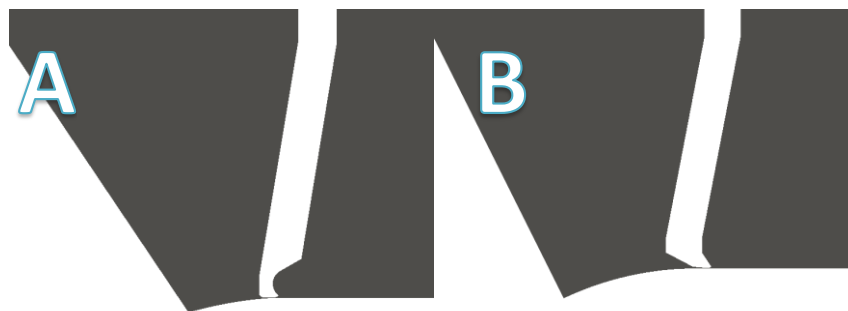


Figura 60- Geometrias presentes na TMG Automotive; A) Faca 1; B) Faca 2.

Criação da geometria- Motivada pelas diferenças na geometria da faca, os caleiros para cada uma das facas empregues apresentam dimensões distintas. Posto isto, o processo de criação da geometria inicia-se com a medição de todas as arestas dos caleiros e das facas, estas podem ser observadas na Figura 61 e 62.

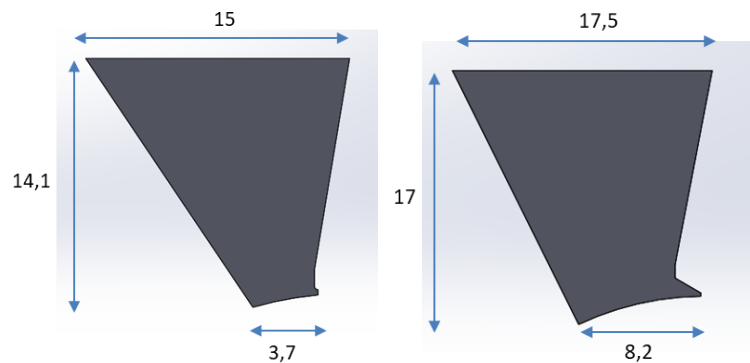


Figura 61- Geometria e dimensões dos caleiros, unidade de medida em cm.

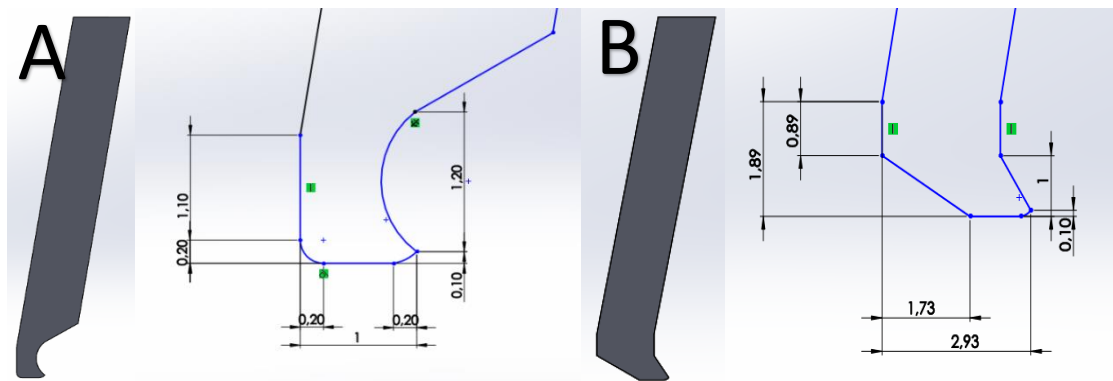


Figura 62- Geometria e dimensões da faca: a) 1ª cabeça de aplicação; b) 2ª cabeça de aplicação, unidade de medida em cm.

A construção da geometria para simular o processo foi desenvolvida por uma ferramenta incorporada na biblioteca computacional *OpenFOAM* denominada *blockMeshDict*.

A estrutura de criação da geometria foi planeada e executada de forma faseada. A Figura 63 ilustra as fases de construção de cada uma das geometrias.

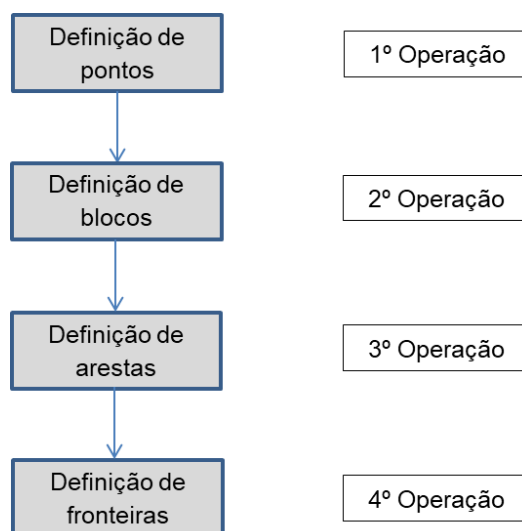


Figura 63- Fases de construção de uma geometria.

A 1ª operação tem como objetivo a definição de todos os pontos presentes na geometria a construir. As geometrias foram desenhadas num *software* CAD, de forma a obter as coordenadas corretas de todos os pontos intermédios. Tendo sido o processo de criação da geometria semelhante para as duas facas em estudo, será apenas retratado o processo de uma das facas, sendo esta denominada por Faca 2. A Figura 64 apresenta todos os pontos definidos.

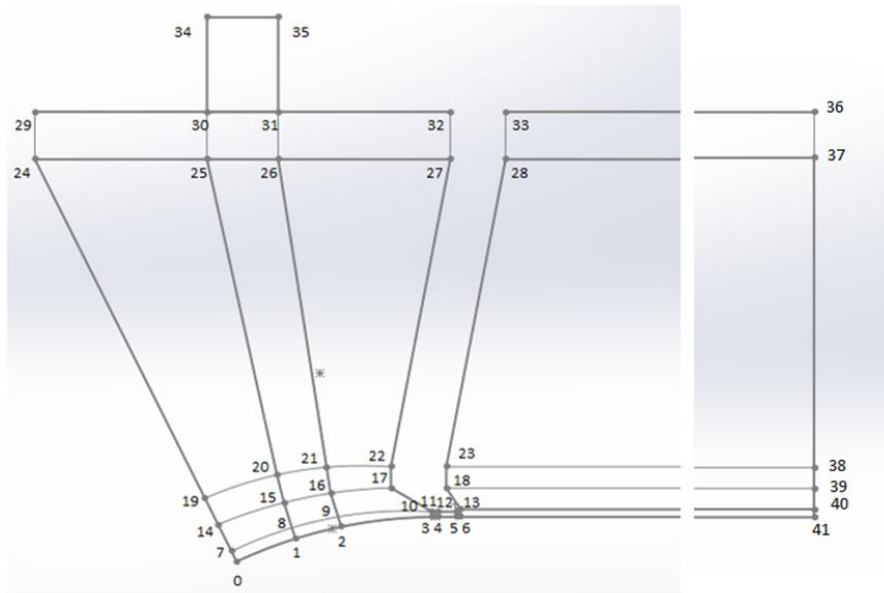


Figura 64- Pontos usados para criação da geometria da Faca 2, plano frontal. Existe um corte efetuado na imagem, devido ao elevado comprimento desta.

Numa fase seguinte, os pontos foram introduzidos e parametrizados de maneira a facilitar a sua utilização e manipulação por parte do utilizador. A parametrização pode ser observada na Figura 65.

```
// Parametrização da Geometria
// Cordenadas em ordem a x
// Cordenadas móveis
x 0; // Cordenada na origem 24 e 29
x1 17.5; // Cordenada máxima do caleiro, 27 e 32
x2 95; // valor máximo 41, 40, 39, 38, 37, 36

// Cordenadas fixas
P0 8.41974051; // Cordenada 0
P1 10.9196838; // Cordenada 1
P2 12.82696921; // Cordenada 2
P3 16.73; // Cordenada 3 e 10
P4 16.97797681; // Cordenada 4 e 11
P5 17.73; // Cordenada 5 e 12
P6 17.93; // Cordenada 6 e 13
P7 8.28551524; // Cordenada 7
P8 10.82984732; // Cordenada 8
P9 12.77608111; // Cordenada 9
P10 7.717668997; // Cordenada 14
P11 10.49583621; // Cordenada 15
P12 12.52484522; // Cordenada 16
P13 15; // Cordenada 17 e 22
P14 17.33; // Cordenada 18 e 23
P15 7.16336078; // Cordenada 19
P16 10.19766152; // Cordenada 20
P17 12.28943287; // Cordenada 21
P18 7.25; // Cordenada 25, 30 e 34
P19 10.25; // Cordenada 26, 31 e 35
P20 19.83; // Cordenada 28 e 33
P18 7.25; // Cordenada 25
P18 7.25; // Cordenada 25
P18 7.25; // Cordenada 25

// Cordenadas em ordem a y
// Cordenadas fixas
Y1 1.14446289; // Cordenada 1
Y2 1.64859572; // Cordenada 2
Y3 2.08257175; // Cordenada 3
Y4 2.08410912; // Cordenada 4, 5, 6 e 41
Y5 0.42896947; // Cordenada 7
Y6 1.42710257; // Cordenada 8
Y7 1.88844095; // Cordenada 9
Y10 1.56462007; // Cordenada 14
Y11 2.48872775; // Cordenada 15
Y12 2.8959902; // Cordenada 16
Y13 2.67327844; // Cordenada 19
Y14 3.66123953; // Cordenada 20
Y15 3.9838509; // Cordenada 21
Y16 23; // Cordenada 34 e 35
y1 1.88580917; // Cordenada do papel

// Cordenadas móveis
y 0.16051893; // Cordenada na origem
y2 17; // Cordenada do topo do caleiro
y3 19; // Cordenada máxima de y
Y8 2.2; // Cordenada 10
Y9 2.17; // Cordenada 11
p1 2.10580917; // Cordenada 12
p2 3.10580917; // Cordenada 17, 18 e 39
p3 4; // Cordenada 22, 23 e 38
p4 2.20580912; // Cordenada 13

// Cordenadas em ordem a z
z1 0;
z2 1;
```

Figura 65- Parametrização da geometria.

Na Figura 65 estão representadas notas introduzidas, a cor azul, de forma a facilitar a manipulação da geometria. A parametrização tem como principal objetivo facilitar a alteração da posição dos pontos.

Na Figura 66 estão representados os pontos introduzidos no ficheiro *blockMeshDict*.

```

vertices
(
  (Sx Sy Sz1) //0 (Sx Sy Sz2) //42
  (SP1 SV1 Sz1) //1 (SP1 SV1 Sz2) //43
  (SP2 SV2 Sz1) //2 (SP2 SV2 Sz2) //44
  (SP3 SV3 Sz1) //3 (SP3 SV3 Sz2) //45
  (SP4 SV4 Sz1) //4 (SP4 SV4 Sz2) //46
  (SP5 SV4 Sz1) //5 (SP5 SV4 Sz2) //47
  (SP6 SV4 Sz1) //6 (SP6 SV4 Sz2) //48
  (SP7 SV5 Sz1) //7 (SP7 SV5 Sz2) //49
  (SP8 SV6 Sz1) //8 (SP8 SV6 Sz2) //50
  (SP9 SV7 Sz1) //9 (SP9 SV7 Sz2) //51
  (SP3 SV8 Sz1) //10 (SP3 SV8 Sz2) //52
  (SP4 SV9 Sz1) //11 (SP4 SV9 Sz2) //53
  (SP5 SP1 Sz1) //12 (SP5 SP1 Sz2) //54
  (SP4 SV9 Sz1) //11 (SP6 SP4 Sz2) //55
  (SP5 SP1 Sz1) //12 (SP10 SV10 Sz2) //56
  (SP6 SP4 Sz1) //13 (SP11 SV11 Sz2) //57
  (SP10 SV10 Sz1) //14 (SP12 SV12 Sz2) //58
  (SP11 SV11 Sz1) //15 (SP13 SP2 Sz2) //59
  (SP12 SV12 Sz1) //16 (SP14 SP2 Sz2) //60
  (SP13 SP2 Sz1) //17 (SP15 SV13 Sz2) //61
  (SP14 SP2 Sz1) //18 (SP16 SV14 Sz2) //62
  (SP15 SV13 Sz1) //19 (SP17 SV15 Sz2) //63
  (SP16 SV14 Sz1) //20 (SP13 SP3 Sz2) //64
  (SP17 SV15 Sz1) //21 (SP14 SP3 Sz2) //65
  (SP13 SP3 Sz1) //22 (Sx Sy2 Sz2) //66
  (SP14 SP3 Sz1) //23 (SP18 Sy2 Sz2) //67
  (Sx Sy2 Sz1) //24 (SP19 Sy2 Sz2) //68
  (SP18 Sy2 Sz1) //25 (Sx1 Sy2 Sz2) //69
  (SP19 Sy2 Sz1) //26 (SP20 Sy2 Sz2) //70
  (Sx1 Sy2 Sz1) //27 (Sx Sy3 Sz2) //71
  (SP20 Sy2 Sz1) //28 (SP18 Sy3 Sz2) //72
  (Sx Sy3 Sz1) //29 (SP19 Sy3 Sz2) //73
  (SP18 Sy3 Sz1) //30 (Sx1 Sy3 Sz2) //74
  (SP19 Sy3 Sz1) //31 (SP20 Sy3 Sz2) //75
  (Sx1 Sy3 Sz1) //32 (SP18 SV16 Sz2) //76
  (SP20 Sy3 Sz1) //33 (Sx2 Sy3 Sz2) //77
  (SP18 SV16 Sz1) //34 (Sx2 Sy2 Sz2) //78
  (SP19 SV16 Sz1) //35 (Sx2 Sp3 Sz2) //79
  (Sx2 Sy3 Sz1) //36 (Sx2 Sp2 Sz2) //80
  (Sx2 Sy2 Sz1) //37 (Sx2 Sp1 Sz2) //81
  (Sx2 Sp3 Sz1) //38 (Sx2 SV4 Sz2) //82
  (Sx2 Sp2 Sz1) //39
  (Sx2 Sp1 Sz1) //40
  (Sx2 SV4 Sz1) //41 );

```

Figura 66- Pontos definidos no OpenFOAM.

Os pontos representados na Figura 64 estão igualmente ilustrados na Figura 66, sendo possível observar o número através do comentário a azul.

Concluída a definição de pontos, a fase seguinte implica a interligação dos 8 pontos de cada vez até ser formado um bloco. Esta geometria é constituída por 24 blocos que englobam a parte da frente e a parte de trás da geometria. Na Figura 67 estão representados os blocos definidos nesta geometria.

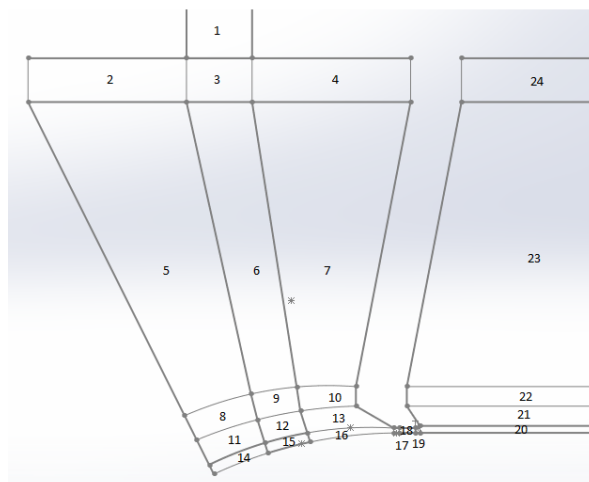


Figura 67- Representação dos blocos definidos para a Faca 2.

Após definidos os blocos, estes foram introduzidos no ficheiro de criação da geometria, Figura 68.

```

blocks
(
  hex (30 31 35 34 72 73 77 76) (SNx SN1 SZ) simpleGrading (1 1 1) //bloco 1
  hex (24 25 30 29 66 67 72 71) (SNe Sny SZ) simpleGrading (1 1 1) //bloco 2
  hex (25 26 31 30 67 68 73 72) (SNx Sny SZ) simpleGrading (1 1 1) //bloco 3
  hex (26 27 32 31 68 69 74 73) (SNx Sny SZ) simpleGrading (0.1 1 1) //bloco 4
  hex (19 20 25 24 61 62 67 66) (SNe Sny SZ) simpleGrading (1 10 1) //bloco 5
  hex (20 21 26 25 62 63 68 67) (SNx Sny SZ) simpleGrading (1 10 1) //bloco 6
  hex (21 22 27 26 63 64 69 68) (SNx Sny SZ) simpleGrading (0.1 10 1) //bloco 7
  hex (14 15 20 19 56 57 62 61) (SNe Snc SZ) simpleGrading (1 1 1) //bloco 8
  hex (15 16 21 20 57 58 63 62) (SNx Snc SZ) simpleGrading (1 1 1) //bloco 9
  hex (16 17 22 21 58 59 64 63) (SNx Snc SZ) simpleGrading (0.1 1 1) //bloco 10
  hex (7 8 15 14 49 50 57 56) (SNe SM1 SZ) simpleGrading (1 5 1) //bloco 11
  hex (8 9 16 15 50 51 58 57) (SNx SM1 SZ) simpleGrading (1 5 1) //bloco 12
  hex (9 10 17 16 51 52 59 58) (SNx SM1 SZ) simpleGrading (0.1 5 1) //bloco 13
  hex (0 1 8 7 42 43 50 49) (SNe SN3 SZ) simpleGrading (1 1 1) //bloco 14
  hex (1 2 9 8 43 44 51 50) (SNx SN3 SZ) simpleGrading (1 1 1) //bloco 15
  hex (2 3 10 9 44 45 52 51) (SNx SN3 SZ) simpleGrading (0.1 1 1) //bloco 16
  hex (3 4 11 10 45 46 53 52) (SNa SN3 SZ) simpleGrading (1 1 1) //bloco 17
  hex (4 5 12 11 46 47 54 53) (SN18 SN3 SZ) simpleGrading (0.5 1 1) //bloco 18
  hex (5 6 13 12 47 48 55 54) (SN19 SN3 SZ) simpleGrading (2 1 1) //bloco 19
  hex (6 41 40 13 48 83 82 55) (SNb SN3 SZ) simpleGrading (35 1 1) //bloco 20
  hex (13 40 39 18 55 82 81 60) (SNb SM1 SZ) simpleGrading (35 7 1) //bloco 21
  hex (18 39 38 23 60 81 80 65) (SNb Snc SZ) simpleGrading (35 1 1) //bloco 22
  hex (23 38 37 28 65 80 79 70) (SNb Sny SZ) simpleGrading (35 10 1) //bloco 23
  hex (28 37 36 33 70 79 78 75) (SNb Sny SZ) simpleGrading (35 1 1) //bloco 24
);

```

Figura 68- Definição dos blocos da geometria.

À semelhança do que acontece na definição de pontos, a parametrização também pode ser aplicada à definição de blocos sendo uma ferramenta com uma utilidade elevada para o estudo de refinamento de malha. Na Figura 69 encontra-se explicada a estrutura da definição de um bloco.

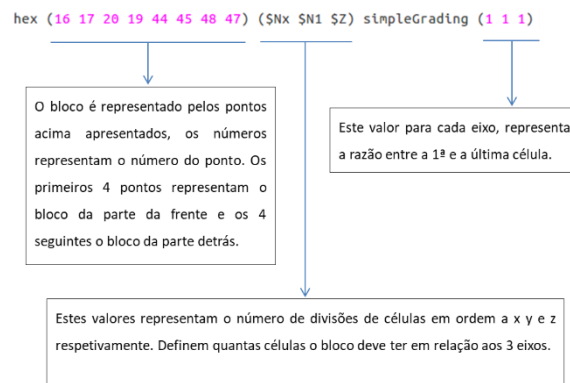


Figura 69- Esquema explicativo do processo de definição de blocos.

A parametrização para esta geometria pode ser observada pela Figura 70.

```

// Refinamento da malha
// Refinamento em ordem a x
NX 10; // blocos 1, 3, 6, 9, 12 e 15
Nx 50; // blocos 16,13, 10, 7,e 4
Ne 20; // blocos 14 11 8 5 2
Na 15; // blocos 17 19
Nb 450; // bloco 20, 21, 22, 23, 24
N18 70; // bloco 18
N19 20;

// Refinamento em ordem a y
Ny 35; // blocos 5, 6, 7 e 23
NY 3; // bloco 2, 3, 4 e 24
Nc 10; // blocos 8, 9, 10 e 22
N1 23; // bloco 11, 12, 13 e 21
N3 10; // bloco 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20
n1 9; // bloco 1

// Refinamento em orde a z
z 1;

```

Figura 70- Parametrização dos blocos criados na geometria.

Havendo a presença de arestas curvas na geometria, estas foram definidas nesta operação, 3ª operação. As arestas que sejam curvas requerem a indicação de um ponto

adicional para ficarem totalmente definidas. O esquema de definição de arestas curvas pode ser observada pela Figura 71.

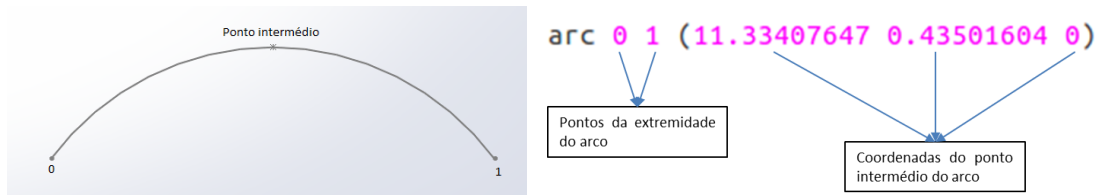


Figura 71- Esquema explicativo do processo de definição de arcos.

As arestas curvas e a respetiva parametrização empregue na geometria criada podem ser observadas pela Figura 72.

```
edges
(
  arc 0 1 ($R0 $r0 $z1)           // Parametrização das arestas curvas
  arc 42 43 ($R0 $r0 $z2)         R0 9.65317178;           // Arco 0-1
  arc 1 2 ($R1 $r1 $z1)           r0 0.69451565;         // Arco 1-2
  arc 43 44 ($R1 $r1 $z2)         R1 11.8671068;        // Arco 1-2
  arc 2 3 ($R2 $r2 $z1)           r1 1.42000029;        // Arco 2-3
  arc 44 45 ($R2 $r2 $z2)         R2 14.76780719;      // Arco 2-3
  arc 7 8 ($R3 $r3 $z1)           r2 1.96161274;        // Arco 7-8
  arc 49 50 ($R3 $r3 $z2)         R3 9.53733465;       // Arco 7-8
  arc 8 9 ($R4 $r4 $z1)           r2 0.97990145;        // Arco 8-9
  arc 50 51 ($R4 $r4 $z2)         R4 11.79608726;      // Arco 8-9
  arc 9 10 ($R5 $r5 $z1)          r4 1.6867834;         // Arco 9-10
  arc 51 52 ($R5 $r5 $z2)         R5 14.7466089;       // Arco 9-10
  arc 3 4 ($R6 $r6 $z1)           r5 2.11411662;        // Arco 3-4
  arc 45 46 ($R6 $r6 $z2)         R6 16.85398603;     // Arco 3-4
  arc 14 15 ($R7 $r7 $z1)         r6 2.08372477;        // Arco 14-15
  arc 56 57 ($R7 $r7 $z2)         R7 9.09010048;       // Arco 14-15
  arc 15 16 ($R8 $r8 $z1)         r7 2.0767688;        // Arco 15-16
  arc 57 58 ($R8 $r8 $z2)         R8 11.50515408;     // Arco 15-16
  arc 16 17 ($R9 $r9 $z1)         r8 2.71820259;        // Arco 16-17
  arc 58 59 ($R9 $r9 $z2)         R9 13.75915921;     // Arco 16-17
  arc 19 20 ($R10 $r10 $z1)       r9 3.04052921;        // Arco 19-20
  arc 61 62 ($R10 $r10 $z2)       R10 8.65646423;      // Arco 19-20
  arc 20 21 ($R11 $r11 $z1)       r10 3.24111367;      // Arco 20-21
  arc 62 63 ($R11 $r11 $z2)       R11 11.23834599;     // Arco 20-21
  arc 21 22 ($R12 $r12 $z1)       r11 3.85626907;      // Arco 21-22
  arc 63 64 ($R12 $r12 $z2)       R12 13.64438276;     // Arco 21-22
  arc 12 13 ($R13 $r13 $z1)       r12 4.04792959;      // Arco 12-13
  arc 54 55 ($R13 $r13 $z2)       R13 17.83916902;     // Arco 12-13
);
r13 2.13747107;
```

Figura 72- Código referente a definição de arestas curvas e a respetiva parametrização.

Os arcos criados são principalmente referentes à estrutura circular representativa do papel sobre o cilindro de borracha e também para suavização de arestas da faca.

De forma a finalizar o processo de criação da geometria através do ficheiro, foi efetuada a última operação tendo sido esta responsável pela especificação do tipo de fronteira empregue. Todas as fronteiras presentes na geometria devem ser agregadas, caso contrário a simulação numérica é inviabilizada. A fronteira da geometria é dividida em regiões, cada região devidamente identificada. As informações relativas a cada região encontram-se num sub-dicionário contendo o tipo de fronteira e ainda a lista de faces que formam essa fronteira, na Figura 73 encontra-se ilustrado o processo de definição de uma fronteira.

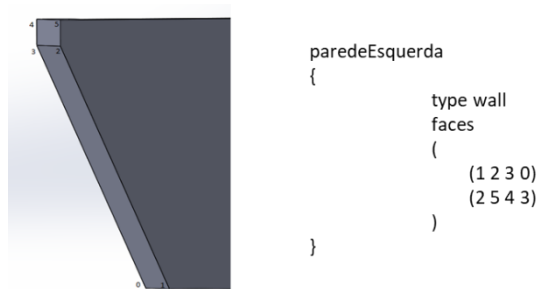


Figura 73- Processo exemplo de definição de uma fronteira.

A geometria em estudo foi definida por 5 grupos de fronteiras. Na Figura 74 são representadas os grupos de fronteiras devidamente identificadas.

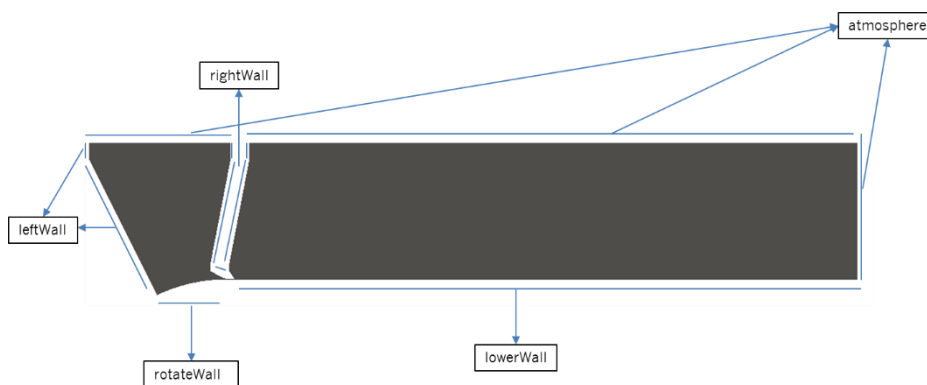


Figura 74- Representação e identificação de todas as fronteiras da geometria.

Após atribuída a designação adequada, foi especificado o tipo de fronteira para cada uma das regiões, esta pode ser observada pela Tabela 8.

Tabela 8- Tipo de fronteira aplicada a cada região.

Fronteira	Tipo
leftWall	wall
rightWall	wall
rotateWall	wall
lowerWall	wall
atmosphere	patch
frontAndBack	empty

O tipo de fronteira denominada por *wall* representa, como o nome indica, a presença de uma parede, por outro lado, *patch* indica a presença de um tipo de fronteira

genérica [50]. A definição *empty* instrui o OpenFOAM para que as equações sejam resolvidas apenas em dois planos neste caso x e y.

Concluída a fase de introdução de todos os dados referentes à geometria, esta é criada através do comando *blockMesh*, podendo conferir se ocorreu a definição correta de todos os pontos e blocos através do comando *checkMesh*. Se a geometria estiver corretamente criada o terminal reportará a mensagem *Mesh ok*.

Definição de condições de fronteira- Nesta fase é importante definir as condições de fronteira para cada uma das paredes quantificando a velocidade, pressão e o valor do alfa em cada uma delas. A Tabela 9 apresenta as condições de fronteira definidas para cada uma das fronteiras existentes.

Tabela 9- Condições de fronteira definidas para cada fronteira.

Fronteira	Velocidade		Pressão		Valor do alfa	
	Condição de fronteira	Valor (m/s)	Condição de fronteira	Valor (Pa)	Condição de fronteira	Valor
leftWall	fixedValue	uniform (0 0 0)	zeroGradient	-	zeroGradient	-
rightWall	fixedValue	uniform (0 0 0)	zeroGradient	-	zeroGradient	-
rotateWall	rotatingWallVelocity	origin - (0,16 -0,17 0) axis - (0 0 1) omega -2,08	zeroGradient	-	zeroGradient	-
lowerWall	movingWallVelocity	uniform (0,42 0 0)	zeroGradient	-	zeroGradient	-
atmosphere	zeroGradient	-	fixedValue	uniform 0	zeroGradient	-
frontAndBack	empty	-	empty	-	empty	-

A condição designada por *fixedValue* representa a atribuição de um valor fixo à condição que está a ser imposta, especificando de seguida o valor do mesmo. Relativamente às condições impostas designadas por *zeroGradient*, estas implicam um gradiente nulo na zona especificada [51]. A velocidade foi definida para a zona plana como uma velocidade linear aplicando um valor de velocidade sobre o eixo dos x, contudo para a zona curva, foi necessário impor uma velocidade angular (*omega*), definir o eixo de rotação (*axis*) e a ainda o centro da circunferência (*origin*). O valor de velocidade angular resulta num valor negativo devido ao sentido do eixo dos z, sendo este ilustrado na Equação (9).

$$\omega = \frac{v_{processo}(m/s)}{raio_{cilindro}(m)} = \frac{0.416666666667}{0.2} = -2.08 (rad/s) \quad (9)$$

Modelo viscoso- O plastisol é caracterizado por ser um fluido não-newtoniano, tendo sido necessária a introdução de um modelo capaz de descrever o seu comportamento. Para o ar, procedeu-se da mesma forma, com a diferença de este ser caracterizado por ser um fluido newtoniano. Estes modelos são definidos num ficheiro designado *transportProperties*, sendo abordado na subsecção 2.4.1 Na Figura 75 está ilustrado o conteúdo típico deste ficheiro.

```

phases (fluid air);

water
{
transportModel BirdCarreau;

BirdCarreauCoeffs
{
nu0      [0 2 -1 0 0 0 0] 0.0695652173913043; //Viscosidade cinemática para taxa de corte nula
nuInf    [0 2 -1 0 0 0 0] 0.000869565217391304; //Viscosidade cinemática para taxa de corte infinita
k        [0 0 1 0 0 0 0] 44.4340740315952; //Constante de tempo
n        [0 0 0 0 0 0 0] 0.429562707266285; //Lei da Potência
}

rho      [1 -3 0 0 0 0 0] 1150; //Valor de densidade do fluido kg/m3
}

air
{
transportModel Newtonian;
nu        [0 2 -1 0 0 0 0] 1.48e-05; //Valor de viscosidade
rho      [1 -3 0 0 0 0 0] 1; //Valor da densidade kg/m3
}

sigma    0.07;

```

Figura 75- Código referente à definição do modelo viscoso.

Como é possível observar na Figura 75, o modelo adotado para a caracterização do fluido foi um modelo newtoniano generalizado. Os valores de viscosidade obtidos pela caracterização reológica foram obtidos em Pa.s (viscosidade dinâmica), sendo introduzidos no ficheiro em m²/s (viscosidade cinemática). Os valores de viscosidade cinemática foram calculados através da Equação (10).

$$v (m^2/s) = \frac{\eta (Pa.s)}{\rho (kg/m^3)} \quad (10)$$

A densidade utilizada para cada um dos plastissóis foi de 1150 kg/m³, tendo sido este valor calculado aquando a produção dos plastissóis.

O valor de sigma apresentado na Figura 75 representa a constante de Stefan-Boltzmann, indicando o valor da tensão superficial entre os dois materiais [50].

Controlo de tempo da simulação- O controlo de tempo da simulação foi efetuado através do ficheiro *controlDict*. Neste foram controlados os tempos referentes à simulação, mais concretamente o tempo de início da simulação, a duração, o passo de tempo da simulação designado por delta T, o número de *Courant*, entre outros. O número de *Courant* ajuda na determinação do passo de tempo para a geometria dada, a sua monitorização deve ser cuidada pois se o *Courant* for maior que 1 a simulação irá divergir. A Figura 76 ilustra o código típico para o controlo dos dados referentes ao tempo de simulação.

```

application      interFoam;
startFrom        startTime;
startTime        0;
stopAt           endTime;
endTime          50;
deltaT           1e-07;
writeControl     adjustableRunTime;
writeInterval    0.1;
purgeWrite       0;
writeFormat      ascii;
writePrecision   6;
writeCompression uncompressed;
timeFormat       general;
timePrecision    6;
runTimeModifiable yes;
adjustTimeStep   yes;
maxCo            1;
maxAlphaCo       1;
maxDeltaT        1;

```

Figura 76- Definição do controlo do tempo de simulação

Preenchimento do espaço desejado com plastisol- Tratando-se de uma simulação multifásica foi necessário definir na geometria quais os locais que se encontravam preenchidos por plastisol através do ficheiro *setFieldsDict*. Este ficheiro tem como função a colocação do plastisol no local desejado. Na Figura 77 encontra-se representada o conteúdo do ficheiro responsável por colocar o fluido no local desejado.

```

defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.fluid 0
);
regions
(
    boxToCell
    {
        box (0 0 0) (1.7 1.5 1);
        fieldValues
        (
            volScalarFieldValue alpha.fluid 1
        );
    }
);

```

Figura 77- Código referente à definição espacial do fluido.

Numa fase inicial, como é possível observar pela Figura 77, definiu-se por defeito que todo o volume de controlo foi preenchido com ar, representado pelo número 0 e, posteriormente alocando o fluido através do número 1 em função da Equação (7) de transporte do alfa. O processo de alocação do fluido foi efetuado por meio de uma caixa como se encontra ilustrado na Figura 78.

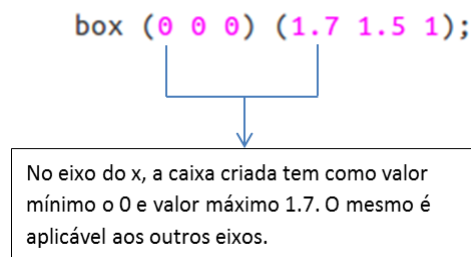


Figura 78- Esquema explicativo do processo de definição de uma box.

Após criado e executado o ficheiro através do comando *setFields*, resulta a geometria apresentada na Figura 79 sendo o fluido representado com a cor vermelha.



Figura 79- Representação do fluido no caleiro.

Método de discretização e resolução das equações- Estes ficheiros definem a forma com que o *software* irá proceder à discretização e resolução das equações empregues na simulação, sendo o ficheiro responsável por essa operação denominado por *fvSchemes* e *fvSolutions*. Nestes ficheiros, foram empregues os valores pré-definidos pelo sistema.

Após a geometria se encontrar criada e funcional e, definidos todos os ficheiros acima apresentados, foi efetuado um estudo de refinamento da malha de forma a conferir a veracidade dos resultados obtidos.

O estudo foi iniciado com uma malha (pouco refinada) e aumentando o seu refinamento através da diminuição do valor da aresta para metade, implicando um

aumento de células de aproximadamente 4 vezes mais, a Figura 80 ilustra as 4 malhas utilizadas no estudo de refinamento.

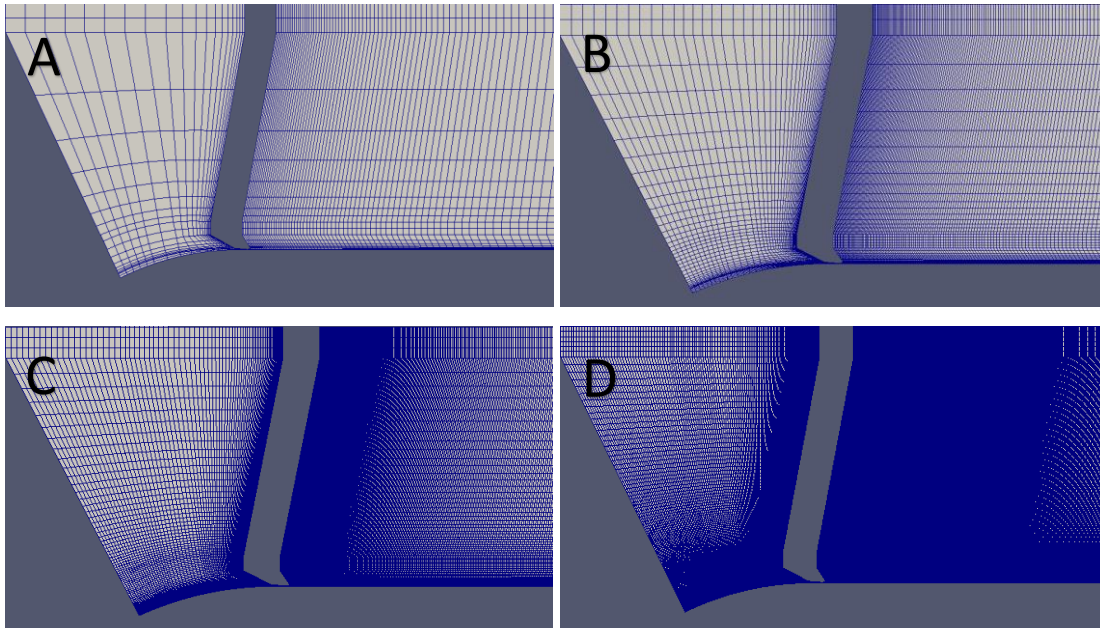


Figura 80- Malhas usadas no estudo de refinamento da malha: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4.

O número de células, presente em cada uma das malhas, pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10- Número de células presente em cada uma das malhas.

Malha	Número de células
M1	2644
M2	10985
M3	44470
M4	176280

Para cada geometria foi efetuada a simulação mantendo sempre constante todas as condições de processamento e propriedades reológicas variando apenas o grau de refinamento da malha.

Após as simulações efetuadas, foi estudada a veracidade dos resultados provenientes das malhas, através da realização de um varrimento em ordem a y, avaliando os valores de taxa de corte, velocidade em ordem a x e a y, a magnitude de velocidade e ainda o valor do alfa para as 5 zonas diferentes ao longo da geometria, estando estas ilustradas na Figura 81.

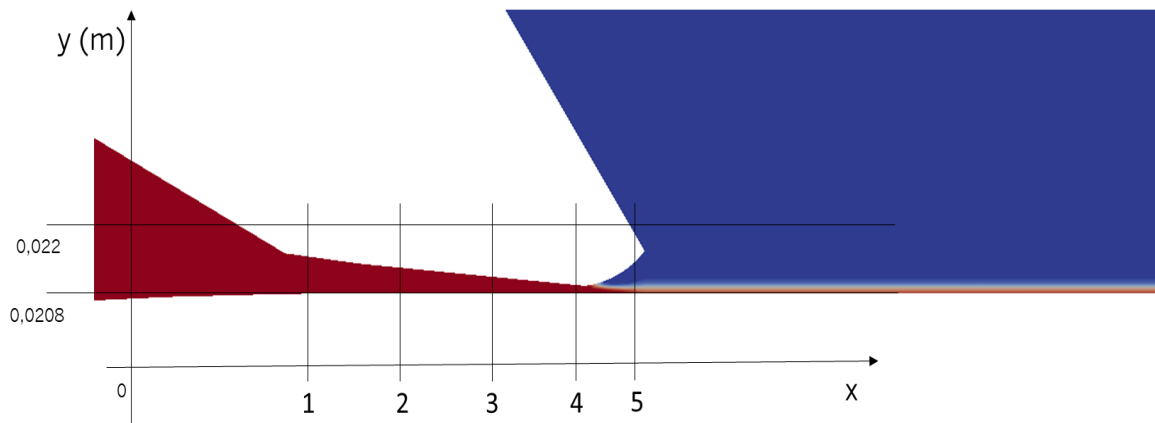


Figura 81- Zonas de avaliação para o estudo de refinamento da malha.

Os parâmetros acima descritos foram avaliados, para cada uma das zonas, para um tempo de simulação de 25 segundos, posto isto, foram elaborados gráficos para cada parâmetro e zona. Na Figura 82 encontra-se ilustrado um típico exemplo com os dados provenientes das 4 malhas para a zona 2 (representada na Figura 81).

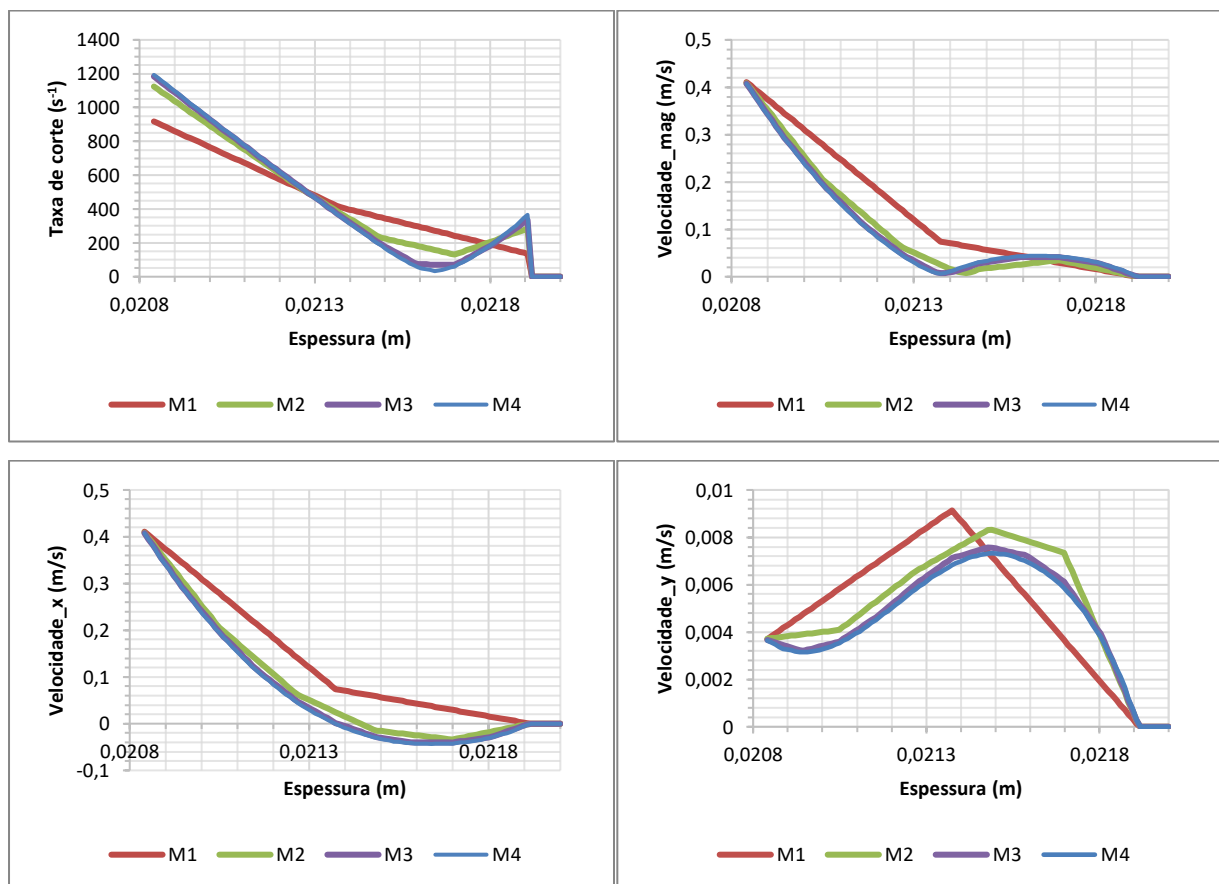


Figura 82- Resultados provenientes do estudo de refinamento da malha.

Observando os resultados provenientes da Figura 82, observa-se uma convergência de resultados à medida que o grau de refinamento aumenta. O gráfico do

alfa não se encontra aqui apresentado devido ao canal nesta zona se encontrar apenas composto por plastisol.

ii) Cálculo numérico

Após o modelo totalmente desenvolvido e preenchido foi efetuado o cálculo numérico através do solver *interFoam* presente na biblioteca computacional *OpenFOAM*.

iii) Pós-processamento

Esta etapa foi responsável pela obtenção de todos os resultados provenientes das simulações. Todo este processo foi realizado por via de uma ferramenta destinada à visualização e manipulação de resultados denominada *Paraview*.

Tratando-se de um escoamento transiente, todos os resultados foram avaliados para um tempo de escoamento de 25 segundos, sendo este tempo escolhido de forma a garantir que o sistema se encontrava numa fase estável.

A taxa de corte, viscosidade e pressão foram avaliados através de utilitários presentes na biblioteca computacional do *OpenFOAM*. As recirculações no caleiro foram avaliadas através de funções existentes no *Paraview*, em primeiro lugar foi aplicado à geometria a função *Threshold*, sendo esta responsável por apresentar apenas a parte da geometria onde se encontra o fluido. Após a aplicação deste, a geometria resultante pode encontra-se ilustrada na Figura 83.

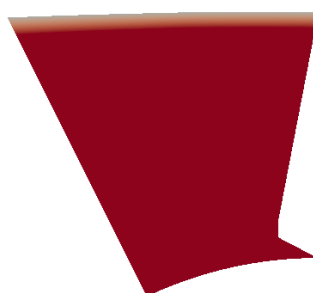


Figura 83- Aplicação da função *Threshold*.

Após separado o fluido do resto da geometria, as recirculações do caleiro foram avaliadas através das ferramentas *Glyph* e *Stream Tracer* responsáveis pela

aplicação de setas com a direção que o fluido adota e linhas de fluxo, respetivamente. Um exemplo típico pode ser observado na Figura 84.

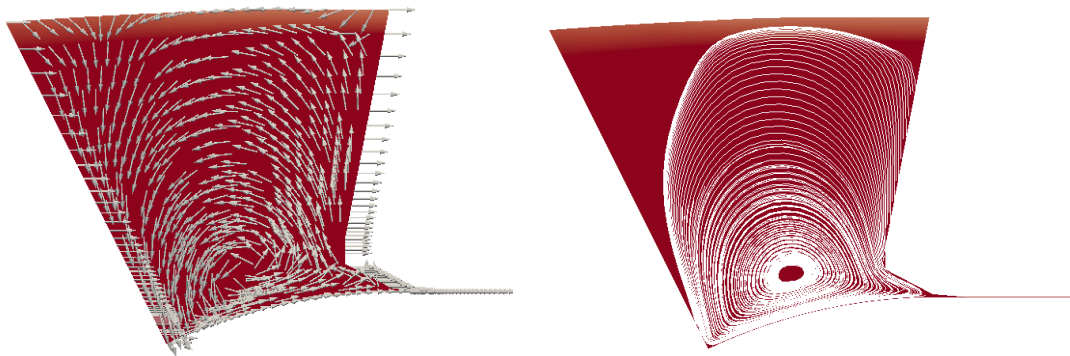


Figura 84- Exemplo típico da avaliação de refluxos no caleiro para o plastisol 1 a 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.

A espessura do filme formado foi avaliada em 3 locais diferentes na geometria de forma a garantir a medição numa zona em que esta se encontrava estabilizada. As medições foram efetuadas nos locais conforme ilustrado na Figura 85, procedendo à obtenção da média das medições.

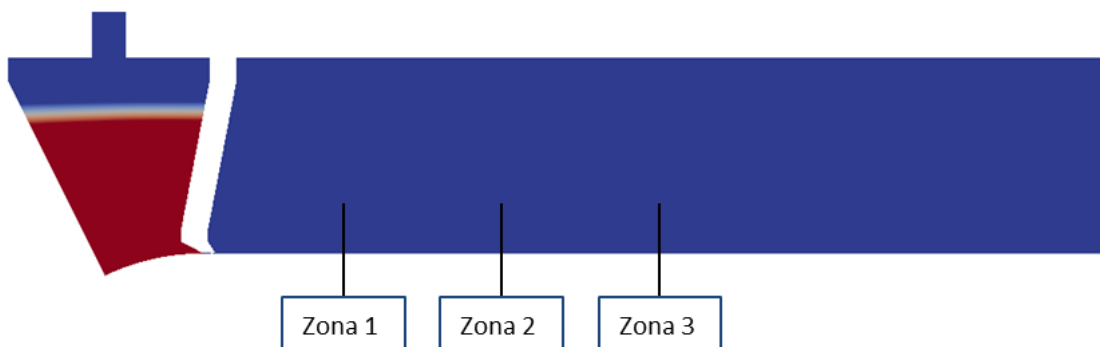


Figura 85- Zonas de medições de espessura.

Os valores de espessura foram obtidos a partir de um gráfico do alfa em função da espessura, obtendo o valor de espessura quando o alfa se encontra no valor de 0.5 representando a transição de fluido para o ar, como é possível observar pela Figura 86.

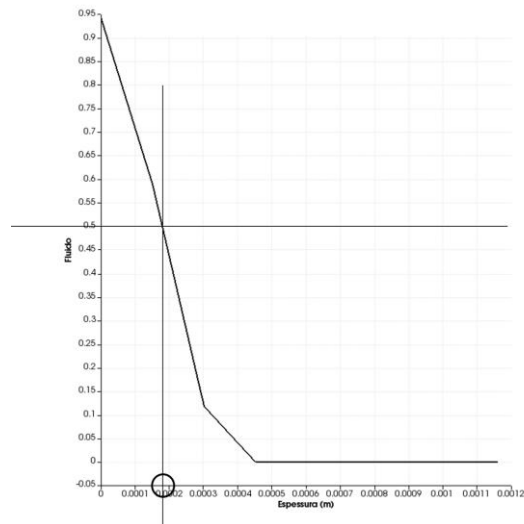


Figura 86- Exemplo típico de uma medição de espessura.

O valor de espessura para a zona avaliada é obtido pela coordenada do eixo dos x representada pelo círculo na Figura 86.

A pressão e taxa de corte foram obtidos a partir da zona mais crítica da geometria, sendo esta representada pelo final da faca onde o valor do entreferro é menor, Figura 87.

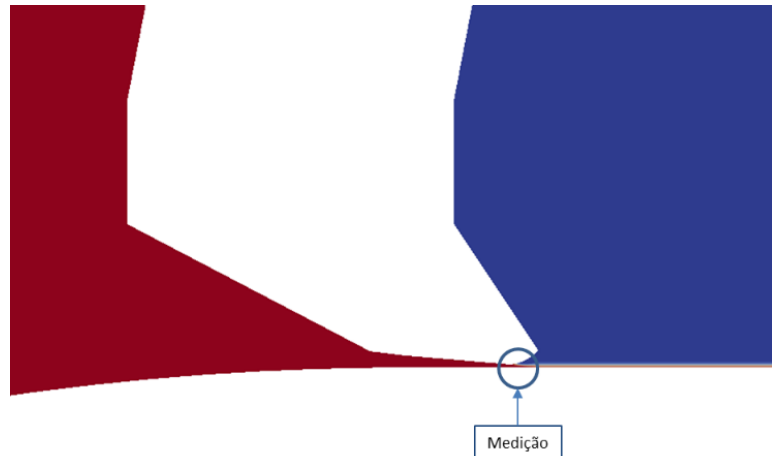


Figura 87- Zona mais restrita de medição.

De forma a obter os valores máximos, estes foram colocados num gráfico com os valores em função da espessura, obtendo os valores desejados, conforme o gráfico ilustrado na Figura 88.

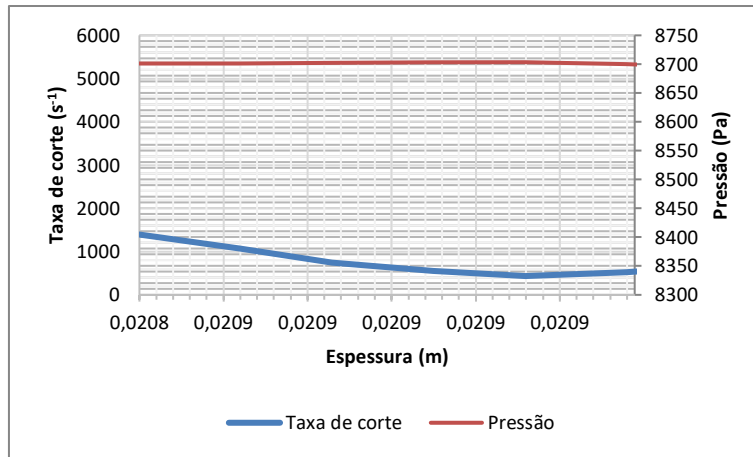


Figura 88- Exemplo de obtenção de valores de pressão e taxa de corte para a zona da faca em que a espessura é menor.

iv) Casos de estudo

Após criado o ficheiro computacional, procedeu-se à simulação do processo de recobrimento aproximando ao máximo o processo utilizado na TMG Automotive.

Através das simulações numéricas o principal objetivo resume-se à compreensão do escoamento do plastisol no caleiro durante o seu processamento, para isso, foram ainda estudadas algumas variações de parâmetros face ao processo capazes de provocar alterações significativas ao processo de recobrimento indireto por faca presente na TMG Automotive, nomeadamente no caleiro e na zona mais restrita da geometria, Figura 89.

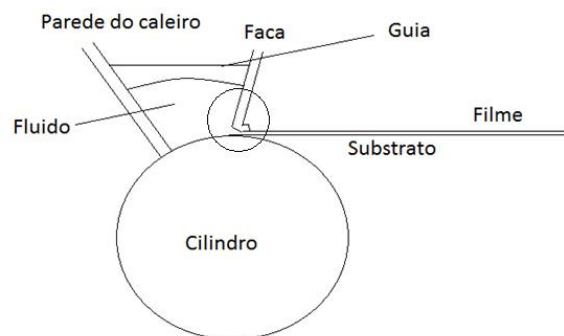


Figura 89- Ilustração do processo de recobrimento, zona onde será avaliado o comportamento do fluxo.

Os casos de estudo presentes neste trabalho representam fatores, quer referentes ao processo quer à matéria-prima, que poderão ser alterados durante o processamento e, aos quais é necessário entender a sua influência no escoamento. Os casos de estudo referentes ao processo são:

Velocidade de processo- Dependendo de cada artigo produzido, a velocidade de processamento nunca se mantém constante para todos os artigos, podendo variar entre os 15 m/min até os 35 m/min. Face ao explícito, será analisada a influência da alteração da velocidade no escoamento do plastisol, mantendo constante todos os parâmetros alterando apenas a velocidade linear de processamento, com valores de 15, 25 e 35 m/min;

Altura de plastisol presente no caleiro- A altura de plastisol presente no caleiro é pré-definido para todas as produções, assim sendo será estudado se o escoamento é alterado com outros volumes de plastisol presente no caleiro. As alturas avaliadas foram de 6, 12 e 14 cm, como é possível observar na Figura 90.

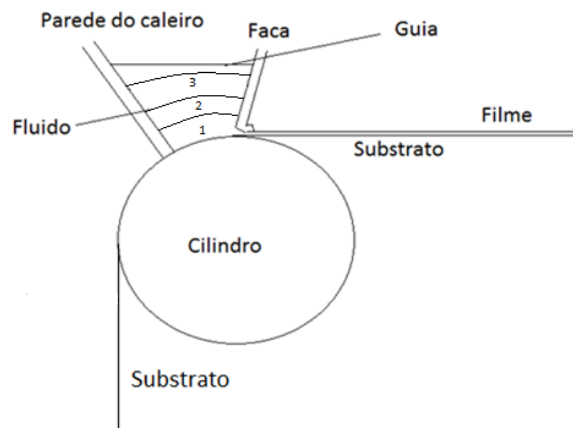


Figura 90- Ilustração de diferentes alturas de plastisol no caleiro; 1) 6 cm; 2) 12 cm; 3) 14 cm.

Geometria da faca- Como observado na subsecção 4.2.4, na Figura 51, a máquina de revestimento é uma máquina tripla sendo que a faca presente na 2ª e 3ª cabeça são iguais, no entanto, na 1ª cabeça a geometria da faca é diferente. Face ao explícito existe a necessidade de perceber o impacto da utilização de duas facas com geometrias diferentes, estas podem ser observadas na Figura 91.

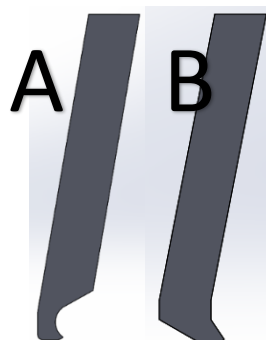


Figura 91- Geometrias testadas; A) Faca 1; B) Faca 2.

Ângulo de faca- Conforme estudos da literatura reportados na secção 3.2, o ângulo da faca pode ser determinante no escoamento do plastisol à passagem pela faca, motivado por esse estudo, será analisado 3 ângulos de faca avaliando o impacto destes na geometria da Faca 2. Os diferentes ângulos de faca empregues nas simulações podem ser observados na Figura 92.



Figura 92- Diferentes ângulos empregues no estudo para a Faca 2.

Dosagem de plastisol aplicado- Face a espessura que é desejada no produto final, a dosagem de plastisol aplicada no substrato por metro quadrado é diferente. Através disto foi avaliado o impacto da dosagem de plastisol aplicado por via do valor do entreferro no escoamento. As dosagens de plastisol aplicado estudadas foram 120, 250 e 750 g/m². A Figura 93 ilustra o parâmetro a estudar neste tópico.

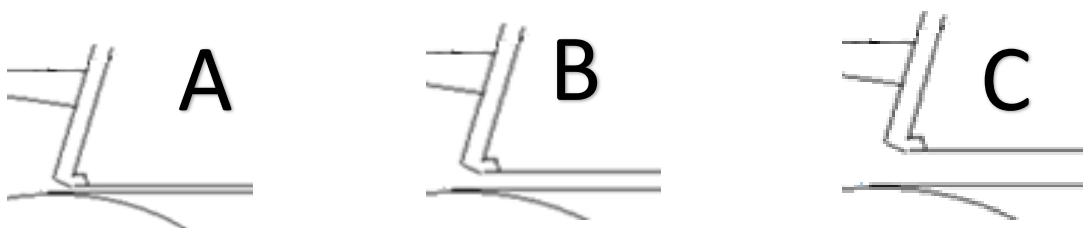


Figura 93- Diferentes quantidades de plastisol aplicados: A) 120 g/m²; B) 250 g/m²; C) 750 g/m².

Relativamente a alterações de matéria-prima, os parâmetros em estudo são:

Temperatura do plastisol- Os plastissóis processados dão entrada no caleiro com temperaturas compreendidas entre os 25 e 30°C. Com isto, será avaliado o impacto entre processar o plastisol com uma temperatura de 25°C ou com uma temperatura de 30°C.

Tempo de armazenamento- Os plastissóis produzidos nem sempre são consumidos pelo processo logo após a sua produção, sendo muitas vezes armazenados, podendo ainda ficar armazenados durante umas horas ou até dias, como já referido. Face a isto, será avaliado o impacto do armazenamento do plastisol no seu escoamento através da simulação de um plastisol consumido logo após a sua produção (t=0 horas) e outro com 9 dias de armazenamento (t=216 horas).

Efeito do processo de vácuo- Como observado na subsecção 3.1.5, o processo de vácuo implica uma alteração no comportamento reológico do plastisol. Na TMG Automotive alguns dos plastissóis são submetidos a um processo de vácuo de maneira a retirar o ar contido no seu interior. Posto isto, será avaliado a influência deste no escoamento do plastisol.

Para cada um dos casos em estudo acima apresentados, será avaliada a influência de diversos fatores e apresentados os que tem relevância, sendo eles:

- Taxa de corte;
- Recirculações no caleiro;
- Viscosidade;
- Pressão debaixo da faca;
- Espessura do filme formado.

Para avaliação de todos os casos de estudo, estes serão sempre comparados com a simulação referência. Esta simulação referência contém as condições de processamento mais utilizadas num maior número de plastissóis, sendo ainda aquela que apresenta um maior interesse de obter conhecimento. As condições da simulação referência podem ser observadas na Tabela 11.

Tabela 11- Condições presentes na simulação referência.

	Plastisol a avaliar	Geometria da faca	Tempo de armazenamento	Processo de vácuo	Velocidade de processo	Temperatura do plastisol	Volume de plastisol	Dosagem de plastisol aplicado
Referência	Plastisol 1	Faca 2	0 horas	Sim	25 m/min	25 °c	14 cm	250 g/m2

Posto isto, as condições a variar em cada caso de estudo face à simulação referência podem ser observadas na Tabela 12.

Tabela 12- Simulações a efetuar.

Simulação	Caso de estudo	Quantidade a avaliar
1	Velocidade de processo	15 m/min
		Referência
		20 m/min
2	Volume de Plastisol	6 cm
		12 cm
		Referência
3	Geometria da faca	Cabeça 1
		Referência
		Referência
4	Ângulo da faca	Ângulo 1
		Ângulo 2
		Referência
5	Dosagem de Plastisol	120 g/m2
		Referência
		750 g/m2
6	Temperatura do Plastisol	Referência
		30 °c
7	Tempo de armazenamento	Referência
		216 horas
8	Processo de vácuo	Referência
		Não

5. Apresentação e discussão de resultados

De entre todos os estudos efetuados, este capítulo tem como principal objetivo a apresentação e discussão dos resultados práticos obtidos. O capítulo é iniciado com a apresentação dos resultados provenientes da caracterização reológica dos plastissóis de PVC e ainda dos ajustes de modelos reológicos. Com isto, segue-se a apresentação dos resultados do estudo da variação de temperatura no processo de recobrimento.

Por último, são apresentados os resultados obtidos através da simulação numérica para cada um dos parâmetros em estudo.

5.1. Comportamento reológico do plastisol de PVC

Nesta subsecção são apresentados os resultados provenientes da caracterização reológica face a alguns parâmetros estudados. A caracterização reológica dos plastissóis selecionados para o estudo teve como principal objetivo a obtenção de modelos reológicos capazes de caracterizar o comportamento reológico dos mesmos. Contudo, foi ainda definido um objetivo secundário através da caracterização, nomeadamente, o estudo da influência de alguns parâmetros no comportamento reológico dos plastissóis. Os parâmetros estudados são parâmetros reais de processamento existentes no processo industrial da TMG Automotive.

Através da caracterização reológica e dos resultados obtidos pela mesma, de acordo com a literatura estudada, os plastissóis de PVC estudados na empresa são definidos por apresentarem um comportamento reofluidificante (pseudoplástico). Este tipo de fluidos são caracterizados pela diminuição de viscosidade com o aumento da taxa de corte, como observado na Secção 3, sendo ainda possível observar o mesmo comportamento na Figura 94.

Todos os gráficos apresentados resultam da criação de uma curva mestra motivada pela caracterização a baixas taxas de corte (de 0.1 a 100 s⁻¹) através da reometria de pratos paralelos e pela caracterização a taxas de corte intermédias (de 6.65 até 1000 s⁻¹), através da reometria de cilindros concêntricos.

A Figura 94 representa os resultados obtidos pelos ensaios em fluxo dos três plastissóis em estudo à temperatura de 25°C logo após a sua produção (t=0 horas).

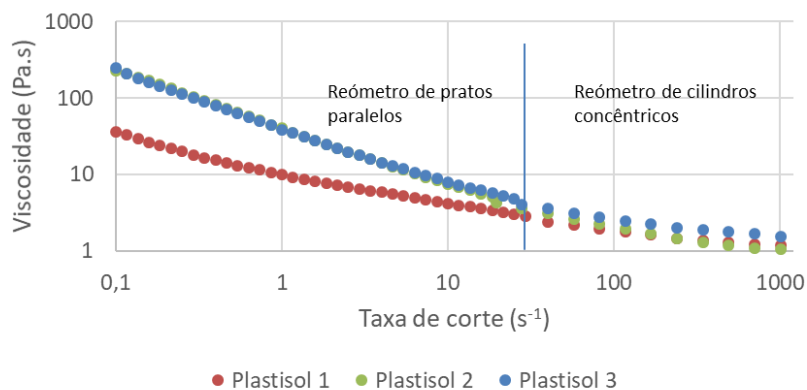


Figura 94- Curva mestra de viscosidade em função da taxa de corte dos três plastissóis em estudo para uma temperatura de 25°C e instante $t=0$ (logo após a produção).

A análise da figura permite observar o comportamento anteriormente mencionado, reofluidificante. A diferença de declives é motivada por alterações de formulações e processos externos.

Através do mesmo equipamento, reômetro de pratos paralelos, foram ainda avaliadas propriedades dinâmicas do material, estas, podem ser analisadas pela Figura 95 representando o módulo elástico e viscoso em função da frequência.

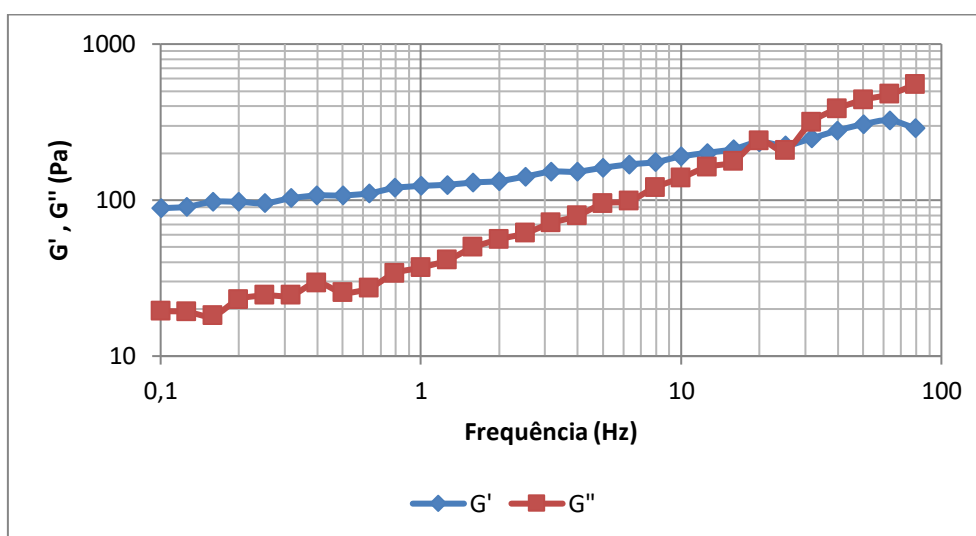


Figura 95- Varrimento de frequências do plastisol 1 para uma temperatura de 25°C e instante de tempo de $t=216$ horas.

Pela análise da figura é perceptível a predominância do comportamento elástico para baixas frequências (entre 0 e 50 Hz) e um comportamento predominantemente viscoso para altas frequências (a partir de 50 Hz aproximadamente). O comportamento predominantemente elástico para baixas frequências foi verificado para todos os plastissóis estudados.

5.1.1. Temperatura

Como foi descrito na secção anterior os valores de temperatura empregues na caracterização reológica correspondem a 25 e a 30°C. Os gráficos apresentados nas Figuras 96-98 ilustram a influência da temperatura nas curvas de viscosidade, para os dois tempos de armazenamento empregues (0 e 216 horas), em função da taxa de corte dos três plastissóis em estudo.

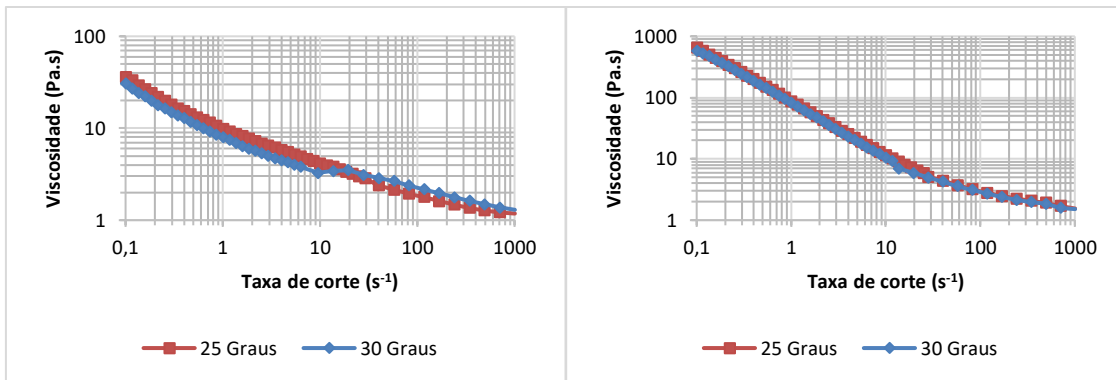


Figura 96- Curva de viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 1.

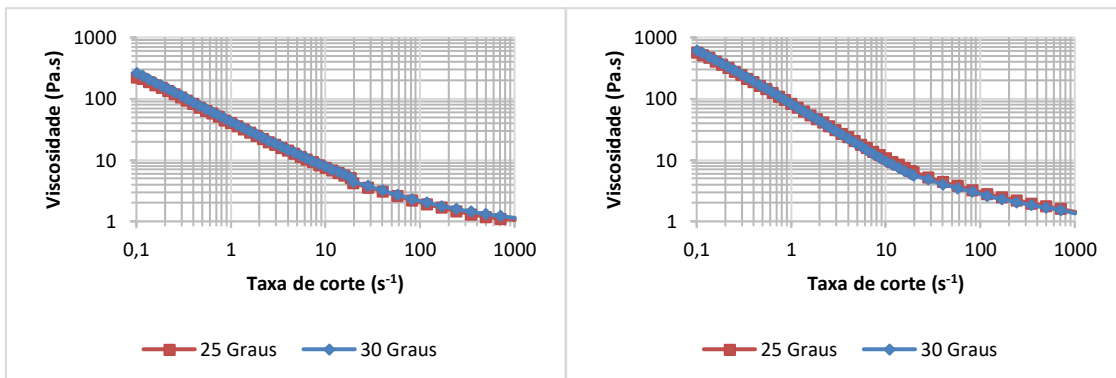


Figura 97- Curva de viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 2.

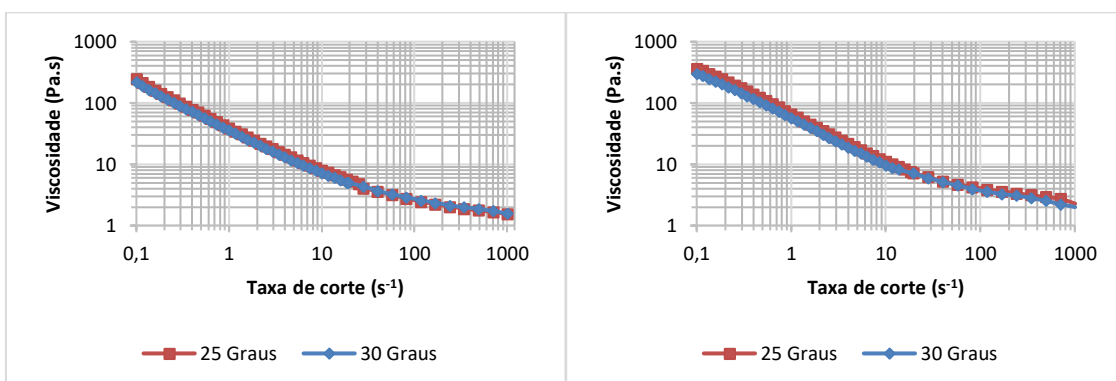


Figura 98- Curva de viscosidade em função da taxa de corte para o plastisol 3.

A partir da análise dos gráficos das Figuras 96-98, verifica-se que a diferença de temperatura analisada não tem um impacto significativo no comportamento reológico

dos diferentes plastissóis, uma vez que as curvas se encontram praticamente sobrepostas em todos os casos.

Como revisto na literatura, quanto maior for a diferença de temperaturas estudadas, maior será a diferença de viscosidade (para o mesmo plastisol). Contudo, para a gama de temperaturas estudadas não se observou uma diferença impactante no comportamento reológico face às duas temperaturas empregues.

No que diz respeito ao tempo de armazenamento, também apresentado na Figura 96, verificou-se que mesmo que os plastissóis se encontrem armazenados durante 216 horas, o seu comportamento reológico não sofre alterações relevantes na gama de temperaturas estudadas, que é representativa do que acontece no processo.

É, então, possível concluir que a gama de temperaturas a que os plastissóis são recobertos não apresenta qualquer influência significativa no seu comportamento reológico.

Na Figura 99 são apresentados os módulos, elástico e viscoso, dos plastissóis determinados a partir dos ensaios dinâmicos realizados (na gama de temperaturas estudada).

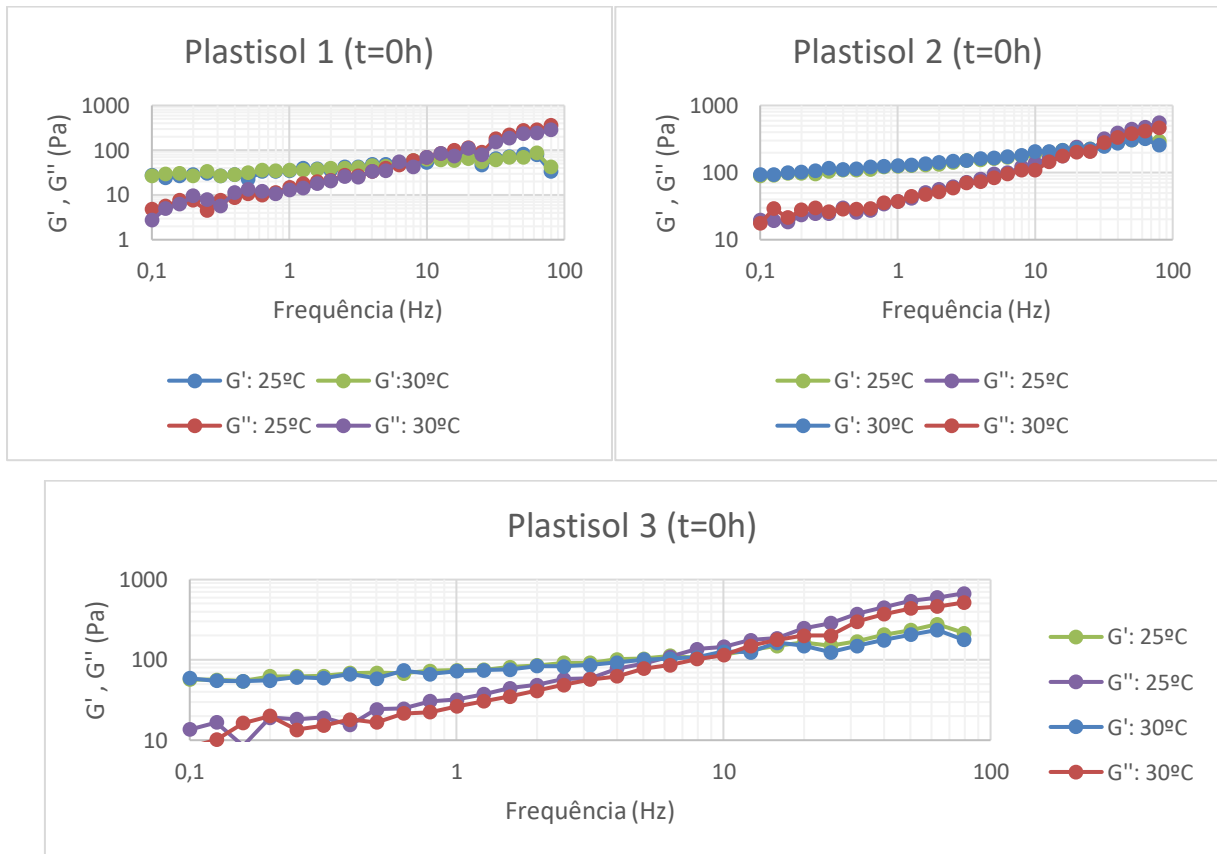


Figura 99-Avaliação do módulo elástico e viscoso face à gama de temperaturas em estudo.

À semelhança do que foi observado nas curvas de fluxo (Figura 96-98), verificou-se que os valores dos módulos, elástico e viscoso, não apresentam diferenças significativas na gama de temperaturas estudadas. As oscilações existentes nas curvas são motivadas pela baixa deformação empregue no varrimento de deformação.

Em suma, após a conclusão da caracterização reológica dos plastissóis é possível concluir que a uma diferença de 5°C na temperatura dos plastissóis não apresenta qualquer impacto no seu comportamento reológico.

Apesar de todos os ensaios terem sido efetuados para as duas temperaturas estudadas (25 e 30°C), dada o reduzido impacto da temperatura nas propriedades na gama estudada, nas subsecções seguintes serão apenas apresentados os resultados provenientes dos ensaios a 25°C, estando os restantes apresentados em anexo.

5.1.2. Processo de vácuo

O processo de vácuo é efetuado em alguns dos plastissóis produzidos na TMG Automotive com o objetivo de remover o ar presente no interior do plastisol, incorporado durante o processo de mistura. A presença de ar pode dar origem a alguns defeitos não desejados no produto final, como retratado na Subsecção 3.1.5.

Na Figura 100, são apresentados dois gráficos relativos às curvas de fluxo dos plastissóis 1 (com vácuo) e 2 (sem vácuo) em função da taxa de corte.

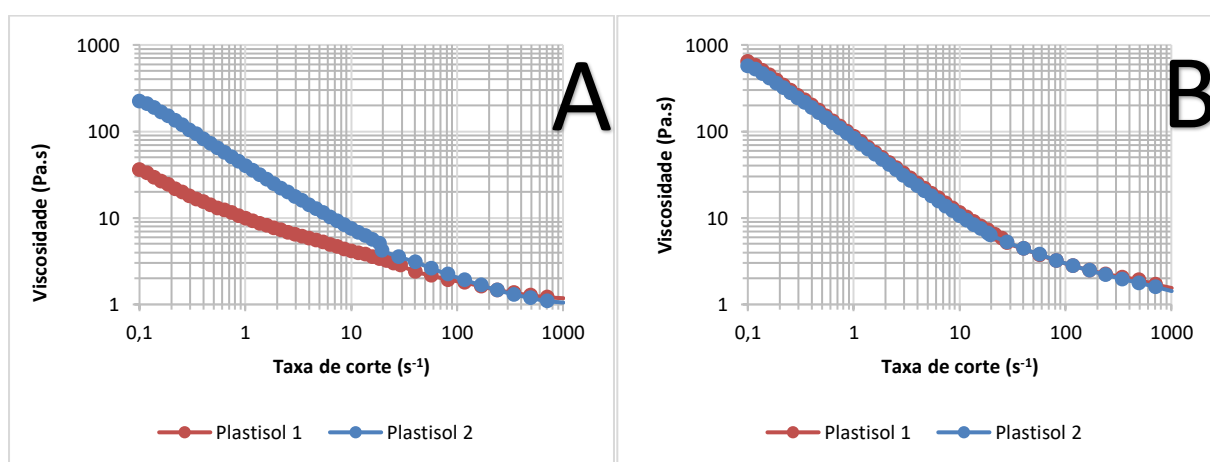


Figura 100- Avaliação da influência do processo de vácuo no comportamento reológico dos plastissóis de PVC para a temperatura de 25°C: A) t=0 horas; B) t=216 horas.

Pela análise dos resultados apresentados na Figura 100 é possível concluir que, imediatamente após a produção dos plastissóis e da aplicação do processo de vácuo, a

curva de fluxo apresenta diferenças significativas para uma gama de taxas de corte mais reduzidas (aproximadamente de 0 a 20 s⁻¹).

Contudo, uma vez que o processo de recobrimento impõe taxas de corte superiores a 1000 s⁻¹, conclui-se que o processo de vácuo poderá não apresentar influência no processamento dos plastissóis, uma vez que para taxas de corte de 1000 s⁻¹ (Figura 100-A) os plastissóis apresentam um comportamento idêntico (quer tenha sido submetido a vácuo ou não). Não obstante, será necessário no futuro um varrimento para taxas de corte mais elevadas de forma a concluir definitivamente qual a influência deste processo no escoamento dos plastissóis.

Como já referido na Subsecção 3.1.5, sendo o ar menos denso que o plastisol, este tende a deslocar-se em direção da superfície do plastisol e a ser removido de forma natural. O ar presente nos plastissóis analisados é removido após 72 horas do seu processamento dependendo da formulação, uma vez que as curvas de viscosidade são praticamente idênticas para tempos iguais ou superiores ao referido, em conformidade com os resultados apresentados na Figura 21 da Subsecção 3.1.5, ou seja, após este tempo de armazenamento o ar presente no plastisol foi expelido de forma natural. Pela análise da Figura 100-B é possível observar o que para um tempo de 216 horas após a sua produção os plastissóis apresentam um comportamento reológico igual, ou seja, ao fim de 216 horas de armazenamento o plastisol que não foi submetido ao vácuo já não tem, na sua constituição, a presença de ar tendo sido expelida de forma natural.

Na Figura 101 encontra-se apresentada a influência do processo de vácuo nos módulos elástico e viscoso dos plastissóis 1 e 2.

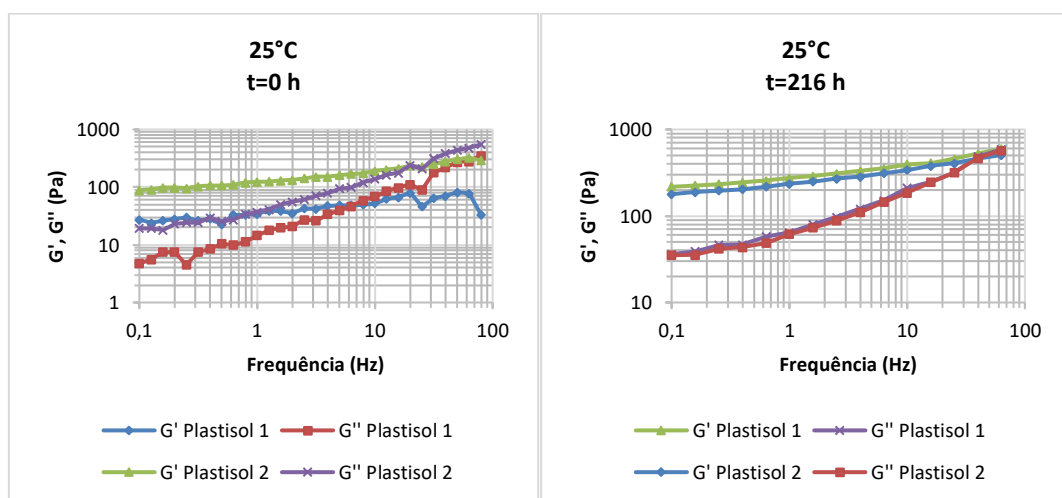


Figura 101- Avaliação do módulo elástico e viscoso face ao processo de vácuo.

Pela observação da figura anterior verifica-se que os efeitos obtidos nos valores dos módulos são idênticos aqueles obtidos para a curva de fluxo.

5.1.3. Tempo de armazenamento

Os gráficos presentes na Figura 102 abaixo, representam as curvas de viscosidade dos três plastissóis estudados para os dois tempos de armazenamento já referidos (a uma temperatura de 25°C). Os resultados relativos à temperatura de 30°C podem ser observados no Anexo B.

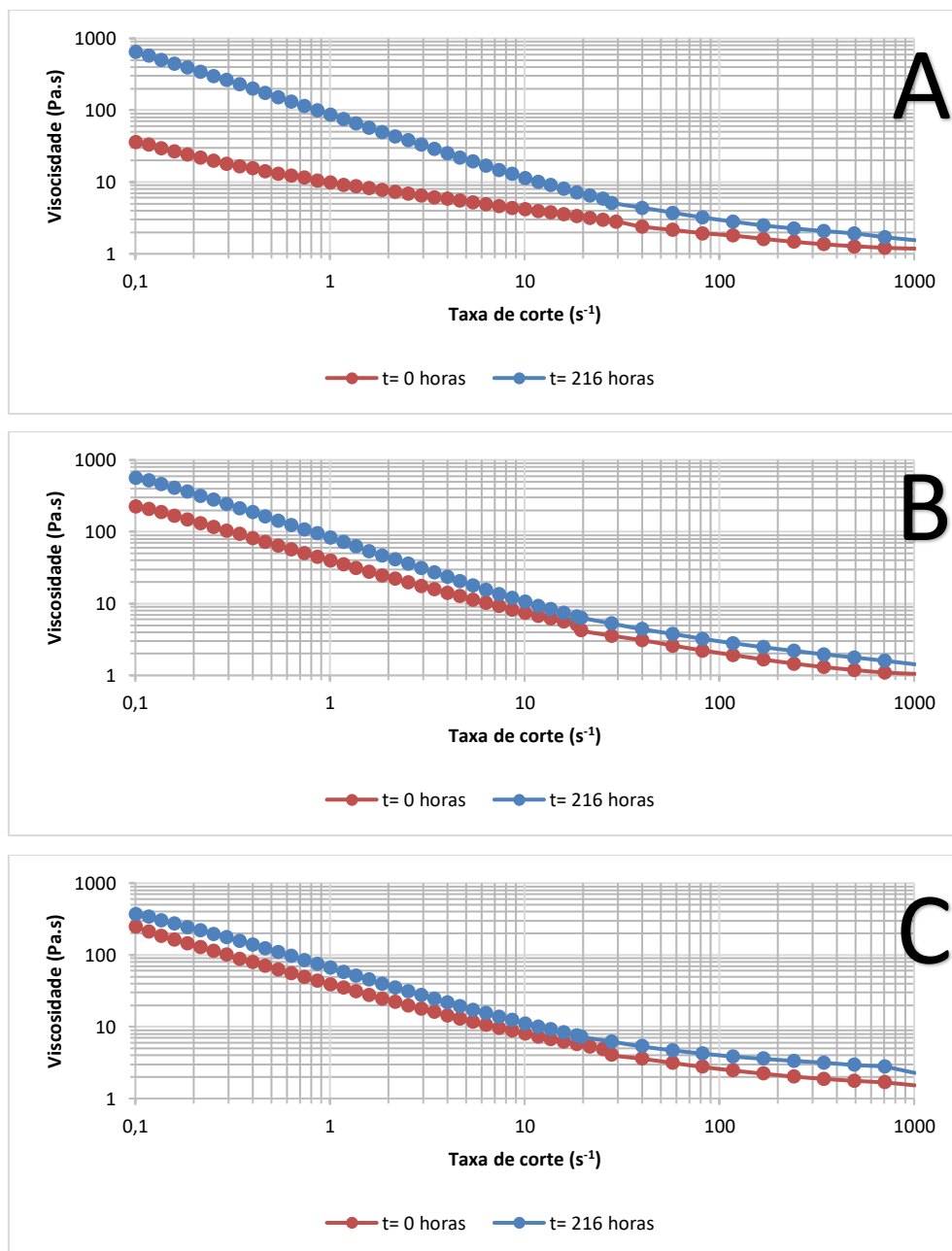


Figura 102- Influência do tempo de armazenamento no plastisol 3: A) Plastisol 1; B) Plastisol 2; C) Plastisol 3.

Pela análise da Figura 102, é possível observar que o plastisol 1 é aquele em que comportamento reológico sofre uma maior alteração. Esta diferença superior, comparativamente aos restantes plastissóis, deve-se ao facto de este ser submetido a um processo de vácuo o que resulta numa diminuição significativa da sua viscosidade logo após a sua produção, como já observado na subsecção anterior.

Não obstante, apesar de os plastissóis 2 e 3 apresentarem uma alteração no seu comportamento reológico esta não é tão acentuada como quando comparado com o plastisol 1.

À medida que o tempo de armazenamento dos plastissóis de PVC aumenta, a sua viscosidade aumenta também motivado pela solvatação parcial das partículas de PVC. O aumento de viscosidade é bastante acentuado para o Plastisol 1 a taxas de corte reduzidas, sendo que para o Plastisol 2 e 3 o aumento de viscosidade permanece semelhante para toda a gama estudada.

Relativamente à relevância deste parâmetro (tempo de armazenamento), pode-se concluir que se trata de um parâmetro bastante relevante e determinante no comportamento dos plastissóis para taxas de corte reduzidas, contudo, relativamente ao comportamento do mesmo à passagem pela faca este poderá não representar um problema pois a diferença de viscosidade para elevadas taxas de corte não é muito elevada.

As Figuras 103-105 representam a avaliação do módulo elástico e viscoso mediante o tempo de armazenamento.

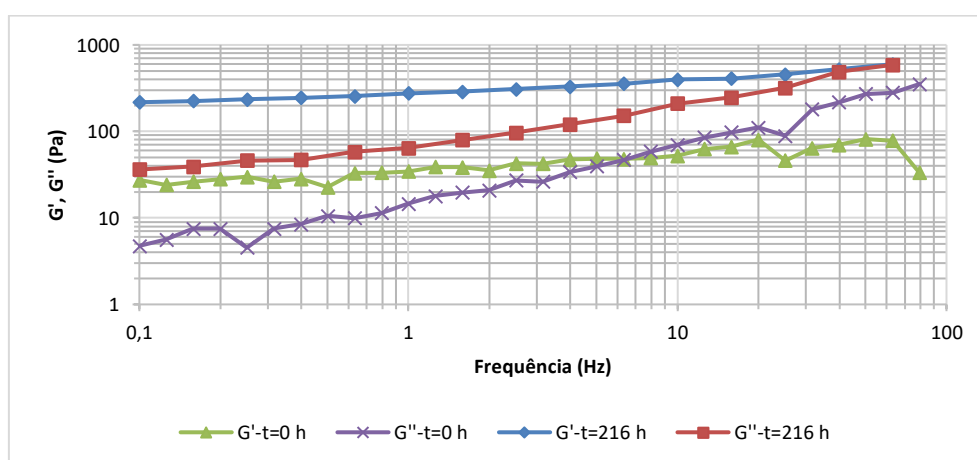


Figura 103- Avaliação dos módulos com influência do tempo de armazenamento, para o plastisol 1 a uma temperatura de 25°C.

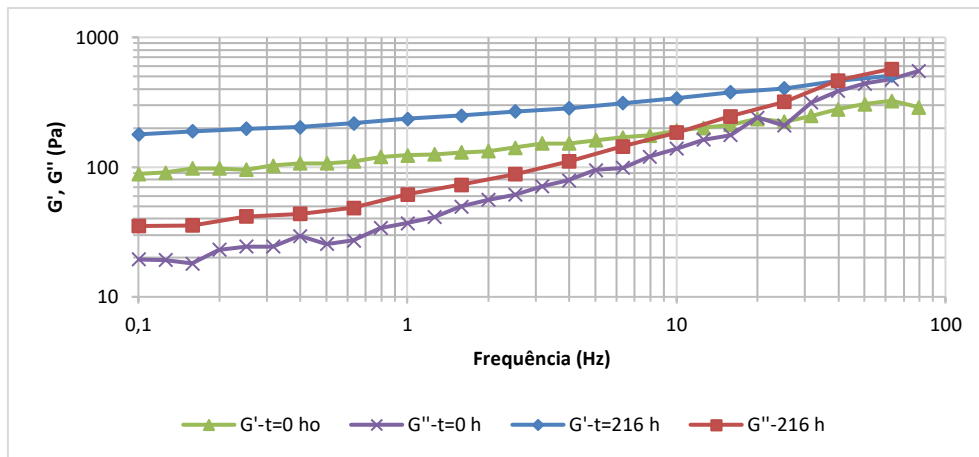


Figura 104- Avaliação dos módulos com influência do tempo de armazenamento, para o plastisol 2 a uma temperatura de 25°C.

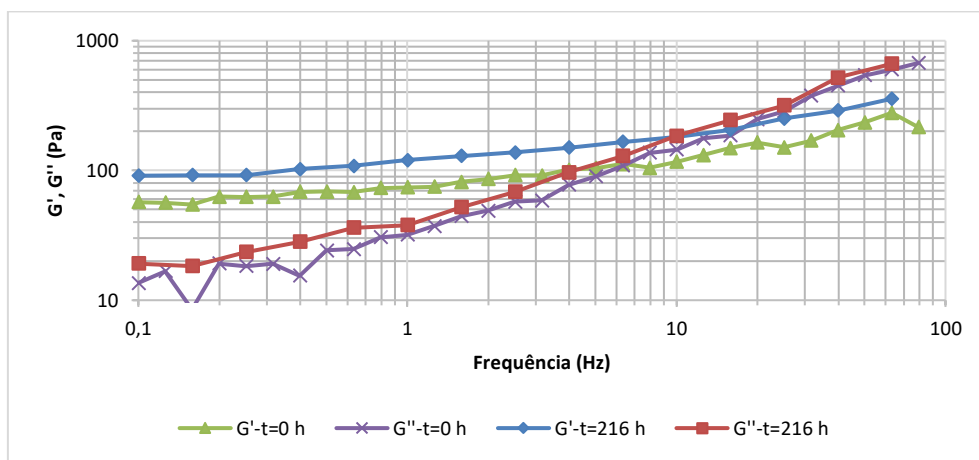


Figura 105- Avaliação dos módulos com influência do tempo de armazenamento, para o plastisol 3 a uma temperatura de 25°C.

Pela análise das Figuras 103-105 é possível observar um aumento dos valores dos módulos, elástico e viscoso, com o aumento do tempo de armazenamento, permanecendo o comportamento elástico predominante para frequências reduzidas. O mesmo pode ser observado para uma temperatura de 30°C apresentados também no Anexo B.

O armazenamento dos plastissóis pode ser prolongado por alterações na ordem de produção dos determinados artigos, levando a um armazenamento mais prolongado do que o planejado. Como é possível observar pelas figuras presentes nesta subsecção, o tempo em que os plastissóis ficam armazenados é bastante importante e determinante para o comportamento reológico dos mesmos.

5.2. Ajuste de modelos reológicos

Os modelos reológicos anteriormente apresentados no Capítulo 4 foram ajustados para os três plastissóis em estudo mediante as condições estudadas, temperatura e tempo de armazenamento.

Neste subcapítulo, serão apenas apresentados todos os modelos reológicos em estudo para o plastisol 2 a 25°C e para um tempo de armazenamento de 0 horas. Para os outros plastissóis e condições de processamento, será apenas apresentado o ajuste do modelo reológico escolhido que melhor se adapta às curvas. Nas Figuras 106-111 está representado o ajuste dos diferentes modelos reológicos para o plastisol 2 (à temperatura de 25° e um tempo de armazenamento de 0 horas).

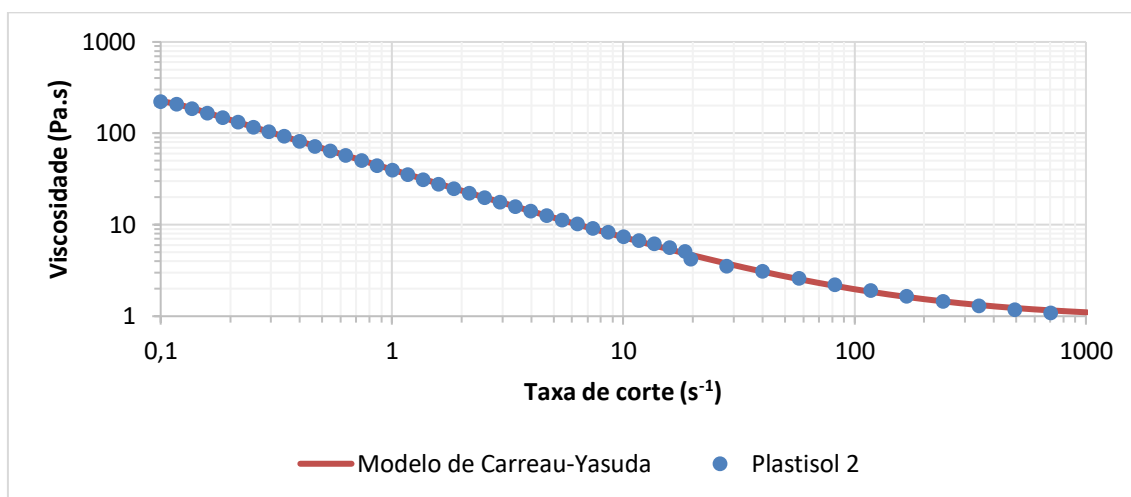


Figura 106- Ajuste do modelo de Carreau-Yasuda.

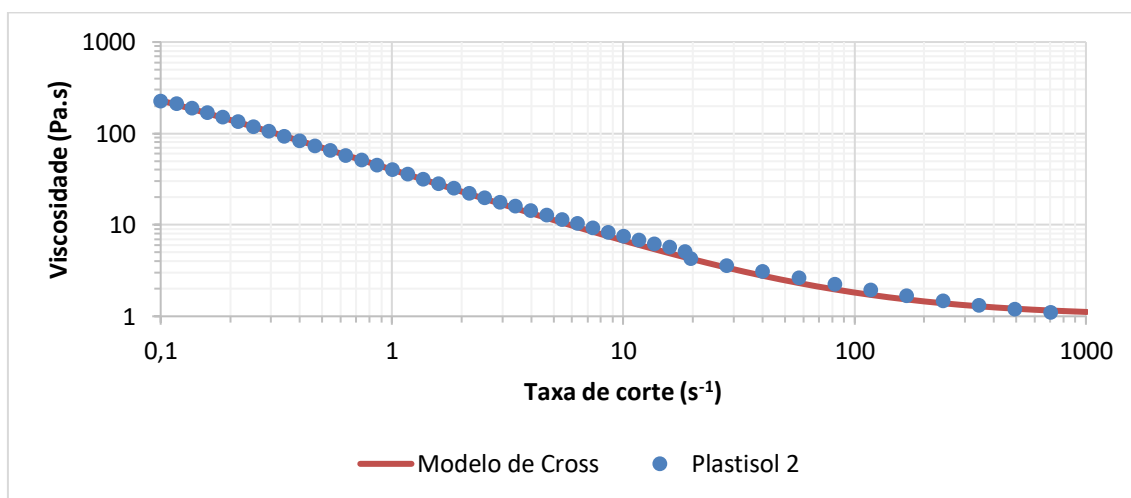


Figura 107- Ajuste do modelo de Cross.

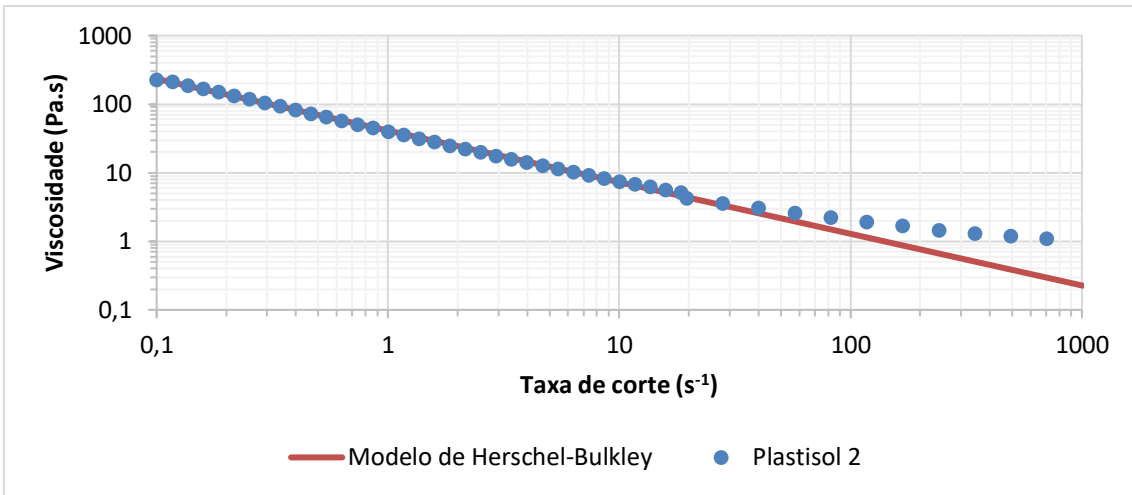


Figura 108- Ajuste do modelo de Herschel-Bulkley.

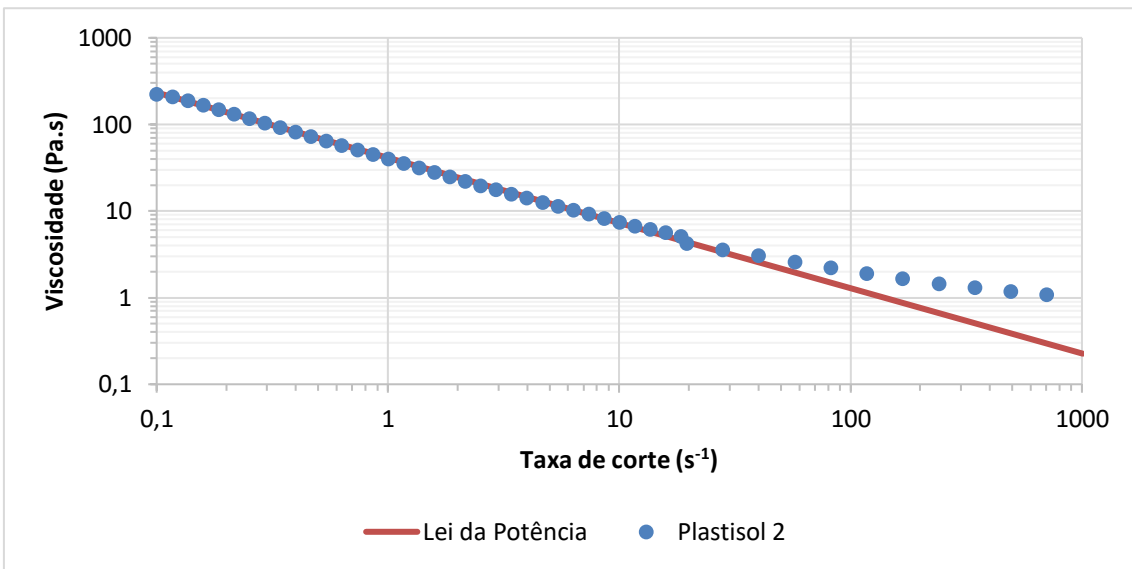


Figura 109- Ajuste do modelo Lei de Potência (Ostwalde-de-wale).

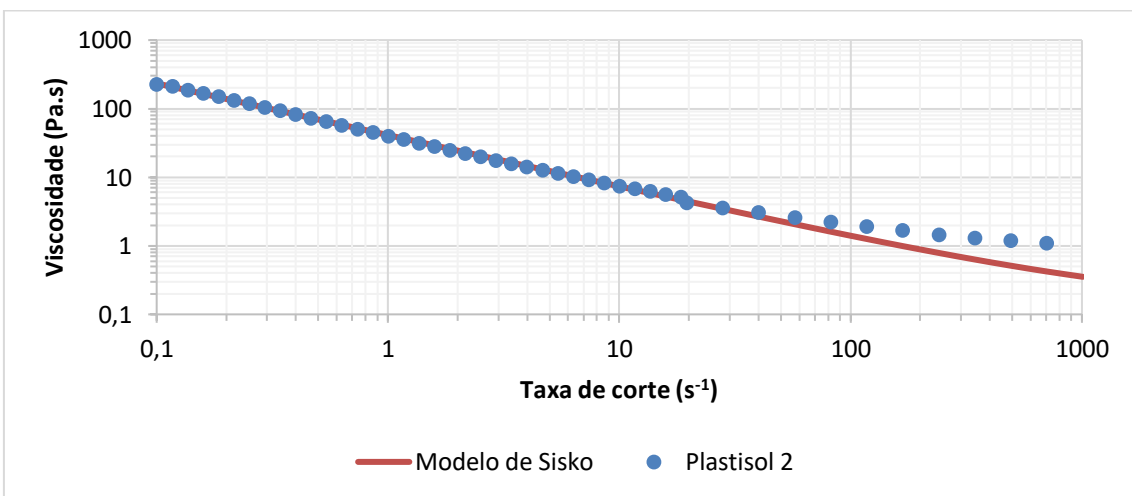


Figura 110- Ajuste do modelo de Sisko.

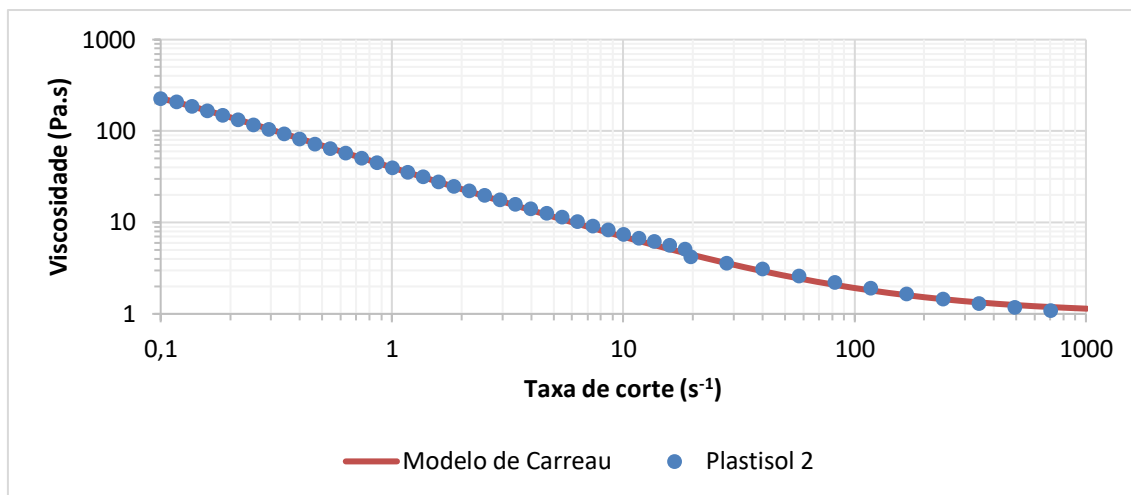


Figura 111- Ajuste do modelo de Carreau para o plastisol 2 a 25°C e um tempo de armazenamento de 0 horas.

Tal como referido, as figuras acima apresentadas representam um exemplo dos modelos ajustados à curva de fluxo. Com o ajuste realizado, o modelo escolhido para representar o fluido em estudo foi escolhido com base no erro quadrático calculado, como referido na subsecção 4.1.5. Este erro pode ser observado na Tabela 13, para cada modelo e plastisol estudado.

Tabela 13- Avaliação do erro quadrático dos modelos estudados.

		RQUAD					
		Modelo de Carreau	Modelo de Carreau-Yasuda	Modelo de Cross	Modelo de Herschel-Bulkley	Lei da Potência	Modelo de sisko
Plastisol 1	t=0 horas, 25 C	0,995	0,997	0,997	1,000	0,991	0,997
	t=0 horas, 30 C	0,996	0,998	0,986	0,999	0,988	0,998
	t=216 horas, 25 C	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	t=216 horas, 30 C	1,000	1,000	1,000	0,998	0,999	0,991
Plastisol 2	t=0 horas, 25 C	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999
	t=0 horas, 30 C	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	t=216 horas, 25 C	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999
	t=216 horas, 30 C	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999
Plastisol 3	t=0 horas, 25 C	0,998	0,999	0,999	1,000	0,999	0,999
	t=0 horas, 30 C	0,995	1,000	0,988	1,000	0,999	1,000
	t=216 horas, 25 C	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999
	t=216 horas, 30 C	1,000	1,000	1,000	0,999	0,999	0,999

Face aos modelos existentes na biblioteca do *software (OpenFOam)*, os modelos que melhor caracterizam o fluido em estudo são o modelo de *Carreau* e de *Cross*. Com isto, após a avaliação visual da curva e do erro quadrático, o modelo escolhido para utilização na simulação computacional foi o modelo de *Carreau*. Na Tabela 14 são apresentados os parâmetros do modelo ajustado para os três plastissóis e diferentes condições testadas.

Tabela 14- Parâmetros ajustados para o modelo de Carreau.

		Modelo de Carreau				
		n	λ	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	RQUAD
Plastisol 1	t=0 horas, 25 C	0,430	44,434	80,000	1,000	0,995
	t=0 horas, 30 C	0,377	52,450	80,000	1,290	0,996
	t=216 horas, 25 C	0,018	12,657	1000,000	1,500	0,999
	t=216 horas, 30 C	0,059	14,338	979,443	1,500	1,000
Plastisol 2	t=0 horas, 25 C	0,186	17,738	406,353	1,000	1,000
	t=0 horas, 30 C	0,106	13,265	400,000	1,300	0,998
	t=216 horas, 25 C	0,541	15,779	2034,555	1,318	1,000
	t=216 horas, 30 C	0,535	16,888	2281,709	1,300	1,000
Plastisol 3	t=0 horas, 25 C	0,155	22,459	500,000	1,600	0,998
	t=0 horas, 30 C	0,108	12,116	300,000	1,600	0,995
	t=216 horas, 25 C	0,174	14,455	582,104	2,300	1,000
	t=216 horas, 30 C	0,204	15,383	487,110	2,000	1,000

Posto isto, os gráficos apresentados nas Figuras 112, 113 e 114 representam o ajuste do modelo de Carreau às curvas obtidas.

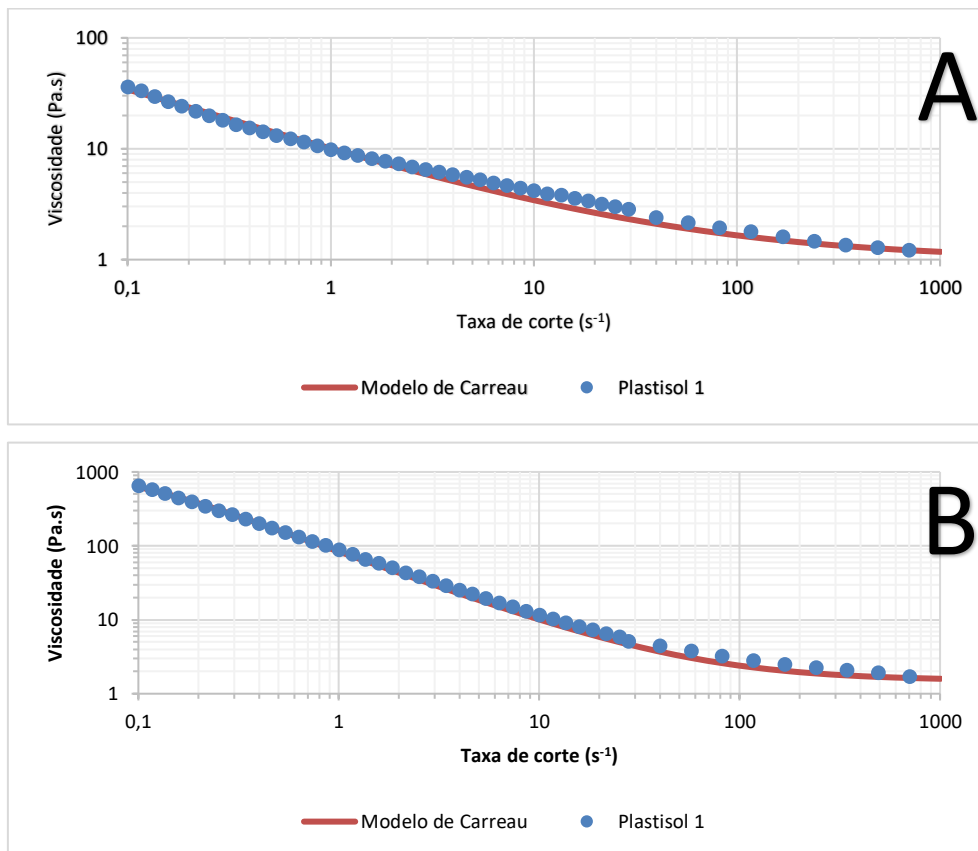


Figura 112- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 1 para a temperatura de 25°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.

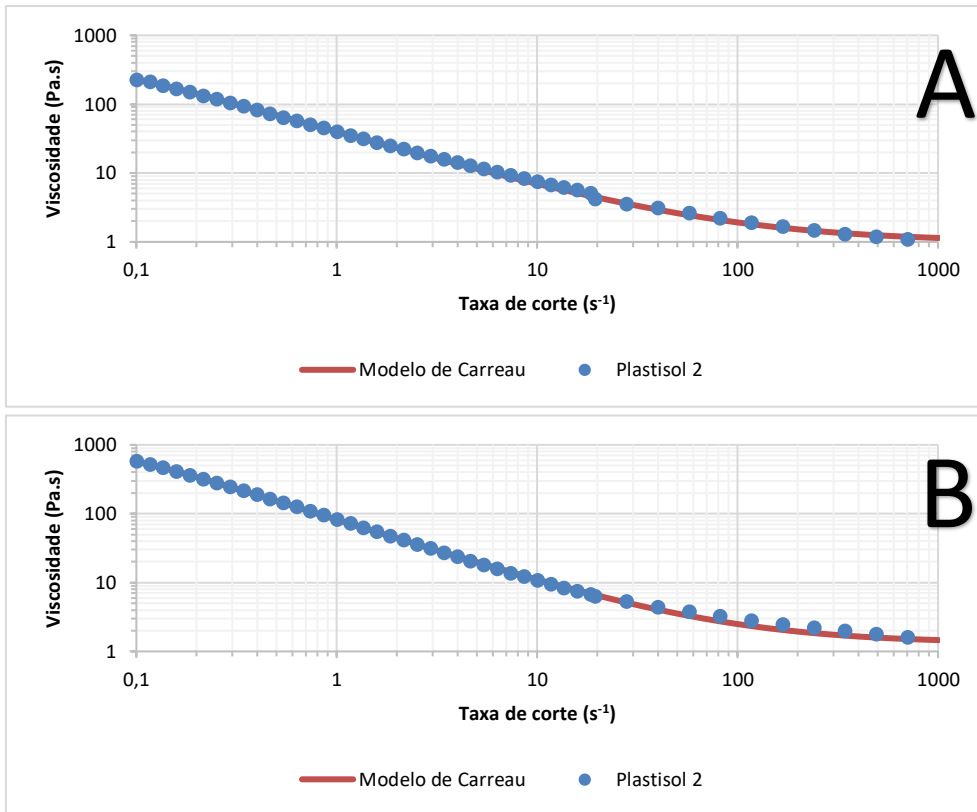


Figura 113- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 2 para a temperatura de 25°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.

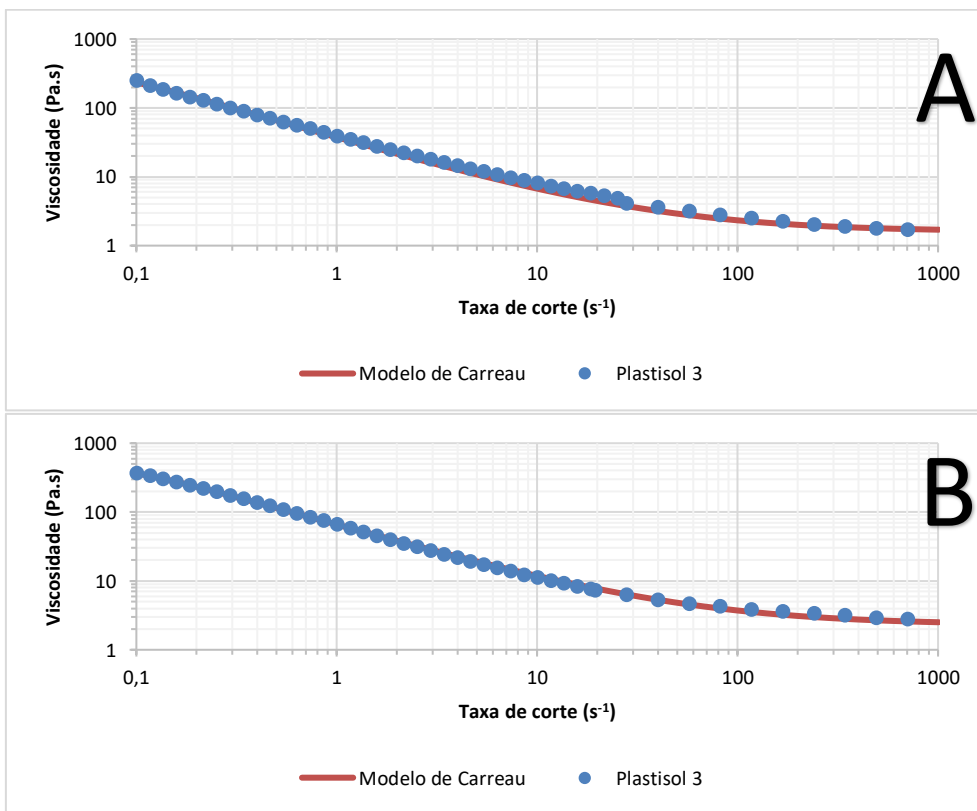


Figura 114- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 3 para a temperatura de 25°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.

Pela observação visual das figuras conclui-se visualmente que o modelo escolhido representa de forma coesa as curvas reológicas obtidas através da caracterização reológica. Para a temperatura de 30°C o ajuste dos modelos pode ser observado nas Figuras 115 a 117.

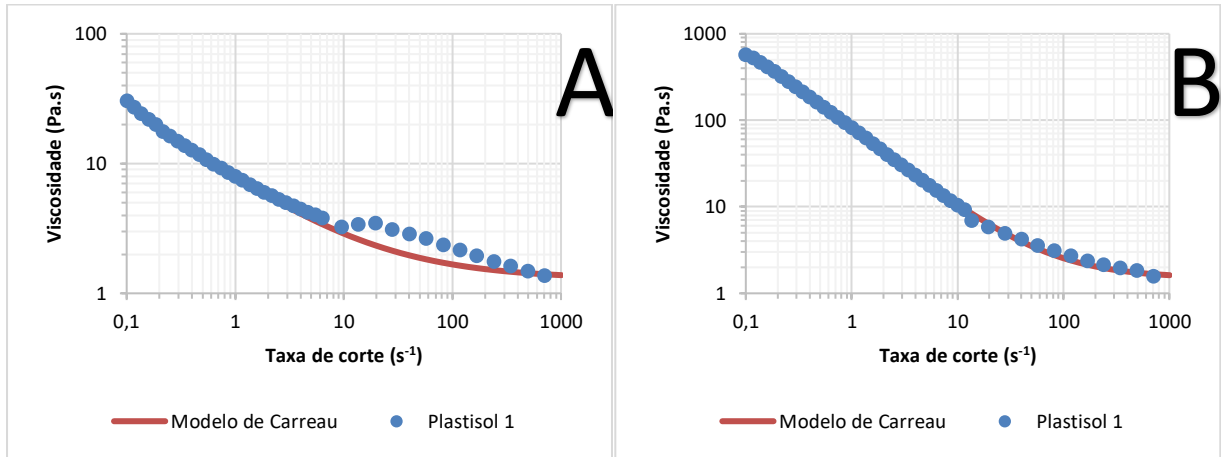


Figura 115- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 1 para a temperatura de 30°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.

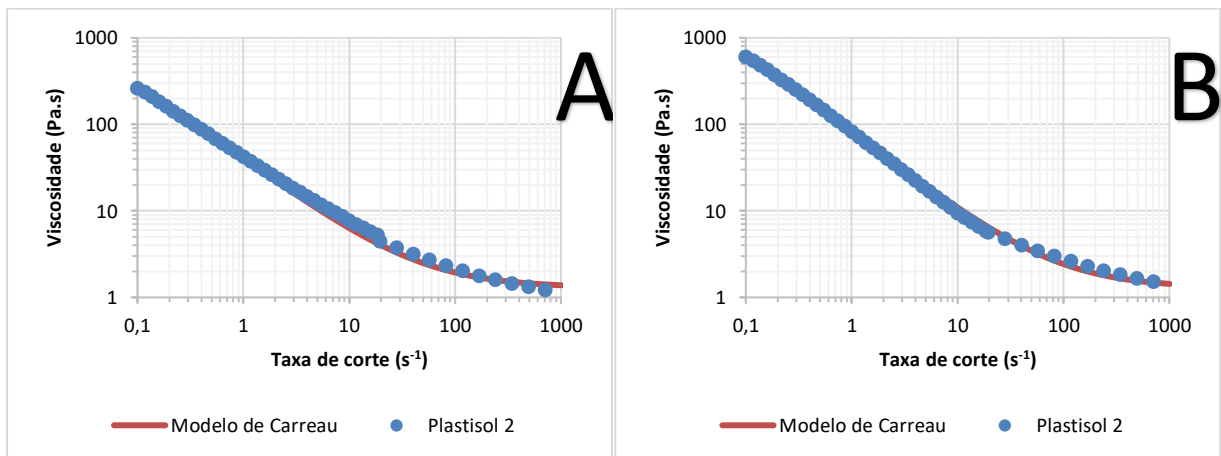


Figura 116- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 2 para a temperatura de 30°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.

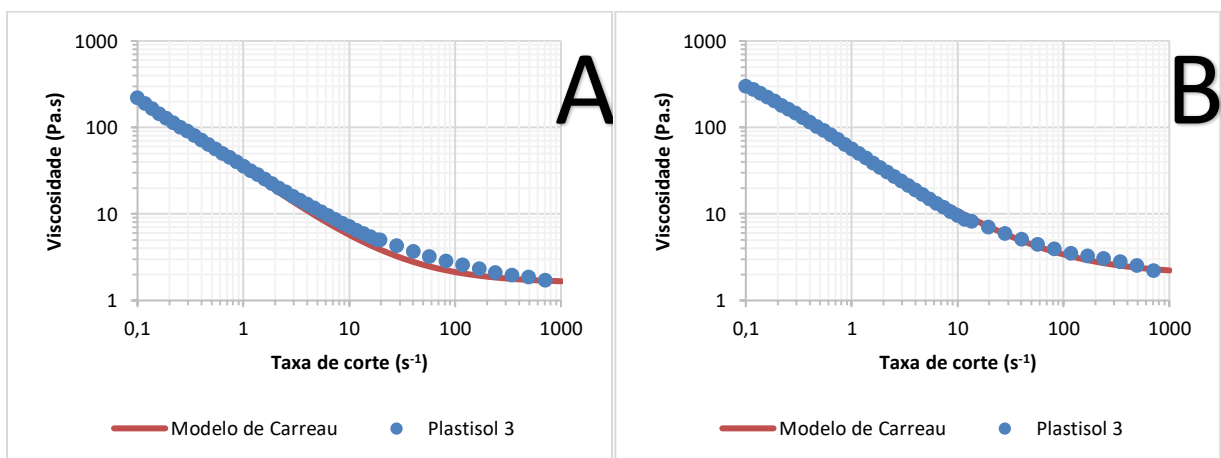


Figura 117- Ajuste do modelo de Carreau no plastisol 3 para a temperatura de 30°C; A) t=0 horas; B) t=216 horas.

Analisando as figuras para a temperatura de 30°C, uma vez que o próprio comportamento reológico dos plastissóis face às duas temperaturas estudadas não se altera, os modelos apresentam-se ser igualmente adequados para 30°C face à temperatura de 25°C. Na Figura 115-A) observa-se uma alteração no declive da curva de fluxo motivada pela ocorrência de um escorregamento durante a sua caracterização reológica.

5.3. *Variação de temperatura no processo de recobrimento*

Como já discutido anteriormente, a temperatura do substrato pode representar uma contribuição relevante para a temperatura do filme formado à saída da faca. Uma vez que o volume de aplicação de pasta é reduzido, o substrato pode provocar uma alteração na temperatura do plastisol. Em primeiro lugar serão apresentados os resultados face à medição de temperaturas à qual o substrato chega à cabeça de aplicação de pasta. Os valores de temperatura do substrato nas 3 cabeças de aplicação podem ser observados na Figura 118 para os pontos anteriormente descritos na Figura 56.

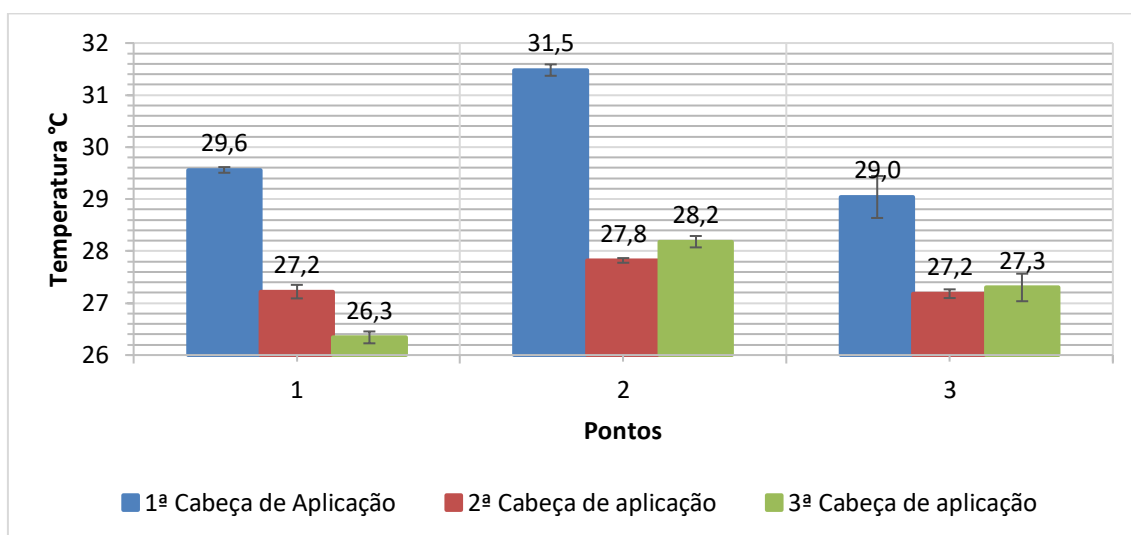


Figura 118- Valores de temperatura com que o substrato chega a cada cabeça de aplicação.

Por observação da Figura 118, é possível prever que diferentes temperaturas de filme serão atingidas nas diferentes cabeças de aplicação, diferença esta provocada pela diferença acentuada de temperaturas do substrato da 1ª cabeça de aplicação (entre 2 a 4°C aproximadamente), quando comparada com a 2ª e 3ª cabeça de aplicação de pasta.

Em primeiro lugar foi efetuada uma análise da 1ª cabeça de aplicação. Nesta estação, o substrato é sujeito a um processo de secagem antes de chegar à cabeça de aplicação. Para o processo de secagem, o substrato passa por uma estufa (com temperaturas compreendidas entre os 60 e 90°, dependendo do tipo de artigo) responsável pela eliminação da humidade. Apesar de este ser ainda sujeito a um arrefecimento posterior à passagem pela estufa, verifica-se que este não é tão eficiente quando comparado com o arrefecimento à saída da 2ª e 3ª estufa, justificando a diferença de temperatura nas três estações.

Considera-se também que a temperatura com que o substrato chega à cabeça de aplicação depende consideravelmente do artigo que se encontra a ser produzido, devido às diferentes temperaturas aplicadas nas estufas.

A Figura 119 representa o perfil de temperaturas estudado para a 1ª cabeça de aplicação, nomeadamente na cuba, caleiro, filme e ainda a temperatura do substrato, nos pontos descritos nas Figuras 53, 54 e 56.

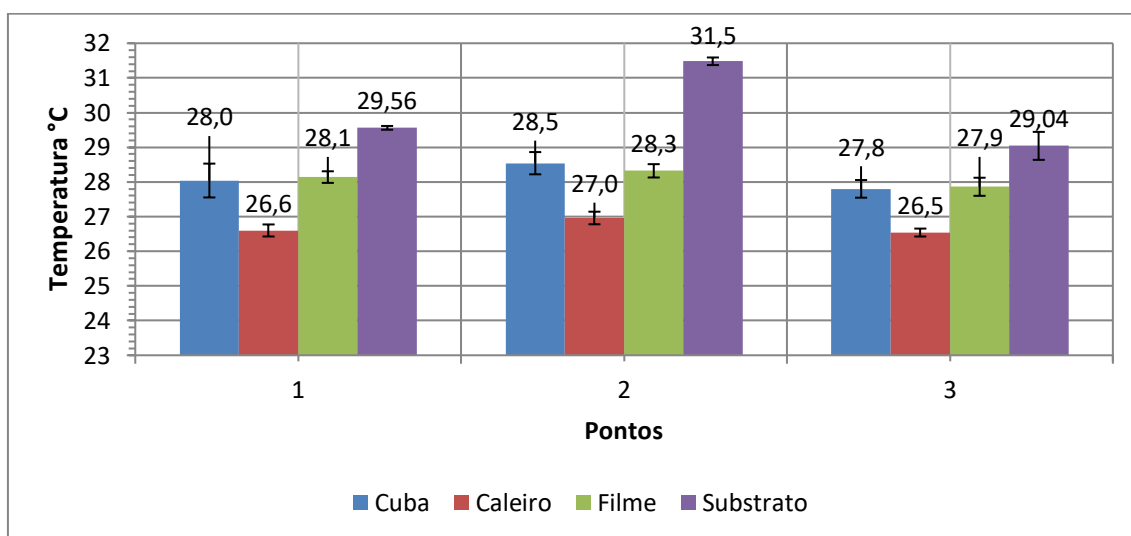


Figura 119- Perfil de Temperaturas na 1ª cabeça de aplicação, avaliando a temperatura desde que o material sai da cuba.

Pela análise da Figura 115, é possível observar uma diminuição de temperatura desde o momento que a pasta se encontra na cuba até ao caleiro. Esta diminuição pode ser explicada pelo arrefecimento repentino da pasta quando entra em contacto com as paredes da bomba, uma vez que estas se encontram a uma temperatura média de 22 °C. Visto que os plastissóis aplicados nesta cabeça apresentam valores de viscosidade mais reduzidos (na ordem dos 5-9 Pa.s) quando comparados com os plastissóis aplicados nas restantes cabeças de aplicação, o aumento de temperatura por dissipação viscosa

poderá possivelmente ser desprezado, acentuando-se o arrefecimento por condução com as paredes da bomba. É ainda observado um aumento de temperatura do plastisol desde que se encontra no caleiro até ser formado o filme. Este fenómeno é justificado pela temperatura mais elevada do substrato à chegada da cabeça de aplicação. Tendo em conta que a quantidade de plastisol aplicada bastante reduzida (na ordem dos 250 g/m²), é perceptível que pode ser facilmente provocado um aumento de temperatura no filme produzido.

A Figura 120 representa o perfil de temperaturas na 2ª cabeça de aplicação para os pontos apresentados nas Figuras 53, 54 e 56.

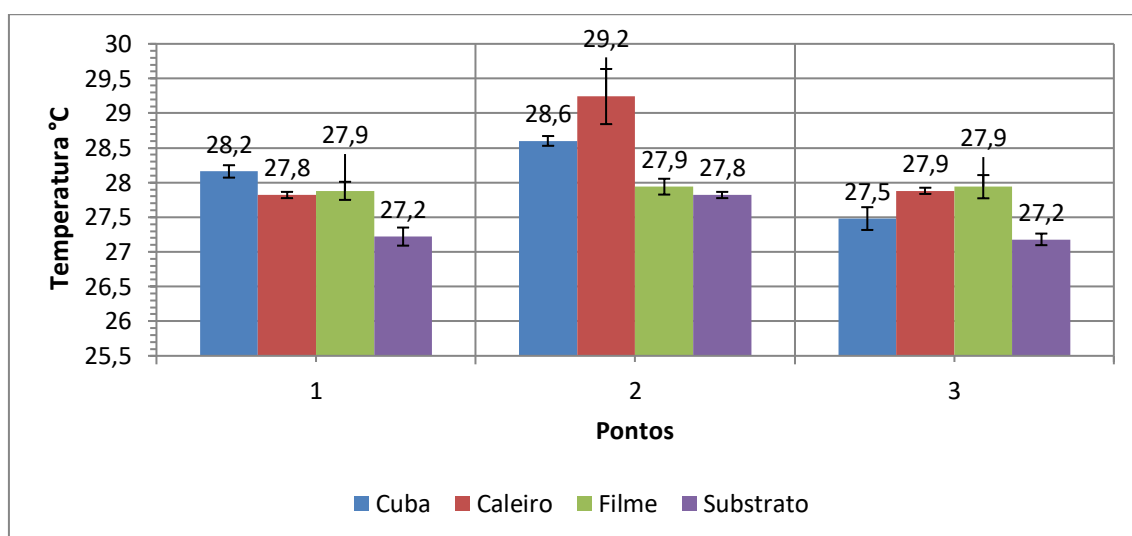


Figura 120- Perfil de Temperaturas na 2ª cabeça de aplicação, avaliando a temperatura desde que o material sai da cuba.

Pela análise do gráfico, é possível observar que a pasta quando é movimentada da cuba para o caleiro, sofre um aumento de temperatura. O aumento de temperatura apesar de ser bastante reduzido é justificado pelo aumento de temperatura por dissipação viscosa, sendo uma pasta com viscosidade na ordem dos 13 Pa.s, fazendo ainda com que o arrefecimento por condução com as paredes da bomba seja desprezado.

Relativamente à temperatura do filme, este encontra-se com os valores mais reduzidos de temperatura quando comparado com a temperatura do plastisol no caleiro. Contrariamente ao que acontece na 1ª cabeça de aplicação, nesta estação o substrato chega à cabeça de aplicação com temperatura mais reduzida, promovendo assim um arrefecimento do plastisol durante a passagem do caleiro para a forma de

filme. Por fim, foram analisados os fenómenos presentes na 3ª cabeça de aplicação. A Figura 121 apresenta o perfil de temperaturas da 3ª cabeça de aplicação para os pontos apresentados nas Figuras 53, 54 e 56.

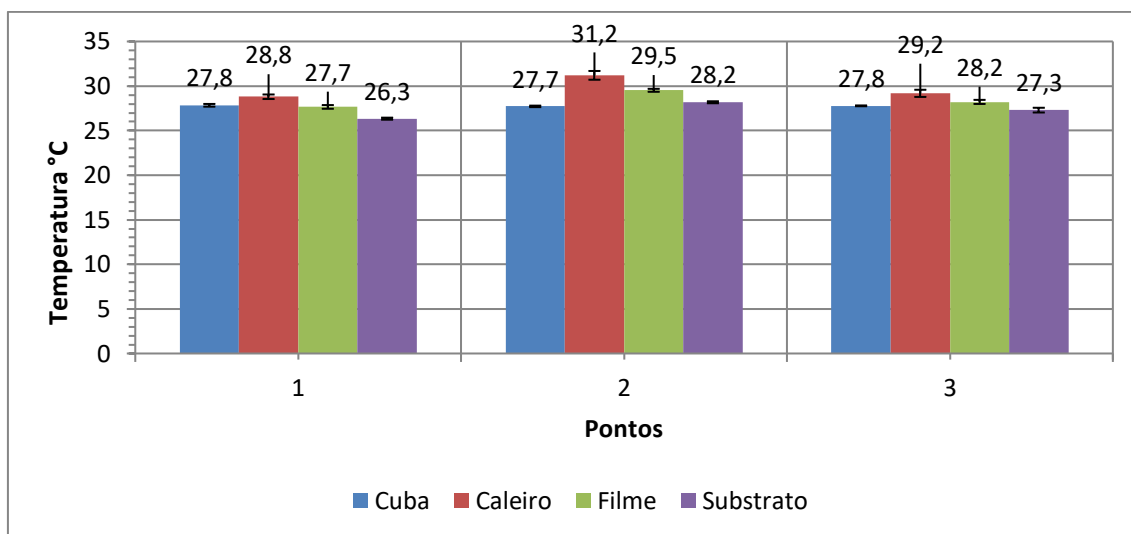


Figura 121- Perfil de Temperaturas na 3ª cabeça de aplicação, avaliando a temperatura desde que o material sai da cuba.

Relativamente à 3ª camada aplicada, é observado o mesmo fenómeno observado na 2ª cabeça de aplicação, ou seja, um aumento de temperatura durante o bombeamento do plastisol para o caleiro. Este fenómeno pode ser igualmente devido à viscosidade elevada do plastisol (de aproximadamente 12 Pa.s) que promove um aumento de temperatura devido ao efeito de dissipação viscosa motivada pela taxa de corte imposta pelo escoamento no interior da conduta (bomba).

A temperatura do substrato vai promover um arrefecimento no filme produzido à semelhança do que acontece na 2ª cabeça de aplicação.

De uma forma geral, é possível concluir que podem ocorrer dois fenómenos distintos durante o bombeamento do plastisol para o caleiro, o aumento de temperatura por provocado por dissipação viscosa e o arrefecimento do fluido quando em contacto com as paredes da bomba, o aumento ou diminuição de temperatura do fluido no caleiro será determinada pela preponderância de um destes fenómenos devido às propriedades reológicas do material.

No caso em estudo, na 1ª cabeça de aplicação o fenómeno de arrefecimento é mais acentuado. Por outro lado, na 2ª e na 3ª cabeça de aplicação o contrário é observado, ou seja, o fenómeno de aquecimento do plastisol por dissipação viscosa é mais acentuado motivado pela elevada viscosidade do plastisol.

Como principal conclusão retirada deste estudo, apesar das diferenças de temperatura existentes no processo de recobrimento serem bastante reduzidas e motivadas por fatores externos, podendo ainda ser motivadas por erros associados ao equipamento de medição, o escoamento do plastisol no processo de recobrimento existente na TMG Automotive trata-se de um escoamento isotérmico, sendo desta forma desprezáveis as diferenças de temperatura à passagem pela faca.

5.4. *Modelação computacional do processo*

Para o estudo um dos processos de fabrico presente na TMG Automotive, como simulação referência serão utilizados o plastisol 1 (para um tempo de armazenamento de 0 horas e 25°C), a faca presente na 2ª cabeça de aplicação, (Figura 122) e a velocidade de 25 m/min.



Figura 122- *Faca da cabeça 2, usada como padrão.*

5.4.1. *Estudo de refinamento da malha*

O estudo do refinamento da malha teve como principal objetivo a determinação da malha ideal a usar nos estudos computacionais. Esta será determinada quando, os resultados do refinamento coincidirem com os resultados provenientes da malha anterior, concluindo-se não ocorrer variação de resultados. As zonas para os quais são apresentados os resultados encontra-se ilustrada na secção 4.1.8 na Figura 68. Abaixo, serão apresentados os resultados através da simulação das quatro geometrias com diferentes graus de refinamento apenas para a zona 2 (Figura 123), as restantes zonas podem ser observadas em anexo (Anexo-C).

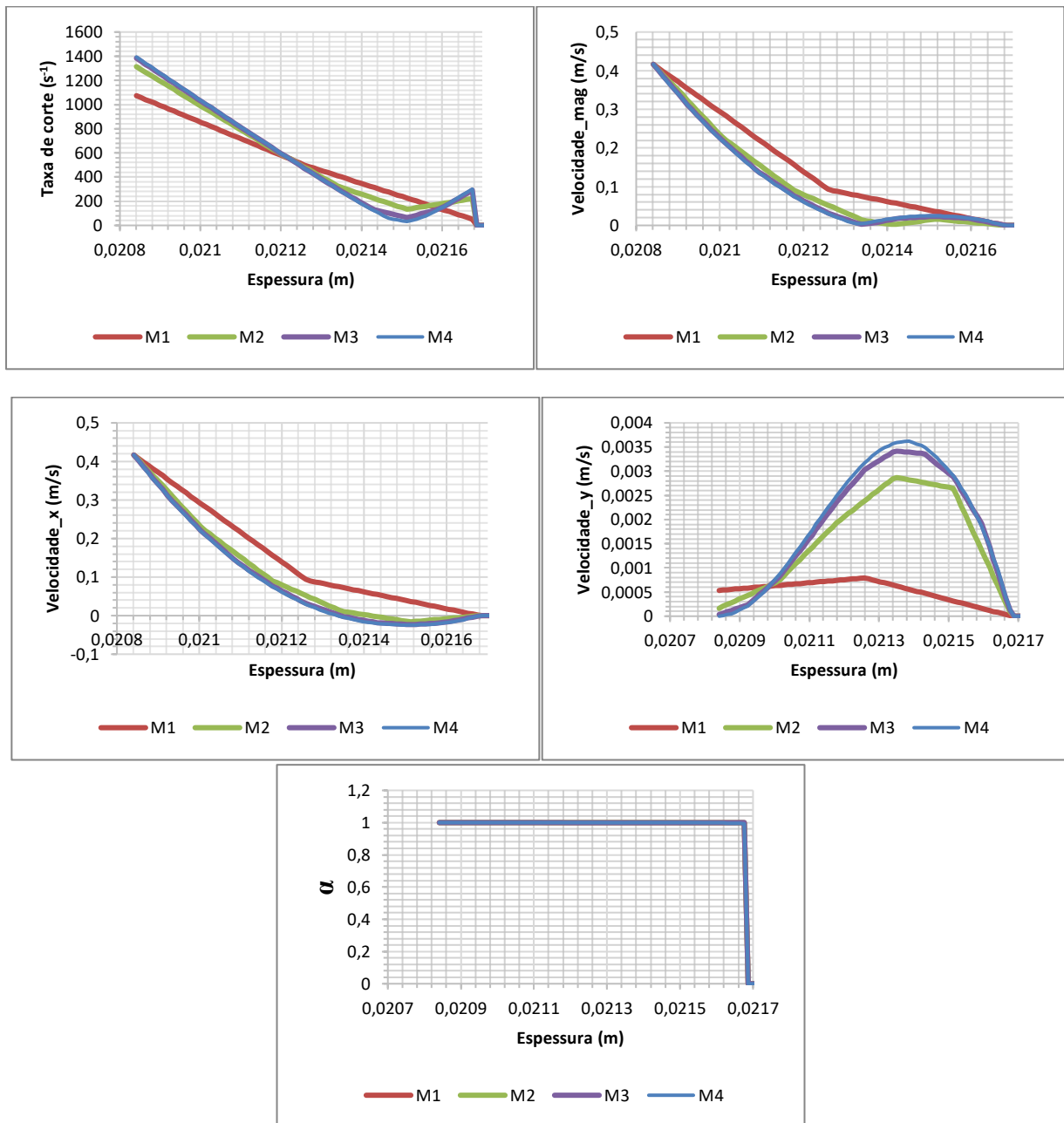


Figura 123- Resultados do refinamento da malha zona 2 para o plastisol 1 a 25°C com tempo de armazenamento de 0 horas.

Pela análise detalhada da Figura 123 é possível observar que os resultados provenientes das diferentes malhas são um pouco diferentes. A Malha 1 é aquela que apresenta resultados mais grosseiros e diferentes das restantes, à medida que o refinamento da malha aumenta, a diferença de resultados provenientes das malhas começa a atenuar-se até que os mesmos coincidem. Observando com detalhe a figura conclui-se que a diferença entre os resultados provenientes das malhas M3 e M4 é

quase nula, ou seja, quer seja utilizada a M3 como a M4 os resultados que se obterão serão praticamente iguais. O que significa que a utilização da M3 para os estudos computacionais é viável devido aos seus resultados coerentes. Após a M3, os resultados provenientes das simulações não são alterados por via de um maior refinamento, posto isto, uma vez que a malha M3 já tem uma precisão adequada e apresenta um tempo de simulação mais reduzido, esta foi a malha escolhida para os estudos. A malha M3 apresenta na sua constituição 44470 células.

5.4.2. Taxa de corte

A taxa de corte é um parâmetro determinante no comportamento reológico do plastisol. A motivação da elaboração desta subsecção reside na necessidade de compreensão do perfil de taxas de corte a que o fluido é sujeito ao longo de toda a faca e, ainda, os principais fatores capazes de provocar uma alteração no valor da taxa de corte máxima a que o fluido é sujeito na zona mais restrita da faca.

Desta forma, numa primeira fase será apresentado o perfil de taxas de corte ao longo da faca e posteriormente todos os fatores capazes de alterar o valor de taxa de corte máxima. A Figura 124 ilustra o perfil de taxa de corte ao longo de toda a faca.

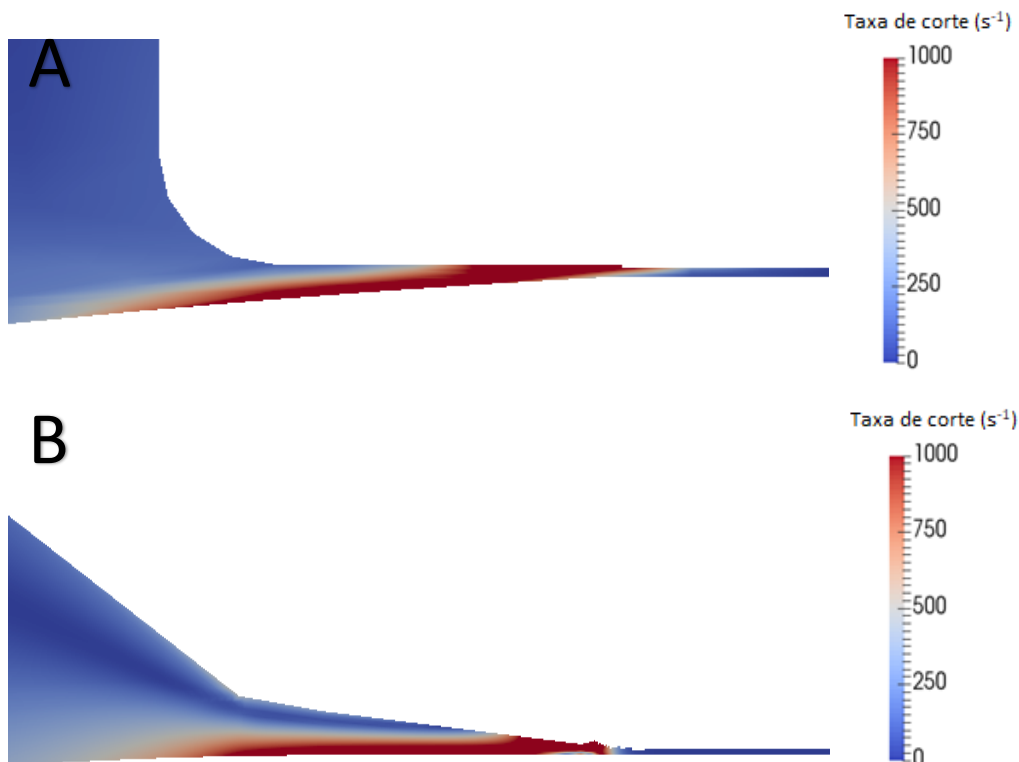


Figura 124- Perfil de taxas de corte nas duas geometrias de faca utilizadas no processamento de plastissóis; A) Faca 1; B) Faca 2.

Como é possível observar na figura anterior, a taxa de corte apresenta um valor crescente desde a entrada da mesma até à zona mais restrita (zona em que o valor de espessura é mais reduzido) devido ao refluxo debaixo da faca.

Através das simulações numéricas efetuadas determinou-se qual dos parâmetros estudados tem impacto significativo no valor de taxa de corte na zona mais restrita da geometria, estando os valores máximos apresentados na Figura 125. Os resultados cujo impacto não é impactante encontram-se ilustrados no Anexo-D.

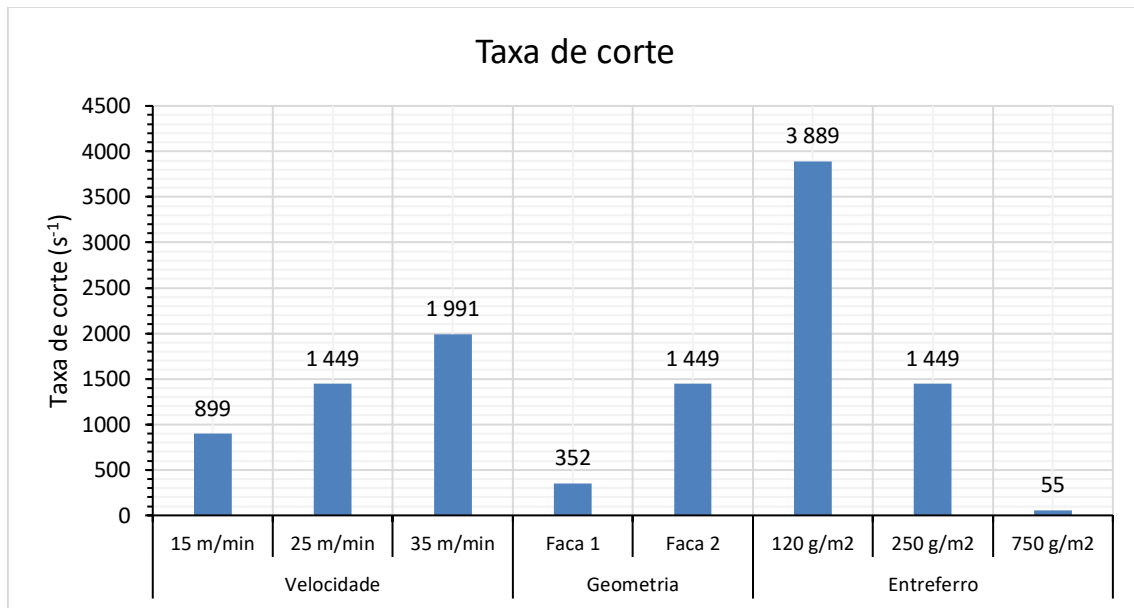


Figura 125- Valor de taxa de corte face aos parâmetros impactantes estudados.

Analisando a Figura 125 é possível observar um aumento da taxa de corte a que o fluido é sujeito com o aumento da velocidade de processamento. Com o aumento da dosagem de plastisol aplicada (valor do entreferro) observa-se ainda uma diminuição do valor da taxa de corte, como esperado. Ainda, a utilização de diferentes geometrias de faca pode ter uma influência impactante no valor de taxa de corte a que o fluido é sujeito. De todos os parâmetros avaliados, o valor do entreferro é aquele cuja sua influência é mais acentuada, aumentando a dosagem aplicada de plastisol de 120 g/m² para 250 g/m², o valor da taxa de corte aumenta 2450 s⁻¹ aproximadamente.

A Tabela 15 apresenta de todos os parâmetros estudados quais os mais impactantes.

Tabela 15- Avaliação da influência dos parâmetros estudados na taxa de corte.

Parâmetro	Influência
Velocidade de processo	Elevada
Altura de plastisol	Sem influência
Geometria da faca	Elevada
Ângulo da faca	Sem influência
Dosagem de plastisol	Elevada
Temperatura do plastisol	Sem influência
Tempo de armazenamento	Sem influência
Processo de vácuo	Sem influência

5.4.3. Recirculações

Concluído o estudo relativo ao impacto dos diferentes parâmetros de processamento no perfil de taxas de corte, foi avaliado o perfil de recirculações e a intensidade dos mesmos em função dos mesmos parâmetros. Este estudo foi motivado pela desconfiança da recirculação poder estar associada à ocorrência de alguns defeitos no filme produzido. Os fatores cujo impacto é significativo encontram-se representados abaixo.

i) Velocidade linear de processamento

Na Figura 126 encontra-se ilustrado o perfil de recirculações avaliado face à alteração da velocidade linear de processamento, mantendo constantes todas as variáveis apenas alterando a velocidade de linear de processamento.

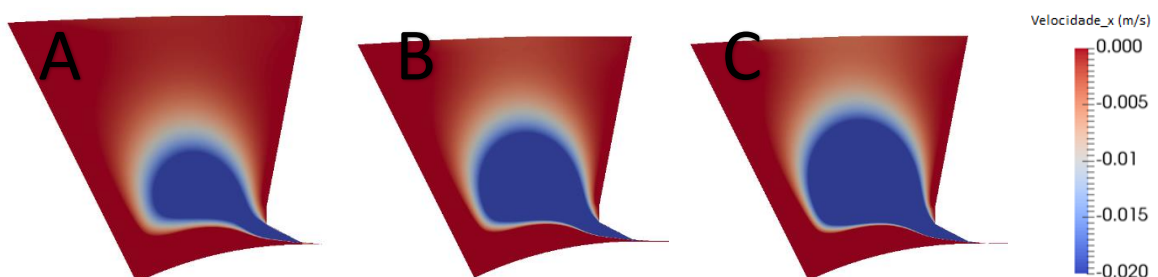


Figura 126- Influência da velocidade de processo no perfil de recirculações de fluido: A) 15 m/min; B) 25 m/min; C) 35 m/min.

Pela análise da figura anterior observa-se uma relação da dimensão do perfil de recirculação com o aumento de velocidade linear de processamento. Como implicação direta do aumento da velocidade linear de processamento, verifica-se um aumento da dimensão da recirculação. As linhas de fluxo podem ser observadas na Figura 127.

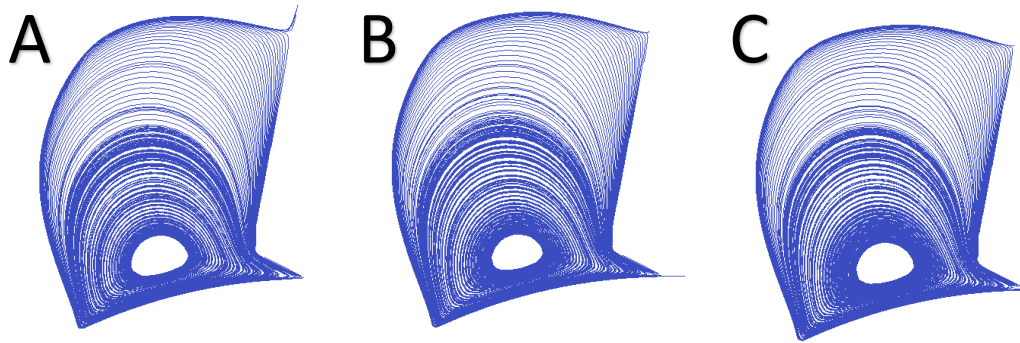


Figura 127- Linhas de fluxo para as velocidades estudadas: A) 15 m/min; B) 25 m/min; C) 35 m/min.

Observando a figura anterior, através das linhas de fluxo conclui-se que a velocidade de processamento não altera o perfil de recirculação, apenas a dimensão do mesmo (Figura 127).

ii) Altura de plastisol no caleiro

A Figura 128 apresenta a influência de diferentes alturas de plastisol no caleiro, influenciando o volume de plastisol no caleiro, na formação de recirculações e na direção do fluido dentro dos vórtices formados.

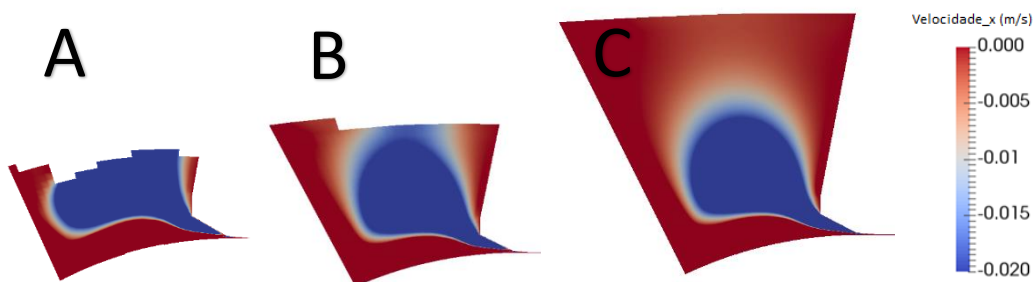


Figura 128- Influência da altura de plastisol presente no caleiro no perfil de recirculações de fluido: A) 6 cm; B) 12 cm; C) 14 cm.

Pela análise da figura anterior, o impacto do volume de plastisol presente no caleiro é moderado, isto é, o seu impacto reflete-se na dimensão da recirculação formada proveniente da diminuição de fluido presente no caleiro. A Figura 129

apresenta as linhas de fluxo para as quantidades de plastisol presentes no caleiro acima apresentadas.

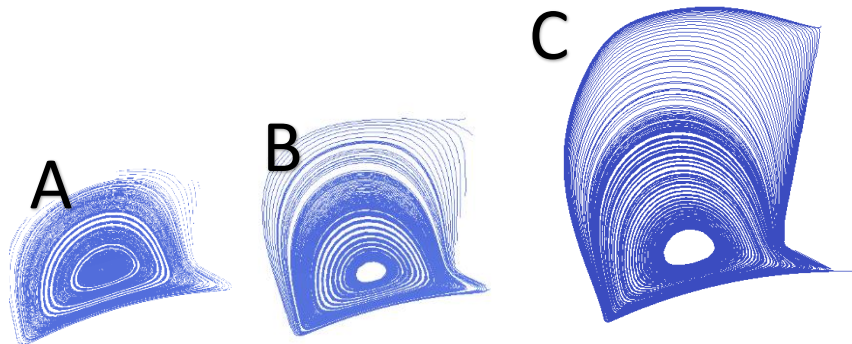


Figura 129- Linhas de fluxo para diferentes alturas de plastisol no caleiro: A) 6 cm; B) 12 cm; C) 14 cm.

Analisando a Figura 129, a dimensão da recirculação é diminuída face à diminuição de volume de plastisol presente no caleiro sendo o seu perfil mais oval. No entanto, a recirculação de fluido encontra-se na mesma presente no caleiro independentemente do volume de plastisol.

iii) Geometria de faca

Na Figura 130 são apresentados os resultados relativos ao perfil de recirculações existentes no caleiro provenientes da avaliação para duas geometrias de faca diferentes para as mesmas condições de processamento.

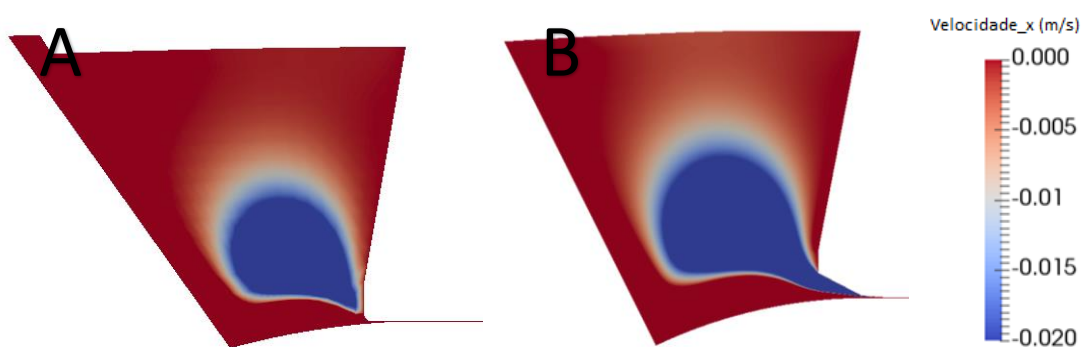


Figura 130- Influência da geometria da faca no perfil de recirculações de fluido: A) Faca 1; B) Faca 2.

Analisando a figura anterior, verifica-se que o perfil de recirculações é afetado pela geometria da faca. A Faca 2 apresenta um perfil de recirculações com dimensão mais elevada. A grande diferença existente nas duas geometrias reflete-se no ponto de

estagnação do fluido, estando este para a Faca 2 situado mesmo debaixo da faca, tendo início a recirculação no mesmo local como é possível observar pela Figura 131.

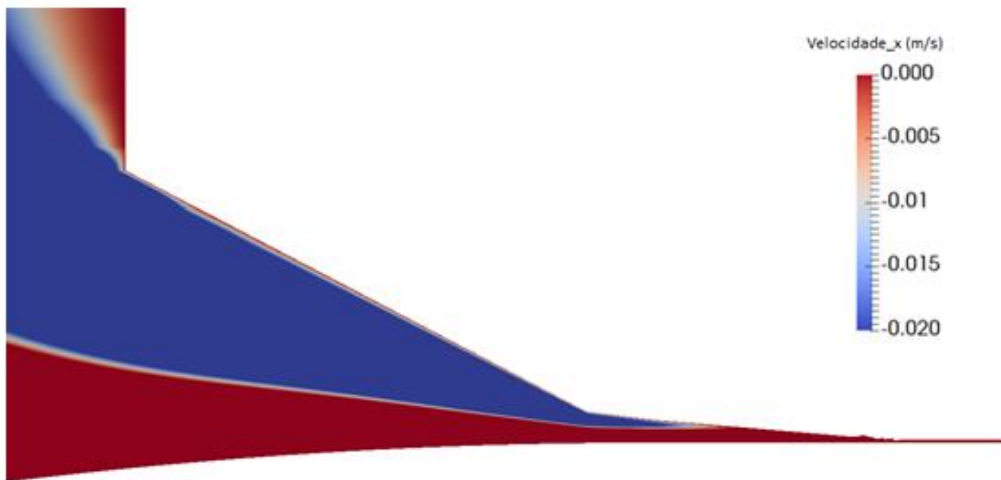


Figura 131- Perfil de recirculações na zona mais restrita da Faca 2.

O perfil de recirculação debaixo da faca pode ser observado pela análise de três zonas da faca (Figura 132). Em cada uma das zonas foi avaliada a velocidade em ordem a x em toda a altura da faca.

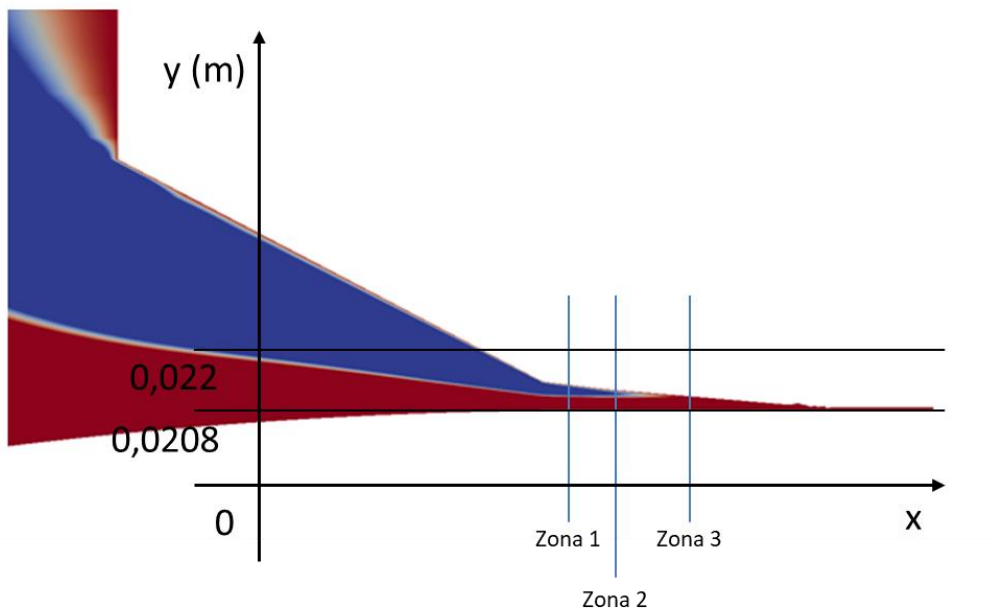


Figura 132- Zonas de avaliação do perfil de velocidade para a Faca 2.

O perfil de velocidade para as zonas acima indicadas pode ser observado no gráfico presente na Figura 133.

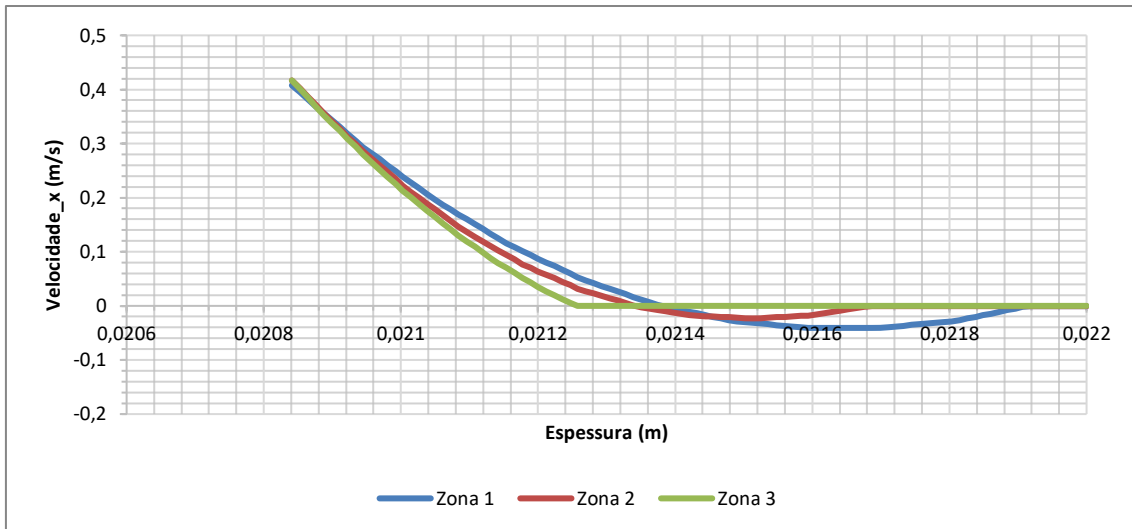


Figura 133- Perfil de velocidades para 3 zonas ao longo da faca.

Como é possível observar no gráfico da figura anterior, nas zonas 1 e 2, a componente da velocidade segundo x apresenta valores negativos, indicando com isto que a partir daquela localização em ordem a y, em específico, o plastisol desloca-se no sentido contrário ao do escoamento.

Relativamente às linhas de fluxo, estas podem ser observadas na Figura 134.

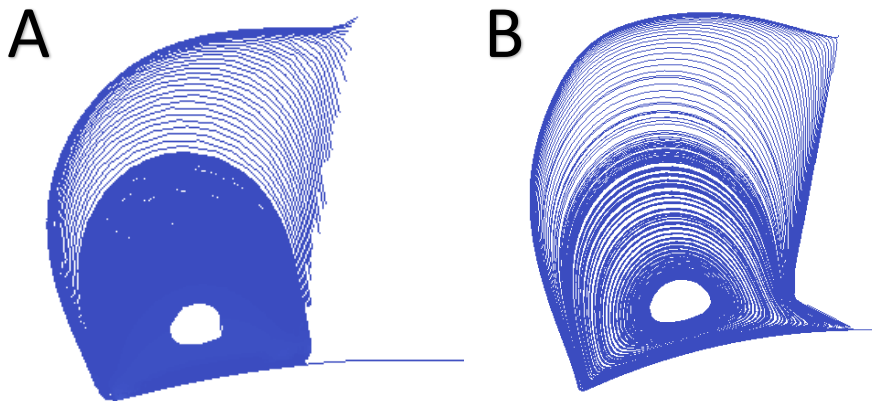


Figura 134- Linhas de fluxo: A) Faca 1; B) Faca 2.

Uma vez que a dimensão da recirculação existente na Faca 1 é mais reduzida, conclui-se que este é ainda mais intenso.

iv) Ângulo de faca

A Figura 135 ilustra os resultados provenientes dos três ângulos de faca avaliados, refletindo a influência da mesma na formação de recirculações.

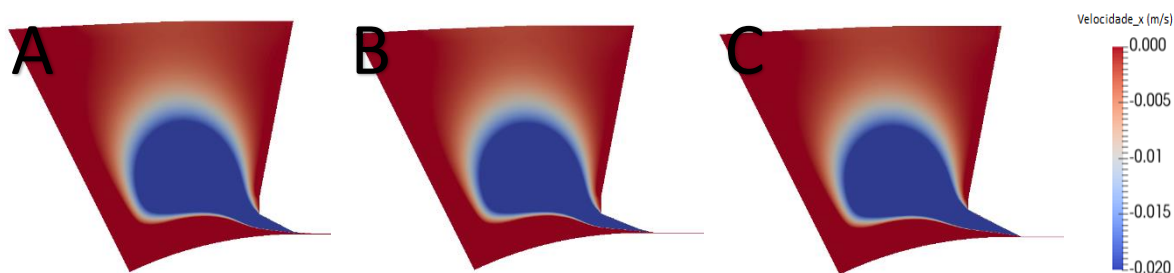


Figura 135- Influência do ângulo da faca no perfil de recirculações de fluido: A) Padrão; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.

Analisando a figura anterior, verifica-se que a alteração deste parâmetro (ângulo da faca) não apresenta qualquer influência na dimensão do perfil de recirculações existentes no caleiro nem na sua intensidade. No entanto, com o aumento do ângulo de faca observa-se uma deslocação da posição do ponto de estagnação movendo-se em direção à saída da faca, Figura 136.

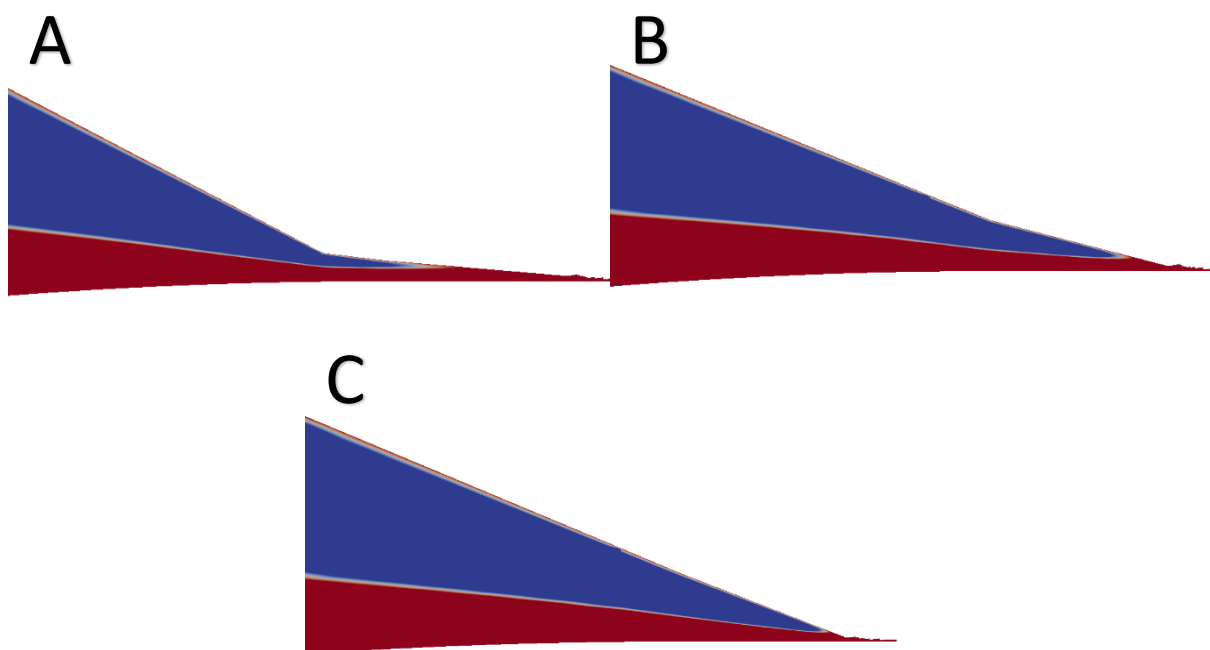


Figura 136- Ponto de estagnação face aos 3 ângulos de faca estudados: A) Referência; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.

O ponto de estagnação pode ainda ser observado com mais clareza através das linhas de fluxo apresentadas na Figura 137.

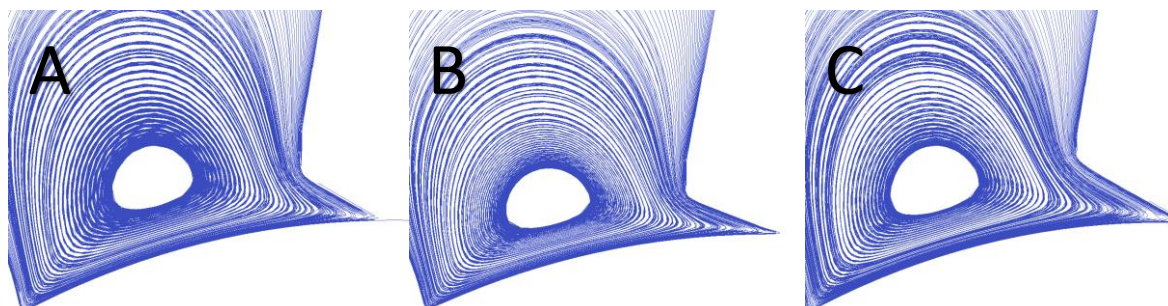


Figura 137- Linhas de fluxo para diferentes ângulos de faca: A) Referência; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.

Em suma, e como já foi referido, o ângulo da faca apresenta apenas impacto na posição do ponto de estagnação, não apresentando qualquer influência na recirculação do fluido.

v) Diferentes dosagens de plastisol aplicado

A aplicação de diferentes dosagens de plastisol, dependendo da formulação, resulta numa alteração de valores de entreferro (distância da faca ao substrato). A Figura 138 representa as recirculações formadas em função da dosagem de plastisol.

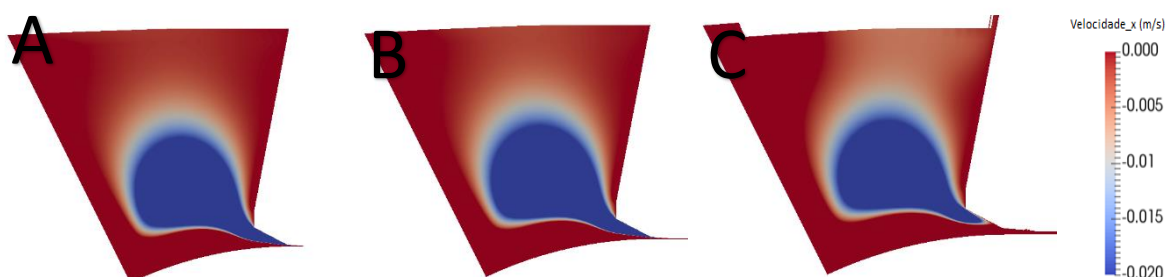


Figura 138- Influência do valor da dosagem aplicada no perfil de recirculações: A) 120 g/m²; B) 250 g/m²; C) 750 g/m².

Com o aumento do valor do entreferro, observa-se um ligeiro aumento da dimensão da recirculação. Pela análise da Figura 138 observa-se uma alteração do comportamento debaixo da faca, ocorrendo uma deslocação do ponto de estagnação para a esquerda (entrada da faca) com o aumento da dosagem de plastisol aplicada. A Figura 139 apresenta o perfil de recirculações debaixo da faca.

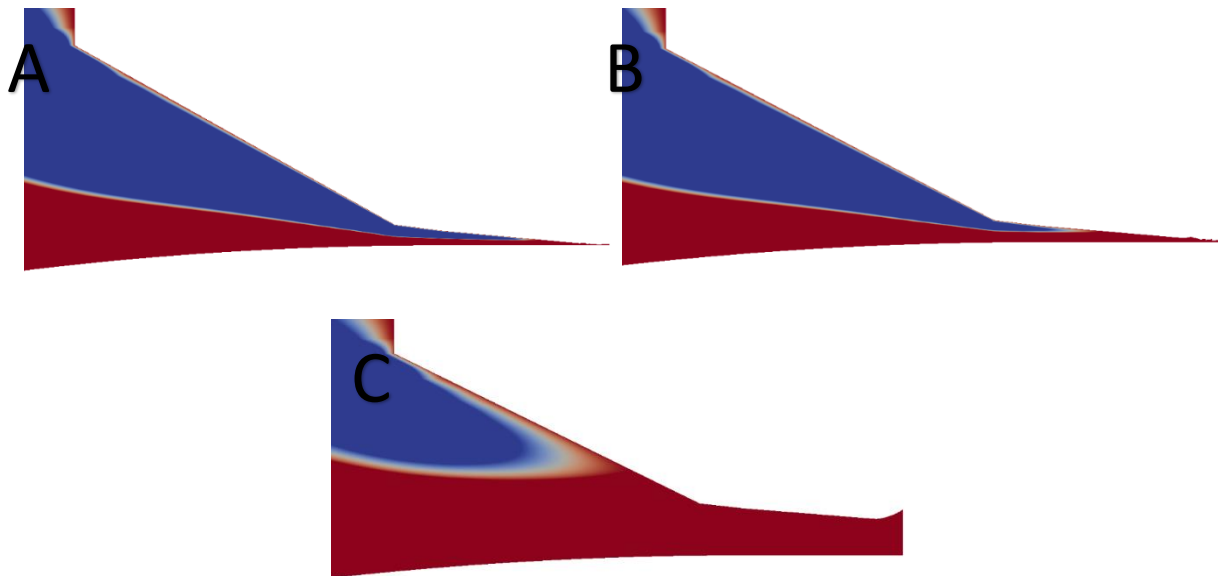


Figura 139- Perfil de recirculações debaixo da faca: A) 120 g/m²; B) 250 g/m²; C) 750 g/m².

Através da análise da Figura 139 observa-se que com o aumento do valor do entreferro ocorre uma diminuição da recirculação debaixo da faca ocorrendo um deslocamento do ponto de estagnação para a entrada da faca (Figura 139-A-B). Quando o valor do entreferro é aumentado consideravelmente, deixa de ser verificada a recirculação do fluido debaixo da faca (Figura 139-C).

Na Figura 140 é possível observar com maior detalhe o deslocamento do ponto de estagnação através das linhas de fluxo.

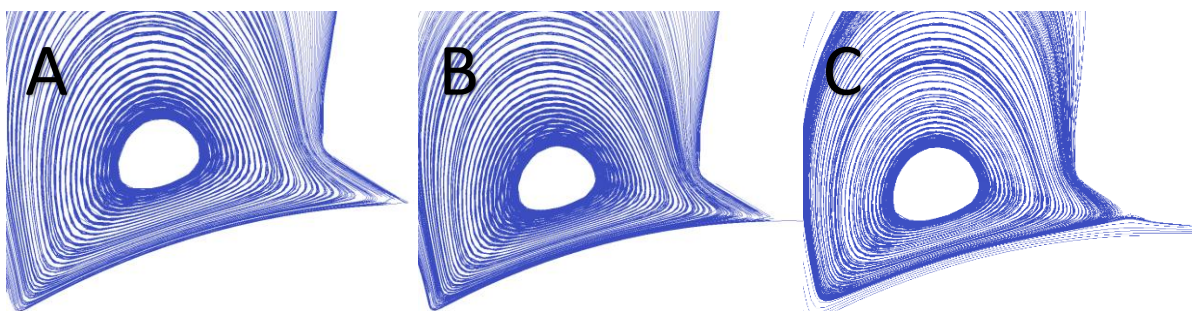


Figura 140- Linhas de fluxo para diferentes dosagens de plastisol aplicado: A) 120 g/m²; B) 250 g/m²; C) 750 g/m².

vi) Tempo de armazenamento

O tempo de armazenamento tem como impacto principal a alteração das propriedades reológicas do plastisol, provocando um aumento da sua viscosidade. Na Figura 141 são apresentados os resultados do comportamento do plastisol no caleiro, nomeadamente o perfil de recirculações.

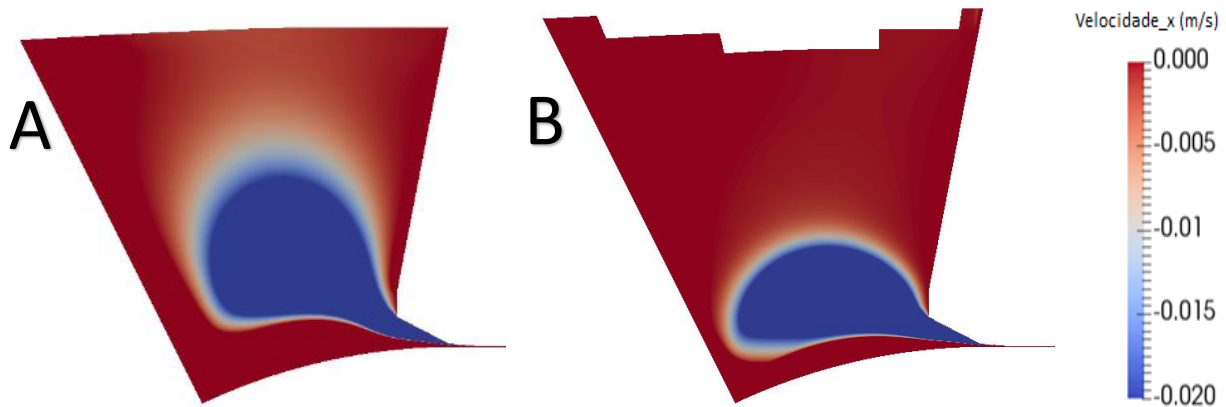


Figura 141- Influência do tempo de armazenamento na recirculação de fluido: A) 0 horas; B) 216 horas.

Pela análise da Figura 141, é possível observar o impacto da alteração das propriedades reológicas na formação de recirculações. Com 216 horas de armazenamento o plastisol apresenta uma maior viscosidade e, como consequência, observa-se uma maior dificuldade de movimentação do mesmo no caleiro. Na Figura 142 são apresentadas as linhas de fluxo para o plastisol testado.

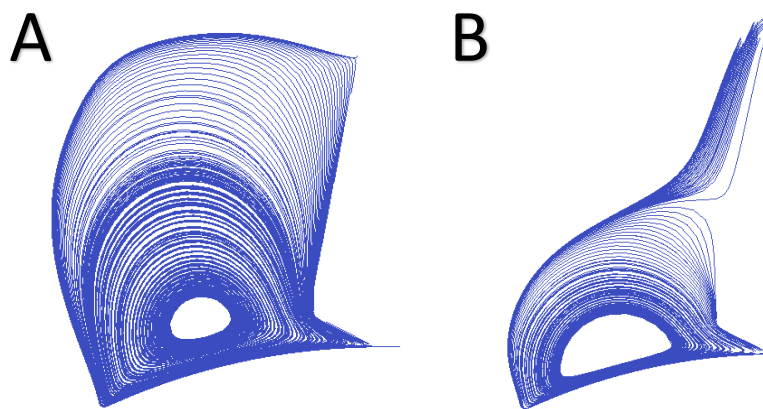


Figura 142- Linhas de fluxo para dois tempos de armazenamento: A) 0 horas; B) 216 horas.

Verifica-se que para um tempo de armazenamento de 216 horas, o plastisol em estudo apresenta uma maior estagnação no centro da recirculação. Esta estagnação é motivada pela reduzida dimensão da recirculação, limitando e alterando também o movimento do fluxo no topo do caleiro. A Figura 143 apresenta o movimento do fluido em todo o caleiro.

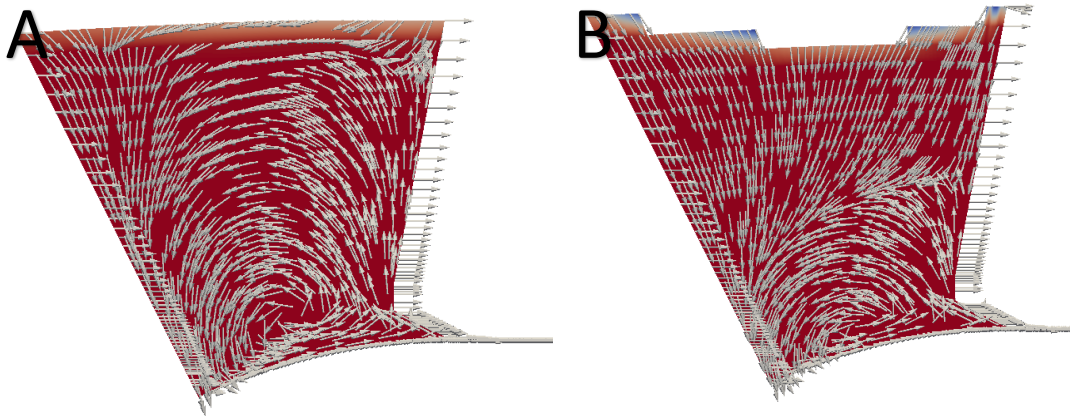


Figura 143- Movimento dos plastissóis no caleiro: A) 0 horas; B) 216 horas.

Sendo o perfil de recirculação menor, o plastisol presente no topo do caleiro apenas circula no sentido descendente até que entre na recirculação, ao passo que para um tempo de armazenamento de 0 horas o plastisol presente no topo do caleiro é parte integrante da recirculação (Figura 143).

vii) Processo de vácuo

À semelhança do tempo de armazenamento, o processo de vácuo apresenta também um impacto muito significativo no comportamento reológico do material. Na Figura 144 são apresentados os resultados provenientes da avaliação do impacto do processo de vácuo na recirculação de plastisol no caleiro.

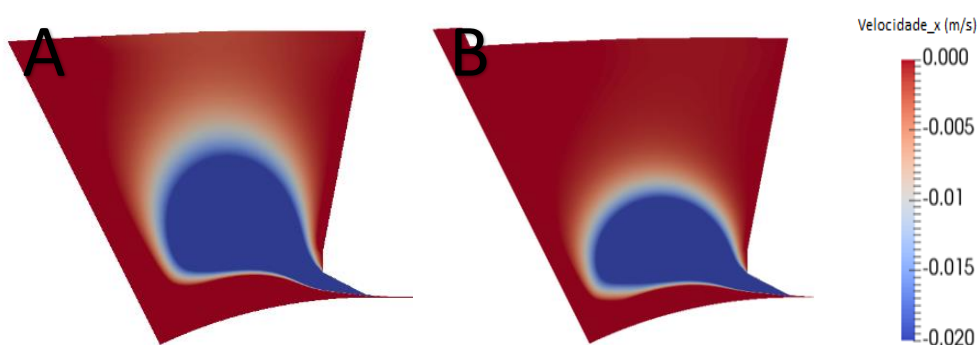


Figura 144- Influência do processo de vácuo no perfil de recirculações de fluido: A) com vácuo; B) sem vácuo.

Pela análise detalhada da Figura 144 observa-se, à semelhança do que foi verificado para o tempo de armazenamento, que existe um impacto considerável na circulação do fluido no caleiro. O perfil de recirculações existente para o fluido que não foi submetido ao processo de vácuo (Figura 144-B) apresenta menor dimensão e uma

geometria mais ovalizada, ao contrário do que é observado no plastisol submetido ao processo de vácuo (Figura 144-A). Este fenómeno pode também ser justificado pela diferença de viscosidade do plastisol, uma vez que o processo de vácuo reduz a viscosidade do mesmo. As linhas de fluxo podem ser observadas na Figura 145.

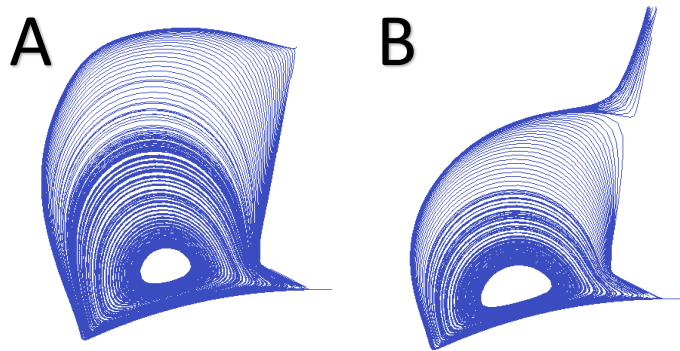


Figura 145- Linhas de fluxo para o plastisol: A) submetido ao processo de vácuo; B) não submetido ao processo de vácuo.

Analisando a Figura 145 observa-se uma maior quantidade de plastisol estagnado no centro da recirculação para o fluido que não foi submetido ao vácuo (Figura 145-B), devido à maior dificuldade de movimentação do mesmo face à viscosidade mais elevada. Para além da estagnação, verifica-se também que a circulação do fluido é ainda alterada iniciando-se com um movimento descendente desde o início do caleiro. A Figura 146 apresenta o movimento que os plastissóis efetuam no caleiro.

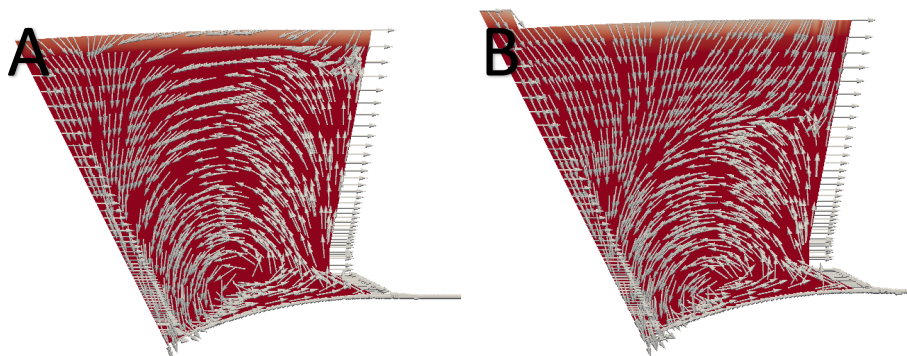


Figura 146- Movimento dos plastissóis no caleiro: A) vácuo; B) sem vácuo.

Observando a figura anterior, observa-se que o plastisol que não foi submetido a vácuo (Figura 146-B) encontra-se mais estagnado no topo do caleiro apresentando apenas movimento descendente. Este fenómeno não é observado para o plastisol submetido ao processo de vácuo (Figura 146-a).

viii) Conclusão

Após a avaliação de todos os parâmetros apresentados nesta subsecção, conclui-se que o comportamento do fluido no caleiro e à passagem pela faca pode facilmente ser afetado por diversos fatores relacionados com as condições de processamento (velocidade de processamento, ângulo da faca, geometria da faca e valor do entreferro) e com as propriedades do plastisol processado (tempo de armazenamento e realização do processo de vácuo), sendo a influência dos parâmetros estudados observada pela Tabela 16.

Tabela 16- Avaliação da influência dos parâmetros estudados nas recirculações

Parâmetro	Nível	Influência
Velocidade de processamento	15 m/min	Elevada
	25 m/min	
	35 m/min	
Altura de palstisol	6 cm	Moderada
	12 cm	
	14 cm	
Geometria da faca	Cabeça 1	Elevada
	Cabeça 2	
Ângulo da faca	Padrão	Moderada
	Ângulo 1	
	Ângulo 2	
Dosagem de plastisol	120 g/m ²	Elevada
	250 g/m ²	
	750 g/m ²	
Temperatura	25°C	s/influência
	30°C	
Tempo	0 horas	Elevada
	216 horas	
Vácuo	Com vácuo	Elevada
	Sem vácuo	

Entrando em concordância com os resultados obtidos pela caracterização reológica na subsecção 5.1.1, a temperatura estudada não apresenta um impacto significativo no perfil de recirculações do plastisol no caleiro.

5.4.4. Viscosidade

A viscosidade apresenta um papel preponderante no escoamento do plastisol, uma vez que esta pode originar a ocorrência de alguns defeitos. Neste subcapítulo foi avaliada a distribuição do perfil de viscosidades do plastisol no caleiro. Face a todos os parâmetros estudados, foi observado que os parâmetros impactantes na viscosidade do plastisol no caleiro são apenas aqueles capazes de alterar o seu comportamento reológico, como é possível observar pela tabela 17.

Tabela 17- Parâmetros com influência na viscosidade do plastisol.

Parâmetro	Nível	Influência
Velocidade de processamento	15 m/min	s/influência
	25 m/min	
	35 m/min	
Altura de plastisol	6 cm	s/influência
	12 cm	
	14 cm	
Geometria da faca	Cabeça 1	s/influência
	Cabeça 2	
Ângulo da faca	Padrão	s/influência
	Ângulo 1	
	Ângulo 2	
Dosagem de plastisol	120 g/m ²	s/influência
	250 g/m ²	
	750 g/m ²	
Temperatura	25°C	s/influência
	30°C	
Tempo de armazenamento	0 horas	Elevada
	216 horas	
Processo de vácuo	Com vácuo	Elevada
	Sem vácuo	

Posto isto, serão apresentados a distribuição de viscosidade do plastisol no caleiro apenas os parâmetros determinados com influência impactante na viscosidade do material, sendo estes o tempo de armazenamento e a realização do processo de vácuo. Os restantes podem ser observados em anexo (Anexo D)

i) Tempo de armazenamento

Uma vez que já foram apresentados os resultados relativos ao estudo da influência (do tempo de armazenamento) no comportamento reológico do plastisol, a Figura 147 apresenta a distribuição de viscosidade do fluido no caleiro.

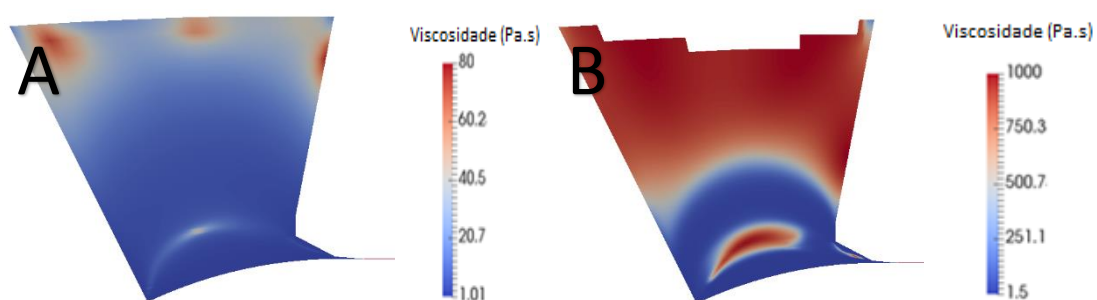


Figura 147- Influência do tempo de armazenamento na viscosidade do fluido: A) 0 horas; B) 216 horas.

Pela análise da Figura 147 e entrando em concordância com o observado na subsecção 5.4.3, o plastisol processado logo após a sua produção (0 horas de armazenamento) apresenta valores de viscosidade no caleiro reduzidos (Figura 147-A) significando o movimento uniforme por todo o caleiro. Contrariamente, o plastisol com

tempo de armazenamento de 216 horas não apresenta um movimento uniforme no caleiro, ou seja, este apresenta valores reduzidos de viscosidade nas zonas em que o fluido se encontra em movimento e, nas zonas em que o movimento do fluido é muito pequeno o plastisol apresenta valores de viscosidade elevados (indicando que o fluido se encontra estagnado, motivado pela taxa de corte aplicada ao fluido nessas zonas ser praticamente nula).

ii) Processo de vácuo

A Figura 148 apresenta a influência do processo de vácuo na distribuição de viscosidades nos plastissóis.

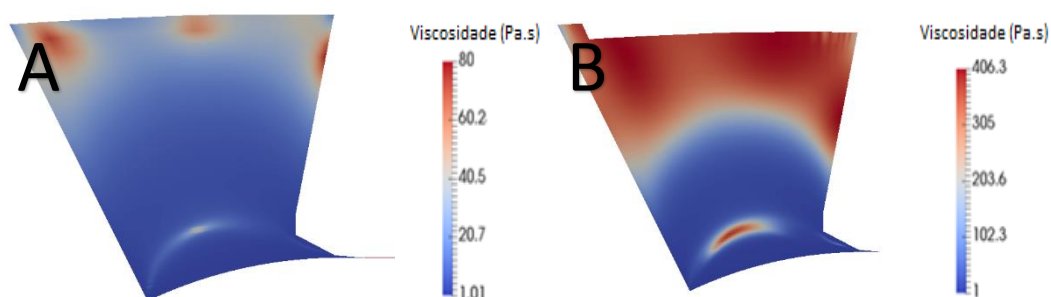


Figura 148- *Influência do processo de vácuo na viscosidade do fluido: A) com vácuo; B) sem vácuo, viscosidade apresentada em Pa.s.*

À semelhança do tempo de armazenamento, o processo de vácuo apresenta um impacto significativo na distribuição de viscosidade do plastisol no caleiro. Contrariamente ao observado no plastisol submetido ao processo de vácuo (Figura 148-A), o plastisol que não foi submetido a este processo (Figura 148-B) apresenta ao longo do caleiro diferentes valores de viscosidade, indicando as zonas de maior viscosidade uma maior estagnação de fluido (mais propriamente no topo do caleiro e no interior da recirculação).

iii) Conclusão

Através da análise de todos os resultados presentes neste subcapítulo, conclui-se que tanto o tempo de armazenamento como o processo de vácuo tem implicações diretas na viscosidade do plastisol quando este é recoberto, consequentemente, no refluxo do material. Face a esta conclusão obtida, será posteriormente avaliada esta

informação ao nível do processo industrial de forma a poder correlacionar a informação obtida com possíveis defeitos de carácter reológico existentes no mesmo.

Expondo o exemplo anteriormente apresentado, o plastisol quanto mais viscoso (proveniente de tempos excessivos de armazenamento) apresenta um escoamento mais complexo acentuando a recirculação de plastisol existente no caleiro Na Figura 149 observa-se o perfil de recirculações e a direção que o plastisol adota durante o escoamento do mesmo.

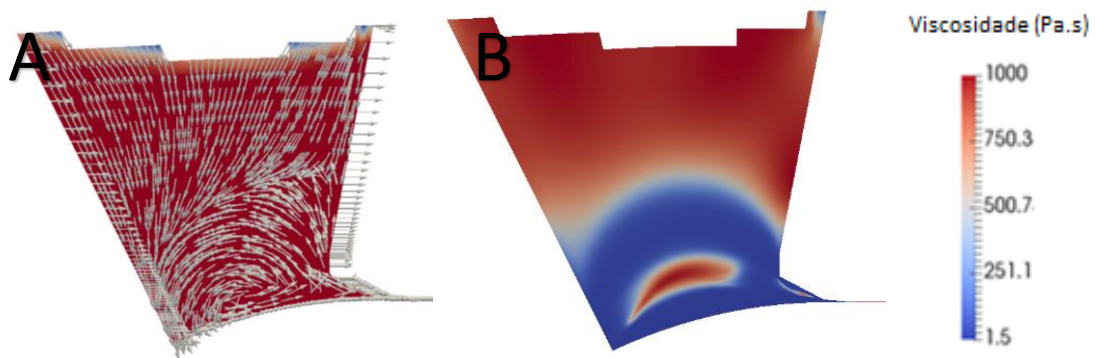


Figura 149- Avaliação da viscosidade face á recirculação: A) Direção do fluxo; B) Perfil de viscosidade.

Pela análise da Figura 149, é observado que quanto maior a viscosidade do plastisol processado maior será a alteração do fluxo dentro do caleiro, apresentando também zonas em que o fluido encontra-se estagnado motivado pela taxa de corte praticamente nula a que está sujeito.

O comportamento reológico do fluido imediatamente após a passagem na faca encontra-se ilustrado na Figura 150, este escoamento representa o plastisol 2 com um tempo de armazenamento de 0 horas a uma temperatura de 25°C, todos os plastissóis para os diferentes parâmetros de teste apresentam o mesmo comportamento.



Figura 150- Perfil de viscosidade logo após a passagem pela faca para o plastisol 2 com tempo de armazenamento de 0 horas e uma temperatura de 25°C.

Como consequência do modelo em uso, em que não são contemplados os efeitos viscoelásticos, verifica-se que o plastisol aumenta praticamente de imediato a viscosidade inicial (para taxas de corte nulas) após a passagem pela faca.

5.4.5. Pressão na faca

O valor de pressão a que o fluido é sujeito à passagem pela faca pode ser impactante no valor de espessura do filme formado, possivelmente devido à relaxação das partículas após a deformação imposta. Posto isto, esta subsecção destina-se à avaliação da influência dos diversos parâmetros estudados no valor da pressão a que o fluido é sujeito à passagem pela faca. Este foi avaliado ao longo do comprimento da faca como é possível observar na Figura 151.

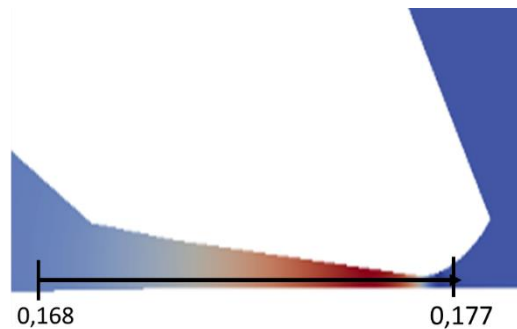


Figura 151- Avaliação do perfil de pressões ao longo da faca.

i) Velocidade linear de processamento

A Figura 152 apresenta a influência da velocidade de processamento do plastisol na pressão à qual o mesmo é sujeito durante a passagem pela faca.



Figura 152- Influência da velocidade de processo no valor de pressão à passagem pela faca: A) 15 m/min; B) 25 m/min; C) 35 m/min.

Através da análise da Figura 152 é possível estabelecer uma relação direta entre a velocidade de processamento e o valor de pressão à passagem pela faca. Com o aumento da velocidade linear de processamento ocorre também um aumento da

pressão a que o fluido é sujeito debaixo da faca. Os valores podem ser observados através da Figura 153.

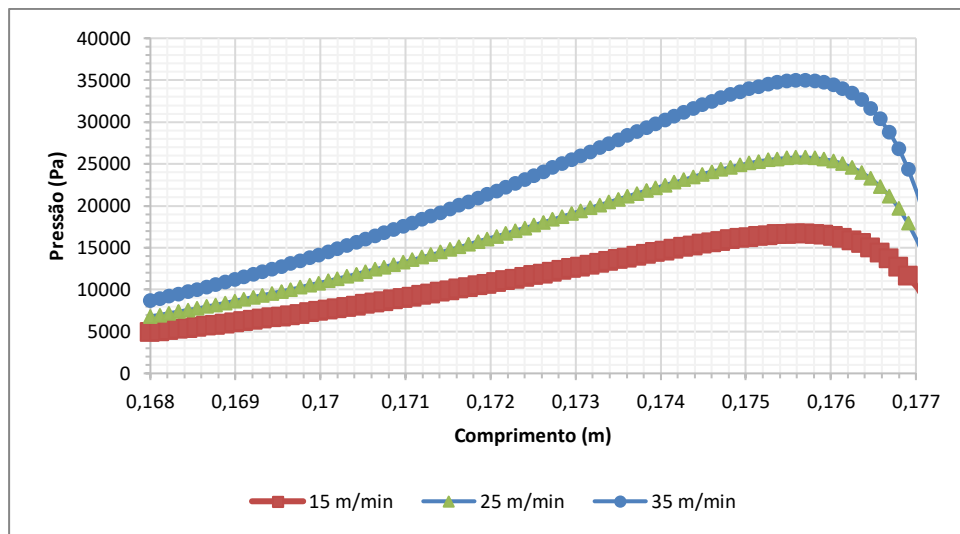


Figura 153- Valores de pressão ao longo da faca para as diferentes velocidades lineares de processamento.

Analisando a figura anterior, observa-se que a zona mais restrita da faca é a zona onde a pressão exercida no fluido é máxima, ainda, observa-se uma dependência da pressão com a velocidade linear de processamento, ou seja, à medida que a velocidade de processamento aumenta, o valor da pressão que é exercida no fluido aumenta também.

ii) Geometria de faca

De forma a perceber a influência do tipo de geometria no perfil de pressões a que o fluido está sujeito à passagem pela faca, foi observado o perfil de pressões ao longo da faca. A sua influência encontra-se representada pela Figura 154.

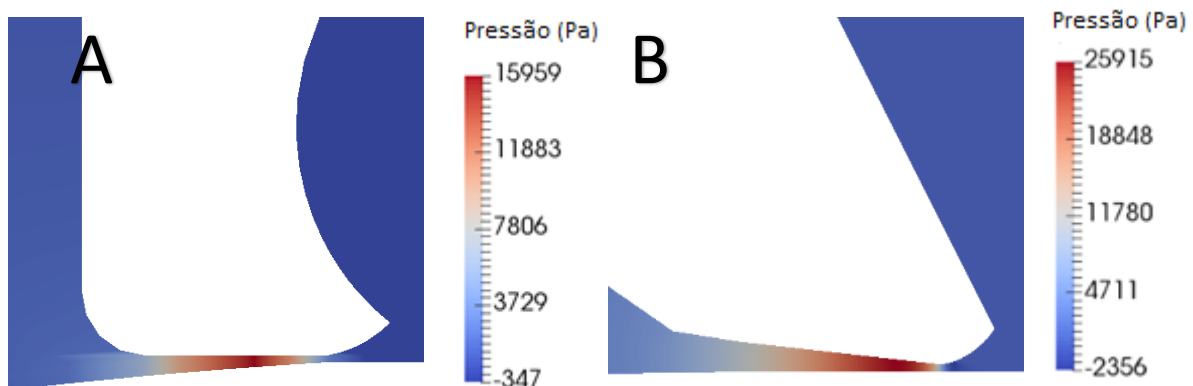


Figura 154- Influência da geometria de faca na pressão à passagem pela faca: A) Faca 1; B) Faca 2.

Pela observação da Figura 154 observa-se o impacto deste parâmetro no valor de pressão a que o plastisol é sujeito à passagem pela faca. Mantendo constantes todas as condições de processamento verifica-se que os valores de pressão gerados quando utilizada a Faca 2 são cerca de 10000 Pa mais elevados do que com a Faca 1 (Figura 154). Na Figura 155 encontra-se representado os valores de pressão ao longo da faca.

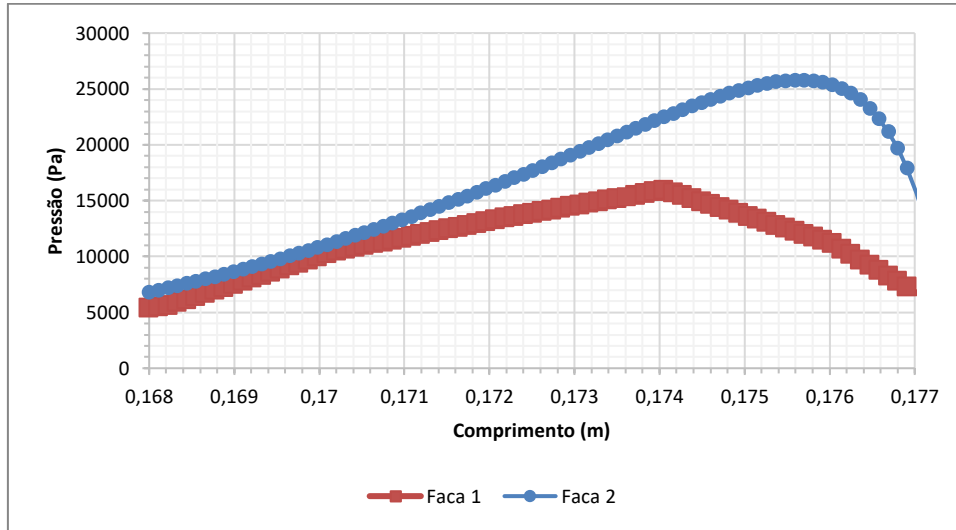


Figura 155- Valores de pressão ao longo da faca para as diferentes geometrias de faca.

Observando a figura anterior verifica-se que a Faca 2 apresenta valores de pressão maiores do que a Faca 1 quando se aproxima da zona mais restrita. Esta zona (mais restrita da faca) representa ainda a zona em que a viscosidade do fluido é menor motivada pela zona onde a taxa de corte é máxima.

iii) Ângulo de faca

A influência do ângulo da faca no valor de pressão encontra-se representado na Figura 156.

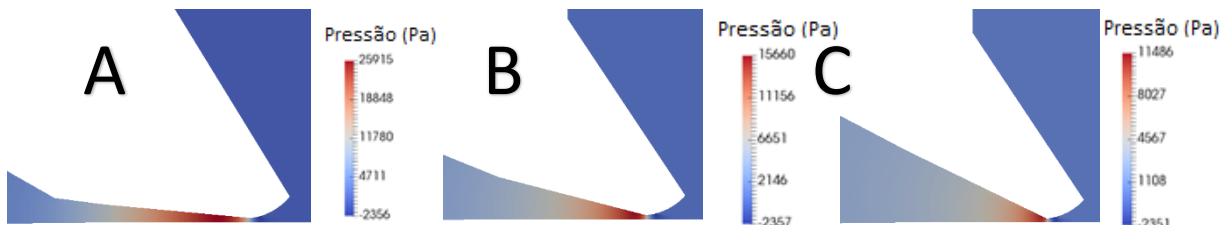


Figura 156- Influência de diferentes ângulos de faca na pressão à passagem pela faca: A) Padrão; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.

Analisando a figura anterior, conclui-se que à medida que o ângulo da faca aumenta, ocorre uma diminuição na pressão a que o fluido se encontra sujeito à passagem pela faca. Na Figura 157 é apresentado o perfil de pressões ao longo de toda a faca desde a entrada da mesma até à saída.

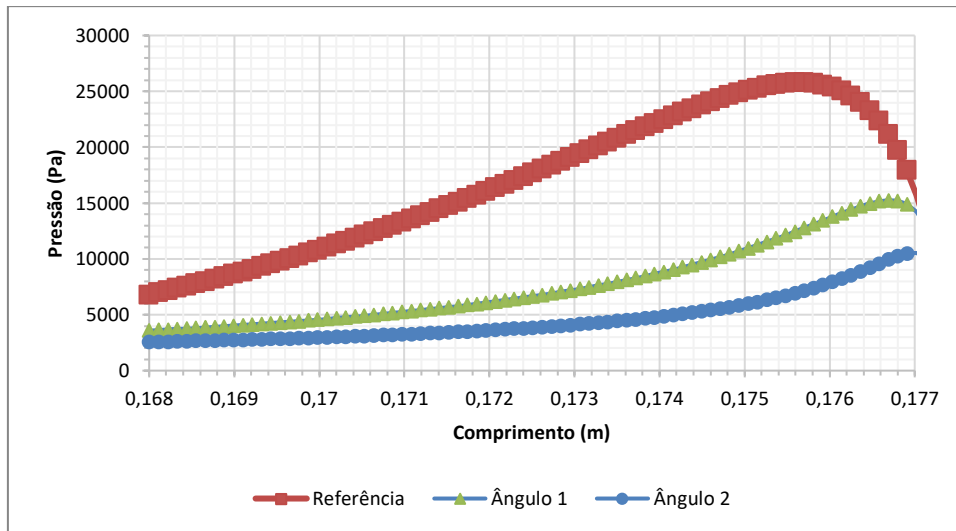


Figura 157- Valores de pressão ao longo da faca para os diferentes ângulos de faca.

Pela análise da figura anterior conclui-se que o aumento do ângulo da faca implica uma diminuição do valor de pressão exercida no fluido, ainda, o valor máximo de pressão desloca-se ligeiramente em direção à saída da faca (no eixo dos x) com o aumento do ângulo.

iv) Diferentes dosagens de plastisol aplicado

O impacto do uso de diferentes valores de entreferro motivado pela dosagem de plastisol aplicado na pressão pode ser observado pela Figura 158.



Figura 158- Influência de diferentes dosagens de plastisol aplicado na pressão à passagem pela faca: A) 120 g/m²; B) 250 g/m²; C) 750 g/m².

Pela análise da Figura 158, é possível concluir que o valor de pressão a que o fluido é sujeito à passagem pela faca é inversamente proporcional ao valor do

entreferro, observando-se uma diminuição da pressão à medida que o valor do entreferro aumenta. Na Figura 159 encontra-se ilustrado o perfil de pressões ao longo da faca.

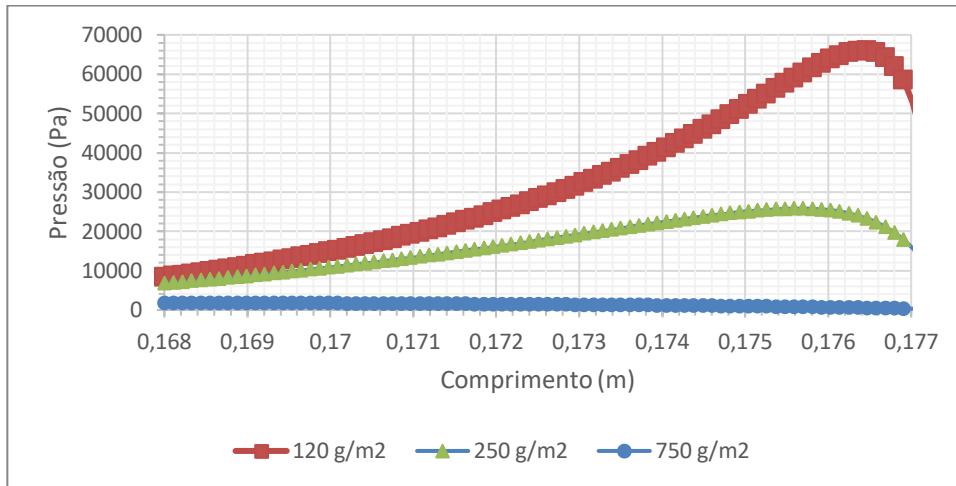


Figura 159- Valores de pressão em função do comprimento da faca para as diferentes dosagens de plastisol aplicado.

Analisando com detalhe a Figura 159, a gramagem de plastisol aplicado tem uma influência impactante no perfil de pressões ao longo da faca. À medida que a gramagem de plastisol aplicado aumenta, e como já referido, conseqüentemente aumenta o valor do entreferro, observa-se uma diminuição significativa do valor de pressão a que o fluido é sujeito ao longo da faca. Estabelecendo uma correlação, quanto menor for o valor do entreferro maior será a taxa de corte a que o fluido é sujeito, conseqüentemente o valor de pressão na zona mais restrita é maior.

v) Temperatura do plastisol

A Figura 160 apresenta a influência da gama de temperaturas de processamento do plastisol no valor de pressão à passagem pela faca.

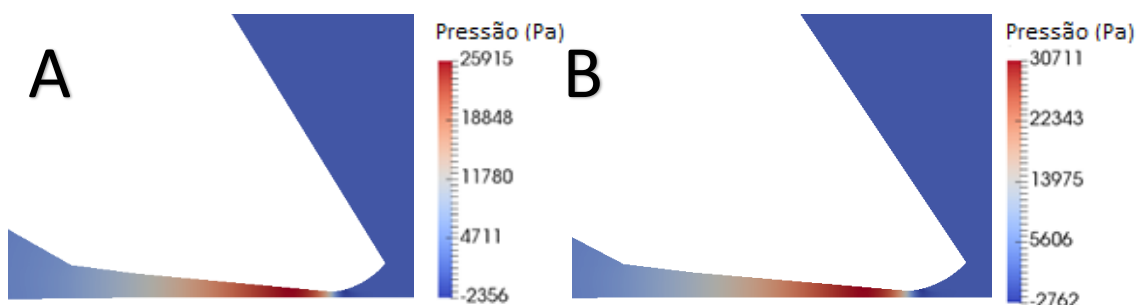


Figura 160- Influência da temperatura do plastisol na pressão à passagem pela faca: A) 25°C; B) 30°C.

Analisando a Figura 160, o valor de pressão exercida nos plastissóis não têm uma alteração impactante face a este parâmetro (temperatura do plastisol) contudo existe uma ligeira diferença no valor máximo. O perfil de pressões ao longo da faca pode ser observado na Figura 161.

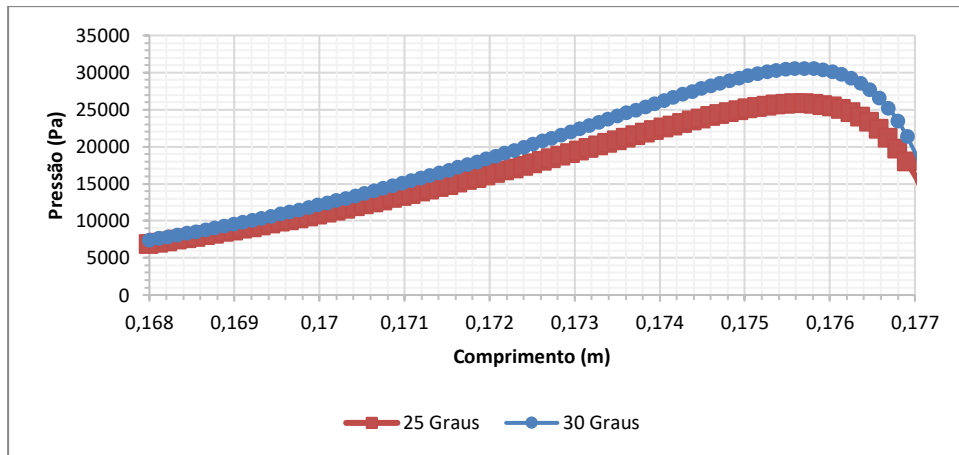


Figura 161- Valores de pressão em função do comprimento da faca para as diferentes temperaturas de processamento do plastisol.

Pela análise do gráfico presente na figura anterior observa-se uma ligeira diferença no perfil de pressões do plastisol testado a diferentes temperaturas, a grande diferença reside apenas no valor máximo de pressão na zona mais restrita, sendo este mais acentuado para a temperatura de 30°C. Com isto, observa-se uma relação do valor de pressão a que o fluido é sujeito em relação à temperatura, motivado pela diminuição de viscosidade com o aumento de temperatura.

vi) Tempo de armazenamento

A Figura 162 apresenta a relação entre o tempo de armazenamento e a pressão que o fluido é sujeito à passagem pela faca.

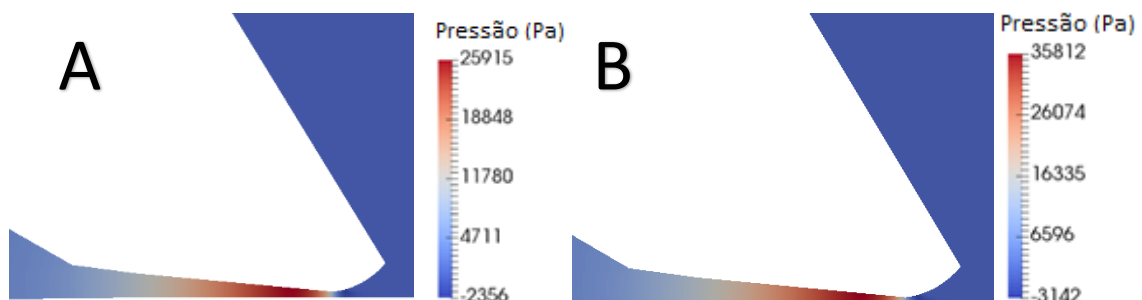


Figura 162- Influência do tempo de armazenamento do plastisol na pressão à passagem pela faca: A) 0 horas; B) 216 horas.

Através da análise da figura anterior, verifica-se que, como seria de esperar, com o aumento da viscosidade do plastisol (proporcionada pelo tempo de armazenamento) a pressão na faca também aumenta. Encontra-se ilustrado na Figura 163 a distribuição da pressão em função do comprimento da faca.

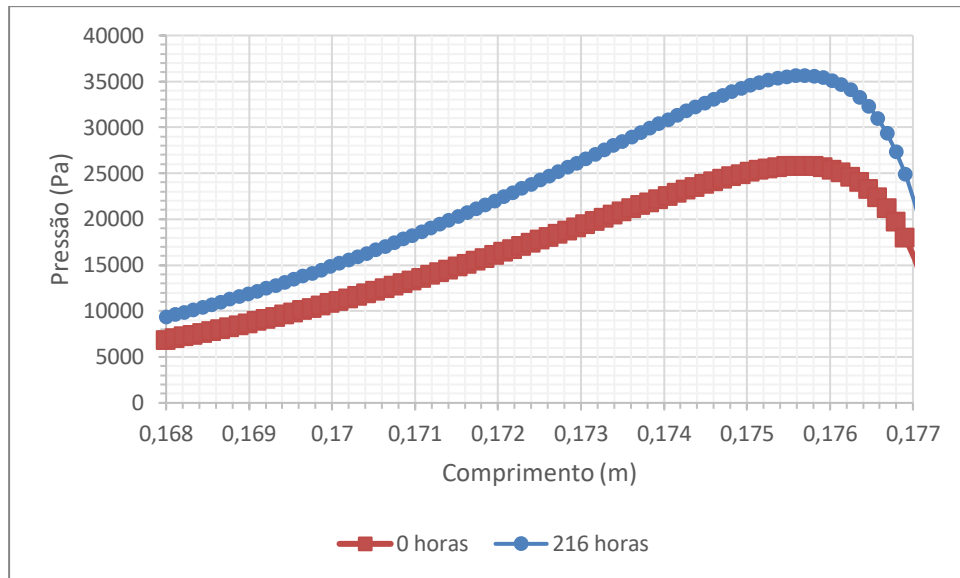


Figura 163- Valores de pressão em função do comprimento da faca para diferentes tempos de armazenamento de plastisol.

Como se têm vindo a observar, a viscosidade do plastisol têm uma influência direta na pressão a que o fluido é sujeito à passagem pela faca. Pela análise da figura anterior observa-se que o perfil de pressões apresenta o mesmo comportamento, contudo, motivado pela diferença de viscosidade existe uma diferença do valor de pressão.

vii) Conclusões

Finalizando este estudo conclui-se que o valor de pressão pode ser influenciado por diversos fatores, tanto a nível das condições de processamento como das propriedades reológicas do plastisol. O impacto dos parâmetros estudados na pressão foram avaliados e pode ser observada a sua influência na Tabela 18.

Tabela 18- Parâmetros com influência no valor de pressão.

Parâmetro	Nível	Valor máximo	Influência
Velocidade de processamento	15 m/min	1688	Elevada
	25 m/min	26341	
	35 m/min	35683	
Altura de plastisol	6 cm	26383	Moderada
	12 cm	26025	
	14 cm	26341	
Geometria da faca	Cabeça 1	15827	Elevada
	Cabeça 2	26341	
Ângulo da faca	Padrão	26341	Moderada
	Ângulo 1	16933	
	Ângulo 2	12747	
Dosagem de plastisol	120 g/m ²	60239	Elevada
	250 g/m ²	26341	
	750 g/m ²	1928	
Temperatura do palstisol	25°C	26341	Moderada
	30°C	31290	
Tempo de armazename	0 horas	26341	Moderada
	216 horas	36179	
Processo de vácuo	Com vácuo	25698	s/influência
	Sem vácuo	26341	

Na Figura 164 está representado o máximo de pressão para cada parâmetro avaliado.

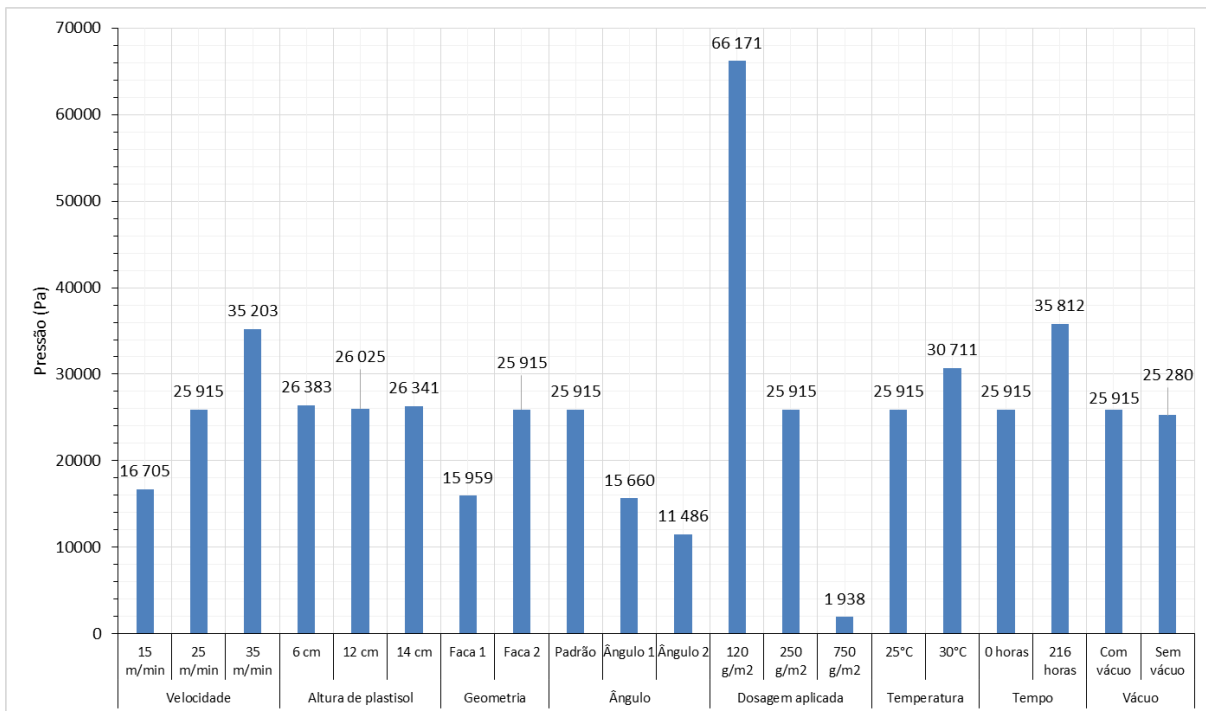


Figura 164- Resultados compilados do valor de pressão para cada parâmetro.

Através da análise da Tabela 18 e da Figura 164, conclui-se que o parâmetro cujo seu impacto é mais preponderante no valor de pressão de que o fluido é sujeito à passagem pela faca é o valor do entreferro, pequenas alterações deste resultam em alterações significativas no valor máximo de pressão. No entanto, todas as condições de processamento apresentam influência considerável, nomeadamente velocidade linear

de processamento, geometria e ângulo da faca empregue no processamento. Com impacto não tão preponderante, mas ainda significativo, as propriedades reológicas do plastisol apresentam uma relação direta com a pressão exercida, nomeadamente a viscosidade do plastisol. Observando os resultados obtidos nesta subsecção e ainda a Figura 160, conclui-se que o valor de pressão exercido nos plastissóis à passagem pela zona mais restrita da faca será tanto maior quanto maior for a viscosidade do plastisol processado.

5.4.6. Espessura do filme formado

A espessura do filme formado é a especificação mais importante a cumprir quando se trata de um processo de recobrimento indireto por faca, pois, este valor influencia significativamente nas propriedades do artigo final, principalmente propriedades mecânicas como flexões, carga à rotura entre outros. Com isto, pretende-se determinar e compreender quais os parâmetros com maior relevância para a característica do filme. Nas Figuras 165-169 encontram-se apresentados os gráficos do alfa em função da espessura para os diferentes parâmetros relevantes estudados.

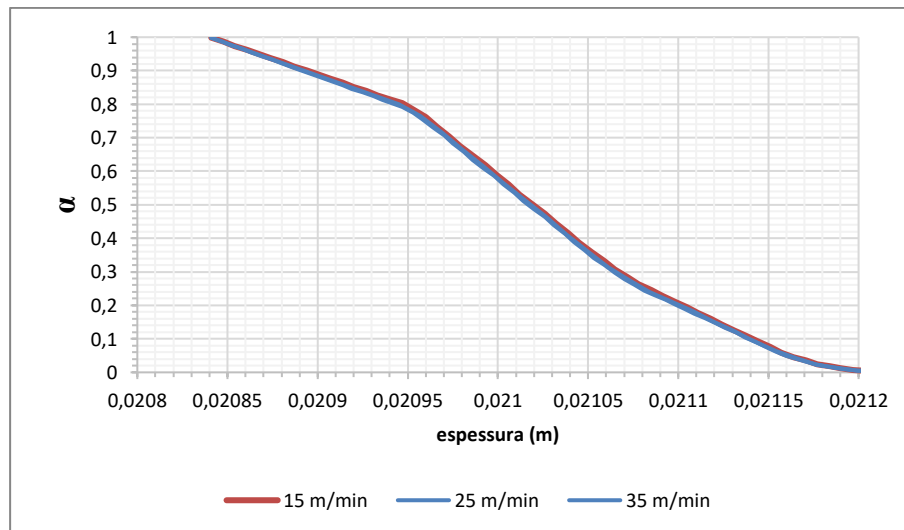


Figura 165- Variação do alfa em função da espessura para diferentes velocidades de processamento.

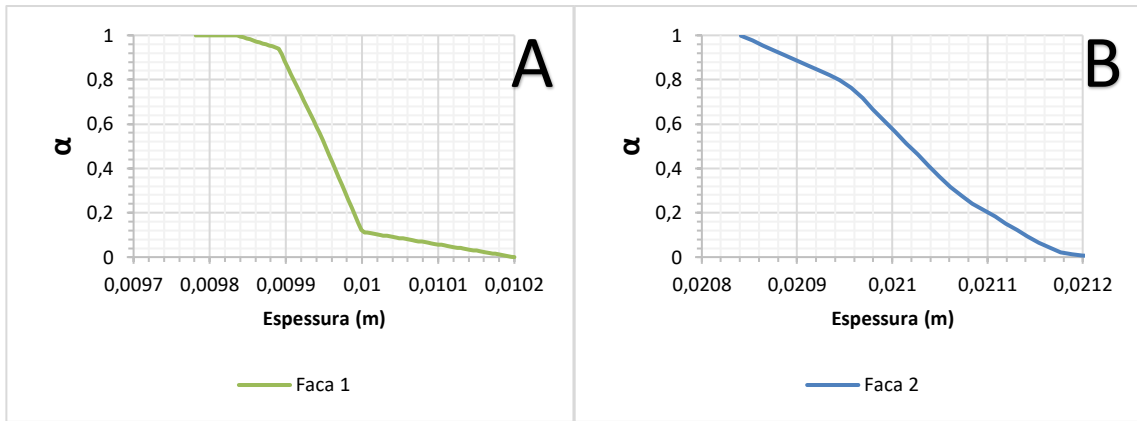


Figura 166- Variação do alfa em função da espessura para diferentes facas; A) Faca 1; B) Faca 2.

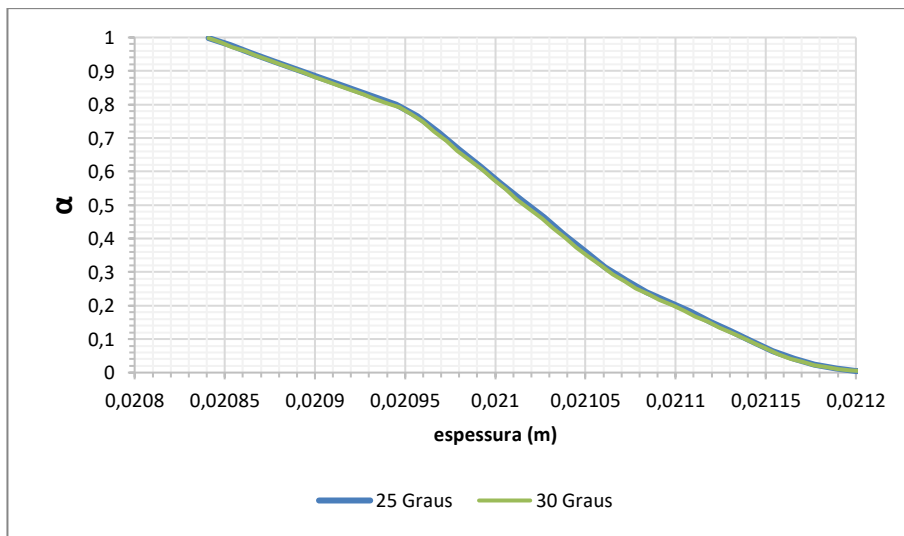


Figura 167- Variação do alfa em função da espessura para diferentes temperaturas.

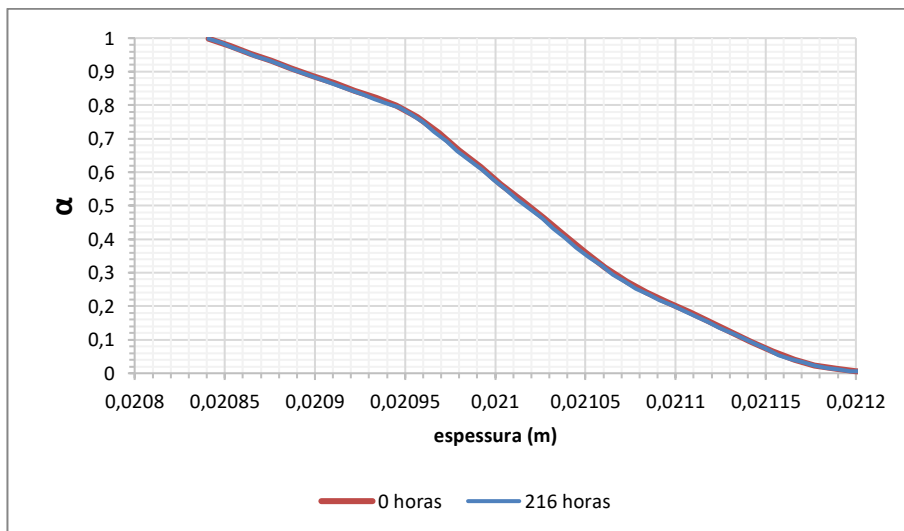


Figura 168- Variação do alfa em função da espessura para diferentes tempos de armazenamento.

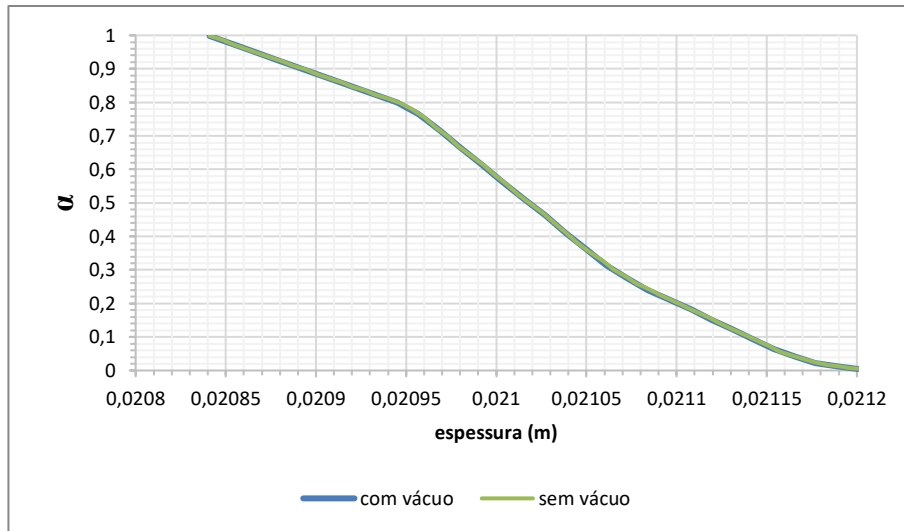


Figura 169- Distribuição do alfa em função da espessura avaliando a influência do processo de vácuo.

Para melhor interpretação dos resultados, o valor de espessura para cada um dos parâmetros estudados encontram-se representados na Figura 170.

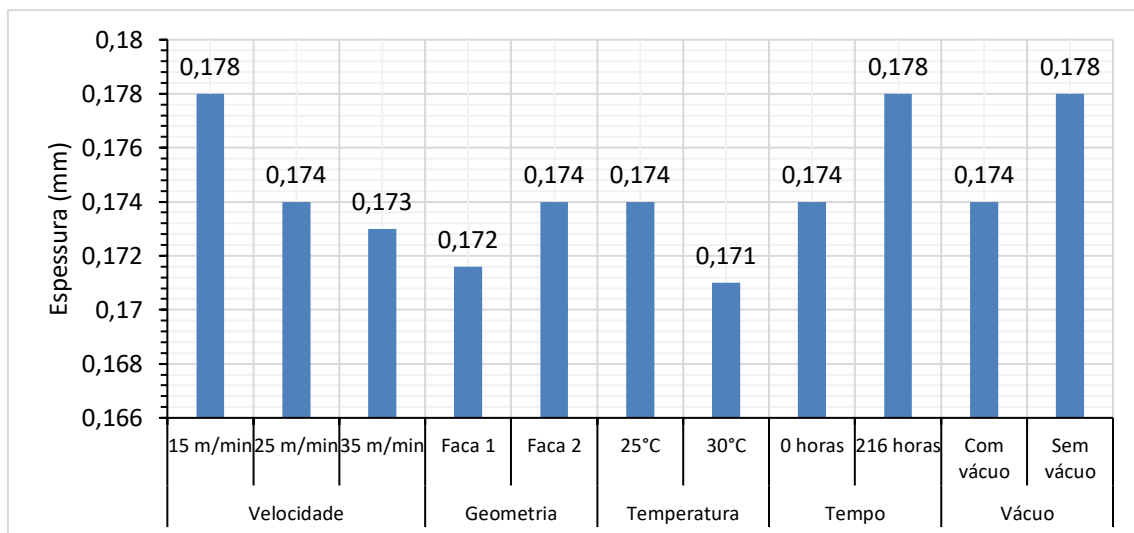


Figura 170- Valores de espessura dos filmes formados.

A Figura 170 revela-se conclusiva relativamente aos parâmetros que apresentam maior influência na espessura de um filme processado. Pela análise da figura o parâmetro mais impactante no valor de espessura é a velocidade linear de processamento a que o plastisol de PVC é recoberto, observando-se uma diminuição de espessura à medida que esta aumenta. As diferentes geometrias revelaram uma espessura de filme diferente, apresentando a Faca 1 uma espessura inferior (Figura 170). Ainda, a viscosidade do plastisol processado mostrou também ser impactante no valor

do filme formado, resumindo, quanto maior a viscosidade do plastisol processado maior será o valor da espessura do filme.

Como conclusões gerais, a influência dos diversos parâmetros estudados pode ser observada na Tabela 19.

Tabela 19- Grau de influência de todos os parâmetros estudados.

Parâmetro	Nível	Taxa de corte	Recirculações	Viscosidade	Pressão	Espessura
Velocidade de processamento	15 m/min	Elevada	Elevada	s/influência	Elevada	Elevada
	25 m/min					
	35 m/min					
Altura de plastisol	6 cm	s/influência	Moderada	s/influência	s/influência	s/influência
	12 cm					
	14 cm					
Geometria da faca	Cabeça 1	Elevada	Elevada	s/influência	Elevada	Elevada
	Cabeça 2					
Ângulo da faca	Padrão	s/influência	Moderada	s/influência	Elevada	s/influência
	Ângulo 1					
	Ângulo 2					
Dosagem de plastisol	120 g/m ²	Elevada	Elevada	s/influência	Elevada	-
	250 g/m ²					
	750 g/m ²					
Temperatura do plastisol	25°C	s/influência	s/influência	s/influência	Moderada	Elevada
	30°C					
Tempo de armazenamento	0 horas	s/influência	Elevada	Elevada	Moderada	Elevada
	216 horas					
Processo de vácuo	Com vácuo	s/influência	Elevada	Elevada	s/influência	Elevada
	Sem vácuo					

6. Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta dissertação de mestrado permitiu o aumento do conhecimento relativo às propriedades reológicas dos plastissóis de PVC e do respetivo escoamento, em função de diferentes parâmetros, no processo de recobrimento indireto por faca. Este capítulo tem como principal objetivo a apresentação de todas as conclusões obtidas com o estudo. As conclusões neste capítulo apresentadas abordarão o comportamento reológico do plastisol e o seu comportamento durante o processamento.

i) Comportamento reológico do Plastisol

O trabalho realizado nesta dissertação iniciou-se pela caracterização reológica dos Plastissóis escolhidos para o estudo. Através do reómetro presente na TMG Automotive concluiu-se que os plastissóis processados apresentam um comportamento reofluidificante. Posto isto, foram estudados alguns fatores que ocorrem na empresa durante o manuseamento dos Plastissóis aos quais o principal objetivo era a determinação da influência destes no comportamento reológico, nomeadamente a temperatura do plastisol, realização de um processo de vácuo e o tempo de armazenamento.

Foi verificado, a partir da caracterização reológica, que a gama de temperaturas estudada (25 e 30°C) não apresentam qualquer impacto no comportamento reológico dos Plastissóis.

Relativamente ao processo de vácuo, este implica uma redução de viscosidade bastante significativa no plastisol (quando comparado com a mesma formulação sem que fosse submetido ao processo de vácuo) para taxas de corte reduzidas. No entanto, para taxas de corte mais elevadas os comportamentos dos dois plastissóis (um submetido ao processo de vácuo e o outro não) tendem para o mesmo comportamento.

Conclui-se também que o tempo que o Plastisol fica armazenado, desde o momento que este é produzido até o momento em que é consumido pela máquina de recobrimento, apresenta um impacto muito significativo no comportamento reológico. Com o aumento do tempo de armazenamento foi verificado um aumento da viscosidade do Plastisol. Apesar de se verificar um aumento de viscosidade para toda a gama de

taxas de corte estudadas, este aumento é mais significativo para taxas de corte reduzidas, pois, à medida que a taxa de corte se aproxima das existentes no processo industrial, as duas curvas de fluxo (uma com 0 horas de armazenamento e outra com 216 horas de armazenamento) tendem a aproximarem-se para um valor. Não obstante, deve ser considerada a possível existência de aglomerados no plastisol para tempos de armazenamento mais elevados, que se podem traduzir em defeitos no produto final.

ii) Escoamento do Plastisol de PVC

A realização das simulações numéricas permitiu a obtenção de informação relevante sobre o escoamento dos Plastissóis no processo de recobrimento indireto por faca. A taxa de corte que o fluido é sujeito quando passa debaixo da faca vê-se fortemente influenciada pelas condições de processamento, nomeadamente a velocidade linear de processamento, a geometria da faca e a mais preponderante o valor do entreferro (distância do substrato à faca).

Concluiu-se que o fluxo do Plastisol no caleiro é alterado face às condições de processamento empregues e ainda as propriedades reológicas do plastisol. As condições de processamento tem impacto na dimensão da recirculação formada no caleiro, foi observado um aumento do perfil de recirculação com o aumento da velocidade sendo esta a mais preponderante. O valor do entreferro não apresenta impacto direto na dimensão da recirculação, mas sim no ponto de estagnação do fluido (ponto onde se inicia a circulação de fluido no sentido contrário). Verificou-se também que aumentando o ângulo da faca a recirculação debaixo da faca aumentava (em dimensão) e o ponto de estagnação do fluido deslocava-se em direção à saída da faca. Por outro lado, as propriedades reológicas do Plastisol demonstraram afetar a dimensão da recirculação do fluido e o comportamento do mesmo. Com o aumento da viscosidade do plastisol verificou-se uma diminuição da dimensão do perfil de recirculação de fluido, no caso do fluido menos viscoso concluiu-se que a dimensão da recirculação era tão elevada que até o fluido presente no topo do caleiro circulava. Ainda, com o aumento da viscosidade do plastisol, o fluido no topo do caleiro encontrava-se estagnado, apresentava apenas um movimento descendente até que entrasse na recirculação.

Conclui-se também que a pressão exercida no plastisol na zona mais restrita da faca é fortemente afetada pela dosagem de plastisol aplicado, conseqüentemente o

valor do entreferro, empregue no processamento, quanto menor o valor de entreferro maior será a pressão exercida no plastisol, sendo este o parâmetro mais preponderante. No entanto, concluiu-se ainda que as restantes condições de processamento influenciam significativamente o valor de pressão, com o aumento da velocidade de processamento verificou-se que o valor de pressão aumentava. Ainda, foi verificado uma diminuição do valor de pressão à medida que o ângulo da faca aumentava.

Ficou também apurado que a espessura do filme formado apresenta dependência direta com a velocidade de processamento (sendo este o mais impactante na espessura do filme), à medida que a velocidade de processamento aumenta a espessura do filme formado diminui. Verificou-se ainda que, com o aumento da viscosidade do Plastisol processado, a espessura do filme aumenta também.

7. Propostas de trabalho futuro

Apesar de toda a experiência existente no que diz respeito à reologia e ao comportamento reológico dos plastissóis, o conhecimento relativo aos fatores mais importantes na qualidade do escoamento permanecem ainda relativamente desconhecidos.

Como propostas de trabalhos futuros é necessário encontrar um modelo que contabilize a componente viscoelástica deste tipo de fluidos de forma a garantir que os resultados obtidos por via da simulação são os mais fiáveis possíveis. Uma vez que a caracterização reológica foi efetuada para uma gama de taxas de corte compreendidas entre 0.1 e 1000 s⁻¹, é necessário proceder à caracterização reológica dos mesmos plastissóis aproximando ao máximo as taxas de corte existentes no processo de recobrimento, sendo estas superiores ao intervalo estudado. Será necessário, para melhor compreensão do perfil de recirculações ao longo do comprimento do caleiro, proceder à simulação numérica em três dimensões.

Seria ainda de grande interesse discretizar os diferentes tipos de partículas e fluidos existentes na receita do plastisol de PVC de forma a perceber com exatidão a interação entre as partículas e o fluido, podendo avaliar potenciais acumulações e zonas com maior quantidade de sólidos.

A avaliação do comportamento reológico deverá ainda ser alargado para uma maior gama de plastissóis assim como a respetiva modelação numérica.

8. Bibliografia

- [1] J. Thornton, "Environmental Impacts of Polyvinyl Chloride (PVC) Building Materials," *Heal. Build. Netw.*, 2002.
- [2] A. Rodolfo Jr., L. Rodrigo Nunes, and W. Ormanji, *Tecnologia do PVC*. 2006.
- [3] "OpenFOAM, The open source CFD toolbox." [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/>. [Accessed: 28-Oct-2019].
- [4] S. G. Patrick, *Practical Guide to Polyvinyl Chloride*. 2005.
- [5] S. Patrick, *PVC Compounds and Processing*, vol. 15. 2004.
- [6] W. V. Titow, *PVC Technology*. 1984.
- [7] W. S. Penn, *PVC Technology*. 1971.
- [8] L. Ferreira, S. Figueiredo, M. G. Rasteiro, and A. Toma, "PVC Paste Rheology : Study of Process Dependencies," *J. Appl. Polym. Sci.*, 2009.
- [9] T. Osswald and N. Rudolph, *Polymer Rheology, Fundamentals and Applications*. 2015.
- [10] F. Irgens, *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. .
- [11] A. Gomes de castro, J. António Covas, and A. Correia Diogo, "Reologia e as suas aplicações industriais," 2001.
- [12] R. W. Fox, A. T. Mcdonald, P. J. Pritchard, and J. C. Leylegian, *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 8th ed. 2014.
- [13] F. M. White, *Mecânica dos Fluidos*, 6th ed. 2011.
- [14] "Viscosidade vs taxa de corte." [Online]. Available: https://elearning.uminho.pt/bbcswebdav/pid-577523-dt-content-rid-1058755_1/courses/1516.9705N8_1/Lecture 2_Viscosity_vs_Rate.pdf.
- [15] N. Nakajima and E. R. Harrell, "Non-linear Viscoelastic Behavior of PVC Plastisol," 2005.
- [16] L. G. da S. Alves, "Reologia e Estabilidade Térmica de plastisois," 1993.
- [17] A. Marcilla, J. C. Garcia, and M. Beltran, "Study of the Flow Properties and the Ageing Process in PVC Plastisols from Commercial PVC Resins," vol. 33, 1997.
- [18] E. J. Wickson, *Handbook of PVC Formulating*. 1993.
- [19] J. M and B. S. Butola, "Application technologies for coating, lamination and finishing of technical textiles," 2013.
- [20] L. W. Mckeen, *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook*, 2nd ed. 2006.
- [21] B. Roth, R. R. Søndergaard, and F. C. Krebs, "Roll-to-roll printing and coating techniques for manufacturing large-area flexible organic electronics," in *Handbook of Flexible*

- Organic Electronics*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 171–197.
- [22] L. E. Scriven, “Physics and Applications of Dip Coating and Spin Coating,” 1988.
- [23] M. Van Parys, *Coating*. 1994.
- [24] E. Shim, “Coating and laminating processes and techniques for textiles,” in *Smart Textile Coatings and Laminates*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 11–45.
- [25] A. Giessmann, *Coating Substrates and Textiles: A Practical Guide to Coating and Laminating Technologies*. 2012.
- [26] E. A. Collins and D. J. Hoffman, “Rheology of Plastisols of Poly (Vinyl Chloride),” in *Rubber Chemistry and Technology*, 1979, pp. 676–691.
- [27] A. Marcilla, “Theoretical Model for the Gelation and Fusion Mechanisms of PVC Plastisols Based on Rheological Measurements,” in *European Polymer Journal*, 1997, pp. 357–363.
- [28] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2nd ed. 2007.
- [29] “OpenFOAM and The OpenFOAM Foundation.” [Online]. Available: <https://openfoam.org/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [30] C. J. Greenshields, *OpenFOAM*. 2018.
- [31] F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish, *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. 2015.
- [32] R. Eymard, T. Gallouet, and R. Herbin, “Finite Volume Methods,” in *Handbook of Numerical Analysis*, 2019, pp. 713–1020.
- [33] L. E. Nielsen, “Rheology,” in *Polymer Rheology*, Marcel Dekker, 1977, pp. 1–3.
- [34] E. R. Nakajima, N. and Harrell, “Rheology of PVC Plastisol : Particle Size Distribution and Viscoelastic Properties 1,” *J. Colloid Interface Sci.*, pp. 105–115, 2001.
- [35] P. Fernandes, “Caracterização Reológica de Plastissóis de PVC,” 2018.
- [36] A. Paar, “Rheological characterization of PVC Plastisol,” 2018.
- [37] E. G. Barroso, F. M. Duarte, M. Couto, and M. M. Maia, “A Rheological Study of the Ageing of Emulsion,” *J. Appl. Polym. Sci.*, 2008.
- [38] P. H. Daniels, C. M. Brofman, and G. D. Harvey, “Meaningful Evaluation of Plastisol Gelation and Fusion Temperatures by Dynamic Mechanical Analysis,” *J. Vinyl Technol.*, vol. 8, no. 4, 1986.
- [39] R. A., Tomás, Gando-Ferreira, and F. L., “Rheology of Poly(vinyl chloride) Plastisol,” *J. Appl. Polym. Sci.*, 2009.
- [40] E. Mitsoullis, “Numerical Simulation of Viscoelastic Effects in Blade-Over-Roll Coating Forming Flows,” vol. 10, no. 3, pp. 156–166, 2010.

- [41] T. Sullivan, S. Middleman, and R. Keunings, "Use of a Finite-Element Method to Interpret Rheological Effects in Blade Coating," *AIChE J.*, vol. 33, pp. 2047–2056, 1987.
- [42] S. Diego and L. Jolla, "Film thickness in blade coating of viscous and viscoelastic liquids," *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 21, pp. 13–38, 1986.
- [43] F. Davard and D. Dupuis, "Flow visualisation experiments in a blade coating process," *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 93, pp. 17–28, 2000.
- [44] F. A. Morrison, *Understanding Rheology*. 2001.
- [45] C. W. Macosko, *Rheology principles, measurements, and applications*. 1993.
- [46] Microsoft, "RQUAD (Função RQUAD) - Suporte do Office." [Online]. Available: <https://support.office.com/pt-br/article/RQUAD-Função-RQUAD-D7161715-250D-4A01-B80D-A8364F2BE08F>. [Accessed: 26-Sep-2019].
- [47] D. J. Coyle, "Knife and roll coating," in *Liquid Film Coating*, no. Chapter 11, 1997, pp. 11–12.
- [48] C. Direct, "Breaking of dam." [Online]. Available: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v7-dambreak/>. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [49] J. Nagy, "Multiphase Modeling." [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=5WO2cDRB_iY&t=607s. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [50] C. Support, "Boundary Types." [Online]. Available: <https://www.cfdsupport.com/OpenFOAM-Training-by-CFD-Support/node94.html>. [Accessed: 26-Sep-2019].
- [51] OpenFOAM, "Standard boundary conditions." [Online]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/standard-boundaryconditions.php>. [Accessed: 26-Sep-2019].

9. Anexos

A. Comportamento reológico face ao processo de vácuo

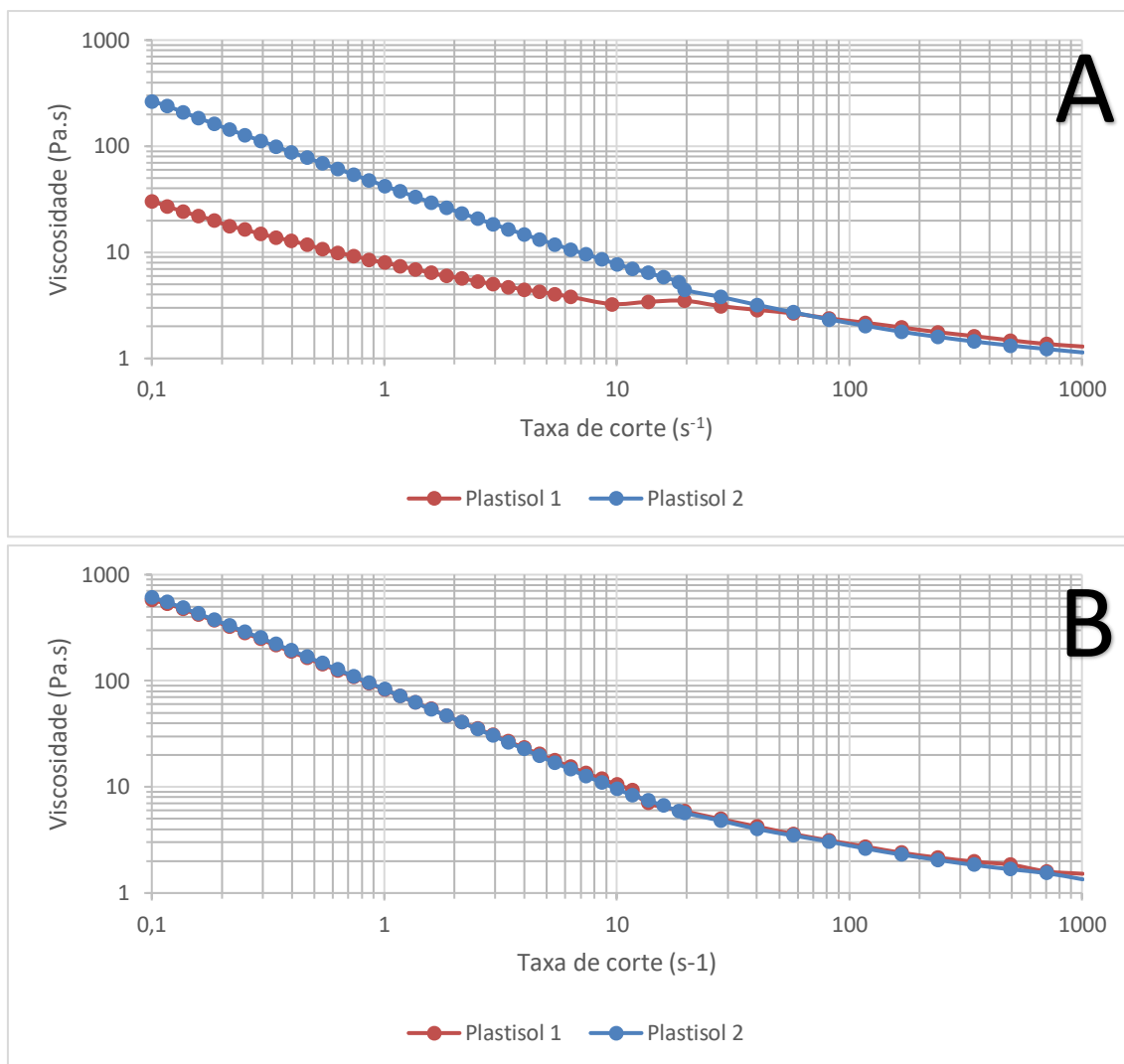


Figura 171- Avaliação do processo de vácuo no comportamento reológico dos plastissóis de PVC para a temperatura de 30°C: a) t=0 horas; b) t=216 horas.

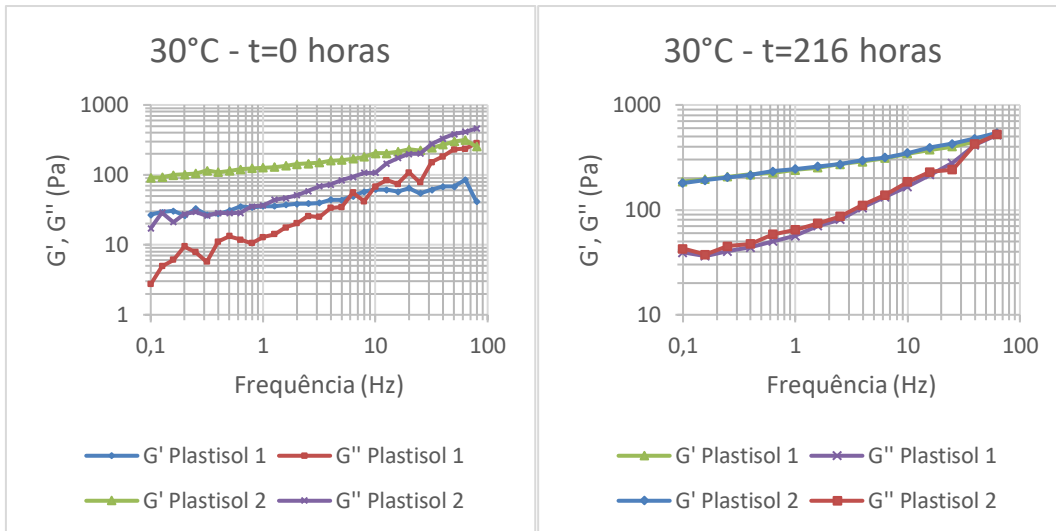


Figura 172- Avaliação do módulo elástico e viscoso face ao processo de vácuo.

B. Comportamento reológico face ao tempo de armazenamento

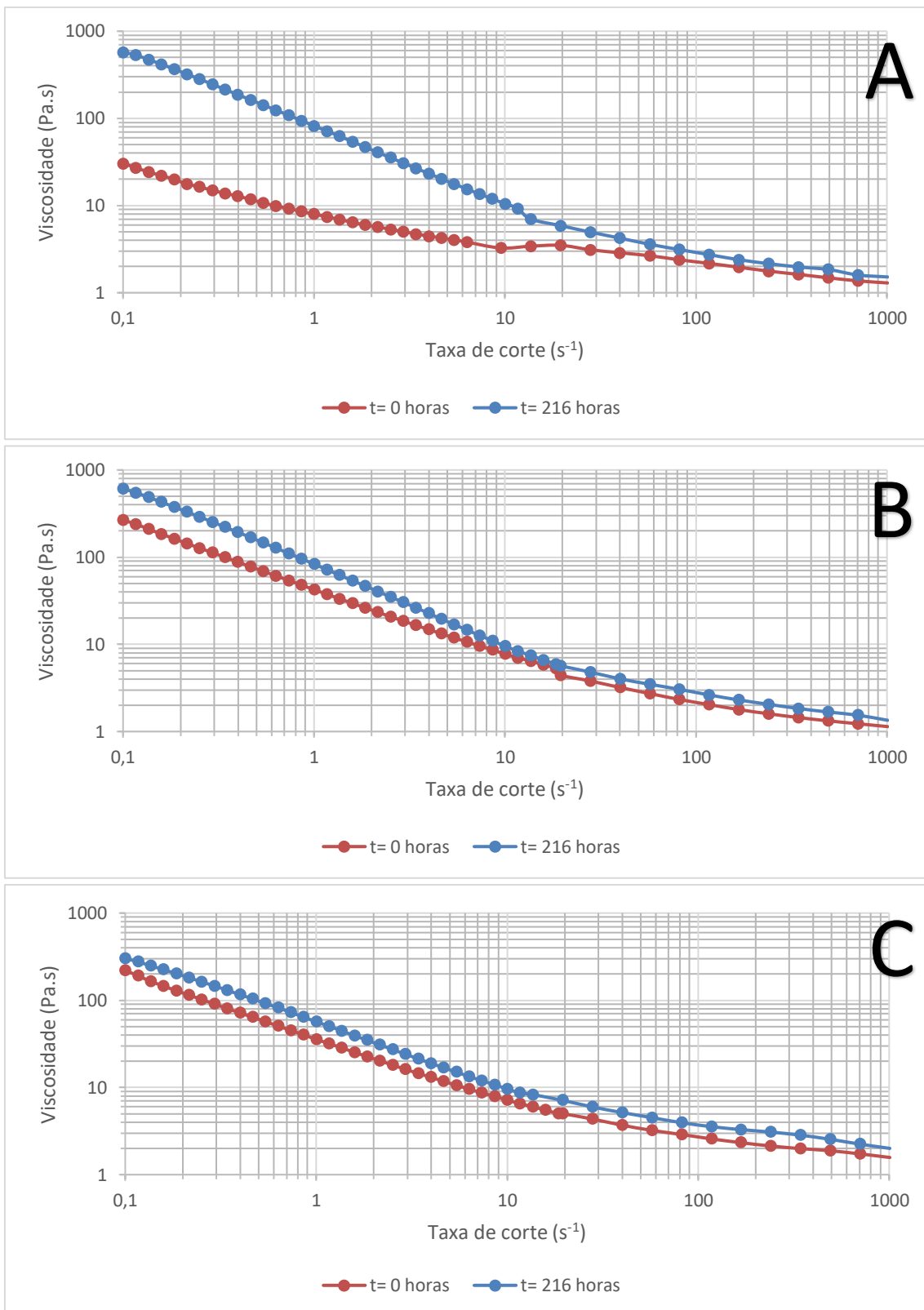


Figura 173- Influência do tempo de armazenamento para uma temperatura de 30°C: a) Plastisol 1; b) Plastisol 2; c) Plastisol 3

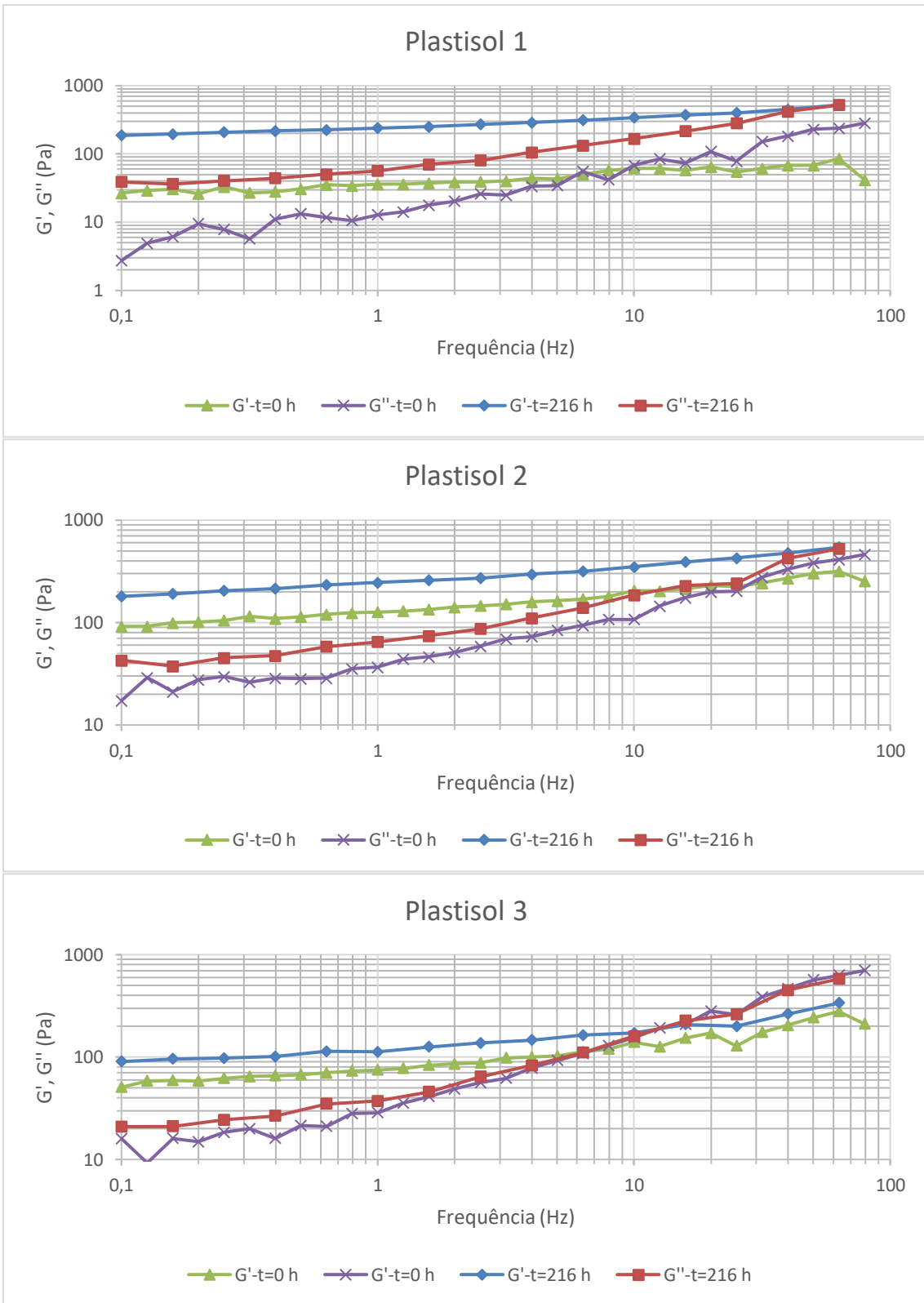


Figura 174- Avaliação dos módulos com influência do tempo de armazenamento, para uma temperatura de 30°C.

C. Estudo de refinamento da malha

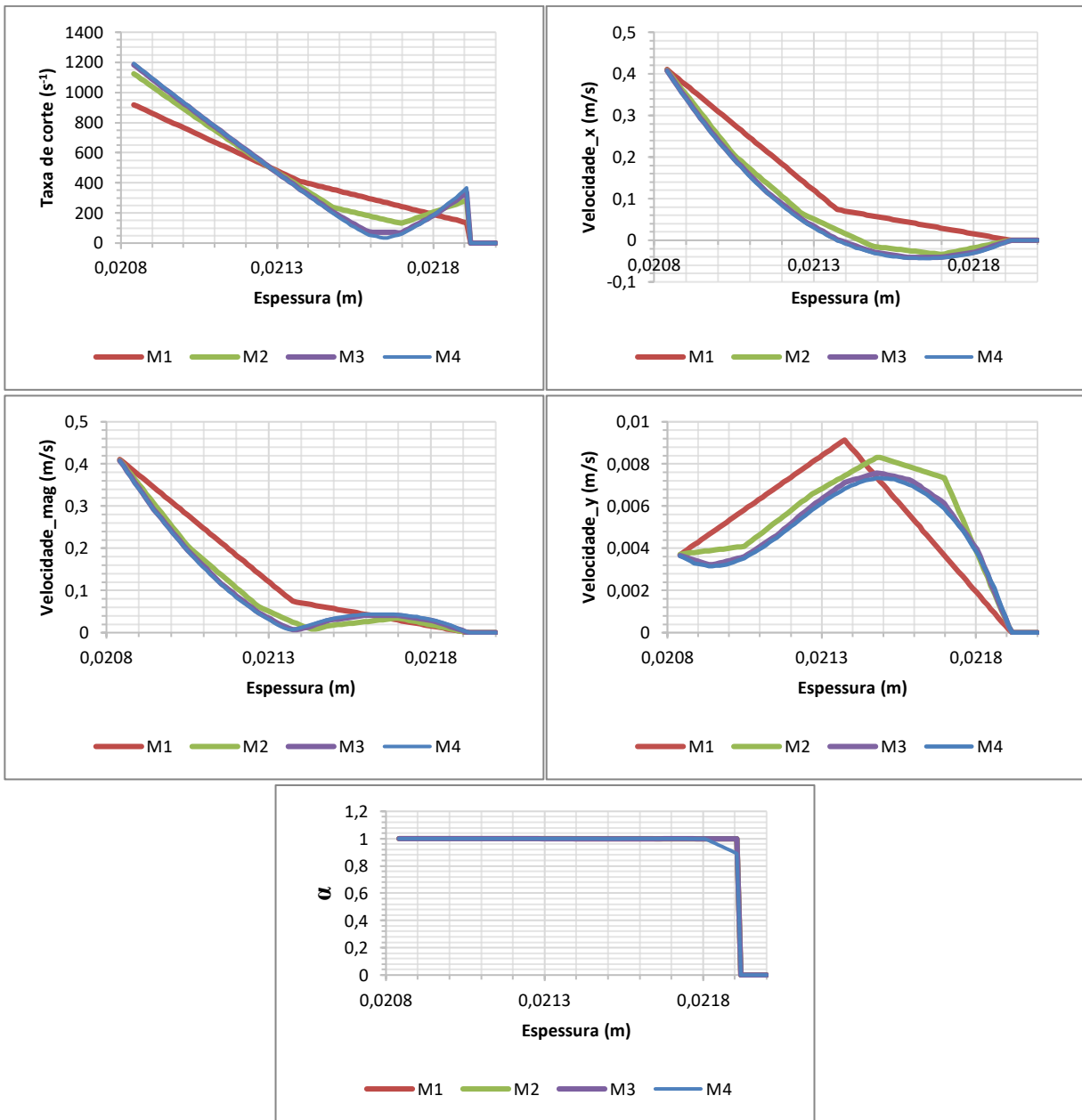


Figura 175- Estudo de refinamento da malha para a zona 1.

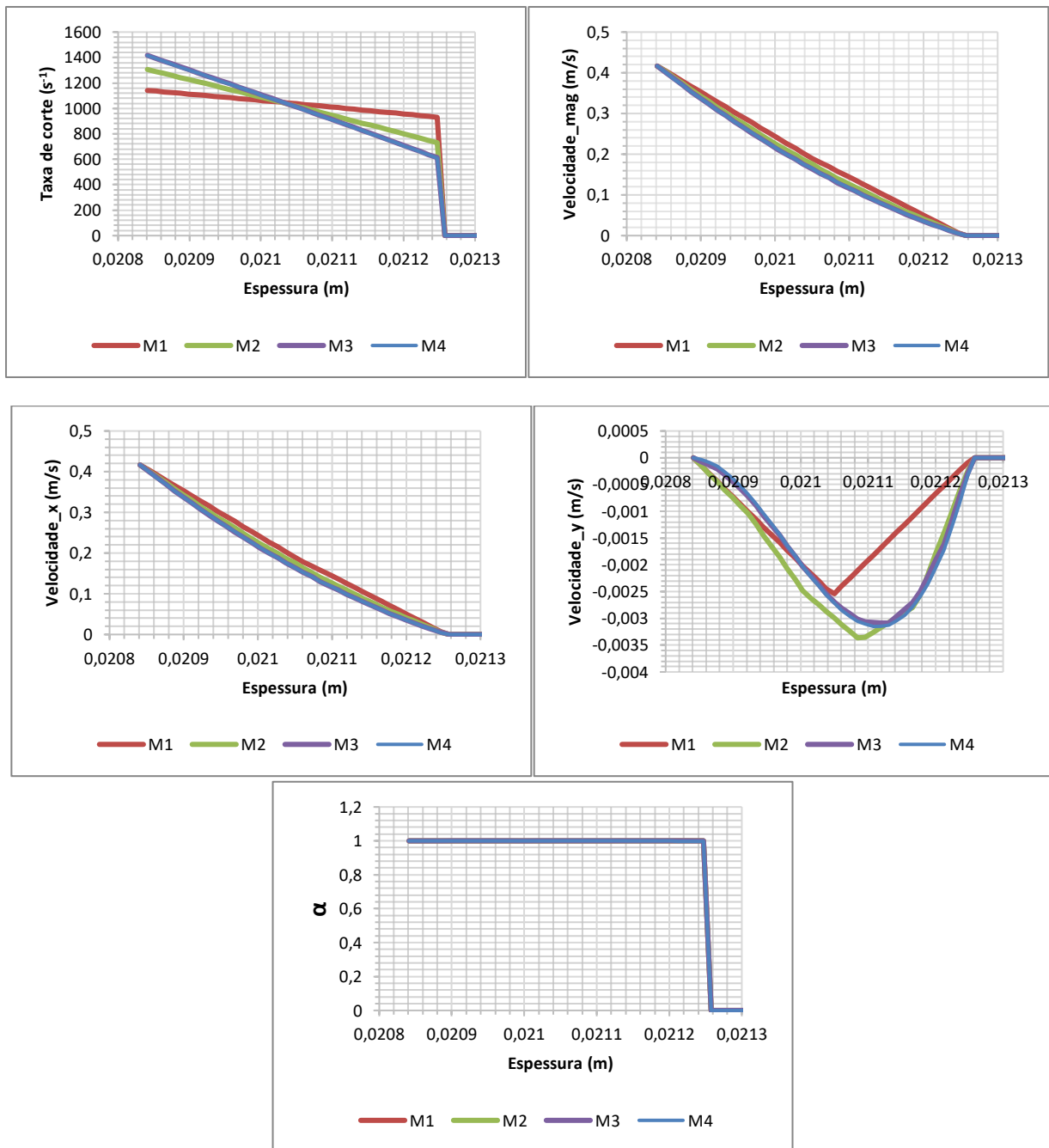


Figura 176- Estudo de refinamento da malha para a zona 3.

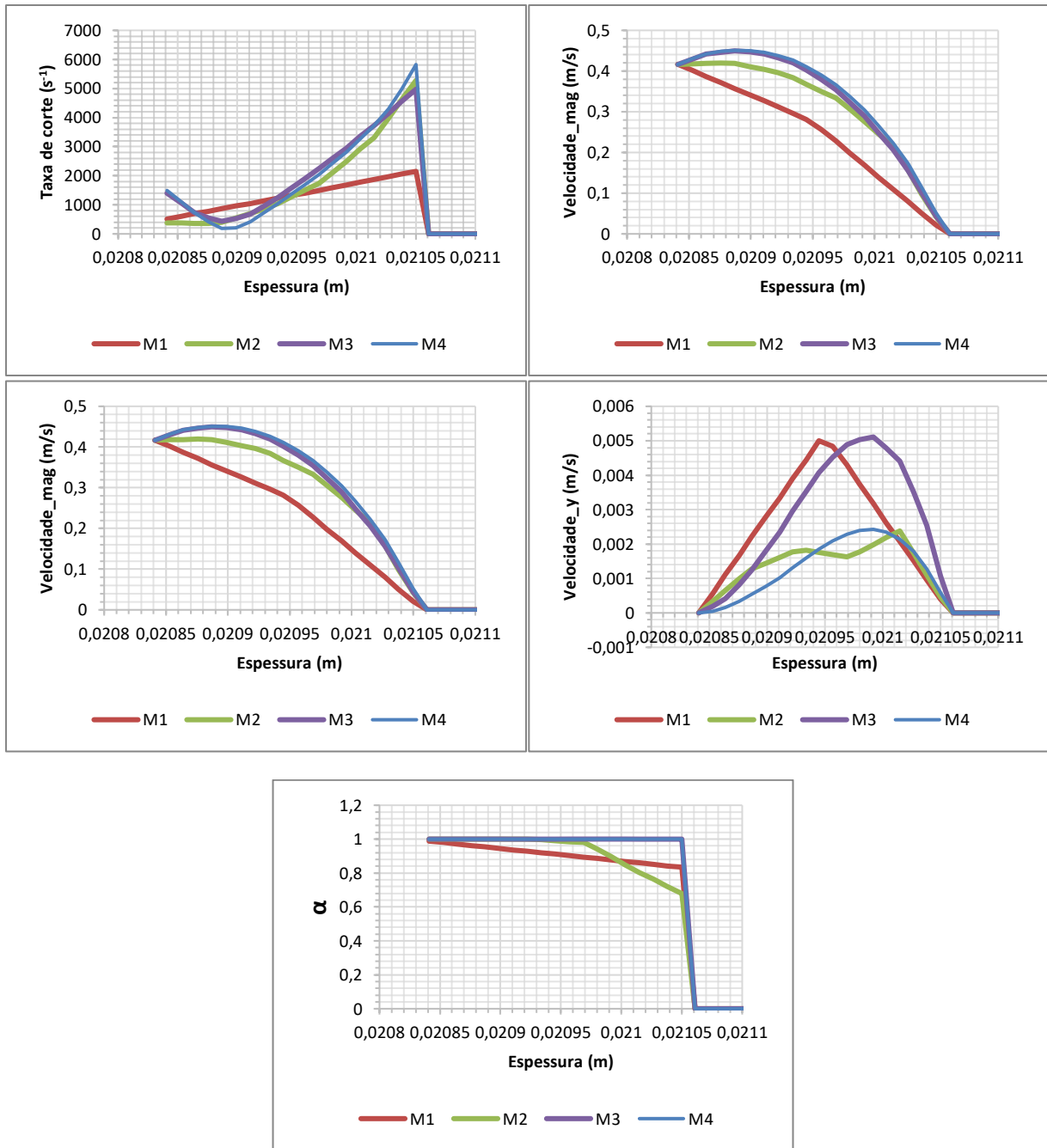


Figura 177- Estudo de refinamento da malha para a zona 4.

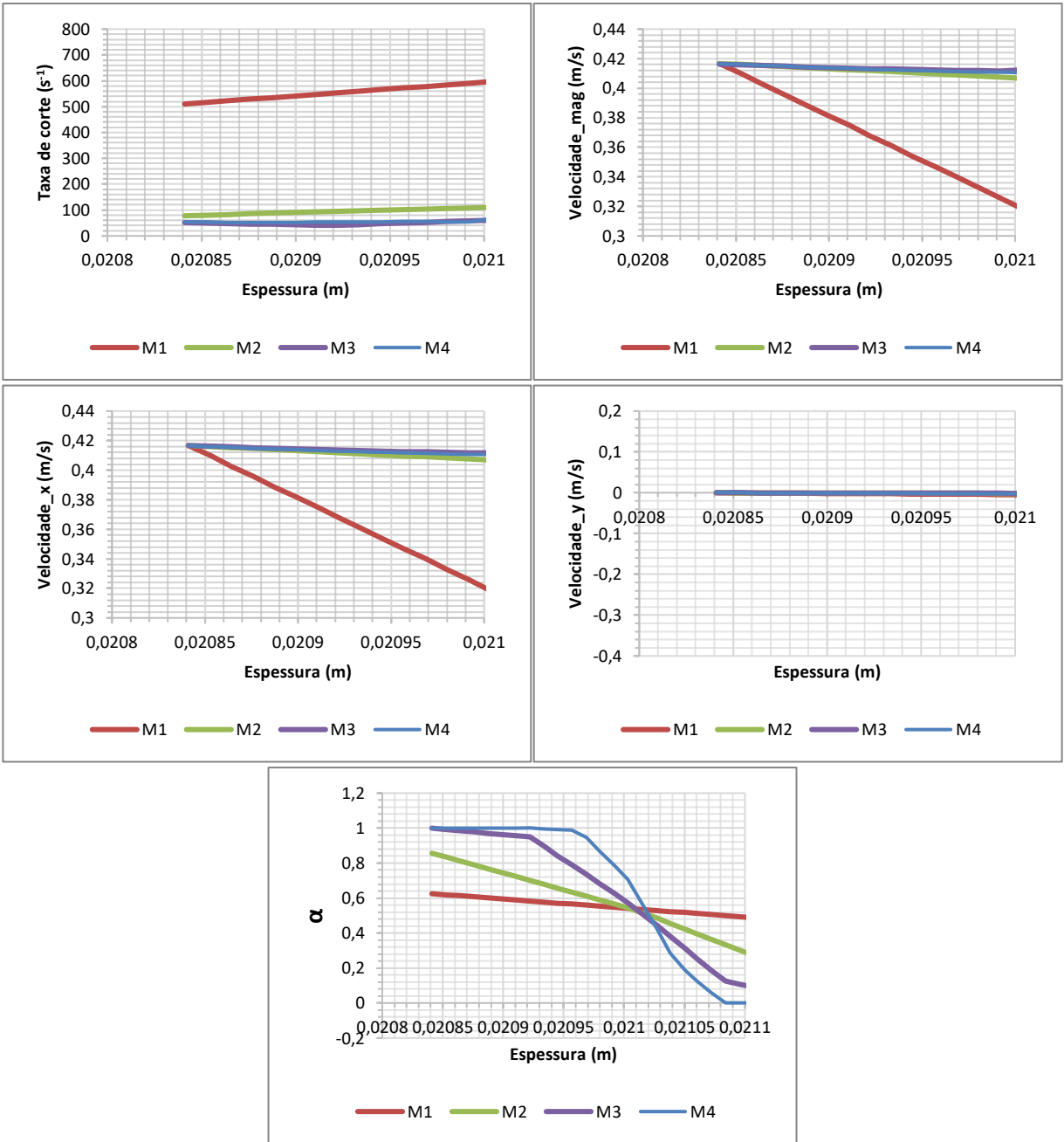


Figura 178- Estudo de refinamento da malha para a zona 5.

D. Simulação computacional

- Perfil de taxa de corte na zona mais restrita

Parâmetro	Nível	Valor máximo (s ⁻¹)	Influência
Velocidade	15 m/min	899	Elevada
	25 m/min	1449	
	35 m/min	1991	
Altura de plastisol	6 cm	1405	s/influência
	12 cm	1579	
	14 cm	1449	
Geometria	Faca 1	352	Elevada
	Faca 2	1449	
Ângulo	Padrão	1449	s/influência
	Ângulo 1	1462	
	Ângulo 2	1026	
Dosagem	120 g/m ²	3889	Elevada
	250 g/m ²	1449	
	750 g/m ²	55	
Temperatura	25°C	1449	s/influência
	30°C	1417	
Tempo	0 horas	1449	s/influência
	216 horas	1434	
Vácuo	Com vácuo	1449	s/influência
	Sem vácuo	1475	

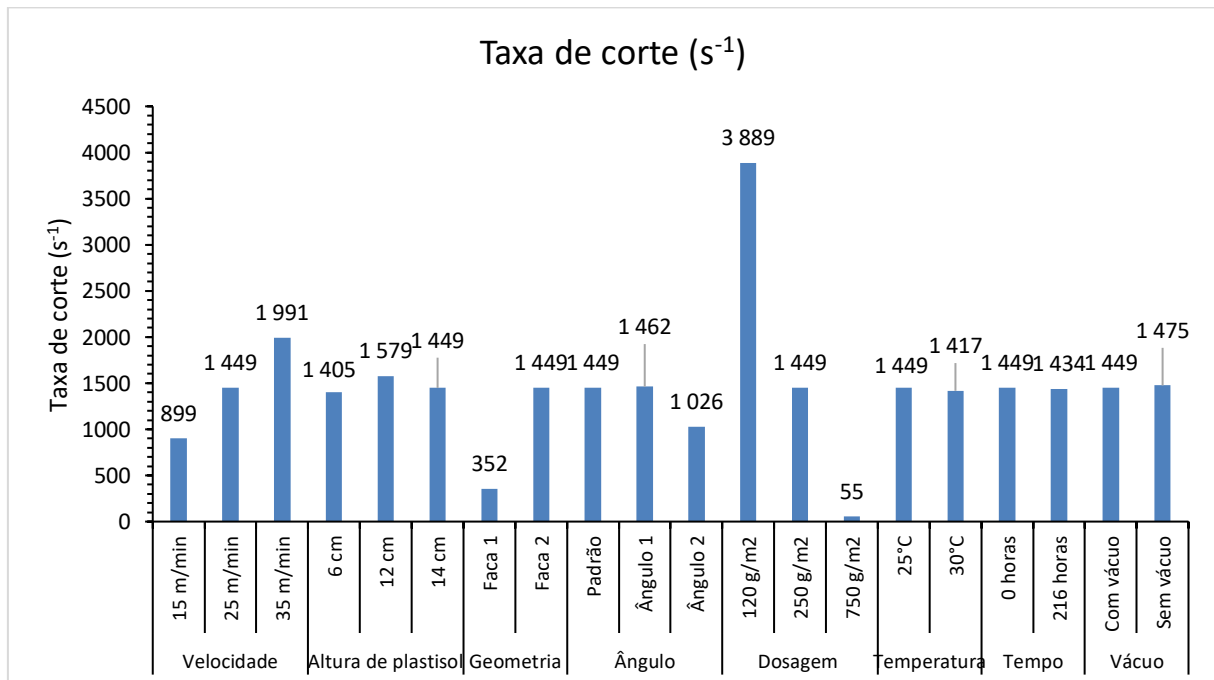


Figura 179- Avaliação da influência dos parâmetros na taxa de corte.

- Perfil de viscosidade no caleiro

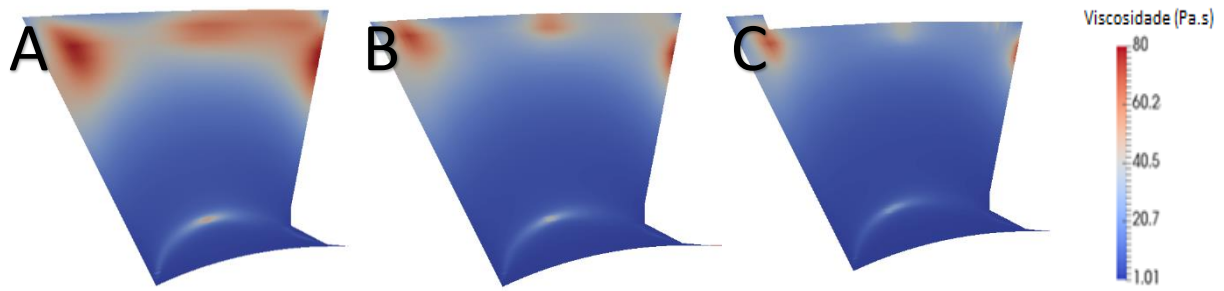


Figura 180- Influência da velocidade de processamento na viscosidade do fluido no caleiro; A) 15 m/min; B) 25 m/min; C) 35 m/min.

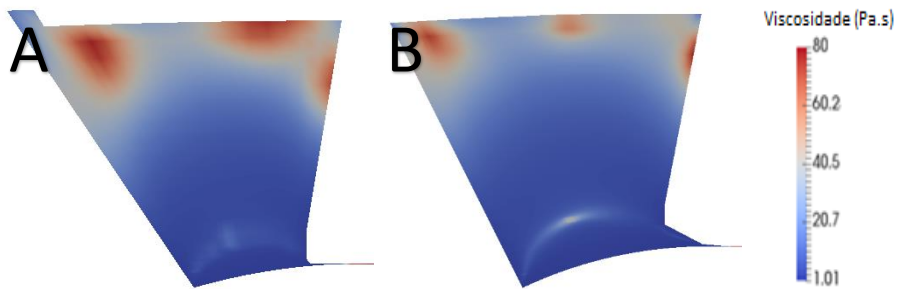


Figura 181- Influência da geometria da faca na viscosidade do fluido no caleiro; A) Faca 1; B) Faca 2.

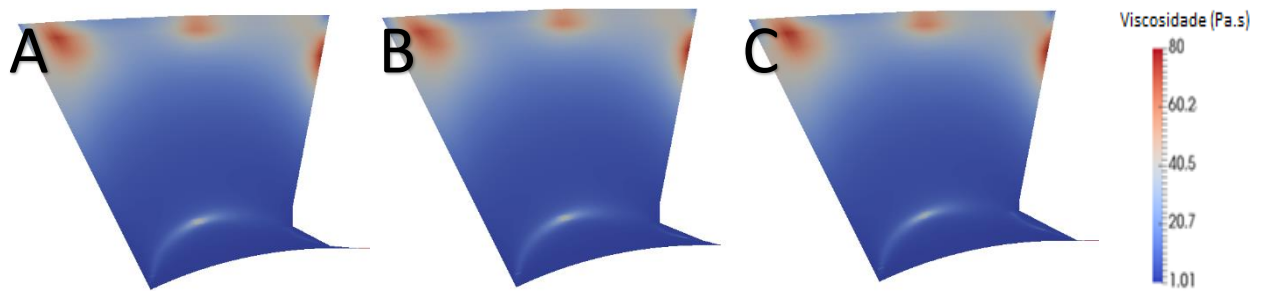


Figura 182- Influência do ângulo da faca na viscosidade do fluido no caleiro; A) Referência; B) Ângulo 1; C) Ângulo 2.

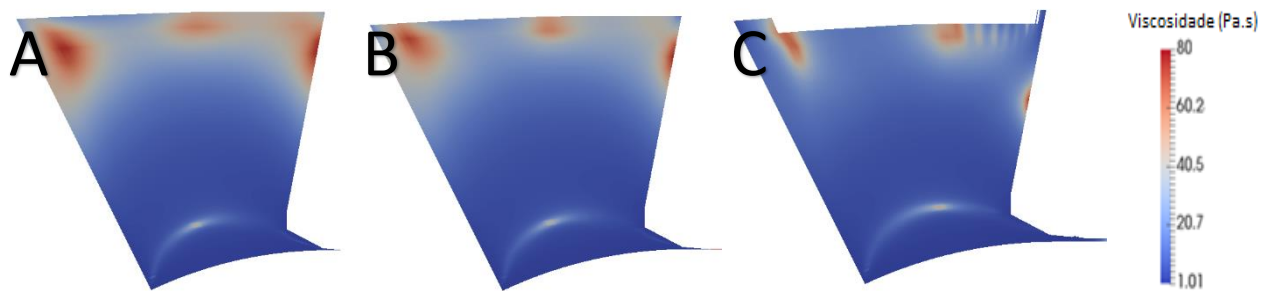


Figura 183- Influência da dosagem de plastisol aplicado na viscosidade do fluido no caleiro; A) 120 g/m²; B) 250 g/m²; C) 750 g/m².

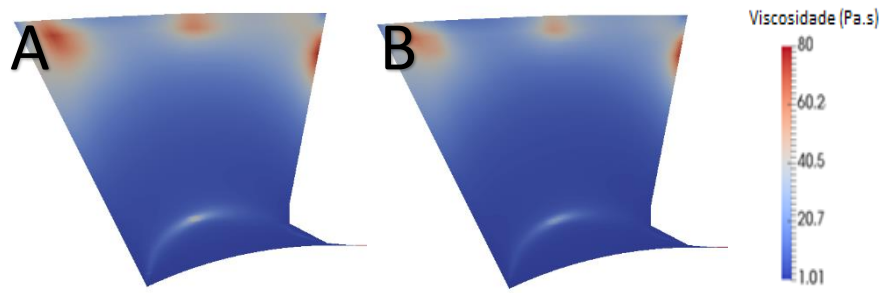


Figura 184- Influência da temperatura na viscosidade do fluido no caleiro; A) 25°C; B) 30°C.