



M 2024



SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE NA MANUFATURA AUTOMÓVEL

ANA CATARINA SOUSA MOREIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Mestrado em Engenharia Química

Simulação hidrodinâmica do processo de tratamento de superfície na manufatura automóvel

Dissertação de Mestrado

de

Ana Catarina Sousa Moreira

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

STAR Institute - Associação de Investigação, Ciência e Tecnologia Aplicadas



Orientador na FEUP: Doutor Ricardo Santos

Coordenador no STAR Institute: Doutora Mariana Domingos



agosto de 2024

Agradecimentos

Encerrar esta etapa e ultrapassar todas as dificuldades até ao momento não teria sido possível sem alguma ajuda. Desta forma, deixo os meus agradecimentos de modo particular àqueles que de perto tornaram esta dissertação possível.

Em primeiro lugar, ao Doutor Ricardo Santos por toda a disponibilidade e ajuda ao longo destes meses de trabalho. A partilha de conhecimento e experiência em Dinâmica de Fluidos Computacional foi essencial na escrita desta dissertação.

À minha orientadora Doutora Mariana Domingos, pelo incansável apoio e incentivo permanente durante todo o processo de pesquisa e desenvolvimento deste projeto.

Ao Professor José Carlos Lopes, por confiar nas minhas competências e dar oportunidade de trabalhar com o STAR Institute, deixo também o meu agradecimento.

À Isabel Fernandes, pela disponibilidade e auxílio na realização das simulações em CFD. À Doutora Margarida Brito e à ELham Delvar, pela ajuda na realização da análise reológica.

Aos meus amigos que estiveram presentes desde o primeiro dia e tornaram estes cinco anos únicos e memoráveis para sempre.

À minha família, por sempre me acompanharem e incentivarem a lutar pelos meus objetivos. Um obrigada especial à minha mãe e ao meu pai, pelo apoio incondicional, encorajamento e amor ao longo de toda a minha vida, sem eles não seria possível chegar até aqui. À minha irmã, Sofia, por ser o ombro amigo nos momentos mais difíceis. À minha avó Rosa, por sempre se orgulhar e mostrar interesse no trabalho da neta “preferida”.

Por fim, em memória do meu avô Carlos, a ele dedico esta dissertação.

O STAR Institute - Associação de Investigação, Ciência e Tecnologias Aplicadas, agradece o financiamento do aviso 03/C05-i02/2022, do investimento C05-i02 - Missão Interface - renovação da rede de suporte C&T e orientação para o tecido produtivo é financiado pelo Mecanismo de Recuperação e Resiliência da Comissão Europeia.



Resumo

O objetivo desta dissertação é entender a influência de diversos parâmetros num escoamento multifásico (líquidos imiscíveis) e consequentemente no tempo de limpeza num tanque de desgorduramento da etapa de pré-tratamento da manufatura automóvel utilizando simulação de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD).

Para isso, modelou-se a geometria paralelepípedica do tanque em duas dimensões no pacote de CFD ANSYS Fluent e estudou-se a hidrodinâmica do sistema através da variação da velocidade de entrada e da altura do tanque em estado estacionário.

Posteriormente, desenvolveu-se um modelo bidimensional de duas fases em estado transiente e recorreu-se ao método Volume de Fluido (VOF) para determinar o tempo de escoamento e as alterações na interface. Definiu-se que a fase 1 deste sistema multifásico é água e que a fase 2 corresponde a uma camada de resíduos colocadas na superfície da carroçaria metálica do automóvel. De seguida, foram atribuídos valores aos parâmetros da viscosidade e massa volúmica da fase 2, à tensão superficial entre as duas fases, ao ângulo de contacto entre a fase 2 e a superfície e à velocidade de entrada da fase 1 no tanque.

Realizaram-se as simulações CFD e analisaram-se os resultados. Verificou-se que resíduos de maior viscosidade apresentam maior resistência à deformação imposta pelo escoamento e, consequentemente, maior tempo de limpeza. A ação da tensão superficial leva a uma diminuição da área interfacial entre as fases e, por isso, reduz o tempo de limpeza. Relativamente ao efeito do ângulo de contacto, este parâmetro afeta a adesão da fase 2 à superfície sendo que quanto menor o ângulo de contacto menor a sua adesão e em consequência, menor o tempo de limpeza. Observou-se ainda que quanto menor a velocidade de entrada da fase 1, maior será o tempo de limpeza, uma vez que, o escoamento não tem energia cinética suficiente para arrastar a gordura de forma constante levando à sua acumulação. Por fim, um aumento significativo da massa volúmica da fase 2 provoca um ligeiro aumento no tempo de limpeza.

Em suma, a presente dissertação permite concluir que conhecer as características dos resíduos de sujidade é essencial para garantir uma limpeza eficaz e num intervalo de tempo ótimo. Para além disso, investir em investigação e desenvolvimento do estudo da hidrodinâmica do sistema permitirá otimizar o tempo do desgorduramento da carroçaria metálica.

Palavras-Chave (Tema):

Escoamento multifásico, desgorduramento, CFD, tempo de limpeza, tensão superficial, ângulo de contacto, viscosidade.

Abstract

The aim of this project is to understand the influence of several parameters on a multiphase flow (immiscible liquids) and cleaning time in a degreasing tank in the pre-treatment stage of automotive manufacturing, using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation.

For this purpose, the parallelepiped geometry of the tank was modeled in two dimensions using the ANSYS Fluent CFD package, and the system hydrodynamics were studied with different inlet velocities and tank heights in steady state.

Thus, a two-dimensional two-phase model was developed in transient state and the Volume of Fluid (VOF) method was employed to determine the flow time and changes at the interface. Phase 1 was defined as water and phase 2 as a layer of soil placed on the car roof. Different values were then assigned to the viscosity and density of phase 2, surface tension between the two phases, contact angle between phase 2 and the surface and inlet velocity of phase 1.

CFD simulations were carried out and the results analysed. It was found that a higher soil viscosity leads to higher resistance to the deformation applied by the flow and therefore to a slower cleaning time. The increase in surface tension reduces the interfacial area between the phases and reduces the cleaning time. Regarding the effect of the contact angle, this parameter affects the adhesion of phase 2 to the surface. Consequently, a smaller contact angle results in less wall adhesion and a shorter cleaning time. Furthermore, lower inlet velocity leads to longer cleaning time since the flow does not have enough kinetic energy to consistently drag the soil, leading to its accumulation. Finally, a significant increase in the density of phase 2 causes a slight increase in cleaning time.

To sum up, this dissertation concludes that knowing the characteristics of the soil is essential to guarantee an effective cleaning. Moreover, the investment in research and development to study the system's hydrodynamics will make it possible to optimize the degreasing time of the body-in-white.

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.



Catarina Moreira

Junho de 2024

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento e Apresentação do Projeto.....	1
1.2.	Apresentação da Empresa	2
1.3.	Contributos da autora para o trabalho	3
1.4.	Organização da Dissertação	3
2.	Contexto e Estado da Arte	4
2.1.	Processo de <i>Paint Shop</i>	4
2.2.	Etapa de Pré-Tratamento	6
2.2.1.	Pré-tratamento com fosfato tricatiónico de zinco	7
2.2.2.	Pré-tratamento de óxido de zircônio	8
2.2.3.	Desengorduramento	9
2.3.	Simulações CFD aplicada à limpeza de superfícies com desengordurantes ...	10
2.4.	Escoamento multifásico	13
3.	Materiais e Métodos.....	15
3.1.	CFD	15
3.1.1.	Modelos de turbulência	16
3.1.2.	Modelo VOF - escoamentos multifásicos.....	17
3.2.	Geometria e discretização do domínio	19
3.3.	Condições iniciais e fronteira	23
3.4.	Propriedades físicas dos materiais	24
4.	Resultados e Discussão	25
4.1.	Desenvolvimento do modelo hidrodinâmico	25
4.1.1.	Efeito da velocidade de entrada.....	25
4.1.2.	Efeito da altura	29
4.2.	Desenvolvimento do modelo de limpeza.....	30
4.2.1.	Estudo da influência da viscosidade.....	32
4.2.2.	Estudo da influência do ângulo de contacto e da tensão superficial	35
4.2.3.	Estudo da influência da velocidade de arrasto	41
4.2.4.	Estudo da influência da massa volúmica	43
5.	Conclusões.....	45
6.	Avaliação do Trabalho Realizado	46
6.1.	Objetivos Realizados.....	46
6.2.	Contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável	46
6.3.	Outros Trabalhos Realizados	47
6.4.	Apreciação Final	47
	Referências.....	48
	Apêndice A - Evolução da tecnologia de tratamento e pintura automóvel.....	51

Apêndice B - Análise reológica da solução de limpeza	53
Apêndice C - Influência da viscosidade, ângulo de contacto e tensão superficial no tempo de limpeza	55
C.1 Viscosidade	55
C.2 Ângulo de contacto e tensão superficial	58

Lista de Figuras

Figura 1: Logótipo do STAR Institute - Associação de Investigação, Ciência e Tecnologia Aplicadas. .	2
Figura 2: Unidade de produção automóvel de Mangualde, Viseu, extraído de [3].	2
Figura 3: Procedimento de paint shop numa indústria automóvel moderna, extraído de [6].	4
Figura 4: (a) Camadas e espessuras de revestimento automóvel e respetivas (b) etapas do processo paint shop, adaptado de [7].	5
Figura 5: Esquema do processo de eletrodeposição catódica, extraído de [11].	6
Figura 6: Processo de pré-tratamento com fosfato tricatiónico de zinco, extraído de [7].	7
Figura 7: Processo de pré-tratamento de óxido de zircónio, extraído de [7].	8
Figura 8: Mecanismo de remoção de óleo de superfícies por um tensoativo, extraído de [6].	10
Figura 9: Exemplo esquemático de um sistema de limpeza composto por três fases: fluído de limpeza, resíduos de sujidade e o substrato sólido, extraído de [14].	10
Figura 10: Representação dos quatro mecanismos de limpeza, extraído de [15]	11
Figura 11: Medição do ângulo de contacto numa superfície molhada, extraído de [38].	14
Figura 12: Esquema do processo de imersão do body-in-white no tanque de desgorduramento, adaptado [9].	20
Figura 13: Modelo 2D do tanque de desgorduramento.	20
Figura 14: Grelha computacional do tanque de desgorduramento.	22
Figura 15: Grelha computacional com camadas de inflação aproximadas.	22
Figura 16: (a) Linhas de corrente e (b) contorno da taxa de dissipação turbulenta para $ve = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.	26
Figura 17: (a) Linhas de corrente e (b) contorno da taxa de dissipação turbulenta para $ve = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.	27
Figura 18: (a) Linhas de corrente e (b) contorno taxa de dissipação turbulenta para $ve = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.	27
Figura 19: Contorno da fração mássica de desgordurante alcalino e tensoativo para as alturas (h) estudadas.	29
Figura 20: Mapa da fração mássica inicial da fase 1 para as simulações multifásicas.	30
Figura 21: Mapa da fração mássica final da fase 1 para as simulações multifásicas.	32
Figura 22: Contornos da fração mássica da fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.	33
Figura 23: Contornos da fração mássica da fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.	33
Figura 24: Contornos da fração mássica da fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.	34
Figura 25: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$.	34
Figura 26: Variação de m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$.	34
Figura 27: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.	36
Figura 28: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.	36
Figura 29: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.	37

Figura 30: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	37
Figura 31: Caudal mássico fase 2 para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	37
Figura 32: Caudal mássico fase 2 para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	38
Figura 33: Caudal mássico fase 2 para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	38
Figura 34: Contornos da fração mássica da fase 2 para $[4,75; 5,75] \text{ s}$, $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$...	38
Figura 35: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	39
Figura 36: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	39
Figura 37: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	39
Figura 38: Tempo de limpeza em função da viscosidade para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$	40
Figura 39: Tempo de limpeza em função da viscosidade para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$	40
Figura 40: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	41
Figura 41: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	41
Figura 42: (a) Fração mássica de fase 2 para $ve = 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e (b) fração mássica de fase 2 para $ve = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	42
Figura 43: Caudal mássico da fase 2 para as massas volúmicas estudadas, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	43
Figura 44: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para as massas volúmicas estudadas, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	44
Figura B.1: Curva de viscosidade para a solução de limpeza.....	53
Figura B.2: Curva de escoamento para a solução de limpeza.....	53
Figura B.3: Rampa de temperatura para a solução de limpeza.....	54
Figura C.1: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 90^\circ$	56
Figura C.2: Variação de m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 90^\circ$	56
Figura C.3: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 0^\circ$	56
Figura C.4: Variação de m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 0^\circ$	56
Figura C.5: Caudal mássico fase 2 para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 90^\circ$	57
Figura C.6: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 90^\circ$	57
Figura C.7: Caudal mássico fase 2 para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$	57
Figura C.8: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$	57
Figura C.9: Caudal mássico fase 2 para as viscosidades estudadas, $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 0^\circ$	58
Figura C.10: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 0^\circ$	58
Figura C.11: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	59
Figura C.12: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	59
Figura C.13: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	59
Figura C.14: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	59
Figura C.15: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	60

Figura C.16: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	60
Figura C.17: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	60
Figura C.18: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	60
Figura C.19: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	62
Figura C.20: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	62
Figura C.21: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	62
Figura C.22: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	62
Figura C.23: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	63
Figura C.24: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	63
Figura C.25: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	63
Figura C.26: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	63
Figura C.27: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	64
Figura C.28: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	64
Figura C.29: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	64
Figura C.30: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	64

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Tamanho dos elementos da malha, nº de elementos da malha, velocidade e fração mássica de tracer à saída do tanque.</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 2: Métodos selecionados no ANSYS Fluent para as simulações CFD.</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 3: Variáveis analisadas no estudo da hidrodinâmica.</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 4: Variação da fração mássica de desengordurante alcalino com tensoativo, o respetivo caudal mássico e taxa de dissipação turbulenta à saída do tanque.</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 5: Fração mássica e caudal mássico de solução de limpeza à saída do tanque para as alturas estudadas.</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 6: Tensão superficial (σ), ângulo de contacto (θ) e viscosidade da fase 2 (μ_{fase2}) utilizados para cada simulação.</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 7: Velocidade de entrada da solução de limpeza (v_e) e massa volúmica da fase 2 (ρ_{fase2}) utilizadas para cada simulação.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 8: Tempos de limpeza do tanque variando a velocidade de entrada.</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 9: Tempos de limpeza do tanque variando a massa volúmica da fase 2.</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 10: Contribuição da dissertação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.</i>	<i>46</i>
<i>Tabela C.1: Tempos de limpeza do tanque variando a viscosidade da fase 2.</i>	<i>55</i>
<i>Tabela C. 2: Tempos de limpeza para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.</i>	<i>58</i>
<i>Tabela C.3: Tempos de limpeza para $\theta = 45^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.</i>	<i>61</i>

Notação e Glossário

A	Área	m^2
h	Altura do tanque	m
l	Comprimento do tanque	m
t	Tempo	s
k	Energia cinética de turbulência	$m^2 \cdot s^{-2}$
v	Velocidade na direção yy	$m \cdot s^{-1}$
u	Velocidade na direção xx	$m \cdot s^{-1}$
p	Pressão	Pa
$\vec{v}$	Vetor velocidade	$m \cdot s^{-1}$
d_e	Diâmetro de entrada do tanque	m
v_e	Velocidade de entrada do fluido	$m \cdot s^{-1}$
$v_{saída}$	Velocidade de saída do fluido	$m \cdot s^{-1}$
Q_m	Caudal mássico	$kg \cdot s^{-1}$
x	Fração mássica	
m	Massa	kg
Re	Número de Reynolds	
G_k	Geração de energia cinética de turbulência devido aos gradientes de velocidade	
G_b	Geração de energia cinética de turbulência devido à flutuabilidade	
Y_M	Contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação global	
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	Constantes pré-definidas do modelo de turbulência $k-\varepsilon$	
S_k, S_ε	Termos de fonte definidos pelo utilizador	
C_μ, C_ν	Constantes da viscosidade turbulenta	
Δt	Intervalo de tempo	s
V_c	Volume da célula	m^3
U_f	Fluxo volumétrico através da face	$m^3 \cdot s^{-1}$
$\vec{F}$	Termos de troca de momento interfásico	
$\vec{g}$	Vetor de aceleração gravitacional	$m \cdot s^{-2}$
F_{vol}	Força por unidade de volume	$N \cdot m^{-3}$

Letras gregas

σ	Tensão superficial	$N \cdot m^{-1}$
ε	Taxa de dissipação de turbulência isotrópica	$m^2 \cdot s^{-3}$
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	$Pa \cdot s$
ν	Viscosidade cinemática do fluido	$m^2 \cdot s^{-1}$
θ	Ângulo de contacto	$^\circ$
ρ	Massa volúmica	$kg \cdot m^{-3}$
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Número de Prandtl turbulentos para k e ε	
α	Fração volúmica	
κ	Curvatura da interface	m^{-1}
ϕ	Fração da quantidade escalar	
Δx	Tamanho do elemento da mesh	m

Índices

$'$	Componente flutuante	
x	Coordenada horizontal do referencial cartesiano	m
y	Coordenada vertical do referencial cartesiano	m

<i>t</i>	Turbulento
<i>i</i>	Fase i
<i>j</i>	Fase j
<i>n</i>	Índice de contagem do intervalo de tempo

Lista de Siglas

2D	Duas Dimensões
CED	Revestimento de Eletrodeposição
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional
CSF	Modelo de força superficial contínua
ED	Eletrodeposição
KOD	Desengorduramento <i>knock-off</i>
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Apresentação do Projeto

Desde o início do século XX que a indústria automóvel evolui de forma rápida no que diz respeito ao desenvolvimento de materiais e processos de fabricação. Atualmente, o processo de manufatura automóvel apresenta diversas etapas que vão desde a montagem das peças individuais que compõem a carroçaria metálica (*body-in-white*) até à aplicação da camada de revestimento de superfície (*base coat*) que finaliza o processo de pintura de um automóvel.

O desgorduramento da carroçaria metálica acontece logo a seguir à montagem do *body-in-white* e é o primeiro passo na etapa de pré-tratamento do processo de pintura (*paint shop*). O processo de tratamento de superfície da carroçaria metálica permite uma melhor adesão do primário (*primer*) e cria uma estrutura de superfície que permite a ligação de uma camada de proteção contra corrosão. Esta etapa tem como objetivo limpar a superfície do metal, removendo resíduos e óleos remanescentes da soldagem, preparando assim o *body-in-white* para receber as camadas de pintura. Esta limpeza é feita recorrendo a uma solução desgordurante alcalina composta por sais inorgânicos responsáveis pela limpeza de contaminantes inorgânicos, tais como grãos de metal e um surfactante/tensioativo que é capaz de limpar os óleos da superfície através da redução da tensão superficial entre a superfície e os resíduos.

A carroçaria metálica é então imersa num tanque com esta solução desgordurante, mas para garantir que o desgorduramento ocorre nas condições mais apropriadas, e reduzir o tempo total necessário a este passo, é necessário avaliar quais os fatores que podem causar alterações durante o processo de limpeza. Dada a sua complexidade, uma vez que estão envolvidas múltiplas variáveis, a simulação por dinâmica de fluidos computacional (CFD) é de particular interesse neste estudo uma vez que, permite estudar a hidrodinâmica do sistema bem como o deslocamento dos resíduos da superfície metálica para o escoamento no interior do tanque.

A utilização da ferramenta de CFD possibilita a otimização e consequentemente aumento da produtividade do processo de tratamento de superfície através do estudo do impacto de fatores como a viscosidade e densidade dos resíduos, a tensão superficial, o ângulo de contacto e a velocidade de arrasto do escoamento.

O presente trabalho tem, por isso, como objetivo a simulação e o estudo da influência de diversos parâmetros no tempo necessário para desgordurar totalmente uma peça metálica utilizando simulações CFD.

1.2. Apresentação da Empresa

A presente tese foi desenvolvida no âmbito da unidade curricular de dissertação do Mestrado em Engenharia Química na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em colaboração com o STAR Institute - Associação de Investigação, Ciência e Tecnologia Aplicadas. Na Figura 1 é apresentado o logótipo do STAR Institute - Associação de Investigação, Ciência e Tecnologia Aplicadas.



Figura 1: Logótipo do STAR Institute - Associação de Investigação, Ciência e Tecnologia Aplicadas.

Fundado em 2022 e sediado em Mangualde, o STAR Institute é um Centro de Tecnologia e Inovação (CTI) que se foca essencialmente na indústria automóvel e na sequência de processos envolvidos na sua produção e distribuição. Atua em diferentes áreas de desenvolvimento como economia circular, impressão 3D, robótica, processos e tecnologias de produção [1].

Atualmente, o STAR Institute conta com diversos membros associados, entre os quais a Stellantis na qual se insere o caso de estudo desta dissertação. A Stellantis é uma empresa internacional de produção automóvel que contempla catorze marcas mundialmente conhecidas, como Peugeot, Citroën e Opel e possui uma unidade de produção em Mangualde, Viseu. O centro de produção de Mangualde foi construído no ano de 1962 pelo grupo Stellantis, na altura denominado grupo PSA e desde o início da sua atividade que a quantidade e modelos de veículos produzidos aumenta de forma substancial a cada ano. No ano de 2022 saíram de linha de produção da Stellantis Mangualde cerca de 77 422 veículos, um valor que representa um crescimento de 14% face a 2021 [2], [3].

A Figura 2 apresenta a etapa de ferragem da produção automóvel realizada na unidade de Mangualde.



Figura 2: Unidade de produção automóvel de Mangualde, Viseu, extraído de [3].

O centro de produção de Mangualde divide-se em vários setores do processo de fabricação automóvel, desde ferragem, pintura, montagem, qualidade e logística [4].

1.3. Contributos da autora para o trabalho

Todo o trabalho descrito ao longo da dissertação, nomeadamente, a construção da geometria e malha, simulações CFD e respetiva discussão de resultados foi realizado pela autora, sob a orientação do Doutor Ricardo Santos e da Doutora Mariana Domingos. A Elham Delvar contribuiu para a análise reológica da solução de limpeza.

1.4. Organização da Dissertação

A presente dissertação é composta por 6 capítulos, incluindo o capítulo introdutório, Contexto e Estado da Arte, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão, Conclusões e por fim, Avaliação do trabalho realizado.

Na Introdução é feita uma pequena apresentação dos problemas associados ao tema da dissertação e qual o objetivo da sua pesquisa. É introduzido o tema da manufatura automóvel, quais as etapas que se incluem neste processo e qual o interesse da implementação de ferramentas da dinâmica de fluidos computacional como meio de otimização das diversas fases deste processo. Faz-se ainda uma breve referência à empresa para a qual este projeto foi realizado.

O capítulo correspondente ao Contexto e Estado da Arte aborda de maneira mais pormenorizada as etapas do processo *paint shop* da pintura automóvel e os mecanismos de limpeza. Por fim, menciona-se aplicações de CFD para o estudo da limpeza de superfícies com desgordurantes e faz-se uma curta apresentação aos sistemas multifásicos.

O capítulo três, intitulado Materiais e Métodos, descreve os modelos de turbulência e VOF utilizados nas simulações CFD. É ainda neste capítulo que se apresenta o método de construção da grelha computacional e a sua discretização, as condições iniciais e fronteira e as propriedades dos materiais utilizados.

Nos Resultados e Discussão, primeiro é validado o modelo hidrodinâmico sem a presença da camada de gordura, alterando a velocidade de entrada e a profundidade do tanque. De seguida, é introduzida a camada de gordura e desenvolvido o modelo de limpeza para, por fim, se avaliar a influência das variáveis estudadas, tais como viscosidade, ângulo de contacto, tensão superficial, velocidade de entrada e massa volúmica da gordura no tempo de limpeza da carroçaria metálica.

A Conclusão encerra a presente dissertação mostrando as principais conclusões deste projeto. No último capítulo, Avaliação do trabalho realizado, é feito um balanço do trabalho realizado ao longo do processo de pesquisa e escrita da dissertação. Finalmente, avalia-se a contribuição da dissertação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

2. Contexto e Estado da Arte

Desde o início do século XX que a indústria automóvel tem registado uma enorme evolução no que diz respeito ao desenvolvimento de materiais e processos de fabricação. Atualmente, o processo de fabrico automóvel é composto por três passos fundamentais: ferragem, processo de *paint shop* e montagem. Na primeira etapa, as peças que fazem parte da carroçaria são soldadas formando o “*body-in-white*”. Após a montagem do *body-in-white* este segue para a etapa de *paint shop* onde são limpas as impurezas remanescentes da etapa anterior e são aplicadas as duas camadas de revestimento de superfície (*base coat* e *clear coat*). Por fim, o automóvel é encaminhado para a linha final de montagem onde são instalados os componentes internos do veículo como o motor, suspensão, sistemas elétricos, portas e janelas [5], [6].

No Apêndice A é abordada de forma mais pormenorizada a evolução do processo de revestimento (*paint shop*) da superfície metálica ao longo do século XX até à atualidade.

2.1. Processo de *Paint Shop*

O processo de “*paint shop*” de um automóvel moderno inclui cinco fases de revestimento: pré-tratamento, eletrodeposição (CED), camada de *primer* e as duas camadas de revestimento de superfície (*base coat* e *clear coat*). Todas estas fases de revestimento envolvem processos de cura ou secagem, nos quais as camadas revestidas com tinta húmida são convertidas numa película seca [5].

Na Figura 3 é apresentado o processo de *paint shop* numa indústria automóvel moderna.

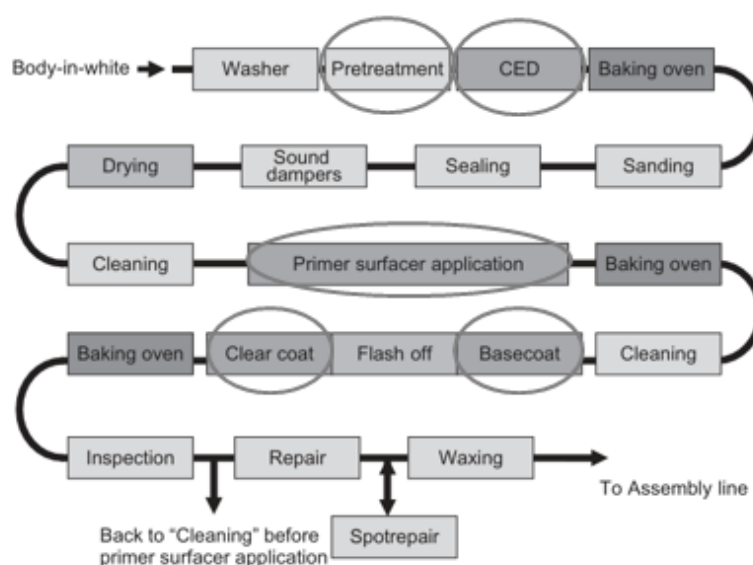


Figura 3: Procedimento de *paint shop* numa indústria automóvel moderna, extraído de [6].

Cada uma destas camadas tem as suas próprias propriedades e espessura, bem como diferentes funções de acabamento e proteção. A Figura 4 apresenta as diferentes camadas de revestimento aplicadas no processo de *paint shop* de um automóvel e respectivas espessuras-tipo.

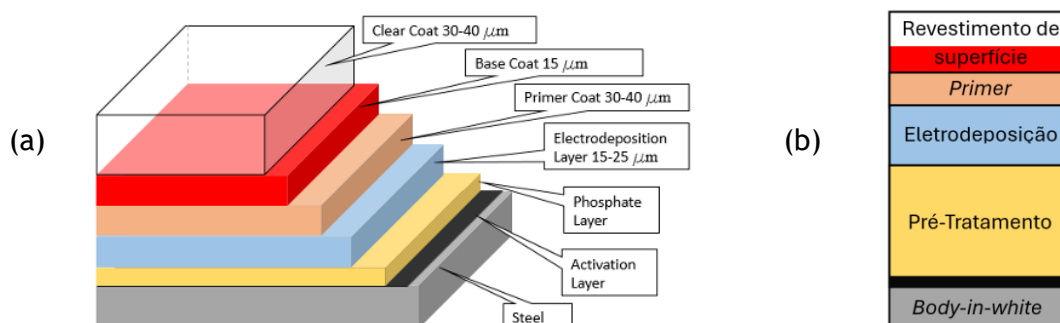


Figura 4: (a) Camadas e espessuras de revestimento automóvel e respectivas (b) etapas do processo *paint shop*, adaptado de [7].

A etapa de pré-tratamento tem como objetivo limpar a superfície do metal, removendo resíduos de soldagem e óleos remanescentes do processo de estampagem resultando em duas camadas: a camada de ativação (*activation layer*) e a camada de fosfatação (*phosphate layer*). Esta etapa ajuda o *primer* a aderir ao metal, cria uma estrutura de superfície que permite a ligação de uma camada de proteção contra corrosão e prepara a superfície metálica para receber as restantes camadas de pintura [8].

Na etapa de ED, ocorre a deposição da camada de prevenção contra a corrosão. A eletrodeposição catódica envolve a imersão da peça metálica, carregada negativamente, na solução de revestimento, carregada positivamente, e a passagem de uma corrente elétrica através da carroçaria e da solução líquida de eletrodeposição. A tinta de eletrodeposição, através de uma diferença de potencial, é promovida para se ligar ao substrato metálico, penetrando em locais que um spray não alcançaria. O aumento da camada de revestimento numa determinada região do *body-in-white* conduz ao aumento da sua resistência elétrica e, inibe a deposição excessiva de revestimento em zonas localizadas da superfície metálica. O processo de eletrodeposição irá, por isso, continuar para as regiões onde a eletrodeposição ainda não ocorreu, produzindo uma espessura de revestimento uniforme. Os revestimentos catódicos oferecem um elevado desempenho, uma vez que têm a capacidade de cobrir completamente um objeto metálico mesmo a sua morfologia sendo complexa e ainda apresentam uma excelente resistência à corrosão [8], [9], [10], [11].

Um esquema do processo de eletrodeposição catódica é apresentado na Figura 5.

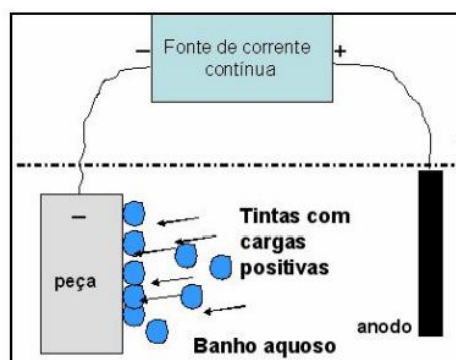


Figura 5: Esquema do processo de eletrodeposição catódica, extraído de [11].

Antes do *primer* é aplicada uma película de revestimento *underbody*, por exemplo policloreto de vinilo (PVC), é realizada principalmente no capot, à volta e no interior das portas, nas juntas metálicas e na zona das rodas traseiras da carroçaria. Este revestimento ajuda garantir a anti-corrosão e minimiza o ruído e vibração que são transferidos do motor, do sistema de suspensão, da unidade de tração para o compartimento dos passageiros do automóvel [5], [8].

O *primer*, promove a adesão entre a superfície e o *base coat*, melhora a aparência da pintura, proporciona propriedades anti-lascagem e resistência às intempéries. Podem ser aplicados *primers* à base de solvente, à base de água ou em pó. *Primers* à base de água têm melhores propriedades termoplásticas e são mais duráveis. Por outro lado, *primers* à base de solvente produzem um acabamento mais duro e mais tolerante a condições adversas durante o período de secagem. Já os *primers* em pó são compostos quase exclusivamente por materiais não voláteis, sendo, desta forma, mais ecológicos.

Por fim, a aplicação dos revestimentos de superfície que consiste em duas camadas - *base coat* e *clear coat*. Estas duas últimas camadas possuem, respetivamente, o pigmento de coloração que dá cor ao automóvel e providenciam um acabamento uniforme e com brilho, protegem ainda contra a degradação causada pelos raios UV e fornecem uma camada protetora de resistência ao meio [5], [8].

2.2. Etapa de Pré-Tratamento

Ao dispor das empresas da indústria automóvel estão diferentes formas de pré-tratamento, contudo, os processos que são tradicionalmente escolhidos pelas mesmas utilizam fosfato de ferro ou fosfato tricatiónico de zinco. Com o aumento das preocupações ambientais, entre elas reduzir o uso de energia e água surgiram desenvolvimentos para substituir estas tecnologias tradicionais. Assim, foi introduzido o processo de revestimento de conversão de nova geração baseado em zircônio [7], [12].

2.2.1. Pré-tratamento com fosfato tricatiónico de zinco

Os processos de pré-tratamento à base de fosfato de ferro podem incluir até cinco zonas de processamento: desgorduramento, remoção de ferrugem (quando constituído por um único metal), ativação de superfície, fosfatação e passivação [13].

Estes processos são habitualmente usados para peças que exigem um acabamento de longa duração, mas que não são expostas a ambientes severamente corrosivos, uma vez que, os fosfatos de ferro proporcionam uma menor proteção contra a corrosão do que os fosfatos de zinco [13].

Os sistemas de pré-tratamento com fosfato de zinco para além de proporcionarem uma maior durabilidade às peças metálicas quando submetidas a ambientes corrosivos, têm a capacidade de revestir metais mistos (aço, alumínio, etc.). De modo, a diminuir o impacto ambiente e melhorar o desempenho, os processos de pré-tratamento de zinco sofreram desenvolvimentos nos últimos anos para operar em temperaturas mais baixas e se tornarem isentos de nitritos e níquel [12].

Na Figura 6 são apresentadas as etapas do processo de pré-tratamento com fosfato tricatiónico de zinco.

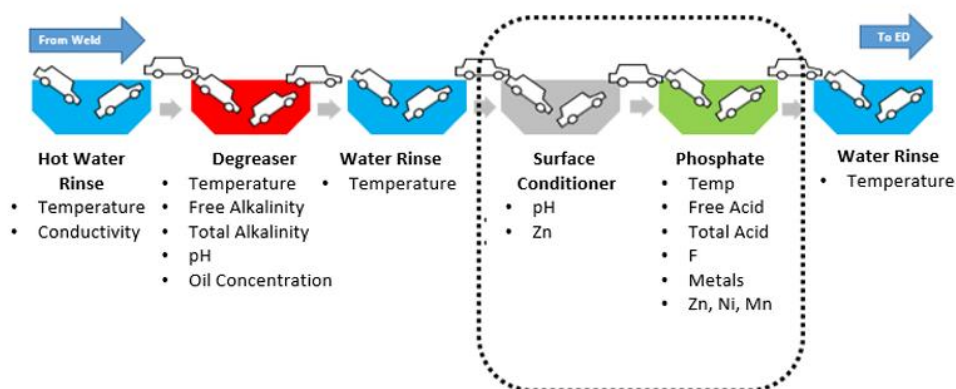


Figura 6: Processo de pré-tratamento com fosfato tricatiónico de zinco, extraído de [7].

O processo de pré-tratamento com fosfato de zinco inicia-se pelo desgorduramento em duas fases, uma primeira fase de pulverização seguida de uma segunda fase de imersão do *body-in-white*. Nesta etapa do pré-tratamento é essencial ter em consideração a alcalinidade total da solução de desgorduramento e a temperatura dos tanques onde ocorrem estas etapas [13].

De seguida, a ativação da superfície é realizada recorrendo a uma dispersão coloidal fracamente alcalina do complexo de titânio. Ocorre, na superfície metálica, a formação de um grande número de cristalitos mais finos de titânio que atuam como núcleos de cristais para o crescimento de cristais finos de fosfato de zinco durante a fase de fosfatação. Desta

forma, refinando o tamanho dos cristais do revestimento de fosfato de zinco, é possível controlar o peso do revestimento durante a fase de fosfatação [13].

O *body-in-white* segue depois para a etapa de fosfatação. O primeiro passo desta etapa é a decapagem da superfície metálica utilizando ácido fosfórico livre, o consumo de iões de hidrogénio leva a uma alteração de pH na camada de difusão adjacente à superfície do metal. Desta forma, os limites de solubilidade são ultrapassados e ocorre a precipitação de fosfato de zinco. São utilizadas formulações de fosfatos tricatiónicos que contêm iões manganês (Mn), níquel (Ni) e baixa concentração de iões de zinco (Zn). A reação de formação do revestimento depende ainda em grande parte do ácido livre, do ácido total, da concentração de agentes oxidantes, da temperatura do tanque de fosfatação e do tempo de deposição da superfície metálica. Nesta etapa, dependendo dos metais que constituem o sistema, podem ser adicionados aditivos que auxiliam a formação do revestimento de conversão no substrato. Por exemplo, a adição de flúor ao banho otimiza o revestimento de conversão em alumínio e/ou zinco [7], [12].

A última fase deste pré-tratamento, proporciona estabilidade adicional à superfície fosfatada através da vedação parcial dos poros no revestimento de fosfato de zinco, melhorando a resistência à corrosão. Para isso, durante o processo de passivação, a superfície metálica é enxaguada com soluções contendo crómio hexavalente (VI) e/ou crómio trivalente (III) [6], [7], [13].

2.2.2. Pré-tratamento de óxido de zircônio

O processo de pré-tratamento baseado em zircônio não contém zinco, níquel ou manganês. Este processo forma na superfície metálica um revestimento amorfo de óxido de zircônio mais fino que os tradicionais revestimentos de conversão de fosfato de ferro ou zinco [7], [12].

Na Figura 7 são apresentadas as etapas do processo de pré-tratamento com óxido de zircônio (ZrO_2) tanto para adaptação de instalações existentes (*Brown field*) como para novas instalações (*Green field*).

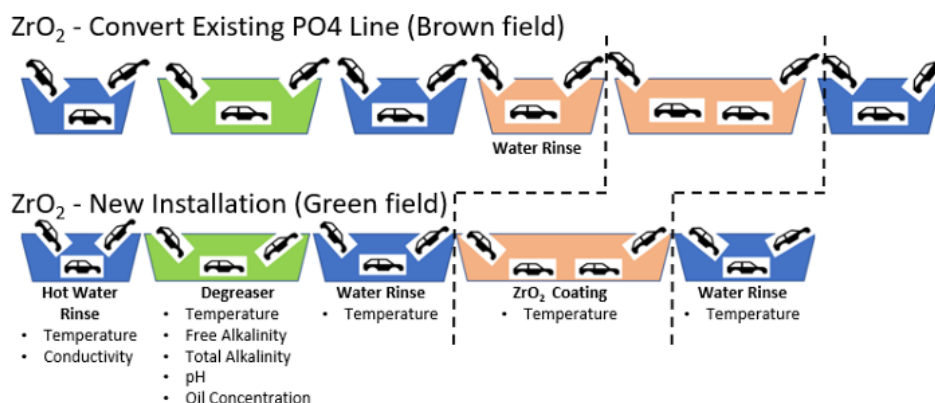


Figura 7: Processo de pré-tratamento de óxido de zircônio, extraído de [7].

Tal como o processo de pré-tratamento com fosfato de zinco o *body-in-white* é sujeito à etapa de desgorduramento. Contrariamente, este processo pode ser realizado à temperatura ambiente e não necessita de um tanque de ativação de superfície, sendo por isso, realizado em menos etapas. Na forma mais simples (*green field*) o processo consiste em apenas cinco fases, duas químicas e três de limpeza com água. Desta forma, existe uma redução do consumo de água e energia. Para além disso, o óxido de zircônio exige menos requisitos de filtração e ainda é considerado menos tóxico. Diz-se assim, que o processo de pré-tratamento de óxido de zircônio apresenta diversas vantagens em comparação com o processo via fosfato de zinco [6], [7], [12].

Atualmente o processo de fosfatação utilizado pela Stellantis na sua fábrica de produção automóvel localizada em Mangualde é uma instalação *green field* do pré-tratamento com óxido de zircônio.

2.2.3. Desgorduramento

Esta dissertação focar-se-á no estudo do tempo de escoamento do passo de desgorduramento do pré-tratamento automóvel.

O desgorduramento durante o processo de pré-tratamento tem a finalidade de remover todos os tipos de contaminações da superfície metálica como resíduos provenientes da soldadura do *body-in-white* ou do processo de estampagem e obter uma superfície que é capaz de formar a camada de conversão, isto é o revestimento de fosfato, dentro de um intervalo de tempo razoável [6], [8].

A solução desgordurante alcalina é composta por sais inorgânicos e por compostos orgânicos designados por surfactante/ tensioativo. Os sais inorgânicos, por exemplo, por hidróxido de sódio (NaOH), silicatos e fosfatos condensados, removem contaminantes inorgânicos e pigmentares, como grãos de metal e resíduos da etapa de soldagem. O tensioativo, contem um grupo hidrofílico, solúvel em água, e um grupo hidrofóbico, tipicamente um alquil de cadeia longa que remove óleos, lubrificantes e outros possíveis contaminantes orgânicos [6], [8].

Na Figura 8 é apresentado o mecanismo de remoção de óleo da superfície metálica do automóvel por um tensioativo.

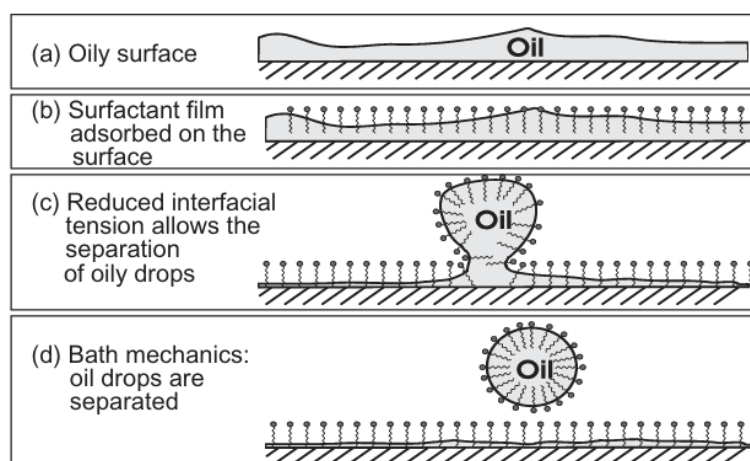


Figura 8: Mecanismo de remoção de óleo de superfícies por um tensoativo, extraído de [6].

Em primeiro lugar, o tensoativo é adsorvido na superfície que integra o óleo e, de seguida, a redução das tensões superficiais permite remover da superfície as gotículas de óleo. Os tensoativos utilizados atualmente nesta indústria são não iónicos devido à sua melhor conformidade ambiental [6].

A zona de desengorduramento normalmente consiste em duas etapas, sendo a primeira de pulverização conhecida como o desengorduramento *knock-off* (KOD) seguindo-se por uma etapa de imersão [13].

2.3. Simulações CFD aplicada à limpeza de superfícies com desengordurantes

Os processos de limpeza estão presentes na maioria das atividades humanas, seja nas atividades domésticas ou na atividade industrial à grande escala. No entanto, a remoção de depósitos semelhantes a filmes é ainda um desafio em consequência da necessidade de otimização dos processos de limpeza por razões ambientais e económicas [8], [14].

Um sistema de limpeza é habitualmente composto por três fases: 1) um fluido de limpeza (*cleanser flow*); 2) os resíduos de sujidade (*soil*), que podem apresentar diferentes reologias e 3) um substrato sólido (*substrate*) onde estes resíduos estão depositados. Estas três fases apresentam-se representadas esquematicamente na Figura 9 a azul, castanho e cinzento, respetivamente [14], [15].



Figura 9: Exemplo esquemático de um sistema de limpeza composto por três fases: fluido de limpeza, resíduos de sujidade e o substrato sólido, extraído de [14].

O comportamento do sistema de limpeza é determinado pela interação entre todos os elementos que o compõe. Quando a substância de limpeza é um líquido, os processos físico-químicos subjacentes aos problemas de limpeza são determinados pela mecânica de fluidos, fenómenos de transporte e dinâmica interfacial que permitem compreender e modelizar e, com isso, fazer uma previsão da eficácia dessa limpeza [14], [15].

Fryer e Asteriadou (2009) [16] e Joppa et al. (2020) [17] identificaram quatro mecanismos de limpeza: dissolução difusiva, separação coesiva, deslocação viscosa e o descolamento adesivo. Numa situação real, podem estar presentes simultaneamente mais do que um destes mecanismos [15], [18].

Na Figura 10 são apresentados esquematicamente os quatro mecanismos de limpeza.

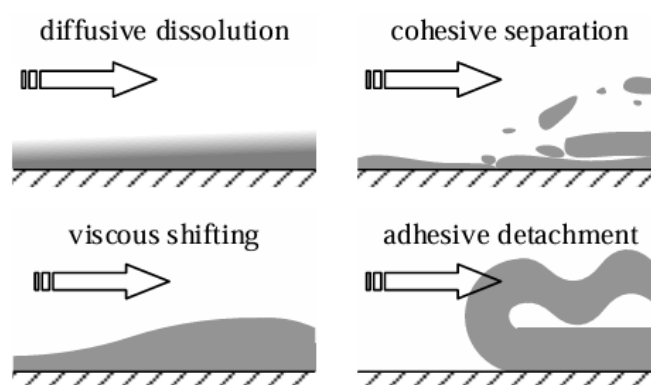


Figura 10: Representação dos quatro mecanismos de limpeza, extraído de [15] .

Segundo Köhler et al. (2019) [15] o processo de dissolução difusiva (*diffusive dissolution*) é impulsionado pelo transporte difusivo de moléculas do resíduo sólido através da camada limite para o fluxo principal, onde a uma velocidade de fluxo suficientemente alta, domina o transporte convectivo. Este mecanismo de limpeza ocorre para combinações específicas onde os resíduos são solúveis no fluido de limpeza.

No mecanismo de separação coesiva (*cohesive separation*) ultrapassada a força de coesão no interior dos resíduos e ocorre a erosão sucessiva da camada de sujidade. Para partículas muito pequenas, o transporte de partículas próximas da camada dos resíduos é semelhante à dissolução difusiva. No caso de partículas com maiores dimensões é necessária mais investigação experimental e modelação numérica. Gradoń (2009) descreve com maior pormenor o processo deste mecanismo designadamente a ressuspensão de partículas de sujidade em substratos com multicamadas [15], [18], [19].

No mecanismo de deslocamento viscoso (*viscous shifting*), os resíduos de sujidade correspondem a fluidos ou têm de se tornar fluidos por processos como imersão, transferência de calor ou reações químicas. O fluxo da camada dos resíduos de sujidade é determinado pelas suas propriedades reológicas e pelas forças hidráulicas do fluido de

limpeza que pode ser simulado como uma única fase. Considerando como condição fronteira a interação do fluido de limpeza e a camada dos resíduos de sujidade, existe uma velocidade diferente de zero para o fluido de limpeza na interface entre os dois. Neste mecanismo, é importante considerar a tensão de cedência e o comportamento não newtoniano do escoamento. O processo de limpeza de dois fluídos imiscíveis, como o caso da remoção de vaselina pela água, é um exemplo do mecanismo de alteração de viscosidade. Wilson et al. (2014) [20] investigou o mecanismo da alteração da viscosidade num sistema de limpeza de vaselina por jatos de água onde a camada de resíduos é muito espessa em relação à película de fluido [15], [20].

Por fim, o descolamento adesivo (adhesive detachment) é dominado por dois processos sobrepostos. Numa primeira fase, a difusão do fluido de limpeza nos resíduos de sujidade leva ao inchaço e à alteração das propriedades do mesmo, sendo que quando o fluido de limpeza atinge a interface resíduos-substrato, ocorre a alteração da adesão entre os dois. De seguida, é introduzida uma tensão mecânica como resultado do fluxo do fluido de limpeza. Quando ultrapassada a adesão, os resíduos desprendem-se do substrato e são transportados pelo fluxo de limpeza. Zhao et al. [21] determinaram que a energia livre da superfície do substrato sólido é fator determinante para determinar a adesão dos resíduos [15], [18].

A modelação da remoção dos resíduos para todos os mecanismos de limpeza anteriormente mencionados pode ser abordada através de simulações de escoamento multifásico com resolução temporal e espacial completa em softwares de CFD. Esta ferramenta permite não só o desenvolvimento como a otimização da remoção de resíduos indesejáveis em diversos processos industriais, embora enfrente desafios à sua utilização regular no dia-a-dia da indústria devido à complexidade associada que requiere elevadas quantidades de recursos computacionais e, podendo demorar muito tempo a serem concluídas [14], [15], [18]. Ainda assim, no contexto de investigação e desenvolvimento, é possível encontrar alguns trabalhos que recorreram à simulação numérica para melhor compreensão de design de processos de limpeza. Seguindo a classificação do mecanismo de limpeza proposta por Köhler et al. (2019) [15], Joppa et al. (2017, 2019) desenvolveu um modelo físico-numérico para simular a limpeza por dissolução difusiva ou separação coesiva de pequenas partículas de resíduo, tratando-o como uma condição fronteira do sistema, e desse modo levando a uma redução do tempo computacional. Este modelo foi validado recorrendo a uma experiência laboratorial em que removia uma camada de amido de uma superfície de aço inoxidável assim como, num trabalho seguinte, resíduos de proteína de soro de leite. O modelo não utiliza quaisquer correlações empíricas é, por isso, possível que possa ser aplicado para diferentes configurações de escoamentos e resíduos. Köhler et al. (2021) propuseram um modelo semelhante que permite a simulação do processo de acumulação

de resíduos e descolamento adesivo, que foi posteriormente expandido para 3D para o caso de remoção de resíduos num canal com uma expansão súbita [22]. Este modelo usa equações de quantidade de movimento de escoamento com resíduos de determinada resistência, e propõe-se ser uma melhoria face ao proposto por Wilson et al. 2014 [20] para previsão do raio de limpeza por utilização de jatos. Estes estudos, contudo, não abordam o mecanismo de limpeza com base no deslocamento viscoso. Trabalhos envolvendo simulação numérica para limpeza com presença de deslocamento viscoso foram publicados por Fernandes [23] para resíduos viscoelásticos e por Fernandes e Wilson (2020) [24] onde a remoção era feita com aplicação de jatos perpendiculares à superfície, condição que não é aplicável ao caso de imersão da carroçaria automóvel no tanque de desengorduramento.

2.4. Escoamento multifásico

No mundo da engenharia conhecer e entender o comportamento de escoamentos multifásicos (sistemas de transporte de gás natural, escoamento em biorreatores) é de extrema importância, para isso, são frequentemente utilizadas estratégias analíticas e numéricas de modo a prever o seu comportamento. É designado por escoamento multifásico qualquer sistema de escoamento de fluidos composto por mais do que uma fase que flui simultaneamente [25], [26].

Os escoamentos multifásicos podem ser classificados de acordo com o estado das diferentes fases, isto é, em sistemas compostos por duas fases estes podem ser divididos em mistura gás-sólido, mistura gás-líquido, mistura líquido-sólido e líquido imiscível.

A tensão superficial e o ângulo de contacto são características determinantes para entender o comportamento de sistemas multifásicos.

A tensão superficial (σ) resulta de forças atrativas entre as moléculas de um fluido. Corresponde à força que atua na interface da superfície livre de um líquido para equilibrar as forças de atração para dentro (coesão) com as forças de pressão para fora (pressão atmosférica, p.e.), de modo a manter a estabilidade. Em fenómenos de escoamento em que ocorre a separação das fases do sistema, atua para minimizar a energia livre ao diminuir a área da interface, isto porque, uma menor área de interface implica uma menor energia livre associada à superfície. Desta forma, pode dizer-se que a tensão superficial é quantidade de energia livre de Gibbs, a uma temperatura, pressão e composição constantes, necessária para alterar a área de interface de um determinado sistema, sendo quantitativamente descrita como o trabalho por unidade de área, $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ou força por unidade de comprimento da interface em $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ [25], [27].

A força de adesão à parede é uma consequência da diferença de pressão resultante da tensão superficial e relaciona as forças que atuam entre os fluidos e a superfície sólida na qual estão em contacto [28]. De maneira a modelar a adesão da mistura líquido-líquido a

uma superfície sólida é necessário especificar o ângulo de contacto (θ). O ângulo de contacto, θ , é definido como o ângulo formado entre a superfície sólida e a tangente à interface entre as restantes fases e a superfície sólida, medido no interior de uma das fases e pode ter valores que variam entre 0 e 180°. Com base no ângulo de contacto medido, é possível determinar a molhabilidade da superfície.

A Figura 11 são apresentados os ângulos de contacto de acordo com as propriedades de molhabilidade de uma superfície.

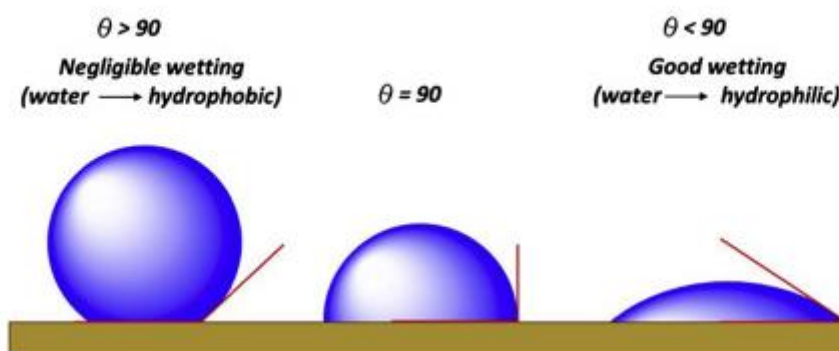


Figura 11: Medição do ângulo de contacto numa superfície molhada, extraído de [38].

Quando um líquido entra em contacto com um sólido e ocorre o espalhamento do líquido ao longo da superfície do sólido aplica-se o termo molhagem. Nesses casos, o ângulo de contacto na superfície é inferior a 90° e a superfície sólida é classificada como hidrofílica e os fluidos como molhantes, enquanto valores superiores a 90° é denominada hidrofóbica (fluidos não molhantes). Um ângulo de contacto de 90° corresponde a um efeito de não adesão à parede, ou seja, a interface é normal à parede adjacente [25], [26], [27]

3. Materiais e Métodos

3.1. CFD

As simulações CFD têm por base os princípios de conservação de massa e de conservação da quantidade de movimento (Segunda Lei de Newton), que são aplicados no domínio do espaço e do tempo de modo a prever o comportamento e as características do escoamento de fluidos [25].

Para um escoamento bidimensional, incompressível e em estado estacionário, o balanço mássico é dado pela equação de continuidade (Equação 3.1):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

Onde u e v correspondem à velocidade nas direções xx e yy , respetivamente.

O balanço à quantidade de movimento, é dado pelas equações de Navier-Stokes

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

Onde ν e ρ correspondem à viscosidade cinemática e à massa volúmica do fluido, respetivamente e p corresponde à pressão.

No caso de regimes de escoamento turbulento existem flutuações aleatórias da velocidade e da pressão em várias direções e magnitudes. Por isso, recorre-se às equações Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) que correspondem a uma forma das equações de Navier-Stokes, em que as equações são calculadas em média no tempo para todas as escalas turbulentas, com o objetivo de produzir soluções estatisticamente mais estáveis (Franke et al. 2004). Estas introduzem termos adicionais na equação de quantidade de movimento, que representam o efeito das flutuações turbulentas no escoamento médio. Estes novos termos são designados por tensões de Reynolds e podem ser modelizados através de diferentes modelos de turbulência. Estes modelos consistem em decompor as equações de Navier-Stokes em componentes médias e flutuantes, geralmente descrito por

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.3)$$

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.4)$$

as Equações (3.3) e (3.4) são a decomposição das componentes da velocidade e de outras quantidades escalares, como a pressão, energia ou a concentração de espécies químicas (designadas por ϕ), respetivamente.

3.1.1. Modelos de turbulência

O primeiro modelo k- ε a ser desenvolvido foi proposto por Launder e Spalding (1972) [29] e corresponde ao modelo k- ε padrão. Tendo em conta a sua robustez, precisão razoável e baixo custo este é amplamente utilizado em simulações industriais de fluxo e de transferência de calor. Este modelo de turbulência trata-se de um modelo semi-empírico e tem por base as equações de transporte para a energia cinética da turbulência (k) e a sua taxa de dissipação (ε), dadas por

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.6)$$

Em que, G_k é a geração de energia cinética de turbulência devido aos gradientes de velocidade, G_b a geração de energia cinética de turbulência devido à flutuabilidade. Y_M representa a contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação global, os valores de $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ são constantes pré-definidas. σ_k e σ_ε correspondem aos números de Prandtl turbulentos para k e ε , respetivamente, obtidos a partir de ensaios experimentais para regimes turbulentos fundamentais. S_k e S_ε são termos de fonte definidos pelo utilizador.

Por fim, μ_t , corresponde à viscosidade turbulenta e é dada por

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

Onde C_μ corresponde a uma constante.

Na derivação do modelo é considerado um fluxo turbulento e os efeitos da viscosidade molecular são negligenciados, assim, o modelo k- ε padrão é válido apenas para escoamentos totalmente turbulentos. À medida que as vantagens e desvantagens do modelo k- ε padrão se tornaram conhecidas, foi necessário introduzir modificações para melhorar o seu desempenho. Dessa foram desenvolvidos os modelos k- ε realizável e k- ε RNG.

O modelo de turbulência utilizado nas simulações CFD desta dissertação foi o modelo k- ε realizável, por isso, é o modelo descrito em maior detalhe.

O modelo de turbulência k- ε realizável foi proposto por Shih et al. (1995) e difere do modelo k- ε padrão em dois aspetos. Em primeiro lugar, adota uma nova formula de viscosidade turbulenta com a variável C_μ proposta por Reynolds (1987), para além disso, utiliza uma nova equação para ε com base na derivada da equação dinâmica da flutuação da vorticidade ao quadrado médio. O termo "realizável" significa que o modelo satisfaz

restrições matemáticas sobre as tensões de Reynolds, consistentes com a física dos escoamentos turbulentos. Nenhum dos modelos k-ε padrão ou k-ε RNG são realizáveis.

As equações da energia cinética e da taxa de dissipação para o modelo k-ε realizável, respetivamente são:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon\end{aligned}\quad (3.8)$$

A viscosidade turbulenta, μ_t , é igualmente dada pela Equação (3.7), mas ao contrário dos outros métodos, C_μ não representa uma constante e é expressa por uma função das taxas médias de deformação e rotação, da velocidade angular de rotação do sistema e dos campos de turbulência (k e ε). C_μ é dada pela Equação (3.9).

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k U^*}{\varepsilon}} \quad (3.9)$$

Em que

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.10)$$

E

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k, \quad \Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k, \quad (3.11)$$

Onde $\bar{\Omega}_{ij}$ corresponde ao tensor da velocidade média de rotação num referencial móvel com a velocidade angular ω_k . As constantes A_0 e A_S são dadas por:

$$A_0 = 4,04, \quad A_S = \sqrt{6} \cos \varphi \quad (3.12)$$

Em que

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \sqrt{6} W, \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S}^3 = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.13)$$

Este modelo foi validado para uma vasta gama de escoamentos, por exemplo escoamentos de cisalhamento homogêneos rotacionais, escoamentos livres incluindo jatos e camadas de mistura, escoamentos em canal e em camada limite, tendo sempre revelado melhor desempenho do que o modelo padrão k-ε [30], [31].

3.1.2. Modelo VOF - escoamentos multifásicos

O modelo volume de fluido (VOF) é normalmente utilizado para descrever escoamentos de fluidos multifásicos. É um modelo capaz de seguir a interface de dois ou mais fluidos através da resolução de uma única equação de quantidade de movimento utilizando as propriedades da mistura de ambas as fases e, desta forma, rastrear a fração de volume de

cada um dos fluidos em todo o domínio. Este rastreamento é feito considerando a célula computacional e a fração de volume, definido como α , que é ocupada por uma determinada fase. As frações de volume de todas as fases somadas igualam a unidade, por isso, quando a fração de volume é 1 diz-se que a célula está totalmente preenchida com a fase considerada, se 0 for o valor da fração de volume então é porque se encontra vazia. No caso de o valor da fração do volume estar compreendida entre 0 e 1 a célula contém a interface entre as fases [25], [32], [33].

A equação base (conservação de massa) do método VOF para sistemas de duas fases é a Equação (3.14).

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.14)$$

Em que, ρ corresponde à massa volúmica da mistura e $\vec{v}$ ao vetor da velocidade.

A viscosidade, a massa volúmica e a velocidade da mistura podem ser determinadas consoante a fração de volume de cada fase, pelas seguintes leis:

$$\mu = \mu_i \alpha_i + \mu_j \alpha_j \quad (3.15)$$

$$\rho = \rho_i \alpha_i + \rho_j \alpha_j \quad (3.16)$$

$$v = \frac{1}{\rho} [\rho_i \alpha_i v_i + \rho_j \alpha_j v_j] \quad (3.17)$$

A letras i e j correspondem, respetivamente, à fase i e j .

Através da resolução da equação da continuidade da fração volumétrica de uma das fases da mistura é possível seguir a interface das mesmas, que pode ser expressa como:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i \vec{v}) = 0 \quad (3.18)$$

A Equação (3.18) designada também por equação da fração de volume, pode ser resolvida através de discretização explícita ou implícita no tempo. Neste projeto foi utilizado o esquema explícito uma vez que, é o mais adequado para calcular soluções dependentes do tempo e simulações em que a tensão superficial é importante para um cálculo exato da curvatura na região de contacto. A discretização temporal explícita da equação da fração de volume é apresentada na Equação (3.19).

$$\sum_f (\rho_i U_f^n \alpha_{i,f}^n) + \frac{\alpha_i^{n+1} \rho_i^{n+1} + \alpha_i^n \rho_i^n}{\Delta t} V_c = 0 \quad (3.19)$$

onde Δt corresponde ao intervalo de tempo, V_c é o volume da célula, os índices n e $n + 1$ são os valores temporais anteriores e atuais das variáveis, respetivamente, e U_f diz respeito ao fluxo de volume através da face, com base na velocidade normal.

A equação de quantidade de movimento depende das frações de volume de todas as fases através das propriedades viscosidade e massa volúmica, pode ser escrita como na Equação (3.20).

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.20)$$

onde p representa a pressão que é partilhada pelas fases e $\vec{g}$ o vetor de aceleração gravitacional. $\vec{F}$ corresponde aos termos de troca de momento interfásico, incluindo as forças interfaciais que resultam da interação entre as fases. T indica a transposta do vetor gradiente de velocidade.

Nas simulações realizadas no âmbito deste trabalho, a tensão superficial foi considerada como a força interfásica dominante no escoamento multifásico e a contribuição dos restantes efeitos (flutuação, lubrificação da parede, reações, etc.) foi desprezada.

Proposto por Brackbill et al. [34], o modelo de força superficial contínua (CSF) interpreta a tensão superficial como um efeito contínuo e tridimensional através de uma interface, em vez de uma condição fronteira na interface. Assim, os efeitos da tensão superficial são modelizados pela adição de um termo de força volumétrica na equação de quantidade de movimento.

A força volumétrica, para sistemas multifásicos, é dada por

$$F_{vol} = \sum_{\text{pares } ij, i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i \kappa_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (3.21)$$

onde κ é a curvatura da interface e σ_{ij} corresponde à tensão interfacial entre as fases i e j . Para sistemas contendo apenas duas fases, a expressão anterior $\kappa_i = -\kappa_j$ e $\nabla \alpha_i = -\nabla \alpha_j$, pode ser simplificada para

$$F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (3.22)$$

Neste modelo, κ é definido por

$$\kappa_i = \nabla \cdot \hat{n} = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \alpha_i}{|\nabla \alpha_i|} \right) \quad (3.23)$$

Em que, $\hat{n}$ é o vetor normal unitário.

Para as simulações em que se defina um valor de tensão superficial entre as fases, o termo $\vec{F}$ na equação de quantidade de movimento é dado pela Equação (3.22) [25], [32].

3.2. Geometria e discretização do domínio

As simulações efetuadas para o estudo da transferência de massa na superfície do automóvel mergulhado no tanque de desengorduramento foram realizadas utilizando o software CFD ANSYS Fluent 2024 R1, em que a respetiva geometria e malha necessárias às simulações foram construídas no Design Modeler e no Meshing disponíveis no Ansys Workbench 2024 R1.

Neste estudo foi considerada uma secção transversal de um tanque paralelepípedo onde se faz a imersão do *body-in-white* do automóvel, para o seu desengorduramento. A secção considerada foi aquela acima do tanque imerso conforme se encontra destacado na Figura 12.

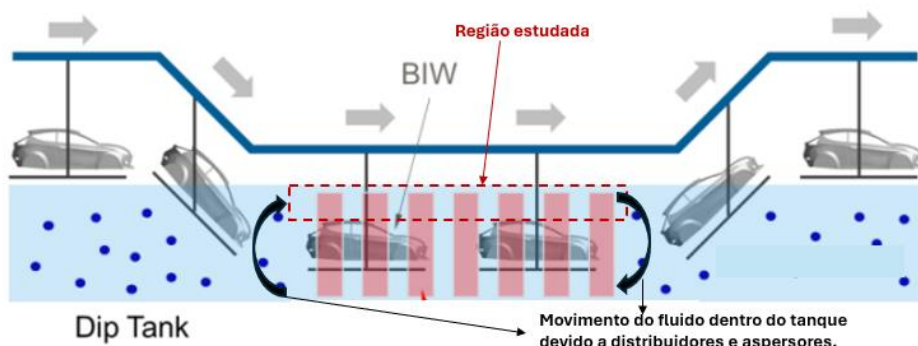


Figura 12: Esquema do processo de imersão do *body-in-white* no tanque de desengorduramento, adaptado [9].

Esta secção possui 0,4 m de altura (h), 2 m de comprimento (l) e uma área total de 0,8 m², em concordância com o que o registado na fábrica da Stellantis em Mangualde.

Tal como apresentado na Figura 13, a geometria é uma simplificação 2D do tanque anteriormente mencionado.

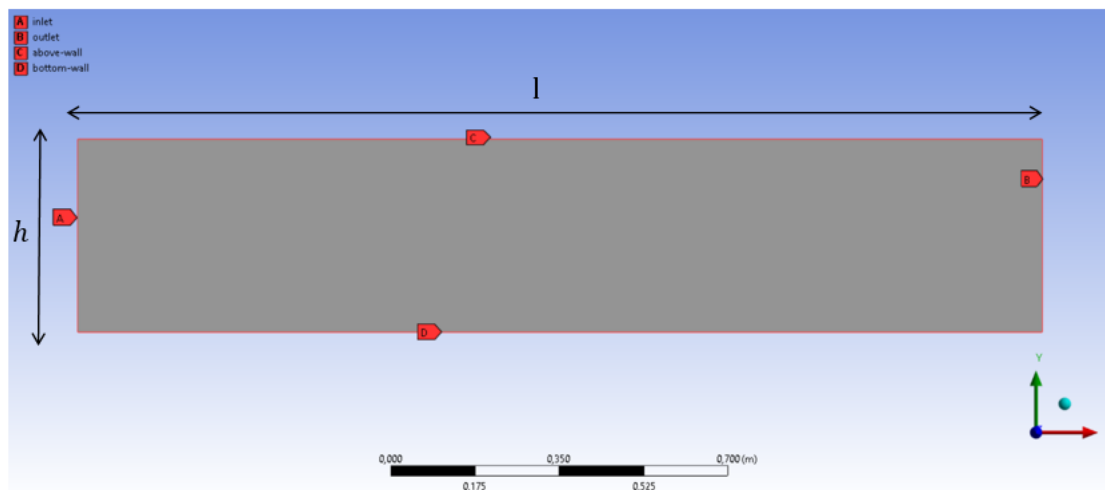


Figura 13: Modelo 2D do tanque de desengorduramento.

Dentro do tanque existe um sistema de aspersão e distribuição que faz com que na zona considerada exista um fluxo horizontal de fluido. Como tal, as fronteiras esquerda (A), direita (B), superior (C) e inferior (D) foram definidas como entrada, saída, parede superior e parede inferior, respetivamente. O restante domínio foi definido como fluido.

A discretização do domínio é um dos passos mais importantes nos estudos de CFD, desta maneira, após definida a geometria e respetivas dimensões foi necessário proceder à discretização da mesma. O processo de discretização é a subdivisão do modelo

computacional em pequenos volumes finitos onde as equações são resolvidas e que determinam o número de elementos que definem a grelha computacional. Esta etapa de discretização determina a exatidão dos resultados devido a aproximações numéricas dependentes da dimensão destes elementos.

Ao diminuir a dimensão dos elementos obtém-se uma malha com melhor discretização, e consequentemente com maior número de elementos. Contudo, aumenta-se o tempo de simulação. Desta forma, para definir a malha adequada é necessário encontrar em equilíbrio entre a exatidão dos resultados e o esforço computacional necessário.

Foi efetuado o teste de independência da malha onde foram testadas três malhas com diferentes tamanhos com assimetria média constante. As malhas foram geradas utilizando o método *Quadrilateral Dominant*.

Na Tabela 1 são apresentados os diferentes tamanhos de malha ($\overline{\Delta x}$), número de elementos e respetivas velocidades à saída do tanque.

Tabela 1: Tamanho dos elementos da malha, nº de elementos da malha, velocidade e fração mássica de tracer à saída do tanque.

	$\overline{\Delta x}$ (m)	Nº de elementos	$v_{saída}$ (m·s ⁻¹)	x_{tracer}
DP0	0,01	8392	0,5018	0,9632
DP1	0,005	32784	0,5018	0,9632
DP2	0,0025	129495	0,5024	0,9629

Na malha DP0, o tamanho de um elemento é de 0,01 m e contem 8392 células. As seguintes malhas DP1 e DP2 possuem 0,005 m de tamanho de elemento e 32784 células e 0,0025 m de tamanho de elemento e 160 778 células, respetivamente.

O parâmetro de validação da malha foi a comparação da velocidade de saída numa simulação de escoamento de água, em estado estacionário, ao longo do tanque, para as três malhas. Os valores obtidos com as malhas DP0 e DP1 diferem entre eles menos que a 0,05%, desta forma, foi escolhida a malha DP1 com o valor do tamanho do elemento de 0,005 m. Adicionalmente, como se tratam de malhas bastante regulares e isotrópicas a assimetria média é aproximadamente 0,9.

Neste projeto foram ainda realizadas simulações de uma camada de resíduo muito pouco espessa na superfície do automóvel para o seio do fluido, utilizando o modelo VOF, por essa razão, foi adicionado o controlo de inflação da malha que permite aumentar a discretização do domínio junto à parede do tanque, onde se verificam alterações mais significativas na concentração do fluido que circula dentro do tanque. Foram testados diferentes números e espessuras de camadas (*layers*) no que diz respeito ao controlo de inflação, no entanto, estes apresentaram uma influência mínima nos parâmetros velocidade superficial de saída e fração mássica de *tracer*. É assim possível concluir que

predomina a dispersão, isto é, ocorre uma maior mistura e homogeneidade do fluido devido à ação dos vórtices criados pela turbulência do escoamento ao longo do tanque. Por isso, associou-se à geometria uma inflação de 2 camadas com uma taxa de crescimento de 1,2. A Figura 14 mostra a grelha computacional utilizada nas simulações CFD. Na Figura 15 é apresentada a discretização do domínio com as respectivas camadas de inflação aproximadas para a geometria utilizada.

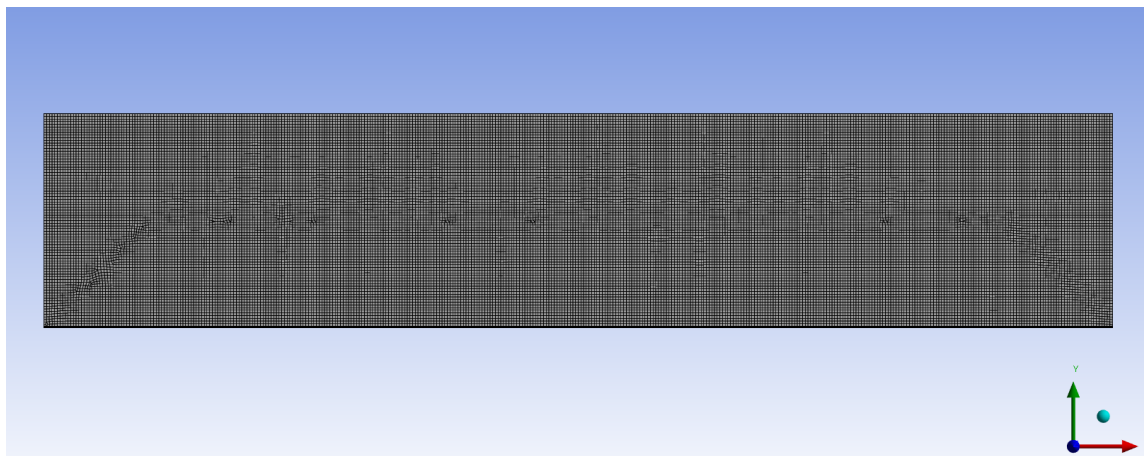


Figura 14: Grelha computacional do tanque de desengorduramento.

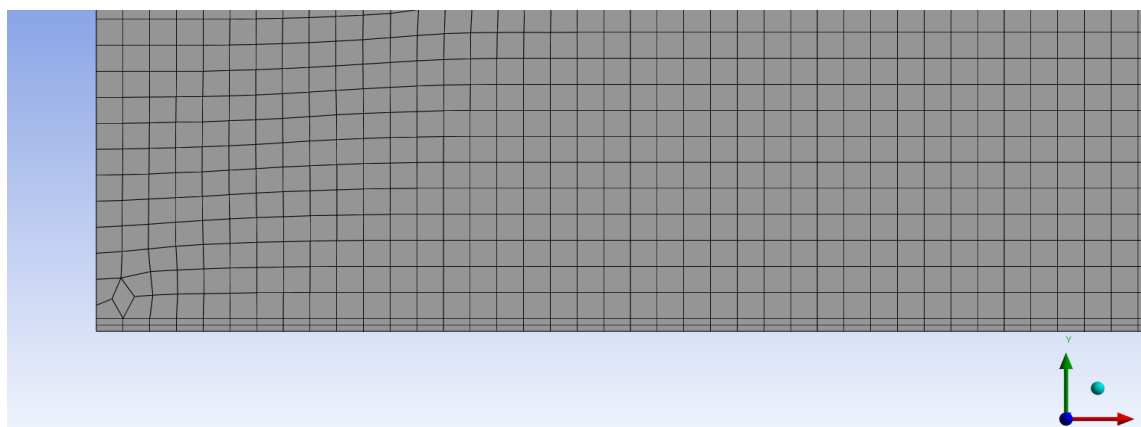


Figura 15: Grelha computacional com camadas de inflação aproximadas.

As simulações CFD utilizando água e solução de limpeza como fluidos de trabalho foram realizadas em estado isotérmico e estacionário, utilizando o modelo viscoso turbulento ($k-\epsilon$ realizável) devido às condições impostas à entrada que resultam num elevado número de Reynolds ($Re_e = 200\,000$). Para a condição de entrada de turbulência, utilizou-se 5% de intensidade de turbulência e uma razão de viscosidade turbulenta de 10. Posteriormente recorreu-se ao método VOF em estado transiente utilizando uma mistura líquido-líquido de água e *tracer* com o objetivo de estudar o tempo de simulação para a limpeza total de uma camada de resíduos da superfície do automóvel.

Para estas simulações, foi utilizado o *Scheme Coupled* para o acoplamento pressão-velocidade. Para a discretização espacial, foi utilizada a segunda ordem para a pressão e

segunda ordem *upwind* para a energia cinética turbulenta e para a taxa de dissipação turbulenta. As simulações foram inicializadas utilizando a inicialização *standard* e os critérios de convergência das simulações foram os resíduos de 10^{-3} .

A Tabela 2 apresenta os métodos selecionados no ANSYS Fluent para as simulações CFD.

Tabela 2: Métodos selecionados no ANSYS Fluent para as simulações CFD.

Métodos	
Acoplamento pressão-velocidade	
<i>Scheme</i>	<i>Coupled</i>
Discretização Espacial	
Gradiente	<i>Least Squares Cell Based</i>
Pressão	PRESTO!
Momento	Segunda Ordem <i>Upwind</i>
Energia Cinética Turbulenta	Segunda Ordem <i>Upwind</i>
Taxa de Dissipação Turbulenta	Segunda Ordem <i>Upwind</i>

3.3. Condições iniciais e fronteira

De modo a compreender o campo de escoamento, é fundamental fazer a integração numérica das equações diferenciais que foram previamente estabelecidas como as equações fundamentais. Por isso, é necessário definir condições iniciais e condições fronteira que correspondem, respetivamente, a restrições estabelecidas no tempo inicial do domínio e no domínio espacial.

A velocidade à entrada na fronteira A (Figura 13) da secção do tanque analisada foi definida como constante de valor igual a $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. O número de Reynolds, Re , é caracterizado por ser a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas [35]. Neste caso, o número de Reynolds na entrada na secção em estudo, Re_e , pode ser calculado assumindo a altura da secção do tanque considerada (h do tanque) como diâmetro d_e e a velocidade de entrada v_e do fluido na fronteira A (Figura 13):

$$Re = \frac{\rho v_e d_e}{\mu} \quad (3.24)$$

Onde ρ e μ correspondem à densidade e viscosidade do fluido.

O número de Reynolds correspondente à velocidade de entrada definida é de 200 000 e tratando-se, por isso, de um regime de escoamento turbulento.

Foi aplicada a condição de não deslizamento à parede, coincidente com o tejadilho do automóvel (fronteira D da Figura 13) e foi definida a pressão 0 Pa à saída da secção em análise (fronteira B da Figura 13). Na fronteira C (Figura 13) não foi imposta nenhuma tensão de cisalhamento específica.

Nas simulações CFD realizadas em modo transiente, recorrendo ao método VOF e acionando a tensão superficial, o efeito de adesão à superfície do automóvel e o ângulo de contacto nas paredes sólidas foram estabelecidos para diferentes casos de estudo conforme descrito no Capítulo 5 deste relatório.

3.4. Propriedades físicas dos materiais

Com o objetivo de simular o escoamento do fluido, foi recolhida uma amostra da solução de limpeza utilizada no tanque de desgorduramento da unidade de produção da Stellantis, em Mangualde, e realizou-se a análise reológica da mesma.

Os resultados obtidos na análise reológica da solução de limpeza estão apresentados no Apêndice B.

A solução de limpeza é constituída por um desgordurante muito alcalino e por um surfactante/tensioativo dissolvidos em água nas concentrações volúmicas de 0,2 %(v/v) e 0,3% (v/v), respetivamente e é utilizada na indústria num intervalo de temperaturas [45; 60] °C.

Apesar da diferença de valores entre as viscosidades da água ($\mu = 1,003 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) e da solução de limpeza, o número de Reynolds obtido à entrada do tanque é bastante elevado ($Re > 4000$), indicando sempre um regime de escoamento turbulento. Desta forma nas análises de CFD efetuadas, considerou-se que o fluido a circular dentro do tanque consistia numa solução composta por água, um desgordurante alcalino e um tensioativo com as mesmas características da água. As suas propriedades foram dadas por modelos adequados existentes no ANSYS Fluent. Assim, o fluido utilizado nestas simulações foi uma mistura com as mesmas características da água líquida a 20 °C com uma massa volúmica de $\rho = 998,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e uma viscosidade de $\mu = 1,003 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Considerou-se uma velocidade de entrada constante, v_e , de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ que corresponde a um número de Reynolds de 200 000, para as propriedades físicas da água líquida.

Para simular a transferência de massa em 2D, entre a água e o desgordurante alcalino com tensioativo, o modelo de transporte de espécies é ativado criando uma mistura de H₂O e *tracer*. São utilizados os modelos *volume weighted mixing law* e *mass weighted mixing law* para determinar a densidade e viscosidade da mistura embora não tenha impacto no resultado final, uma vez que as propriedades são iguais. A difusividade mássica entre as duas espécies foi de $1,00 \times 10^{-9} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

4. Resultados e Discussão

4.1. Desenvolvimento do modelo hidrodinâmico

O presente capítulo aborda os resultados obtidos para simulações realizadas de modo a compreender a influência de diferentes velocidades de entrada do fluido e alturas de tanque no transporte de massa da solução de desengordurante alcalino com tensioativo (solução de limpeza) para a superfície metálica do automóvel. As variáveis estudadas são apresentadas na Tabela 3.

O caso base considerado para estes estudos foi o caso de escoamento unifásico descrito no Capítulo 3.2.

Tabela 3: Variáveis analisadas no estudo da hidrodinâmica.

	h_{tanque} (m)	v_e ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Re_e	Tipo de Regime
h_1	0,4	0,5	200 000	Turbulento
h_2	0,3		150 000	
h_3	0,1		50 000	
h_4	0,06		30 000	
h_5	0,02		10 000	
v_1	0,4	0,5	200 000	
v_2		0,25	100 000	
v_3		0,1	40 000	

O principal objetivo ao estudar a hidrodinâmica é verificar qual o tipo de escoamento que domina no interior do tanque, especialmente nas zonas junto às paredes, uma vez que, são as principais responsáveis pela existência de vórtices e turbulência. Um campo de escoamento bem definido garante uma medição mais precisa do tempo de limpeza da camada de gordura no caso do escoamento multifásico e, consequentemente, uma mais fácil otimização do mesmo.

Todas as simulações de estudo da hidrodinâmica foram realizadas em estado estacionário, tendo sido definida uma fração de 0,01 de desengordurante alcalino com tensioativo à entrada da secção do tanque.

4.1.1. Efeito da velocidade de entrada

Foram analisados os perfis de velocidade no interior do tanque para diferentes velocidades de entrada. Recorreu-se ao estudo das linhas de corrente (*streamlines*) e dos contornos da taxa de dissipação turbulenta (ε) representados por diferentes cores consoante a intensidade da variável em estudo. As linhas de corrente indicam a direção do fluxo num campo de escoamento, sendo que onde existe uma maior densidade de linhas o fluxo é

mais intenso. Para além disso, permitem identificar fenômenos complexos de escoamento, como por exemplo vórtices, recirculações e zonas de estagnação. Os contornos da taxa de dissipação turbulenta permitem facilmente identificar zonas onde ocorre maior dissipação da energia cinética turbulenta devido ação da viscosidade.

Através destas variáveis torna-se possível compreender e simplificar o escoamento dentro do tanque e, desta forma, identificar quais os fenômenos responsáveis por alterações nos perfis de velocidade.

Na Figura 16 são apresentadas as linhas de corrente e o contorno da taxa de dissipação turbulenta (ε) no tanque de desgorduramento quando $v_e = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

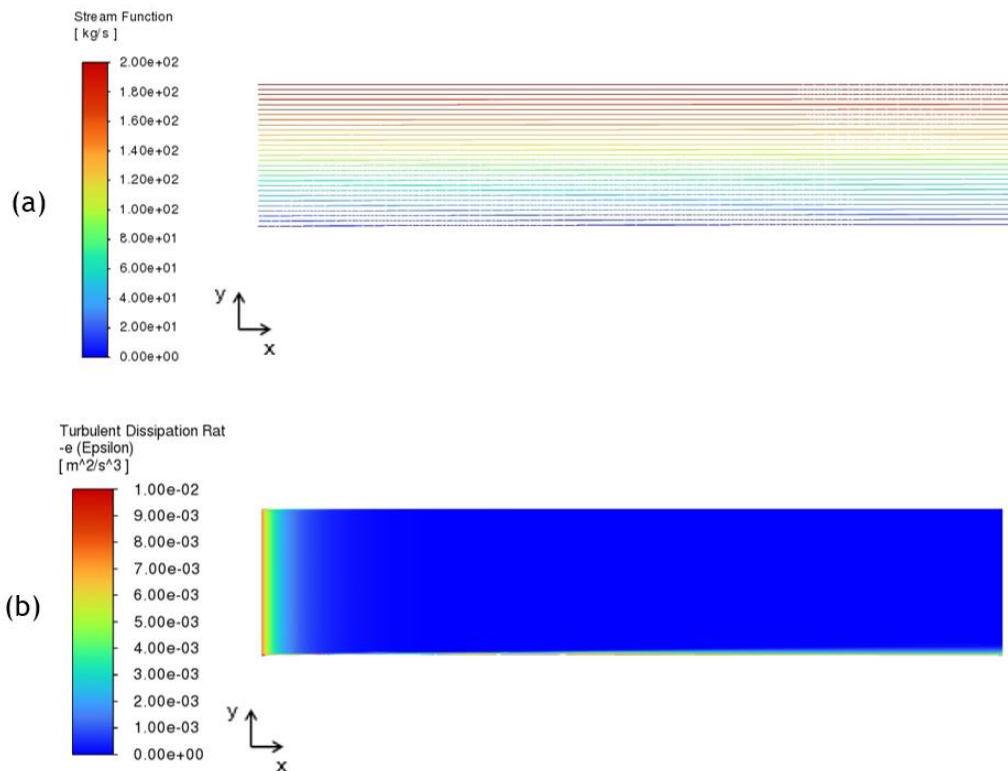


Figura 16: (a) Linhas de corrente e (b) contorno da taxa de dissipação turbulenta para $v_e = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Como se trata de um regime de escoamento muito turbulento, as linhas de corrente apresentam um comportamento paralelo entre si e representam o comportamento do escoamento médio, de modo a facilitar a análise destes sistemas complexos. Para além disso, trata-se de um escoamento totalmente desenvolvido, isto é, as propriedades do fluido, o perfil de velocidade e a distribuição de pressão, não se alteram ao longo da direção do escoamento.

Nas Figuras 17 e 18 estão representadas as linhas de corrente e o contorno da taxa de dissipação turbulenta para $v_e = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $v_e = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respetivamente.

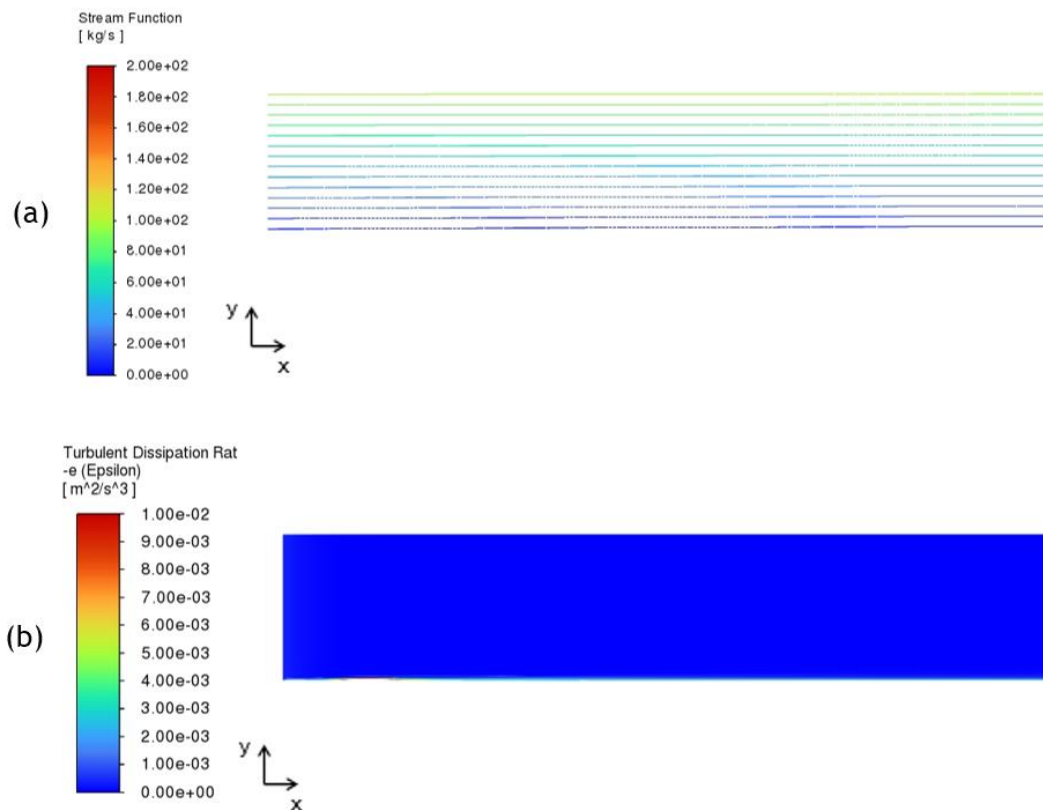


Figura 17: (a) Linhas de corrente e (b) contorno da taxa de dissipação turbulenta para $v_e = 0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

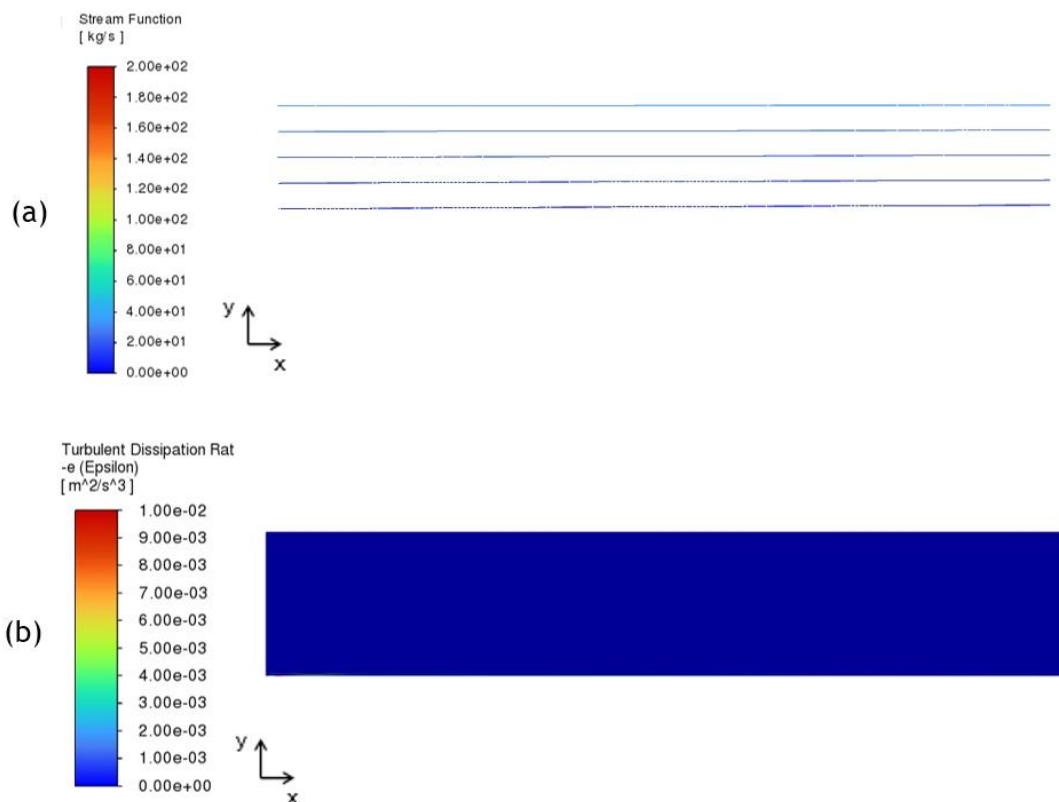


Figura 18: (a) Linhas de corrente e (b) contorno taxa de dissipação turbulenta para $v_e = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Quanto maior a densidade das linhas de corrente, maior o fluxo mássico que circula dentro da geometria. Neste caso, tal como previsto, as linhas de corrente para $v_e = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ são mais densas e apresentam maior caudal. Para $v_e = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, as linhas de corrente estão mais afastadas entre si, mostrando que o caudal que circula dentro do tanque é proporcional à velocidade de entrada, e por isso, menor.

Apesar do fluido entrar no tanque com diferentes velocidades, trata-se sempre de um regime de escoamento muito turbulento. Observa-se que existe uma maior formação e dissipação da energia cinética turbulenta na entrada do tanque e junto à parede inferior (camada limite), correspondente ao tejadilho do automóvel. A turbulência imposta na entrada do tanque cria vórtices e flutuações da velocidade que aumentam a taxa de dissipação de energia cinética. Da mesma forma, junto à camada limite a fricção entre o fluido em movimento e a superfície estacionária causa gradientes de velocidade significativos, que promove a formação de estruturas turbulentas e consequente aumento da dissipação da energia cinética turbulenta. Para além disso, quanto menor a velocidade de entrada, menor é a taxa de dissipação turbulenta. Para compreender melhor a turbulência junto às paredes seria necessário um refinamento da grelha computacional junto das paredes, devido a limitações computacionais, tal não foi possível.

A Tabela 4 apresenta como varia a fração de desengordurante alcalino com tensioativo, o respetivo caudal mássico e a taxa de dissipação turbulenta à saída do tanque.

Tabela 4: Variação da fração mássica de desengordurante alcalino com tensioativo, o respetivo caudal mássico e taxa de dissipação turbulenta à saída do tanque.

	$h_{\text{tanque}} \text{ (m)}$	$v_e \text{ (m}\cdot\text{s}^{-1})$	$x_{\text{solução limpeza saída}}$	$Q_m \text{ solução limpeza saída (kg}\cdot\text{s}^{-1})$	$\varepsilon \text{ (m}^2\cdot\text{s}^{-3})$
V ₁	0,4	0,5	0,0096	-1,923	$2,00 \times 10^{-4}$
V ₂		0,25	0,0095	-0,950	$3,49 \times 10^{-5}$
V ₃		0,1	0,0093	-0,371	$3,78 \times 10^{-6}$

Para valores de velocidades de entrada maiores, maior é o caudal mássico à saída e menor o tempo de passagem associado à solução de limpeza dentro do tanque. É retida menos fração, mas maior quantidade solução na parede, uma vez que o volume de passagem também é maior. Tendo em conta o aumento do número de Reynolds com o aumento da velocidade, o regime torna-se mais turbulento, maior é a dissipação da energia turbulenta e maior é o transporte para a parede. Resumindo, o caso de $v_e = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ apresenta um tempo de passagem 5x menor e um caudal 5x maior do que $v_e = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, logo, apesar da concentração de solução de limpeza no escoamento ser menor para $v_e = 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à saída, o valor consumido na parede da secção estudada é inferior associado à menor capacidade de dispersão no escoamento.

4.1.2. Efeito da altura

Fez-se variar a altura do tanque em 5 medidas, $h_1 = 0,4$ m, $h_2 = 0,3$ m, $h_3 = 0,1$ m, $h_4 = 0,06$ m e $h_5 = 0,02$ m. Na Figura 19 são apresentados os contornos da fração mássica para as alturas estudadas.



Figura 19: Contorno da fração mássica de desgordurante alcalino e tensioativo para as alturas (h) estudadas.

A Tabela 5 apresenta a velocidade de saída, a fração mássica e o caudal mássico de desgordurante alcalino com tensioativo à saída do tanque para as diferentes alturas estudadas.

Tabela 5: Fração mássica e caudal mássico de solução de limpeza à saída do tanque para as alturas estudadas.

	h_{tanque} (m)	v_e ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$x_{\text{solução limpeza saída}}$	Q_m solução limpeza saída ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
h1	0,4	0,5	0,0096	-1,923
h2	0,3		0,0095	-1,424
h3	0,1		0,0085	-0,425
h4	0,06		0,0075	-0,225
h5	0,02		0,0026	-0,026

Quanto menor a altura do tanque, menor é a fração mássica da solução de limpeza à saída do tanque, mas a massa retida diminui. Neste caso, o regime é menos turbulento e ocorre uma menor mistura vertical levando ao menor transporte de massa da solução de limpeza para a superfície do automóvel.

4.2. Desenvolvimento do modelo de limpeza

O modelo de limpeza do tanque através do fluxo multifásico foi estudado recorrendo a simulações CFD em duas dimensões. Para definir o modelo VOF foi necessário especificar uma fase primária (fase 1) e uma fase secundária (fase 2), desta forma, optou-se por definir que a fase primária corresponde à água e a fase secundária ao resíduo na superfície do automóvel. Neste caso, como as simulações foram realizadas em 2D, a interface das duas fases acontece ao longo de todo o comprimento do tanque.

O método VOF foi utilizado na formulação explícita e foi escolhida a opção *Sharp* na modelação da interface, visto ser a mais adequada em casos em que existe uma interface distinta entre as fases. Na interação entre as fases foi acionada a tensão superficial e a adesão à parede. Ainda, de forma a garantir a convergência da solução CFD foram definidos resíduos inferiores a 10^{-3} e um tamanho de passo de tempo (*time step*) de 0,01 s. A condição inicial para o escoamento multifásico foi definida criando uma região de fase 2 (gordura) na parede inferior, tejadilho do automóvel, com espessura total de 5 mm tendo ficado abrangidas por esta região 2800 células e correspondendo a uma fração mássica de 0,01 de fase 2. Na Figura 20 pode-se observar a condição inicial para as simulações multifásicas.



Figura 20: Mapa da fração mássica inicial da fase 1 para as simulações multifásicas.

Para as simulações relativas ao desenvolvimento do modelo de limpeza foi utilizada uma geometria refinada com 8 camadas e taxa de crescimento de 1,2 de modo a melhorar a precisão e eficiência das simulações nas zonas mais críticas e onde ocorrem mudanças mais rápidas nas propriedades da mistura, neste caso, na superfície do tejadilho do automóvel. De modo a estudar o tempo de limpeza da camada de resíduo da secção considerada, que corresponde ao tejadilho do automóvel, foram efetuadas simulações para três valores diferentes de viscosidade da fase 2 ($\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$). Avaliou-se ainda a influência do ângulo de contacto no escoamento e para isso considerou-se três valores de ângulos diferentes. No primeiro caso, um efeito de não adesão à parede ($\theta = 90^\circ$), de seguida um ângulo em que a parede é hidrofílica em relação

à fase 2 ($\theta = 45^\circ$ e $\theta = 0^\circ$) e um caso em que é hidrofóbica ($\theta = 135^\circ$). Os valores do ângulo de contacto apresentados são medidos no interior da fase 2. Além disso, foi estudada a influência da tensão superficial na dinâmica do escoamento e na interação entre as fases. Para tal, considerou-se um caso com um valor característico para o sistema água - ar ($\sigma = 70 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$) [36] e o valor representativo da tensão superficial atualmente utilizado na fábrica da Stellantis ($\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$). A Tabela 6 apresenta os valores da tensão superficial, do ângulo de contacto e da viscosidade da fase 2 utilizados para cada simulação.

Tabela 6: Tensão superficial (σ), ângulo de contacto (θ) e viscosidade da fase 2 (μ_{fase2}) utilizados para cada simulação.

Simulação	$\sigma \text{ (mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\theta \text{ (}^\circ\text{)}$	$\mu_{\text{fase2}} \text{ (mPa}\cdot\text{s)}$
1	33,8	90	1
2			10
3			100
4		45	1
5			10
6			100
7		0	1
8			10
9			100
10		135	1
11	70	90	1
12			10
13			100
14		45	1
15			10
16			100
17		0	1
18			10
19			100
20		135	1

Por fim, e de maneira a entender que outros fatores podem interferir na limpeza dos resíduos na superfície metálica estudou-se a influência da velocidade de entrada da solução de limpeza, v_e , e da massa volúmica da fase 2, ρ_{fase2} . Estas simulações foram realizadas fixando $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Os valores de velocidade de entrada e massa volúmica estudados estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7: Velocidade de entrada da solução de limpeza (v_e) e massa volúmica da fase 2 (ρ_{fase2}) utilizadas para cada simulação.

Simulação	v_e ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	ρ_{fase2} ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
21	0,5	2 000
22		10000
23	0,05	998,2
24	0,2	
25	0,8	

As simulações dinâmicas têm como objetivo retirar toda a fase 2 do interior do tanque, por isso, definiu-se que entrava no tanque apenas a fase 1 e que o tanque está totalmente limpo de fase 2 quando o caudal mássico deste à saída for igual a $0 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

A Figura 21 apresenta o mapa final da fração mássica da fase 1 para as simulações multifásicas.



Figura 21: Mapa da fração mássica final da fase 1 para as simulações multifásicas.

4.2.1. Estudo da influência da viscosidade

Uma vez que as conclusões dos resultados obtidos são semelhantes para os dois valores de tensão superficial estudados ($\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$), neste capítulo apresentam-se apenas os resultados para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$. Os restantes resultados (tempos de limpeza, caudal mássico e integral mássico) estão no Apêndice C.1.

As Figuras 22, 23 e 24 apresentam os contornos aproximados da fração mássica da fase 2 para simulações realizadas com as viscosidades $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, respetivamente, conforme apresentado na Tabela 6. Os resultados foram obtidos ao fim de 30 intervalos de tempo, correspondente a 0,3 segundos.

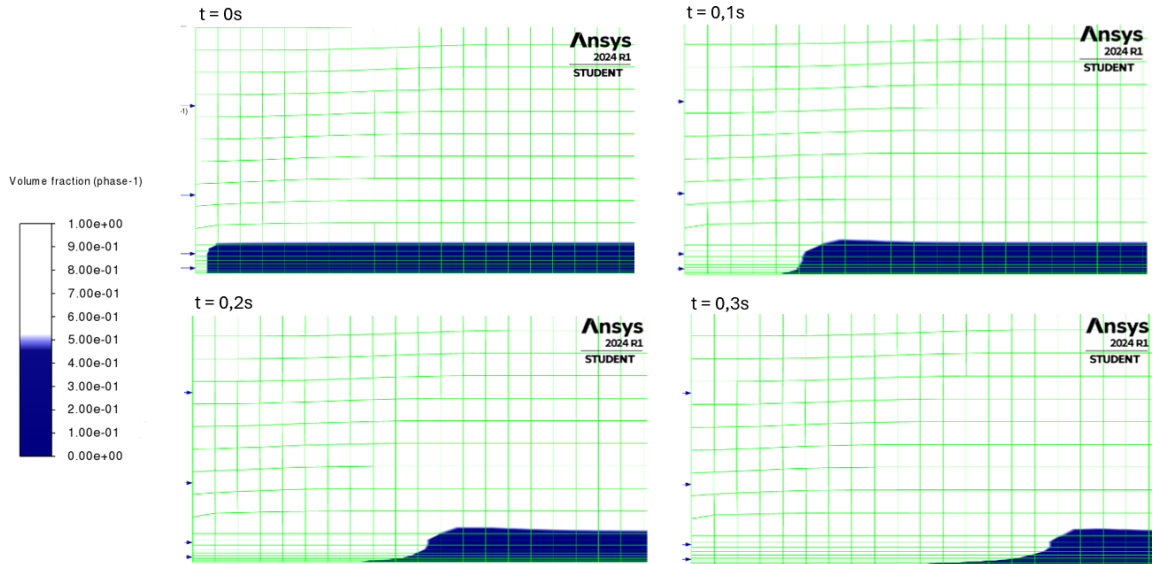


Figura 22: Contornos da fração mássica da fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

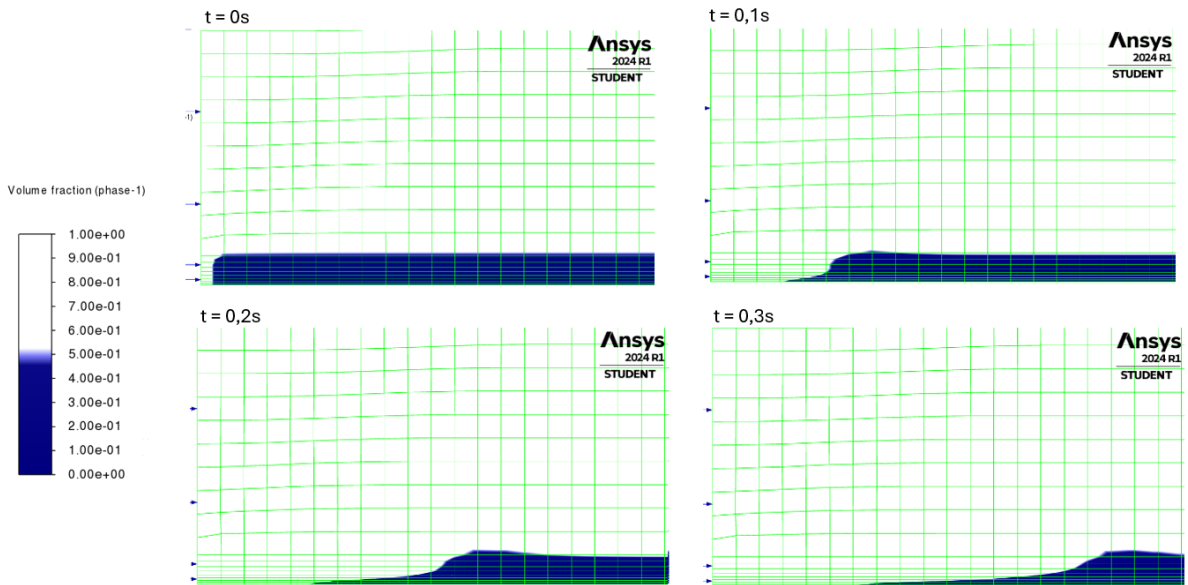


Figura 23: Contornos da fração mássica da fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

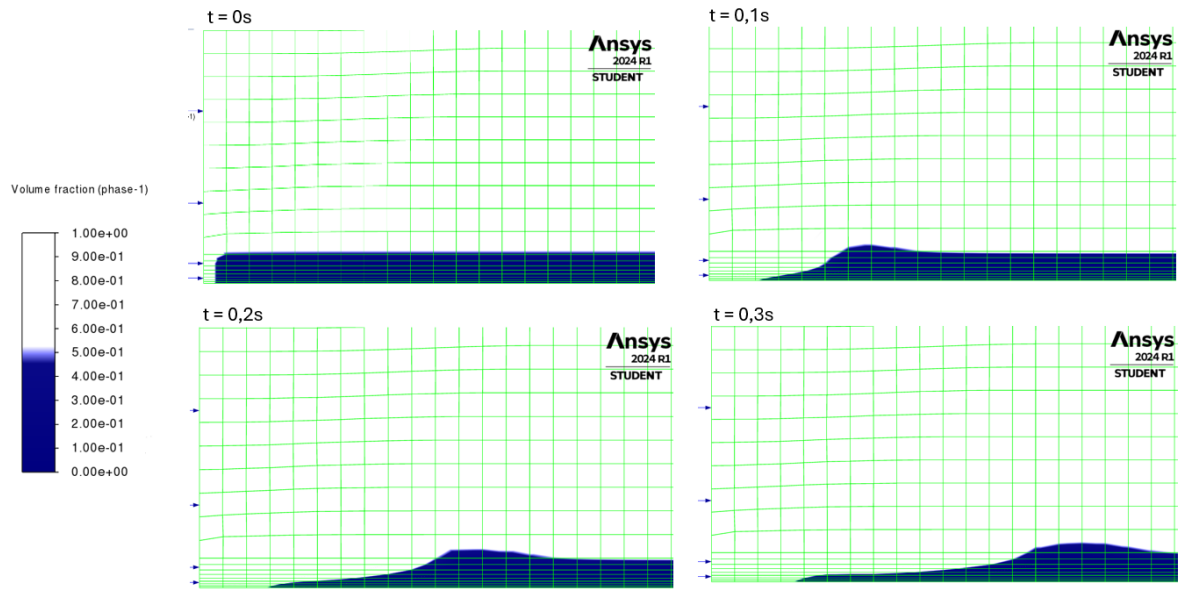


Figura 24: Contornos da fração mássica da fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Como é possível observar nos mapas da fração mássica, existe um aumento gradual da espessura máxima da camada de resíduo que fica retida na superfície do automóvel, à medida que a viscosidade dessa fase aumenta. A espessura ao longo do domínio considerado apresenta também maior variabilidade do que para os casos de viscosidade mais baixa. A viscosidade é uma medida da resistência interna do fluido ao escoamento, assim, resíduos com maior viscosidade apresentam maior resistência à deformação imposta pelo escoamento e, por isso, a sua remoção é mais difícil.

Assim sendo, é de esperar que uma superfície coberta pelo fluido de maior viscosidade ($\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) apresente maior tempo de limpeza que uma superfície coberta pela fase 2 de menor viscosidade ($\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$).

As Figuras 25 e 26 mostram a variação do caudal mássico à saída do tanque e o integral mássico da fase 2, em função do tempo de escoamento para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$.

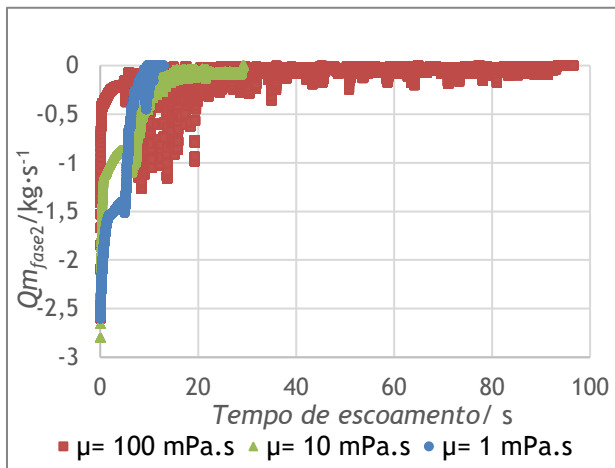


Figura 25: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$.

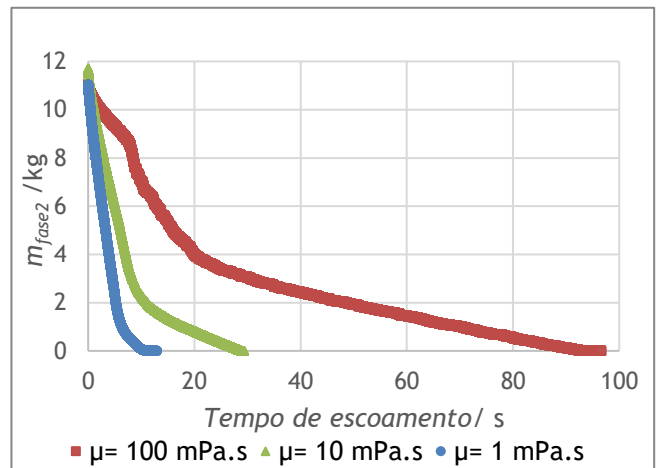


Figura 26: Variação de m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$.

Observando a Figura 25 é possível concluir que a limpeza dos resíduos na superfície da carroçaria metálica ocorre maioritariamente em duas fases distintas. Numa 1ª fase o escoamento dos resíduos é influenciado pelo efeito da viscosidade no caudal de saída por diminuição da velocidade, levando uma diminuição abrupta do caudal da fase 2 à saída. De notar que, no tempo de simulação $t=0,3$ s o caudal de saída para $\mu_{fase2} = 1,0$ mPa·s é $2,22 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ enquanto o valor do caudal no caso dos resíduos mais viscosos ($\mu_{fase2} = 100,0$ mPa·s) é apenas $0,42 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ mas comparando as Figuras 22 e 24 a espessura da camada é semelhante. Resíduos mais viscosos apresentam maior resistência à deformação, por isso, são mais dificilmente arrastados para a saída do tanque e provocam um arrasto menor na superfície da carroçaria metálica do automóvel, levando à aglomeração de partes do fluido, tal como é observado nas Figuras 22 a 24.

De seguida, após se manter contante por poucos instantes, observa-se um novo decréscimo do caudal mássico da fase 2 à saída do tanque. Nesta fase, o caudal de saída da fase 2 é maioritariamente influenciado pela alteração da espessura da camada de resíduos que se vai tornando cada vez menor até ser nula. Assim, também o caudal da fase 2 vai diminuindo até ser nulo, quando a limpeza da superfície metálica se dá por completa.

Analisando a Figura 26, é possível comprovar que o tempo de limpeza é menor para $\mu_{fase2} = 1,0$ mPa·s do que para valores de viscosidade mais elevados. Os tempos de limpeza obtidos para as viscosidades de $\mu_{fase2} = 1,0$ mPa·s, $\mu_{fase2} = 10,0$ mPa·s e $\mu_{fase2} = 100,0$ mPa·s foram 12,47 s, 29,12 s e 93,63 s, respetivamente. É também de notar que o declive é maior na 1ª fase de remoção, destacando que o efeito da diminuição da viscosidade leva a uma remoção de massa mais rápida do que a redução de espessura causada pelo aglomerar do fluido.

Desta forma, a viscosidade da camada de resíduo tem uma influência significativa no tempo de limpeza da superfície da carroçaria metálica, sendo que quanto mais viscoso o fluido, mais difícil a sua remoção. No entanto, as características dos resíduos são independentes do sistema de limpeza, por isso, estudou-se os fatores da tensão superficial e ângulo de contacto de modo a facilitar a otimização desta limpeza através da adição de, por exemplo, tensoativos à solução de limpeza.

4.2.2. Estudo da influência do ângulo de contacto e da tensão superficial

Ao longo deste subcapítulo são apenas apresentados os resultados da influência do ângulo de contacto para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, a uma viscosidade $\mu_{fase2} = 1,0$ mPa·s e da influência da tensão superficial para $\mu_{fase2} = 1,0$ mPa·s, $\mu_{fase2} = 10,0$ mPa·s e $\mu_{fase2} = 100,0$ mPa·s a um ângulo de 90° . Os restantes resultados de tempos de limpeza, variação do

caudal mássico à saída e variação da massa de fase 2 na superfície do automóvel são apresentados no Apêndice C.2.

A tensão superficial e o ângulo de contacto estão intimamente ligados e a sua relação pode ser descrita pela Equação de Young. Uma consequência da diferença de pressão resultante da tensão superficial é o fenómeno de adesão à parede. A adesão de um fluido a uma parede está dependente da energia de interação entre as moléculas deste último e as moléculas da superfície. No caso de uma grande interação o fluido tem maior adesão e tende a formar uma camada fina e uniforme na superfície. Caso contrário, o fluido tende a formar gotas na superfície da parede que são mais facilmente removidas.

Estudou-se de que maneira o ângulo de contacto entre os resíduos fluidos e a superfície metálica do automóvel afetam o tempo de limpeza dos mesmos. As Figuras 27 e 28 apresentam a influência do ângulo de contacto na variação do caudal mássico da fase 2, à saída do tanque para $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

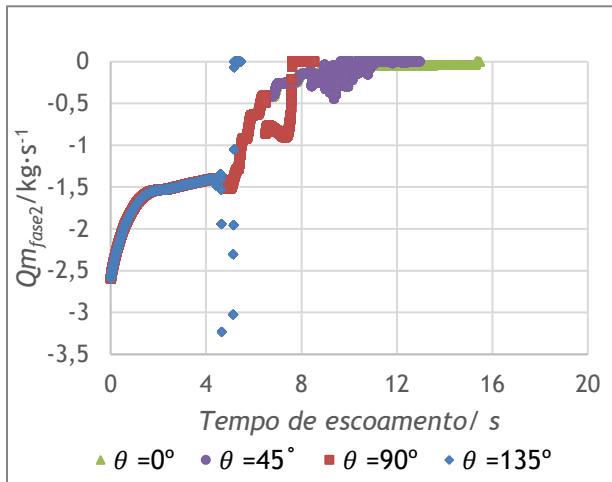


Figura 27: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

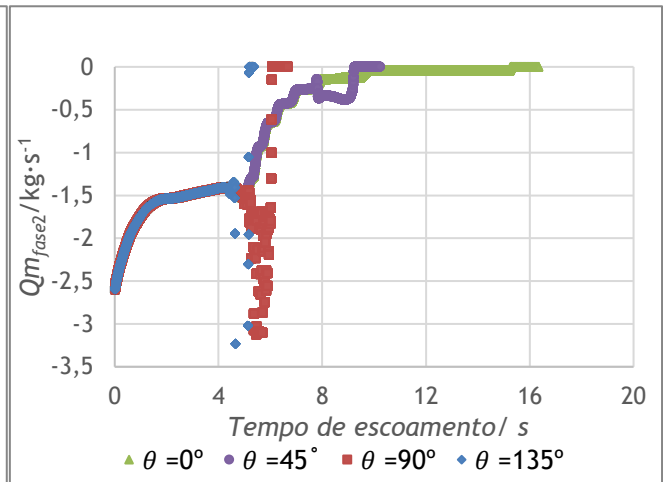


Figura 28: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Sabe-se que para valores de ângulo de contacto maiores, mais hidrofóbica é a fase 2 à superfície sólida e consequentemente menor a sua afinidade, neste caso ao tejadilho do automóvel. Assim, quanto menor a afinidade da fase ao metal mais facilmente será a sua remoção da superfície. Pelas Figuras 27 e 28, observa-se que o caudal mássico da fase 2 é praticamente igual para todos os ângulos de contacto até aos 5 segundos de simulação. A partir desse momento, ocorre um aumento do caudal mássico de saída da fase 2 para os ângulos de contacto maiores ($\theta = 135^\circ$ e $\theta = 90^\circ$). Este fenómeno pode ser explicado pela saída de resíduos do interior do tanque em forma de gotículas como consequência da pouca afinidade desta à superfície metálica.

As Figura 29 e 30 apresentam a variação da massa (integral mássico) de fase 2 em função do tempo de escoamento para $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

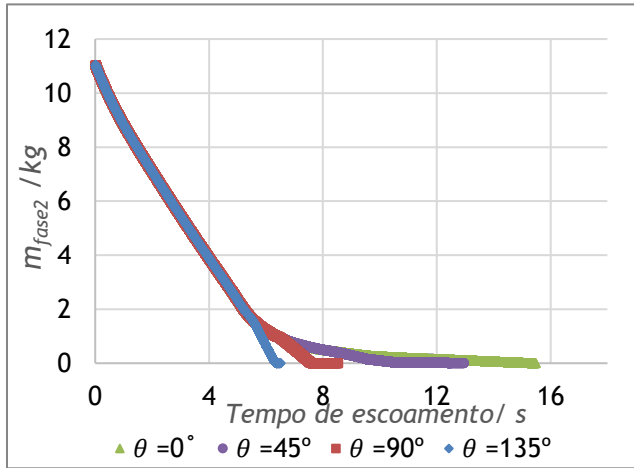


Figura 29: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

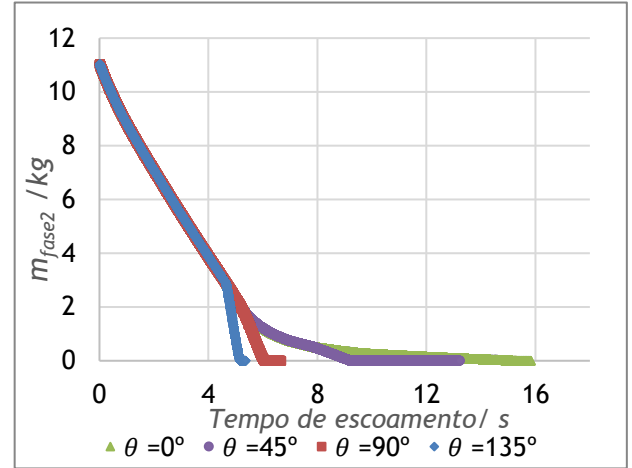


Figura 30: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Como se pode observar dos resultados das Figuras 29 e 30, o tempo de escoamento necessário para eliminar totalmente os resíduos da superfície metálica do automóvel diminui com o aumento do ângulo de contacto. Para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, foram obtidos os tempos de limpeza 6,36 s, 7,63 s, 12,47 s e 15,26 s para os ângulos de contacto $\theta = 135^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 0^\circ$, respetivamente. Para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ os tempos de limpeza obtidos apresentaram o mesmo comportamento, sendo que aumentando o ângulo de contacto, o tempo de limpeza diminui significativamente. É ainda de notar o aumento no declive do gráfico a partir, de aproximadamente, 5 segundos para os ângulos $\theta = 135^\circ$ e $\theta = 90$, destacando novamente o aumento da quantidade de resíduos que sai do tanque em forma de gotas.

Os resultados obtidos para as viscosidades $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ a $\theta = 90^\circ$ estão apresentados nas Figuras 31, 32 e 33.

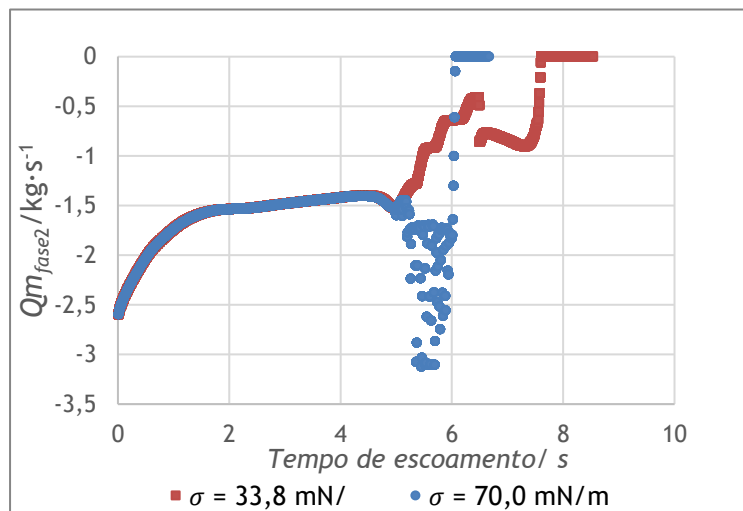


Figura 31: Caudal mássico fase 2 para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

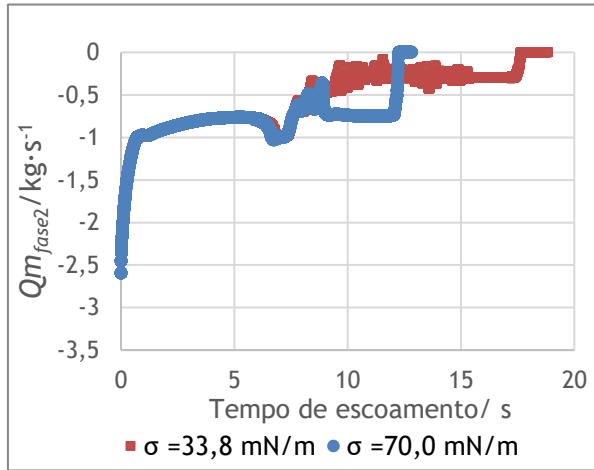


Figura 32: Caudal mássico fase 2 para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

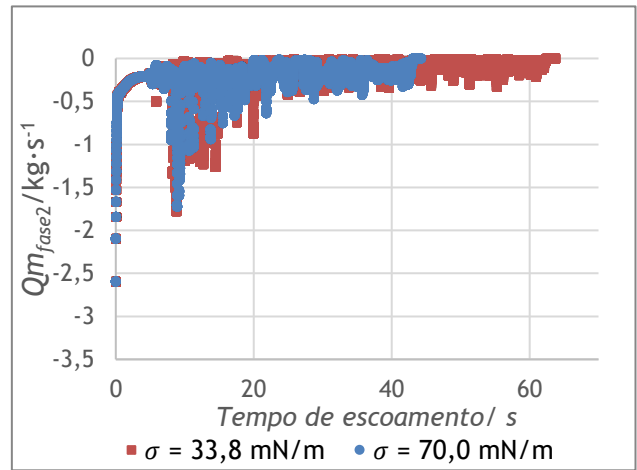


Figura 33: Caudal mássico fase 2 para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Pelos resultados apresentados nas Figuras 31, 32 e 33 verifica-se que com o aumento da tensão superficial ocorre uma diminuição do tempo de escoamento necessário para retirar toda a fase 2 da superfície do automóvel. A tensão superficial influencia significativamente a interação entre as fases de um sistema multifásico, um valor de tensão superficial mais elevado reduz a miscibilidade entre as fases, torna a interface mais estável, sendo por isso menos favorável à sua mistura. Contudo, embora a mistura entre as fases seja mais desfavorável, a remoção da fase 2 por arrastamento da corrente de fluxo para a maior tensão superficial, para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ é favorecida, originando um tempo de limpeza menor. Após um tempo de escoamento de 5 segundos, observa-se que o fluxo da fase 2 à saída do tanque, para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, sofre um ligeiro aumento. A partir desse momento a fase 2 que é removida do interior do tanque em forma de aglomerado.

A Figura 34 apresenta os contornos aproximados da fração mássica da fase 2 para a condição inicial e o intervalo de tempo $[4,75; 5,75] \text{ s}$ para $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\theta = 90^\circ$ e para as tensões superficiais de $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

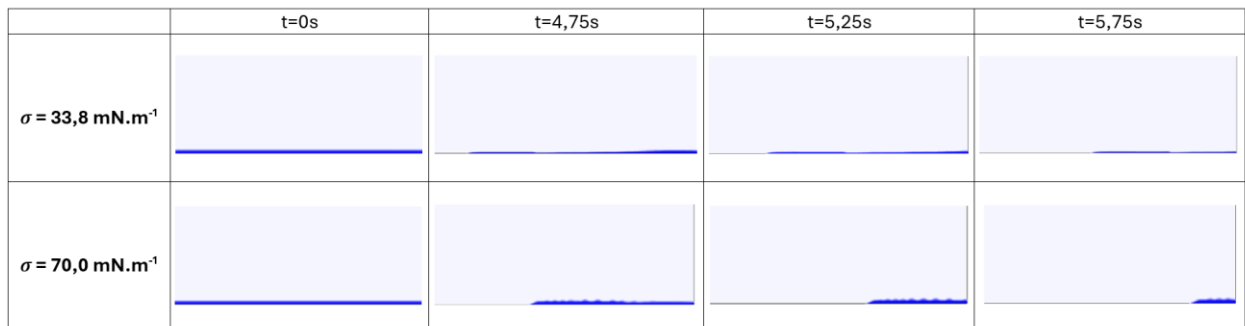


Figura 34: Contornos da fração mássica da fase 2 para $[4,75; 5,75] \text{ s}$, $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Para casos em que a tensão superficial é mais baixa, $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, a interface entre a fase 1 e a fase 2 é mais facilmente quebrada. A mistura das fases é favorecida, uma vez que a deformação na interface é mais acentuada. Por esta razão, a camada de resíduo sofre maior deformação do longo do escoamento de limpeza e como consequência é arrastada de forma contínua ao longo do tempo. Assim sendo, a remoção da fase 2 acontece de forma gradual até esta ser totalmente removida. Por outro lado, como é visível na Figura 34 para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, a interface entre as duas fases é mais estável e não se deforma com tanta facilidade. Isso resulta num acumular e aumento da espessura da camada de resíduo na superfície do automóvel. Desta forma, como a fase 2 se mantém separada da fase 1 a sua remoção é facilitada.

As Figuras 35, 36 e 37 mostram a influencia da tensão superficial na variação da massa de fase 2 em função do tempo de escoamento para $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ a $\theta = 90^\circ$.

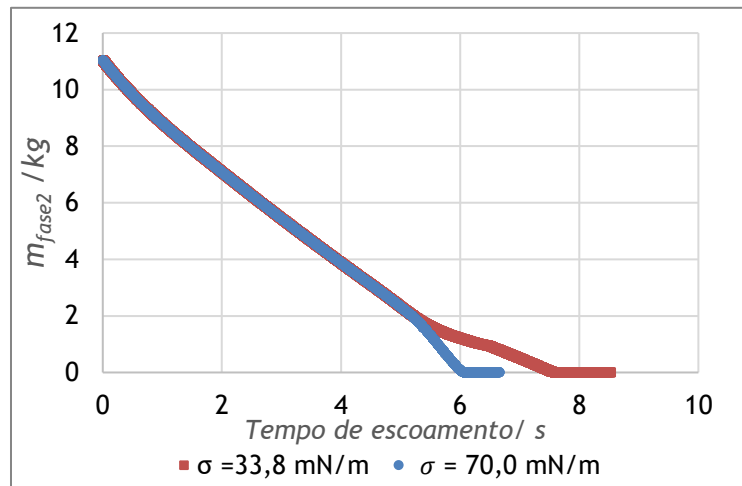


Figura 35: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

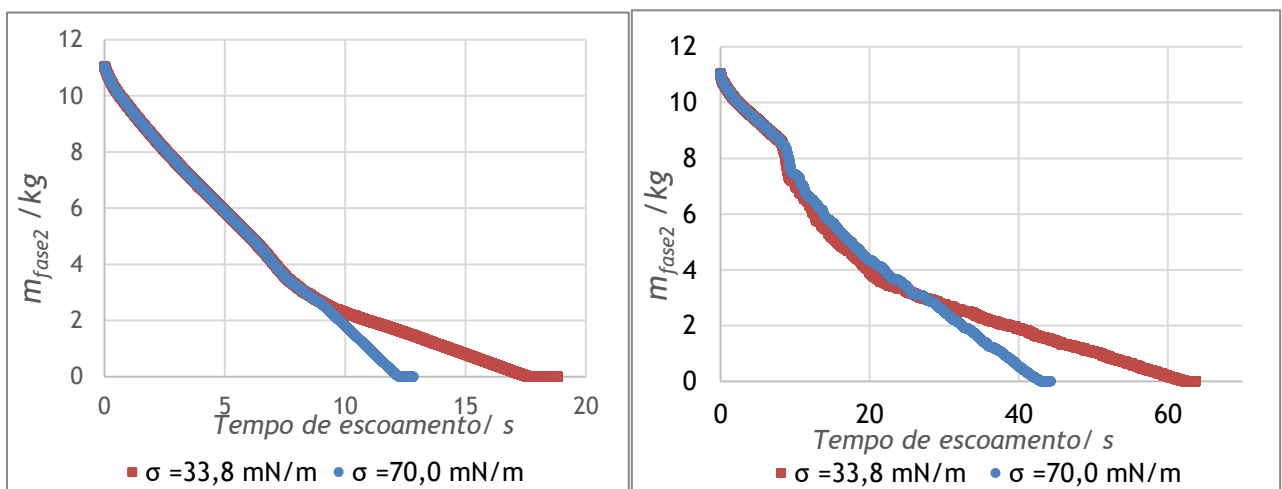


Figura 36: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Figura 37: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 90^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

O tempo de escoamento necessário para retirar todo o resíduo do tejadilho do automóvel é menor para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ do que para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Para $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, foram obtidos os tempos de limpeza 7,63 s e 6,08 s para as tensões superficiais $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, respetivamente. Para as restantes viscosidades ($\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) os tempos de limpeza obtidos apresentaram o mesmo comportamento, isto é, menor tempo de limpeza dos resíduos da superfície metálica do automóvel para a tensão superficial $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

As Figuras 38 e 39 relacionam os tempos de limpeza com o ângulo de contacto ($\theta = 90^\circ$ e $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 0^\circ$) e a viscosidade ($\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) para as tensões superficiais $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, respetivamente.

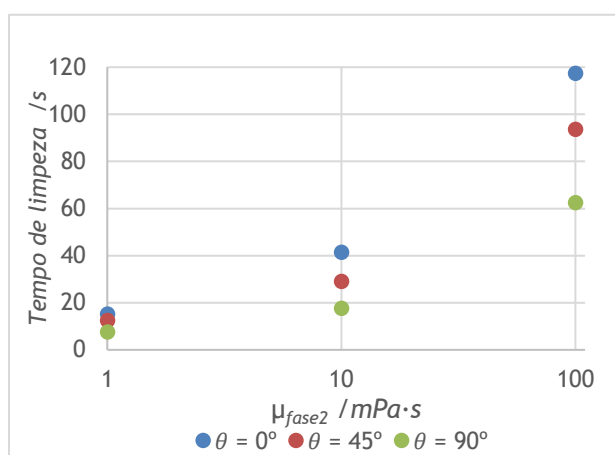


Figura 38: Tempo de limpeza em função da viscosidade para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

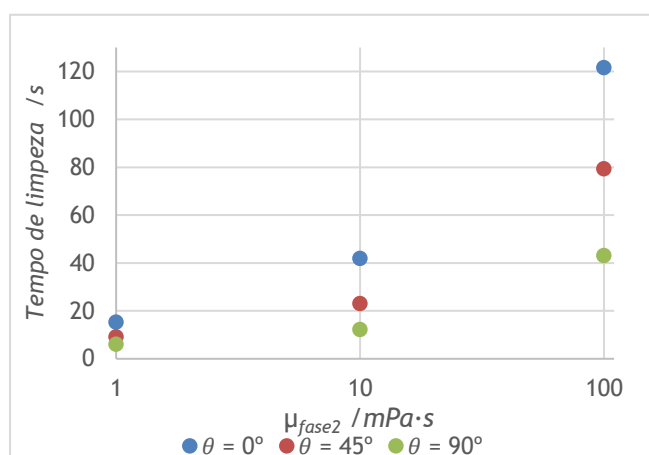


Figura 39: Tempo de limpeza em função da viscosidade para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

Pode-se concluir, pelas Figuras 38 e 39, que a viscosidade dos resíduos é o parâmetro que apresenta uma influência mais significativa no tempo de limpeza da carroçaria metálica, por isso, é importante conhecer de forma clara as características dos resíduos fluidos antes de proceder ao processo de desengorduramento. Uma forma de otimizar este processo é investigar e investir em soluções de limpeza que tornem, por exemplo, os resíduos menos viscosos. Outra sugestão passa pelo uso de tensioativos, que permitam alterar, aumentando, o ângulo de contacto dos resíduos com a superfície metálica de modo a tornar a sua adesão mínima e sua remoção mais fácil.

Por fim, relativamente à tensão superficial, é importante referir que o tempo de limpeza para resíduos de $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ é praticamente independente da tensão superficial. Contudo, para $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ com $\theta = 0^\circ$ a uma tensão de $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ é 4 segundos superior ao tempo de limpeza para resíduos com as mesmas características, mas para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

A utilização de tensoativos favorece a separação das fases e consequentemente, diminui o tempo de escoamento necessário para limpar totalmente os resíduos da superfície do automóvel.

4.2.3. Estudo da influência da velocidade de arrasto

As Figuras 40 e 41 apresentam, respetivamente, a variação do caudal mássico da fase 2 à saída do tanque e a variação da massa de fase 2 no interior do tanque em função do tempo de escoamento para as velocidades de entrada da solução de limpeza de $v_e = 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $v_e = 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $v_e = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. e $v_e = 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

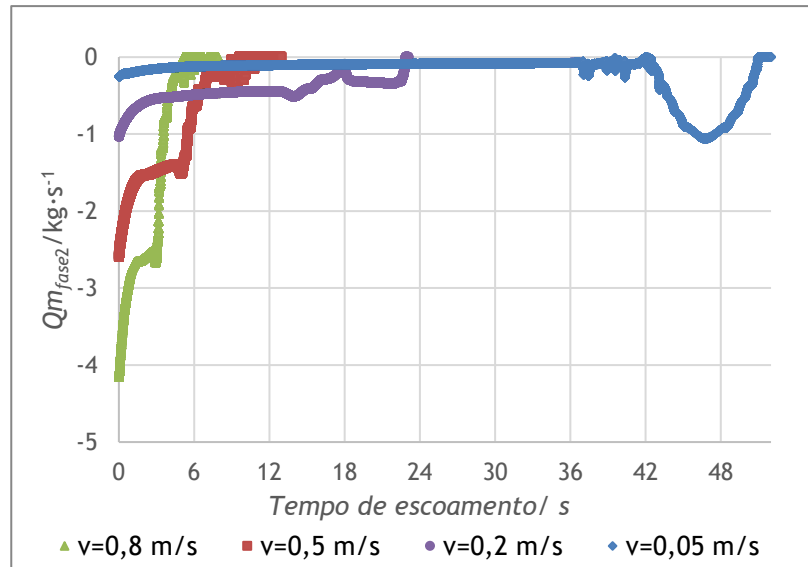


Figura 40: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

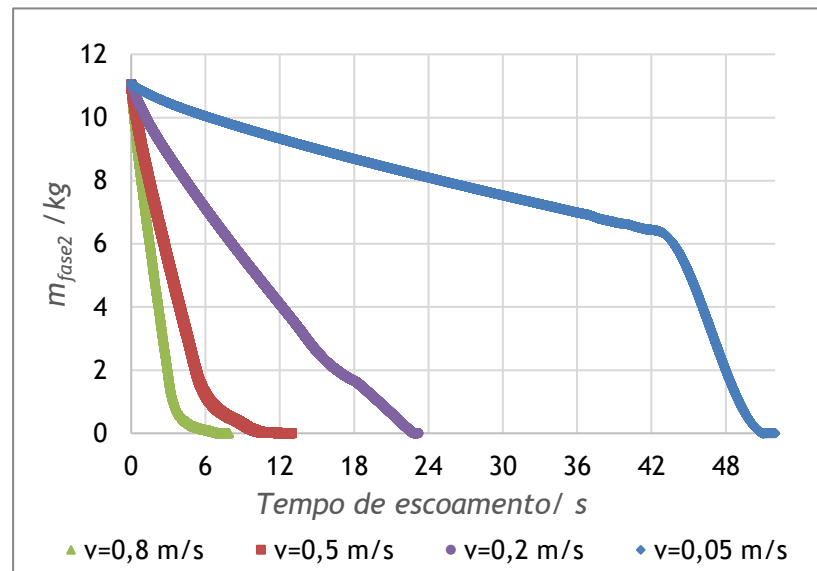


Figura 41: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{\text{fase2}} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Observa-se, pelas Figuras 40 e 41, que quanto menor a velocidade de entrada da solução de limpeza maior será o tempo de escoamento necessário para retirar todo o resíduo da superfície do automóvel.

No caso de $v_e = 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, o fluxo de escoamento tem menor energia cinética e maior tempo de residência que se traduz num processo de limpeza mais demorado e menos eficaz. Uma velocidade de limpeza mais pequena não possui energia cinética suficiente para arrastar a gordura de forma constante que resulta no seu acumular na superfície do automóvel. Quando esta atinge o troço final do tanque é removida toda ao mesmo tempo provocando assim o aumento do caudal da fase 2 à saída do tanque nos últimos instantes da limpeza.

A Figura 42 compara os contornos mássicos da fase 2 para $v_e = 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (a) e $v_e = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (b) durante a simulação CFD na mesma zona do tanque, respetivamente.

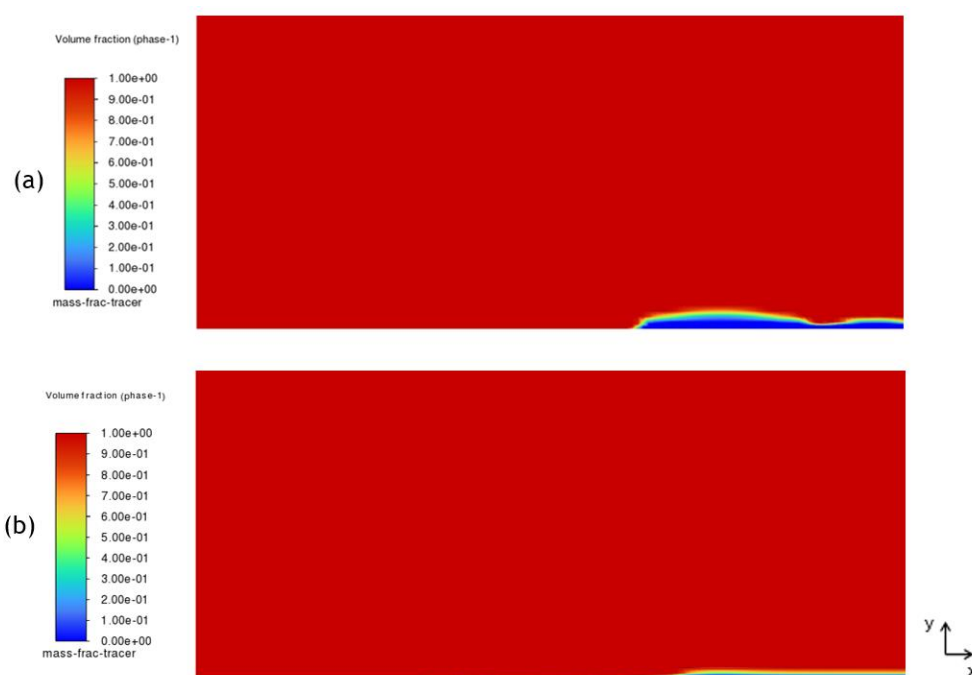


Figura 42: (a) Fração mássica de fase 2 para $v_e = 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e (b) fração mássica de fase 2 para $v_e = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Na Figura 42, é possível observar o acumular da fase 2 ao longo do comprimento da superfície metálica devido à dificuldade da solução de limpeza em arrastar os resíduos que estão presos à superfície. No caso em que $v_e = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a limpeza ocorre de uma forma mais gradual onde a fase 2 é encaminhada para a saída do tanque, não existindo o seu depósito na fronteira inferior, coincidente com a superfície do automóvel.

Na Tabela 8 estão descritos os tempos de limpeza para as duas velocidades de entrada da solução de limpeza estudadas.

Tabela 8: Tempos de limpeza do tanque variando a velocidade de entrada.

σ (mN·m ⁻¹)	θ (°)	μ (mPa·s)	v_e (m·s ⁻¹)	Tempo de Limpeza (s)
0,0338	45	1	0,05	51,09
			0,2	22,94
			0,5	12,47
			0,8	7,09

Para simulações em que $v_e = 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ foi obtido um tempo de limpeza de 51,09 segundos enquanto no caso em que a velocidade de entrada do fluido de limpeza foi $v_e = 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ o tempo de limpeza foi de apenas 7,09 segundos. Assim, de maneira a otimizar o tempo de limpeza da carroçaria metálica é necessário utilizar velocidades de entrada da solução de limpeza maiores, de modo, a arrastar os resíduos de sujidade com maior facilidade. Neste caso a velocidade de entrada mais eficiente é $v_e = 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.2.4. Estudo da influência da massa volúmica

A variação do caudal mássico à saída do tanque e a variação da massa de fase 2 no tejadilho do automóvel em função do tempo de escoamento para os diferentes valores da massa volúmica da fase 2 são apresentados nas Figuras 43 e 44.

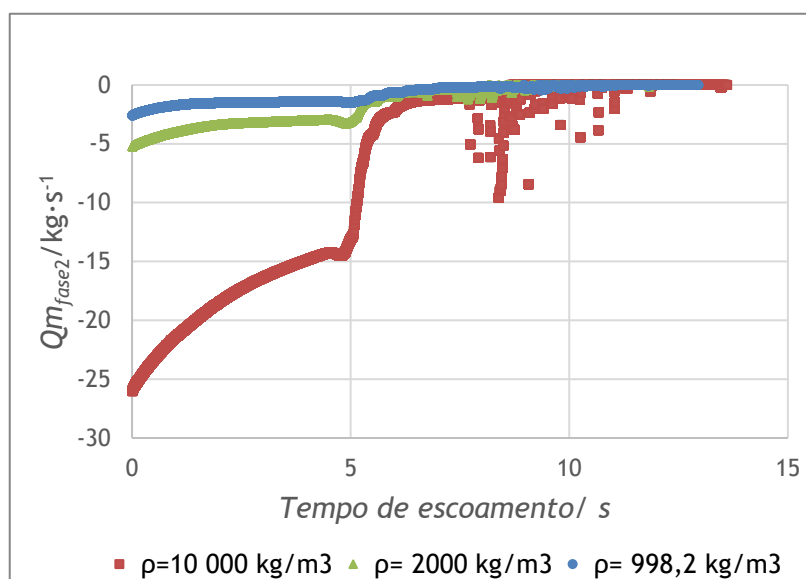


Figura 43: Caudal mássico da fase 2 para as massas volúmicas estudadas, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

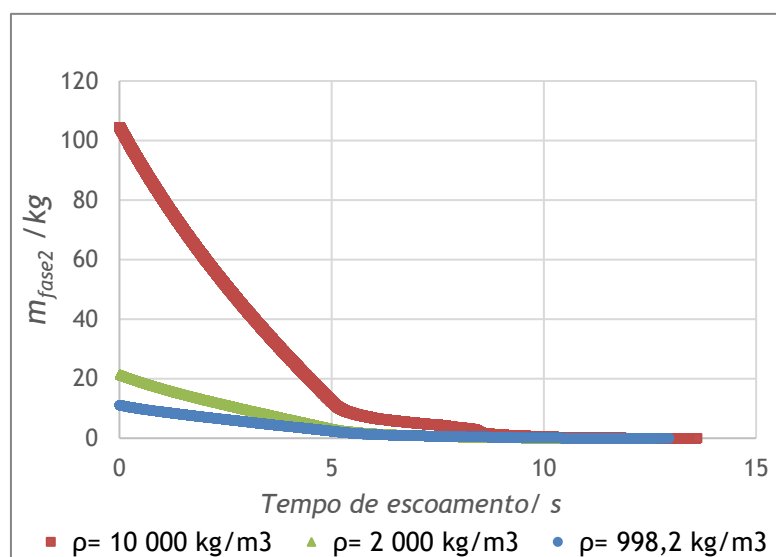


Figura 44: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para as massas volúmicas estudadas, $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0\text{ mPa}\cdot\text{s}$.

É possível observar que para valores maiores de massa volúmica da fase 2 aumenta o caudal mássico de resíduo à saída.

Os tempos de limpeza para as massas volúmicas da fase 2 estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9: Tempos de limpeza do tanque variando a massa volúmica da fase 2.

$\sigma\text{ (mN}\cdot\text{m}^{-1}\text{)}$	$\theta\text{ (}^\circ\text{)}$	$\mu\text{ (mPa}\cdot\text{s)}$	$\rho_{fase2}\text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$	Tempo de Limpeza (s)
0,0338	45	1	998,2	12,47
			2000	12,16
			10000	13,55

Quando a massa volúmica da gordura é duplicada o tempo de limpeza permanece praticamente o mesmo, no entanto quando a densidade da fase 2 é aumentada em 10 vezes existe um aumento de 1 segundo no tempo de limpeza da gordura da superfície do automóvel. No caso em que os resíduos apresentam maior massa volúmica, a solução de limpeza necessita de mais tempo para penetrar e quebrar a sujidade, prolongando assim o tempo total de limpeza. No entanto, a influência da massa volúmica não é tão significativa relativamente aos outros parâmetros considerados.

5. Conclusões

A etapa de pré-tratamento, nomeadamente o tratamento de superfície, do processo *paint shop* da manufatura automóvel é essencial para conferir uma maior estabilidade e durabilidade ao revestimento de pintura da carroçaria metálica do automóvel. Assim, o estudo de fatores que influenciam este processo de desengorduramento é de extrema importância de modo a tornar possível a sua otimização e consequente aumento da produtividade industrial.

Os modelos CFD permitem simular de forma simplificada sistemas complexos como é o caso do tanque de desengorduramento. Por isso, recorreu-se ao software ANSYS Fluent para simular em 2D o escoamento e entender a influência de diversos fatores no tempo de limpeza de um sistema multifásico. Fatores como a viscosidade e massa volúmica dos resíduos, a tensão superficial e o ângulo de contacto e a velocidade de entrada da solução de limpeza foram testados.

A viscosidade da gordura tem um impacto significativo no tempo de limpeza da superfície da carroçaria metálica, sendo que quanto mais viscoso for o fluido mais difícil será a sua remoção devido ao aumento da resistência à deformação imposta pelo escoamento. No que diz respeito à massa volúmica da fase 2, esta não apresenta tanto impacto no tempo de limpeza, no entanto, quanto maior a massa volúmica maior o tempo de escoamento necessário para limpar totalmente a superfície.

O aumento do ângulo de contacto diminui o tempo de limpeza da superfície. Valores de ângulo de contacto maiores provocam menos afinidade da gordura à superfície metálica dando origem à formação de gotículas que tornam mais fácil a sua remoção. Adicionalmente, verificou-se que quanto maior a tensão superficial menor o tempo de limpeza. Valores de tensão mais elevados reduzem a adesão entre as fases e, portanto, é mais difícil quebrar a sua interface tornando menos propensa a sua mistura.

Por fim, quanto menor a velocidade de entrada da solução de limpeza no tanque maior será o tempo de limpeza. Uma menor velocidade apresenta menos energia cinética capaz de arrastar a gordura de forma constante levando ao seu acumular e consequente mais tempo de escoamento para a eliminar totalmente da superfície metálica.

Conclui-se assim que é essencial conhecer e entender as características dos resíduos de sujidade de modo a garantir uma limpeza eficaz num intervalo de tempo ótimo. Para além disso, investir em investigação e desenvolvimento do estudo da hidrodinâmica do sistema, exemplo, mudar as condições operacionais para velocidades de entrada da solução de limpeza maiores ou alterar a posição dos aspersores e distribuidores de solução no interior do tanque são sugestões que permitem otimizar o tempo do desengorduramento da carroçaria metálica.

6. Avaliação do Trabalho Realizado

6.1. Objetivos Realizados

Ao longo dos meses de trabalho da dissertação foi possível testar diferentes parâmetros que influenciam o processo de tratamento de superfície na manufatura automóvel utilizando simulações CFD. Foram realizados estudos hidrodinâmicos que se basearam na análise de como a velocidade e a altura do sistema influenciam o escoamento na superfície metálica da carroçaria automóvel.

Depois de refinada a grelha da geometria foram efetuadas simulações de transferência de massa em 2D para diferentes parâmetros do sistema de limpeza da superfície. Os resultados foram comparados entre si de maneira a definir quais os parâmetros que otimizam o tempo de limpeza do desgorduramento da camada de resíduos na superfície da carroçaria metálica.

Desta forma, os objetivos deste trabalho foram alcançados, tendo sido possível obter algumas sugestões para melhoria da etapa de desgorduramento da carroçaria automóvel.

6.2. Contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

A Tabela 10 apresenta os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para os quais esta dissertação pode contribuir.

Tabela 10: Contribuição da dissertação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

ODS	Meta	Contribuição	Indicadores de desempenho e métricas
9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura	9.4	Implementação de tecnologias mais sustentáveis: O uso da tecnologia CFD permite reduzir o impacto ambiental dos processos industriais ao permitir a sua simulação e evitar a utilização direta de recursos como água, energia, surfactantes.	Variações das emissões de CO ₂ e consumo de energia ao longo dos anos.
	9.5	Melhoria das capacidades tecnológicas: O uso de CFD para otimizar de processos industriais incentiva a investigação científica e o investimento em tecnologias avançadas que permitem desenvolver tecnologias inovadoras.	Relatório com balanço dos números de trabalhadores no Departamento de &D ao longo dos anos;
		Promover a investigação e desenvolvimento (I&D): A implementação de CFD requer investimento em I&D, promovendo a inovação e evolução tecnológica no setor industrial	Relatórios anuais com as despesas em I&D.
12 - Consumo e Produção sustentáveis	12.2	Uso eficiente dos recursos: A redução do tempo de limpeza do processo de desgorduramento resulta numa gestão mais eficiente e sustentável dos recursos. É possível reduzir significativamente o uso de água e	Apresentar periodicamente a pegada material per capita e por PIB.

		produtos químicos (surfactante e) no processo de limpeza.	
	12.5	Redução de resíduos: Melhor eficiência no processo de desengorduramento reduz a geração de resíduos líquidos e sólidos.	Apresentar taxa de resíduos reciclados anualmente.
	12.8	Conscientização para práticas sustentáveis: A implementação e divulgação de tecnologias como CFD permite dar a conhecer os benefícios do desenvolvimento sustentável e aumentar a conscientização da sociedade para práticas industriais sustentáveis.	Fazer inquérito populacional para saber qual a percentagem que reporta ter acesso a informações relevantes sobre tecnologias de desenvolvimento sustentável.

6.3. Outros Trabalhos Realizados

Com o objetivo de complementar esta dissertação foi feita a análise reológica da solução de limpeza. Existiu ainda uma tentativa de medir o ângulo de contacto da solução de limpeza com a superfície metálica de alumínio, no entanto, não foi bem sucedida por limitações de equipamento.

6.4. Apreciação Final

O tempo de desenvolvimento desta dissertação foi essencial para compreender os fatores que influenciam o processo de desengorduramento da etapa de pré-tratamento da manufatura automóvel e propor soluções de modo a otimizá-lo. A técnica de CFD mostrou um bom desempenho no estudo de sistemas multifásicos mostrando assim que pode ser utilizada para simular sistemas mais complexos podendo ser empregue em futuros projetos. Por outro lado, as simulações realizadas consumiram muito tempo o que impediu que fossem estudadas mais variáveis, como por exemplo, qual o comportamento de resíduos ainda mais viscosos no escoamento de limpeza.

Trabalhos futuros podem-se debruçar no estudo de soluções de limpeza alternativas desta vez mais sustentáveis e que diminuam, por exemplo, a adesão dos resíduos à superfície da carroçaria metálica.

Referências

- [1] STAR Institute - Associação de Investigação, “STAR Institute - Sobre nós.” Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://starinstitute.pt/sobre-nos/>
- [2] Stellantis, “Stellantis - About us.” Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.stellantis.com/en/company/about-us>
- [3] J. Delfim Tomé, “Stellantis Mangualde ficou «à beira» de bater recorde de produção em 2022.” Accessed: Mar. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.razaoautomovel.com/noticias/producao-stellantis-mangualde-2022/>
- [4] S. Campos Ferreira, “Estudo do tratamento dos efluentes no processo de Tratamento de Superfície e Cataforese”, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2019.
- [5] M.R. Pendar, F. Rodrigues, J. C. Páscoa, e R. Lima, “Review of coating and curing processes: Evaluation in automotive industry,” *Physics of Fluids*, vol. 34, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.1063/5.0109376.
- [6] H. Streitberger and K. Dössel, Eds., *Automotive Paints and Coatings*. Wiley, 2008. doi: 10.1002/9783527622375.
- [7] M. Doerre, L. Hibbitts, G. Patrick, e N. Akafuah, “Advances in Automotive Conversion Coatings during Pretreatment of the Body Structure: A Review”, *Coatings*, vol. 8, no. 11, p. 405, Nov. 2018, doi: 10.3390/coatings8110405.
- [8] N. Akafuah, S. Poozesh, A. Salaimah, G. Patrick, K. Lawler, e K. Saito, “Evolution of the Automotive Body Coating Process—A Review,” *Coatings*, vol. 6, no. 2, p. 24, Jun. 2016, doi: 10.3390/coatings6020024.
- [9] V. Aggarwal, T. Patil, V. Patil, and I. Lockley, “Air Bleed and Paint Drain Analysis for an Automotive E-Dip Process using Volume-of-Fluid Model with Hybrid Time Advancement Scheme,” *J Fluid Flow Heat Mass Transf*, 2022, doi: 10.11159/jffhmt.2022.007.
- [10] M. R. Alves Villas e F. B. Mainier, “PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE TINTAS CATÓDICAS POR ELETROFORESE E SUAS CORRELAÇÕES COM A QUALIDADE E O MEIO AMBIENTE.” Accessed: Mar. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos05/261_Tinta.pdf
- [11] N. Vatistas e A. Della Schiava, “Electro-coating bath movement/pulsed voltage and primer thickness,” *Prog Org Coat*, vol. 69, no. 3, pp. 247-251, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.porgcoat.2010.06.001.
- [12] T. Giles e Henkel, “Pretreatment for Painting: Products Finishing,” 2011. Accessed: Feb. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.pfonline.com/articles/pretreatment-for-painting>

- [13] N. C. Debnath, "Importance of Surface Preparation for Corrosion Protection of Automobiles," *J Surf Eng Mater Adv Technol*, vol. 03, no. 01, pp. 94-105, 2013, doi: 10.4236/jsemat.2013.31A014.
- [14] J. R. Landel e D. I. Wilson, "The Fluid Mechanics of Cleaning and Decontamination of Surfaces," *Annu Rev Fluid Mech*, vol. 53, no. 1, pp. 147-171, Jan. 2021, doi: 10.1146/annurev-fluid-022820-113739.
- [15] H. Köhler, V. Liebmman, M. Joppa, J. Fröhlich, P. Majschak, e F. Rüdiger, "ON THE CONCEPT OF CFD-BASED PREDICTION OF CLEANING FOR FILM-LIKE SOILS," 2019. Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: https://heatexchanger-fouling.com/wp-content/uploads/2021/09/39_Hannes-Koehler.pdf
- [16] P. J. Fryer e K. Asteriadou, "A prototype cleaning map: A classification of industrial cleaning processes," *Trends Food Sci Technol*, vol. 20, no. 6-7, pp. 255-262, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.tifs.2009.03.005.
- [17] M. Joppa, H. Köhler, F. Rüdiger, J.-P. Majschak, e J. Fröhlich, "Prediction of Cleaning by Means of Computational Fluid Dynamics: Implication of the Pre-wetting of a Swellable Soil," *Heat Transfer Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 178-188, Jan. 2020, doi: 10.1080/01457632.2018.1522096.
- [18] H. Köhler, V. Liebmman, C. Golla, J. Fröhlich, e F. Rüdiger, "Modeling and CFD-simulation of cleaning process for adhesively detaching film-like soils with respect to industrial application," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 129, pp. 157-167, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.fbp.2021.08.002.
- [19] L. Gradoń, "Resuspension of particles from surfaces: Technological, environmental and pharmaceutical aspects," *Advanced Powder Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 17-28, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.appt.2008.10.009.
- [20] D. I. Wilson *et al.*, "Cleaning of soft-solid soil layers on vertical and horizontal surfaces by stationary coherent impinging liquid jets," *Chem Eng Sci*, vol. 109, pp. 183-196, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.ces.2014.01.034.
- [21] Q. Zhao, Y. Liu, H. Müller-Steinhagen, e G. Liu, "Graded Ni-P-PTFE coatings and their potential applications," *Surf Coat Technol*, vol. 155, no. 2-3, pp. 279-284, Jun. 2002, doi: 10.1016/S0257-8972(02)00116-0.
- [22] C. Golla, H. Köhler, V. Liebmman, J. Fröhlich, e F. Rüdiger, "CFD-based three-dimensional modeling of an adhesively detaching soil layer in a channel flow with sudden expansion," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 136, pp. 176-183, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.fbp.2022.10.004.
- [23] R. R. Fernandes, J.-H. Tsai, e D. I. Wilson, "Comparison of models for predicting cleaning of viscoplastic soil layers by impinging coherent turbulent water jets," *Chem Eng Sci*, vol. 248, p. 117060, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ces.2021.117060.

- [24] R. R. Fernandes e D. I. Wilson, “Modelling the cleaning of viscoplastic layers by impinging coherent turbulent water jets,” *J Nonnewton Fluid Mech*, vol. 282, p. 104314, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jnnfm.2020.104314.
- [25] I. Sousa Fernandes, “Two-Phase Flow in NETmix Reactors”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2018.
- [26] C. T. Crowe, Eds., *Multiphase Flow Handbook*. CRC Press, 2005. doi: 10.1201/9781420040470.
- [27] ANSYS Inc, “Multiphase Flows,” in *ANSYS Fluent Theory Guide*, 2021.
- [28] P. C. Hiemenz e R. Rajagopalan, *Principles of Colloid and Surface Chemistry*, 3rd ed. Nova Iorque, 1997.
- [29] B. E. Launder and D. B. Spalding, *Lectures in mathematical models of turbulence*. London: Academic Press, 1972.
- [30] ANSYS Inc., “Standard, RNG, and Realizable k- ϵ Models,” in *ANSYS Fluent Theory Guide*, 2021.
- [31] E. R. Garcez Lencastre, “Analysis of natural ventilation in primary classrooms using CFD”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2024.
- [32] ANSYS Inc., “Volume of Fluid (VOF) Model Theory,” in *ANSYS Fluent Theory Guide*, 2021.
- [33] P. Cifani, W. R. Michalek, G. J. M. Priems, J. G. M. Kuerten, C. W. M. van der Geld, e B. J. Geurts, “A comparison between the surface compression method and an interface reconstruction method for the VOF approach,” *Comput Fluids*, vol. 136, pp. 421-435, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compfluid.2016.06.026.
- [34] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, e C. Zemach, “A continuum method for modeling surface tension,” *J Comput Phys*, vol. 100, no. 2, pp. 335-354, Jun. 1992, doi: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.
- [35] Cussler. E. L., “Fundamentals of Mass Transfer,” in *Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems*, Cambridge University Press: Cambridge, Ed., 2009, pp. 237-273.
- [36] J. R. Welty, C. E. Wicks, R. E. Wilson, e G. L. Rorrer, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 5th ed. 2008.
- [37] The garage built by Eastwood, “History Timeline and Types of Automotive Paint.” Accessed: Feb. 16, 2024. [Online]. Available: <https://thegarage.eastwood.com/history-timeline-and-types-of-automotive-paint/>
- [38] M. R. Mahadeshwara, “Contact angle measurements.” Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.tribonet.org/wiki/contact-angle-measurements/>

Apêndice A - Evolução da tecnologia de tratamento e pintura automóvel

Os primeiros processos de revestimento introduzidos nos anos 20 utilizavam tintas de secagem ao ar que necessitavam de ser lixadas e alisadas. A aplicação das tintas era repetida diversas vezes de modo a formar várias camadas de revestimento. No fim deste procedimento, os veículos eram polidos para obter superfícies brilhantes. Estes processos eram realizados manualmente e levavam semanas a serem concluídos. Para além disso, não possuíam grande resistência às intempéries ou luz solar, ficando secos e quebradiços em pouco tempo [6], [8], [37].

Mais tarde, na década de 40, com a introdução da produção em massa foi necessário recorrer a novos revestimentos que permitissem uma secagem mais rápida. Desta forma, os revestimentos passaram a ser aplicados através de um equipamento de pulverização, eram designados por “esmaltes de estufa” e tinham por base resinas alquídicas (obtidas pela condensação de poliálcoois com poliácidos ou anidridos). Estes diziam ser mais uniformes e precisar de menos processos abrasivos. Para além disso, as matérias-primas naturais utilizadas no fabrico das tintas, devido à sua disponibilidade limitada, começaram a dar lugar a produtos químicos sintéticos. O processo de revestimento foi, por isso, reduzido para uma semana. O número de revestimentos aplicados foi igualmente reduzido tal como a sua espessura, sendo que nesta altura correspondiam a cinco camadas todas pulverizadas manualmente. A camada correspondente ao *primer* tem como função proteger contra a corrosão, os *primers* de superfície, frequentemente aplicados nas extremidades frontais e áreas expostas dos automóveis, fornecem suavidade e resistência a lascas, já a cor e resistência às intempéries é dada pela camada final de acabamento [4], [5], [6], [8].

Na década de 1950, o processo de aplicação do primário passou a ser feito por imersão. No entanto, por questões ambientais e de segurança devido à emissão de solventes e risco de incêndio, este processo foi substituído pela utilização de tintas à base de água e tintas de eletrodeposição anódica. [4], [6], [8].

Nos anos 70, os revestimentos de deposição catódica vieram substituir a eletrodeposição anódica utilizada anteriormente, uma vez que, possuíam melhor proteção contra corrosão. Na eletrodeposição catódica, o corpo metálico do automóvel funciona como um cátodo, isto é, as partículas de tinta apresentam carga positiva, são atraídas e, por fim, depositadas no automóvel em construção. Simultaneamente, passaram a ser utilizados revestimentos superiores (*top coats*) de duas camadas, caracterizados pela aplicação de uma camada de base (*basecoat*), responsável pela cor, seguindo-se um verniz (*clearcoat*), um revestimento transparente mais espesso que proporciona uma maior durabilidade à cor anteriormente aplicada. Desta evolução, resultou uma melhor proteção contra a corrosão e

maior durabilidade da camada superior. No entanto, graças ao elevado custo do processo de pintura do método “*basecoat/clearcoat*” este era insuportável para as linhas de automóveis mais baratas, até ao final da década de 1980 foi utilizado apenas em linhas de automóveis mais caras e de alta qualidade [5], [6], [8], [9].

Em 1990, foram desenvolvidos os primeiros *basecoats* e *primers* de superfície à base de água com o objetivo de contribuir para a conformidade ambiental dos processos. Desta forma, os primários à base de água passaram a ser utilizados cada vez com mais frequência [6].

Juntamente com o desenvolvimento tecnológico de revestimento e pintura, as técnicas de aplicação por pulverização também sofreram melhorias significativas deixando de ser necessária a habilidade manual na pintura. Com esta evolução não só foi possível diminuir significativamente o intervalo de tempo em que carroçaria sai da oficina e entra na linha de montagem como também se garantiu uma maior a segurança do trabalhador e, por fim, a uniformização da tinta depositada na superfície [4], [6].

Atualmente, a proteção contra a corrosão e a durabilidade da cor e do brilho são cerca de duas vezes superiores do que era há 25 anos. A criação de novos substratos, a introdução de tintas de eletrodeposição catódica, a utilização de *primers* líquidos ou em pó e o sistema de revestimento superior de duas camadas foram os principais fatores que contribuíram para o aumento do tempo de vida de um automóvel. Nos dias atuais, a maior parte dos *clearcoats* utilizados na Europa são baseados numa formulação de dois componentes, uma resina acrílica com funções OH e um reticulador reativo de poliuretano. Desta forma, o tempo de vida de um automóvel já não está relacionado com a corrosão ou a durabilidade do revestimento e da cor [6], [8].

Apêndice B - Análise reológica da solução de limpeza

Relativamente à análise reológica da solução de limpeza, composta por um desengordurante muito alcalino e um surfactante/ tensioativo, determinou-se a curva de viscosidade, a curva de escoamento e a rampa de temperatura.

A curva de viscosidade foi realizada num intervalo de temperaturas de 20°C a 40°C, para uma taxa de cisalhamento a variar entre 5 e 600 s⁻¹ num total de 30 pontos e é apresentada na Figura B.1.

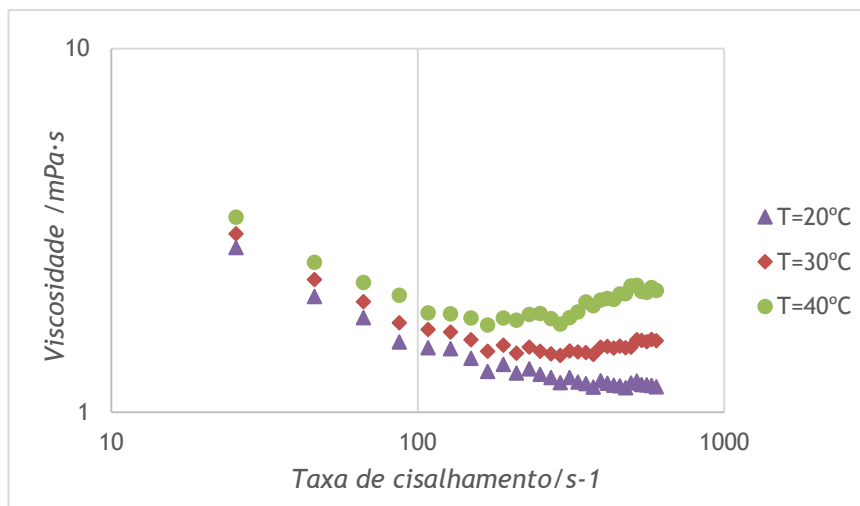


Figura B.1: Curva de viscosidade para a solução de limpeza.

A viscosidade não é constante à medida que se aumenta a taxa de cisalhamento, desta forma, o fluido apresenta comportamento de fluido não newtoniano e a sua viscosidade varia entre $1,17 \times 10^{-3}$ Pa·s e $3,44 \times 10^{-3}$ Pa·s para o intervalo de temperaturas estudado.

A curva de escoamento, representada na Figura B.2 foi realizada a uma tensão de cisalhamento de 20 Pa para um intervalo de temperaturas de 20°C a 40°C e um total de 30 pontos.

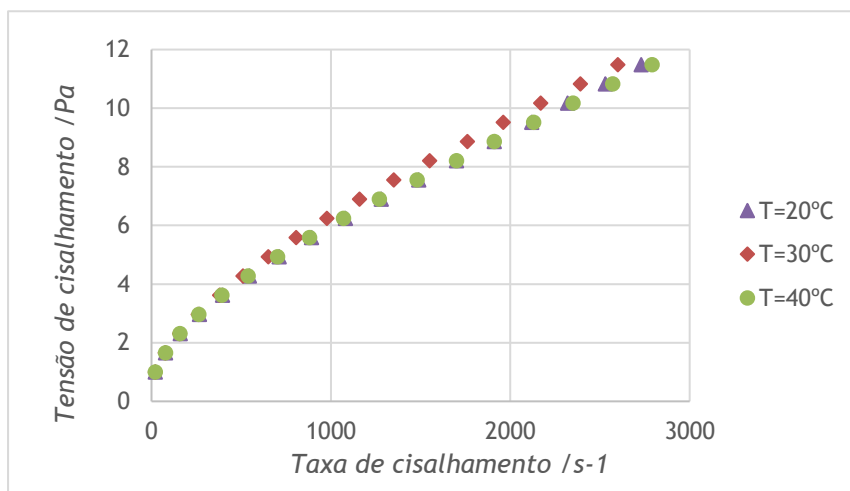


Figura B.2: Curva de escoamento para a solução de limpeza.

Para todas as temperaturas estudadas a solução não apresenta tensão de cedência. Analisando o comportamento da curva de escoamento, conclui-se que a solução corresponde a um material pseudoplástico, e por isso, confirma que se trata de um fluido não newtoniano.

Por fim, foram realizados dois ensaios de rampa de temperatura para taxas de cisalhamento de 50 s^{-1} e 200 s^{-1} num intervalo de temperatura de 40°C a 65°C .

A Figura B.3 apresenta a rampa de temperatura para a solução de limpeza.

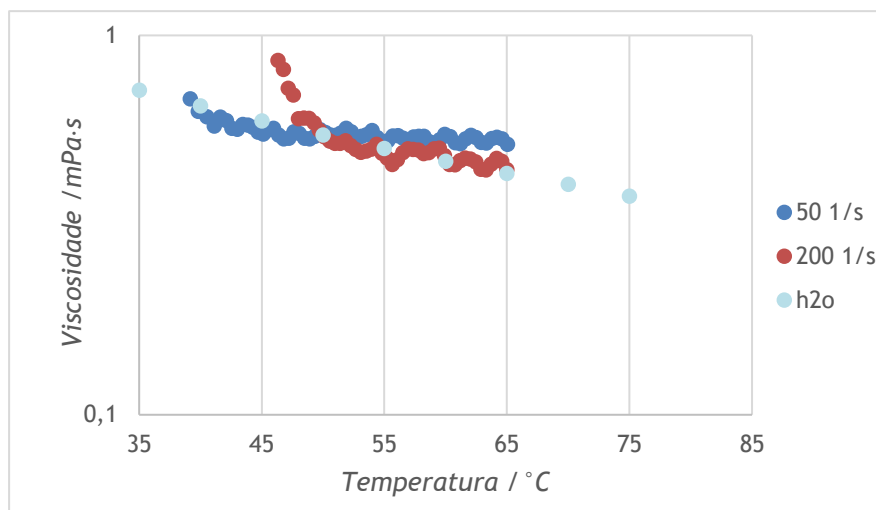


Figura B.3: Rampa de temperatura para a solução de limpeza.

Como seria de esperar a viscosidade da solução de limpeza diminui com o aumento da temperatura, para além que a variação da viscosidade da solução de limpeza é idêntica à variação da viscosidade da água com a temperatura.

Apêndice C - Influência da viscosidade, ângulo de contacto e tensão superficial no tempo de limpeza

C.1 Viscosidade

A Tabela C.1 apresenta os tempos de limpeza para as simulações em que $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ fazendo variar a viscosidade da fase 2.

Tabela C.1: Tempos de limpeza do tanque variando a viscosidade da fase 2.

$\sigma \text{ (mN}\cdot\text{m}^{-1}\text{)}$	$\theta \text{ (}^\circ\text{)}$	$\mu \text{ (mPa}\cdot\text{s)}$	Tempo de Limpeza (s)
33,8	90	1	7,63
		10	17,7
		100	62,54
	45	1	12,47
		10	29,12
		100	93,63
	0	1	15,26
		10	41,42
		100	117,37
70	90	1	6,08
		10	12,29
		100	43,16
	45	1	9,26
		10	23,14
		100	79,41
	0	1	15,3
		10	41,99
		100	121,64

As Figuras C.1 a C.4 apresentam o caudal mássico à saída do tanque e a variação da massa de fase 2 na superfície do automóvel em função do tempo de escoamento para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e para os ângulos de contacto $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 0^\circ$, respetivamente.

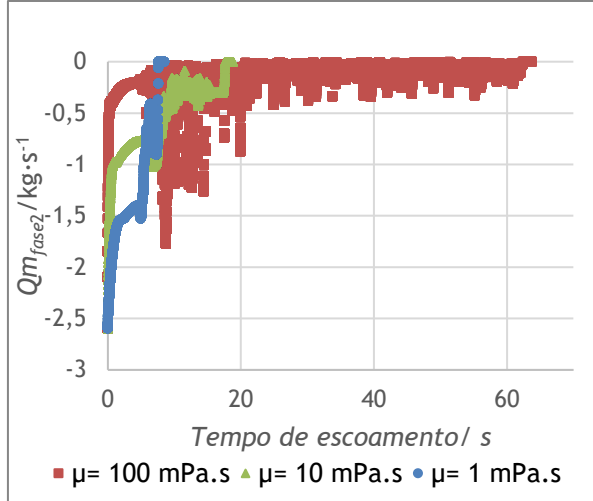


Figura C.1: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 90^\circ$.

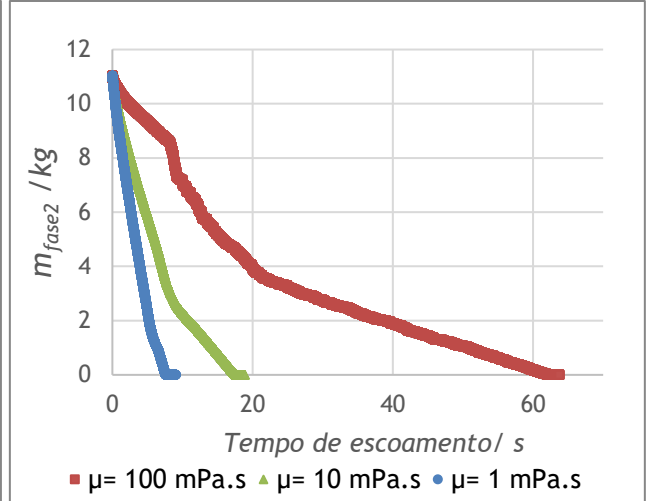


Figura C.2: Variação de m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 90^\circ$.

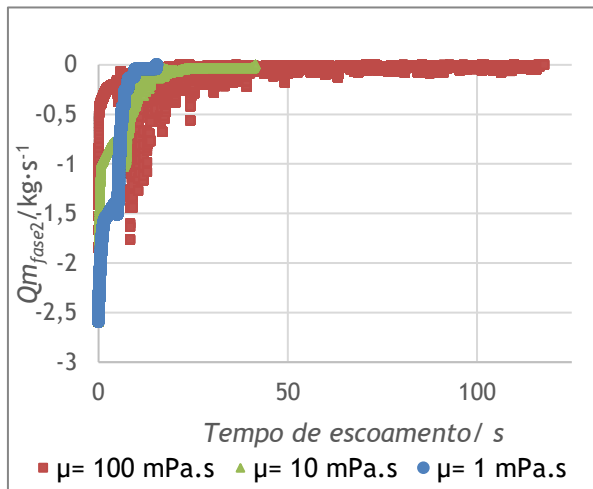


Figura C.3: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 0^\circ$.

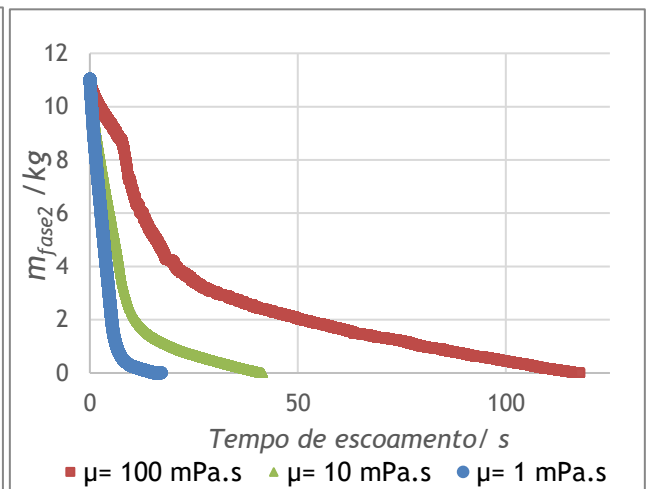


Figura C.4: Variação de m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 0^\circ$.

As Figuras C.5 a C.10 apresentam o caudal mássico à saída do tanque e a variação da massa de fase 2 na superfície do automóvel em função do tempo de escoamento para as viscosidades estudadas para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e para os ângulos de contacto $\theta = 90^\circ$, $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 0^\circ$, respetivamente.

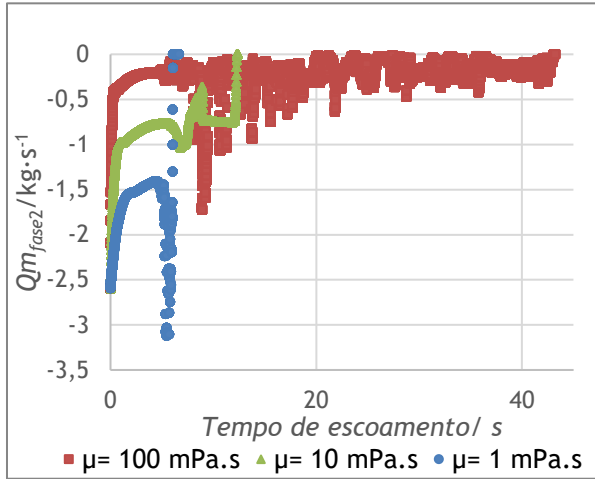


Figura C.5: Caudal mássico fase 2 para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 90^\circ$.

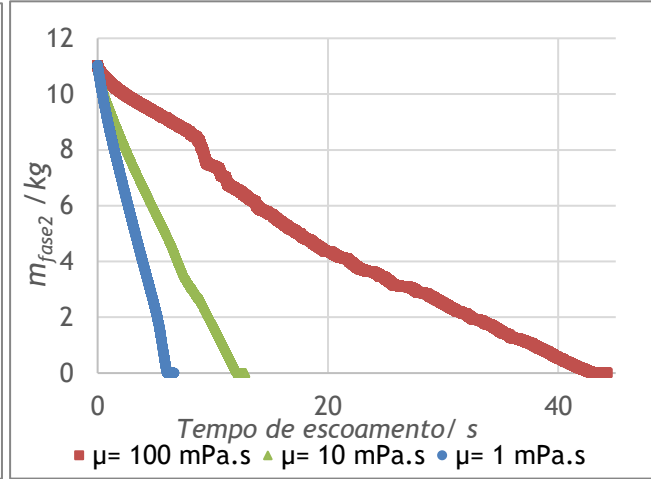


Figura C.6: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 90^\circ$.

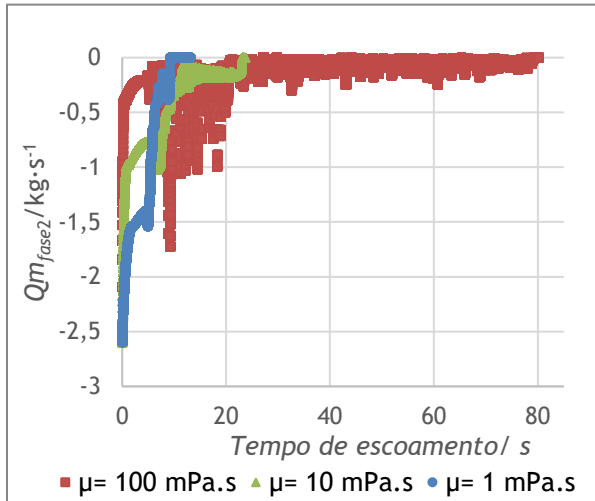


Figura C.7: Caudal mássico fase 2 para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$.

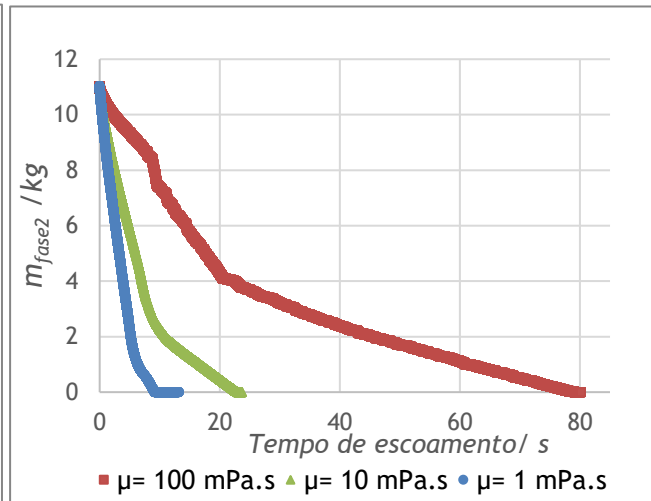


Figura C.8: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 45^\circ$.

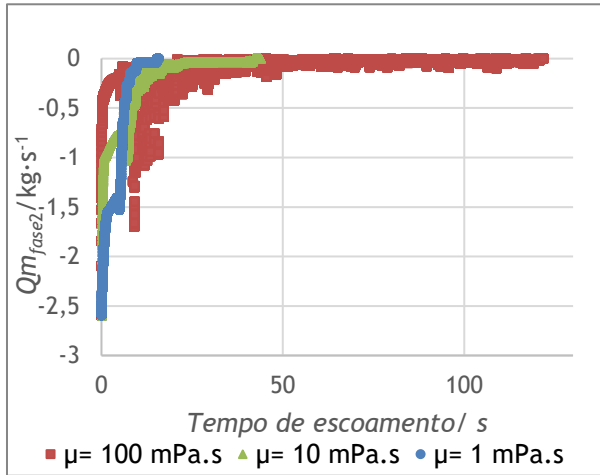


Figura C.9: Caudal mássico fase 2 para as viscosidades estudadas, $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 0^\circ$.

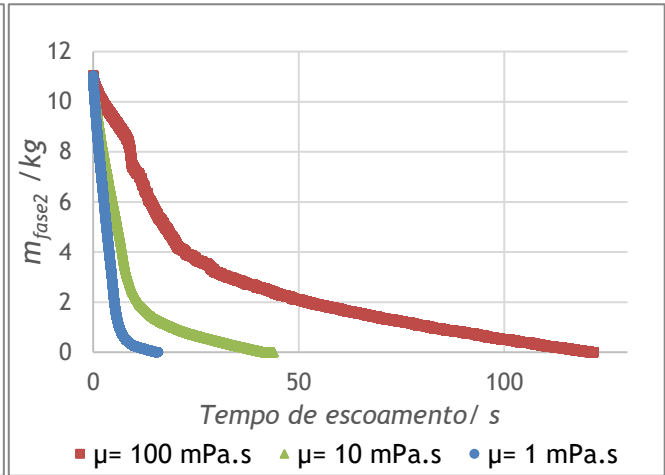


Figura C.10: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para as viscosidades estudadas, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\theta = 0^\circ$.

C.2 Ângulo de contacto e tensão superficial

A Tabela C.2 apresenta os tempos de limpeza para as simulações em que $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ fazendo variar o ângulo de contacto.

Tabela C. 2: Tempos de limpeza para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

$\sigma \text{ (mN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\theta \text{ (}^\circ)$	$\mu \text{ (mPa}\cdot\text{s)}$	Tempo de Limpeza (s)
33,8	135	1	6,36
	90		7,63
	45		12,47
	0		15,26
70	135		5,18
	90		6,08
	45		9,26
	0		15,3
33,8	90	10	17,7
	45		29,12
	0		41,42
70	90		12,29
	45		23,14
	0		41,99
33,8	90	100	62,54
	45		93,63
	0		117,37
70	90		43,16
	45		79,41
	0		121,64

Nas Figuras C.11, C.12, C.13 e C.14 estão representadas a comparação do caudal mássico e a variação da massa de fase 2 no tejadilho do automóvel para os ângulos de contacto estudados em função do tempo de escoamento para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e para as viscosidades $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, respetivamente.

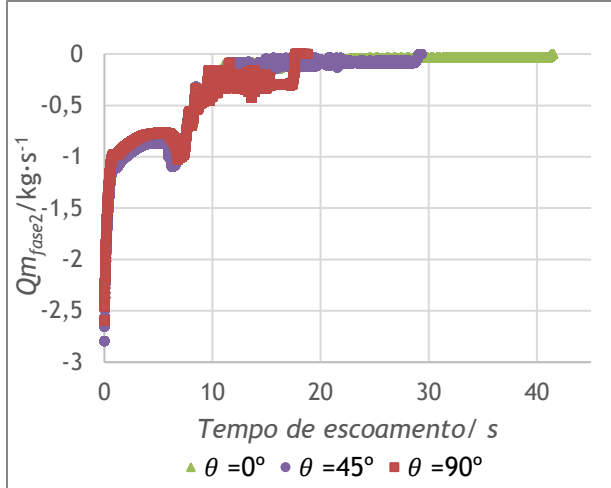


Figura C.11: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

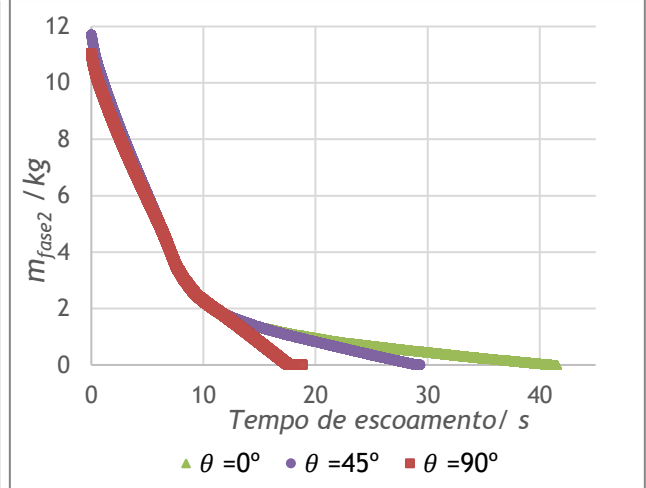


Figura C.12: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

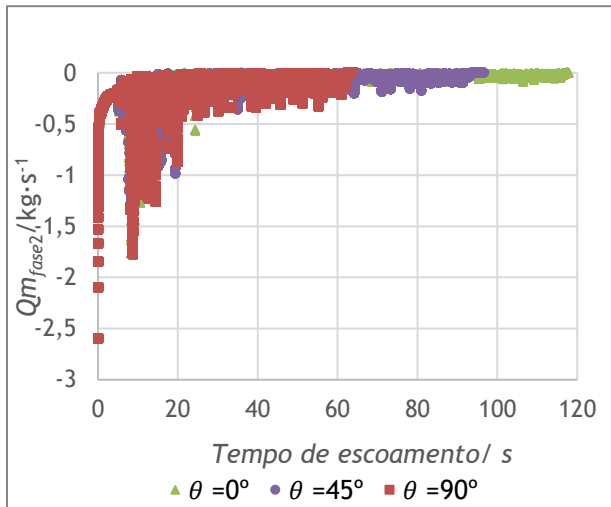


Figura C.13: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

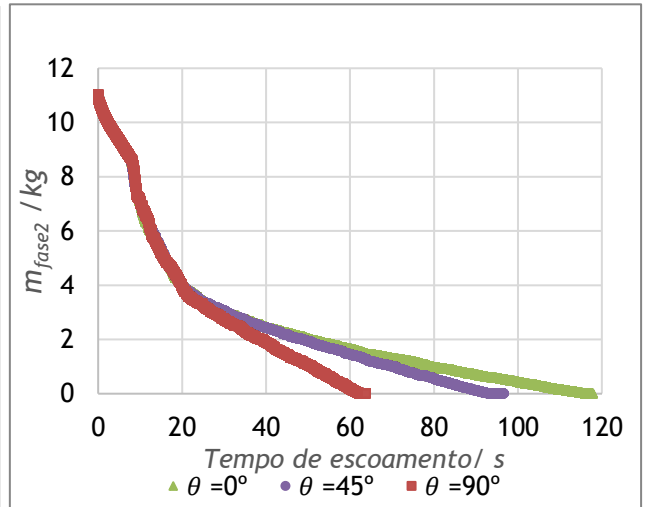


Figura C.14: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 33,8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

As Figuras C.15 a C.18 apresentam o caudal mássico à saída do tanque e a variação da massa de fase 2 no tejadilho do automóvel em função do tempo de escoamento para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e para as viscosidades $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, respetivamente.

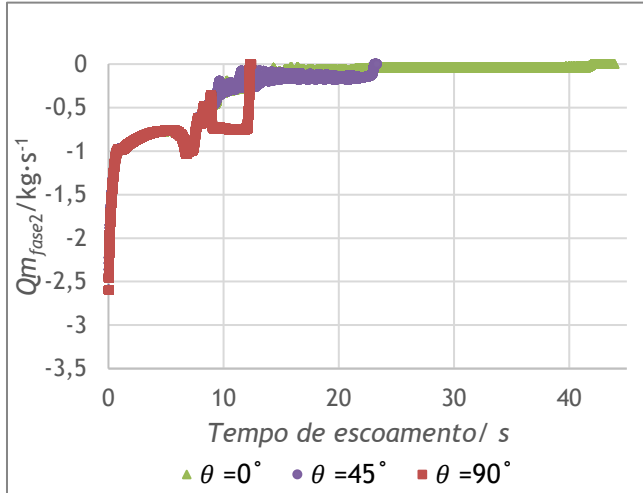


Figura C.15: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

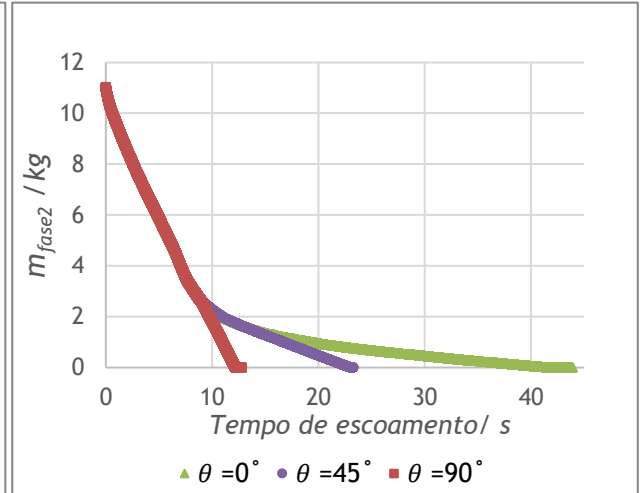


Figura C.16: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

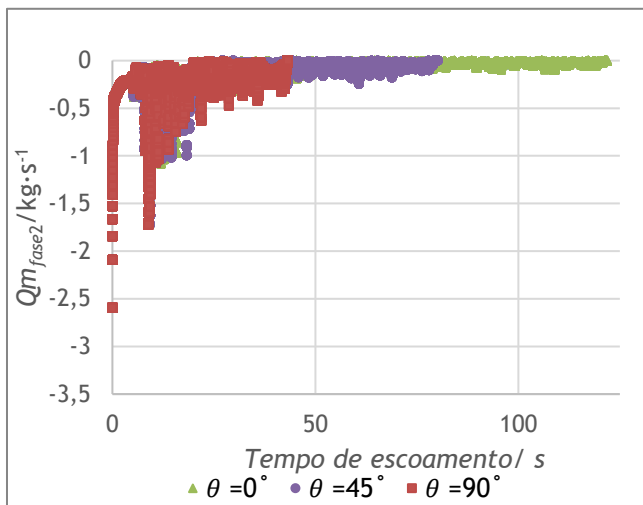


Figura C.17: Caudal mássico fase 2 para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

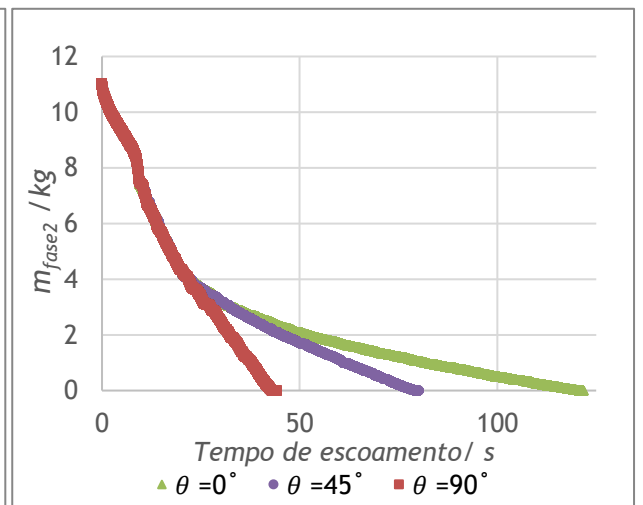


Figura C.18: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\sigma = 70,0 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ e $\mu_{\text{fase2}} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

A Tabela C.3 apresenta os tempos de limpeza para as simulações em que é estudada a influência da tensão superficial para os ângulos de contacto $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 0^\circ$ e viscosidades $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Tabela C.3: Tempos de limpeza para $\theta = 45^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

σ (mN·m ⁻¹)	θ (°)	μ (mPa·s)	Tempo de Limpeza (s)
33,8	90	1	7,63
		10	17,7
		100	62,54
70		1	6,08
		10	12,29
		100	43,16
33,8	45	1	12,47
		10	29,12
		100	93,63
70,0		1	9,26
		10	23,14
		100	79,41
33,8	0	1	15,26
		10	41,42
		100	117,37
70,0		1	15,3
		10	41,99
		100	121,64

As Figuras C.19 a C.24 apresentam o caudal mássico à saída do tanque e a variação da massa de fase 2 na superfície do automóvel em função do tempo de escoamento para os valores estudados da tensão superficial, para o ângulo de contacto $\theta = 45^\circ$ e para as viscosidades $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

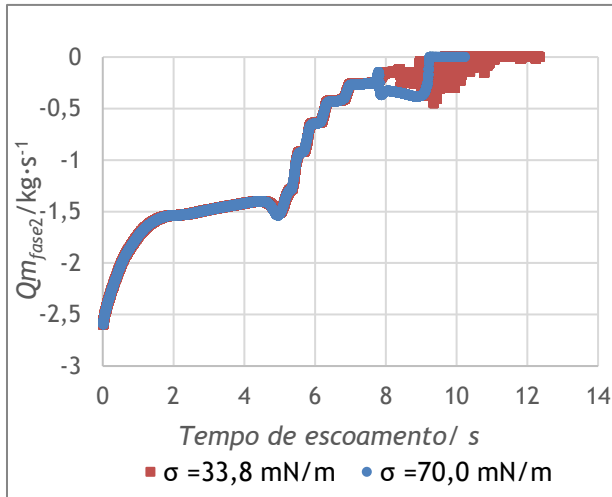


Figura C.19: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

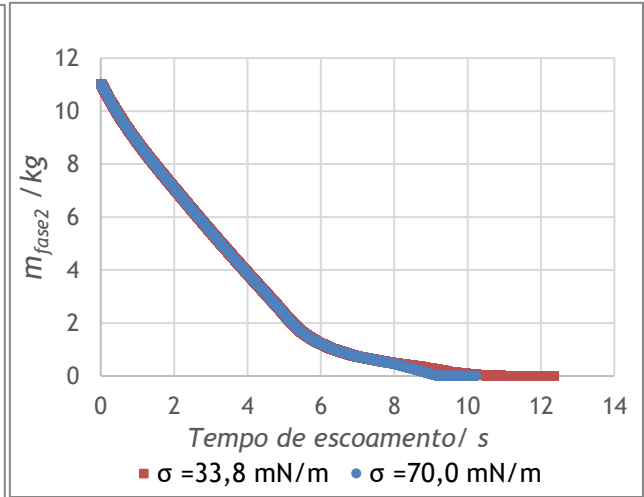


Figura C.20: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

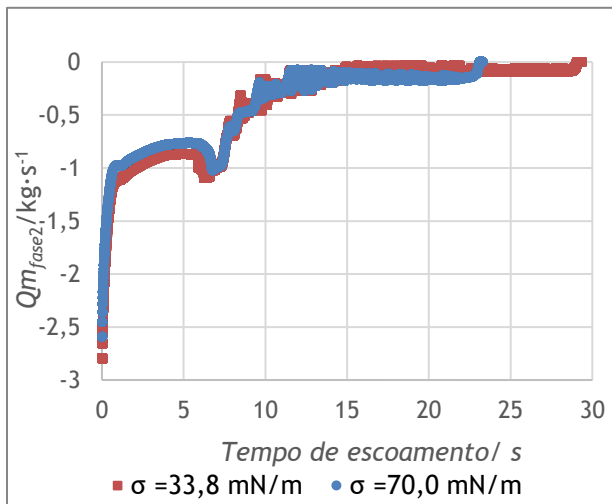


Figura C.21: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

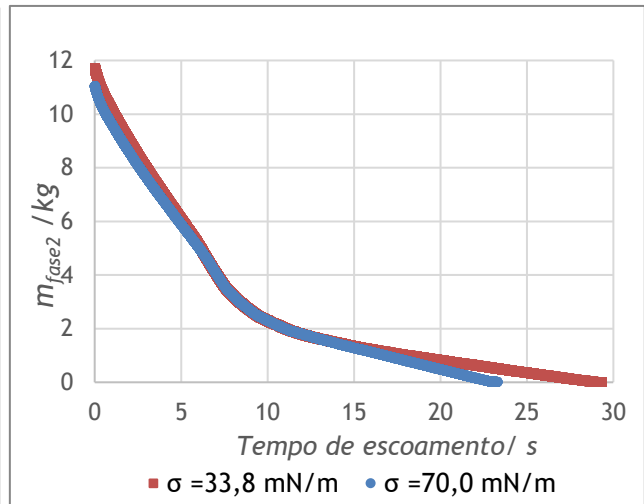


Figura C.22: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

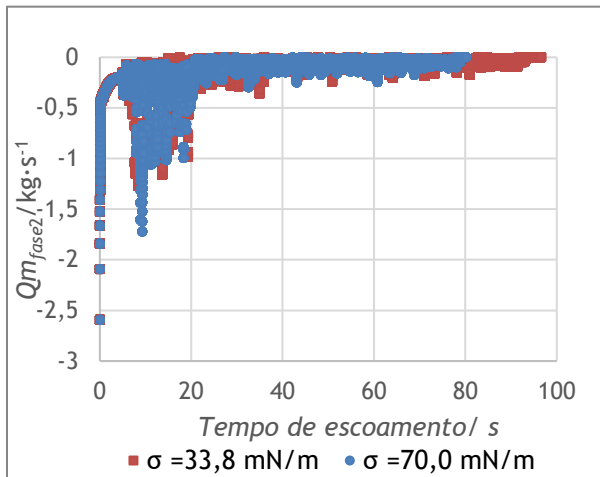


Figura C.23: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

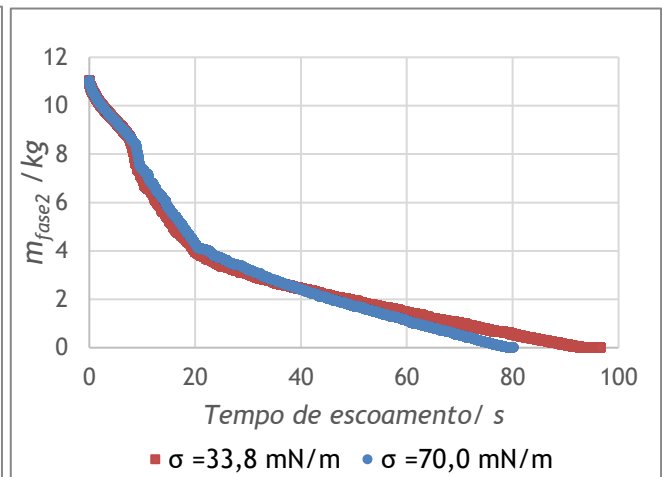


Figura C.24: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 45^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

As Figuras C.25 a C.30 apresentam a comparação do caudal mássico e do integral mássico para os valores estudados da tensão superficial, para o ângulo de contacto $\theta = 0^\circ$ e para as viscosidades $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

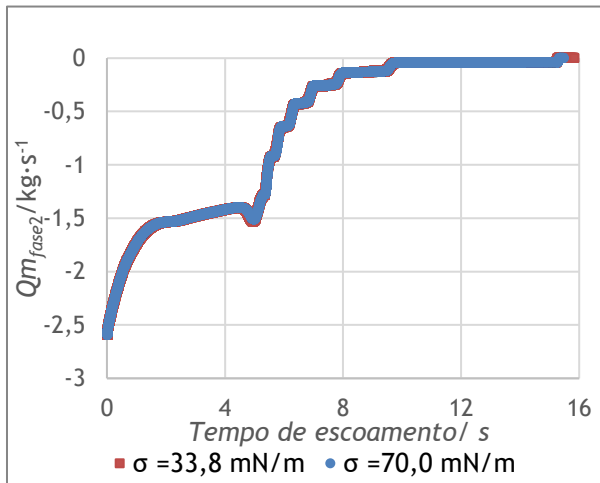


Figura C.25: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

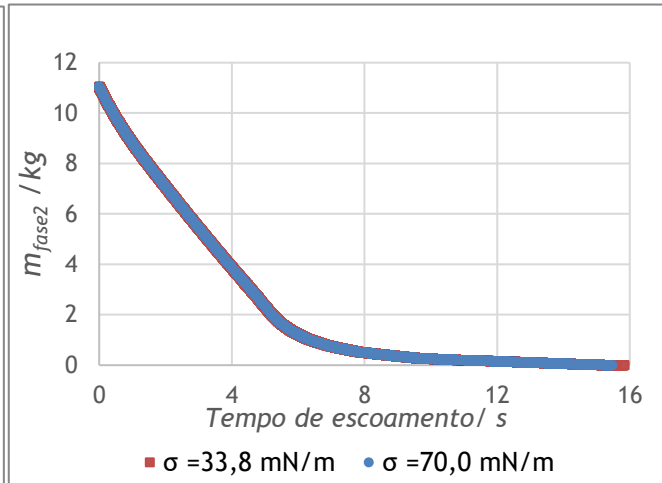


Figura C.26: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 1,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

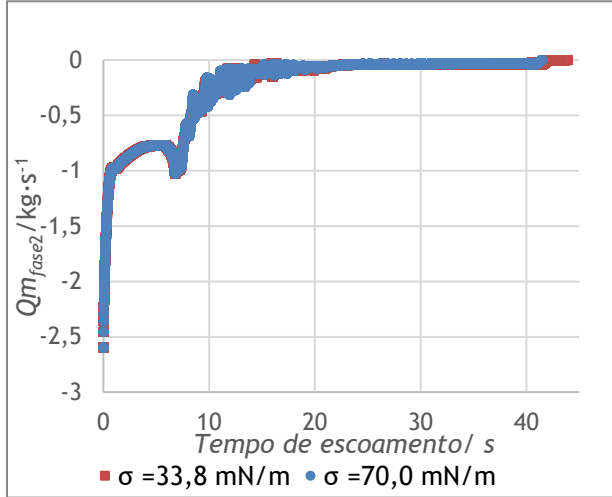


Figura C.27: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

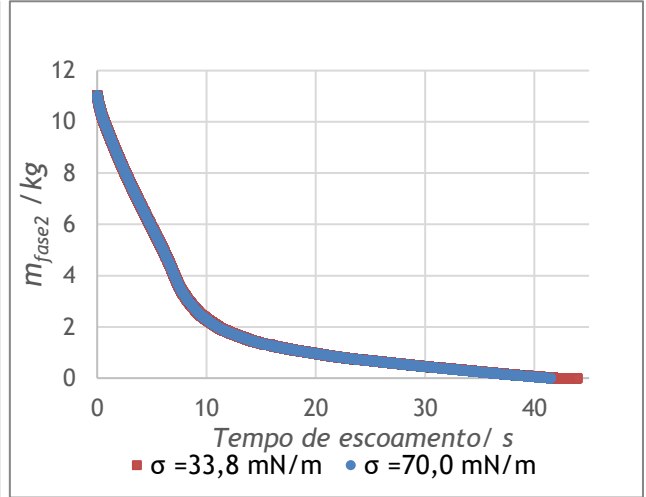


Figura C.28: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 10,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

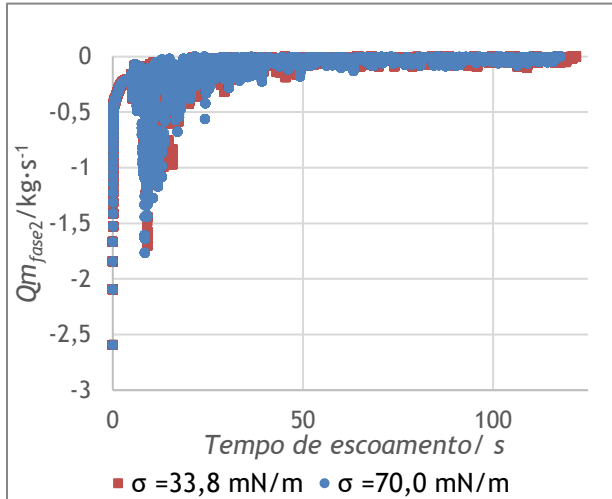


Figura C.29: Caudal mássico da fase 2 para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

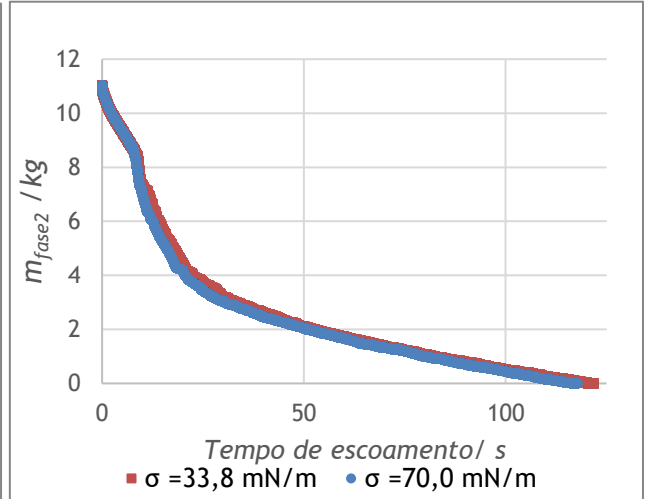


Figura C.30: Variação da m_{fase2} na superfície do automóvel para $\theta = 0^\circ$ e $\mu_{fase2} = 100,0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.