



M 2021

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE MATÉRIAS-PRIMAS NUMA FÁBRICA DE TINTAS

DANIEL MAURÍCIO ARAÚJO OLIVEIRA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Caracterização reológica e dimensionamento de um sistema de transferência de matérias-primas numa fábrica de tintas

Dissertação de Mestrado

de

Daniel Maurício Araújo Oliveira

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

CIN-Corporação Industrial do Norte, S.A.



CIN - CORPORAÇÃO INDUSTRIAL DO NORTE, S.A.

Orientador na FEUP: Prof. Manuel Alves

Coordenador na CIN, S.A.: Eng. Pedro Cruz



julho de 2021

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer à Eng. Fernanda Oliveira por ter tornado a realização deste estágio possível e pela integração na empresa.

Este trabalho não poderia ter sido realizado sem o extraordinário acompanhamento dos meus orientadores, o Eng. Pedro Cruz a quem agradeço pela atitude positiva e espírito inovador contagiante e o Prof. Manuel Alves a quem agradeço o aconselhamento científico.

Não poderia deixar de mencionar o Eng. Vasco Lopes pelo interesse demonstrado no meu trabalho e pela constante disponibilidade em ajudar-me, assim como o Ricardo Rocha.

Agradeço também à Mafalda e à Catarina pelo auxílio prestado durante o trabalho experimental, ao Tiago pelo companheirismo e ao Miguel pelas entusiásticas viagens de carro, principalmente à sexta-feira.

Sendo a dissertação, a fase final de uma etapa da vida, não posso deixar de agradecer àqueles que me marcaram ao longo deste percurso atribulado de 5 anos:

Ao Marcelo, por me ter introduzido à República do Abracinho, onde fui muito feliz. Ao Zé e à Margarida por terem catalisado o meu potencial. À Sara pelas boas memórias. Ao Carlos por ter aceitado os desafios que lhe lancei.

Aos meus amigos da faculdade, especialmente ao Ricardo, Bruno, Sónia, Nanda, Inês e Joana pelo companheirismo e recorrente apoio nos bons e maus momentos.

Ao Hemant pela amizade além-fronteiras, por todos os estufados nepaleses e cortes de cabelo.

À Maria, pela paciência e por comprovar a minha teoria que é possível ouvir Smooth FM e ter menos de 30 anos.

Aos meus pais e irmão, pelo amor incondicional.

Diz a sabedoria popular que sozinho chega-se rápido, mas que acompanhado chega-se longe.

A todos, sem exceção, o meu sincero Obrigado.

Resumo

As propriedades reológicas das matérias-primas líquidas da indústria das tintas têm particular impacto no dimensionamento de sistemas de transferência, pelo que, um estudo aprofundado sobre este tema revela-se adequado ao projeto industrial de modernização “Revamp Nováqua”, em curso na empresa CIN.

A presente dissertação tem como objetivos a caracterização reológica de um conjunto de trinta e seis matérias-primas líquidas utilizadas no fabrico de tintas de base aquosa e o dimensionamento de um sistema de transferência destas matérias-primas.

Neste trabalho, realizaram-se medições de viscosidade a taxas de corte e temperaturas diferentes para um conjunto de matérias-primas e ajustaram-se modelos reológicos preditivos de forma a simular o comportamento destes fluidos em diversas condições de interesse. Adicionalmente, foram realizados ensaios de tixotropia para averiguar a estabilidade das matérias-primas a taxas de corte elevadas, semelhantes às sofridas na passagem pela bomba. Apenas um aditivo apresentou mudanças irreversíveis nas propriedades reológicas.

A partir da análise dos resultados, foi possível classificar os fluidos de acordo com o seu comportamento reológico: newtoniano ou pseudoplástico. Para além disso, concluiu-se que a viscosidade das emulsões é pouco afetada pela temperatura, ao contrário dos aditivos. De seguida, foram identificados os aditivos em que existe uma maior dependência da temperatura e em que deverá ser considerada a possibilidade de colocação de um sistema de isolamento térmico nos respetivos tanques de armazenamento.

Com a informação reológica recolhida na primeira fase da dissertação, procedeu-se ao dimensionamento do sistema de transporte e doseamento destas matérias-primas, através da criação de folhas de cálculo automático para cada matéria-prima. A manipulação destas folhas de cálculo permite determinar a influência de diferentes parâmetros (temperatura do fluido, comprimento e diâmetro da tubagem e desnível da instalação) na altura manométrica que o sistema de bombagem deverá fornecer para promover o escoamento do fluido ao caudal desejado.

Palavras-Chave: Tintas, Reologia, Modelo de Carreau-Yasuda, Dimensionamento

Abstract

The rheological properties of liquid raw materials used in the paints industry have a significant influence on the design of transfer systems, therefore a detailed study on this topic is relevant for the industrial modernization project “Revamp Nováqua”, ongoing at the host company CIN.

The objectives of this dissertation include the rheological characterization of a set of thirty-six liquid raw materials used in the production of water-based paints and the design of a transfer system for these raw materials.

For a set of raw materials, viscosity measurements were carried out at different shear rates and temperatures. Predictive rheological models were fitted to the rheological measurements, in order to simulate the behavior of these fluids under different conditions of interest. Moreover, thixotropy tests were carried out to verify the stability of the liquids at high shear rates, like those suffered when passing through the pump. Only one raw material had irreversible changes in the rheological properties.

From the results analysis it was possible to classify the fluids according to their rheological behavior: newtonian or pseudoplastic. Furthermore, it was concluded that the viscosity of emulsions is only slightly affected by temperature, unlike additives, for most of which the viscosity is dependent on the temperature. Afterwards, the additives which showed greater dependence on temperature were identified and those were also the ones for which the possibility of placing a thermal insulation system in their storage tanks should be considered.

With the rheological information acquired in the first part of the dissertation, the design of the transport and dosing system for these raw materials was carried out, through the creation of automatic calculation spreadsheets for each raw material. The manipulation of these spreadsheets makes it possible to determine the influence of different parameters (temperature of the fluid, length and diameter of the pipe and height difference between units) on the pump head required to promote the flow of the fluid at the desired flow rate.

Keywords: Paints, Rheology, Carreau-Yasuda Model, Installation design

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.

Daniel Narciso Araújo Oliveira

05/07/2021

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	1
1.3	Contributos do autor para o Trabalho	2
1.4	Organização da Dissertação	3
2	Contexto e Estado da Arte	5
2.1	Conceitos de Reologia.....	5
2.1.1	Dependência da viscosidade com a taxa de corte.....	6
2.1.2	Dependência da viscosidade com o tempo de aplicação da deformação	8
2.1.3	Dependência da viscosidade com a temperatura.....	8
2.2	Conceitos de Reometria	9
2.2.1	Ensaio de viscosidade	9
2.2.2	Ensaio de tixotropia	9
2.3	Conceitos de Mecânica de Fluidos	11
2.3.1	Curva característica da instalação	11
2.3.2	Taxa de corte na parede da tubagem.....	13
2.3.3	Bombas	13
3	Materiais e Métodos	17
3.1	Instalação experimental	17
3.1.1	Geometrias de medição no reómetro	17
3.1.2	Reómetro utilizado e limites de medição	18
3.2	Ensaio efetuado	19
3.3	Tratamento de Dados	20
3.3.1	Obtenção dos fatores de deslocamento a_T	20
3.3.2	Equações dos modelos ajustados	20
3.3.3	Ajuste dos modelos preditivos aos dados experimentais	21
4	Resultados e Discussão.....	23

4.1	Caracterização reológica	23
4.1.1	Matérias-primas com baixa viscosidade.....	23
4.1.2	Aditivos newtonianos	24
4.1.3	Aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura.....	26
4.1.4	Aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura	28
4.1.5	Emulsões	30
4.1.6	Ensaio <i>Up & Down</i>	32
4.1.7	Ensaio de recuperação	32
4.1.8	Comparação de resultados.....	33
4.2	Dimensionamento	38
4.2.1	Influência da viscosidade e da massa volúmica na curva característica da instalação	38
4.2.2	Influência do desnível da instalação e do diâmetro e comprimento da tubagem na curva característica da instalação	39
4.2.3	Folhas automáticas de cálculo das curvas características da instalação.....	39
5	Conclusões	43
6	Avaliação do trabalho realizado.....	45
6.1	Objetivos Realizados	45
6.2	Outros Trabalhos Realizados.....	45
6.3	Apreciação Final	45
6.4	Trabalhos futuros	45
7	Referências	47
Apêndice A - <i>Layouts</i> possíveis da instalação		50
Apêndice B - Ensaio de viscosidade		52
B.1	Condições dos ensaios de viscosidade	52
B.2	Curvas dos aditivos newtonianos.....	53
B.3	Curvas dos aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura	62
B.4	Curvas dos aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura	66
B.5	Curvas das emulsões.....	78

Apêndice C - Ensaios viscométricos <i>Up & Down</i>	85
C.1 Condições dos ensaios viscométricos de <i>Up & Down</i>	85
C.2 Curvas viscométricas <i>Up & Down</i>	86
Apêndice D - Condições do ensaio de recuperação	89
Apêndice E - Folhas de cálculo automático das curvas características da instalação	90
E.1 Folha de cálculo automático para aditivos newtonianos	91
E.2 Folha de cálculo automático para aditivos pseudoplásticos independentes da temperatura	92
E.3 Folha de cálculo automático para aditivos pseudoplásticos dependentes da temperatura	93
E.4 Folha de cálculo automático para emulsões	94

Lista de Figuras

<i>Figura 1.1 - Planta da CIN-Maia [5].</i>	2
<i>Figura 2.1 - Escoamento de Couette. Adaptado de [7].</i>	5
<i>Figura 2.2 - Perfis de viscosidade típicos: (a) newtoniano; (b) pseudoplástico; (c) dilatante [10].</i>	6
<i>Figura 2.3 - Patamares newtonianos (η_0 e η_∞) numa curva típica de um fluido de Carreau-Yasuda [14].</i>	7
<i>Figura 2.4 - Parâmetros do modelo de Carreau-Yasuda. Adaptado de [9].</i>	7
<i>Figura 2.5 - (a) Variação da taxa de corte num ensaio Up & Down. Adaptado de [14] (b) Ensaio Up & Down [22].</i>	9
<i>Figura 2.6 - Fluido a) tixotrópico e b) reopético [23].</i>	10
<i>Figura 2.7 - Variação da taxa de corte num ensaio de recuperação [6].</i>	10
<i>Figura 2.8 - Variação da viscosidade num ensaio de recuperação [6].</i>	10
<i>Figura 2.9 - Perfis de velocidade $v(r)$ e de taxa de corte $\dot{\gamma}(r)$ num escoamento laminar num tubo. Adaptado de [31].</i>	13
<i>Figura 2.10 - Bomba pneumática de duplo diafragma [32].</i>	14
<i>Figura 2.11 - Bomba centrífuga [33].</i>	14
<i>Figura 2.12 - Curvas características da bomba [34].</i>	15
<i>Figura 3.1 - Geometrias de medição (a) Cone-Prato; (b) Prato-Prato.</i>	18
<i>Figura 3.2 - Instalação experimental.</i>	19
<i>Figura 3.3 - Obtenção iterativa de fatores a_T. (a) Curvas isotérmicas de viscosidade de corte em função da taxa de corte; (b) Curva mestra. Adaptado de [7].</i>	20
<i>Figura 3.4 - Printscreen de uma janela com os parâmetros do Solver.</i>	22
<i>Figura 4.1 - Curvas de viscosidade para amostra do aditivo AAA08.</i>	24
<i>Figura 4.2 - Curva mestra para o aditivo AAA08.</i>	24
<i>Figura 4.3 - Lei de Arrhenius para o aditivo AAA08.</i>	25
<i>Figura 4.4 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA14.</i>	26
<i>Figura 4.5 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA14.</i>	26
<i>Figura 4.6 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA17.</i>	27
<i>Figura 4.7 - Modelo de Lei de Potência do aditivo AAA17.</i>	28
<i>Figura 4.8 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA19.</i>	28

<i>Figura 4.9 - Curva mestra do aditivo AAA19.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.10 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA19.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.11 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA19.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.12 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE08.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.13 - Lei de Arrhenius da emulsão EEE08.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.14 - Ensaios Up & Down a 23°C: (a) sem histerese (b) com histerese.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.15 - Ensaio de recuperação do aditivo AAA23.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.16 - Comparação entre curvas de viscosidade de aditivos newtonianos a 23°C.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.17 - Comparação das curvas da viscosidade de aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.18 - Comparação das curvas da viscosidade de aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura. Medições a T=23°C.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.19 - Comparação das curvas de viscosidade das emulsões a 23°C.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.20 - Curvas de viscosidade: a) AAA11; b) AAA09.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.21 - Influência da temperatura na curva característica da instalação para o aditivo AAA12. .</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.22 - Curvas características da instalação para diferentes matérias-primas.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.23 - Influência do desnível da instalação na curva da instalação para a MP AAA24.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.24 - Influência do diâmetro da tubagem na curva da instalação para a MP AAA13.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.25 - Influência do comprimento da tubagem na curva da instalação da MP AAA21.</i>	<i>42</i>
<i>Figura A.1 - Sugestão 1 de layout da instalação em que: TA-Tanque de Armazenamento; B-Bomba e DP-Dispensor.</i>	<i>50</i>
<i>Figura A.2 - Sugestão 2 de layout da instalação em que: IBC- Industrial Bulk Container; B-Bomba; TA-Tanque de Armazenamento.</i>	<i>51</i>
<i>Figura B.1 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA05.</i>	<i>53</i>
<i>Figura B.2 - Curva mestra do aditivo AAA05.</i>	<i>53</i>
<i>Figura B.3 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA05.</i>	<i>53</i>
<i>Figura B.4 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA06.</i>	<i>54</i>
<i>Figura B.5 - Curva mestra do aditivo AAA06.</i>	<i>54</i>
<i>Figura B.6 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA06.</i>	<i>54</i>
<i>Figura B.7 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA07.</i>	<i>55</i>
<i>Figura B.8 - Curva mestra do aditivo AAA07.</i>	<i>55</i>
<i>Figura B.9 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA07.</i>	<i>55</i>

<i>Figura B.10 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA08.</i>	<i>56</i>
<i>Figura B.11 - Curva mestra do aditivo AAA08.</i>	<i>56</i>
<i>Figura B.12 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA08.</i>	<i>56</i>
<i>Figura B.13 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA09.</i>	<i>57</i>
<i>Figura B.14 - Curva mestra do aditivo AAA09.</i>	<i>57</i>
<i>Figura B.15 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA09.</i>	<i>57</i>
<i>Figura B.16 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA10.</i>	<i>58</i>
<i>Figura B.17 - Curva mestra do aditivo AAA10.</i>	<i>58</i>
<i>Figura B.18 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA10.</i>	<i>58</i>
<i>Figura B.19 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA11.</i>	<i>59</i>
<i>Figura B.20 - Curva mestra do aditivo AAA11.</i>	<i>59</i>
<i>Figura B.21 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA11.</i>	<i>59</i>
<i>Figura B.22 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA12.</i>	<i>60</i>
<i>Figura B.23 - Curva mestra do aditivo AAA12.</i>	<i>60</i>
<i>Figura B.24 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA12.</i>	<i>60</i>
<i>Figura B.25 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA13.</i>	<i>61</i>
<i>Figura B.26 - Curva mestra do aditivo AAA13.</i>	<i>61</i>
<i>Figura B.27 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA13.</i>	<i>61</i>
<i>Figura B.28 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA14.</i>	<i>62</i>
<i>Figura B.29 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA14.</i>	<i>62</i>
<i>Figura B.30 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA15.</i>	<i>63</i>
<i>Figura B.31 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA15.</i>	<i>63</i>
<i>Figura B.32 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA16.</i>	<i>64</i>
<i>Figura B.33 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA16.</i>	<i>64</i>
<i>Figura B.34 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA17.</i>	<i>65</i>
<i>Figura B.35 - Modelo de Lei de Potência do aditivo AAA17.</i>	<i>65</i>
<i>Figura B.36 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA18.</i>	<i>66</i>
<i>Figura B.37 - Curva mestra do aditivo AAA18.</i>	<i>66</i>
<i>Figura B.38 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA18.</i>	<i>67</i>
<i>Figura B.39 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA18.</i>	<i>67</i>

<i>Figura B.40 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA19.</i>	<i>68</i>
<i>Figura B.41 - Curva mestra do aditivo AAA19.</i>	<i>68</i>
<i>Figura B.42 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA19.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura B.43 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA19.</i>	<i>69</i>
<i>Figura B.44 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA20.</i>	<i>69</i>
<i>Figura B.45 - Curva mestra do aditivo AAA20.</i>	<i>70</i>
<i>Figura B.46 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA20.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura B.47 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA20.</i>	<i>70</i>
<i>Figura B.48 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA21.</i>	<i>71</i>
<i>Figur a B.49 - Curva mestra do aditivo AAA21.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura B.50 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA21.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura B.51 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA21.</i>	<i>72</i>
<i>Figura B.52 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA22.</i>	<i>73</i>
<i>Figura B.53 - Curva mestra do aditivo AAA22.</i>	<i>73</i>
<i>Figura B.54 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA22.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura B.55 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA22.</i>	<i>74</i>
<i>Figura B.56 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA23.</i>	<i>74</i>
<i>Figura B.57 - Curva mestra do aditivo AAA23.</i>	<i>75</i>
<i>Figura B.58 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA23.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura B.59 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA23.</i>	<i>75</i>
<i>Figura B.60 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA24.</i>	<i>76</i>
<i>Figura B.61 - Curva mestra do aditivo AAA24.</i>	<i>76</i>
<i>Figura B.62 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA24.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura B.63 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA24.</i>	<i>77</i>
<i>Figura B.64 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE05.</i>	<i>78</i>
<i>Figura B.65 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE05.</i>	<i>78</i>
<i>Figura B.66 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE06.</i>	<i>79</i>
<i>Figura B.67 - Curva mestra da emulsão EEE06.</i>	<i>79</i>
<i>Figura B.68 - Lei de Arrhenius da emulsão EEE06.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura B.69 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE06.</i>	<i>80</i>

<i>Figura B.70 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE07.</i>	<i>80</i>
<i>Figura B.71 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE07.</i>	<i>81</i>
<i>Figura B.72 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE08.</i>	<i>81</i>
<i>Figura B.73 - Curva mestra da emulsão EEE08.</i>	<i>82</i>
<i>Figura B.74 - Lei de Arrhenius da emulsão EEE08.</i>	<i>82</i>
<i>Figura B.75 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE08.</i>	<i>82</i>
<i>Figura B.76 - Curvas da viscosidade da amostra da emulsão EEE09.</i>	<i>83</i>
<i>Figura B.77 - Curva mestra da emulsão EEE09.</i>	<i>83</i>
<i>Figura B.78 - Lei de Arrhenius da emulsão EEE09.</i>	<i>84</i>
<i>Figura B.79 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE09.</i>	<i>84</i>
<i>Figura C.1 - Curvas viscométricas Up & Down.</i>	<i>86</i>
<i>Figura C.2 (Continuação) - Curvas viscométricas Up & Down.</i>	<i>87</i>
<i>Figura C.3 (Continuação) - Curvas viscométricas Up & Down.</i>	<i>88</i>
<i>Figura E.1 Folha de cálculo automático para aditivos newtonianos.</i>	<i>91</i>
<i>Figura E.2 Folha de cálculo automático para aditivos pseudoplásticos independentes da temperatura.</i>	<i>92</i>
<i>Figura E.3 Folha de cálculo automático para aditivos pseudoplásticos dependentes da temperatura.</i>	<i>93</i>
<i>Figura E.4 Folha de cálculo automático para emulsões.</i>	<i>94</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 4.1 - Viscosidades características das matérias-primas consideradas pouco viscosas</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 4.2 - Parâmetros da equação da viscosidade para os aditivos newtonianos.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 4.3 - Parâmetros da equação de Carreau-Yasuda para os aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 4.4 - Parâmetros da equação da viscosidade para os aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 4.5 - Parâmetros da equação da viscosidade para as emulsões</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4.6 - Viscosidades das emulsões ordenadas</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 4.7 - Dependência da T no parque das emulsões.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 4.8 - Viscosidades dos aditivos ordenadas.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 4.9 - Dependência da T no parque de aditivos</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 4.10 - Parâmetros das curvas da instalação apresentadas na secção 4.2.3</i>	<i>40</i>
<i>Tabela B.1 - Condições dos ensaios de viscosidade</i>	<i>52</i>
<i>Tabela C.1 - Condições dos ensaios viscométricos de Up & Down</i>	<i>85</i>
<i>Tabela D.1 - Condições do ensaio de recuperação</i>	<i>89</i>

Notação e Glossário

A	Área da secção circular	m^2
A_P	Área do prato	m^2
a	Parâmetro de rapidez de transição do modelo de Carreau-Yasuda	
a_T	Fator de deslocamento	
C	Constante da lei de Arrhenius	K
F_P	Força aplicada no prato superior	N
f	Fator de atrito para escoamento laminar com fluido newtoniano	
f'	Fator de atrito para escoamento laminar com fluido não-newtoniano	
g	Aceleração gravítica	$m \cdot s^{-2}$
gap	Distância Prato-Prato	m
H	Carga manométrica	m
h_f	Carga dissipada por atrito num escoamento	m
h_P	Distância entre os pratos	m
h_R	Distância Prato-Cone em $r=R$	m
k	Índice de consistência do modelo de Lei de Potência	$Pa \cdot s^n$
L	Comprimento da tubagem	m
n	Índice da Lei de Potência	
n'	Índice aparente da Lei de Potência	
P_1, P_2	Pressões nos pontos 1 e 2, respetivamente	Pa
P_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
Q	Caudal	$m^3 \cdot s^{-1}$
R	Constante universal dos gases ideais	$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
r	Posição radial	m
Re	Número de Reynolds	
T	Temperatura	K
T_R	Temperatura de referência	K
v_1, v_2	Velocidades nos pontos 1 e 2, respetivamente	$m \cdot s^{-1}$
$v_{máx}$	Velocidade máxima no perfil de velocidades de escoamento em tubo	$m \cdot s^{-1}$
v_P	Velocidade relativa entre os pratos	$m \cdot s^{-1}$
v_w	Velocidade na parede	$m \cdot s^{-1}$
z_1, z_2	Cotas dos pontos 1 e 2, respetivamente	m
ω	Velocidade angular	s^{-1}

Letras gregas

α_1, α_2	Fatores de correção de energia cinética nos pontos 1 e 2, respetivamente	
$\dot{\gamma}$	Taxa de corte	s^{-1}
$\dot{\gamma}_w$	Taxa de corte na parede	s^{-1}
ΔH	Variação da entalpia	J
ΔP_{Bomba}	Pressão fornecida pela bomba	Pa
$\Delta P_{Instalação}$	Pressão requerida pela instalação no ponto de operação	Pa
Δz	Desnível da instalação	m
ζ	Torque medido pelo reómetro	$N \cdot m$
ζ_{min}	Torque mínimo do reómetro	$N \cdot m$
η	Viscosidade	$Pa \cdot s$
η_0	Viscosidade do patamar newtoniano a baixas taxas de corte	$Pa \cdot s$
η_∞	Viscosidade do patamar newtoniano a altas taxas de corte	$Pa \cdot s$
η_{23}	Viscosidade medida a 23 °C	$Pa \cdot s$
$\eta_{cy,i}$	Viscosidade prevista pelo modelo de Carreau-Yasuda	$Pa \cdot s$
$\eta_{exp,i}$	Viscosidade medida experimentalmente	$Pa \cdot s$
$\eta_{ficha\ técnica}$	Viscosidade indicada na ficha técnica	$Pa \cdot s$

$\eta_{lp,i}$	Viscosidade prevista pelo modelo de lei de potência	Pa·s
η_p	Viscosidade plástica	Pa·s
η_w	Viscosidade do fluido na parede	Pa·s
θ	Ângulo do cone	rad
λ	Constante de tempo do modelo de Carreau-Yasuda	s
ρ	Massa volúmica	kg·m ⁻³
τ	Tensão de corte	Pa
τ_y	Tensão de cedência	Pa

Lista de Siglas

B	Bomba
CP	Cone-Prato
CSR	<i>Controlled Shear Rate</i>
CSS	<i>Controlled Shear Stress</i>
DP	Dispersor
IBC	<i>Industrial Bulk Container</i>
MP	Matéria-Prima
PP	Prato-Prato
TA	Tanque de Armazenamento

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do projeto

A indústria das tintas está em constante mudança e, por isso, revela-se necessário investir na modernização desta, nomeadamente na automação e numa melhor gestão de recursos, espaço e tempo, com vista a melhorar as condições de trabalho e a aumentar a capacidade produtiva. O projeto industrial “Revamp Nováqua” da CIN, no qual está inserida esta tese, vai ao encontro destas metas de modernização.

O trabalho realizado nesta dissertação foi desenvolvido na fábrica “Nováqua” e no centro de Investigação e Desenvolvimento da empresa CIN, tendo como primeiro objetivo a caracterização reológica de um conjunto de trinta e seis matérias-primas líquidas utilizadas no fabrico de tintas de base aquosa e, como segundo objetivo, o dimensionamento de um sistema de transporte e doseamento destas matérias-primas.

A necessidade da realização da caracterização reológica advém do facto da viscosidade destes líquidos ser variável com a taxa de corte aplicada e com as condições de temperatura ao longo do ano na fábrica. Adicionalmente, num sistema de transferência e doseamento, a viscosidade do fluido tem grande influência nas perdas de carga ao longo da tubagem e, consequentemente, na altura manométrica que a bomba terá de fornecer. Assim, decidiu-se efetuar ensaios de determinação da viscosidade a temperaturas e taxas de corte diferentes, de forma a conseguir efetuar previsões adequadas para o dimensionamento de equipamentos para o transporte e doseamento das matérias-primas.

O segundo objetivo da dissertação é a realização do referido dimensionamento do sistema de transferência, nomeadamente, de bombas e tubagens, partindo dos resultados da caracterização reológica efetuada. Uma fase essencial dos cálculos é a determinação das curvas características da instalação, que determinam a carga energética que a bomba terá de fornecer para promover o escoamento do fluido ao caudal pretendido.

Pretende-se que a primeira parte da dissertação (caracterização reológica) aliada à segunda parte (dimensionamento) permitam tirar conclusões que auxiliarão na tomada de decisões relativas ao projeto industrial “Revamp Nováqua”, em curso na CIN.

1.2 Apresentação da Empresa

A CIN-Corporação Industrial do Norte S.A. é uma empresa sediada na cidade da Maia, com mais de cem anos de experiência, que se dedica exclusivamente à produção e comercialização de tintas, vernizes e produtos afins [1,2].

Mantém a liderança ibérica desde 1995, sendo, atualmente a 13^a maior produtora de tintas e vernizes na Europa e a 47^a a nível mundial [3].

Ao contar com um total de 125 lojas, distribuídas por todo o território nacional, Espanha, Angola e Moçambique, e mais de 1400 colaboradores, a CIN centra a sua atividade nos três principais segmentos do mercado: Construção Civil (51%), Indústria (37%) e Proteção Anticorrosiva (12%) [4].

A CIN-Maia é essencialmente constituída pelas secções apresentadas na Figura 1.1: C0- Armazém de matérias-primas; C1- Fábrica de diversos produtos de base solvente e aquosa; C2- Fábrica exclusiva de produtos de base aquosa, “Nováqua”; C3- Fábrica de tintas brancas e bases neutras; C4- Fábrica de vernizes; C5- Fábrica de diluentes; C6- Fábrica de massas e betumes; C8- Fábrica de produtos industriais e de proteção anticorrosiva; EA- Edifício administrativo; CE- Centro de etiquetagem; CR- Centro de rotulagem; ETARI- Estação de Tratamento de Águas Residuais Industriais e Centro I&D- Centro de Investigação e Desenvolvimento.

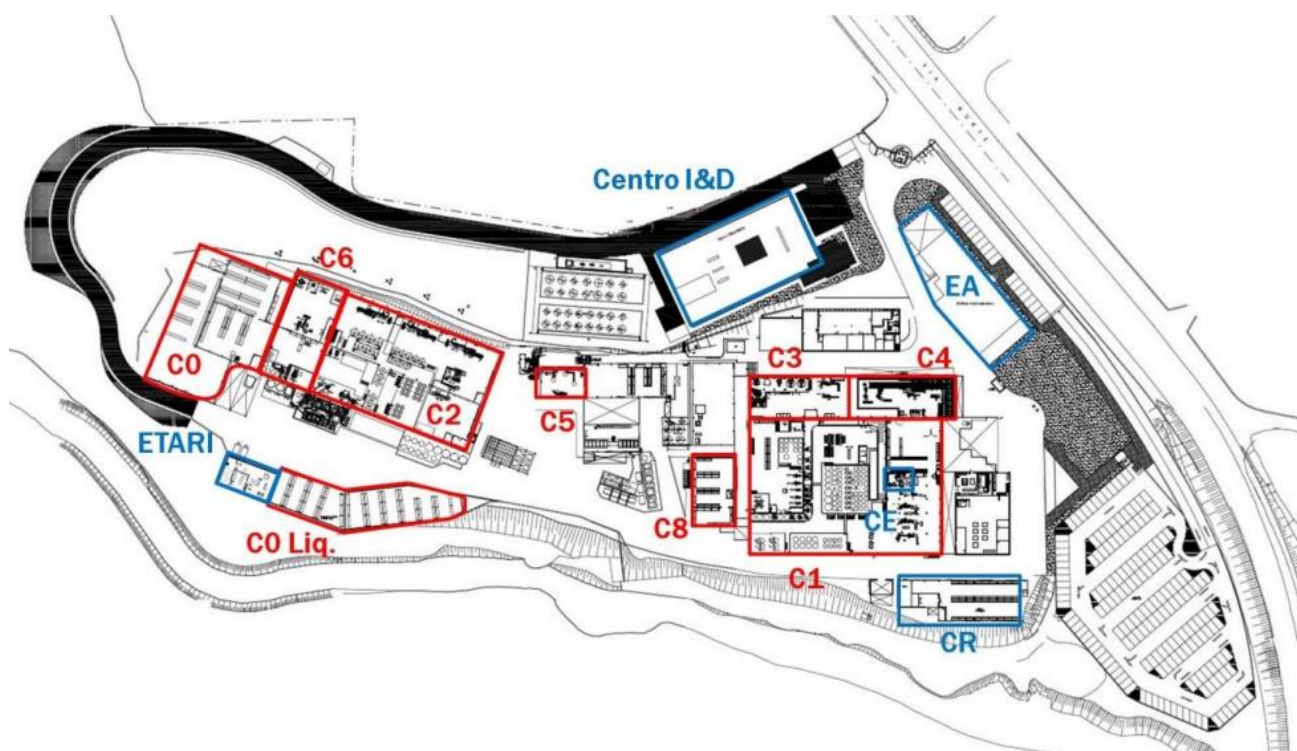


Figura 1.1 - Planta da CIN-Maia [5].

1.3 Contributos do autor para o Trabalho

Os ensaios reológicos, tratamento de dados e cálculos de dimensionamento foram realizados pelo autor, assim como a escrita desta dissertação.

1.4 Organização da Dissertação

Este documento é composto por seis capítulos: Introdução, Contexto e Estado da Arte, Materiais e Métodos, Resultados e Discussão, Conclusões e, por fim, Avaliação do trabalho realizado.

Inicialmente, na Introdução, apresenta-se o projeto e a empresa nos quais a dissertação está inserida.

No capítulo 2, são apresentados conceitos básicos de reologia, reometria e mecânica de fluidos, imprescindíveis para uma correta caracterização reológica das matérias-primas e dimensionamento do sistema de transferência.

No capítulo denominado “Materiais e Métodos” é descrita a instalação experimental, os ensaios efetuados e as estratégias de tratamento de dados implementadas e, nos “Resultados e Discussão”, os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

Por fim, apresentam-se as conclusões (capítulo 5) e avaliação (capítulo 6) do trabalho realizado ao longo da dissertação onde são também referidas algumas recomendações relativas ao projeto industrial.

2 Contexto e Estado da Arte

Os objetivos gerais da dissertação são: a caracterização reológica de trinta e seis matérias-primas utilizadas no fabrico de tintas de base aquosa e o dimensionamento de bombas e tubagens para o transporte das matérias-primas. Apresentam-se, de seguida, conceitos elementares de reologia, reometria e mecânica de fluidos, cujo conhecimento é essencial para atingir estes objetivos.

2.1 Conceitos de Reologia

A reologia é definida como a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria [6].

Os conceitos mais relevantes da área da reologia para esta dissertação são a viscosidade de corte, a taxa de corte e a tensão de corte.

O escoamento de Couette, representado na Figura 2.1, consiste em 2 pratos paralelos infinitos, estando o inferior imóvel e o superior a deslizar a uma velocidade v_P promovido pela ação da força F_P . Os pratos estão separados por uma distância h_P preenchida por um fluido cuja viscosidade, η , é obtida dividindo a tensão de corte, τ pela taxa de corte, $\dot{\gamma}$:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

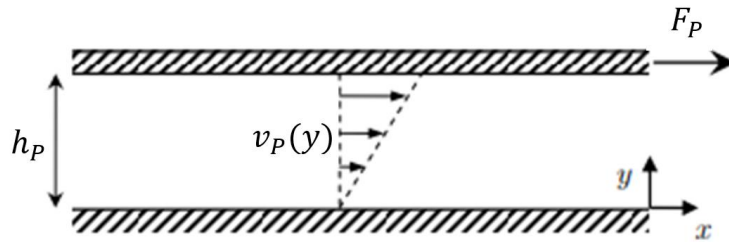


Figura 2.1 - Escoamento de Couette. Adaptado de [7].

A tensão de corte define-se como o quociente entre a força aplicada no prato superior, F_P , e a área de contacto do mesmo com o fluido, A_P :

$$\tau = \frac{F_P}{A_P} \quad (2.2)$$

A taxa de corte, é definida como o quociente entre a velocidade do prato superior, v_P , e a distância h_P entre os pratos [7]:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_P}{h_P} \quad (2.3)$$

Em termos práticos, a viscosidade pode ser interpretada como uma resistência ao escoamento do fluido.

2.1.1 Dependência da viscosidade com a taxa de corte

Importa distinguir, desde já, o comportamento de fluidos newtonianos e não-newtonianos. Os fluidos newtonianos têm uma viscosidade independente da taxa de corte aplicada, enquanto nos fluidos não-newtonianos existe uma dependência da taxa de corte, $\dot{\gamma}$ [8]. Estes últimos podem ser divididos em fluidos pseudoplásticos quando a viscosidade diminui com o aumento da taxa de corte, ou dilatantes quando se verifica o contrário [9], conforme representado na Figura 2.2.

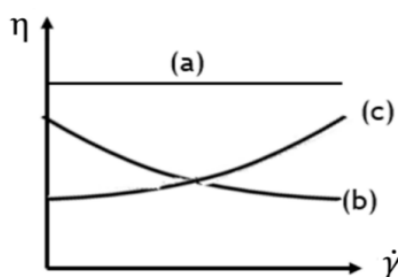


Figura 2.2 - Perfis de viscosidade típicos: (a) newtoniano; (b) pseudoplástico; (c) dilatante [10].

Diversos modelos reológicos, que relacionam a viscosidade do fluido com a taxa de corte aplicada, podem ser ajustados a dados experimentais como o modelo de Lei de Potência, modelo de Bingham, modelo de Carreau-Yasuda, modelo de Hershel-Buckley, modelo de Casson, entre outros. A seleção do modelo reológico que melhor representa a curva de viscosidade é indispensável para realizar uma boa caracterização reológica e, consequentemente, cálculos hidráulicos de dimensionamento corretos [11]. Três destes modelos são apresentados, de seguida, com maior detalhe.

2.1.1.1 Modelo de Lei de Potência

O modelo de Lei de Potência tem 2 parâmetros ajustáveis, k e n :

$$\eta(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.4)$$

em que k representa o índice de consistência e n representa o índice da lei de potência. O valor do índice n permite classificar o comportamento do fluido. Se $n = 1$, o fluido tem comportamento newtoniano. Se $n < 1$, o fluido tem comportamento pseudoplástico e se $n > 1$ o fluido é dilatante [12].

2.1.1.2 Modelo de Carreau-Yasuda

Para fluidos não-newtonianos, o modelo de Carreau-Yasuda descreve com maior precisão o comportamento reológico. Este modelo ajusta, particularmente bem, quando o fluido tende

para um patamar de viscosidade para taxas de corte baixas (η_0) e para taxas de corte elevadas (η_∞) e apresenta comportamento de lei de potência entre estes patamares, conforme representado na Figura 2.3 [13].

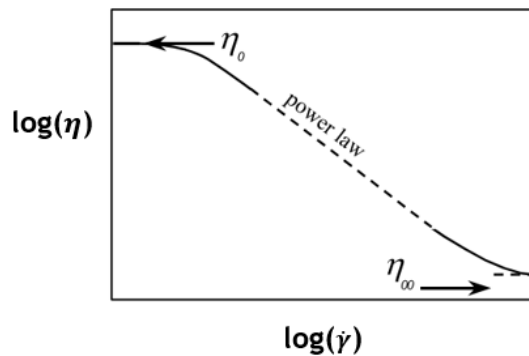


Figura 2.3 - Patamares newtonianos (η_0 e η_∞) numa curva típica de um fluido de Carreau-Yasuda [14].

O modelo de Carreau-Yasuda é descrito pela equação:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{[1 + (\Lambda \dot{\gamma})^a]^{\frac{1-n}{a}}} \quad (2.5)$$

O parâmetro Λ traduz a constante de tempo, que é aproximadamente igual ao inverso do valor da taxa de corte a partir da qual a fluidificação se estabelece, ou seja, quando o fluido transita de comportamento newtoniano a baixas taxas de corte, para pseudoplástico de lei de potência [15]. O parâmetro a permite ajustar a rapidez da transição do patamar de viscosidade constante a baixas taxas de deformação para a zona de comportamento de lei de potência [7] (Figura 2.4).

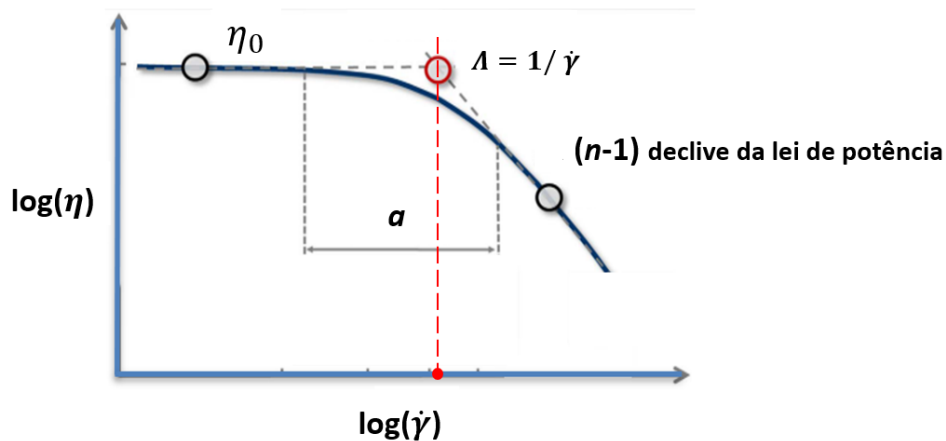


Figura 2.4 - Parâmetros do modelo de Carreau-Yasuda. Adaptado de [9].

A principal diferença entre o modelo de Lei de Potência e o modelo de Carreau-Yasuda é que o último envolve 5 parâmetros (η_0 , η_∞ , Λ , n , a), enquanto o modelo de Lei de Potência apenas envolve dois parâmetros (k , n) [16]. Por este motivo, o modelo de Carreau-Yasuda tem uma gama de aplicação mais larga e ajusta mais eficazmente à maioria das curvas de viscosidade. A

sua desvantagem é o facto de requerer o ajuste simultâneo de 5 parâmetros, apesar disto se tornar relativamente expedito com as atuais ferramentas de *software* [12].

2.1.1.3 Modelo de Bingham

Segundo este modelo, um fluido de Bingham só inicia o escoamento depois de ser exercida sobre ele uma tensão superior à tensão de cedência, τ_y , conforme se pode verificar na seguinte equação [8]:

$$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.6)$$

No entanto, existem artigos científicos que, apesar de reconhecerem a utilidade desta equação em cálculos expeditos de engenharia, contrariam este modelo afirmando que não existe uma tensão de cedência, mas sim um grande aumento de viscosidade para taxas de corte próximas de zero [17].

2.1.2 Dependência da viscosidade com o tempo de aplicação da deformação

A viscosidade dos fluidos pode ser dependente do tempo de aplicação da deformação. Os fluidos cuja viscosidade diminui com o aumento do tempo de aplicação da deformação denominam-se tixotrópicos, e os fluidos em que ocorre o inverso denominam-se reopéticos [8].

2.1.3 Dependência da viscosidade com a temperatura

Para a maioria dos líquidos simples, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura devido ao aumento do movimento Browniano das moléculas e, normalmente, quanto maior for a viscosidade dos líquidos, maior é a diminuição relativa da viscosidade com a temperatura [14]. Muitos líquidos sofrem um aumento de 100% na viscosidade com uma diminuição de 20°C na temperatura [18]. Por este motivo, várias expressões matemáticas têm vindo a ser sugeridas para representar a variação da viscosidade do líquido com a temperatura, partindo de dados experimentais, a partir das quais é possível realizar extrapolação [19]. Um desses métodos de extrapolação, denomina-se princípio de sobreposição tempo-temperatura e é um conceito de química-física de polímeros [20]. Segundo este princípio, as medições reológicas podem ser corrigidas, para uma temperatura de referência T_R , usando um fator de deslocamento a_T na forma

$$\dot{\gamma}(T_R) = a_T \dot{\gamma}(T) \quad (2.7)$$

$$\eta(T_R) = \frac{\eta(T)}{a_T} \quad (2.8)$$

obtendo-se uma curva mestra, independente da temperatura. O fator de deslocamento é função da temperatura, habitualmente seguindo uma lei de Arrhenius,

$$\ln(a_T) = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) = C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (2.9)$$

sendo T a temperatura absoluta do ensaio e T_R a temperatura absoluta de referência [21].

O valor de C pode ser determinado experimentalmente, permitindo utilizar as Eqs.(2.7), (2.8) e (2.9) para extrapolação da curva mestra para qualquer outra temperatura à qual a lei de Arrhenius seja válida.

A utilização deste método é vantajosa porque permite estimar as propriedades reológicas a temperaturas para as quais não foram efetuados ensaios reométricos, aumentando a capacidade preditiva [7].

2.2 Conceitos de Reometria

A reometria é a tecnologia de medição utilizada para determinar propriedades reológicas [6].

2.2.1 Ensaios de viscosidade

Os ensaios de viscosidade registam a variação da viscosidade com a taxa de corte aplicada, permitindo obter informações reológicas sobre o comportamento do fluido em condições de escoamento em tubo. Importa referir que as curvas de viscosidade são normalmente medidas em condições isotérmicas [6]. A partir das curvas, facilmente se classifica o fluido em newtoniano, pseudoplástico ou dilatante, de acordo com a Figura 2.2.

2.2.2 Ensaios de tixotropia

Os ensaios de tixotropia permitem caracterizar a dependência do tempo de aplicação de deformação na viscosidade dos fluidos.

No ensaio *Up & Down*, a taxa de corte é variada ao longo do tempo conforme descrito na Figura 2.5 (a), dando origem a curvas de viscosidade exemplificadas na Figura 2.5 (b).

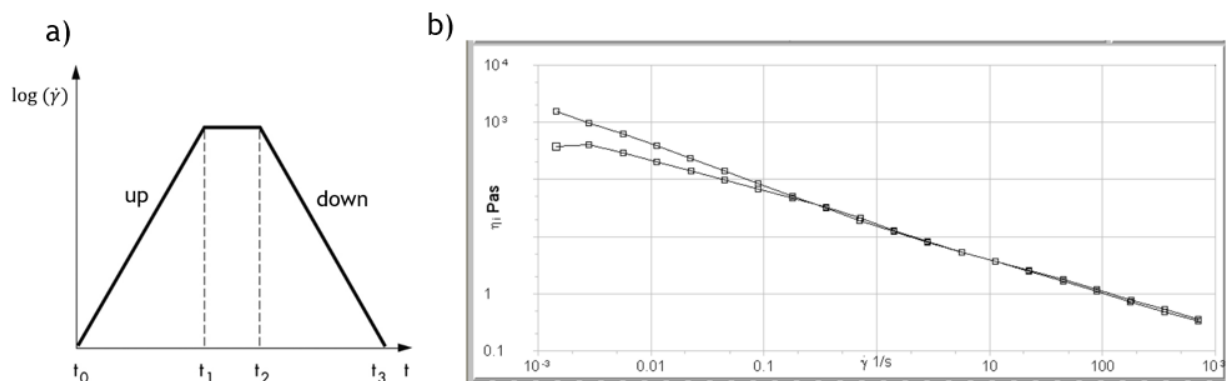


Figura 2.5 - (a) Variação da taxa de corte num ensaio *Up & Down*. Adaptado de [14] (b) Ensaio *Up & Down* [22].

Avalia-se a tixotropia através da análise da histerese das curvas medidas ou da ausência desta (Figura 2.6).

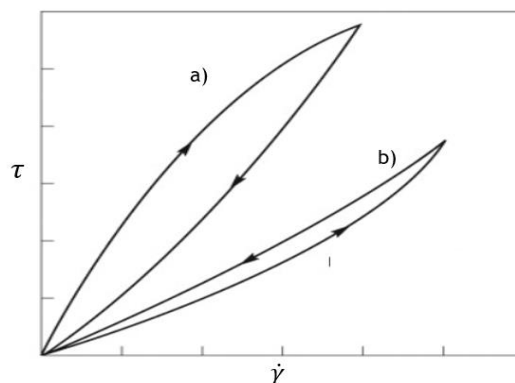


Figura 2.6 - Fluido a) tixotrópico e b) reopético [23].

Para além do ensaio *Up & Down*, existe outro ensaio de tixotropia denominado de teste de recuperação ou “teste dos 3 passos”, pois consiste em 3 passos distintos, conforme ilustrado na Figura 2.7: um primeiro passo a uma taxa de corte baixa (1), um segundo a uma taxa de corte elevada (2) e um terceiro, fase de recuperação, em que a taxa de corte retorna à inicial (3).

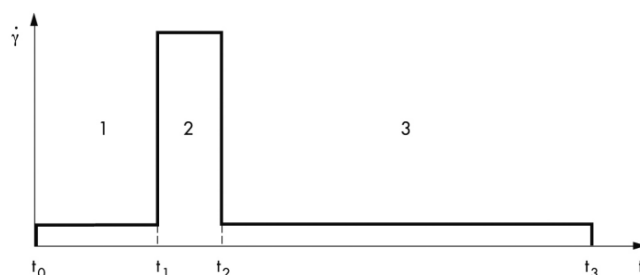


Figura 2.7 - Variação da taxa de corte num ensaio de recuperação [6].

Na maioria dos fluidos pseudoplásticos, na segunda fase há uma queda abrupta da viscosidade e na terceira há uma recuperação gradual da viscosidade inicial, conforme representado na Figura 2.8.

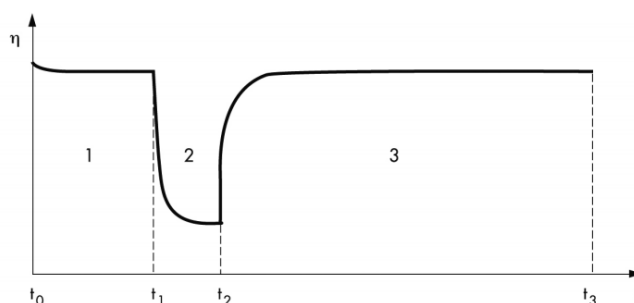


Figura 2.8 - Variação da viscosidade num ensaio de recuperação [6].

Analisando conjuntamente estes dois ensaios de tixotropia é possível tirar conclusões sobre o comportamento tixotrópico do fluido e sobre a sua estabilidade a elevadas taxas de corte,

nomeadamente sobre a ocorrência de mudanças irreversíveis nas propriedades reológicas do fluido devido à aplicação de taxas de corte elevadas.

Alguns líquidos podem sofrer danos irreversíveis quando sujeitos a altas taxas de corte na bomba. Este fenómeno pode ocorrer em, por exemplo, detergentes líquidos que se separam em 2 fases se sujeitos a elevadas tensões de corte [24].

2.3 Conceitos de Mecânica de Fluidos

Osbourne Reynolds fez a distinção, em 1883, entre escoamento laminar e turbulento num tubo e determinou o número adimensional apropriado para caracterizar este efeito, denominado número de Reynolds, que é definido como

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (2.10)$$

em que ρ é a massa volúmica, v a velocidade, η a viscosidade do fluido e D o diâmetro do tubo. Para efeitos de cálculos de engenharia em tubagens considera-se regime laminar para $Re < 2000$ e regime turbulento para $Re > 4000$. Para Re entre estes limites considera-se regime de transição [25].

2.3.1 Curva característica da instalação

A curva característica da instalação é baseada na equação de energia e permite determinar a carga necessária fornecer ao fluido para debitar determinado caudal, através da Eq.(2.11):

$$H = \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2}{2g} v_2^2 + z_2 + h_f \right) - \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1}{2g} v_1^2 + z_1 \right) \quad (2.11)$$

em que P_1 e P_2 são as pressões, v_1 e v_2 as velocidades e z_1 e z_2 as cotas nos pontos 1 (inicial) e 2 (final), respetivamente. h_f representa a perda de carga por atrito na tubagem e α_1 e α_2 representam fatores de correção da energia cinética para os pontos 1 e 2, respetivamente. Desta forma, consegue-se estimar a carga (H) que a bomba terá de fornecer ao fluido para obter o caudal pretendido, na respetiva instalação [26]. Na Eq.(2.11) desprezam-se as perdas de carga localizadas, que é uma aproximação razoável no caso de tubagens longas.

Para escoamento de um fluido newtoniano em regime laminar num tubo circular, $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$ e para regime turbulento $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$ [13]. H pode ser dividido em 2 termos: H_A que diz respeito aos pontos inicial e final e h_f que diz respeito às perdas por atrito ao longo do trajeto de 1 para 2:

$$H = H_A + h_f \quad (2.12)$$

H_A é independente da viscosidade do fluido conforme se pode verificar na seguinte equação:

$$H_A = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (z_2 - z_1) + \frac{1}{2g}(\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2) \quad (2.13)$$

Aplicando-se as seguintes simplificações, adequadas aos layouts possíveis da instalação, representados nas Figura A.1 e Figura A.2,

$$\begin{cases} P_2 = P_1 = P_{atm} \\ z_2 - z_1 = \Delta z \\ \alpha_2 v_2^2 \gg \alpha_1 v_1^2 \rightarrow \alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2 \approx \alpha_2 v_2^2 \end{cases}$$

Obtém-se a seguinte equação simplificada,

$$H_A = \Delta z + \frac{\alpha_2}{2g} v_2^2 = \Delta z + \frac{8}{g} \left(\frac{Q}{\pi D^2} \right)^2 \quad (2.14)$$

Darcy e Weisback, em 1845, propuseram que a perda de carga, h_f , no regime laminar ($Re < 2000$), pode ser calculada por [27]:

$$h_f = \sum \frac{\Delta P_{perdas\ tubo}}{\rho g} = \frac{1}{2g} \left(f \frac{L}{D} \right) \frac{Q^2}{\left(\frac{\pi D^2}{4} \right)^2} \quad (2.15)$$

Por sua vez, o fator de atrito pode ser obtido pela seguinte equação para fluidos newtonianos [28],

$$f = \frac{64}{Re} = 64 \frac{\eta}{\rho v D} \quad (2.16)$$

Para fluidos não-newtonianos descritos pelo modelo de lei de potência, deve ser usada a expressão generalizada [29]:

$$f' = \frac{64}{Re'} = \frac{64 \eta_w \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right)^{n'}}{\rho v D} \quad (2.17)$$

em que η_w representa a viscosidade do fluido na parede, ou seja, a respetiva viscosidade para a taxa de corte característica estimada na parede, $\dot{\gamma}_w = \frac{8v}{D}$. Para os fluidos descritos pelo modelo de lei de potência [29],

$$n' = \frac{d\eta/d\dot{\gamma}}{\eta/\dot{\gamma}} + 1 = \frac{d(k\dot{\gamma}^{n-1})/d\dot{\gamma}}{(k\dot{\gamma}^{n-1})/\dot{\gamma}} + 1 = n \quad (2.18)$$

e para fluidos descritos pelo modelo de Carreau-Yasuda [29],

$$n' = 1 + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)(n - 1)(\Lambda \dot{\gamma})^a [1 + (\Lambda \dot{\gamma})^a]^{\frac{1-n}{a}}}{\eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + (\Lambda \dot{\gamma})^a]^{\frac{1-n}{a}}} \quad (2.19)$$

Analisando as Eqs.(2.15) e (2.16) verifica-se que, para fluidos newtonianos em regime laminar, h_f é diretamente proporcional à viscosidade do fluido. Para fluidos não-newtonianos, em regime laminar, um aumento na viscosidade do fluido corresponde também a um aumento de h_f , conforme se verifica nas Eqs.(2.15) e (2.17).

2.3.2 Taxa de corte na parede da tubagem

Em escoamentos em tubo, a taxa de corte varia radialmente, sendo maior nas paredes da tubagem e nula no centro [30], conforme representado na Figura 2.9.

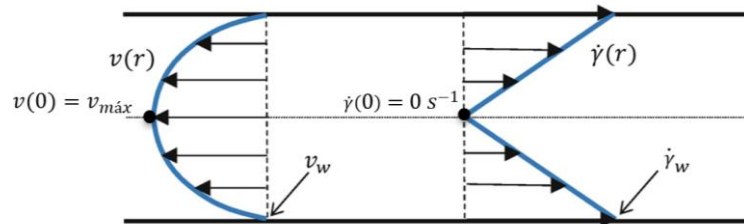


Figura 2.9 - Perfis de velocidade $v(r)$ e de taxa de corte $\dot{\gamma}(r)$ num escoamento laminar num tubo. Adaptado de [31].

Uma vez que a viscosidade tem influência na perda de carga na tubagem, importa determinar o seu valor junto à parede da tubagem. Para os fluidos newtonianos, a taxa de corte na parede da tubagem é dada por [13]:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{8v}{D} = \frac{8Q}{DA} = \frac{8Q}{D\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{32Q}{D^3\pi} \quad (2.20)$$

Esta equação não é aplicável aos fluidos não-newtonianos, mas pode ser utilizada como primeira estimativa [30]. A taxa de corte obtida na parede para os fluidos pseudoplásticos, para o mesmo caudal, é maior que a obtida pela Eq.(2.20) à medida que n diminui [8].

2.3.3 Bombas

Existem diversos tipos de bombas, dando-se ênfase, nesta secção, às bombas de deslocamento positivo e às bombas centrífugas, por serem os dois tipos de bombas mais utilizados na indústria das tintas.

Nas bombas de deslocamento positivo (Figura 2.10), a energia é transmitida ao líquido, através do movimento de rotação de engrenagens, parafusos, pás, diafragmas ou por meio de pistões ou êmbolos alternativos [26]. As bombas de deslocamento positivo estão limitadas a determinada capacidade de caudal, mas são apropriadas para débito de altas cargas e fluidos muito viscosos [13].



Figura 2.10 - Bomba pneumática de duplo diafragma [32].

Nas bombas centrífugas (Figura 2.11) a energia é transmitida ao líquido por meio de um disco provido de pás curvas, chamado impulsor ou rotor, em rotação sobre um veio. As pás transmitem energia cinética ao líquido que é imediatamente convertida num aumento da pressão quando o líquido passa no difusor, antes de sair da bomba [26].



Figura 2.11 - Bomba centrífuga [33].

As bombas centrífugas não só são ineficientes para líquidos com alta viscosidade, como também são altamente sensíveis a alterações de viscosidade do líquido [24]. Geralmente, as bombas centrífugas são mais baratas e têm maior durabilidade que as bombas de deslocamento, mas são inapropriadas para líquidos viscosos e/ou quando ocorrem alterações significativas de viscosidade [24].

Na Figura 2.12 estão representadas as curvas características da bomba de deslocamento positivo do tipo pneumática de duplo diafragma, “S20 Metallic Pump” da Sandpiper. Estes tipos de curvas encontram-se nos catálogos dos fornecedores de bombas e permitem, sabendo o caudal de líquido pretendido e a carga, Eq.(2.11), determinar se a bomba é indicada para a instalação e estimar a pressão e o caudal do ar comprimido necessários para debitar o caudal pretendido de fluido.

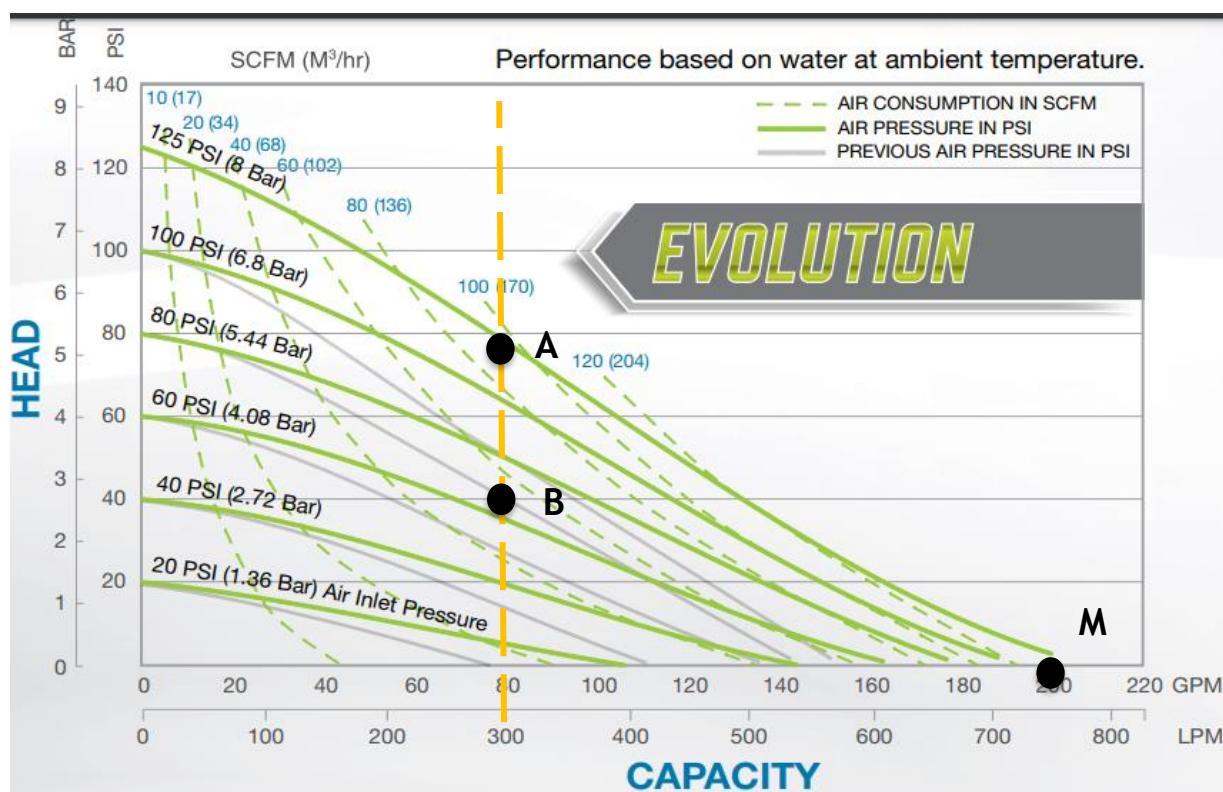


Figura 2.12 - Curvas características da bomba [34].

Pela análise da Figura 2.12, verifica-se que a capacidade máxima desta bomba é de cerca de 750 L·min⁻¹, isto é, se estiver a operar à pressão de ar comprimido máxima, 8 bar, e se a altura manométrica da instalação for baixa (Ponto M).

Se o caudal pretendido for 300 L·min⁻¹, a ΔP_{Bomba} máxima é aproximadamente 5.25 bar (Ponto A) o que significa que para $\Delta P_{\text{Instalação}} > 5.5$ bar o caudal obtido é menor que 300 L·min⁻¹ e para $\Delta P_{\text{Instalação}} < 5.5$ bar o caudal obtido é maior que 300 L·min⁻¹. Se um caudal maior que o pretendido for inconveniente, o procedimento a adotar neste tipo de bombas é diminuir a pressão do ar comprimido (valor ajustável).

Para se obter o caudal desejado, $\Delta P_{\text{Bomba}} = \Delta P_{\text{Instalação}}$. Ou seja, se para um caudal de 300 L·min⁻¹ a $\Delta P_{\text{Instalação}}$ calculada através da Eq.(2.11) for igual a 3 bar (Ponto B), então a pressão do ar comprimido deve ser ajustada para um valor entre 5.44 e 4.08 bar, de forma que o ponto de operação seja coincidente com o ponto da instalação, $\Delta P_{\text{Bomba}} = \Delta P_{\text{Instalação}}$.

3 Materiais e Métodos

3.1 Instalação experimental

Os reómetros são equipamentos que permitem a medição de diversas propriedades reológicas de líquidos. Podem funcionar em modo CSR (*Controlled Shear Rate*) quando a variável controlada é a taxa de corte, $\dot{\gamma}$, e a variável medida é o torque, ζ , ou em modo CSS (*Controlled Shear Stress*) em que ocorre o inverso [6]. Em modo CSR, a taxa de corte, $\dot{\gamma}$, é controlada pelo reómetro, através do valor da velocidade de rotação do veio do reómetro, w :

$$\dot{\gamma} = w \frac{r}{h(r)} \quad (3.1)$$

em que, r representa a posição radial e $h(r)$ representa a distância entre os pratos/prato-cone na respetiva posição radial. A partir do torque medido, ζ , o reómetro calcula o valor da tensão de corte, τ , com base na seguinte equação [35]:

$$\tau = \frac{3\zeta}{2\pi R^3} \quad (3.2)$$

em que R representa o raio da geometria de medição utilizada. A tensão de corte é, por sua vez, relacionada com a viscosidade, pela Eq.(2.1). Assim, é possível obter os valores da viscosidade do fluido para as respetivas taxas de corte, obtendo-se uma curva de escoamento que representa a viscosidade de corte em função da taxa de deformação, $\eta = f(\dot{\gamma})$.

Em modo CSS, mede-se o valor velocidade de rotação do veio do reómetro necessário para provocar um torque pretendido, a partir das Eqs.(3.1) e (3.2).

3.1.1 Geometrias de medição no reómetro

Existem duas geometrias de medição no reómetro amplamente utilizadas: Cone-Prato (CP) e Prato-Prato (PP) [22]. A geometria de cilindros concêntricos também é usada com frequência, em particular com fluidos de baixa viscosidade, mas não será utilizada neste trabalho.

A geometria Cone-Prato está representada na Figura 3.1(a). A maior vantagem em utilizar este sistema é o facto da taxa de corte aplicada ser constante em toda a amostra, independentemente da posição radial. Substituindo $\frac{r}{h(r)}$ por $\frac{1}{\text{tg}(\theta)}$ na Eq(3.1) obtém-se a Eq(3.3), que mostra que $\dot{\gamma}$ é independente da posição radial da amostra:

$$\dot{\gamma} = \frac{w}{\text{tg}(\theta)} \approx \frac{w}{\theta} \quad (3.3)$$

em que θ representa o ângulo do cone. A aproximação $\text{tg}(\theta) \approx \theta$ é válida para ângulos de cone pequenos, o que é tipicamente observado.

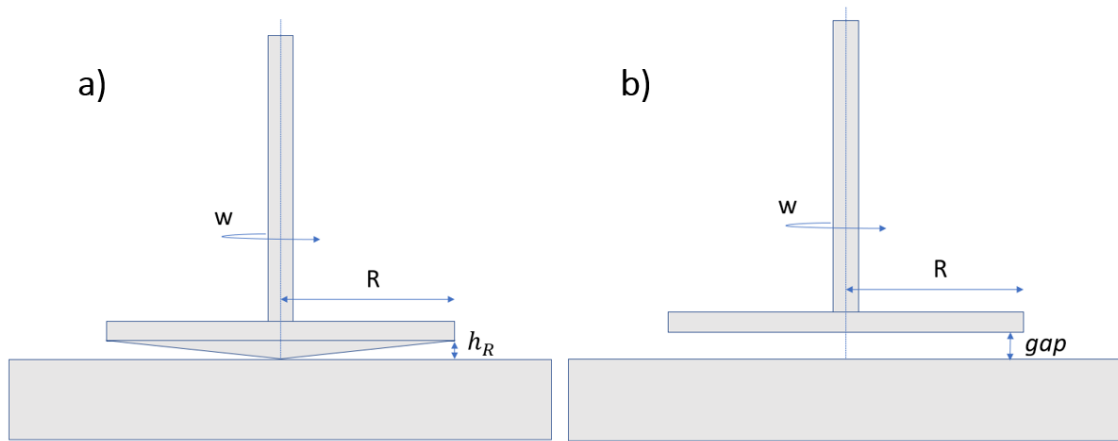


Figura 3.1 - Geometrias de medição (a) Cone-Prato; (b) Prato-Prato.

A desvantagem deste sistema é o facto de existir uma altura fixa h_R , Eq.(3.4), representada na Figura 3.1, que o fluido tem de ser capaz de preencher para uma correta medição. Assim, esta geometria revela-se inadequada para análise reológica de líquidos com baixa tensão superficial. Pelas regras trigonométricas:

$$h_R = R \tan(\theta) \quad (3.4)$$

pelo que, para um cone de raio 2 cm e ângulo 4° , como o usado nas experiências, $h_R = 1.4$ mm.

A geometria Prato-Prato está representada na Figura 3.1(b). Uma vantagem deste sistema de medição é o facto de a altura entre os pratos poder ser controlada para diversos valores. Nesta geometria, a taxa de corte varia linearmente com a distância radial ao centro, sendo nula no centro e máxima na periferia do prato, conforme se pode verificar na Eq.(3.5) gerando valores de viscosidade menos objetivos, uma vez que a amostra não se encontra toda sob aplicação da mesma taxa de corte:

$$\dot{\gamma} = \frac{wr}{gap}, \quad 0 \leq r \leq R \quad (3.5)$$

3.1.2 Reómetro utilizado e limites de medição

O reómetro Bohlin Gemini 150 utilizado no laboratório analítico do centro de Investigação e Desenvolvimento da CIN pode funcionar em modo CSS ou CSR tendo capacidade para realizar diversos tipos de ensaio: fluência ; oscilatórios; viscosidade de corte; relaxação [22].

Conforme se pode verificar na Figura 3.2, o reómetro (1) encontra-se ligado a um sistema pneumático (compressor de ar (2) + módulo de secagem do ar (3)) que possibilita a rotação do veio do reómetro; a um sistema de Peltier (4) para controlo da temperatura; e a um computador com software de aquisição e tratamento de dados (5).

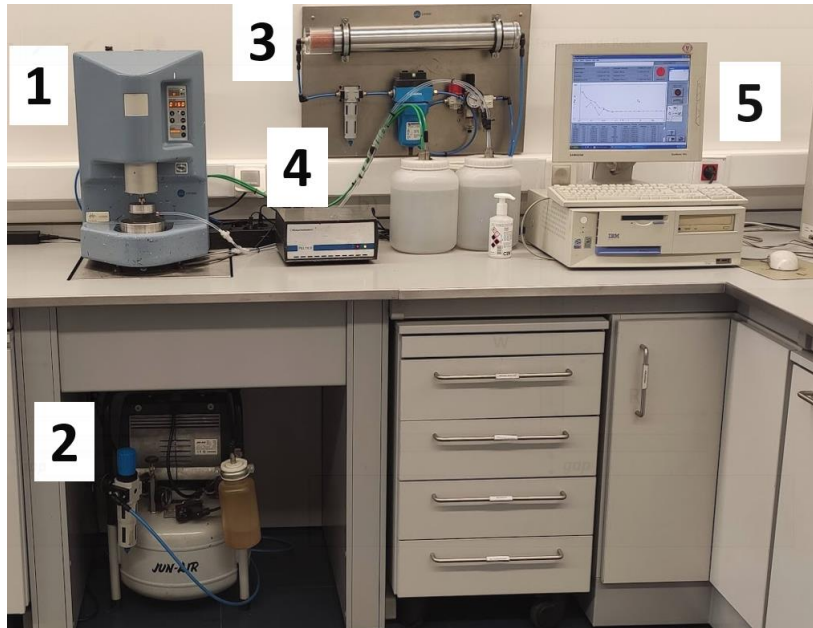


Figura 3.2 - Instalação experimental.

Foi utilizada uma câmara de saturação (*solvent trap*) ajustada ao sistema de medição, para evitar a ocorrência de fenómenos de evaporação de componentes voláteis da amostra.

Existe um limite inferior de medição do reómetro, diretamente relacionado com o torque mínimo passível de deteção no aparelho, $\zeta_{\min}$ [36], que para o reómetro utilizado assume o valor de $5 \times 10^{-8} \text{ N}\cdot\text{m}$ [37] pelo que,

$$\eta_{\min} = \frac{3\zeta_{\min}}{2\pi R^3} \frac{1}{\dot{\gamma}} \quad (3.6)$$

representa o limite de deteção do reómetro. Para efetuar medições precisas considera-se aceitável valores medidos 10 vezes acima do descrito pela Eq.(3.6), em que R representa o raio do cone (0.02 m). Também pode ser calculado um limite superior para a geometria CP, relacionado com a geração de escoamentos secundários a taxas de corte elevadas e que interferem na medição [36], não se devendo considerar as medições abaixo de

$$\eta = \frac{\dot{\gamma} \theta^3 \rho R^2}{6} \quad (3.7)$$

em que θ representa o ângulo do cone ($4^\circ = 0.0698 \text{ rad}$) e ρ a massa volúmica do fluido.

3.2 Ensaios efetuados

Os ensaios reológicos a matérias-primas líquidas foram efetuados com o sistema de medição Cone e Prato (CP), com $\theta = 4^\circ$, e consistiram na determinação da viscosidade, η , para várias taxas de corte, $\dot{\gamma}$, na gama entre $1.432 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e 10^3 s^{-1} , para as temperaturas de 5°C , 10°C , 15°C , 23°C e 30°C , com vista a abranger as temperaturas atingidas durante as várias estações do ano na fábrica. As condições destes ensaios estão explicitadas no Apêndice B.1.

Para cada matéria-prima, foi realizado um varrimento para taxas de corte crescentes e decrescentes (ensaio de *Up & Down*) de forma a averiguar o seu grau de tixotropia e possibilidade de mudanças reológicas irreversíveis a altas taxas de corte. As condições destes ensaios estão explicitadas no Apêndice C.1.

Para a matéria-prima AAA23, em que se verificou ocorrência de histerese no ensaio de *Up & Down*, realizou-se um ensaio de recuperação, nas condições apresentadas no Apêndice D -.

3.3 Tratamento de Dados

3.3.1 Obtenção dos fatores de deslocamento a_T

Normalmente, a forma das curvas de viscosidade obtidas a diferentes temperaturas é idêntica, como se pode observar na Figura 3.3 (a), sugerindo que é possível efetuar uma translação das curvas de forma a obter uma curva mestra [7]. Para obter os valores dos fatores de deslocamento a_T , pode-se alternar os valores destes numa folha de cálculo automático até os dados se sobreponem numa única curva [20].

Assim, a obtenção dos valores dos fatores de deslocamento a_T , foi realizada por tentativa-erro em folhas de cálculo automático no *Excel* e, ao fim de poucas iterações, alcançou-se a sobreposição máxima das várias curvas. Procurou-se efetuar uma translação das curvas a diferentes temperaturas (Figura 3.3.(a)) para uma única curva, denominada curva mestra (Figura 3.3.(b)), a partir da aplicação dos fatores deslocamento a_T , conforme descrito anteriormente, utilizando as Eqs.(2.7) e (2.8).

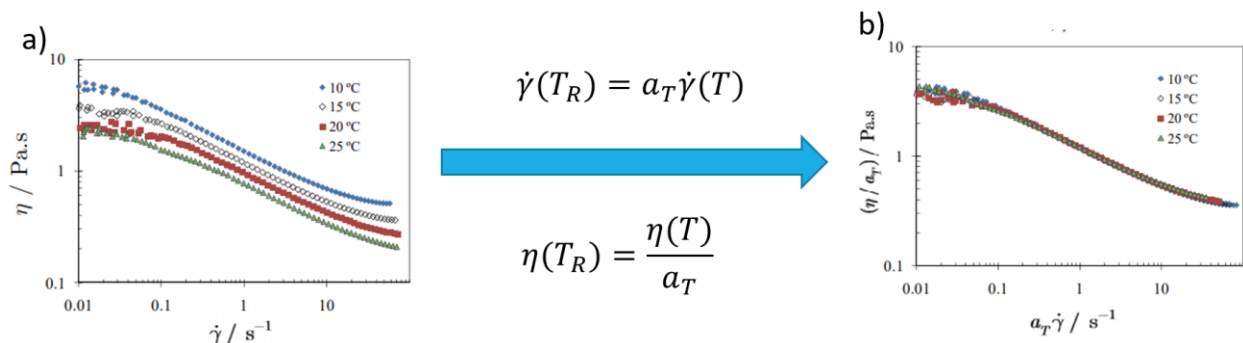


Figura 3.3 - Obtenção iterativa de fatores a_T . (a) Curvas isotérmicas de viscosidade de corte em função da taxa de corte; (b) Curva mestra. Adaptado de [7].

3.3.2 Equações dos modelos ajustados

Os modelos de funções matemáticas de ajuste são utilizados para caracterizar a curva da viscosidade resultando num conjunto reduzido de parâmetros de ajuste. Simplifica-se, assim, a comparação entre as propriedades reológicas de diferentes fluidos, que é feita através da comparação dos parâmetros das respetivas equações [6].

Combinando as Eqs.(2.5), (2.7), (2.8) e (2.9) obtém-se a seguinte equação, que relaciona a viscosidade simultaneamente com a taxa de corte aplicada e com a temperatura:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(\eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{\left[1 + \left(\Lambda \dot{\gamma} e^{C\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)} \right)^a \right]^{\frac{1-n}{a}}} \right) e^{C\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)} \quad (3.8)$$

Se a viscosidade do fluido for independente ou tiver dependência desprezável da temperatura, a equação simplifica para a equação de Carreau-Yasuda, Eq.(2.5). Se a viscosidade do fluido for independente da taxa de corte (fluido newtoniano), a equação simplifica para:

$$\eta(T) = \eta_{23} e^{C\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)} \quad (3.9)$$

Verificou-se que o aditivo AAA17 seguia uma lei de potência na viscosidade Eq.(2.4), sendo este o modelo ajustado.

3.3.3 Ajuste dos modelos preditivos aos dados experimentais

Como referido anteriormente na secção 2.1.1.2, o ajuste do modelo de Carreau-Yasuda aos dados experimentais é facilitado pela utilização de ferramentas de otimização numérica. Para este efeito, foi utilizado o *add-in Solver* do *Excel*, por vir a revelar-se um método adequado e expedito. Com esta ferramenta é possível minimizar o valor do erro relativo acumulado entre o modelo preditivo e os dados experimentais, através do ajuste automático dos valores dos parâmetros, permitindo, assim, obter a equação do modelo. O erro relativo acumulado é dado por:

$$\sum_{i=1}^N \text{erro relativo}_i = \sum_{i=1}^N \frac{|\eta_{exp,i} - \eta_{cy,i}|}{\eta_{exp,i}} \quad (3.10)$$

em que $\eta_{exp,i}$ representa o valor da viscosidade medida experimentalmente, para a taxa de corte i , e $\eta_{cy,i}$, o valor da viscosidade calculado pelo modelo de Carreau-Yasuda para a mesma taxa de corte. Para as curvas experimentais em que se observava, facilmente, a presença de dois patamares, um deles para taxas de corte baixas e o outro para taxas de corte elevadas, os valores de η_0 e η_{∞} foram obtidos fazendo a média dos valores desses patamares, respetivamente, e o número de variáveis ajustadas passou para apenas três (Λ , n , a), o que facilita na procura automática dos parâmetros do modelo que minimizam a Eq.(3.10).

Nas curvas experimentais em que existia alguma dificuldade em visualizar os patamares, as variáveis η_0 , η_{∞} foram tratadas como variáveis a manipular, ou seja, as variáveis ajustadas passaram a ser cinco: Λ , n , a , η_0 , η_{∞} .

Para o ajuste da curva de lei de potência aos dados experimentais do aditivo AAA17, utilizou-se a mesma estratégia descrita anteriormente sendo o erro relativo acumulado:

$$\sum_{i=1}^N \text{erro relativo}_i = \sum_{i=1}^N \frac{|\eta_{exp,i} - \eta_{lp,i}|}{\eta_{exp,i}} \quad (3.11)$$

em que $\eta_{exp,i}$ representa o valor da viscosidade medida experimentalmente, para a taxa de corte i , e $\eta_{lp,i}$ o valor da viscosidade calculada pelo modelo de lei de potência para a mesma taxa de corte. As variáveis ajustadas são apenas duas, neste caso: k e n .

A ferramenta numérica *Solver* dispõe de três métodos de otimização: o *LP Simplex*, adequado apenas para otimização de equações lineares, e o GRG e o *Evolutionary* apropriados para equações não-lineares. Dos dois métodos de otimização não-linear, o GRG (“*Generalized Reduced Gradient*”) é o que converge mais rapidamente, mas é altamente dependente das condições iniciais e costuma convergir para o ótimo local mais próximo das condições iniciais, ao invés do ótimo global [38]. Esta situação ocorre em particular, se o número de parâmetros a otimizar for significativo, pelo que é necessário ser crítico em relação aos resultados da otimização, pois pode-se estar a convergir para um mínimo local.

Na Figura 3.4 ilustra-se uma janela onde são introduzidas as células que contém os parâmetros a ajustar para o *Solver* (\$AD\$52;\$AB\$53;\$AD\$51) e a célula do erro acumulado que se pretende minimizar (\$AD\$55). O método de resolução selecionado foi o GRG Não Linear por ser expedito e por se verificar que produzia resultados que ajustavam suficientemente bem aos dados experimentais, para o nível de detalhe pretendido. O método alternativo, o *Evolutionary*, apesar de ser mais robusto, é mais lento e o seu manuseamento é complexo [38], daí a sua utilização ter sido descartada.

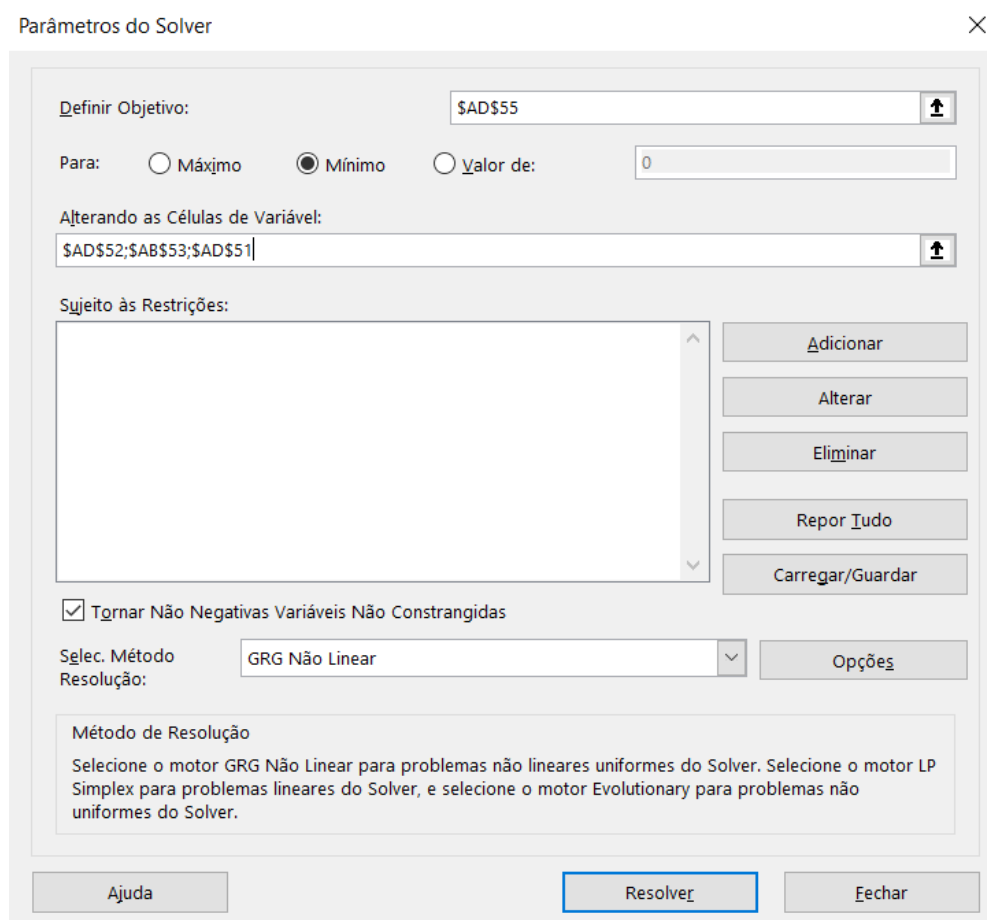


Figura 3.4 - Printscreen de uma janela com os parâmetros do Solver.

4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização reológica

Neste sub-capítulo são apresentados os resultados de ensaios reológicos a matérias-primas líquidas que permitem determinar a viscosidade em função da taxa de corte e da temperatura. As matérias-primas estão agrupadas em aditivos/emulsões e de acordo com o seu comportamento reológico: newtoniano/pseudoplástico e dependente/independente da temperatura. Conforme referido no capítulo anterior, existe um limite inferior de medição do reómetro, Eq.(3.6), identificado com uma linha preta nos gráficos apresentados no decorrer do documento. Para análise e tratamento de dados, apenas foram considerados os pontos acima deste limite.

4.1.1 Matérias-primas com baixa viscosidade

Para algumas matérias-primas, especificadas na Tabela 4.1, não foi possível realizar os ensaios utilizando o reómetro, porque ocorria espalhamento da amostra no prato inferior do reómetro devido à baixa tensão superficial do fluido. Visualizou-se que estes líquidos também eram muito pouco viscosos, pelo que o mais indicado será considerar a sua viscosidade igual ao valor indicado na respetiva ficha técnica.

Tabela 4.1 - Viscosidades características das matérias-primas consideradas pouco viscosas

Matéria-Prima	$\eta_{\text{ficha técnica}}$ (Pa·s)
SSS01	-
EEE01	0.02-0.16
EEE02	0.08-0.28
EEE03	0.03-0.23
EEE04	<0.35
AAA01	0.013
AAA02	0.002-0.02
AAA03	-
AAA04	0.001-0.02
AMONI	-
ÁGUA	10^{-3}

Para estas matérias-primas, não se preveem problemas relacionados com o escoamento do fluido, uma vez que as suas viscosidades são relativamente baixas.

4.1.2 Aditivos newtonianos

Nesta secção são apresentados os resultados para os aditivos que evidenciaram comportamento newtoniano, isto é, viscosidade constante na gama de taxas de corte aplicadas. Apresentam-se as curvas da viscosidade para os aditivos newtonianos a várias temperaturas, assim como as equações de viscosidade obtidas e os valores de viscosidade presentes nas fichas técnicas destas matérias-primas. Conforme referido anteriormente na secção 3.3.2, se a viscosidade do fluido for independente da taxa de corte, a equação da viscosidade é apenas dependente da temperatura:

$$\eta(T) = \eta_{23} e^{c\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)} \quad 5^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

Esta equação permite interpolar o valor da viscosidade do aditivo para qualquer temperatura entre 5°C e 30°C . Apresenta-se, de seguida, na Figura 4.1, a compilação de curvas de viscosidade para a matéria-prima AAA08 às diferentes temperaturas.

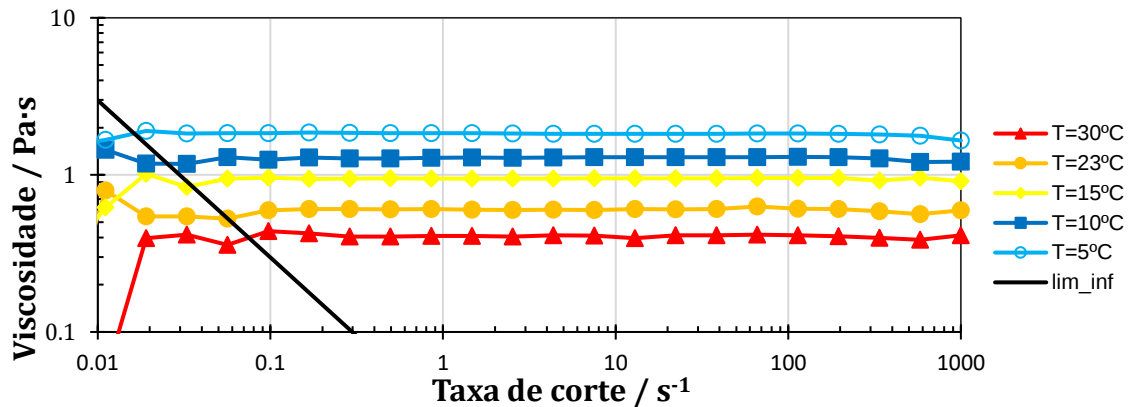


Figura 4.1 - Curvas de viscosidade para amostra do aditivo AAA08.

Conforme esperado, verifica-se que um aumento de temperatura corresponde a uma diminuição da viscosidade do fluido. Seguiu-se a estratégia de obtenção dos valores de fatores de deslocamento, a_T , referida anteriormente na secção 3.3.3, para obtenção da curva mestra apresentada na Figura 4.2.

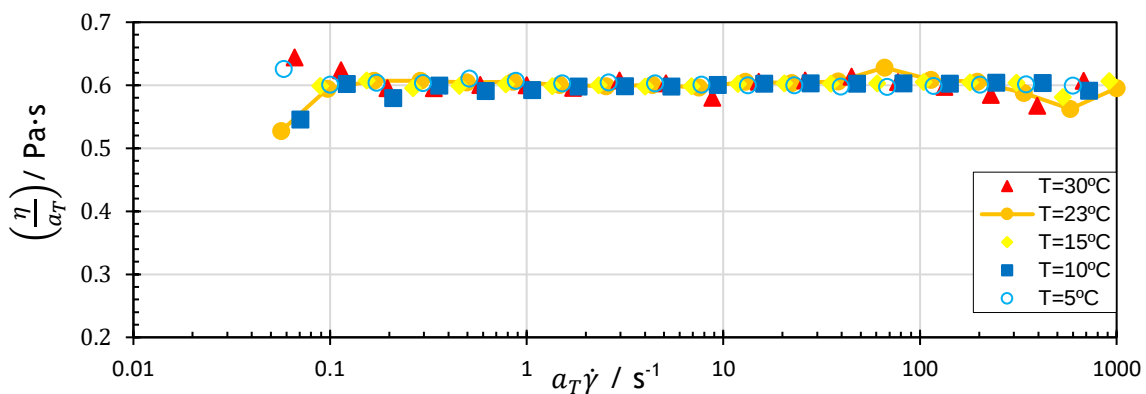


Figura 4.2 - Curva mestra para o aditivo AAA08.

Fazendo o ajuste linear $\ln(a_T)$ em função de $\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right)$, Figura 4.3, conforme indicado na Eq.(2.9) obtém-se uma reta com declive igual a C , denominada constante da lei de Arrhenius.

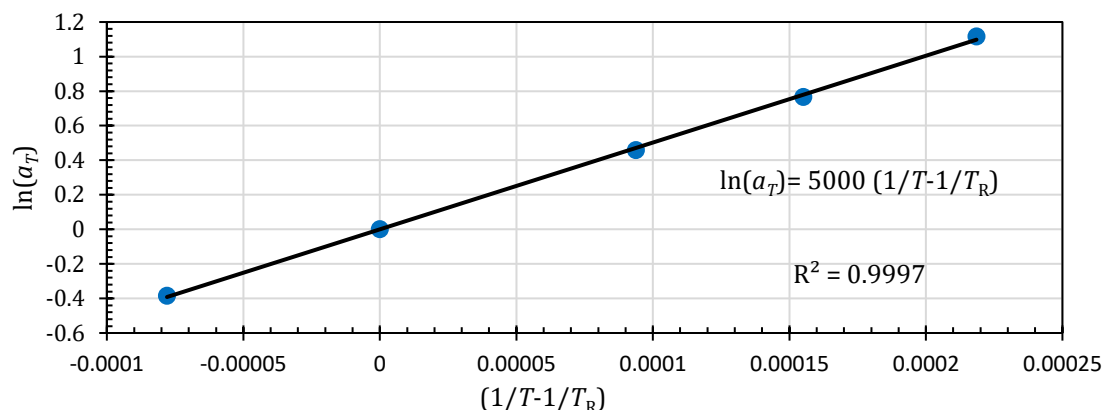


Figura 4.3 - Lei de Arrhenius para o aditivo AAA08.

Obtém-se assim, para o aditivo AAA08, $C = 5000$ K. Com o ensaio de viscosidade a 23°C, já se tinha determinado que $\eta_{23} = 0.60$ Pa·s. Substituindo estes valores na Eq.(4.1), obtém-se a equação geral da viscosidade do aditivo AAA08:

$$\eta(T) = 0.60 e^{5000\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)} \quad (4.2)$$

Esta equação permite obter a viscosidade deste aditivo para qualquer temperatura compreendida entre 5°C e 30°C.

Seguiu-se a estratégia de tratamento de dados referida nos parágrafos anteriores para obtenção dos valores dos parâmetros da equação da viscosidade dos aditivos newtonianos que estão apresentados na Tabela 4.2. Nesta tabela, também são apresentados os valores das viscosidades presentes nas fichas técnicas dos aditivos, para comparação.

Tabela 4.2 - Parâmetros da equação da viscosidade para os aditivos newtonianos

Aditivo newtoniano	Curva Mestra-Lei de Arrhenius	η_{23} (Pa·s)	$\eta_{ficha\ técnica}$ (Pa·s)
	C (K)		
AAA05	8240	0.15	0.148
AAA06	6900	0.44	0.4
AAA07	7100	0.66	0.7
AAA08	5000	0.60	0.3-1.5
AAA09	1800	2.20	2.2-3.2
AAA10	810	0.44	0.16-0.4
AAA11	9000	4.6	< 6.0
AAA12	6300	3.7	1.0-4.0
AAA13	9000	7.3	0.1-8.0

Note-se que os valores de η_{23} obtidos experimentalmente estão muito próximos dos valores de viscosidade presente nas fichas técnicas, permitindo validar o método experimental. As curvas de viscosidade e as curvas mestras, bem como da lei de Arrhenius, encontram-se no Apêndice B.2, para os restantes aditivos.

4.1.3 Aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura

Alguns aditivos apresentam comportamento pseudoplástico, isto é, diminuição da sua viscosidade com o aumento da taxa de corte aplicada, mas independência (dependência desprezável) com a temperatura. Este comportamento é ilustrado na Figura 4.4 para a MP AAA14 em que os pontos são todos praticamente coincidentes, independentemente da temperatura do ensaio.

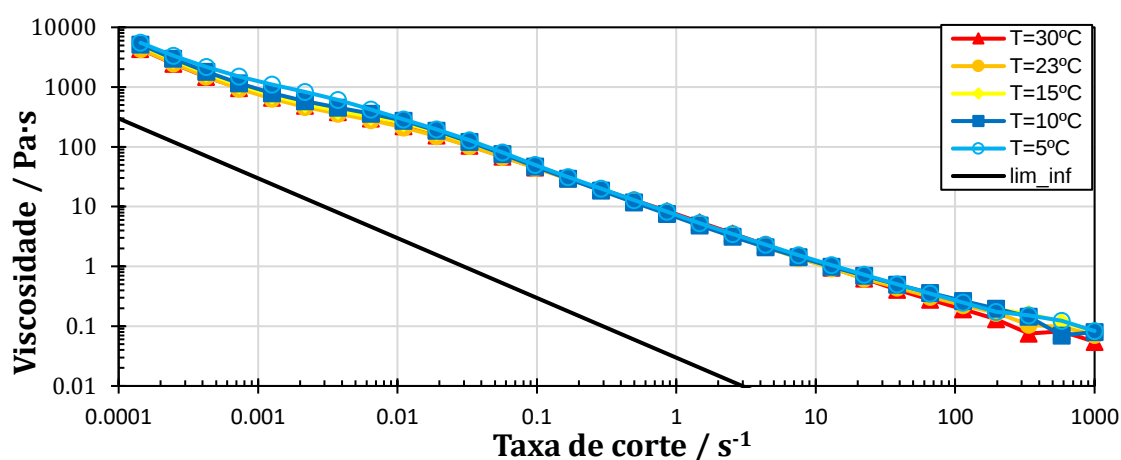


Figura 4.4 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA14.

Para três destes aditivos foi ajustado o modelo de Carreau-Yasuda Eq.(2.5), conforme exemplificado para o aditivo AAA14 na Figura 4.5, seguindo-se a estratégia de tratamento de dados referida anteriormente na secção 3.3.3 para obtenção dos valores dos parâmetros da equação dos modelos, utilizando o *Solver* do *Excel*.

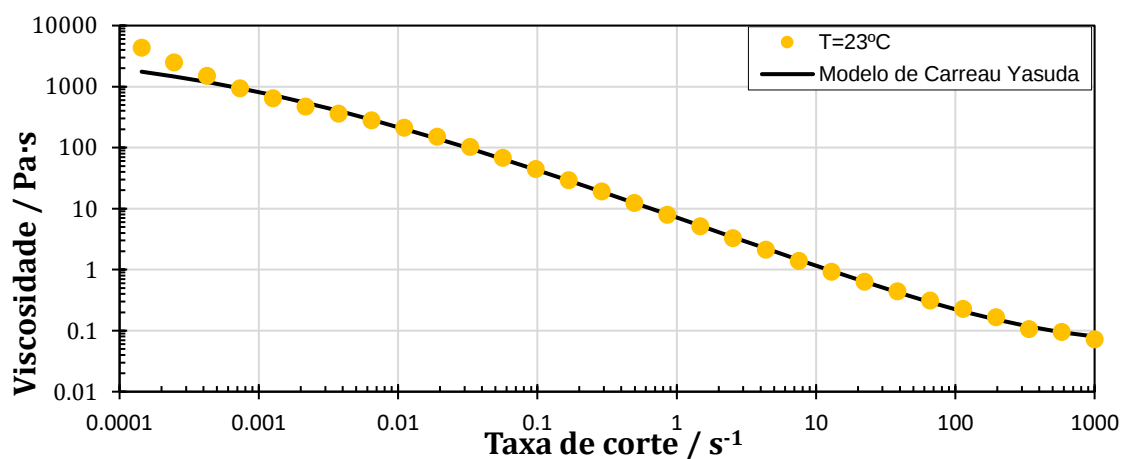


Figura 4.5 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA14.

Verifica-se que o ajuste do modelo de Carreau-Yasuda aos dados experimentais é adequado. A equação da viscosidade obtida é apenas dependente da taxa de corte e assume a forma:

$$\eta(\dot{\gamma}) = 0.0549 + \frac{4350 - 0.0549}{[1 + (2220\dot{\gamma})^{0.433}]^{\frac{1-0.176}{0.433}}} \quad (4.3)$$

O procedimento para tratamento de dados do aditivo AAA14 foi repetido para os aditivos AAA15 e AAA16, cujos valores dos parâmetros da equação de Carreau-Yasuda se apresentam na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros da equação de Carreau-Yasuda para os aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura

Aditivo pseudoplástico	Modelo de Carreau-Yasuda				
	$\Lambda \text{ (s}^{-1}\text{)}$	a	n	$\eta_{\infty} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$	$\eta_0 \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$
AAA14	2220	0.433	0.176	0.0549	4350
AAA15	78.5	0.219	0.00104	0.0182	4910
AAA16	1390	0.587	0.152	0.0484	6750

Para o aditivo AAA17, existiu alguma dificuldade em ajustar o modelo de Carreau-Yasuda, pelo que foi testado o ajuste ao modelo de lei de potência Eq.(2.4), uma vez que se verificou uma linearidade na escala logarítmica entre a viscosidade e a taxa de corte acima de $\dot{\gamma} \approx 0.01 \text{ s}^{-1}$, Figura 4.6.

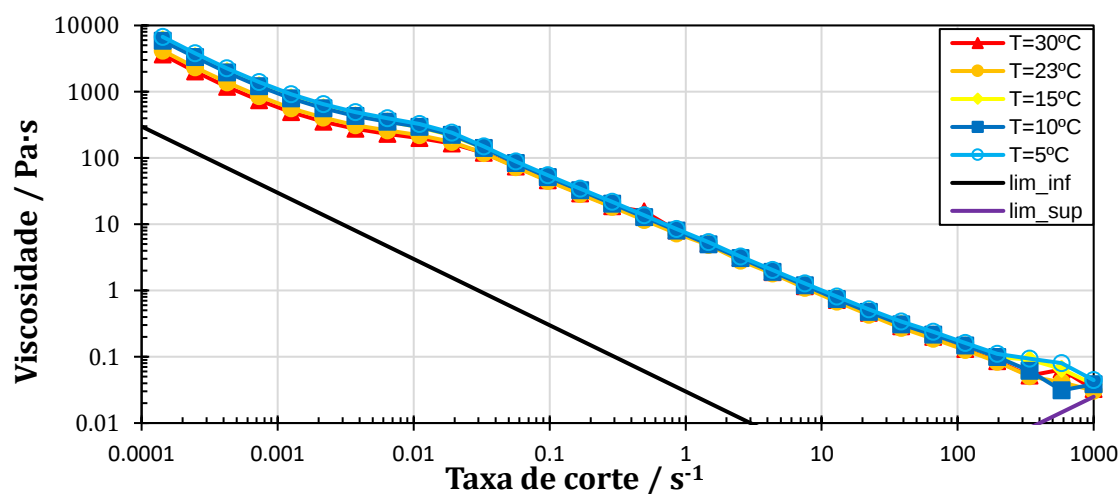


Figura 4.6 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA17.

Seguindo a otimização numérica já referida na secção 3.3.3 obtém-se a seguinte equação de lei de potência para a viscosidade,

$$\eta(\dot{\gamma}) = 4.66\dot{\gamma}^{-0.752} \quad (4.4)$$

que, ajusta razoavelmente bem, aos dados experimentais (Figura 4.7).

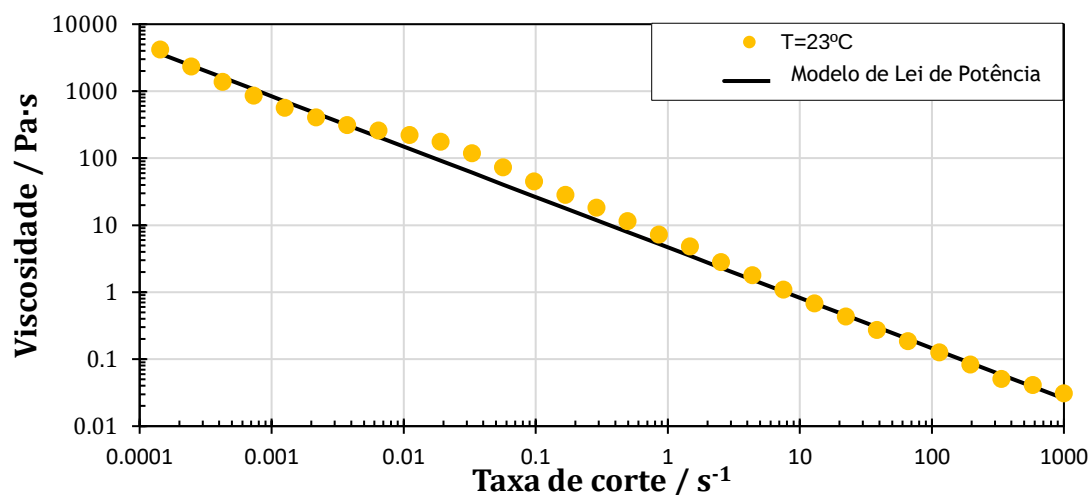


Figura 4.7 - Modelo de Lei de Potência do aditivo AAA17.

Os gráficos das curvas de viscosidade e do modelo de Carreau-Yasuda ajustado para o AAA15 e o AAA16, assim como os valores das viscosidades presentes nas fichas técnicas encontram-se no Apêndice B.3.

4.1.4 Aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura

O comportamento mais comum nos aditivos estudados é comportamento pseudoplástico com dependência da temperatura em que a viscosidade é, simultaneamente, dependente de duas variáveis: taxa de corte, $\dot{\gamma}$, e temperatura, T , conforme exemplificado na Figura 4.8.

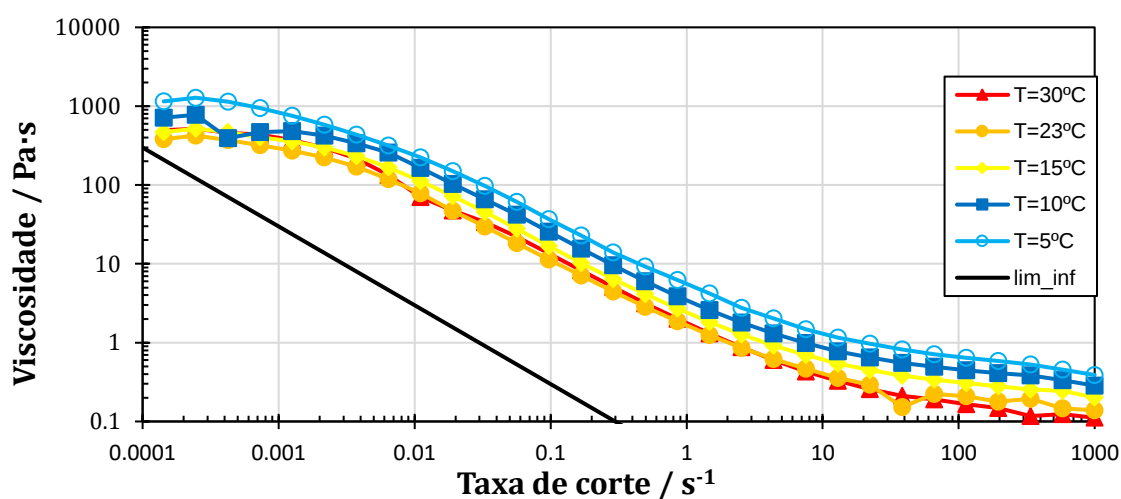


Figura 4.8 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA19.

Para estas matérias-primas, obteve-se a curva mestra (Figura 4.9), ajustou-se a lei de Arrhenius (Figura 4.10), e, depois, o modelo de Carreau-Yasuda (Figura 4.11), conforme exemplificado, seguindo o procedimento apresentado na secção 3.3.

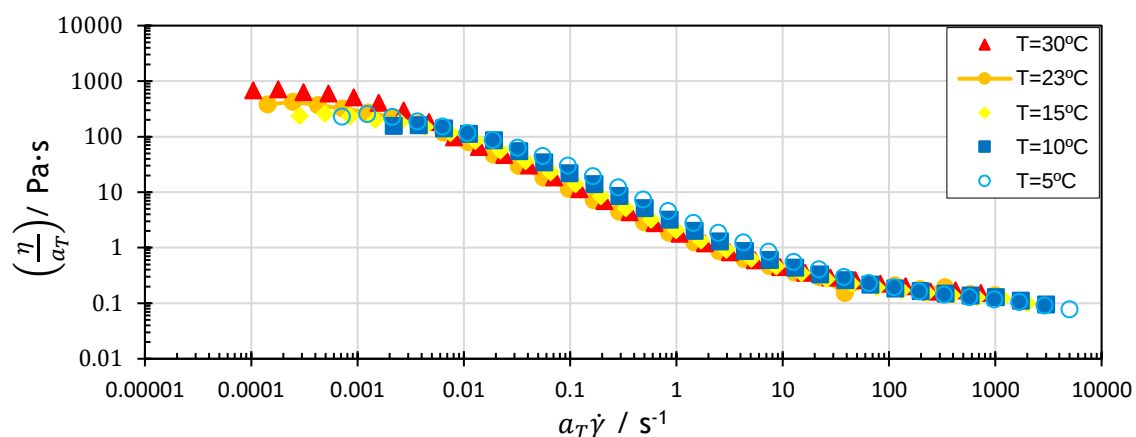


Figura 4.9 - Curva mestra do aditivo AAA19.

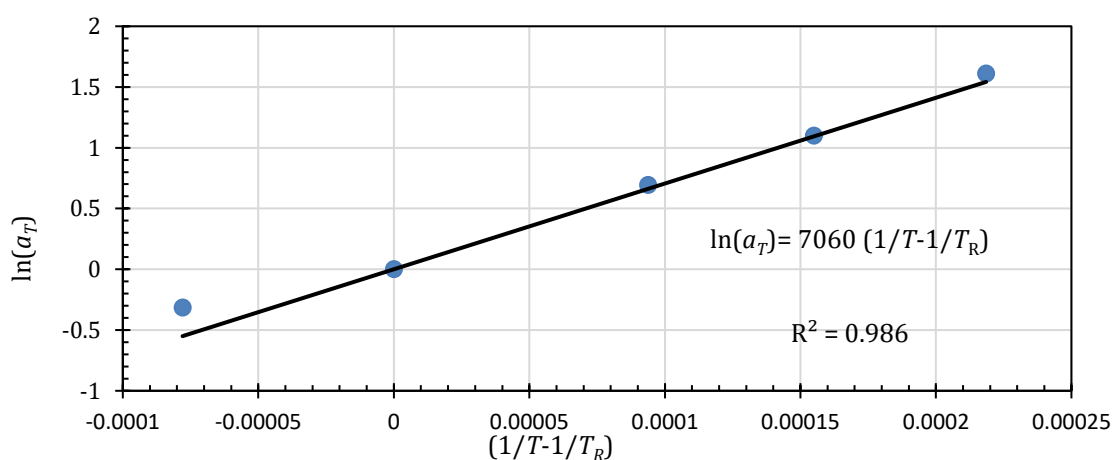


Figura 4.10 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA19.

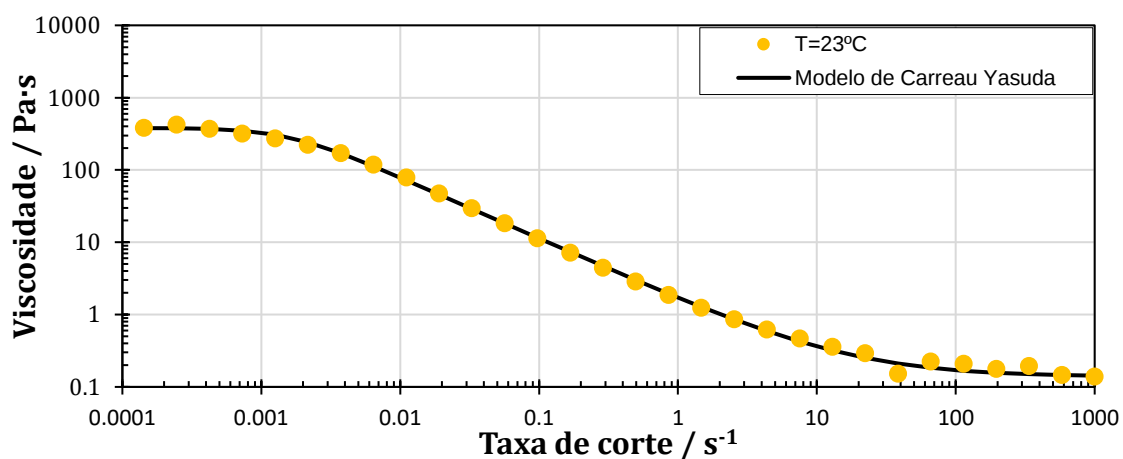


Figura 4.11 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA19.

Terminado este tratamento de dados, obtêm-se os valores dos diversos parâmetros de ajuste. A equação para o modelo preditivo do aditivo AAA19 é:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(0.139 + \frac{380 - 0.139}{\left[1 + \left(640\dot{\gamma} e^{7060\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)} \right)^2 \right]^{\frac{1-0.152}{2}}} \right) e^{7060\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)} \quad (4.5)$$

Esta equação relaciona a viscosidade da MP AAA19 com as duas variáveis em estudo, sendo válida em $10^{-4} \leq \dot{\gamma} / s^{-1} \leq 10^3$ e $5 \leq T / ^\circ C \leq 30$.

O procedimento referido nos parágrafos anteriores para tratamento de dados da MP AAA19 foi repetido para os restantes aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura, cujos valores dos parâmetros da equação da viscosidade se apresentam na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros da equação da viscosidade para os aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura

Aditivo pseudoplástico	Curva Mestra - Lei de Arrhenius	Modelo de Carreau-Yasuda				
	C (K)	Λ (s^{-1})	a	n	η_∞ (Pa·s)	η_0 (Pa·s)
AAA18	5900	1.56	1.43	0.607	0.502	0.706
AAA19	7060	640	2.00	0.152	0.139	380
AAA20	4700	215	0.963	0.0884	0.0843	118
AAA21	2690	5.23	0.214	0.499	0.00	47.9
AAA22	7500	67.7	3.91	0.288	0.505	28.9
AAA23	6800	27300	2.86	0.570	1.53	726
AAA24	4900	0.00309	7.10	0.00	0.00	4.63

Os gráficos das curvas de viscosidade, das curvas mestras, da lei de Arrhenius e do modelo de Carreau-Yasuda ajustado para os restantes aditivos, assim como os valores das viscosidades presentes nas fichas técnicas encontram-se no Apêndice B.4.

4.1.5 Emulsões

Verificou-se que as viscosidades das emulsões EEE05 e EEE07 eram independentes da temperatura (Figura B.64 e Figura B.70) e que a viscosidade das emulsões EEE06 e EEE08 diminui com a diminuição da temperatura, conforme representado na Figura 4.12.

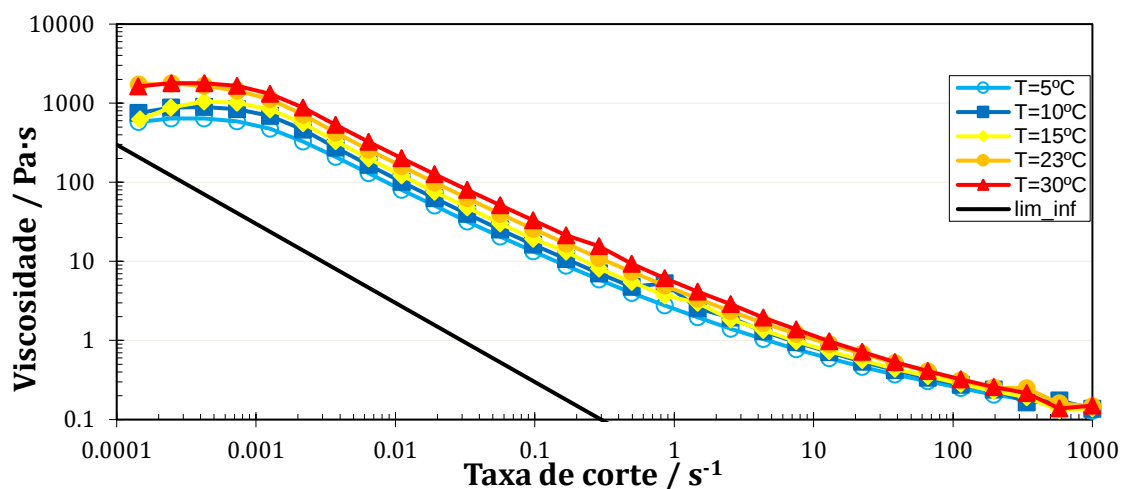


Figura 4.12 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE08.

As emulsões EEE06 e EEE08 apresentam um comportamento pouco comum nos líquidos, conduzindo a valores de C negativos, conforme se pode verificar na Figura 4.13.

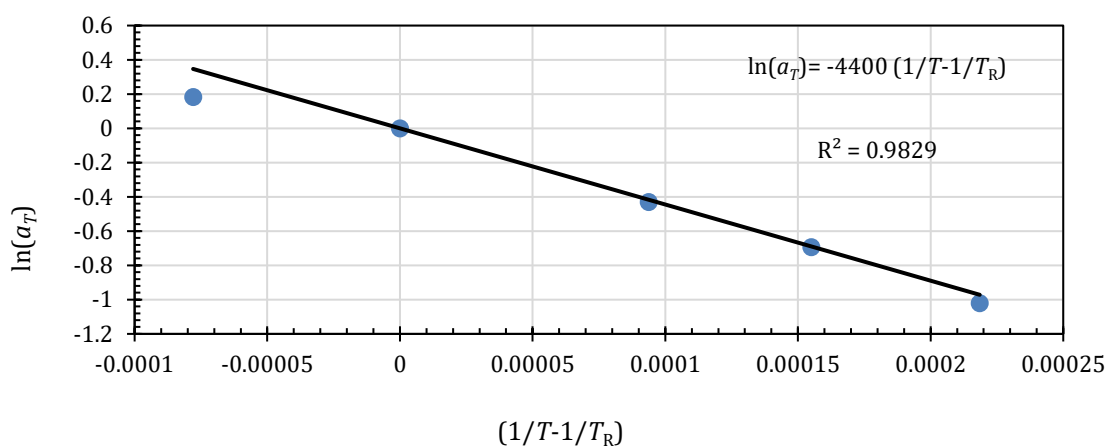


Figura 4.13 - Lei de Arrhenius da emulsão EEE08.

Aplicou-se o tratamento de dados às curvas de viscosidade das emulsões para obter os valores dos parâmetros de ajuste, que se apresentam na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros da equação da viscosidade para as emulsões

Aditivo pseudoplástico	Curva Mestra - Lei de Arrhenius		Modelo de Carreau-Yasuda			
	C (K)	A (s ⁻¹)	a	n	η_{∞} (Pa·s)	η_0 (Pa·s)
EEE05	-	822	0.877	0.126	0.142	5910
EEE06	-2100	1680	4.60	0.188	0.337	17100
EEE07	-	4.46	0.836	0.215	0.0940	23.3
EEE08	-4400	2120	5.05	0.221	0.148	1770
EEE09	3800	3496	6.18	0.287	0.500	1120

Os gráficos das curvas de viscosidade, das curvas mestras, da lei de Arrhenius e do modelo de Carreau-Yasuda ajustado para as restantes emulsões, assim como os valores das viscosidades presentes nas fichas técnicas, encontram-se no Apêndice B.5.

4.1.6 Ensaios *Up & Down*

Para todas as matérias-primas testadas, exceto para o aditivo AAA23, verificou-se que as curvas *Up* (azul) e *Down* (bordô), coincidiam acima do limite inferior do reômetro (linha preta) concluindo que estas não apresentam tixotropia.

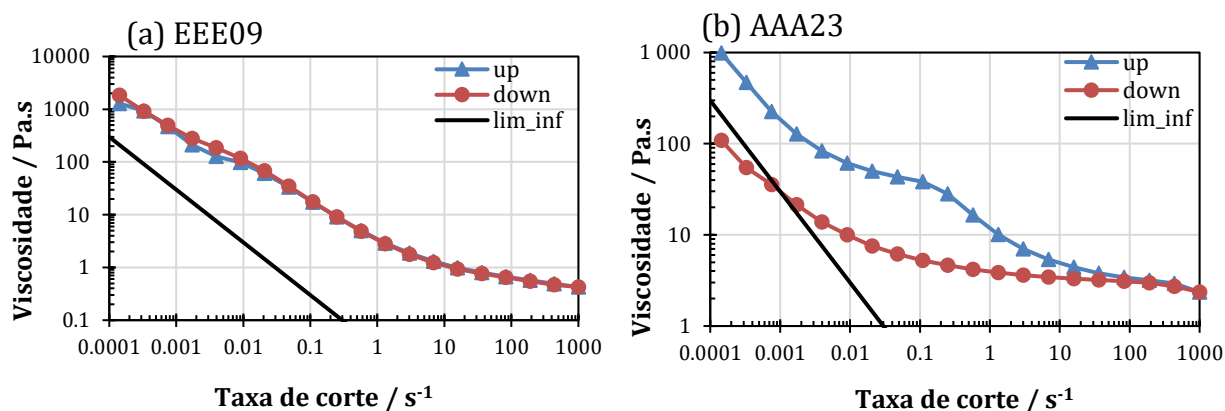


Figura 4.14 - Ensaios *Up & Down* a 23°C: (a) sem histerese (b) com histerese.

As condições destes ensaios encontram-se especificadas no Apêndice C.1 e os gráficos para as vinte e quatro matérias-primas testadas são apresentados no Apêndice C.2.

O ensaio para o aditivo AAA23 aponta a possibilidade de ocorrência de mudanças irreversíveis nas suas propriedades reológicas devido à aplicação de taxas de corte elevadas, semelhantes às sofridas na passagem pela bomba. Surge assim, a necessidade de efetuar um teste de tixotropia mais específico, denominado ensaio de recuperação.

4.1.7 Ensaio de recuperação

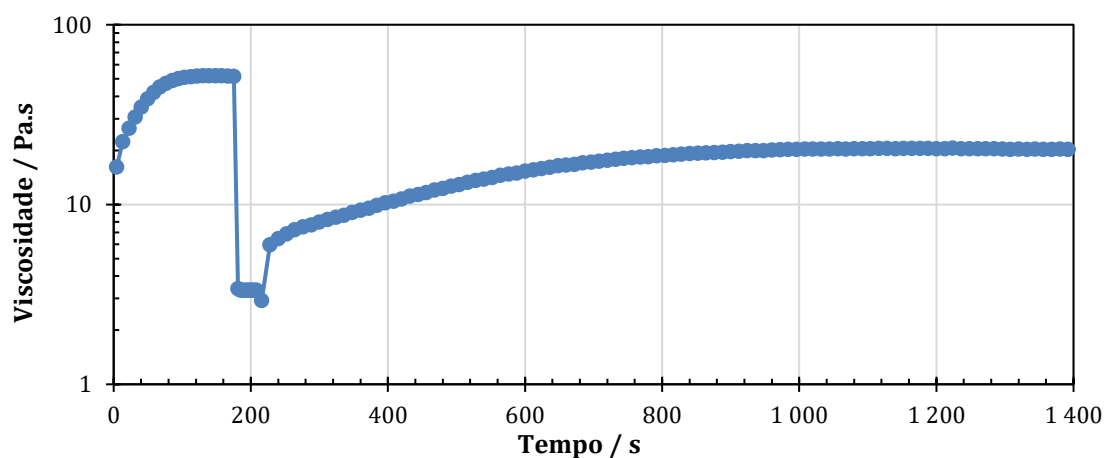


Figura 4.15 - Ensaio de recuperação do aditivo AAA23.

Para o aditivo AAA23 procurou-se simular a passagem pela bomba, através da aplicação instantânea de uma taxa de corte elevada (100 s^{-1}).

Conforme se pode verificar na Figura 4.15, a MP parte de um patamar de viscosidade de cerca de $50 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a uma taxa de corte de 0.1 s^{-1} . Aos 175 s é aplicada a taxa de corte elevada durante 30 s , provocando um decréscimo quase instantâneo da viscosidade para cerca de $3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, e na fase de recuperação, a MP vai recuperando gradualmente a viscosidade, até atingir um patamar a cerca de $20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Este valor é muito inferior ao inicial ($50 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) e o facto da MP não recuperar a sua viscosidade inicial em tempo útil leva a crer que ocorrem mudanças irreversíveis na estrutura do fluido devido à aplicação de elevadas taxas de corte.

As condições deste ensaio encontram-se especificadas no Apêndice D -.

4.1.8 Comparação de resultados

Nesta subsecção pretende-se comparar os resultados relativos à caracterização reológica, enfatizando-se as diferenças e as semelhanças entre as diversas matérias-primas.

4.1.8.1 Classificação das matérias-primas

Conforme referido anteriormente, onze das trinta e seis matérias-primas foram consideradas pouco viscosas: SSS01, EEE01, EEE02, EEE03, EEE04, AAA01, AAA02, AAA03, AAA04, AMONI e ÁGUA.

As restantes matérias-primas podem-se classificar em cinco categorias diferentes de acordo com o seu tipo (aditivo/emulsão), com a forma das curvas da viscosidade (newtoniano/pseudoplástico) e com a dependência/independência da temperatura.

Nove das matérias-primas classificaram-se como aditivos newtonianos (AAA05, AAA06, AAA07, AAA08, AAA09, AAA10, AAA11, AAA12 e AAA13). De seguida, são apresentados na Figura 4.16, os resultados dos ensaios de viscosidade a 23°C de três aditivos newtonianos, em que é possível detetar as diferentes ordens de grandeza de viscosidade que os caracterizam.

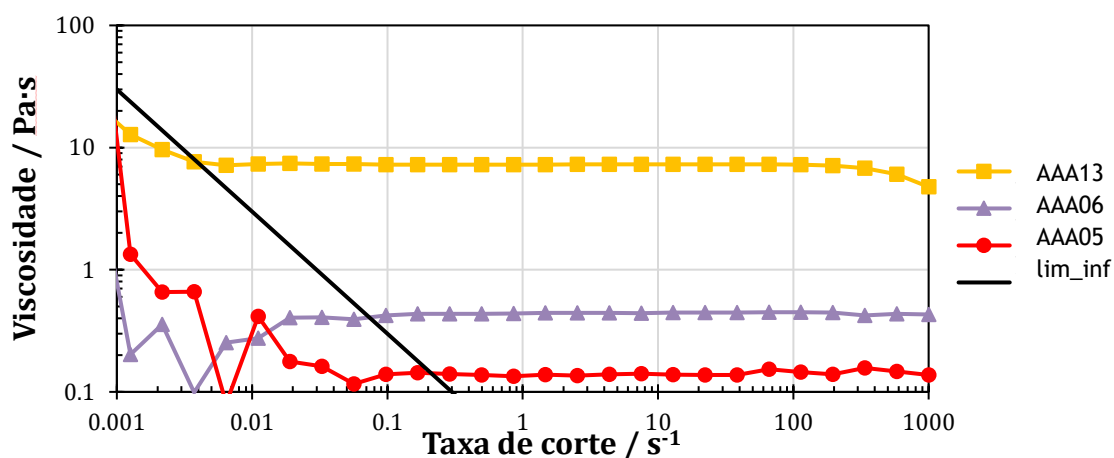


Figura 4.16 - Comparação entre curvas de viscosidade de aditivos newtonianos a 23°C .

Quatro matérias-primas foram classificadas em aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura (AAA14, AAA15, AAA16 e AAA17).

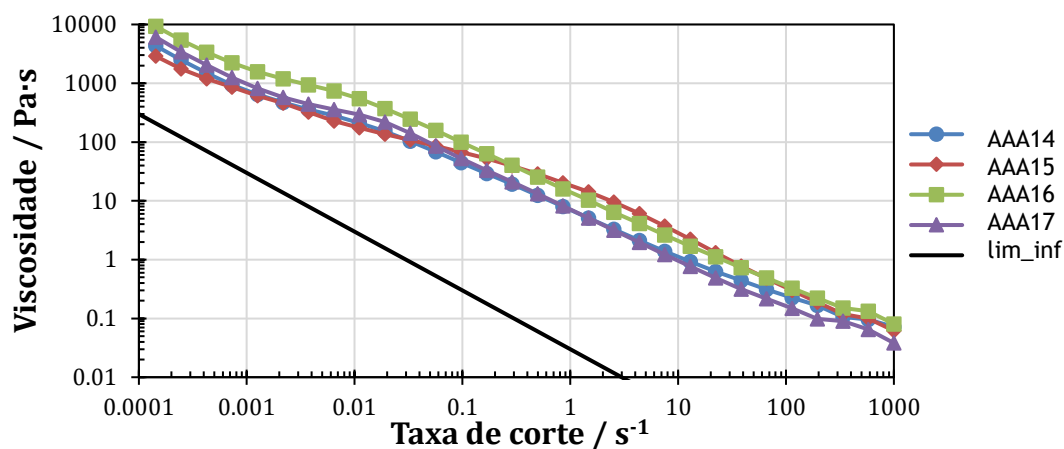


Figura 4.17 - Comparação das curvas da viscosidade de aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura.

Na Figura 4.17 verifica-se que as curvas de viscosidade são bastante semelhantes para esta categoria de matérias-primas.

Sete das matérias-primas foram classificadas em aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura: AAA18, AAA19, AAA20, AAA21, AAA22, AAA23 e AAA24.

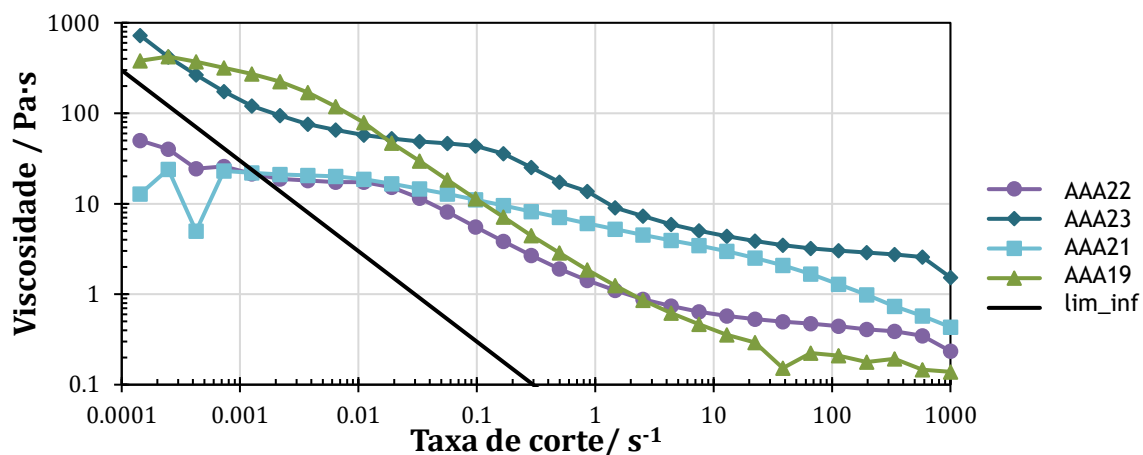


Figura 4.18 - Comparação das curvas da viscosidade de aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura. Medições a $T=23^{\circ}\text{C}$.

Analisando a Figura 4.18 verifica-se uma grande disparidade entre as formas das curvas, o que também torna a análise reológica deste tipo de matérias-primas mais complexa.

As curvas de viscosidade das emulsões (EEE05, EEE06, EEE07, EEE08 e EEE09) são apresentadas na Figura 4.19 observando-se que o comportamento destas difere mais significativamente para taxas de corte baixas.

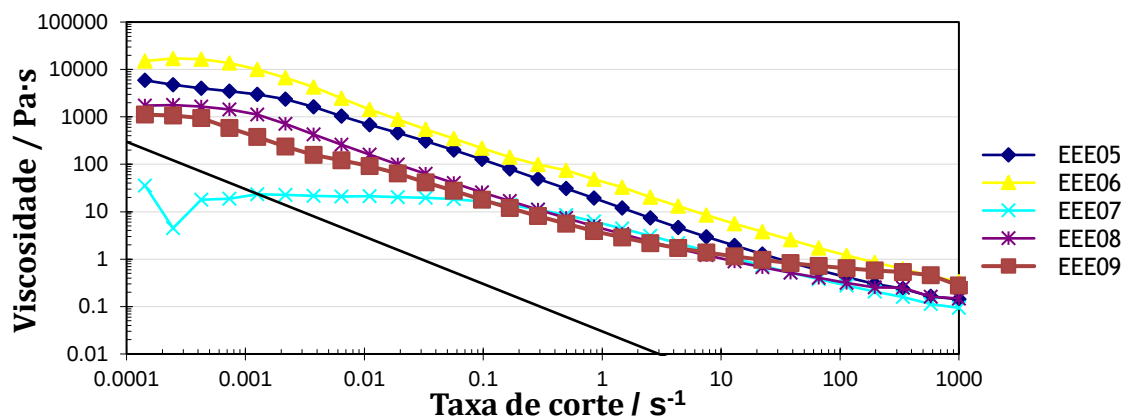


Figura 4.19 - Comparação das curvas de viscosidade das emulsões a 23°C.

4.1.8.2 Parâmetro C da lei de Arrhenius

O valor de C da lei de Arrhenius tem utilidade na interpretação e discussão dos resultados. Se $C > 0$, então um aumento da temperatura corresponde a uma diminuição da viscosidade, o comportamento mais comum para líquidos. Se $C < 0$, ocorre o oposto, conforme se verificou na Figura 4.12 em que a viscosidade da EEE08 era progressivamente menor, à medida que a temperatura do ensaio diminuía. Comparando uma MP (AAA11) com um valor de C positivo relativamente elevado, 9000 K, com uma MP (AAA09) com um valor de C positivo relativamente baixo, 1800 K, visualiza-se na Figura 4.20, que a viscosidade do AAA11 é muito mais dependente da temperatura do que a viscosidade do AAA09.

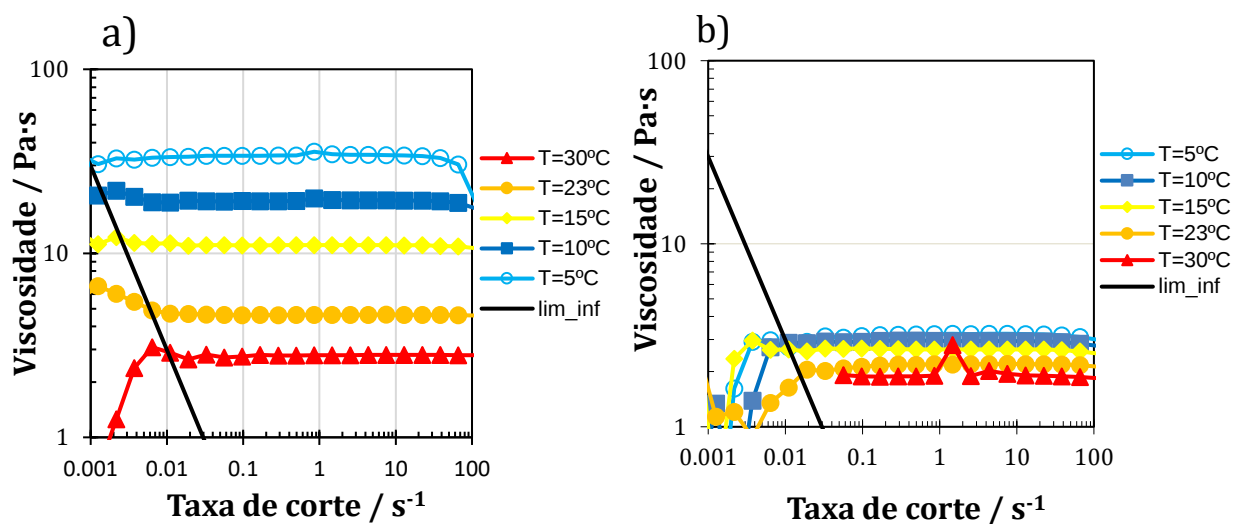


Figura 4.20 - Curvas de viscosidade: a) AAA11; b) AAA09.

À temperatura de 23°C, a viscosidade do aditivo AAA11 é aproximadamente 5 Pa·s e à temperatura de 5°C, que pode vir a sentir-se no inverno, a viscosidade é cerca de 34 Pa·s, correspondendo a um aumento aproximado de 700%. Em contraste, para o aditivo AAA09, o aumento é de apenas 70%, uma vez que à temperatura de 23°C, a viscosidade é cerca de 2.2 Pa·s e à temperatura de 5°C, é cerca de 3.2 Pa·s.

4.1.8.3 Ordenação das matérias-primas

Após o tratamento de dados realizado para todas as matérias-primas, procedeu-se à ordenação/listagem das suas viscosidades a 100 s^{-1} (valor apropriado às taxas de corte típicas na parede da tubagem) na Tabela 4.6 para as emulsões e na Tabela 4.8 para os aditivos.

Analisando a Tabela 4.7, verifica-se que a viscosidade das emulsões é pouco afetada pela temperatura (valores baixos de C), pelo que este parque de armazenamento poderá situar-se numa zona exterior sujeita a variações térmicas sem que ocorram grandes variações nos caudais.

Tabela 4.6 - Viscosidades das emulsões ordenadas

Emulsão	$\eta_{\dot{\gamma}=100\text{s}^{-1}} (\text{Pa}\cdot\text{s})$
EEE06	1.31
EEE09	0.62
EEE05	0.44
EEE04	0.35
EEE07	0.29
EEE08	0.27
EEE02	0.08
EEE03	0.03
EEE01	0.02

Tabela 4.7 - Dependência da T no parque das emulsões

Emulsão	$C \text{ (K)}$
EEE09	3800
EEE05	0
EEE07	0
EEE01	0
EEE02	0
EEE03	0
EEE04	0
EEE06	-2100
EEE08	-4400

A partir dos ensaios realizados, conclui-se que a viscosidade da maioria dos aditivos é afetada pela temperatura e, por esse motivo, procedeu-se à ordenação das MP do parque de aditivos de acordo com o seu valor de C da lei de Arrhenius (Tabela 4.9) que quantifica a dependência da viscosidade da MP com a temperatura. Esta tabela permite identificar quais são as MP mais suscetíveis a variações de caudal ao longo das estações do ano, devido às mudanças de temperatura, que são simultaneamente as MP em que a colocação de um sistema de isolamento térmico nos respetivos tanques de armazenamento é recomendada.

No entanto, note-se que há aditivos cuja dependência com a temperatura é elevada, mas a sua viscosidade continua a ser relativamente baixa (AAA05, por exemplo), pelo que, as duas tabelas devem ser analisadas em conjunto.

Tabela 4.8 - Viscosidades dos aditivos ordenadas

Matéria-prima	$\eta_{\dot{\gamma}=100s^{-1}} (Pa \cdot s)$
AAA13	7.30
AAA24	4.63
AAA11	4.60
AAA12	3.70
AAA23	2.77
AAA09	2.20
AAA21	1.21
AAA07	0.66
AAA08	0.60
AAA22	0.56
AAA18	0.53
AAA10	0.44
AAA06	0.44
AAA15	0.37
AAA16	0.34
AAA14	0.22
AAA19	0.17
AAA05	0.15
AAA17	0.15
AAA20	0.10
AAA02	0.02
AAA04	0.02
AAA01	0.01
AAA03	≈ 0.0001
AMONI	≈ 0.0001
ÁGUA	≈ 0.0001
SSS01	≈ 0.0001

Tabela 4.9 - Dependência da T no parque de aditivos

Matéria-prima	C (K)
AAA11	9000
AAA13	9000
AAA05	8240
AAA22	7500
AAA07	7100
AAA19	7060
AAA06	6900
AAA23	6800
AAA12	6300
AAA18	5900
AAA08	5000
AAA24	4900
AAA20	4700
AAA21	2690
AAA09	1800
AAA10	810
AAA14	0
AAA15	0
AAA16	0
AAA17	0
AAA02	0
AAA04	0
AAA01	0
AAA03	0
AMONI	0
ÁGUA	0
SSS01	0

4.2 Dimensionamento

À data da realização da dissertação ainda não existe um *layout* definitivo da instalação, mas as duas propostas são apresentadas no Apêndice A -. Na primeira proposta, o tanque de armazenamento situa-se ao nível do solo, e a MP é bombeada do tanque até ao dispersor durante o processo de fabrico. Na segunda proposta, a MP é abastecida por bombagem direta do IBC para o tanque de armazenamento que se situa acima do dispersor. Posteriormente, a alimentação e doseamento da MP ao dispersor é feita por gravidade, durante o processo de fabrico.

Foi definido que as tubagens seriam exclusivas para uma única MP assim como as bombas, evitando contaminações.

As propriedades reológicas dos fluidos, estudadas na primeira fase da dissertação, têm influência nas perdas de carga ao longo da tubagem e, conseqüentemente, na altura manométrica que a bomba terá de fornecer ao fluido. Uma correta determinação das “curvas características da instalação” é essencial para dimensionar adequadamente os equipamentos e obter os caudais pretendidos.

Pelas equações apresentadas na secção 2.3.1, fica evidente que em regime laminar, a carga que a bomba terá de fornecer é dependente de diversas variáveis, nomeadamente:

$$\Delta P_{Bomba} = \Delta P_{Bomba}(\rho, \eta_w, Q, L, D, \Delta z) \quad (4.6)$$

4.2.1 Influência da viscosidade e da massa volúmica na curva característica da instalação

Nesta subsecção, pretende-se perceber a influência das propriedades intrínsecas à matéria-prima na pressão que a bomba necessita fornecer ao fluido.

Para fluidos newtonianos em regime laminar, no ponto de operação $\Delta P_{Bomba} = \Delta P_{Instalação}$, pelo que;

$$\Delta P_{Bomba} = \rho g H_{Bomba} = \rho g \Delta z + \frac{128 \eta L}{\pi D^4} Q \quad (4.7)$$

Para obter esta equação, assume-se que as perdas de carga localizadas e a carga cinética são desprezáveis, o que é razoável em escoamento laminar e L elevado.

Para fluidos não-newtonianos em regime laminar,

$$\Delta P_{Bomba} = \rho g H_{Bomba} = \rho g \Delta z + \frac{128 \eta_w L}{\pi D^4} \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right)^{n'} Q \quad (4.8)$$

Independentemente de o fluido ser newtoniano ou não-newtoniano, analisando as equações (4.7) e (4.8) verifica-se que um aumento da massa volúmica, ρ , e da viscosidade, η , do fluido

corresponde a um maior acréscimo de pressão, ΔP_{Bomba} , que a bomba terá de fornecer ao fluido. De notar, contudo, que a viscosidade na parede é variável para fluidos não-newtonianos, dependendo do caudal.

4.2.2 Influência do desnível da instalação e do diâmetro e comprimento da tubagem na curva característica da instalação

Procedeu-se também à análise da influência dos parâmetros estruturais da instalação na curva característica da instalação. Observando as Eqs.(4.7) e (4.8), verifica-se que um aumento do comprimento da tubagem, L , e do desnível da instalação, Δz , corresponde a uma maior pressão que a bomba terá de fornecer. Por outro lado, o aumento do diâmetro da tubagem, D , faz diminuir a carga necessária fornecer ao fluido pela bomba para determinado caudal. Este parâmetro tem uma grande influência no valor de ΔP_{Bomba} , conforme se observa na seguinte relação de proporcionalidade:

$$(\Delta P_{Bomba} - \rho g \Delta z) \propto \frac{1}{D^4} \quad (4.9)$$

4.2.3 Folhas automáticas de cálculo das curvas características da instalação

Conforme referido anteriormente, a viscosidade na parede da tubagem, η_w , pode ser dependente da temperatura e/ou da taxa de corte sentida na parede da tubagem, dependendo do tipo de fluido. A taxa de corte na parede da tubagem, $\dot{\gamma}_w$, é, por sua vez, dependente do caudal, Q , e do diâmetro da tubagem, D , conforme se verifica na Eq.(2.20). Assim, conclui-se que η_w é dependente do fluido, da temperatura, do caudal e do diâmetro da tubagem.

$$\eta_w = \eta_w(T, \dot{\gamma}_w) = \eta_w(T, Q, D) \quad (4.10)$$

A pressão que a bomba necessita de fornecer ao fluido é dependente da massa volúmica, da viscosidade na parede da tubagem, do caudal, do comprimento e diâmetro da tubagem e do desnível da instalação.

$$\Delta P_{Bomba} = \Delta P_{Bomba}(\rho, \eta_w, Q, L, D, \Delta z) \quad (4.11)$$

Conforme verificado anteriormente, na Eq.(4.10), η_w é dependente do tipo de fluido e da temperatura e consequentemente a ΔP_{Bomba} também é.

Após a caracterização reológica foi possível efetuar cálculos preditivos da viscosidade de cada matéria-prima em diversas condições de temperatura e taxa de corte através das equações de ajuste obtidas. Uma vez que as condições térmicas (T) são variáveis, e os parâmetros da instalação ($L, D, \Delta z$) e o caudal (Q) ainda não estavam definidos à data da realização da presente dissertação, criaram-se folhas de cálculo automático cujo *output* são as denominadas “curvas características da instalação”. Estas determinam a carga que a bomba necessita de fornecer para o caudal pretendido. As folhas apresentadas nos Apêndices E.1, E.2, E.3 e E.4 utilizam

simultaneamente as equações de viscosidade obtidas pela caracterização reológica e as equações de dimensionamento adequadas aos *layouts* da instalação propostos.

De seguida, são apresentados, nas Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25, alguns exemplos de curvas características da instalação obtidas através das folhas de cálculo automático. Fizeram-se variar alguns destes parâmetros: T , MP , Δz , D e L , conforme descrito na Tabela 4.10, com o intuito de tirar conclusões úteis para o dimensionamento.

Tabela 4.10 - Parâmetros das curvas da instalação apresentadas na secção 4.2.3

Figura	T (°C)	MP	Δz (m)	D (m)	L (m)
Figura 4.21	variável	AAA12	15	0.05	25
Figura 4.22	23	variável	15	0.05	25
Figura 4.23	23	AAA24	variável	0.05	25
Figura 4.24	23	AAA13	15	variável	25
Figura 4.25	23	AAA21	15	0.05	variável

Como foi verificado pela caracterização reológica, a temperatura normalmente influencia a viscosidade que, por sua vez, tem influência na pressão que a bomba terá de fornecer ao fluido nas condições de operação. O declive da curva característica da instalação aumenta sucessivamente com a diminuição da temperatura, conforme se pode verificar no exemplo apresentado na Figura 4.21.

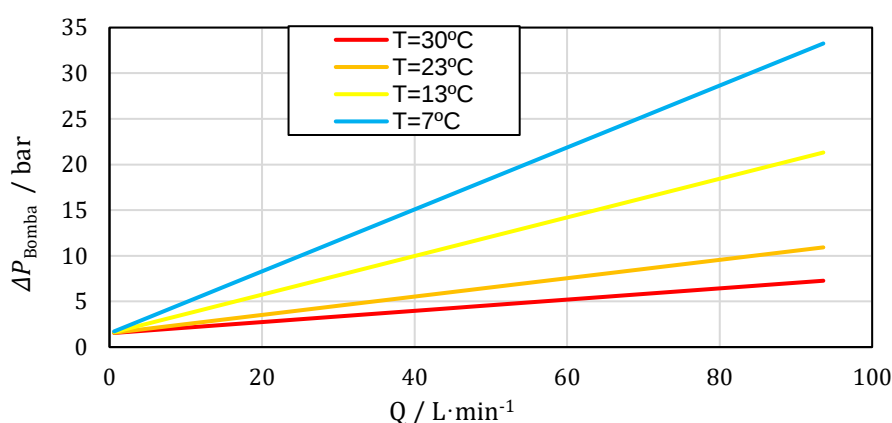


Figura 4.21 - Influência da temperatura na curva característica da instalação para o aditivo AAA12.

Esta figura ajuda a entender os problemas de escoamento de matérias-primas que podem ocorrer nos meses mais frios do ano. O mesmo caudal de AAA12 a 7°C requer uma pressão fornecida pela bomba, H , muito superior à requerida a 23°C. A pressão fornecida pela bomba pneumática de duplo diafragma pode ser aumentada através do aumento da pressão e caudal do ar comprimido conforme se observa na Figura 2.12. No entanto, cada bomba está limitada

a uma capacidade máxima, normalmente proporcional ao seu tamanho, que pode não ser suficiente para debitar um caudal aceitável no inverno. Por este motivo, o aditivo newtoniano com viscosidade dependente da temperatura, AAA12, será um dos casos em que a aplicação de um sistema de isolamento térmico no tanque de armazenamento é recomendável, uma vez que, para $T=7^{\circ}\text{C}$ o declive da curva aumenta significativamente, resultando numa diminuição do caudal da MP.

A partir da caracterização reológica, foi observada uma grande variedade de gamas de viscosidade e de perfis reológicos. A Figura 4.22 corrobora esta afirmação, uma vez que, a curva da instalação varia muito, de acordo com a matéria-prima selecionada. Este facto também vem justificar a utilização de diferentes bombas e tubagens para diferentes matérias-primas.

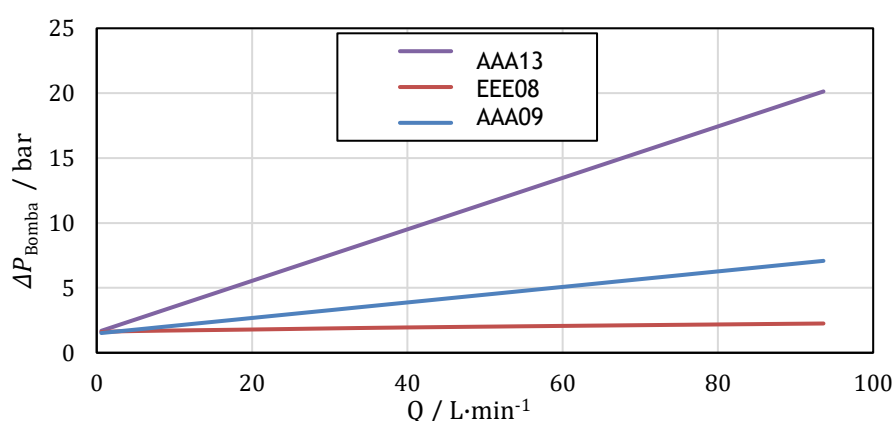


Figura 4.22 - Curvas características da instalação para diferentes matérias-primas.

Utilizando as folhas de cálculo automático geradas foi também estudada a influência dos parâmetros da instalação (desnível da instalação e diâmetro e comprimento da tubagem) na curva característica da instalação.

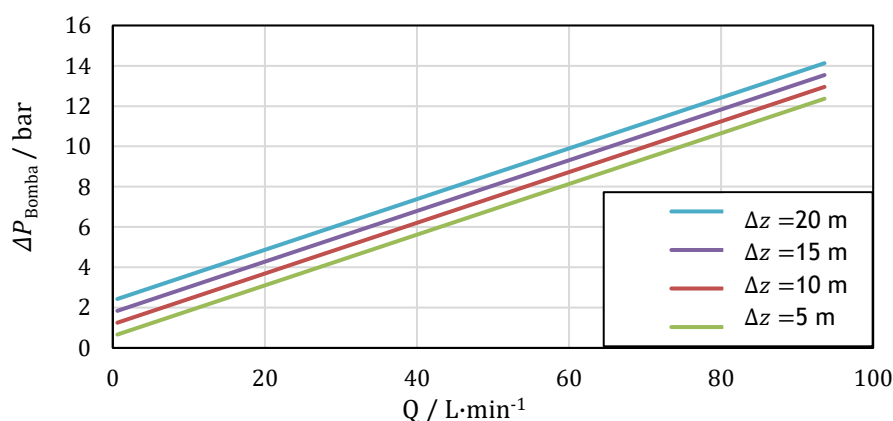


Figura 4.23 - Influência do desnível da instalação na curva da instalação para a MP AAA24.

O desnível da instalação, Δz , tem influência na ordenada na origem da curva da instalação, mantendo-se o comportamento em função de Q igual, conforme se apresenta na Figura 4.23 em que o declive da reta se mantém constante.

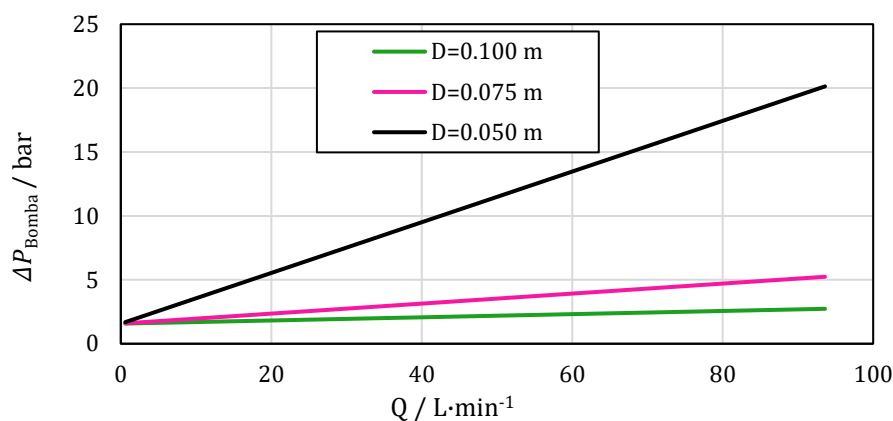


Figura 4.24 - Influência do diâmetro da tubagem na curva da instalação para a MP AAA13.

O diâmetro da tubagem, D , é um parâmetro crítico de dimensionamento como se previu na secção 4.2.2 pela Eq.(4.9) e, conforme se pode verificar na Figura 4.24, a passagem de uma tubagem com 5 cm de diâmetro (curva preta) para uma tubagem com $D=10$ cm (curva verde) conduz a uma redução drástica da carga da bomba.

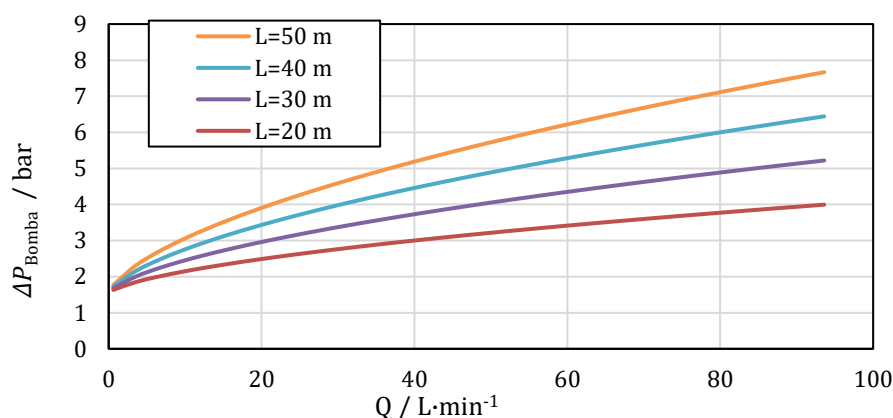


Figura 4.25 - Influência do comprimento da tubagem na curva da instalação da MP AAA21.

Por fim, verifica-se na Figura 4.25 que o comprimento da tubagem, L , influencia proporcionalmente a perda de carga por atrito, sendo $(\Delta P_{Bomba} - \rho g \Delta z) \propto L$ conforme previsto pelas Eqs.(4.7) e (4.8).

Convém referir que para todas as curvas e caudais representados nas folhas de cálculo automático, Re é sempre substancialmente inferior a 2000 e, por isso, os escoamentos ocorrem em regime laminar. Assim, confirma-se que as equações utilizadas ao longo desta secção são adequadas para o tipo de escoamento que pretendem simular (laminar).

5 Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta dissertação permitiu tirar conclusões baseadas nos modelos formulados de previsão de viscosidade de matérias-primas a diferentes taxas de corte e temperaturas.

A partir da caracterização reológica, classificaram-se as matérias-primas de acordo com o seu comportamento reológico, identificaram-se as mais viscosas, assim como as mais suscetíveis a alterações nos caudais devido às mudanças térmicas sofridas ao longo do ano.

Concluiu-se que a viscosidade da maioria dos aditivos é afetada pela temperatura. Para os aditivos em que existe uma maior dependência deverá ser considerada a possibilidade de colocação de um sistema de isolamento térmico nos respetivos tanques de armazenamento. Por sua vez, verificou-se que a viscosidade das emulsões é pouco afetada pela temperatura, pelo que, este parque de armazenamento poderá situar-se numa zona exterior, sem que ocorram problemas de redução de caudal no inverno.

A partir dos ensaios de tixotropia verificou-se que o aditivo AAA23 apresenta uma diminuição possivelmente irreversível da viscosidade devido à aplicação de taxas de corte elevadas, da ordem de grandeza das taxas de corte aplicadas na bomba. Por este motivo, a sua integração no sistema de transferência é desaconselhada. Para as restantes matérias-primas, não se preveem problemas de irreversibilidade nas propriedades reológicas.

Relativamente ao dimensionamento do sistema de transferência, foram feitos alguns progressos e retiradas algumas conclusões, nomeadamente na obtenção das curvas características da instalação necessárias para um dimensionamento adequado da bomba a usar. Foram criadas folhas de cálculo automáticas que permitem estimar as curvas características da instalação. A manipulação destas folhas permite determinar o impacto de diferentes parâmetros (T , MP , Δz , D , L) na altura manométrica fornecida pela bomba que é necessária para promover o escoamento ao caudal desejado. Concluiu-se que o parâmetro que tem mais impacto no dimensionamento, para além do tipo de fluido, é o diâmetro da tubagem.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

O primeiro objetivo da dissertação foi a caracterização reológica de um conjunto de trinta e seis matérias-primas líquidas utilizadas no fabrico de tintas de base aquosa. Este objetivo foi alcançado com sucesso através dos ensaios reológicos efetuados e modelos preditivos ajustados.

O segundo objetivo da dissertação consistia no dimensionamento de um sistema de transporte e doseamento destas matérias-primas que não foi cumprido na íntegra, devido à escassez de tempo. Não obstante, foram criadas folhas de cálculo automático que possibilitam a obtenção das curvas características da instalação para as diferentes matérias-primas sobre diversas condições.

Assim, o trabalho realizado nesta dissertação, para além de aumentar substancialmente o conhecimento reológico das matérias-primas usadas na empresa, também serviu e servirá como apoio a decisões relativas ao projeto industrial “Revamp Nováqua”, em curso na CIN.

6.2 Outros Trabalhos Realizados

Em paralelo, foram realizados outros trabalhos, nomeadamente, na área da melhoria contínua, tendo como objetivo a implementação de soluções com vista a aumentar a eficiência e eficácia do processo produtivo da fábrica de tintas de base aquosa da CIN.

6.3 Apreciação Final

Em termos pessoais, o trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação contribuiu para um ganho de conhecimento na área da reologia, indústria de tintas e projetos na área da engenharia.

Importa referir que, devido à situação pandémica, os trabalhos na empresa iniciaram apenas a 13/03/2021 e os ensaios no centro de ID a 01/04/2021, condicionando o cumprimento de parte dos objetivos inicialmente propostos.

6.4 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros recomenda-se aprofundar o estudo da escolha dos diâmetros das tubagens e analisar os catálogos dos fornecedores de bombas. Aplicando os parâmetros de *layout* corretos (Δz , D , L) nas folhas de cálculo automático geradas nesta dissertação, será possível proceder à escolha informada da bomba adequada para cada matéria-prima, cumprindo integralmente o segundo objetivo inicialmente proposto para esta dissertação.

7 Referências

- [1] CIN, «CIN - Inovação, qualidade e liderança». Disponível em: <https://cin.com/corporate/pt/cin>. [Acedido: 18-Jun-2021].
- [2] CIN, «História da CIN». Disponível em: <https://cin.com/corporate/pt/historia>. [Acedido: 02-Jul-2021].
- [3] CIN, «CIN - Marcos Históricos». Disponível em: <https://cin.com/pt/quem-somos>. [Acedido: 15-Jun-2021].
- [4] CIN, «Relatório e Contas CIN», 2019.
- [5] E. A. R. C. Antas, «Projeto de Simulação Industrial para uma Nova Unidade Produtiva de Tintas», Tese de Mestrado FEUP, 2020.
- [6] T. G. Mezger, *The Rheology Handbook*, 4th ed. Vincentz Network, 2014.
- [7] M. A. Alves, «Noções Elementares de Reologia», em *MIB-Fenómenos de Transporte Aplicados*, FEUP-DEQ, Ed. 2012.
- [8] J. M. de Campos, «Reologia e fluidos não-newtonianos», em *Mecânica dos Fluidos em Operações Unitárias*, FEUP, Ed. 2015.
- [9] Anton Paar, «Basics of Applied Rheology». Oregon State University, 2016.
- [10] D. M. S. da Silva, «Estudo reológico de produtos decorativos durante o processo de aplicação», Tese de Mestrado FEUP, 2020.
- [11] F. J. Adewale, A. P. Lucky, A. P. Oluwabunmi, e E. F. Boluwaji, «Selecting the Most Appropriate Model for Rheological Characterization of Synthetic Based Drilling Mud», *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 12, n. 18, pp. 7614-7629, 2017.
- [12] F. A. Morrison, *Understanding Rheology*. Oxford University Press, 2001.
- [13] R. Darby, *Chemical Engineering Fluid Mechanics*, 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [14] H. A. Barnes, *A Handbook of Elementary Rheology*. University of Wales, 2000.
- [15] Y. Zare, S. P. Park, e K. Y. Rhee, «Results in Physics Analysis of complex viscosity and shear thinning behavior in poly (lactic acid)/ poly (ethylene oxide)/ carbon nanotubes biosensor based on Carreau - Yasuda model», *Results Phys.*, vol. 13, n. December 2018, p. 102245, 2019.
- [16] L. C. F. Andrade e D. O. D. A. Cruz, «The Carreau-Yasuda Fluids : a Skin Friction Equation for Turbulent Flow in Pipes and Kolmogorov Dissipative», *J. Braz. Soc. Mech. Schi Eng.*, vol. XXIX, n. 2, pp. 162-167, 2007.

- [17] H. A. Barnes, «The yield stress — a review or ‘panta rei’ — everything flows?», *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 81, n. May 1998, pp. 133-178, 1999.
- [18] G. F. D. E. Verteuil, «The viscosity of liquids», Cambridge University, 1958.
- [19] A. Messaâdi *et al.*, «A New Equation Relating the Viscosity Arrhenius Temperature and the Activation Energy for Some Newtonian Classical Solvents», *J. Chem.*, vol. 2015, pp. 7-10, 2015.
- [20] P. C. Hiemenz e T. P. Lodge, *Polymer Chemistry*, 2nd ed. CRC Press, 2007.
- [21] R. B. Bird, R. C. Armstrong, e O. Hassager, *Dynamics of Polymeric Liquids. Vol.1- Fluid Mechanics*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 1987.
- [22] V. Lopes e R. Lavandeira, «Manual de Metodologias Reológicas». CIN, S.A., 2009.
- [23] R.P.Chhabra e J.F.Richardson, «Non-Newtonian Fluid Behaviour», em *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology*, 2nd ed., 2008, pp. 1-55.
- [24] F. A. Holland e R. Bragg, *Fluid Flow for Chemical Engineers*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 1973.
- [25] B. Munson, D. Young, T. Okiishi, e W. Huebsch, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 6th ed. Don Fowley, 2009.
- [26] J. M. de Campos, «Bombas centrífugas - seleção e linhas de bombagem», em *Mecânica dos Fluidos em Operações Unitárias*, FEUP, Ed. .
- [27] C. L. Roberto e C. Junior, «Velocidades Ideias de Escoamento de Fluido Hidráulico em Tubulações e Dutos de Manifolds». Jarinu-São Paulo-Brasil, 2013.
- [28] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7th ed. McGraw-Hill.
- [29] D. A. Cruz, P. M. Coelho, e M. A. Alves, «A Simplified Method for Calculating Heat Transfer Coefficients and Friction Factors in Laminar Pipe Flow of Non-Newtonian Fluids», *J. Heat Transfer*, pp. 132-137, 2012.
- [30] J. Mewis, R. Butera, E. Van der Aerschot, e M. Rotti, «Coating Flows», em *Rheology Aspects of Coatings*, 2003.
- [31] X. W. Ng, «Analyzing Fluid Flow Scenarios», em *Pocket Guide to Rheology: A Concise Overview and Test Prep for Engineering Students*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 117-174.
- [32] «World Pumps». Disponível em: <https://www.worldpumps.com/general-processing/features/cost-benefits-and-energy-efficiencies-of-aodd/>. [Acedido: 02-Jul-2021].

- [33] «Horizontal Centrifugal Pump». Disponível em: <https://www.inverter.com/4hp-horizontal-centrifugal-pump>. [Acedido: 02-Jul-2021].
- [34] SandPiper, «S20 METALLIC PUMP TECHNICAL DATA SHEET» .
- [35] A. G. de Castro, J. A. C. Gomes, e D. A. Correia, *Reologia e suas aplicações industriais*, 1ª. ed. Instituto Piaget Lisboa, 2013.
- [36] P. C. S. de Sousa, «Entry Flow of Viscoelastic Fluids at Macro- and Micro-Scale», Tese de Doutoramento FEUP, 2010.
- [37] Malvern Instruments, «Specification Sheet-Bohlin Gemini». 2005.
- [38] «Excel Solver: Which solving method should I choose?». Disponível em: <https://engineerexcel.com/excel-solver-solving-method-choose/>. [Acedido: 01-Jul-2021].

Apêndice A - *Layouts* possíveis da instalação

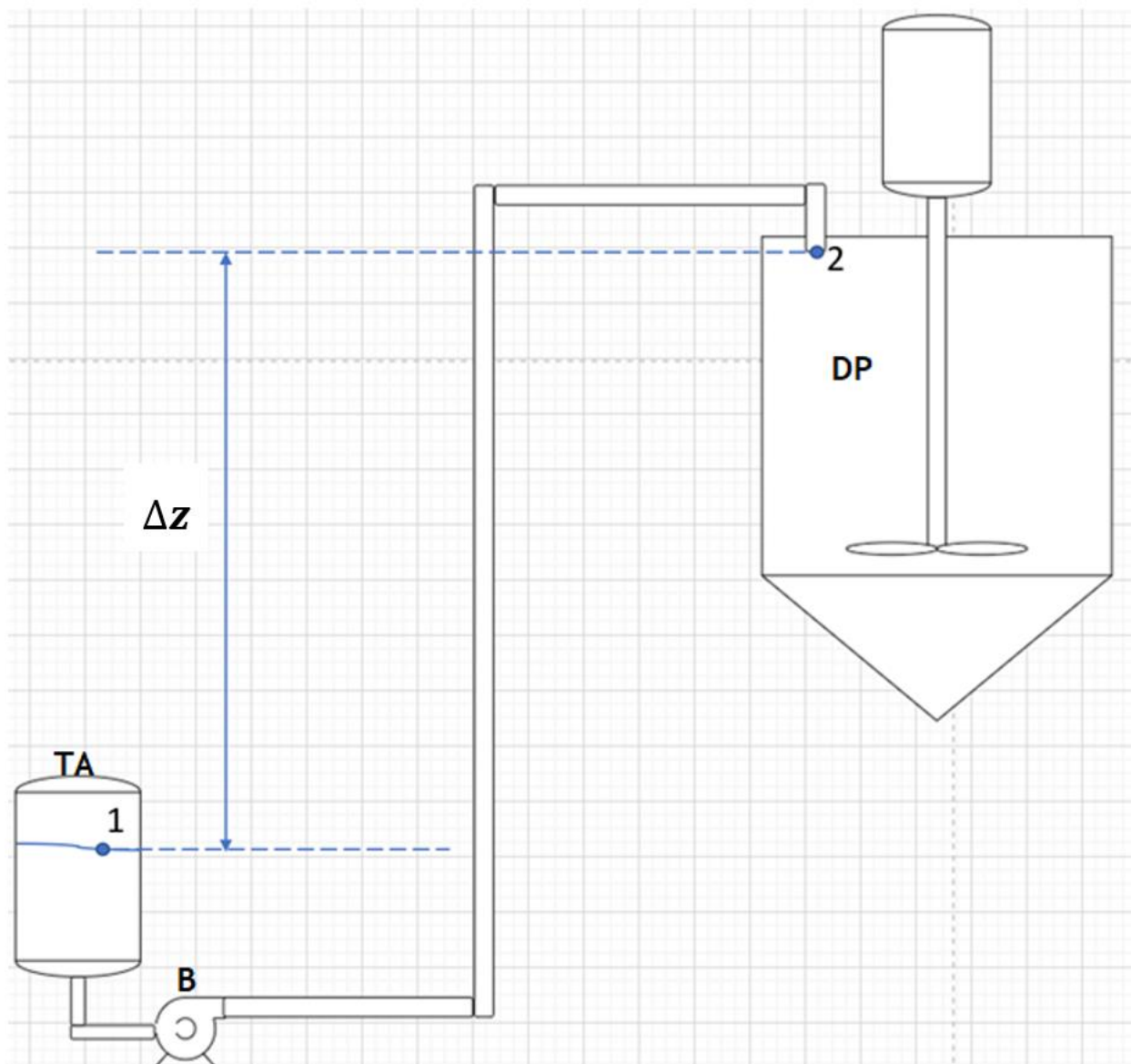


Figura A.1 - Sugestão 1 de layout da instalação em que: TA-Tanque de Armazenamento; B-Bomba e DP-Dispersor.

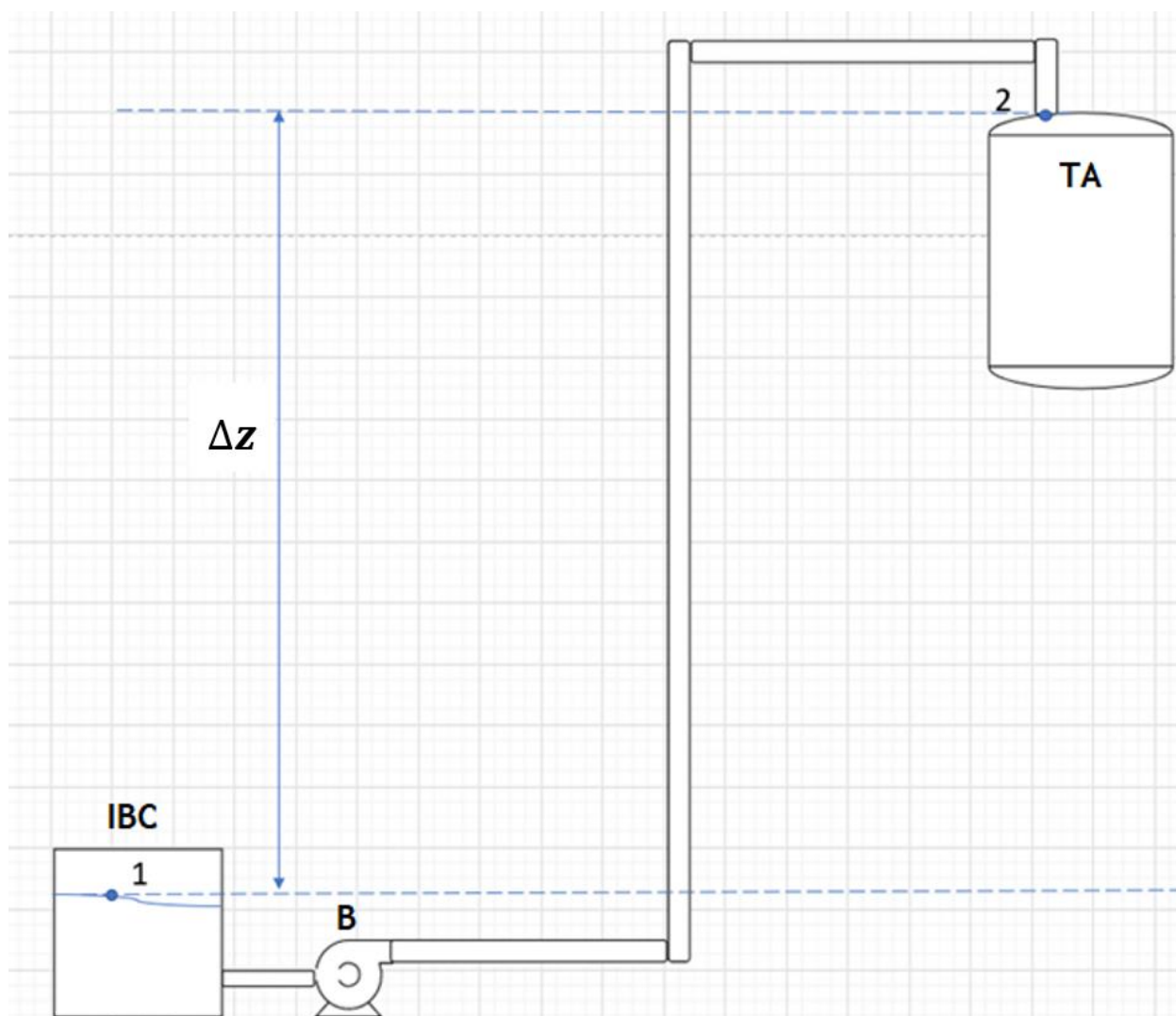


Figura A.2 - Sugestão 2 de layout da instalação em que: IBC- Industrial Bulk Container; B- Bomba; TA-Tanque de Armazenamento.

Apêndice B - Ensaios de viscosidade

B.1 Condições dos ensaios de viscosidade

Tabela B.1 - Condições dos ensaios de viscosidade

Ensaios de Viscosidade	
<i>Shear rate [s^{-1}]</i>	5
<i>Apply time [s]</i>	30
<i>Equilibrium time [s]</i>	30
<i>Temperature [$^{\circ}C$]</i>	5/10/15/23/30
<i>Measurement System</i>	CP 4° / 40 mm
<i>Delay time [s]</i>	10
<i>Integration time [s]</i>	25
<i>Proportionality</i>	<i>Strain</i>
<i>Ramp</i>	<i>Up</i>
<i>Start shear [s^{-1}]</i>	0.0001432
<i>End shear [s^{-1}]</i>	1000
<i>Number of samples</i>	30
<i>Range</i>	<i>Logarithmic</i>

Nota: É usada a nomenclatura em inglês do reómetro utilizado.

B.2 Curvas dos aditivos newtonianos

i) Curvas do aditivo AAA05

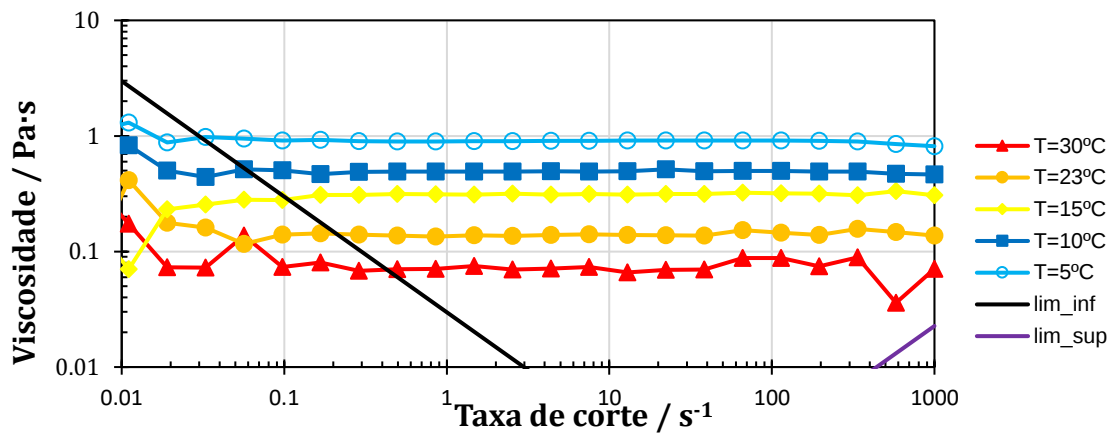


Figura B.1 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA05.

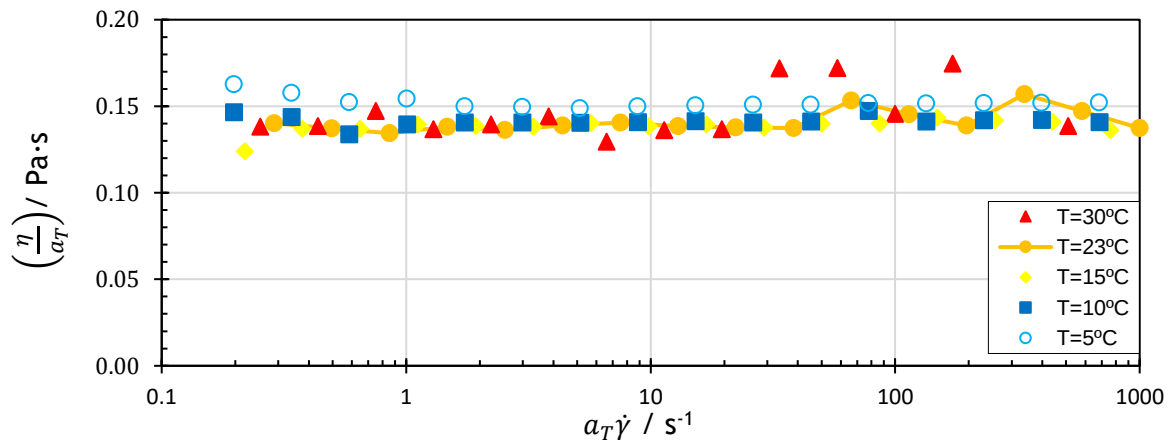


Figura B.2 - Curva mestra do aditivo AAA05.

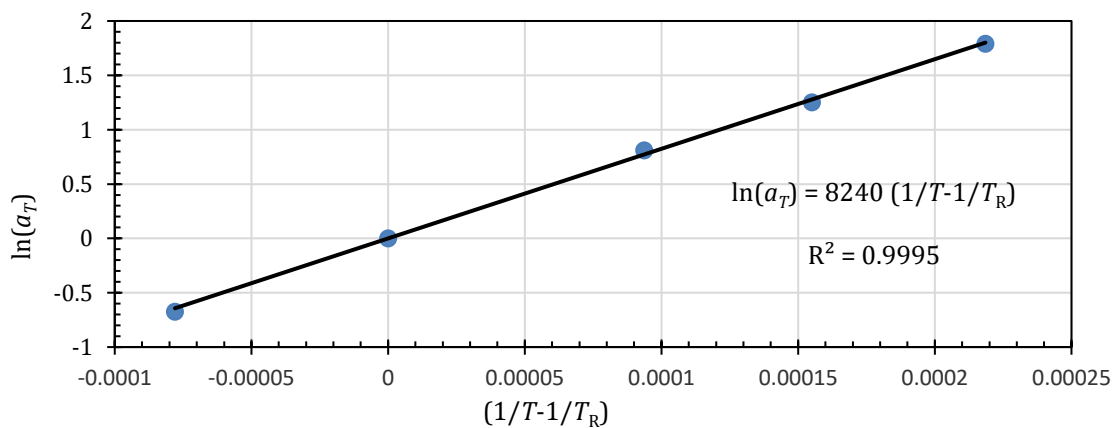


Figura B.3 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA05.

$$\eta(T) = 0.15 e^{8240 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.148 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

ii) Curvas do aditivo AAA06

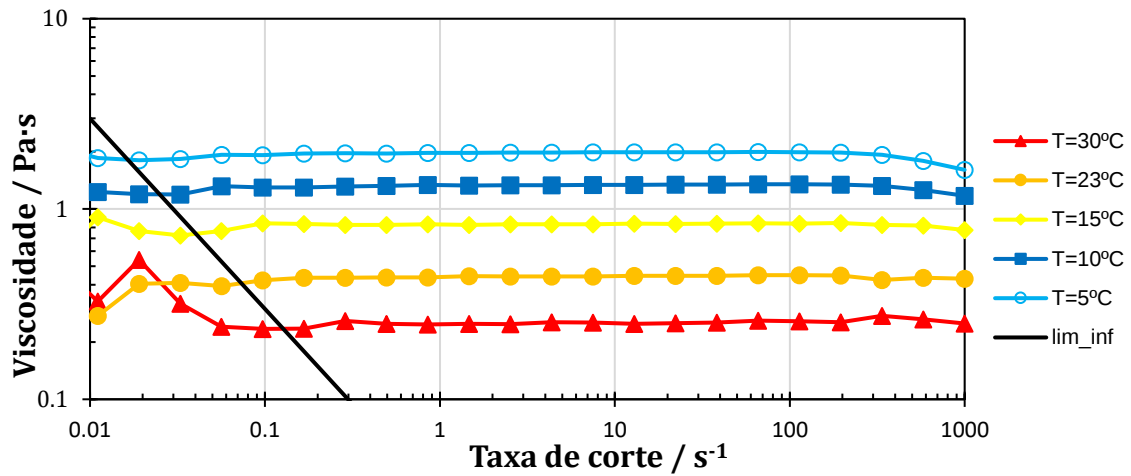


Figura B.4 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA06.

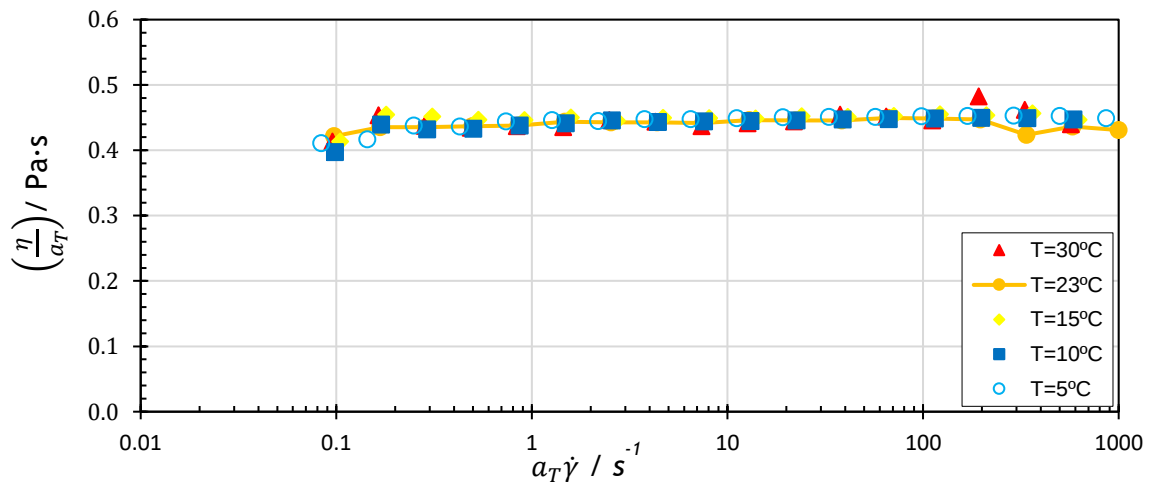


Figura B.5 - Curva mestra do aditivo AAA06.

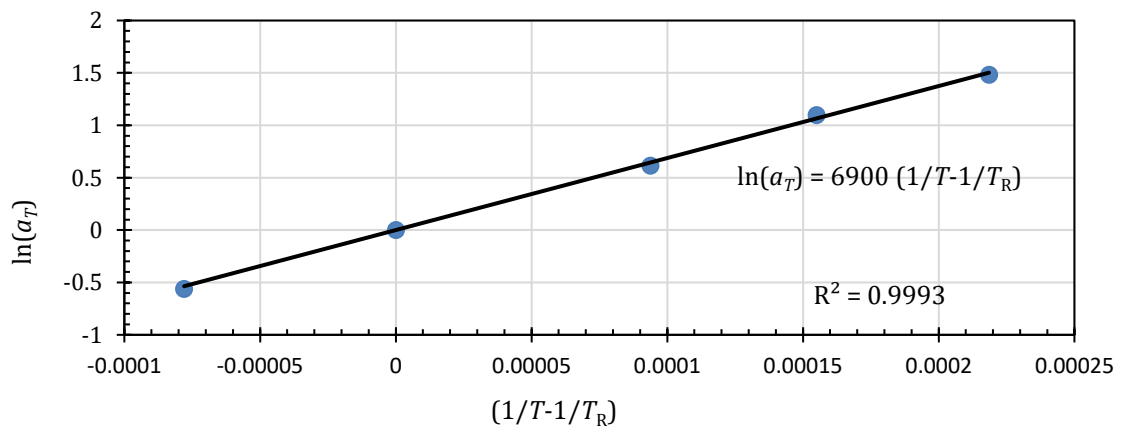


Figura B.6 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA06.

$$\eta(T) = 0.44e^{6900\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

iii) Curvas do aditivo AAA07

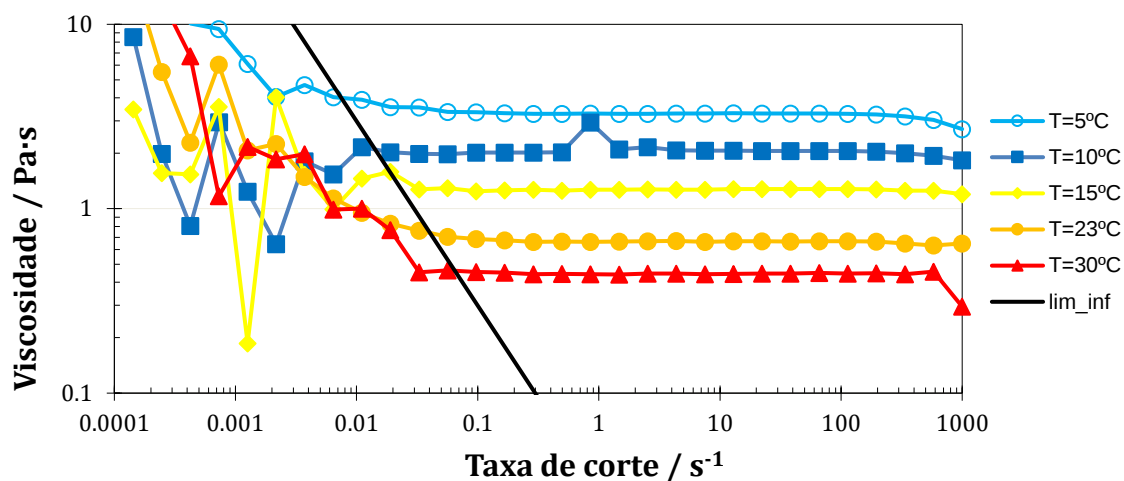


Figura B.7 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA07.

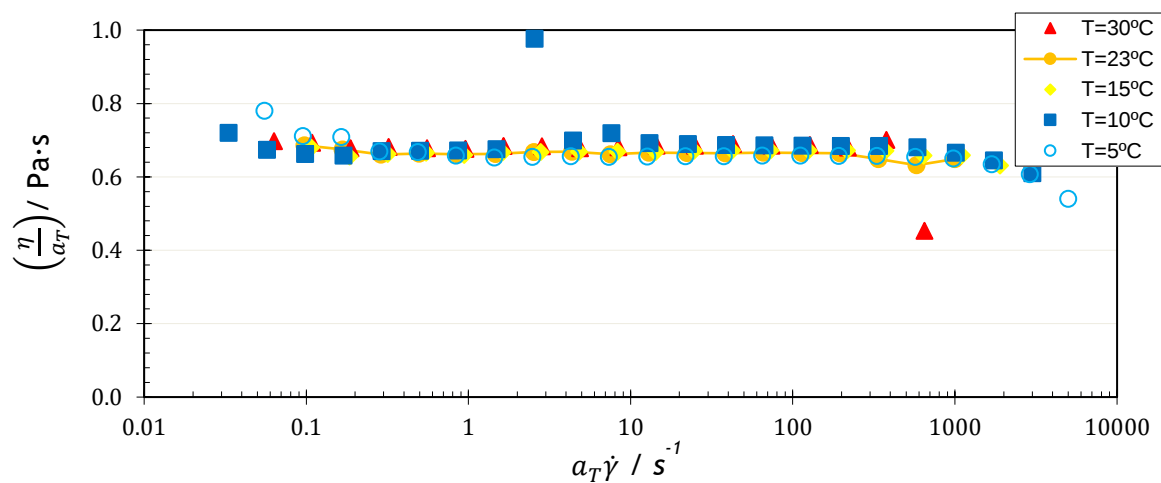


Figura B.8 - Curva mestra do aditivo AAA07.

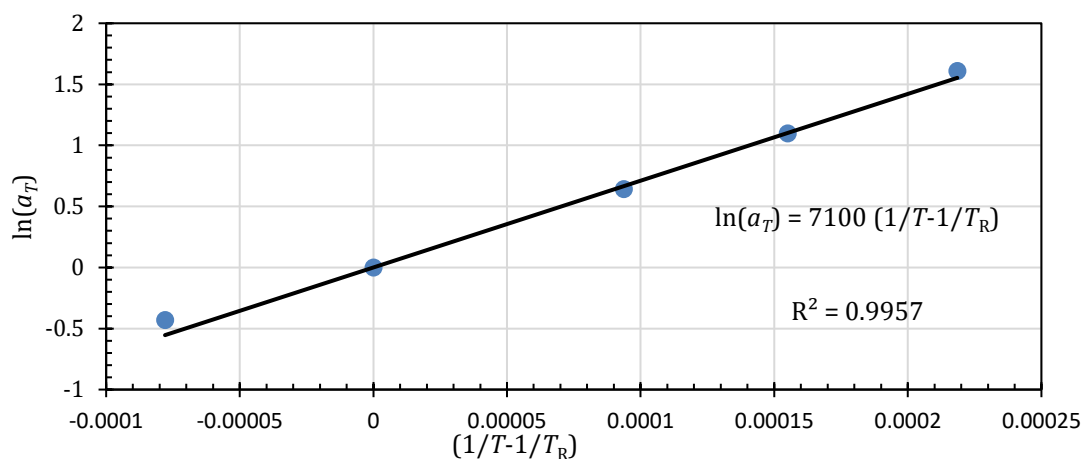


Figura B.9 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA07.

$$\eta(T) = 0.66e^{7100\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

iv) Curvas do aditivo AAA08

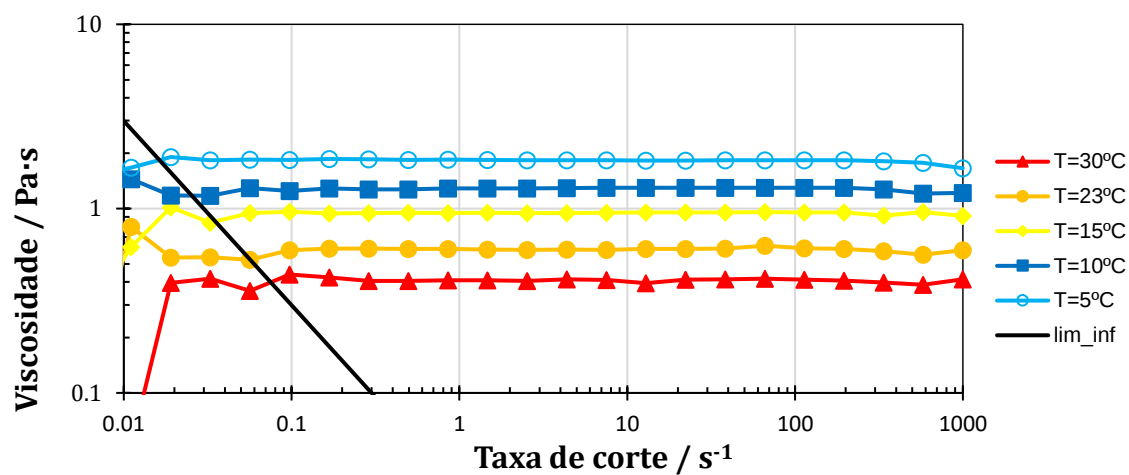


Figura B.10 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA08.

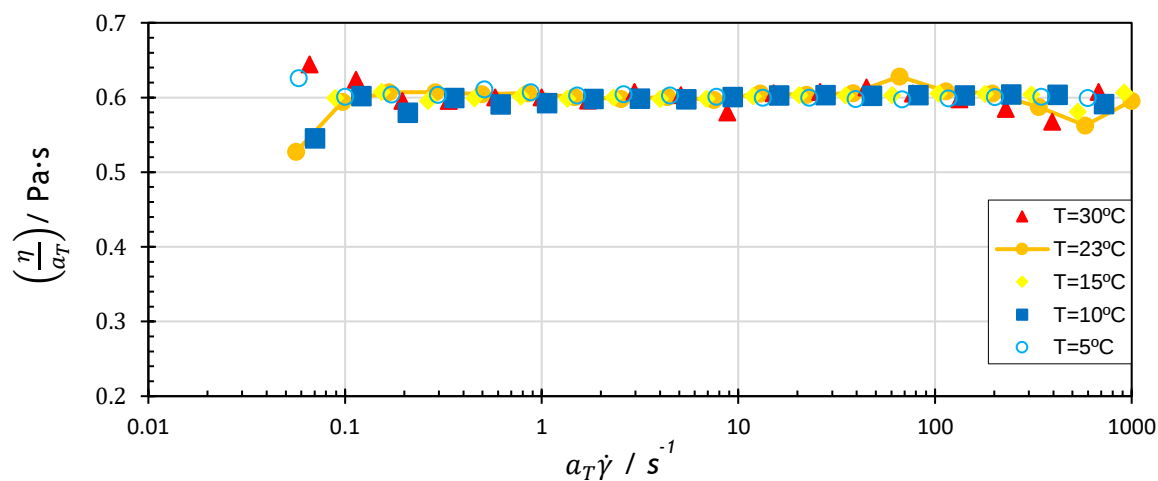


Figura B.11 - Curva mestra do aditivo AAA08.

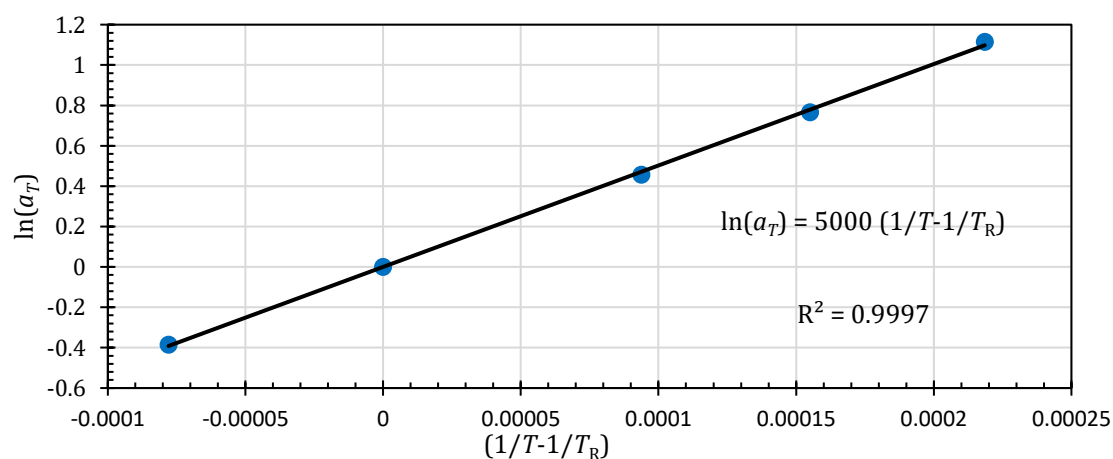


Figura B.12 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA08.

$$\eta(T) = 0.60 e^{5000 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.3 - 1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

v) Curvas do aditivo AAA09

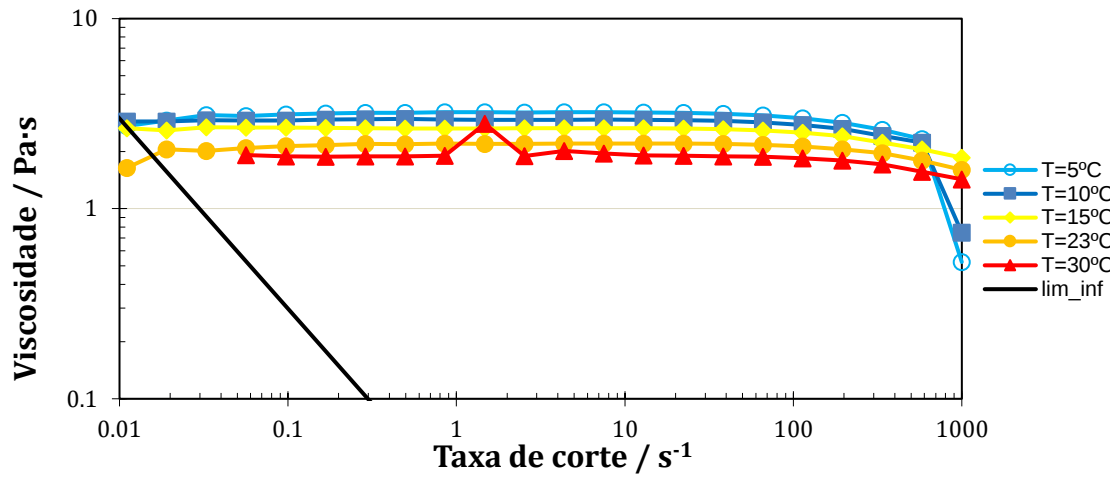


Figura B.13 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA09.

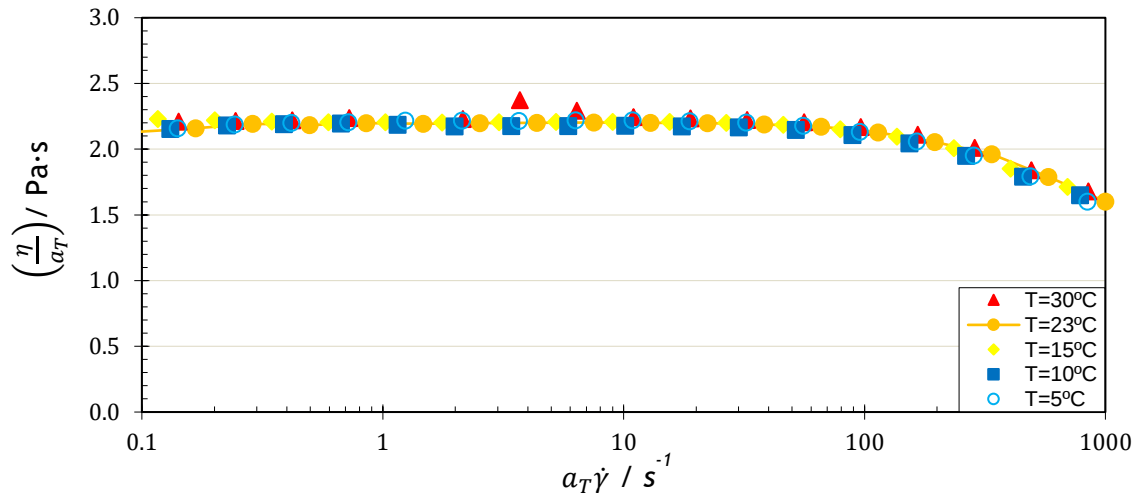


Figura B.14 - Curva mestra do aditivo AAA09.

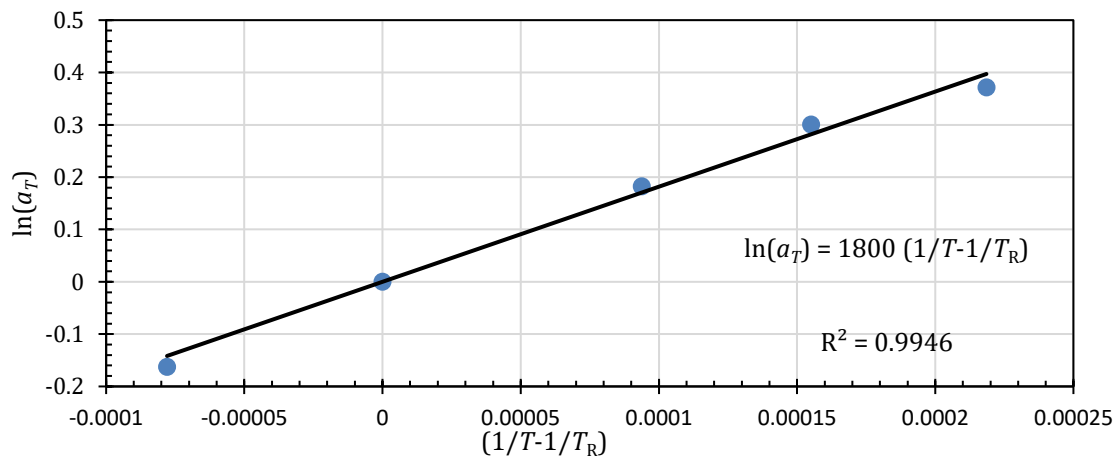


Figura B.15 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA09.

$$\eta(T) = 2.20e^{1800\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 2.2 - 3.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

vi) Curvas do aditivo AAA10

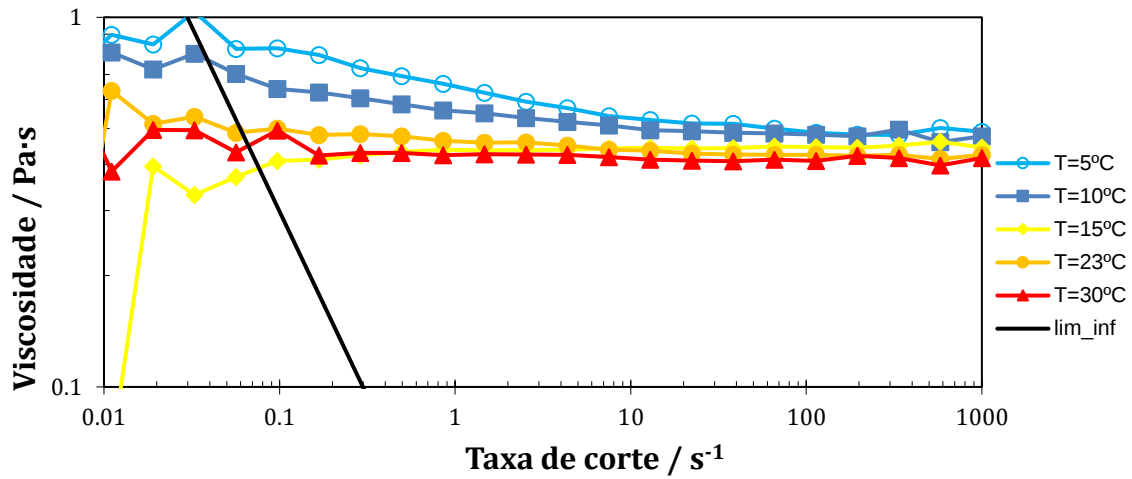


Figura B.16 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA10.

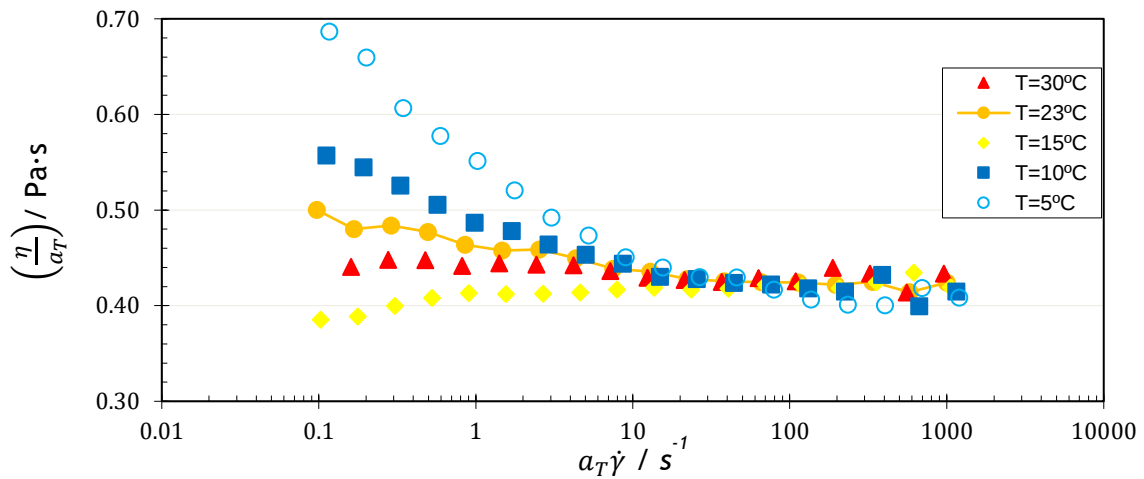


Figura B.17 - Curva mestra do aditivo AAA10.

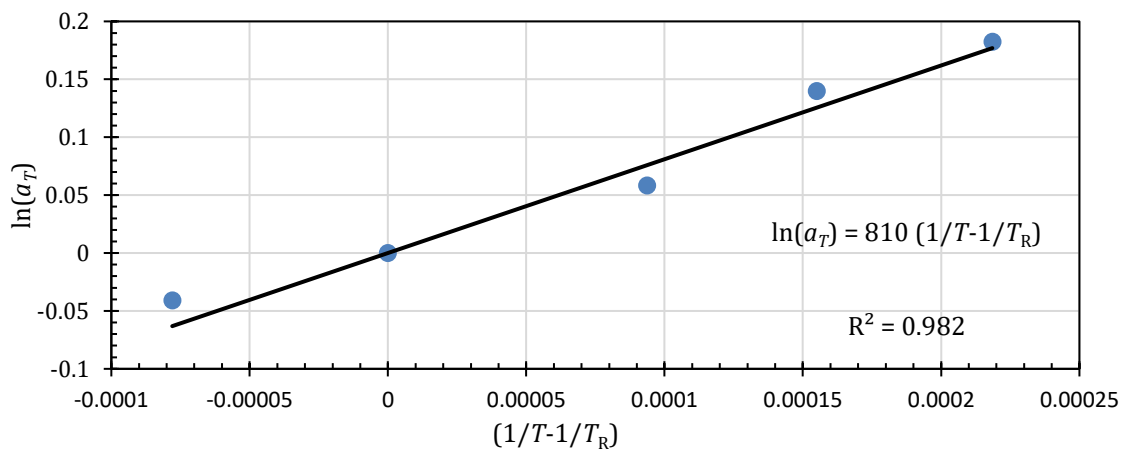


Figura B.18 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA10.

$$\eta(T) = 0.44e^{810\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.16 - 0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

vii) Curvas do aditivo AAA11

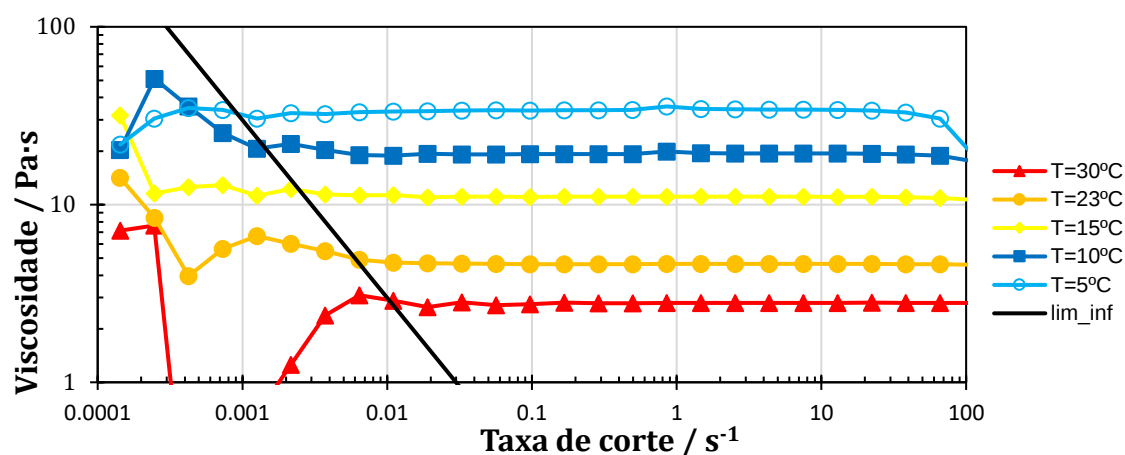


Figura B.19 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA11.

Para taxas de corte superiores a 100 s⁻¹ o fluido é expelido pela força centrífuga no reómetro.

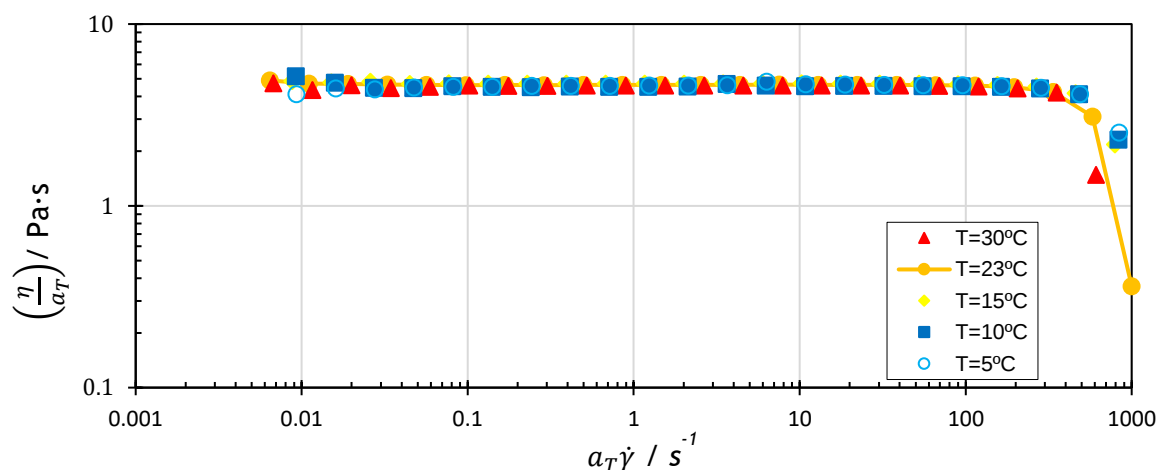


Figura B.20 - Curva mestra do aditivo AAA11.

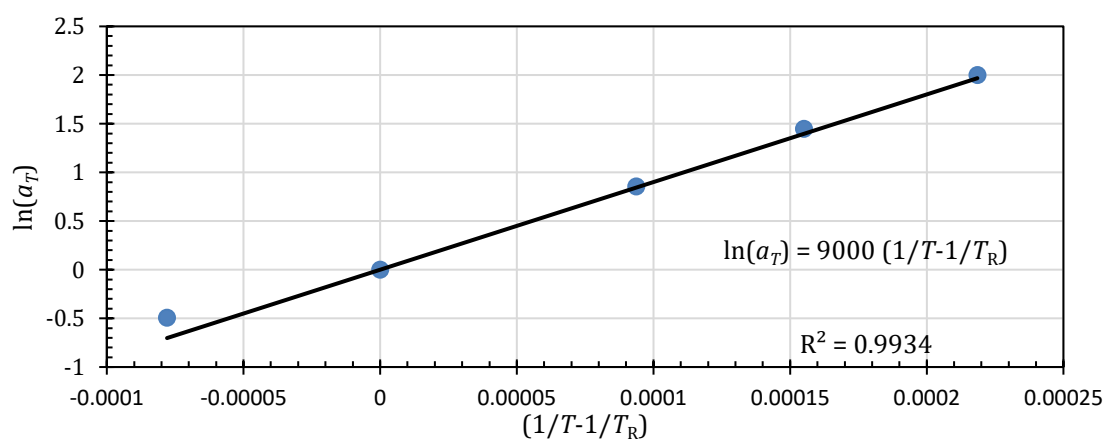


Figura B.21 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA11.

$$\eta(T) = 4.60e^{9000\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} < 6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

viii) Curvas do aditivo AAA12

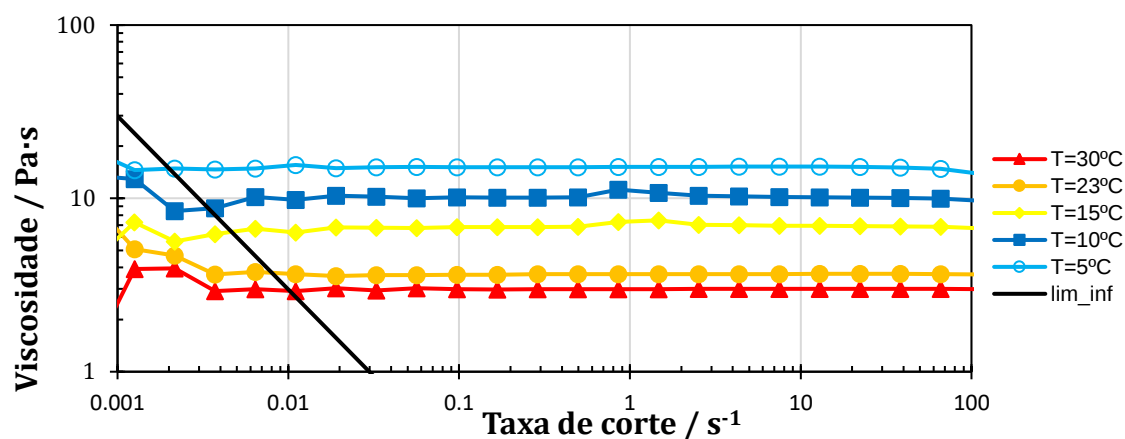


Figura B.22 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA12.

Para taxas de corte superiores a $100 s^{-1}$ o fluido é expelido pela força centrífuga no reómetro.

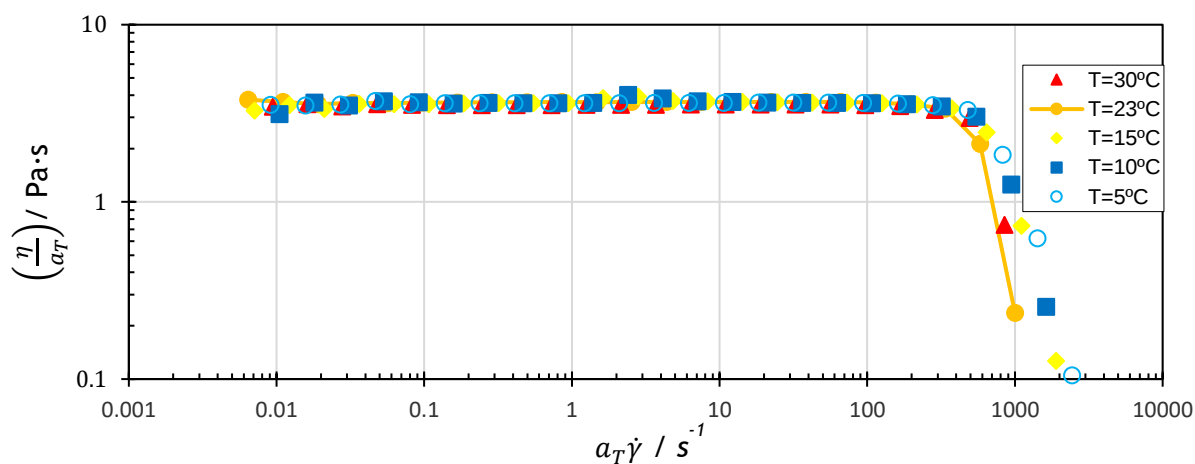


Figura B.23 - Curva mestra do aditivo AAA12.

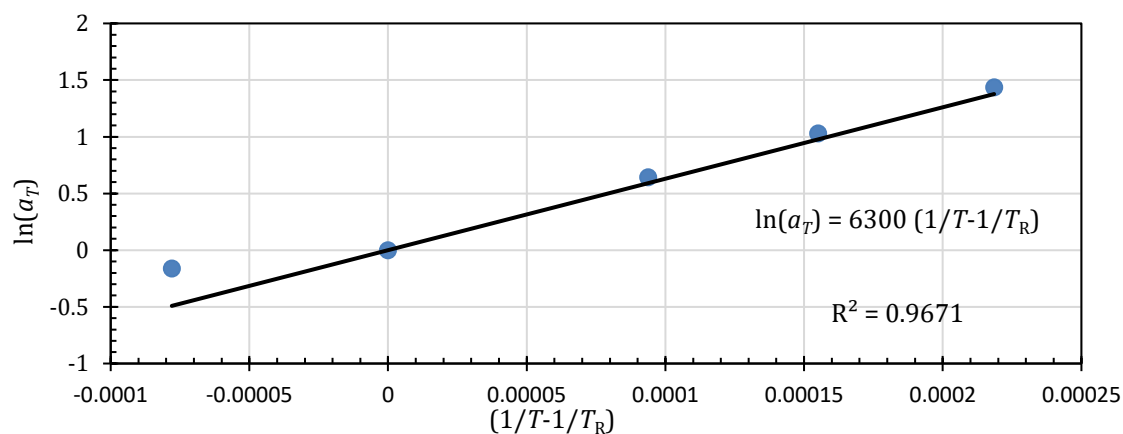


Figura B.24 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA12.

$$\eta(T) = 3.7e^{6300\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 1.0 - 6.0 \text{ Pa} \cdot s$$

ix) Curvas do aditivo AAA13

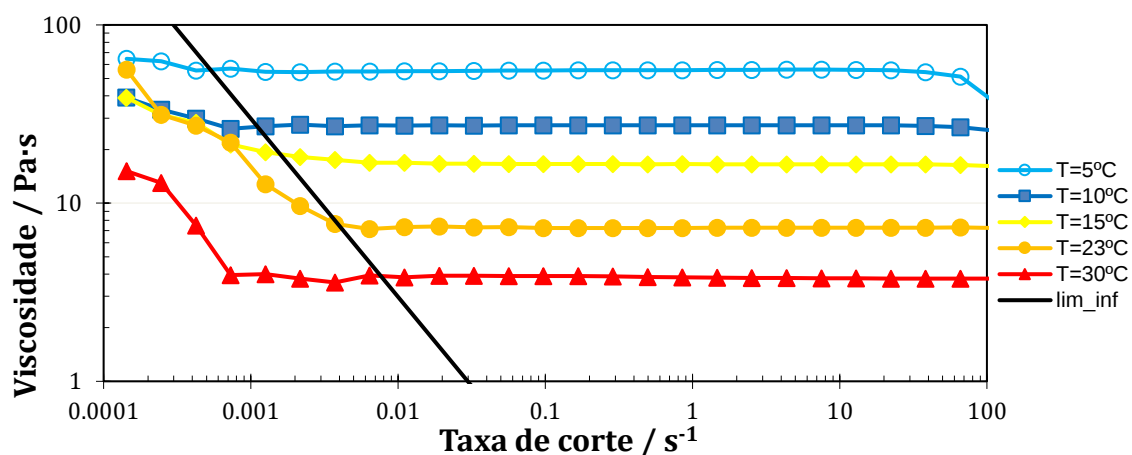


Figura B.25 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA13.

Para taxas de corte superiores a 100 s^{-1} o fluido é expelido pela força centrífuga no reómetro.

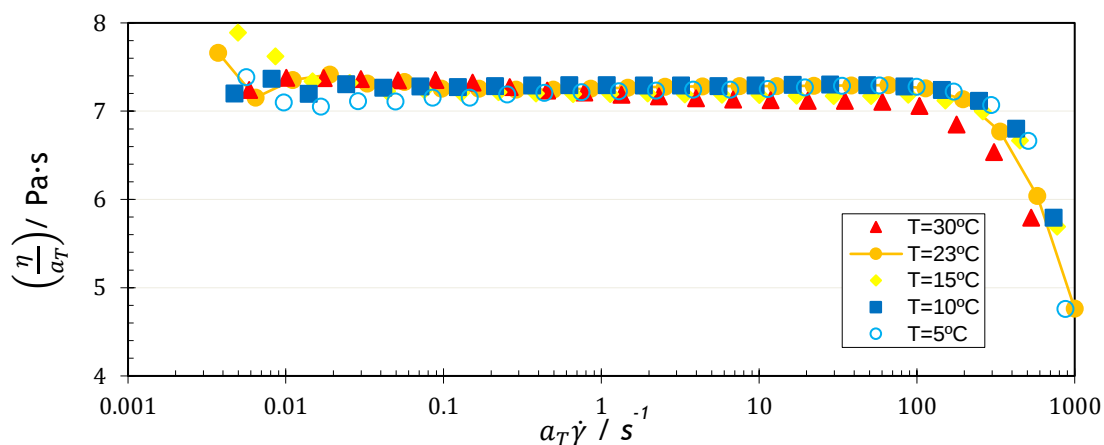


Figura B.26 - Curva mestra do aditivo AAA13.

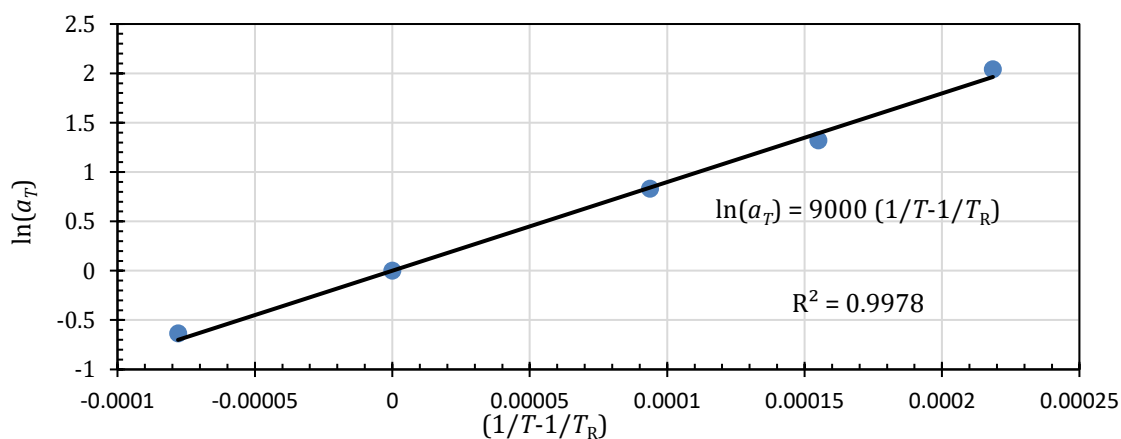


Figura B.27 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA13.

$$\eta(T) = 7.3e^{9000\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.1 - 8.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

B.3 Curvas dos aditivos pseudoplásticos com viscosidade independente da temperatura

i) Curvas do aditivo AAA14

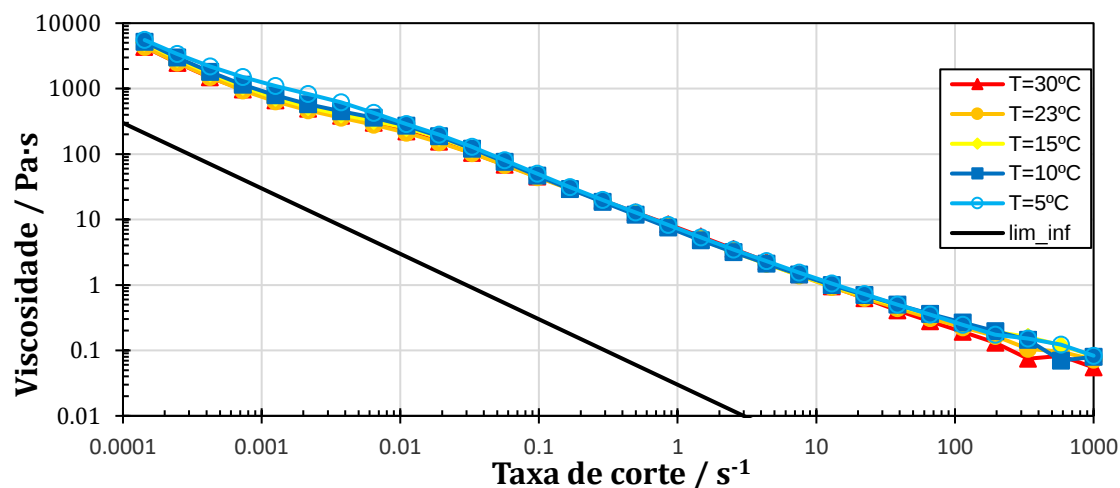


Figura B.28 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA14.

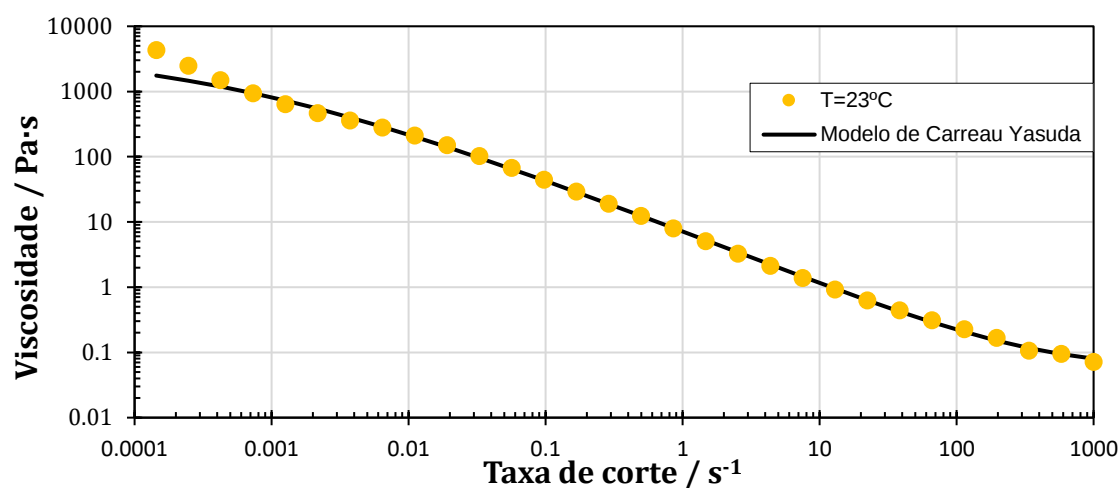


Figura B.29 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA14.

$$\eta(\dot{\gamma}) = 0.0549 + \frac{4350 - 0.0549}{[1 + (2220\dot{\gamma})^{0.433}]^{\frac{1-0.176}{0.433}}}$$

$\eta_{\text{ficha técnica}} = \text{Não disponível}$

ii) Curvas do aditivo AAA15

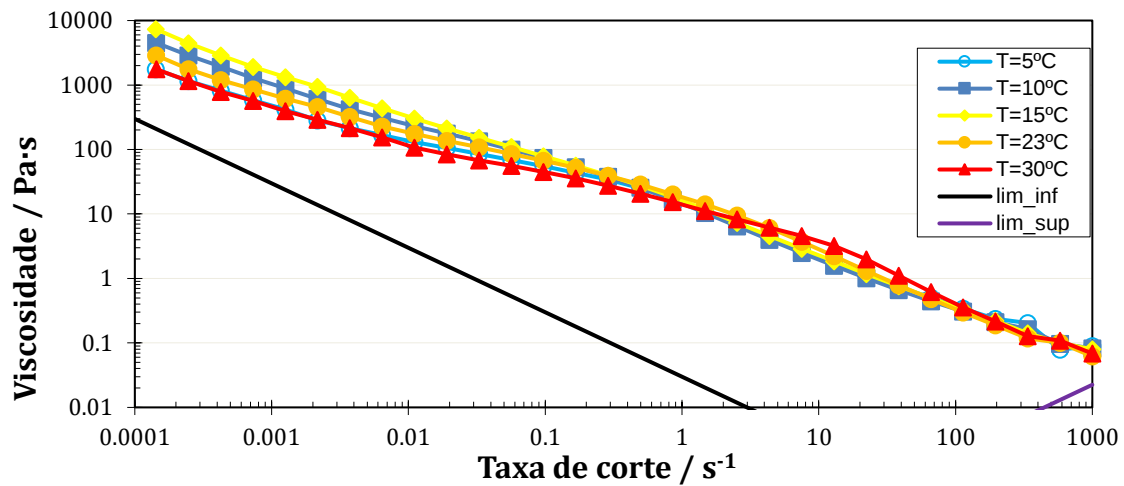


Figura B.30 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA15.

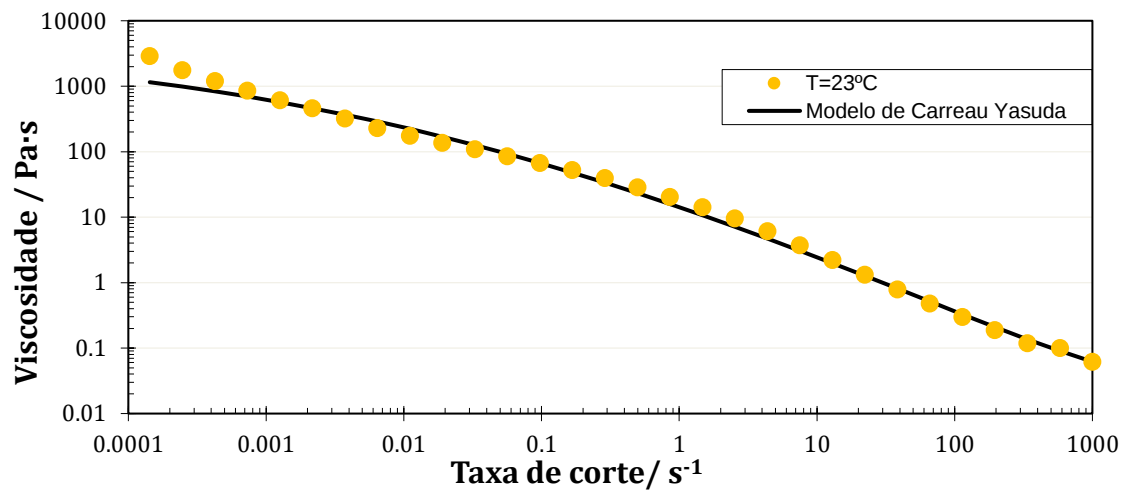


Figura B.31 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA15.

$$\eta(\dot{\gamma}) = 0.0182 + \frac{4910 - 0.0182}{[1 + (78.5\dot{\gamma})^{0.219}]^{\frac{1-0.00104}{0.219}}}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.5 - 1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

iii) Curvas do aditivo AAA16

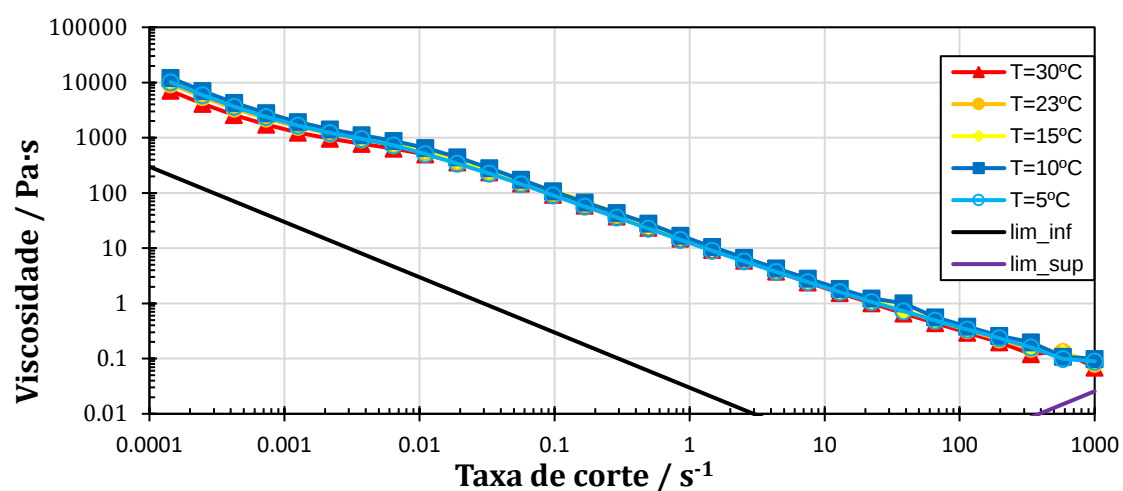


Figura B.32 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA16.

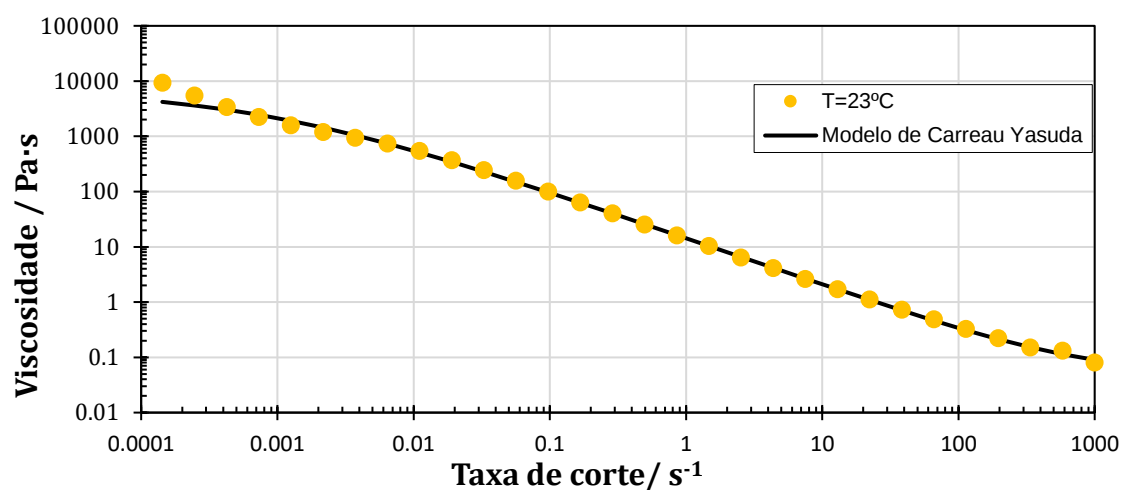


Figura B.33 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA16.

$$\eta(\dot{\gamma}) = 0.0484 + \frac{6750 - 0.0484}{[1 + (1390\dot{\gamma})^{0.587}]^{\frac{1-0.152}{0.587}}}$$

$\eta_{\text{ficha técnica}} = \text{Não disponível}$

iv) Curvas do aditivo AAA17

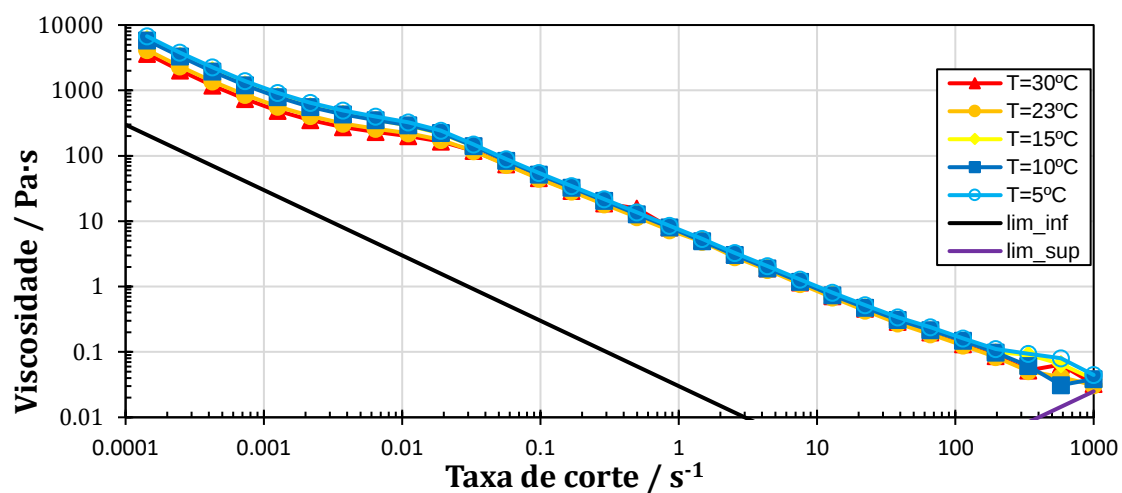


Figura B.34 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA17.

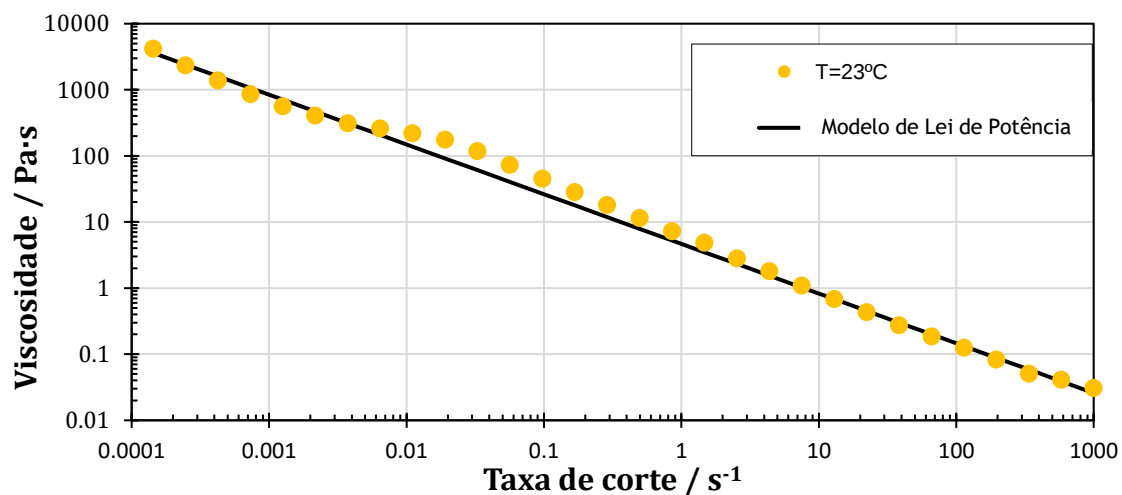


Figura B.35 - Modelo de Lei de Potência do aditivo AAA17.

$$\eta(\dot{\gamma}) = 4.66\dot{\gamma}^{0.248-1}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 1.0 - 4.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

B.4 Curvas dos aditivos pseudoplásticos com viscosidade dependente da temperatura

i) Curvas do aditivo AAA18

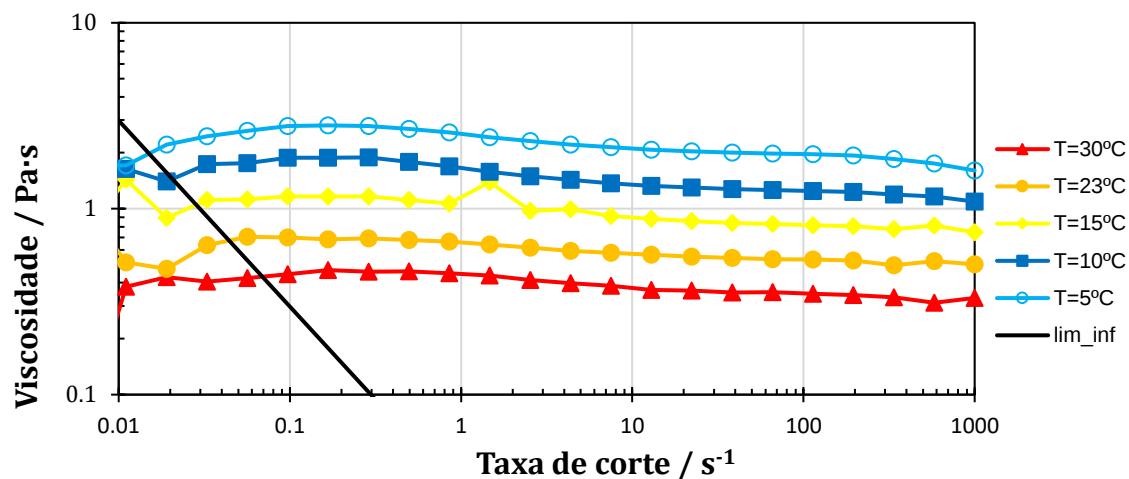


Figura B.36 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA18.

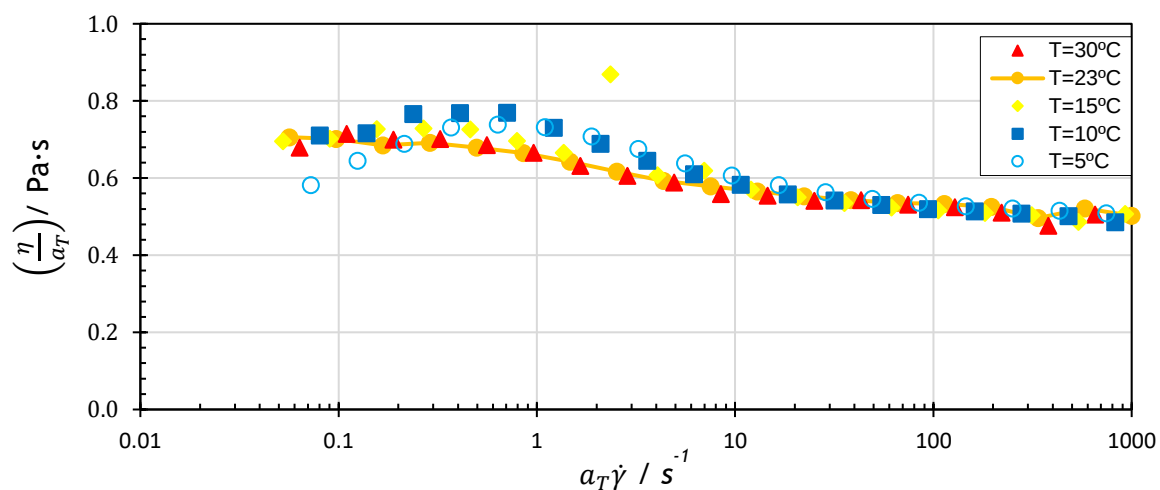


Figura B.37 - Curva mestra do aditivo AAA18.

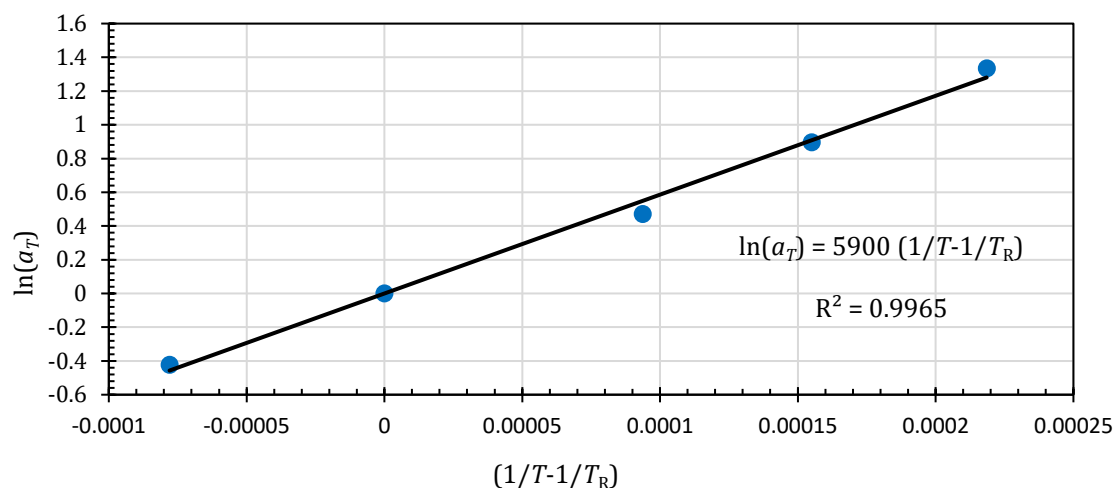


Figura B.38 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA18.

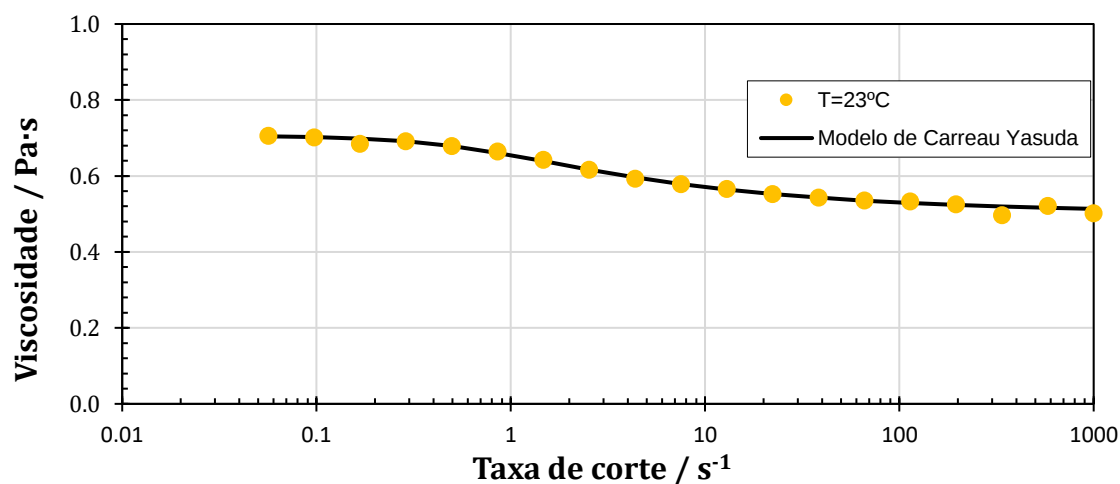


Figura B.39 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA18.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(0.502 + \frac{0.706 - 0.502}{\left[1 + \left(1.56 \dot{\gamma} e^{5900 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{1.43} \right]^{\frac{1-0.607}{1.43}}} \right) e^{5900 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$\eta_{\text{ficha técnica}} = \text{Não disponível}$

ii) Curvas do aditivo AAA19

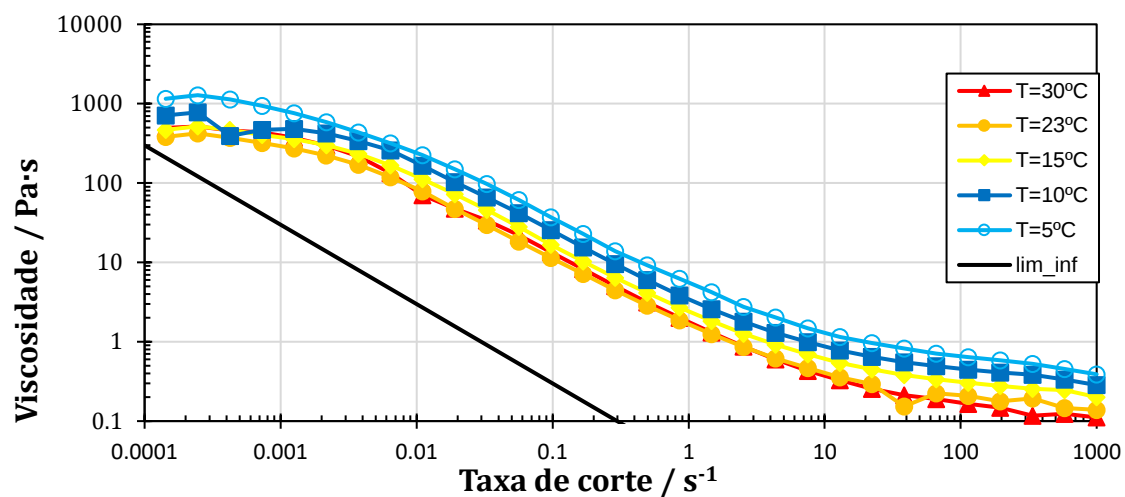


Figura B.40 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA19.

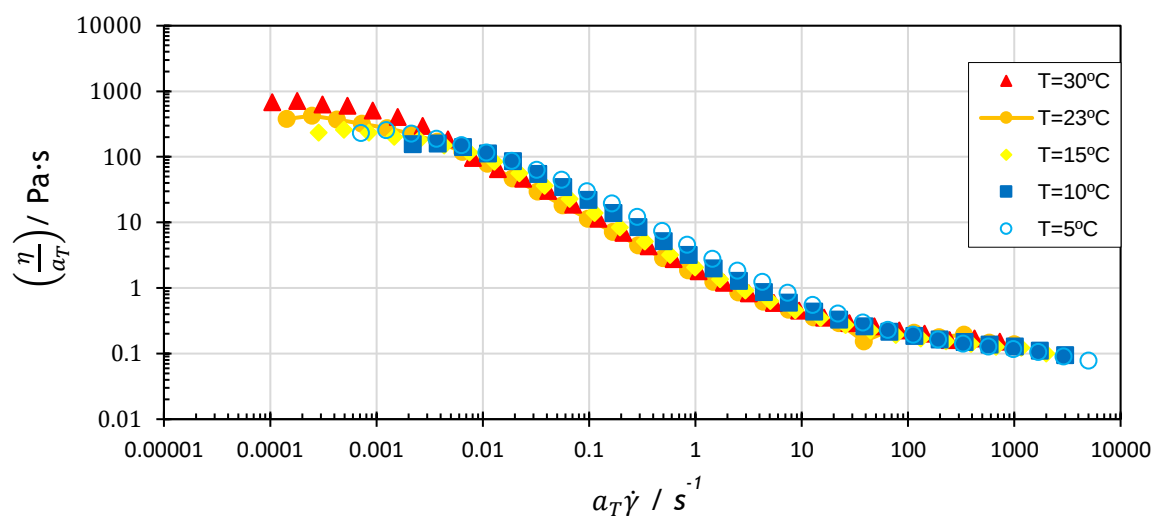


Figura B.41 - Curva mestra do aditivo AAA19.

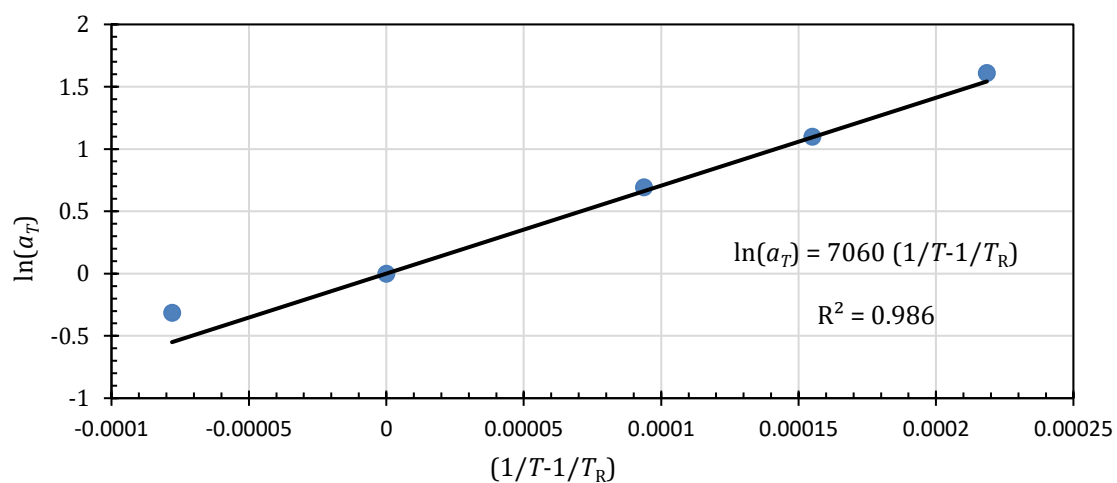


Figura B.42 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA19.

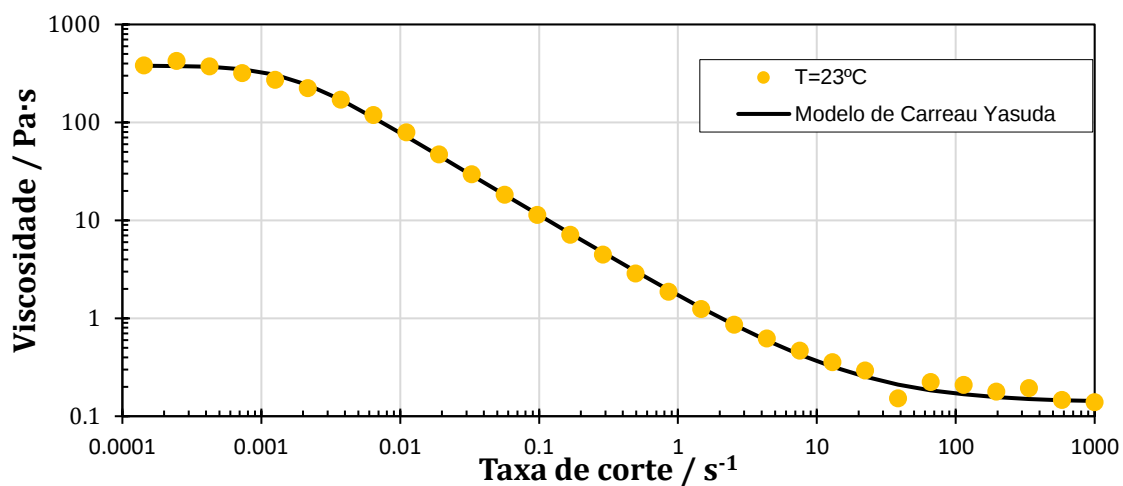


Figura B.43 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA19.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(0.139 + \frac{380 - 0.139}{\left[1 + \left(640\dot{\gamma} e^{7060\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)} \right)^2 \right]^{\frac{1-0.152}{2}}} \right) e^{7060\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296}\right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.5 - 1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

iii) Curvas do aditivo AAA20A

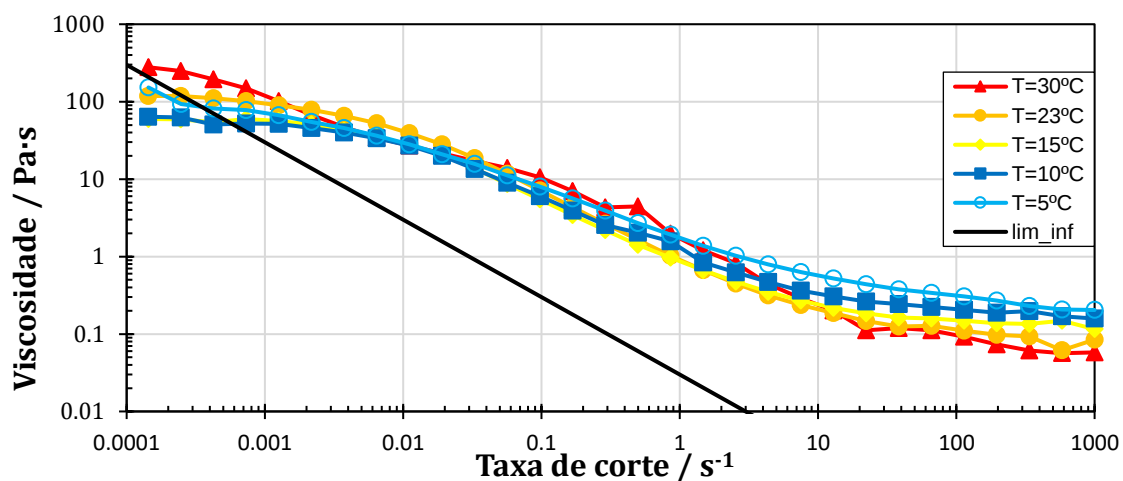


Figura B.44 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA20.

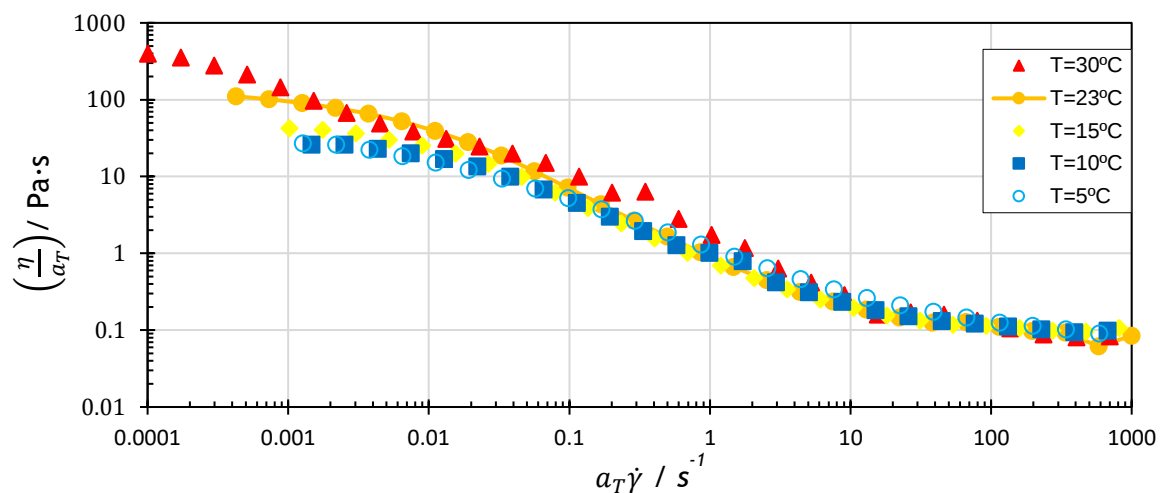


Figura B.45 - Curva mestra do aditivo AAA20.

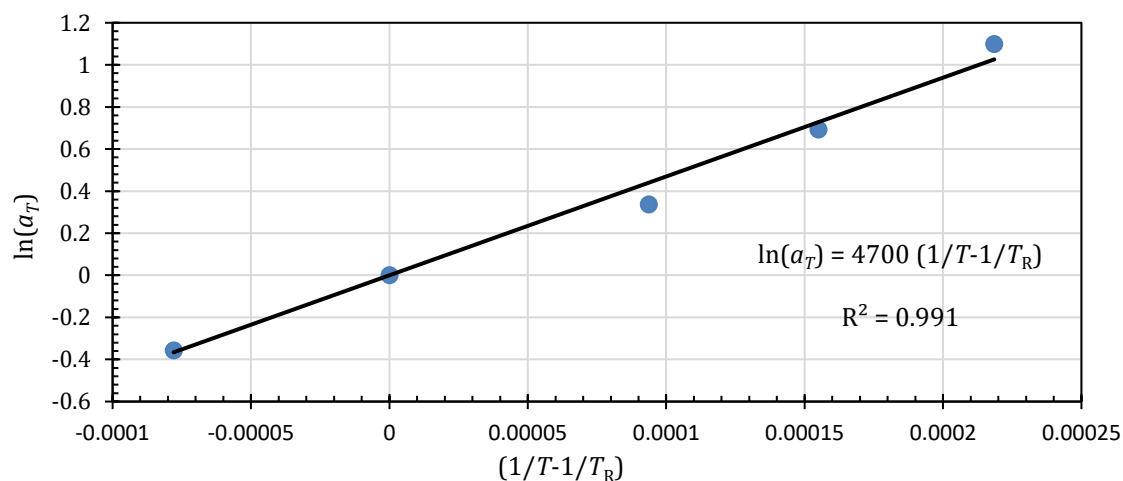


Figura B.46 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA20.

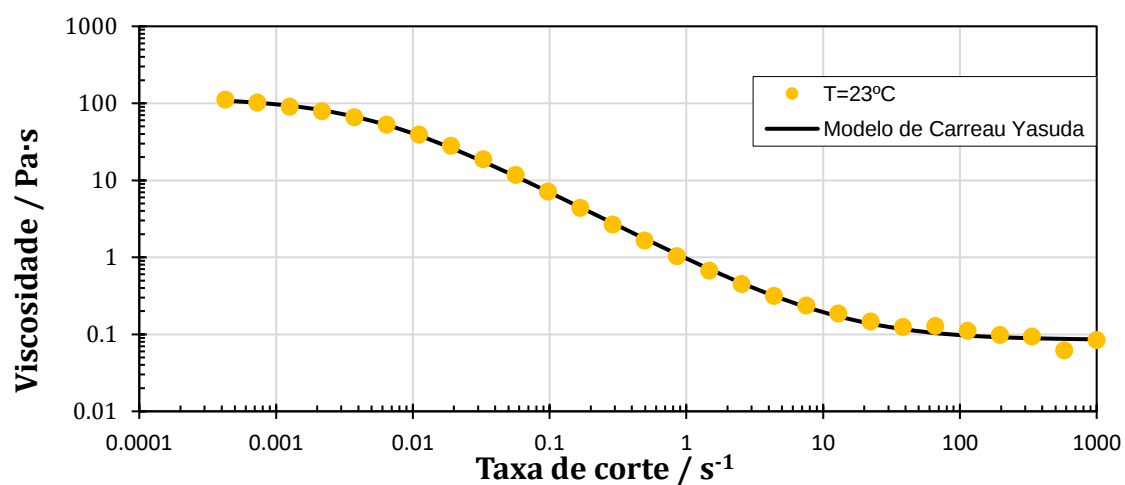


Figura B.47 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA20.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(0.0843 + \frac{118 - 0.0843}{\left[1 + \left(215 \dot{\gamma} e^{4700 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{0.963} \right]^{\frac{1-0.0884}{0.963}}} \right) e^{4700 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$\eta_{\text{ficha técnica}} = \text{Não disponível}$

iv) Curvas do aditivo AAA21A

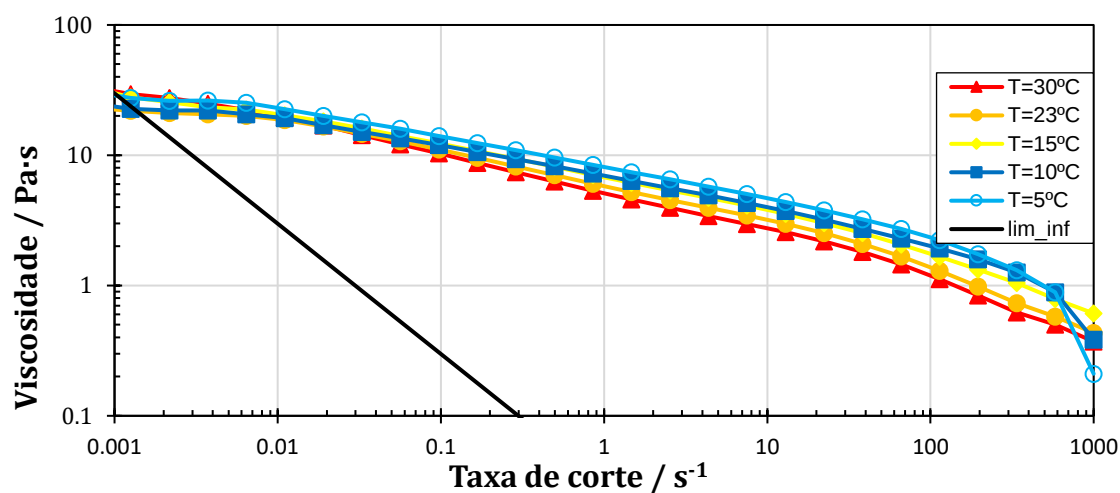


Figura B.48 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA21.

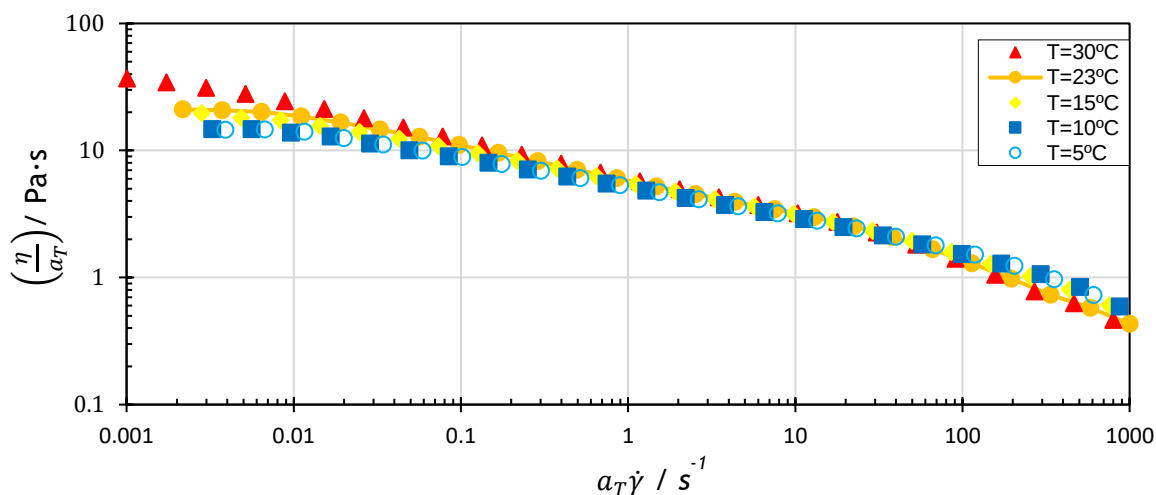


Figura B.49 - Curva mestra do aditivo AAA21.

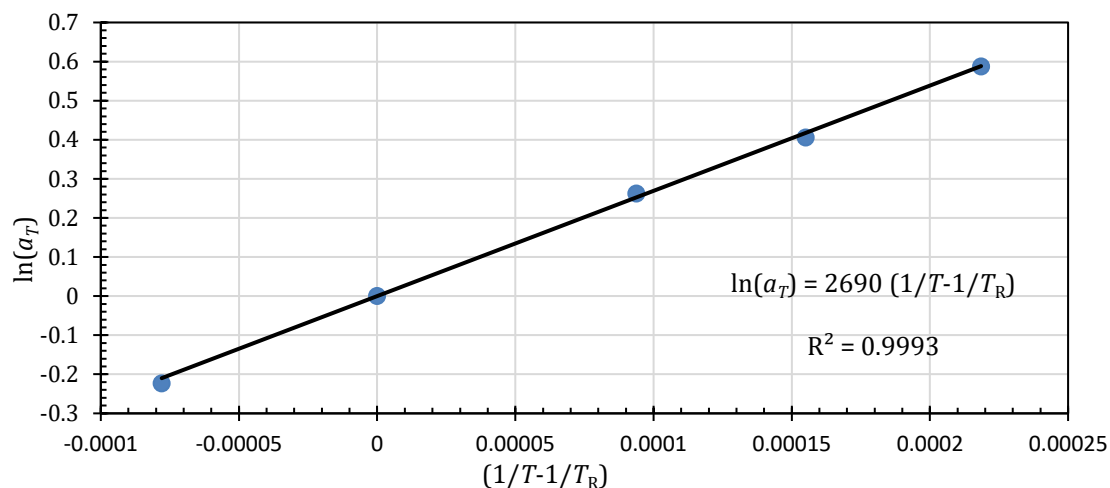


Figura B.50 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA21.

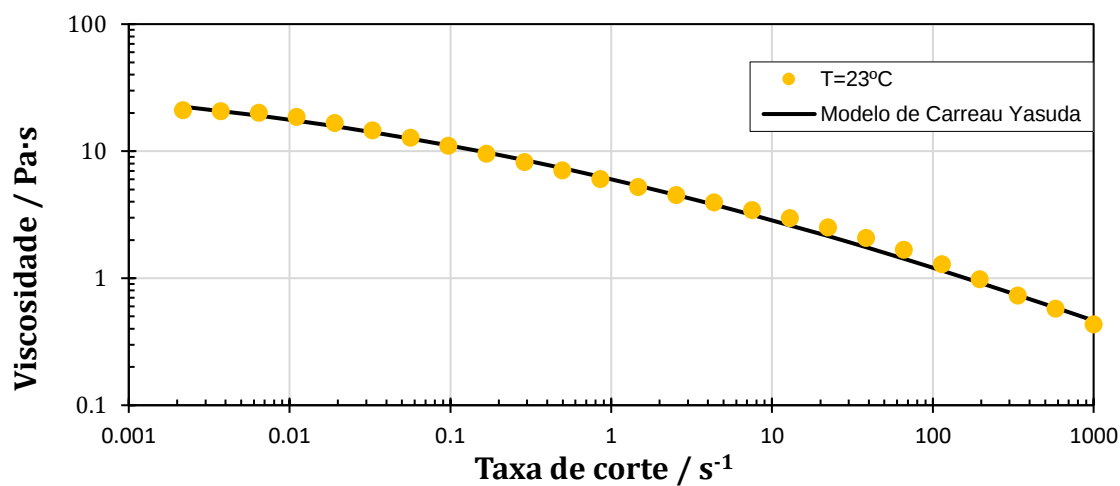


Figura B.51 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA21.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(\frac{47.9}{\left[1 + \left(5.23 \dot{\gamma} e^{2700 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{0.214} \right]^{\frac{1-0.499}{0.214}}} \right) e^{2700 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 1.7 - 3.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

v) Curvas do aditivo AAA22

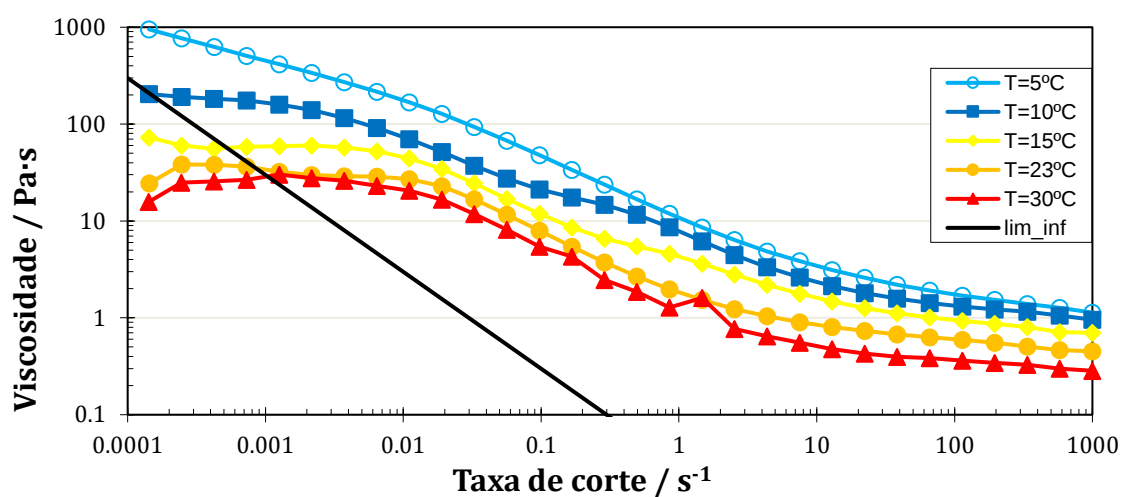


Figura B.52 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA22.

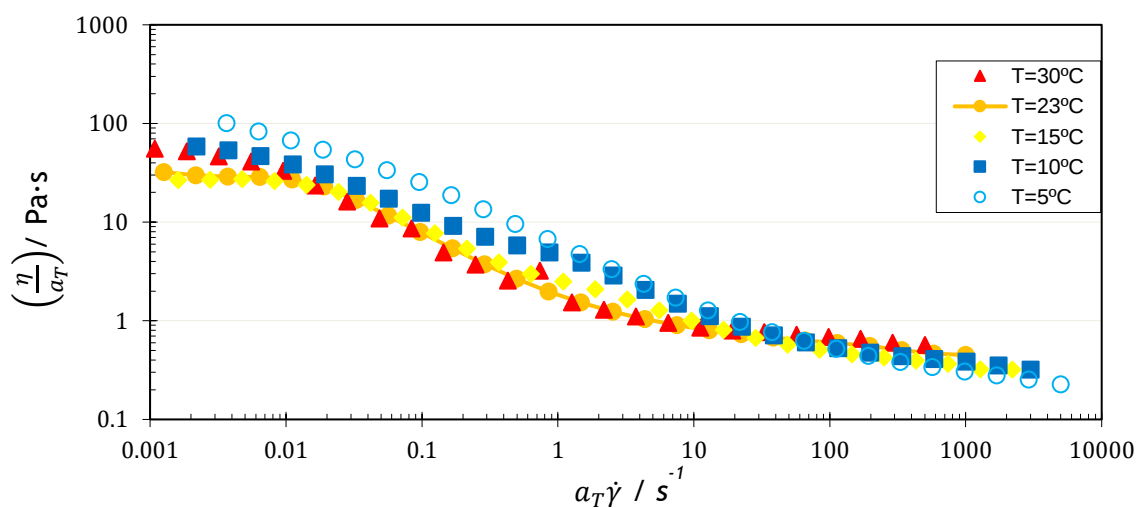


Figura B.53 - Curva mestra do aditivo AAA22.

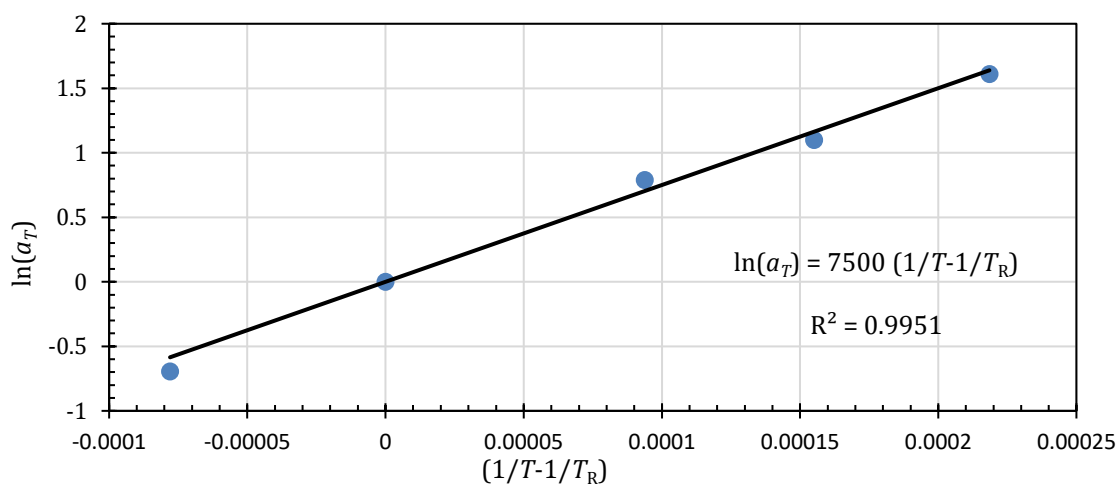


Figura B.54 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA22.

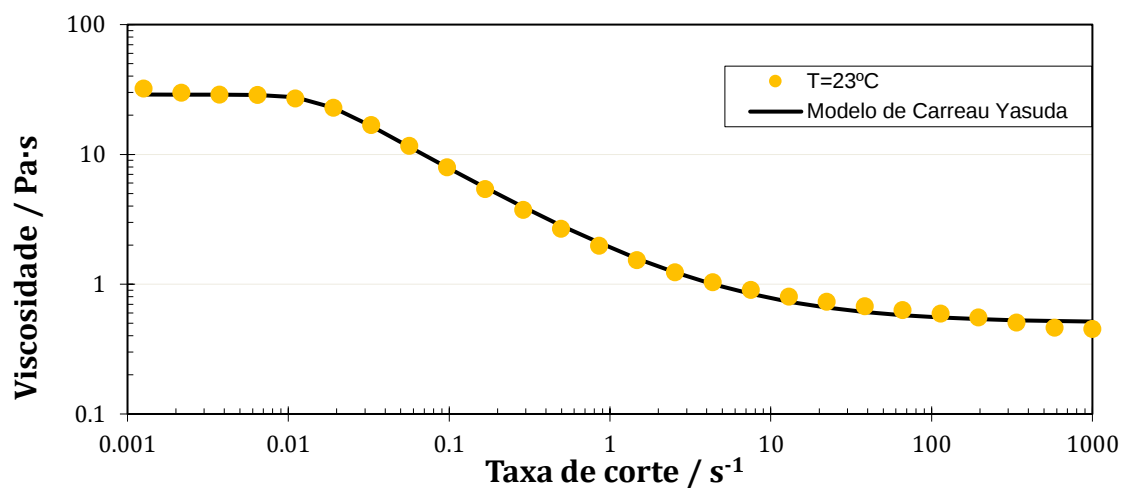


Figura B.55 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA22.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(0.505 + \frac{28.9 - 0.505}{\left[1 + \left(67.7 \dot{\gamma} e^{7500 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{3.91} \right]^{\frac{1-0.288}{3.91}}} \right) e^{7500 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.2 - 1.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

vi) Curvas do aditivo AAA23

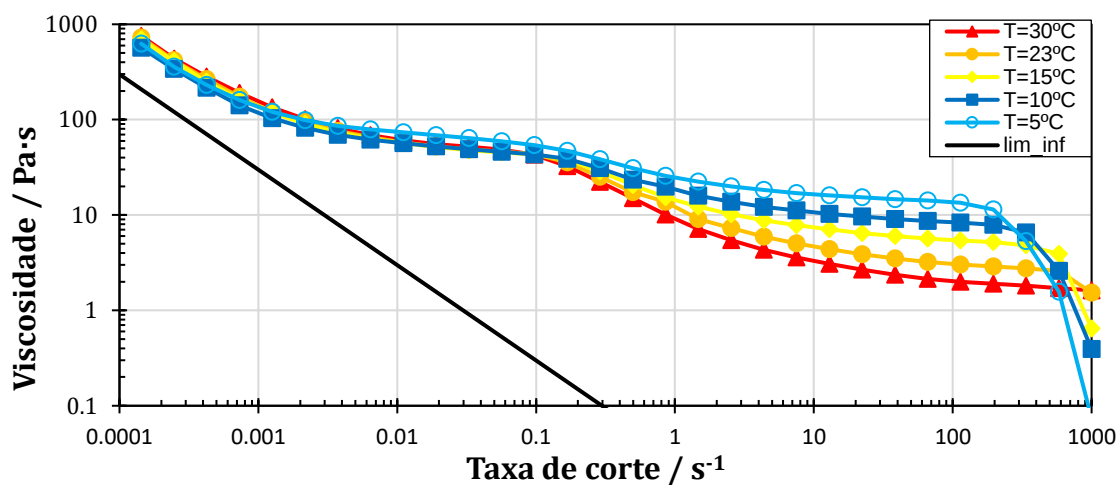


Figura B.56 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA23.

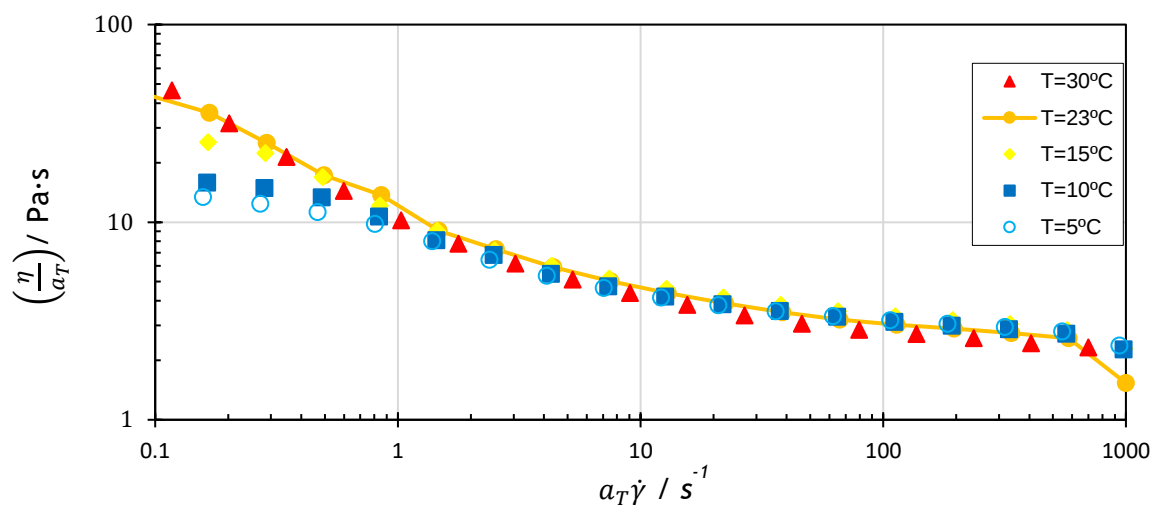


Figura B.57 - Curva mestra do aditivo AAA23.

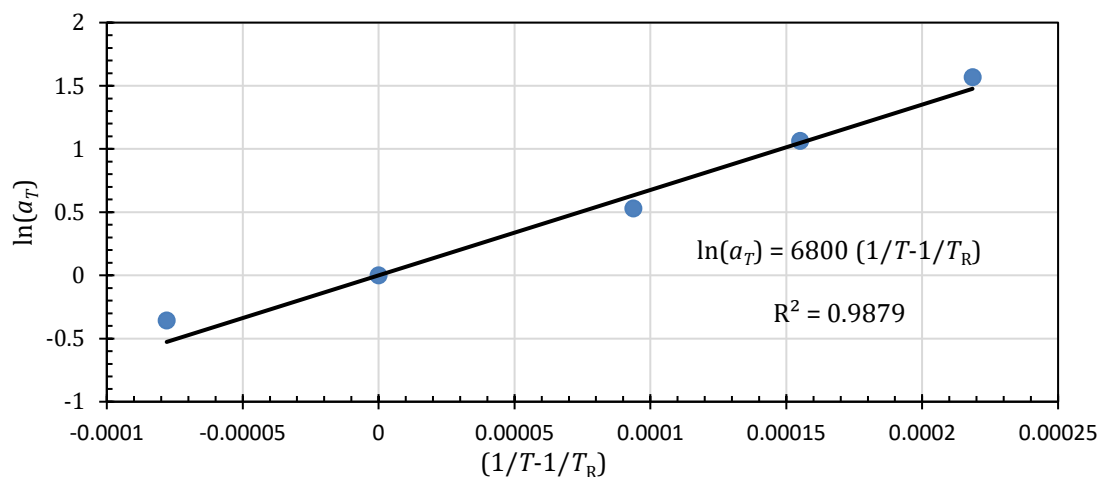


Figura B.58 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA23.

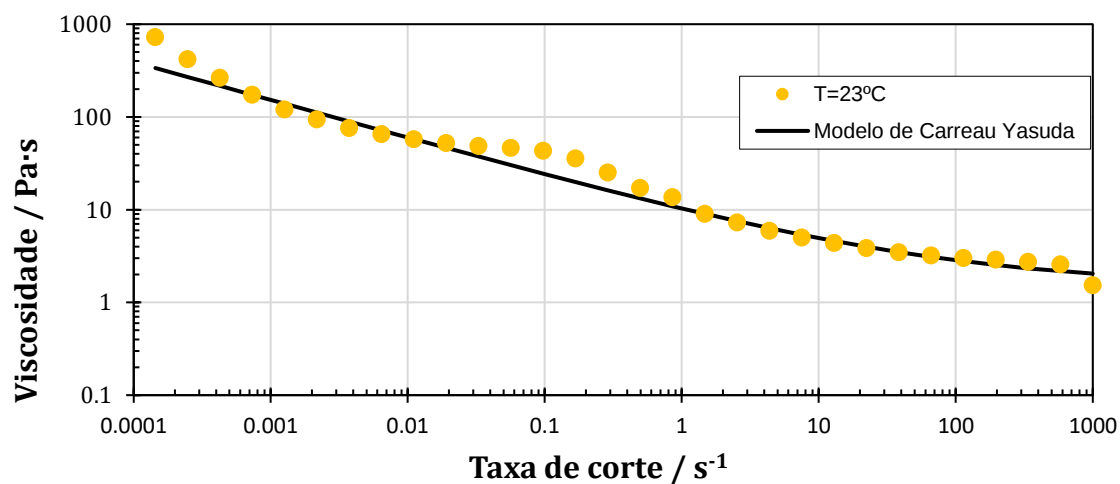


Figura B.59 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA23.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(1.53 + \frac{726 - 1.53}{\left[1 + \left(27300 \dot{\gamma} e^{6800 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{2.86} \right]^{\frac{1-0.570}{2.86}}} \right) e^{6800 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} < 6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

vii) Curvas do aditivo AAA24

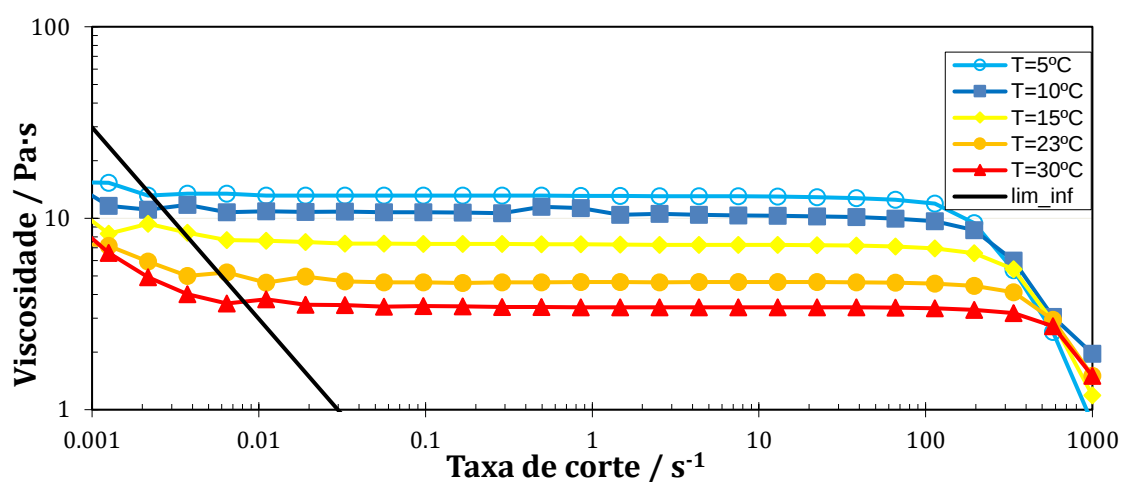


Figura B.60 - Curvas de viscosidade da amostra do aditivo AAA24.

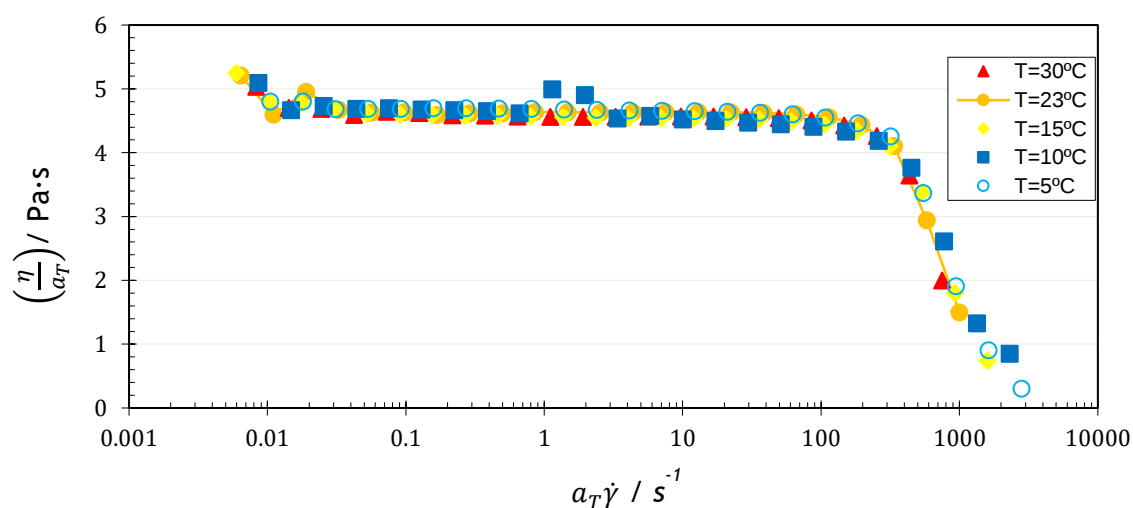


Figura B.61 - Curva mestra do aditivo AAA24.

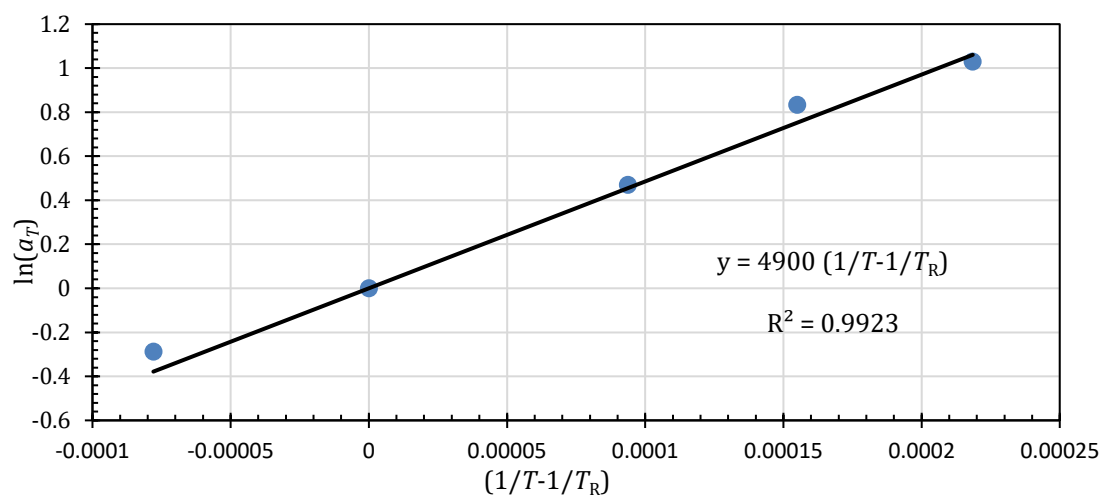


Figura B.62 - Lei de Arrhenius do aditivo AAA24.

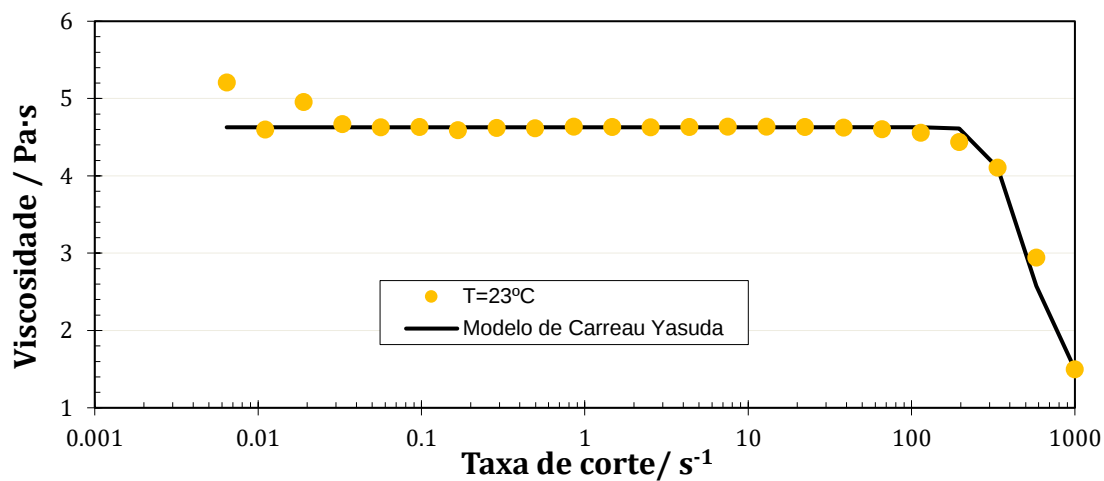


Figura B.63 - Modelo de Carreau-Yasuda do aditivo AAA24.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(\frac{4.63}{\left[1 + \left(0.00309 \dot{\gamma} e^{4900 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{7.10} \right]^{\frac{1}{7.10}}} \right) e^{4900 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 2.5 - 5.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

B.5 Curvas das emulsões

i) Curvas da emulsão EEE05

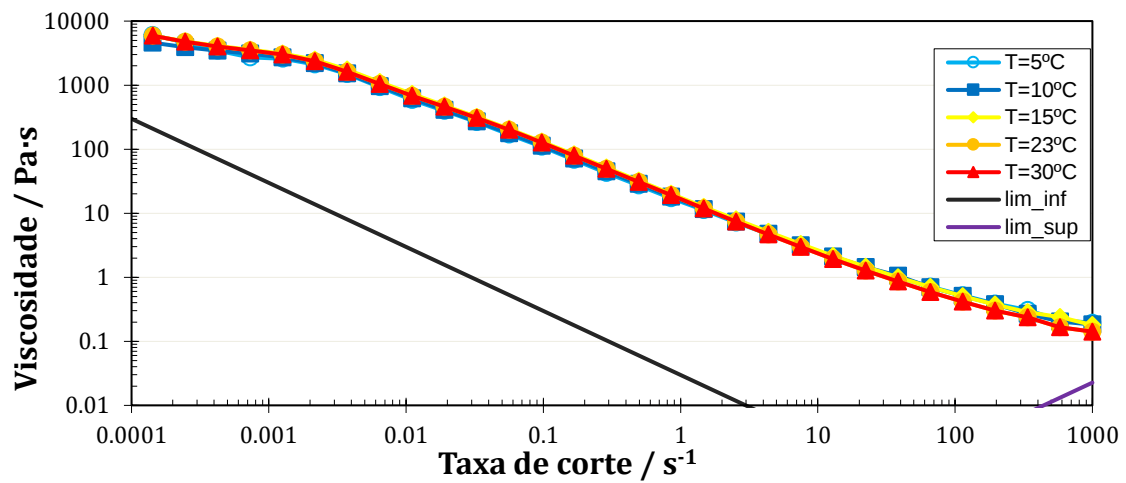


Figura B.64 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE05.

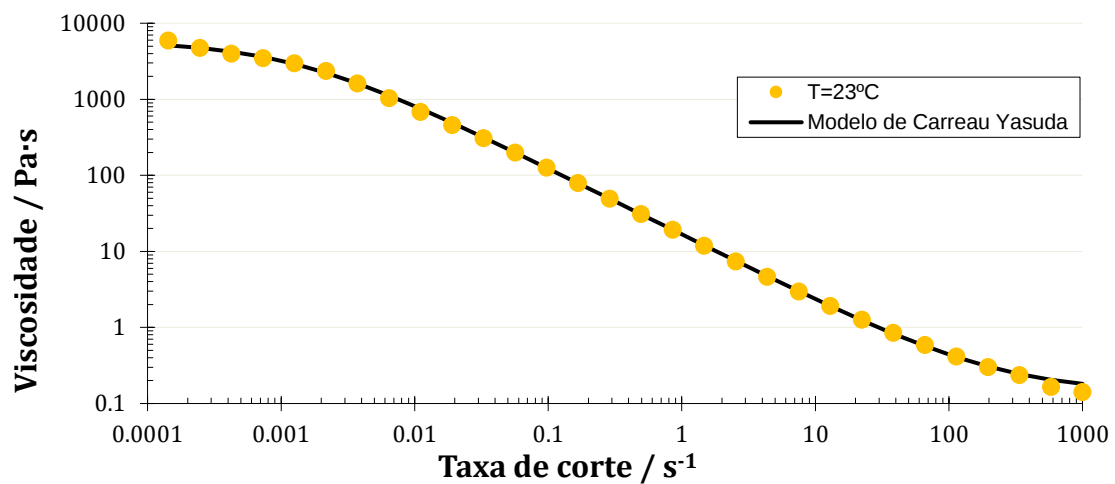


Figura B.65 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE05.

$$\eta(\dot{\gamma}) = 0.142 + \frac{5910 - 0.142}{[1 + (822\dot{\gamma})^{0.877}]^{\frac{1-0.126}{0.877}}}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 2.5 - 4.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

ii) Curvas da emulsão EEE06

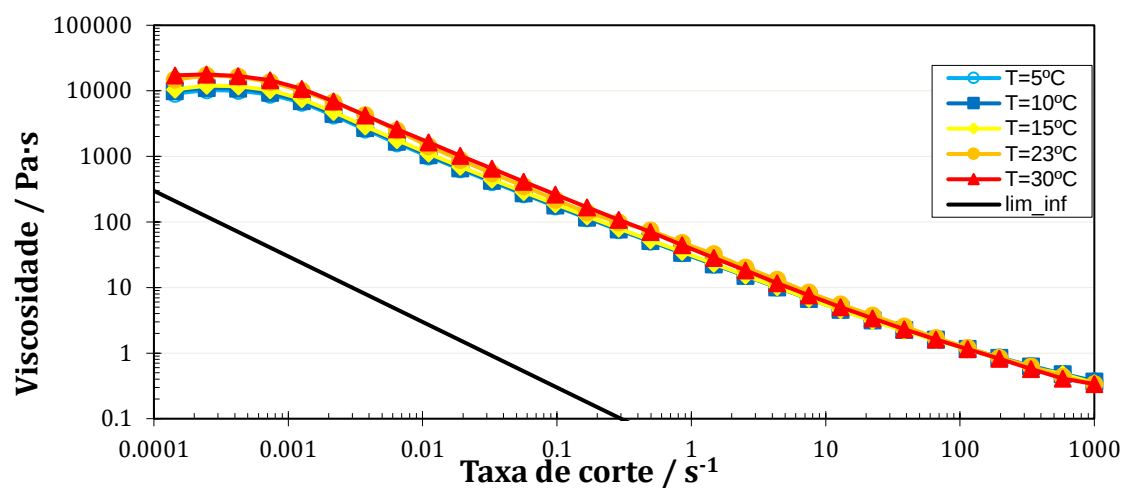


Figura B.66 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE06.

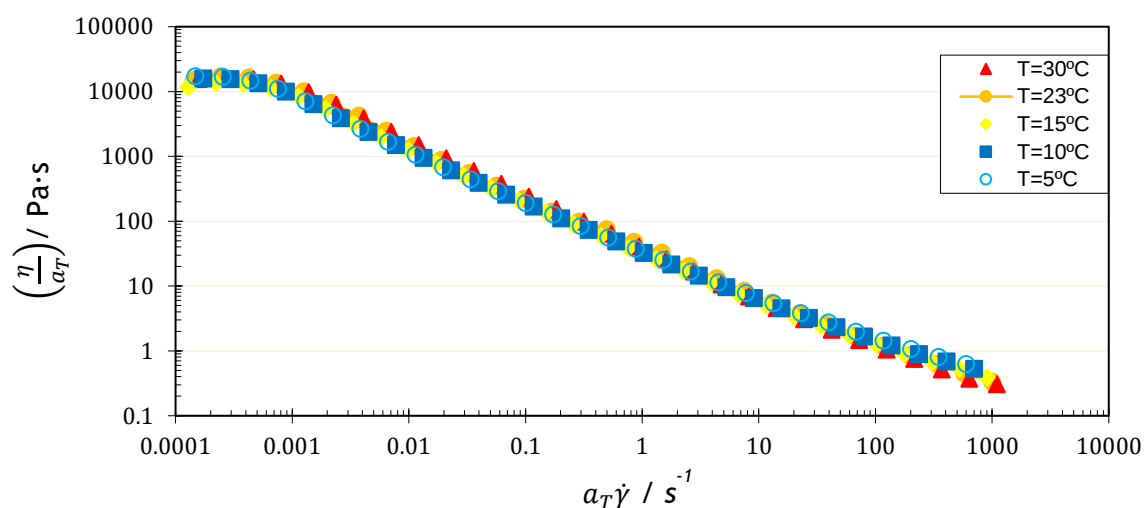


Figura B.67 - Curva mestra da emulsão EEE06.

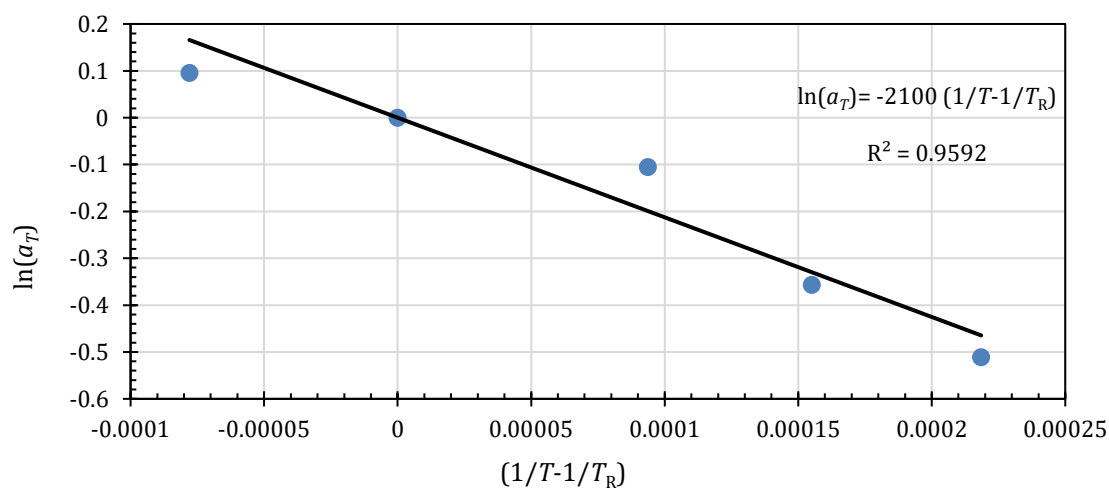


Figura B.68 - Lei de Arrhenius da emulsão EEE06.

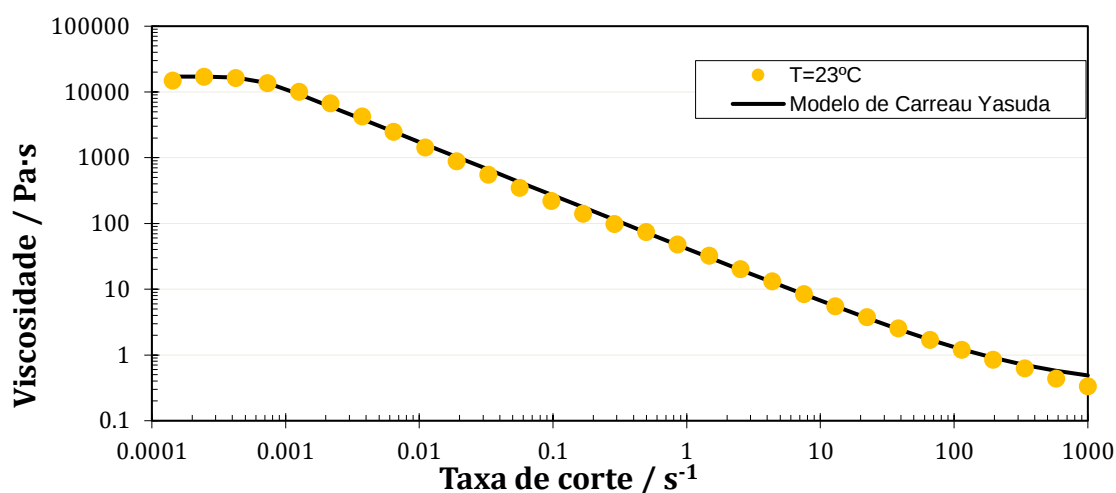


Figura B.69 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE06.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(0.337 + \frac{17100 - 0.337}{\left[1 + \left(1680 \dot{\gamma} e^{-2100 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{4.60} \right]^{\frac{1-0.188}{4.60}}} \right) e^{-2100 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.7 - 1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

iii) Curvas da emulsão EEE07

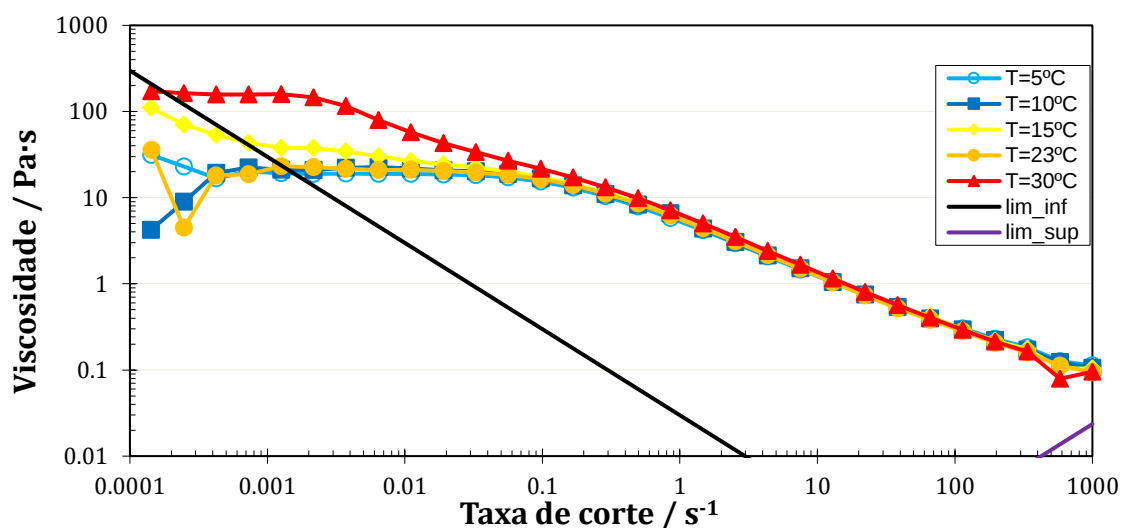


Figura B.70 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE07.

Apesar do desvio a 30°C, considerou-se a viscosidade independente da temperatura, para esta resina.

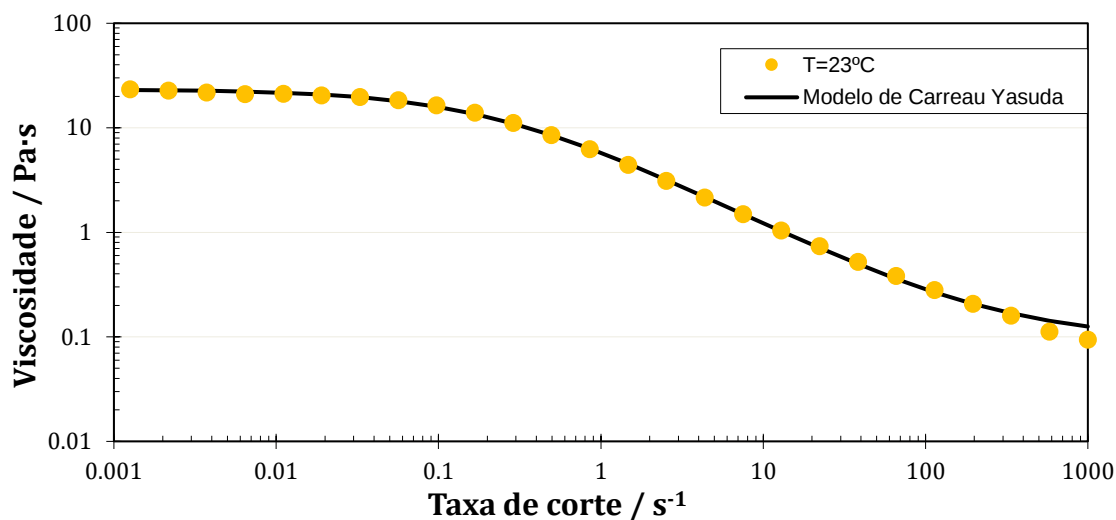


Figura B.71 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE07.

$$\eta(\dot{\gamma}) = 0.0940 + \frac{23.3 - 0.0940}{[1 + (4.46\dot{\gamma})^{0.836}]^{\frac{1-0.215}{0.836}}}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.08 - 0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

iv) Curvas da emulsão EEE08

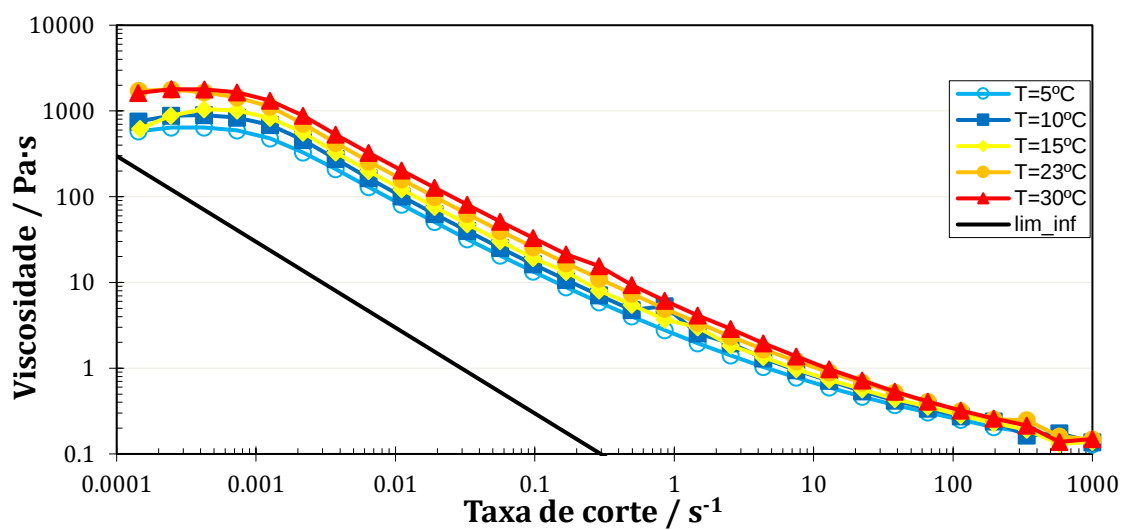


Figura B.72 - Curvas de viscosidade da amostra da emulsão EEE08.

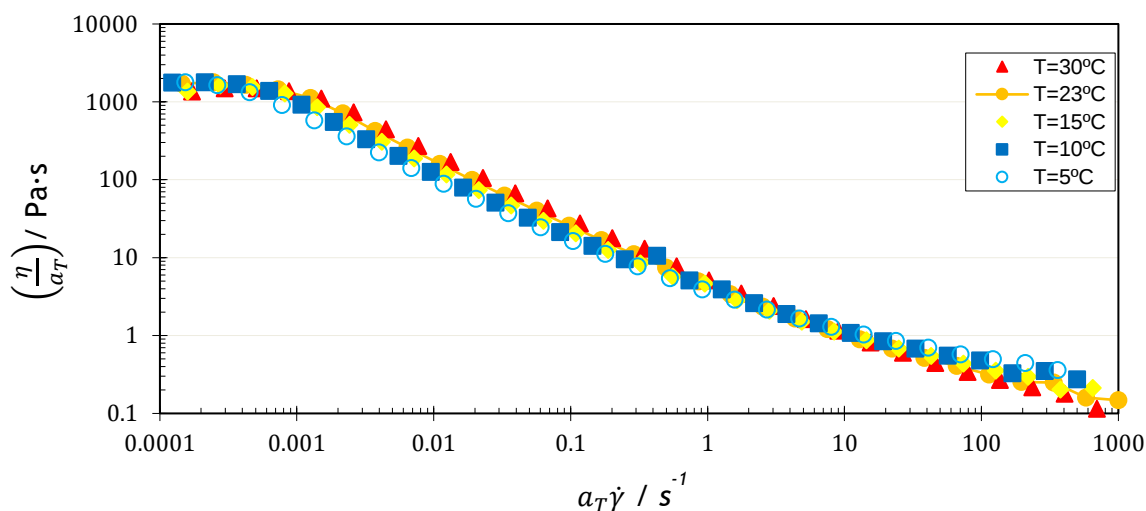


Figura B.73 - Curva mestra da emulsão EEE08.

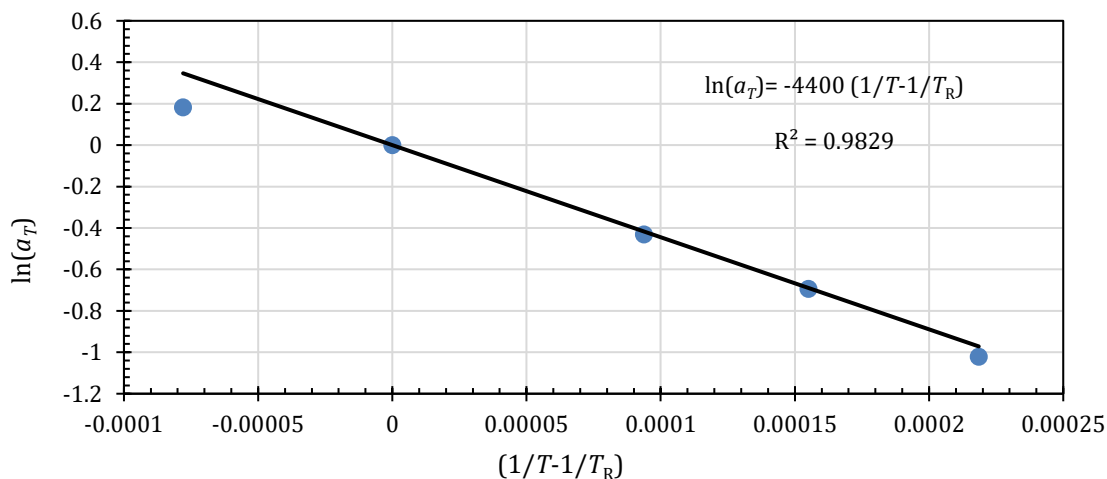


Figura B.74 - Lei de Arrhenius da emulsão EEE08.

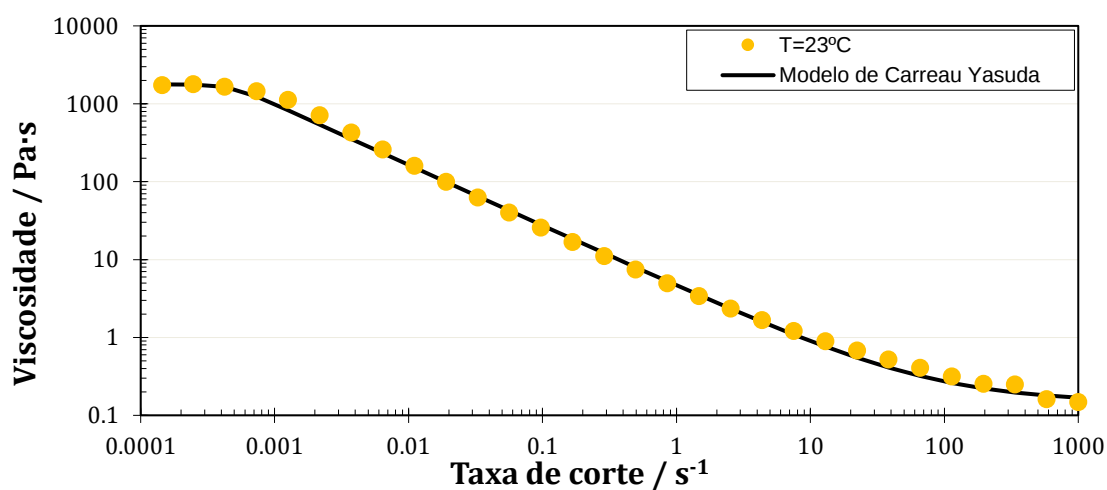


Figura B.75 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE08.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(0.148 + \frac{1770 - 0.148}{\left[1 + \left(2124 \dot{\gamma} e^{-4400 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{5.05} \right]^{\frac{1-0.221}{5.05}}} \right) e^{-4400 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 0.14 - 0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

v) Curvas da emulsão EEE09

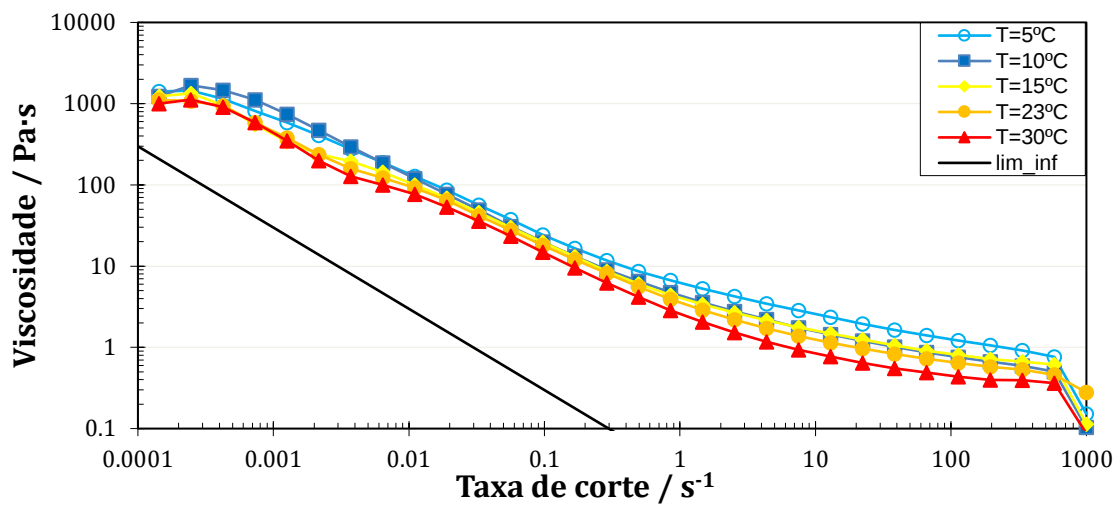


Figura B.76 - Curvas da viscosidade da amostra da emulsão EEE09.

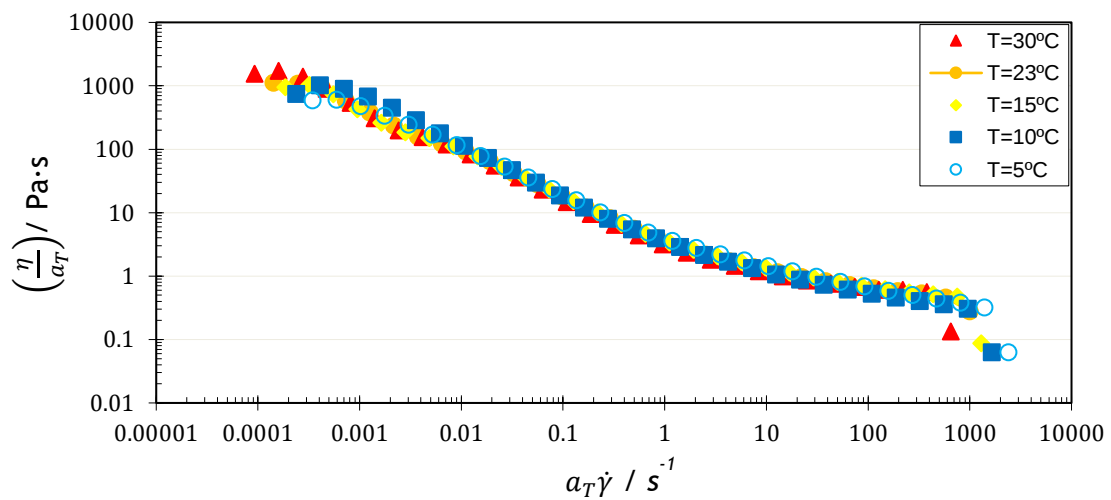


Figura B.77 - Curva mestra da emulsão EEE09.

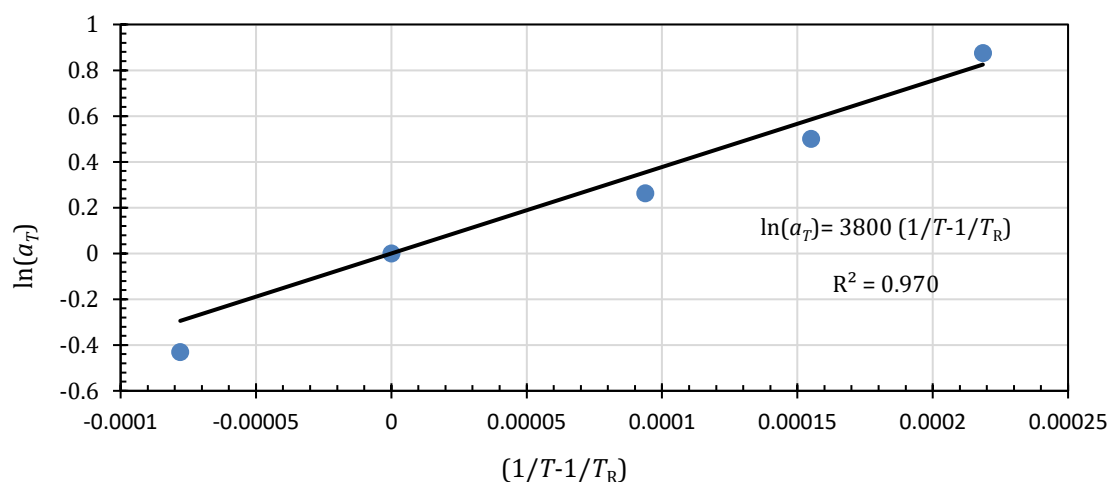


Figura B.78 - Lei de Arrhenius da emulsão EEE09.

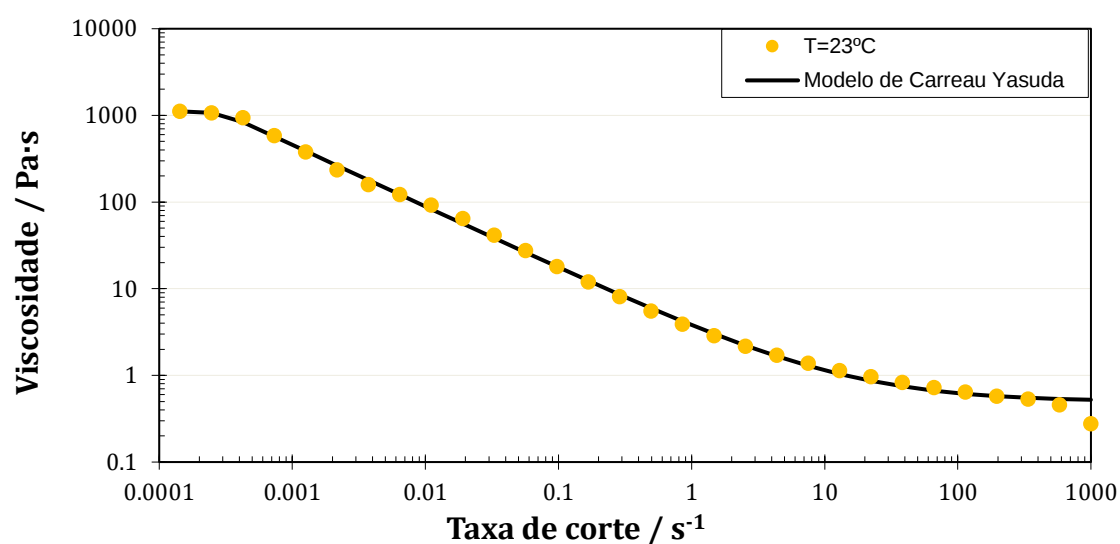


Figura B.79 - Modelo de Carreau-Yasuda da emulsão EEE09.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \left(0.5 + \frac{1120 - 0.5}{\left[1 + \left(3496 \dot{\gamma} e^{3800 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)} \right)^{6.18} \right]^{\frac{1-0.287}{6.18}}} \right) e^{3800 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{296} \right)}$$

$$\eta_{\text{ficha técnica}} = 1.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Apêndice C - Ensaios viscométricos *Up & Down*

C.1 Condições dos ensaios viscométricos de *Up & Down*

Tabela C.1 - Condições dos ensaios viscométricos de *Up & Down*

Ensaios <i>Up & Down</i>	
<i>Shear rate [s⁻¹]</i>	5
<i>Apply time [s]</i>	30
<i>Equilibrium time [s]</i>	90
<i>Temperature [°C]</i>	23
<i>Measurement System</i>	CP 4° / 40 mm
<i>Delay time [s]</i>	10
<i>Integration time [s]</i>	25
<i>Proportionality</i>	<i>Strain</i>
<i>Ramp</i>	<i>Up & Down</i>
<i>Start shear [s⁻¹]</i>	0.0001432
<i>End shear [s⁻¹]</i>	1000 / 100*
<i>Number of samples</i>	20
<i>Range</i>	<i>Logarithmic</i>

*Para AAA11, AAA12, AAA13, AAA24

Notas: É usada a nomenclatura em inglês do reómetro utilizado.

A *End Shear* programada nos ensaios *Up & Down* é de apenas 100 s⁻¹ nos aditivos AAA11, AAA12, AAA13, AAA24 porque, conforme já verificado nos ensaios de viscosidade, para taxas de corte superiores, as amostras eram expelidas pela ação da força centrífuga no reómetro. Desta forma, evita-se a obtenção de resultados inválidos na curva *Down*.

C.2 Curvas viscométricas *Up & Down*

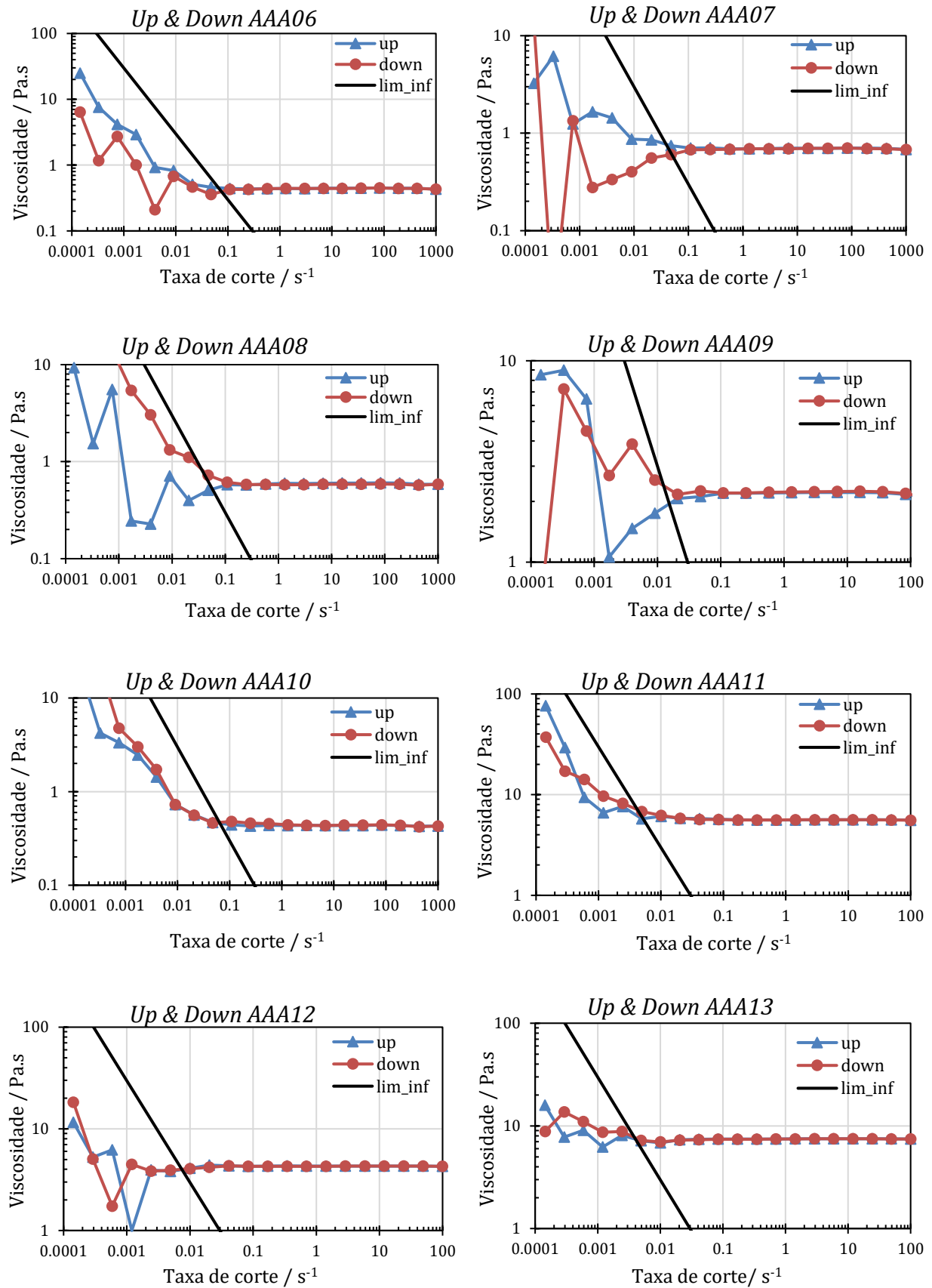


Figura C.1 - Curvas viscométricas *Up & Down*.

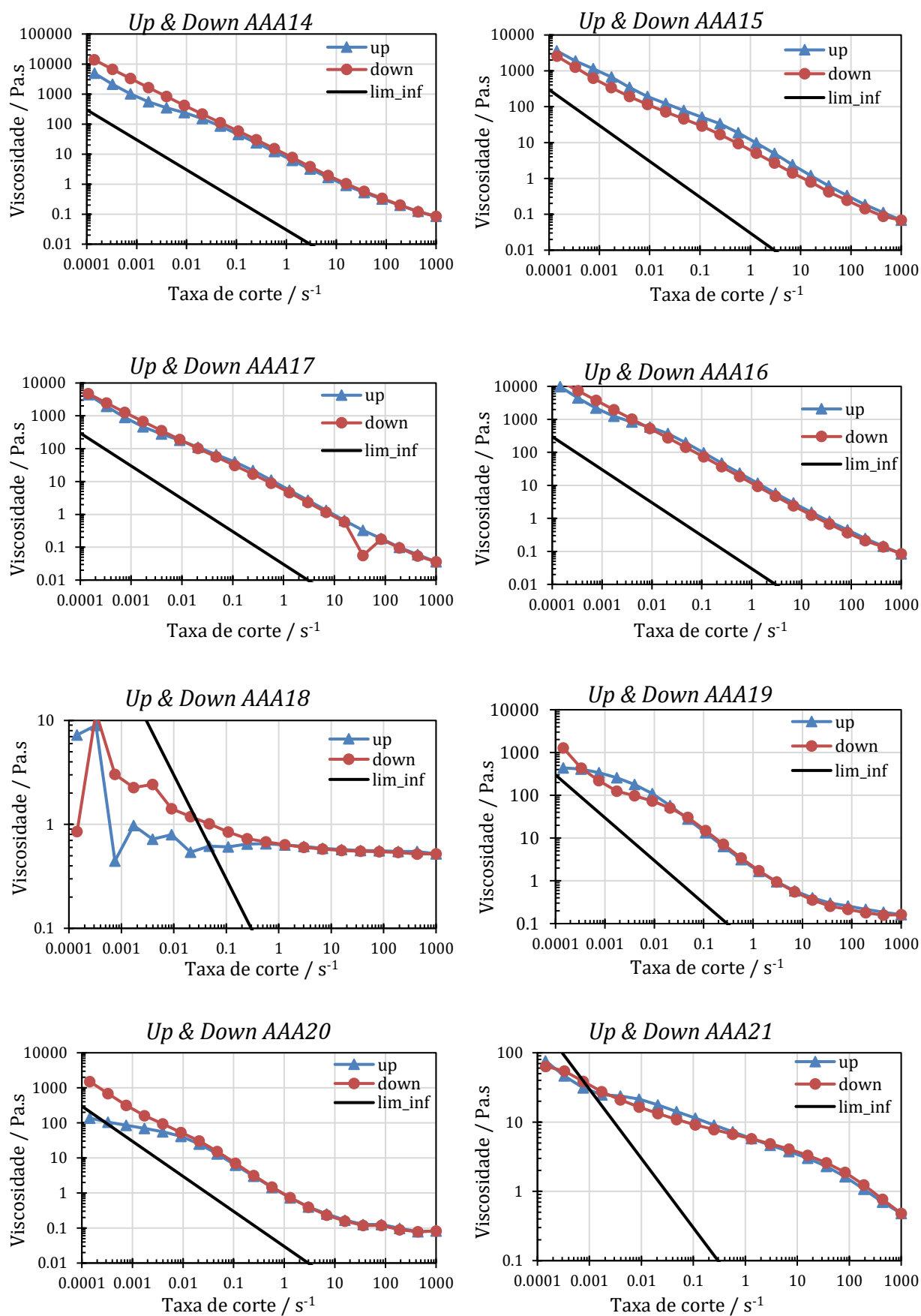


Figura C.2 (Continuação) - Curvas viscométricas Up & Down.

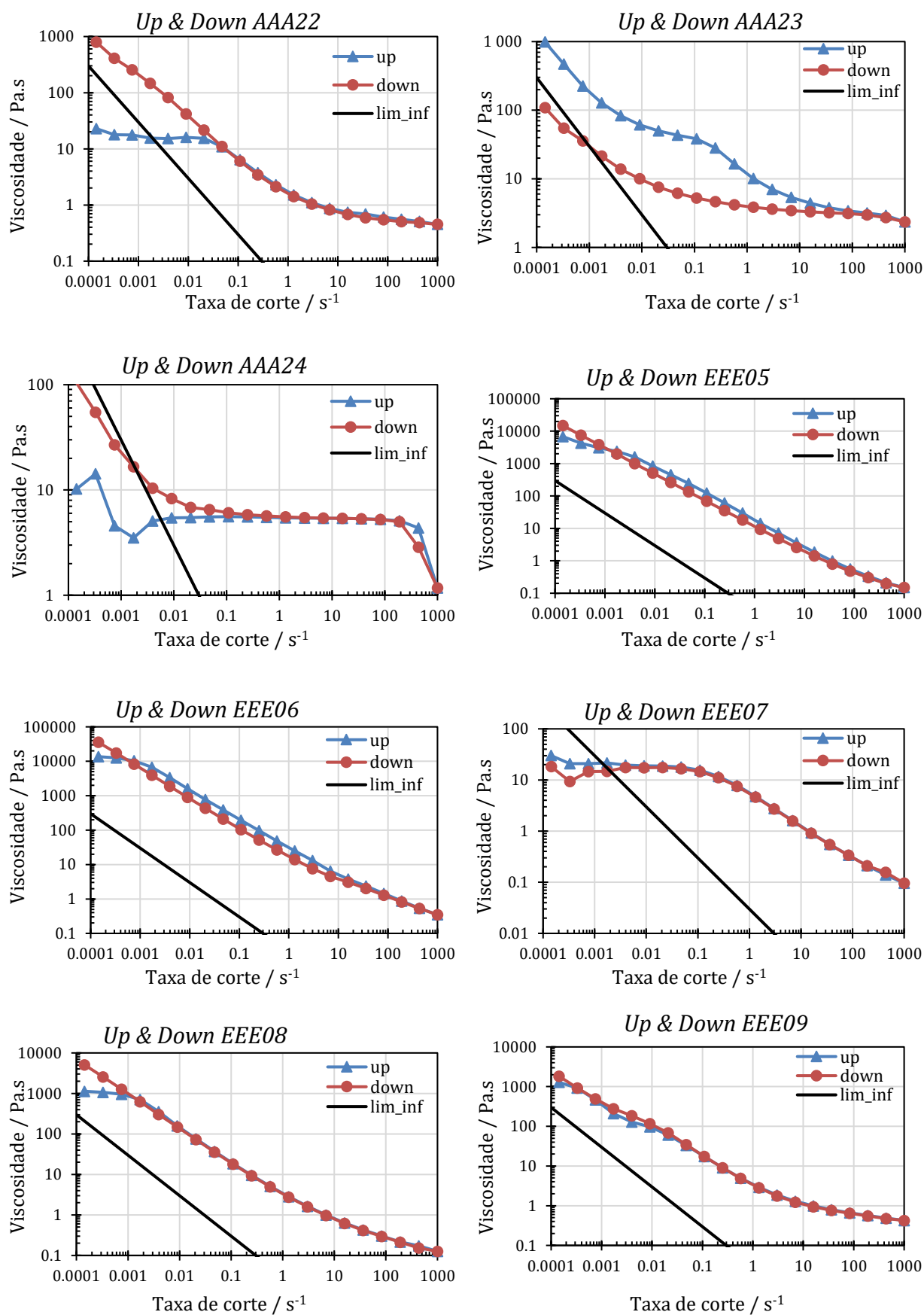


Figura C.3 (Continuação) - Curvas viscométricas Up & Down.

Apêndice D - Condições do ensaio de recuperação

Tabela D.1 - Condições do ensaio de recuperação

Ensaio de Recuperação Estrutural			
<i>Shear rate [s⁻¹]</i>	5		
<i>Apply time [s]</i>	30		
<i>Equilibrium time [s]</i>	90		
<i>Temperature [°C]</i>	23		
<i>Measurement System</i>	CP 4° / 40 mm		
<i>Regions</i>	1	2	3
<i>Start Value</i>	0.1	100	0.1
<i>End Value</i>	0.1	100	0.1
<i>Time [s]</i>	180	30	1200
<i>Sample Mode</i>	<i>Steady</i>	<i>Steady</i>	<i>Steady</i>
<i>Samples</i>	20	10	100

Nota: É usada a nomenclatura em inglês do reómetro utilizado.

Apêndice E - Folhas de cálculo automático das curvas características da instalação

E.1 Folha de cálculo automático para aditivos newtonianos

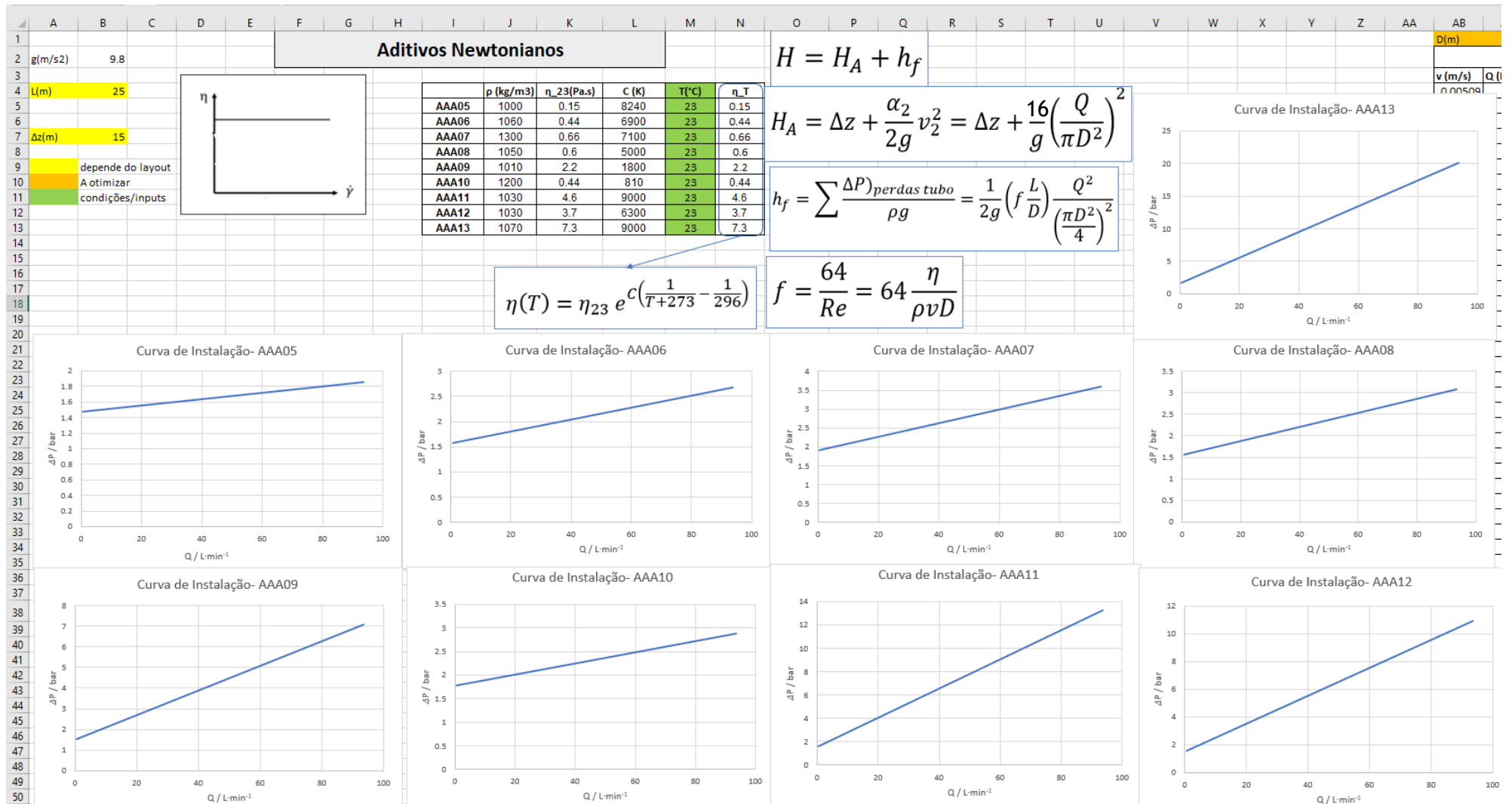


Figura E.1 Folha de cálculo automático para aditivos newtonianos.

E.2 Folha de cálculo automático para aditivos pseudoplásticos independentes da temperatura

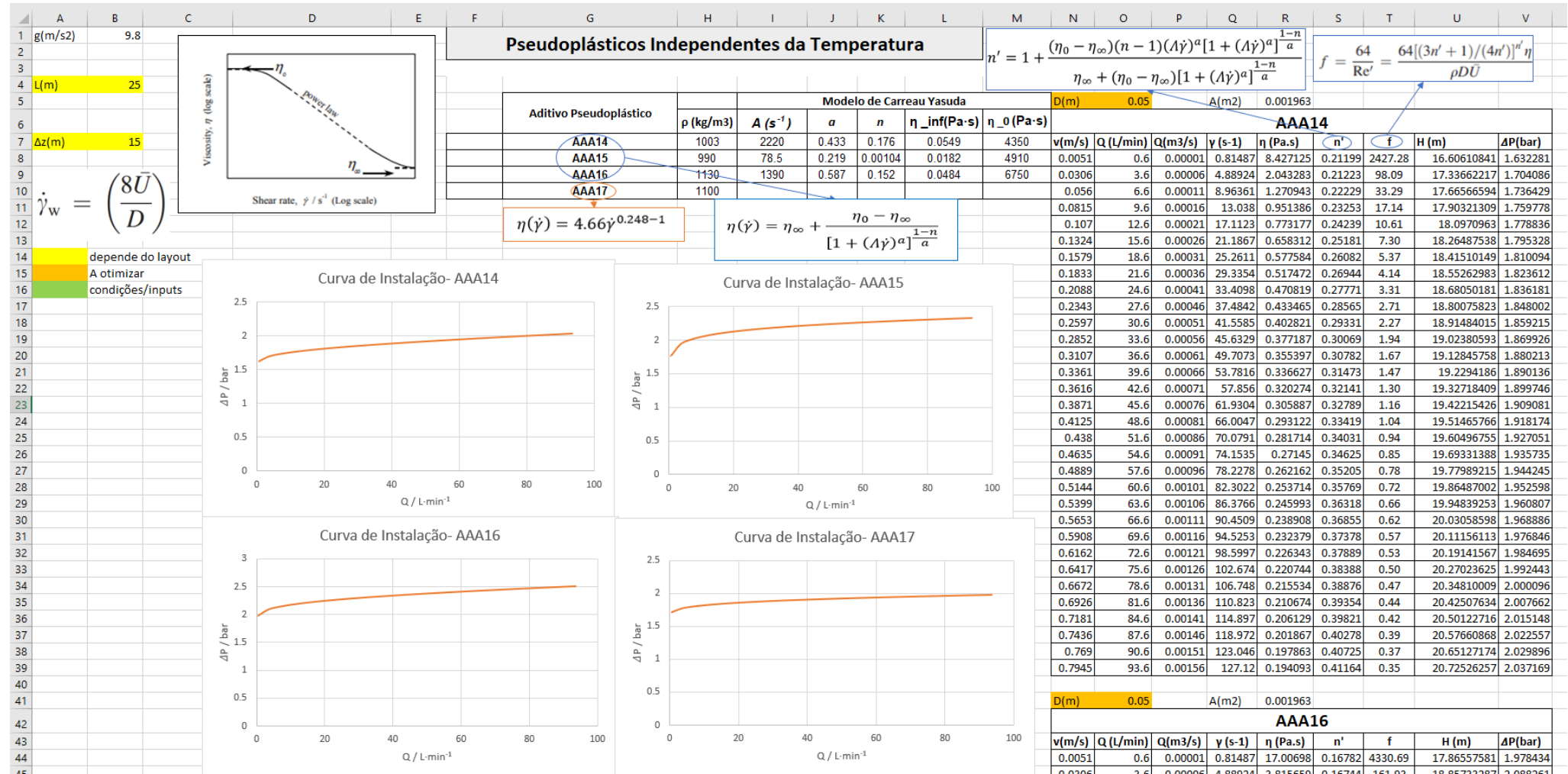


Figura E.2 Folha de cálculo automático para aditivos pseudoplásticos independentes da temperatura.

E.3 Folha de cálculo automático para aditivos pseudoplásticos dependentes da temperatura

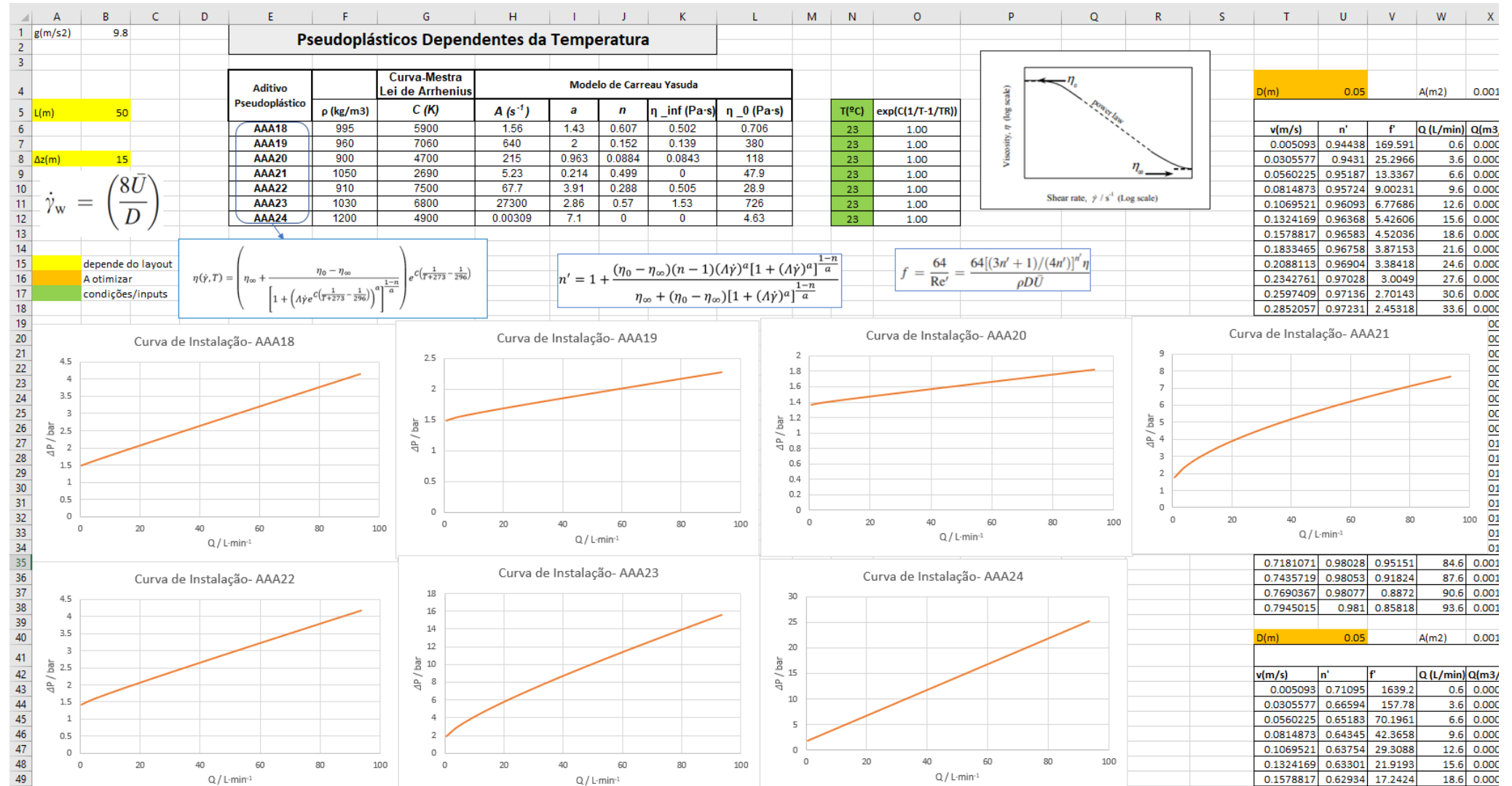


Figura E.3 Folha de cálculo automático para aditivos pseudoplásticos dependentes da temperatura.

E.4 Folha de cálculo automático para emulsões

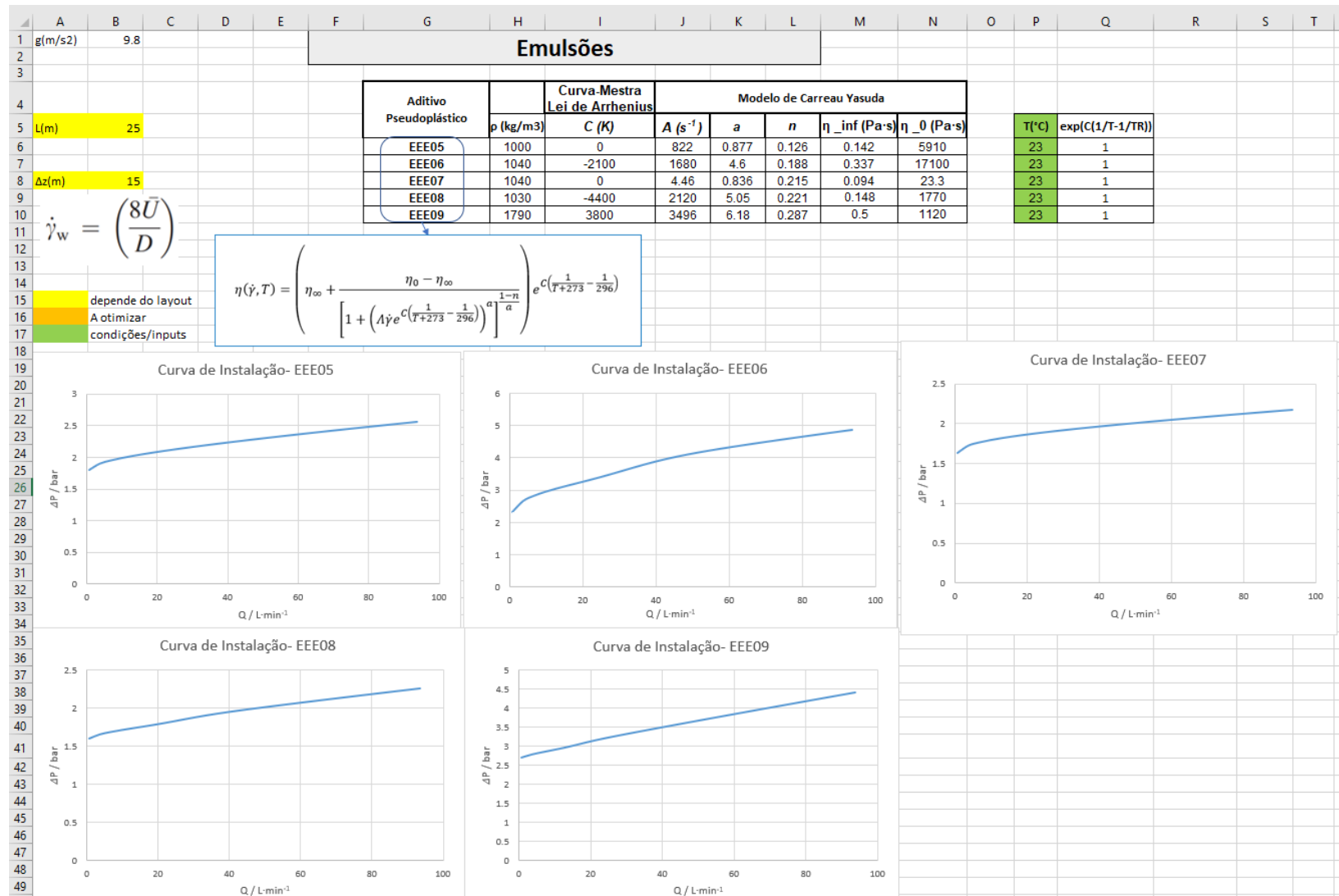


Figura E.4 Folha de cálculo automático para emulsões.

