

## **Desenvolvimento de Esponjas de Proteção.**

**Tânia Catarina Santos Dinis**

**Trabalho realizado sob orientação de:**

Prof. Dr. Rui Lima

Dr. Francisco J. Galindo Rosales<sup>1</sup>

Dra. Laura Campo Deaño<sup>1</sup>

Prof. Dr. Alejandro Sevilla Santiago<sup>2</sup>

Outubro 2013

Apresentado à **Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança** para obtenção do grau de Mestre em **Tecnologia Biomédica**, no ramo **Técnicas e Reabilitação Biomecânica**.

Trabalho realizado em parceria com:

<sup>1</sup>FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

<sup>2</sup>UC3M – Universidade Carlos III de Madrid.



## **Agradecimentos**

Ao professor Dr. Rui Lima pela orientação e aconselhamento ao longo das etapas deste longo trabalho;

Ao Dr. Francisco J. Galindo Rosales (Curro) pela orientação, acompanhamento, paciência e ajuda nas dúvidas/ dificuldades sentidas;

À Dra. Laura Campo Deaño pela presença e orientação nas diversas etapas;

Ao professor Dr. Alejandro Sevilla pelo acompanhamento e disponibilidade durante os 4 meses na Universidade Carlos III de Madrid;

À Diana Pinho, ao Elmano Pinto e ao David Samil pela ajuda e orientação na utilização do laboratório e equipamentos;

Ao professor Dr. Carlos E. Manglano e ao Dr. Wilfried pela paciência, ajuda, e conselhos nas simulações numéricas deste trabalho;

Ao Eng<sup>o</sup> Miguel Figueiredo e ao Sr. Rui Silva do laboratório de Ensaios Tecnológicos da FEUP, por simpaticamente me terem cedido o equipamento necessário a este trabalho, e pela preciosa ajuda na sua utilização;

Ao IPB, por me facilitar os componentes necessários para realizar este relatório e por facilitar a mobilidade Erasmus que me permitiu ir para Madrid (Universidade Carlos III) completar este trabalho;

À FEUP, por me permitir utilizar as suas instalações a fim de realizar este trabalho;

À Universidade Carlos III de Madrid por me ter recebido e autorizado o uso das suas instalações;

À FCT, COMPETE, QREN e União Europeia (FEDER) no âmbito dos projectos PTDC/SAU-BEB/105650/2008, PTDC/SAU-BEB/108728/2008, PTDC/EME-MFE/099109/2008, e PTDC/SAU-ENB/116929/2010 e das bolsas SFRH/BPD/69663/2010 e SFRH/BPD/69664/2010;

Aos meus queridos pais, irmão, família e amigos, pela paciência e coragem dada para não desistir e perceberem a minha falta de tempo/paciência;

Obrigado a todos os que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## Resumo

Os fluidos reoespessantes (STF) são um tipo de fluido que aumenta a sua viscosidade quando é submetido a uma determinada força exterior, sendo uma das suas potenciais aplicações o desenvolvimento de compósitos absorvedores de energia de impacto. O objectivo principal deste trabalho consistiu em esclarecer e compreender o mecanismo de absorção de energia de materiais porosos quando são preenchidos com fluidos reoespessantes. Para esse fim, desenvolveram-se espumas protetoras baseadas em esponjas de maquilhagem preenchidas a 25% de STF do seu volume vazio. O fluido utilizado consiste numa suspensão de partículas de sílica fumada ( $\text{SiO}_2$ ), com diâmetro compreendido entre 200 e 300 [ $\mu\text{m}$ ], em polipropileno glicol (PPG) ( $M_w=400$  [ $\text{g/mol}$ ]) a três concentrações diferentes: 5%, 10% e 15% [w/w].

Numa primeira fase, realizaram-se estudos de reometria de corte e obtiveram-se as curvas de viscosidades destes fluidos sendo que o comportamento reoespessante é maior quanto maior a concentração de  $\text{SiO}_2$ . Seguidamente, foram realizados testes de impacto nas esponjas reticuladas que permitiram confirmar que a energia dissipada no impacto é maior quando preenchidas com o fluido de 15% [w/w] de partículas de sílica. Numa segunda fase, desenvolveram-se por intermédio da técnica de Xurografia suave, microcanais consistindo numa expansão/contração/expansão com diferentes dimensões, de forma a simular os diversos tipos de poros. Por intermédio de um sensor foram medidas as quedas de pressão devidas ao escoamento do fluido reoespessante no interior da esponja, com o intuito de as relacionar com a energia dissipada.

Finalmente, foram realizadas simulações numéricas para comparar os resultados das quedas de pressão ao longo dos microcanais com os valores experimentais.

**Palavras-chave: Fluidos Reoespessantes, Polipropileno Glicol, Sílica Fumada, Esponjas, Microcanais, Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD).**

## **Abstract**

Shear thickening fluids (STF) are a type of fluid which increases its viscosity when subjected to an external force, and the development of impact absorber composites is one of the most potential applications of these fluids. The aim of this work was to understand the absorbing energy mechanism of porous media materials filled with STF. To that end, protective foams based make up sponges filled with to 25% of the empty volume of the foam were developed. The STF used consist of fumed silica particles ( $\text{SiO}_2$ ) with a diameter between 200 and 300 [ $\mu\text{m}$ ], in polypropylene glycol (PPG- $M_w=400$  [g/mol]) at three different concentrations: 5%, 10% e 15% [w/w].

In a first phase, viscosity curves of the fluids were obtained by means of a shear rotational rheometer, showing the three samples a shear-thickening behavior which increases as the concentrations of  $\text{SiO}_2$  increases. Additionally, impact tests were performed in reticulated sponges that allow us to confirm that the dissipated energy in an impact is greater when filled with fluid 15% [w/w] of silica particles.

In a second phase, micro-channels with an expansion/contraction/expansion and different sizes were developed, using soft-Xurography technique. Pressure drops were carried out in order to relate the dissipated energy with the pressure drop along the micro-channel.

Finally, numerical simulations (CFD) were performed and the results of the pressure drop along the micro-channel were compared with the experimental values.

**Keywords: Shear-Thickening, Polypropylene Glycol, Silica, Foams, Micro Channels, Computational Fluid Dynamics (CFD).**

# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abstract .....	v
Lista de Figuras .....	viii
Lista de Tabelas.....	xii
Nomenclatura .....	xiii
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento histórico.....	1
1.2 Motivação.....	3
1.3 Objectivo .....	4
1.4 Estrutura do relatório.....	5
2 Reologia e Testes de Impacto.....	6
2.1 Introdução .....	6
2.2 Fluidos Newtonianos/ Não-Newtonianos.....	9
2.2.1 Fluidos com comportamento Reoespesante.....	12
2.3 Reometria Rotacional.....	16
2.3.1 Reómetro Rotacional.....	17
2.4 Materiais.....	23
2.4.1 Sílica Fumada (SiO <sub>2</sub> ).....	23
2.4.2 Polipropileno Glicol (PPG) .....	25
2.4.3 Preparação da amostra.....	25
2.5 Resultados Reológicos.....	27
2.6 Espumas .....	33
2.6.1 Testes de impacto .....	36
.....	38
2.7 Conclusões dos resultados.....	43
3 Estudo do escoamento de um fluido reoespesante em microcanais fabricados por Xurografia suave .....	45
3.1 Polidimetilsiloxano (PDMS) .....	45
3.2 Xurografia Suave.....	47
3.2.1 Fabricação de microcanais .....	48
3.3 Quedas de pressão .....	51

3.3.1	Amostra A.....	53
3.4	Conclusões .....	54
4	Simulações numéricas de fluidos Não-Newtonianos em microcanais.....	55
4.1	Introdução .....	55
4.2	Modelo Reológico .....	61
4.3	Estudo da malha .....	63
4.4	Resultados .....	65
4.4.1	Canal 2:1:2 .....	67
4.4.2	Canal 4:1:4 .....	76
4.4.3	Canal 8:1:8 .....	84
4.1	Conclusões / comparação dos resultados experimentais e numéricos.....	94
5	Considerações finais, conclusões e trabalhos futuros .....	96
6	Bibliografia .....	98
7	Anexos.....	103
7.1	Anexo A- Protocolo para preparação das amostras.....	103
7.2	Anexo B- Procedimento para utilização do reómetro .....	104
7.3	Anexo C- Protocolo de preparação do PDMS e dos microcanais. ....	106
7.4	AnexoE: Protocolo para utilizar o Fluent.....	107
7.5	AnexoE: protocolo para obter os resultados do Fluent .....	107
7.6	AnexoF- Propriedades Químicas do Polipropilenoglicol.....	108
7.7	ANEXO G - Propriedades Químicas do SiO <sub>2</sub> .....	110
7.8	AnexoH- Propriedades químicas do PDMS .....	113
7.9	Anexo I- Informação sobre o sensor .....	114
7.10	Anexo J- Impregnação da esponja.....	116
7.11	Anexo K- Calibração do sensor de pressão.....	117
7.12	Anexo L- Exemplar de uma UDF utilizada no Fluent .....	118
7.13	Anexo M- Dedução da Equação 3.1, Capítulo 3.....	119
7.14	Anexo N- Poster exposto na Annual European Rheology Conference (AERC), 2-5 April (2013), Leuven, Belgium .....	120
7.15	Anexo O- Resumo submetido para o primeiro Encontro de Jovens Investigadores do IPB – Novembro 2013 .....	121

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1-</b> a) Vestuário feito de bolsas com fluido reoespessante .....	2
<b>Figura 1.2-</b> Esquematização dos objectivos do trabalho. ....	5
<b>Figura 2.1-</b> Classificação dos fluidos tendo em conta o seu comportamento reológico .	7
<b>Figura 2.2-</b> Tipos de fluidos (tensão de corte <i>versus</i> taxa de corte) .....	8
<b>Figura 2.3-</b> Representação esquemática do escoamento entre duas placas .....	9
<b>Figura 2.4-</b> Relação da tensão de corte e da taxa de corte no cálculo da viscosidade...	10
<b>Figura 2.5-</b> a) curva de fluxo; b) curva de viscosidade .....	11
<b>Figura 2.6-</b> a) Diferença entre roupas de protecção antigas; b) roupas mais recentes recorrentes a fluidos reoespessantes; b) <i>Kevlar</i> após impacto de uma bala. ....	12
<b>Figura 2.7-</b> Exemplos de utilização de fluidos shear thickening em equipamentos desportivos por parte da marca Reebok.....	13
<b>Figura 2.8-</b> Formação dos hydroclusters com o aumento da taxa de corte .....	14
<b>Figura 2.9-</b> Diferença de viscosidade entre amostras “floculadas ”-aglomerados e amostras “não-floculadas”- sem aglomerados.....	15
<b>Figura 2.10-</b> Curva de viscosidade característica de um fluido com comportamento reoespessante (acima). Formação de aglomerados no comportamento reoespessante (laranja- abaixo).....	16
<b>Figura 2.11-</b> a) Reómetro rotacional <i>Anton Paar</i> ; b) Reómetro com a geometria.....	17
<b>Figura 2.12-</b> Esquema do reometro de cilindros concêntricos, onde $\Omega$ é a velocidade de rotação, $R_a$ é o raio do cilindro exterior, $R_i$ é o raio do cilindro de interior e $L$ é a altura do cilindro interior. ....	19
<b>Figura 2.13-</b> Esquema da geometria cone-prato, onde $a$ é a altura da ponta do cone truncada, $\alpha$ é o ângulo do cone, $R_C$ é o raio externo do cone, $R_T$ é o raio da ponta do cone truncada.....	20
<b>Figura 2.14</b> — Esquema da geometria prato-prato .....	21
<b>Figura 2.15-</b> Geometrias: a) prato-prato serrada; b) prato-prato liso. ....	22
<b>Figura 2.16-</b> Agregação das partículas de Sílica .....	23
<b>Figura 2.17-</b> Embalagem representativa de cada marca de sílica utilizada: a) Sílica fumada Aerosil 200-Evonik; b) Sílica fumada- Sigma Aldrich. ....	24
<b>Figura 2.18-</b> a) varinha de mistura; b) ultra-sons utilizado na preparação das amostras. .....	26

<b>Figura 2.19-</b> Amostra de 17% [w/w] de SiO <sub>2</sub> em PPG no momento da misturação.....	27
<b>Figura 2.20-</b> Curva de viscosidade do estado inicial e estado estacionário para todas .	29
<b>Figura 2.21-</b> Curva de viscosidade do estado inicial e estado estacionário para todas .	30
<b>Figura 2.22-</b> Curva de viscosidade para a resposta do estado inicial para .....	31
<b>Figura 2.23-</b> Curva de viscosidade para a resposta do estado estacionário para .....	32
<b>Figura 2.24-</b> a) Imagem de tomografia computadorizada de uma espuma de poliuretano células abertas; b) imagem tridimensional de uma espuma de células fechadas de poliuretano .....	33
<b>Figura 2.25-</b> Esquemática da curva tensão ( $\sigma$ )- deformação ( $\epsilon$ ) de uma espuma, mostrando os três regimes: elasticidade linear, colapso e densificação (adaptada de....	34
<b>Figura 2.26-</b> Diferentes espumas utilizadas, com diferentes porosidades. ....	35
<b>Figura 2.27-</b> Espumas impregnadas com o fluido, não sujeitas a qualquer força. ....	36
<b>Figura 2.28-</b> Equipamento utilizado nos testes de impacto- <i>Instrumented impact testing machine: ROSAND IFW5HV – Instrumented Falling Weight Impact Tester, type 5 HV:</i> a) montagem do equipamento; b) apresentação do software utilizado; c) Exemplificação da montagem dos materiais. ....	37
<b>Figura 2.29-</b> Exemplo de resultados obtidos para a amostra A, 20 [J]: Força <i>versus</i> Distância. ....	38
<b>Figura 2.30-</b> Exemplo de resultados obtidos para amostra A, [20J]: Energia Absorvida <i>versus</i> Distância.....	39
<b>Figura 2.31-</b> Esponja impregnada impactada com uma energia 20 [J]: (esquerda) .....	40
<b>Figura 2.32-</b> Esponja impregnada impactada com uma energia 20 [J] (esquerda) .....	41
<b>Figura 2.33-</b> Resultados obtidos nos testes de impacto com fluido reoessante. ....	42
Figura 3.1- Esquemática da estrutura poliméricas do PDMS (Bowen, et al., 2012). 45	
Figura 3.2- Exemplar da embalagem do PDMS utilizado neste trabalho. ....	46
Figura 3.3- Exsiccador conectado à bomba de vácuo. ....	47
<b>Figura 3.4-</b> Desenho esquemático da geometria do microcanal. ....	48
<b>Figura 3.5-</b> Equipamento para impressão do molde das geometrias <i>Plotter Jaguar II.</i> 49	
<b>Figura 3.6-</b> Procedimento do procedimento para fabricar os microcanais por Xurografia .....	50
<b>Figura 3.7-</b> a) Forno utilizado para curar o PDMS; b) Spin-coater utilizada para espalhar o PDMS na lâmina; c) Ilustração do resultado da fabricação de microcanais. 50	

<b>Figura 3.8-</b> Demonstração microscópica do resultado dos moldes em PDMS. ....	51
<b>Figura 3.9-</b> Representação esquemática para medir a queda de pressão em microcanais. .....	52
<b>Figura 3.10-</b> Comparação das duas amostras de 5% partículas de SiO <sub>2</sub> . ....	53
<b>Figura 4.1-</b> Exemplo de como foram desenhados os canais no Ansys Workbench. ....	57
<b>Figura 4.2-</b> Controlo de volume usado para ilustrar a discretização de um escalar da equação de transporte .....	60
<b>Figura 4.3-</b> Resultados dos ajustes das curvas de viscosidade. ....	62
<b>Figura 4.4-</b> Ilustração da malha: a) canal 2:1:2; b) canal 4:1:4; c) canal 8:1:8. ....	64
<b>Figura 4.5-</b> Comparação do número de Poiseuille em várias secções de vários tipos de canais .....	66
<b>Figura 4.6-</b> Resultado relativo à velocidade 2.36E-3 [m/s]: a) pressão relativa; b) velocidade;.....	70
<b>Figura 4.7-</b> Resultado relativo à velocidade 2.36E-3: a) pressão relativa; b) velocidade; .....	72
<b>Figura 4.8-</b> Resultado relativo à velocidade 2.36E-3: a) pressão relativa; b) velocidade; .....	74
<b>Figura 4.9-</b> Resultado relativo à velocidade 2.36E-3: a) pressão relativa; b) velocidade; .....	79
<b>Figura 4.10-</b> Resultado relativo à velocidade 2.36E-3: a) pressão relativa; b) velocidade; .....	81
<b>Figura 4.11-</b> Resultado relativo à velocidade 1.31E-3: a) pressão relativa; b) velocidade; .....	82
<b>Figura 4.12-</b> Resultados após refinamento da malha dentro da contração (iii). ....	83
<b>Figura 4.13-</b> Resultado relativo à velocidade 1.54e-3: a) pressão relativa; b) velocidade; .....	87
<b>Figura 4.14-</b> Resultado relativo à velocidade 1.31e <sup>-3</sup> : a) pressão; b) velocidade; .....	89
<b>Figura 4.15-</b> Resultado relativo à velocidade 1.31E-3: a) pressão relativa; b) velocidade; .....	90
<b>Figura 4.16-</b> Resultado relativo à velocidade 1.31E-3: a) pressão relativa; b) velocidade; .....	91

<b>Figura 4.17-</b> Resultado relativo à velocidade $1.31E-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; .....	91
<b>Figura 4.18-</b> Curvas de viscosidade intermédias.....	93
<b>Figura 4.19-</b> Quedas de pressão obtidas pelas simulações numéricas: .....	94

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1-</b> Propriedades das sílicas fumadas hidrofílica utilizadas. ....	24
<b>Tabela 2.2-</b> Propriedades físicas do PoliPropileno Glicol 400 a 20°C .....	25
<b>Tabela 2.3-</b> Nomenclatura das amostras. ....	27
<b>Tabela 2.4-</b> Resultados de viscosidade obtidos para a amostra <i>A</i> . ....	30
<b>Tabela 2.5-</b> Resultados de viscosidade obtidos para a amostra <i>B</i> . ....	31
<b>Tabela 2.6-</b> Resultados de viscosidade obtidos para a amostra <i>C</i> . ....	31
<b>Tabela 2.7-</b> Parâmetros iniciais e fixos para todos os testes. ....	38
<b>Tabela 2.8-</b> Resultados dos testes de impacto: Valor de energia absorvida pelo fluido reoessante. ....	43
<b>Tabela 3.1-</b> Propriedades químicas do Polidimetilsiloxano. ....	46
<b>Tabela 3.2-</b> Valores das dimensões de cada microcanal utilizado. ....	49
<b>Tabela 4.1-</b> Parâmetros obtidos após o ajuste para as amostras sem álcool. ....	63
<b>Tabela 4.2-</b> Elementos e nós das malhas utilizadas. ....	64
<b>Tabela 4.3-</b> Esquematização do que foi feito e do que não foi no Fluent. ....	67
<b>Tabela 4.4-</b> Resultados para as quedas de pressão com a água e com contração. ....	68
<b>Tabela 4.5-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>A</i> , canal com contração. ....	71
<b>Tabela 4.6-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>A</i> e sem contração. .	73
<b>Tabela 4.7-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>B</i> e com contração. .	74
<b>Tabela 4.8-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>B</i> e sem contração. .	75
<b>Tabela 4.9-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>C</i> e sem contração. .	76
<b>Tabela 4.10-</b> Resultados para as quedas de pressão com a água e com contração. ....	77
<b>Tabela 4.11-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>A</i> , com contração. .	78
<b>Tabela 4.12-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>A</i> , sem contração. .	78
<b>Tabela 4.13-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>B</i> e com contração. ....	80
<b>Tabela 4.14-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>B</i> e sem contração. .	80
<b>Tabela 4.15-</b> Parâmetros utilizados no Fluent. ....	83
<b>Tabela 4.16-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>C</i> e sem contração. .	84
<b>Tabela 4.17-</b> Resultados para as quedas de pressão com a água, canal com contração. .	85

<b>Tabela 4.18-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>A</i> e com contração. .....	86
<b>Tabela 4.19-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>A</i> e sem contração.	86
<b>Tabela 4.20-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>B</i> e com contração. .....	88
<b>Tabela 4.21-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>B</i> e sem contração.	88
<b>Tabela 4.22-</b> Diferentes parâmetros utilizados no Fluent.....	92
<b>Tabela 4.23-</b> Resultados para as quedas de pressão com a amostra <i>C</i> e sem contração.	93
<b>Tabela 4.24-</b> Resultados experimentais e numéricos das quedas de pressão para a amostra <i>A</i> . .....	95

## Nomenclatura

PPG = Polipropileno Glicol;

SiO<sub>2</sub> = Sílica Fumada;

PDMS = Polidimetilsiloxano;

PU = Poliuretano;

$\dot{\gamma}$  = Taxa de Corte [s<sup>-1</sup>];

$\mu$  = Viscosidade [Pa.s];

$\rho$  = Densidade [kg/m<sup>3</sup>];

$\omega$  = Velocidade angular [s<sup>-1</sup>]

rpm = Rotações por minuto;

CFD = Computational Fluid Dynamics;

STF = Fluido reoespessante (“Shear Thickening Fluid”).

# 1 Introdução

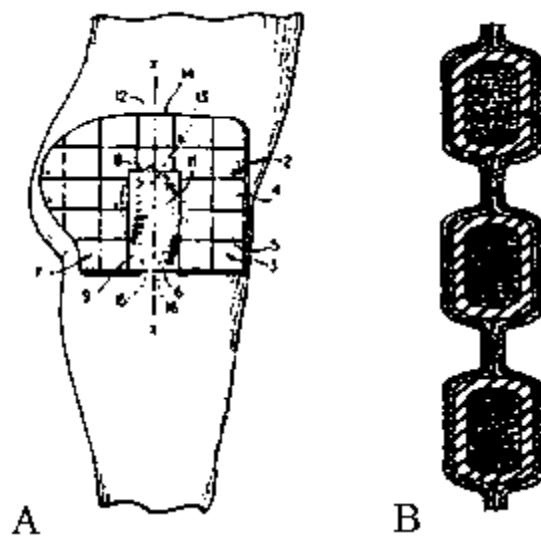
## 1.1 Enquadramento histórico

No ano 1678, foi Robert Hooke quem definiu um sólido elástico como sendo um corpo onde a deformação é directamente proporcional à tensão, e Isaac Newton dedicou-se a estudar o comportamento dos fluidos e 1687 foi o ano em que surgiu a teoria que originou a designação de fluido viscoso Newtoniano: *a força por unidade de área necessária para que exista escoamento é directamente proporcional ao gradiente de velocidade* (Fernandes, 2003). Os fluidos Newtonianos seguem o modelo imposto por Isaac Newton, onde a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) é constante, não dependendo da taxa de deformação imposta, enquanto nos não-Newtonianos a viscosidade depende sempre da taxa de deformação imposta, e apresentam certa elasticidade (Pordeus, 2008).

Muitos anos depois, surgiram dúvidas de que todos os fluidos existentes se comportassem segundo o que Newton sugeriu, e em 1835, Wilhelm Weber, após a realização de trabalhos neste sentido, sugeriu o conceito de sólido viscoelástico e em 1867, por James Maxwell, o conceito de fluido elástico, o que originou a teoria da Viscoelasticidade Linear. Viscoelasticidade não-linear surgiu posteriormente, por Zaremba, que em 1903 realizou os primeiros trabalhos relacionados com este conceito, tendo estimulado outros pesquisadores tais como Jaumann (1905) a realizar trabalhos também nesse sentido. As dispersões ou suspensões sempre foram de grande interesse quando falamos em fluidos. Thomas Graham foi o responsável pela descoberta do termo “suspensões coloidais”, mesmo antes do surgimento do conceito de reologia, que surgiu na segunda metade do séc. XX. O termo foi proposto pelo Professor Eugene Bingham em 1928, que se caracteriza como sendo a ciência que estuda o escoamento e deformação de fluidos, tendo sido aceite cientificamente aquando a fundação da Sociedade de Reologia Americana, em 1929 (Fernandes, 2003). Foram desenvolvidas as equações constitutivas utilizadas actualmente, e os primeiros modelos a aparecer foram os modelos diferenciais e integrais baseados na Teoria da Mecânica dos Meios Contínuos. Olroyd e Giesekus, em 1950 e 1962 respectivamente, destacaram-se pelos trabalhos desenvolvidos na área dos modelos diferenciais e na área dos modelos integrais, são reconhecidos Green e Rivlin, 1957. No entanto, nem todos os fluidos são

correctamente descritos pela Teoria acima citada, o que levou à pesquisa de outros modelos que sejam equivalentes mas que consigam descrever situações em que o fluido está sujeito a deformações elevadas, não se comportando como Newtonianos (Doraiswamy, 2002).

Assim, com a descoberta da ciência que estuda o escoamento dos fluidos, descobriram-se um tipo de fluido bastante complexo, fluidos reoessantes: em repouso são consideravelmente líquidos, e sob a acção de forças, tornam-se bastante viscosos. Em 1989, Barnes já contava com mais de 100 referências relativas a este fluido, e a partir daqui, várias foram as pesquisas realizadas por outros pesquisadores (Dawson, 2008). Assim, em 1997, Wilson C. Hayes and all, desenvolveram um sistema de protecção, recorrendo a bolsas cheias de fluido reoessante, como mostra a Figura 1.1, que faziam também de vestuário e em 1998, Dischler testou fibras revestidas com pó seco com propriedades reoessantes para melhorar o desempenho de Kevlar (material utilizado na constituição de coletes militares), e estas revelaram-se capazes de distribuir energia durante um acidente balístico, devido ao atrito entre as fibras (Lee, et al., 2002).



**Figura 1.1-** a) Vestuário feito de bolsas com reoessante (Bettin, 2005);  
b) Esquemática de bolsas preenchidas com reoessante (Hayves, et al., 1997).

Ainda nos anos 90, sob a orientação do Professor Norman Wagner, investigadores da Universidade de Dalaware do Centro de Materiais Compósitos, iniciaram pesquisas sobre fluidos reoespessantes. No início do ano 2000, começaram a trabalhar em parceria com os Laboratórios de Pesquisa de Materiais de Exército, dirigido pelo Dr. Eric Wetzel, de forma a criar um novo material de proteção, cujos resultados balísticos foram arquivados em 2002, tornando-se públicos no mesmo ano em Orlando (Hanlon, 2006). Desde então várias pesquisas têm sido realizadas, e cada vez mais estes fluidos são importantes no dia-a-dia, quer na área militar quer na área de desporto, entre outras.

## 1.2 Motivação

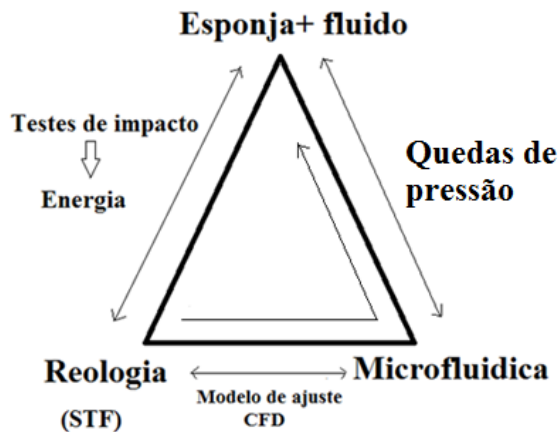
No âmbito do mestrado em Tecnologia Biomédica, no ramo Biomecânica e Reabilitação, com a finalidade de obter o grau de mestre, foi proposto o tema deste trabalho: “Desenvolvimento de espumas de protecção”. Uma vez que uma das áreas principais da Biomédica é o mundo das próteses, torna-se importante o estudo de dispositivos ou equipamentos que atenuem as desvantagens destas e acrescentem as suas vantagens. Um tipo de prótese flexível é baseada em espumas, no entanto estas não têm a capacidade de absorver muita da energia sob impacto, o que desta forma as torna ineficientes. Outro tipo de prótese consiste em compósitos rígidos, os quais fazem com que a capacidade de protecção seja maior mas, uma vez que não são tão flexíveis, tornam-se incómodos para o utente. Assim, a solução ideal seria conseguir reunir as propriedades dos dois tipos: um compósito flexível como uma espuma, mas com uma capacidade de absorção de energia maior. Por esta razão, as espumas impregnadas com um fluido “shear thickening” podem ser uma boa alternativa. O actual conhecimento acerca destes fluidos não permite saber *a priori* a quantidade de energia que este é capaz de absorver, pois esta vai depender da reologia do fluido e da forma como o fluido escoar pelos poros da espuma, os quais apresentam escoamentos complexos e desconhecidos. Portanto a principal motivação deste trabalho foi perceber melhor como funciona uma esponja comercial impregnada com um fluido reoespessante relativamente à absorção de energia de um impacto.

### 1.3 Objectivo

O objectivo final deste trabalho é analisar a capacidade de dissipação de energia que têm as espumas impregnadas com fluido reoespessante sob impacto, e determinar o contributo do fluido nesta dissipação. Para cumprir este objectivo, foram utilizadas várias áreas científicas, como por exemplo a reologia, a microfluidica e a mecânica de fluidos computacional. Para cumprir este objectivo final, vários objectivos intermédios devem ser cumpridos.

1. **Reologia.** Um estudo reológico do fluido é necessário para se conhecer a sua curva de viscosidade.
2. **Testes de Impacto.** Os testes de impactos vão permitir saber quanta energia é absorvida pela esponja sob impacto e o contributo do fluido reoespessante.
3. **Microfluidica.** Para perceber melhor o mecanismo de dissipação da energia devida ao escoamento do fluido através dos poros da esponja. Para isso torna-se necessário analisar o escoamento num microcanal que simule de uma forma muito simplificada a geometria dum único poro da esponja. A queda de pressão no escoamento através do microcanal vai estar relacionada com a energia dissipada pelo fluido quando a esponja impregnada recebe o impacto.
4. **Mecânica de Fluidos Computacional.** Mediante as simulações numéricas é pretendido validar o modelo teórico existente para fluidos reoespessantes. Para além disto, vai ser possível analisar as características do escoamento de um fluido reoespessante numa contração e a sua relação na dissipação viscosa de energia.

A Figura 1.2 é um resumo simplificado de todos estes objectivos mencionados, bem como a forma como se ligam entre eles.



**Figura 1.2-** Esquemática dos objetivos do trabalho.

## 1.4 Estrutura do relatório

Este trabalho encontra-se concentrado em vários Capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma pequena introdução à reologia, explicação de fluidos com comportamento reoespessante, abordagem à reometria e equipamento (reómetro) e suas geometrias, conceito de viscosidade e curva de viscosidade, materiais utilizados e resultados reológicos obtidos. Além disto, é feita uma descrição sobre espumas/esponjas, os testes de impacto realizados e a apresentação dos resultados experimentais.

No Capítulo 3, referente à microfluidica, é descrita a técnica de fabricação utilizada, a Xurografia suave, a fabricação dos microcanais e uma breve referência às quedas de pressão. No final encontra-se uma breve conclusão acerca deste Capítulo.

No Capítulo 4, relativo aos estudos numéricos, é feita uma breve abordagem ao software utilizado (*Ansys/Fluent*), explicação da importância da malha e a apresentação dos resultados para cada microcanal e para cada fluido. Adicionalmente é feita uma comparação dos resultados dos dois Capítulos.

Finalmente no Capítulo 5, na conclusão do trabalho, são discutidos os resultados de uma forma global, e ainda são apresentados os trabalhos futuros e dificuldades sentidas.

Nos Capítulos 6 e 7, respectivamente, encontram-se a bibliografia e os anexos.

## 2 Reologia e Testes de Impacto

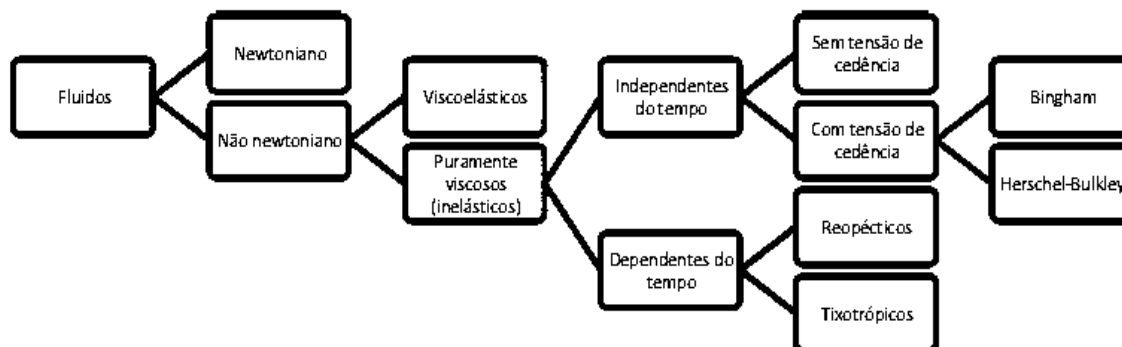
### 2.1 Introdução

A palavra reologia surge da combinação das palavras gregas *Rheo*, que significa fluir/deformação, e *Logia* que significa Ciência ou Estudo, definindo-se deste modo a reologia como a ciência do fluxo dos materiais e das suas deformações (Mezger, 2005).

Por outras palavras, a reologia é a ciência da deformação e do fluxo e das suas propriedades físicas que influenciam o transporte da quantidade de movimento (viscosidade, elasticidade, plasticidade). Assim, esta ciência está intimamente ligada à Mecânica dos Meios Contínuos, ao estudo dos Fenómenos de Transporte e à Mecânica dos Fluidos (Santos, 2009).

Há mais de um século que os cientistas mostraram o seu interesse em conhecer o comportamento de fluidos não-Newtonianos devido às diferentes actividades industriais que os envolvem, tais como extrusão e processamento de polímeros, processamento de tintas, produtos alimentícios e farmacêuticos, etc, ainda que inicialmente utilizando métodos pouco científicos para isso (Mattiusi, et al., 2007). Mais tarde, para conhecer o comportamento dos fluidos, a forma como escoam, desenvolveram-se os testes reológicos (Soares, 2000). Este tipo de testes fornece informação sobre o comportamento dos materiais sob diferentes condições da deformação e fluxo, controladas no laboratório.

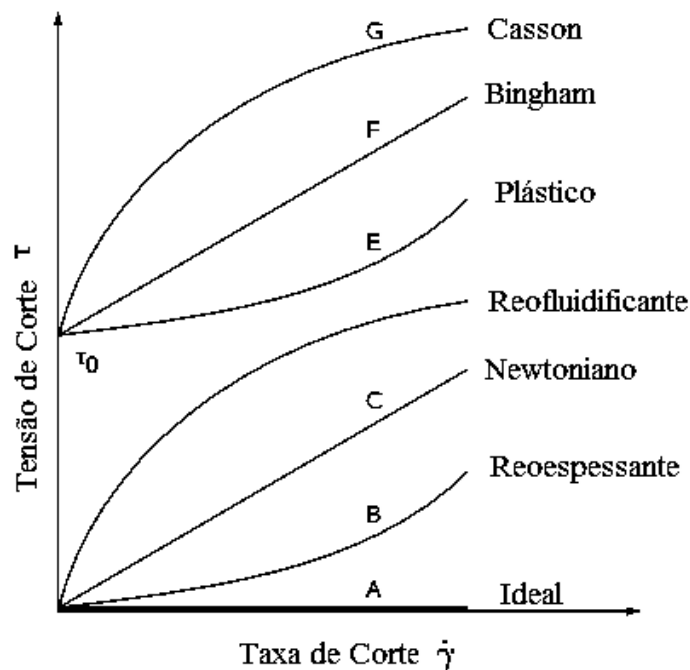
O rápido desenvolvimento das técnicas de análise e caracterização de fluidos permitiu distingui-los com mais detalhe, e classificá-los consoante o seu comportamento reológico, conforme se mostra na Figura 2.1.



**Figura 2.1-** Classificação dos fluidos tendo em conta o seu comportamento reológico (adaptada de (Haminiuk, 2005).

Denomina-se fluido Newtoniano todo o fluido que segue a lei do Newton, ou seja, o valor da sua viscosidade permanece constante independentemente da tensão que lhe for aplicada e não apresenta elasticidade. Um bom exemplo deste tipo de fluido é a água. Fluidos em que não se verifica este princípio, são considerados não-Newtonianos (Gresham, 2008). Existem diversos tipos de fluidos não-Newtonianos, viscoelásticos ou inelásticos onde estes são dependentes ou independentes do tempo (Figura 2.1). Os fluidos reofluídificantes são caracterizados pela sua viscosidade que diminui com o aumento do corte aplicado, sendo o maior exemplo deste tipo de fluido o sangue. Esta característica é típica de polímeros fundidos, e apresenta uma grande vantagem quando estes fluem através de canais ou secções muito pequenas (Soares, 2000). Os fluidos reoespessantes, objecto de estudo do presente trabalho, pelo contrário, são caracterizados pela sua viscosidade que aumenta com o aumento do corte aplicado.

Na Figura 2.2 são comparados os tipos de fluido relativamente á curva tensão de corte *versus* taxa de corte.

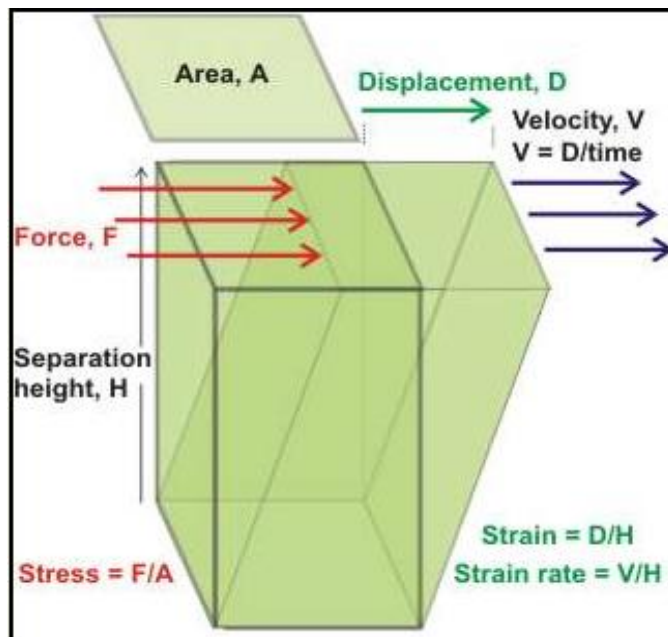


**Figura 2.2-** Tipos de fluidos (tensão de corte *versus* taxa de corte) (adaptada de (Cavadas, 2008)).

Os plásticos de Bingham (por exemplo, a manteiga) reconhecem-se graficamente pois a sua curva de viscosidade não passa pela origem. Nestes casos, a tensão de corte pode ser substancial, mesmo para tensões de corte muito baixas, uma vez que estes fluidos se movem. Então a taxa de deformação é directamente proporcional à taxa de corte, exactamente da mesma forma que os fluidos Newtonianos. Exemplarmente, o puré de batata, uma suspensão de sólidos num líquido, flui mais dificilmente quando é mexida fortemente, e apresenta-se dura se estiver em repouso (Soares, 2000). Os fluidos de Casson mostram características reofluídificantes. Nos fluidos dependentes do tempo, a tensão de corte muda com o tempo a que está sujeito a forças, chamado o tempo de corte. Justifica-se este comportamento pela quebra das ligações entre as partículas ou moléculas, ou pelo distúrbio do repouso das moléculas mais longas (Soares, 2000) (Peifer, 2006).

## 2.2 Fluidos Newtonianos/ Não-Newtonianos

Em todos os fluidos, existem forças friccionais entre as moléculas, e conseqüentemente, estas apresentam uma certa resistência ao fluir, que corresponde, como já foi dito anteriormente, à chamada viscosidade (Scharamm, 1998). Quando é aplicada uma força ao volume de um material, ocorre uma deformação. Ou seja, se tivermos dois pratos, área  $A$ , separados pela altura do fluido ( $H$ ) e o prato superior for movido a uma velocidade  $\vec{V}$  por uma força  $\vec{F}$  em relação ao prato inferior que é fixo, então a lei de Newton propõe que a tensão de corte  $\frac{F}{A}$  é proporcional à taxa de deformação sofrida  $\frac{V}{H}$  (Figura 2.3). Esta constante é conhecida como a viscosidade dinâmica (Equação 2.1).

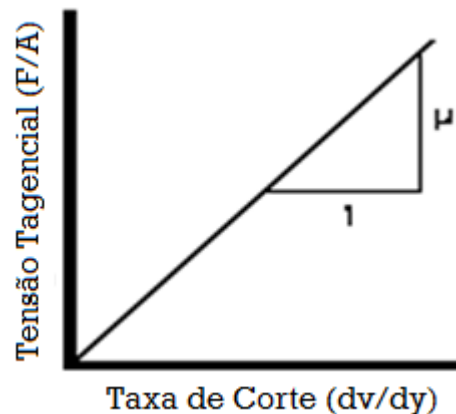


**Figura 2.3-** Representação esquemática do escoamento entre duas placas (Santos, 2009).

Portanto, a viscosidade pode ser obtida pela Equação 2.1:

$$\eta[\text{Pa.s}] = \frac{\text{tensão\_de\_corte}}{\text{taxa\_de\_corte}} \quad (2.1)$$

Como dito anteriormente, nos fluidos Newtonianos, a viscosidade é independente da taxa de corte a uma determinada temperatura: num gráfico da taxa de corte contra a tensão de corte, o resultado é linear e passa pela origem, como se pode ver na Figura 2.4 (Chaplin, 2013).



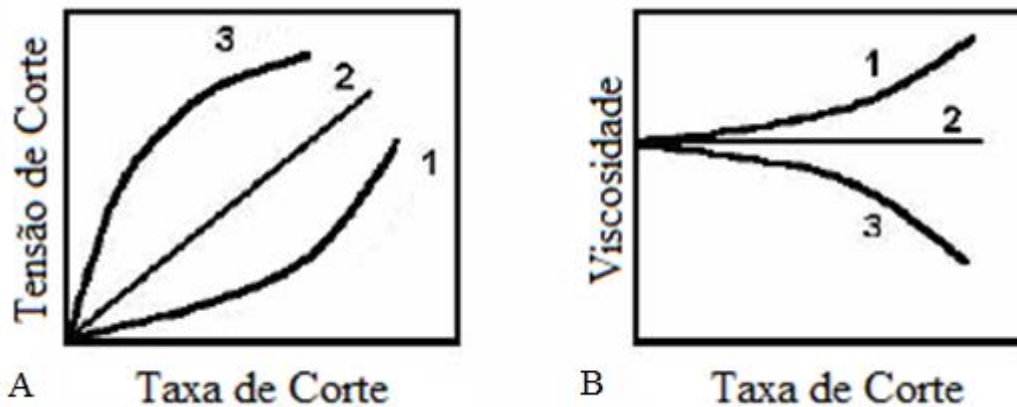
**Figura 2.4-** Relação da tensão de corte e da taxa de corte no cálculo da viscosidade (Gresham, 2008).

Aumentar a concentração de uma substância dissolvida ou dispersa, normalmente faz aumentar a viscosidade (fluido reoespessante), bem como aumenta o peso molecular do soluto. Quando se mede a viscosidade a taxas de corte  $<1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ , é importante assegurar que o ponto de medição é longo o suficiente. Especialmente para amostras com viscosidade elevadas e testadas a taxas de corte baixas. Caso isto não se verifique, podem obter-se efeitos dependentes do tempo, o que leva à medição da viscosidade transiente em vez da viscosidade desejada, a viscosidade estacionária. Esta é apenas dependente da taxa de corte aplicada, daí ser descrita como função de

viscosidade  $\eta(\dot{\gamma})$ , enquanto a viscosidade transitória depende da taxa de corte e do tempo. Quando  $(\dot{\gamma}) > 1$  [ $s^{-1}$ ], os efeitos transientes são mais curtos no tempo.

Para se caracterizar um fluido, é importante referir a curva de viscosidade deste. Os reômetros rotacionais (dispositivo de medição de propriedades reológicas, secção. 2.3) permitem o tratamento matemático da tensão de corte bem como da taxa de corte, utilizando testes dinâmicos ou estáticos. A curva de fluxo representa a dependência da tensão de corte com a taxa de corte, o que descreve o comportamento do fluxo em estado estacionário das amostras. Poderia ser chamada, em vez de curva de fluxo, "impressão digital reológica" das amostras, visto que os seus dados são de importância acrescida. Do mesmo modo, a curva de viscosidade representa a dependência da viscosidade com a taxa de corte. Ainda assim, muitos *fluidos* são comparados pela comparação da curva de fluxo e da curva de viscosidade, abrangendo um intervalo grande da taxa de corte (Scharramm, 1998).

Os resultados apresentados pela curva de fluxo podem ser rearranjados matematicamente, permitindo construir a correspondente curva de viscosidade (Scharramm, 1998). Na Figura 2.5 podemos visualizar esse conceito, em que 1 é um fluido tipo reoespessante, 2 fluido Newtoniano e 3 reofluidificante.



**Figura 2.5-** a) curva de fluxo; b) curva de viscosidade (Scharramm, 1998).

## 2.2.1 Fluidos com comportamento Reoespessante

Os fluidos reoespessantes são um tipo de fluido que se desvia da lei de Newton, e apresentam uma viscosidade que aumenta com a taxa de corte quando esta ultrapassa um valor crítico. Estes fluidos têm sido usados para melhorar o desempenho de tecidos para aplicações de protecção, por exemplo, balística (Kalman, et al., 2007). A ideia básica que justifica a sua utilização nesse tipo de situações não tem mudado muito: param a bala e reduzem o impacto para que cause menos danos, como é o caso do Kevlar (polímero sólido, resistente e leve), material que compõe a maioria dos coletes à prova de bala utilizados nos dias de hoje.

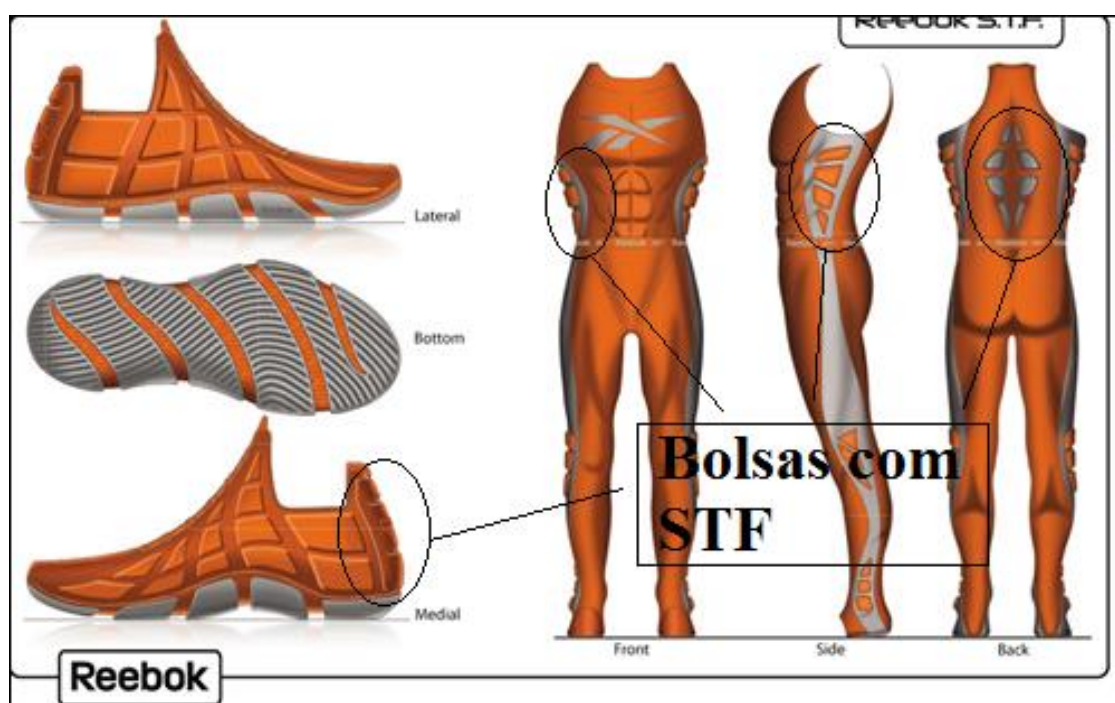
Um outro exemplo é que, antigamente utilizavam-se grandes fatos de materiais rígidos, inflexíveis, e principalmente pesados para protecção de espadas ou outros objectos cortantes, mas com a descoberta destes fluidos, será possível produzir o mesmo efeito mas com roupas muito mais práticas e ergonómicas, como se pode ver na Figura 2.6a (Wilson, 2012). Na Figura 2.6b está exemplificado o efeito de uma bala num colete com Kevlar.



**Figura 2.6-** a) Diferença entre roupas de protecção antigas; b) roupas mais recentes recorrentes a fluidos reoespessantes; b) *Kevlar* após impacto de uma bala (Wilson, 2012).

Os coletes à prova de bala necessitam de pelo menos 40 camadas de Kevlar para conseguirem produzir o seu efeito, e quando de um impacto, o fluido distribui a força produzida por toda a área que ocupa, o que faz reduzir a energia acumulada num só ponto. Um fluido reoessante bastante utilizado, adicionado a Kevlar de forma a aumentar a sua capacidade protectora, é constituído de partículas de sílica em polietilenoglicol (Wilson, 2012).

Muito recentemente, também a marca *Reebok* está a introduzir fluidos reoessantes nos seus produtos. Por exemplo, nos ténis ou outros equipamentos desportivos, mediante bolsas com este fluido, com a finalidade de proteger contra entorses, permitindo ainda total movimentação corporal, como ilustrado na Figura 2.7.

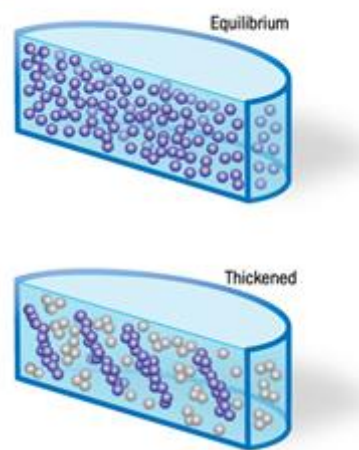


**Figura 2.7-** Exemplos de utilização de fluidos shear thickening em equipamentos desportivos por parte da marca Reebok (Wilson, 2010).

Numa suspensão com comportamento reoessante em estado de repouso, as forças inter-partículas mantêm as partículas dispersas separadas entre si, sem formar agregados (suspensão não floculada – Figura 2.9). No entanto, quando as forças de corte dominam, estas entram num estado de agregação, devido às forças de corte superarem

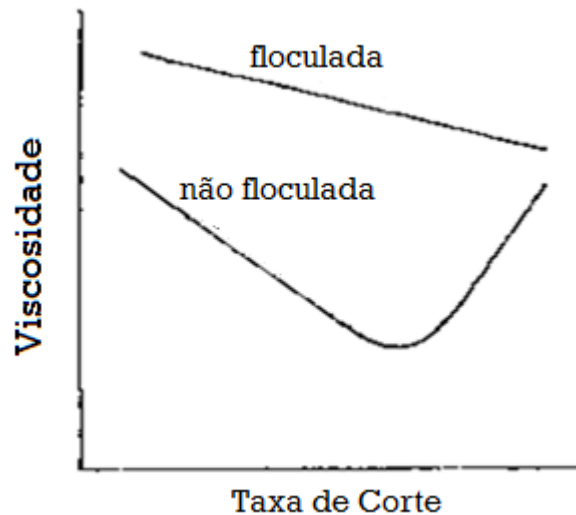
as de repulsão entre as partículas, acabando por se agregar, dando lugar a um aumento da viscosidade, e no limite começam a comportar-se como um sólido. Quando estas forças se afastam, as partículas voltam a dispersar-se, e até então o sólido volta a tornar-se num composto líquido. Ou seja, a viscosidade deste tipo de fluidos depende da taxa de corte aplicada sobre o fluido, e da interacção entre as partículas presentes na suspensão. Se utilizadas as partículas certas, um fluido newtoniano pode facilmente transformar-se num não-Newtoniano com comportamento reoespessante. Para além disto, este comportamento depende também da fracção de volume das partículas sólidas em suspensão num líquido. Quanto maior for a percentagem em volume, menor é a taxa de corte necessária para iniciar este comportamento, como iremos ver neste trabalho. Logo, os parâmetros que controlam o comportamento destes fluidos são principalmente o tamanho das partículas, a interacção das mesmas, a fracção de volume das partículas, que deve ser suficientemente grande para que as partículas sintam a presença umas das outras (Bettin, 2005), a sua forma, e a taxa de corte. Esta explicação física é conhecida como a teoria “hydroclustering”, sugerida primeiramente por Brady (Bossis, et al., 1989). A Figura 2.8 ilustra o comportamento das partículas quando a taxa de corte aumenta, formando aglomerados.

### Fluido Reoespessante



**Figura 2.8-** Formação dos hydroclusters com o aumento da taxa de corte (Chaplin, 2013).

A Figura 2.9 ilustra o comportamento de uma suspensão com aglomerados e sem aglomerados, relativamente à viscosidade em função da taxa de corte. Fluidos com aglomerados, a dada altura aumentam drasticamente a sua viscosidade, daí a teoria “hydroclustering” ser a teoria fundamental para fluidos reoessantes.

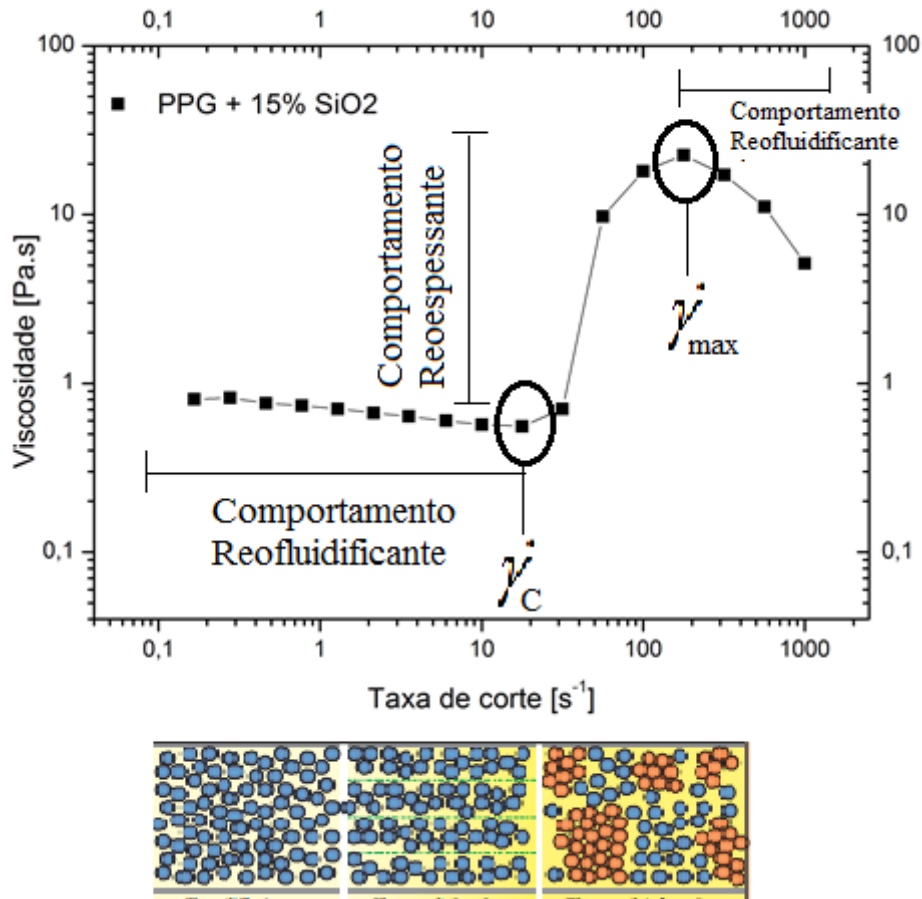


**Figura 2.9-** Diferença de viscosidade entre amostras “floculadas”-aglomerados e amostras “não-floculadas”- sem aglomerados (adaptada de **(Barnes, 1989)**).

A Figura 2.10 representa o tipo de comportamento reológico típico destes fluidos, que apresenta sempre três regiões distintas: uma primeira parte com comportamento reofluidificante (viscosidade decresce) a baixas taxas de corte onde as partículas, até então dispostas livremente, começam a organizar-se, levando à diminuição da viscosidade; uma segunda zona intermédia reoessante, onde as partículas começam a formar aglomerados/“hydroclusters”, fazendo aumentar a viscosidade drasticamente, tornando difícil o seu escoamento e a partir desse momento, após atingir a taxa de corte máxima, exhibe novamente um comportamento reofluidificante como consequência de as partículas começam a separar-se de novo umas das outras (Wagner, et al., 2009).

A Figura 2.10 demonstra também, na parte inferior, as principais diferenças relativamente às partículas na zona de repouso, de comportamento reofluidificante e de

comportamento reoessante, respectivamente. É de salientar que a curva de viscosidade da Figura 2.10 foi obtida neste trabalho aquando os testes reológicos.



**Figura 2.10-** Curva de viscosidade característica de um fluido com comportamento reoessante (acima). Formação de aglomerados no comportamento reoessante (laranja-abaixo).

### 2.3 Reometria Rotacional

A reometria rotacional é uma técnica experimental para medir as propriedades reológicas de fluidos complexos submetidos a um escoamento de corte simples, podendo dividir-se em reometria rotacional contínua e oscilatória. Tanto os materiais com um comportamento predominantemente líquido como os predominantemente sólido podem ser investigados, no entanto, para comportamento viscoso, utilizam-se testes

rotacionais contínuos, enquanto para avaliar a viscoelasticidade, utilizam-se testes oscilatórios, e qualquer um é destes testes desenvolvido por um reómetro rotacional (Mezger, 2005).

### 2.3.1 Reómetro Rotacional

Um reómetro rotacional é um dispositivo usado para medir a resposta de um fluido sob uma determinada deformação ou esforço de corte aplicados neste. O surgimento e evolução dos reómetros, permitiu determinar os parâmetros reológicos fundamentais de uma amostra em diferentes taxas de corte, obtendo-se o perfil reológico desse material (Betioli, et al., 2009).

As propriedades reológicas são fundamentais para obter informações sobre a estrutura de uma material, bem como o seu comportamento durante um qualquer processo. A validação dos resultados obtidos pelos testes reológicos depende do cumprimento de duas condições importantes:

- a. Aderência da amostra que está directamente em contacto com a superfície inferior do reómetro (condição de não deslizamento);
- b. Fluxo ser laminar, ou seja, que não apresente quaisquer turbulências.

Neste trabalho, o reómetro utilizado foi o reómetro rotacional *Physica MCR 301*, da *Anton Paar*, como ilustrado na Figura 2.11. A temperatura no reómetro é controlada por um prato Peltier, que por sua vez está refrigerado por água.



**Figura 2.11-** a) Reómetro rotacional *Anton Paar*; b) Reómetro com a geometria PP50/P2 montada.

Portanto, contrariamente aos viscosímetros, os reómetros apresentam uma maior sensibilidade e também um melhor controlo sobre temperaturas e taxas de corte, o que leva a resultados reológicos mais fiáveis. Os reómetros possuem ainda a escolha de diferentes métodos de análise, podendo ser tensão controlada ou taxa de corte controlada.

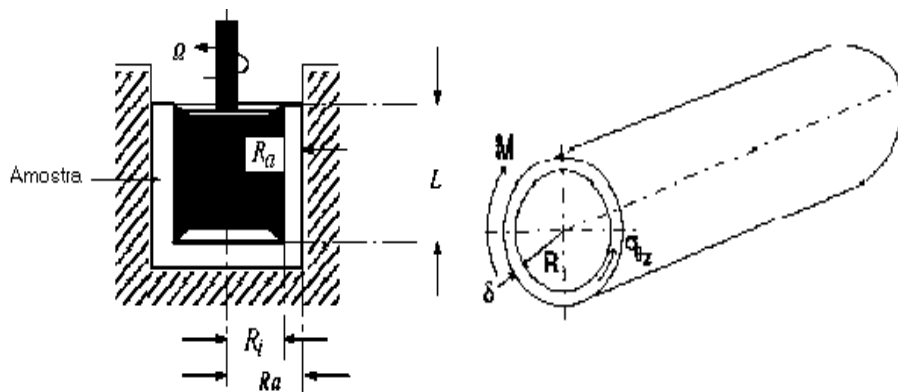
Este tipo de reómetro serve para impor testes rotacionais contínuos com o intuito de obter a curva de viscosidade, a qual representa o valor de viscosidade atingido pela amostra no estado estacionário sob aplicação duma taxa de corte constante. Quando medido a taxa de corte menores que  $1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ , é importante assegurar-nos que a duração da medição é suficiente para atingir um valor de viscosidade estacionário. O valor do ponto de medição deve ser tão longo quanto o inverso da taxa de corte, por exemplo, para  $(\dot{\gamma}) = 0.1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ ,  $t=10 \text{ [s]}$  (Mezger, 2005). Por outro lado, também é possível medir a resposta transiente do fluido, de modo a que, sob aplicação duma taxa de corte, seja medida a evolução temporal da viscosidade.

A amostra é carregada no sistema de medição ou geometrias, concebidos para aplicar um simples esforço de corte quando gira. Este sistema de medição está inserido num rolamento de ar praticamente sem atrito e movido por um motor de inércia muito baixa, que está acoplado a um codificador de posição de precisão ultra-alta (Mezger, 2005; Malvern Instruments, 1965). Entre cada medição é colocada uma nova amostra, para que a medição seguinte não seja afectada pela possível irreversibilidade da mesma (Wagner, et al., 2009). Existem diversas geometrias para análise, podendo ser:

**Geometria de Cilindros Concêntricos** – Promove a deformação por corte do material por meio da rotação de um sensor que se encontra no interior ou exterior da amostra. É sobretudo utilizado para a determinação de propriedades reológicas de materiais que tenham uma viscosidade de corte baixa, como por exemplo, solventes, suspensões de baixa concentração, etc. Isto é possível porque o cilindro estabelece uma grande área de contacto, logo é muito preciso quando em contacto com o fluido, além de que, com outras geometrias, o risco da amostra escorrer fora da zona de medida é maior. Se os materiais apresentarem uma viscosidade maior é mais difícil preencher o volume entre

os dois cilindros, pelo que deve optar-se por outro tipo de geometria, podendo ser cone e placa ou placas paralelas, como será explicado neste trabalho (Haminiuk, 2005).

As geometrias de cilindros concêntricos são desenhados para causar corte no fluido que se encontra localizado entre dois cilindros, tendo em conta que, um deles, roda e o outro mantem-se imóvel (Figura 2.12). Deste modo quando se mantem uma velocidade de rotação constante no cilindro interior, o fluido sofre uma taxa de corte constante e a sua resposta (tensão de corte) é obtida através da medida da torção no eixo do cilindro. O rácio entre a tensão de corte e a taxa de corte proporciona a viscosidade para a taxa de corte imposta. A curva de viscosidade é portanto uma composição de medidas de viscosidades a distintas taxas de corte

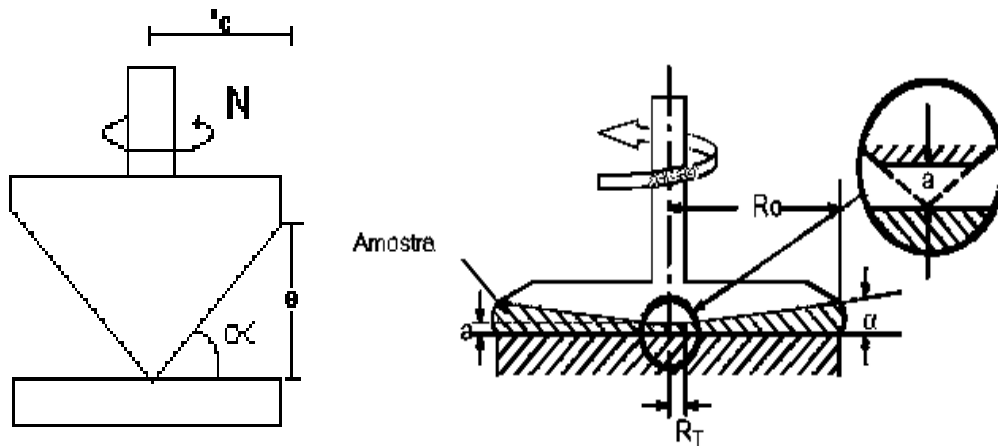


**Figura 2.12-** Esquema do reómetro de cilindros concêntricos, onde  $\Omega$  é a velocidade de rotação,  $R_a$  é o raio do cilindro exterior,  $R_i$  é o raio do cilindro de interior e  $L$  é a altura do cilindro interior. (Haminiuk, 2005).

Os sistemas de sensores podem ser modificados de forma ao cilindro exterior, usualmente denominado de copo, ser substituído por uma placa estacionária mais baixa, e o cilindro interior, o disco ou rotor, por um cone rotativo ou uma placa superior, o que origina as restantes geometrias possíveis do reómetro rotacional (Mezger, 2005).

**Geometria Prato-Cone** – É constituída por um prato plano horizontal (regime estacionário) e de um cone invertido, cujo vértice se encontra truncado e muito próximo da própria placa (ver Figura 2.13). Esse cone apresenta um ângulo, que normalmente é

pequeno (tipicamente  $0.5^\circ$ ,  $1^\circ$  ou  $2^\circ$ ). Esta geometria tem como vantagem principal o fato de assegurar uma taxa de corte uniforme em todos os pontos do fluido (Haminiuk, 2005).



**Figura 2.13-** Esquema da geometria cone-prato, onde  $a$  é a altura da ponta do cone truncada,  $\alpha$  é o ângulo do cone,  $R_C$  é o raio externo do cone,  $R_T$  é o raio da ponta do cone truncada (Haminiuk, 2005).

**Geometria Placa Paralela** – Sistema que é constituído por duas placas/pratos paralelas em forma de disco. Este sistema rege-se pelo raio  $R$  da placa e pela distância  $h$  entre as duas placas (ver Figura 2.14) (Haminiuk, 2005). A principal diferença do que acontece com a geometria cone-prato, é que a taxa de corte gerada no fluido quando se usa uma geometria prato-prato não é uniforme, pois varia com a posição no raio. Não obstante tem a vantagem de poder ter a superfície rugosa para garantir que não haja escorregamento algum da amostra em contacto com a geometria.

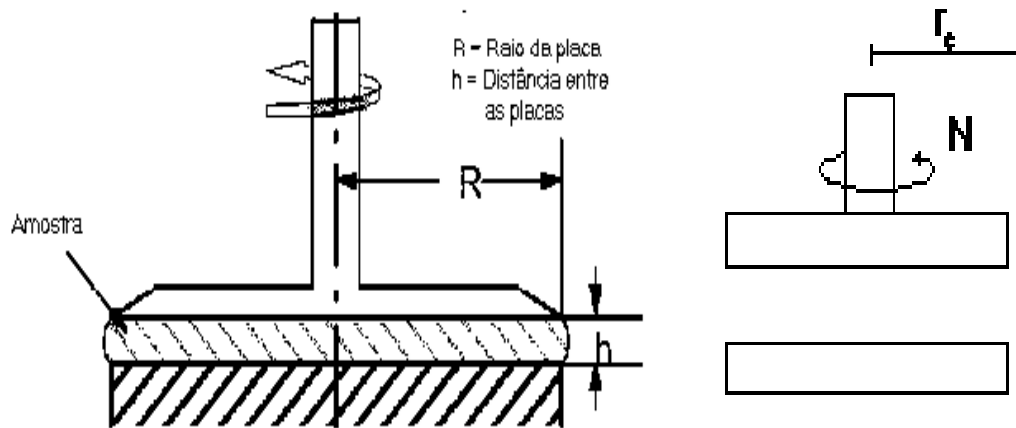
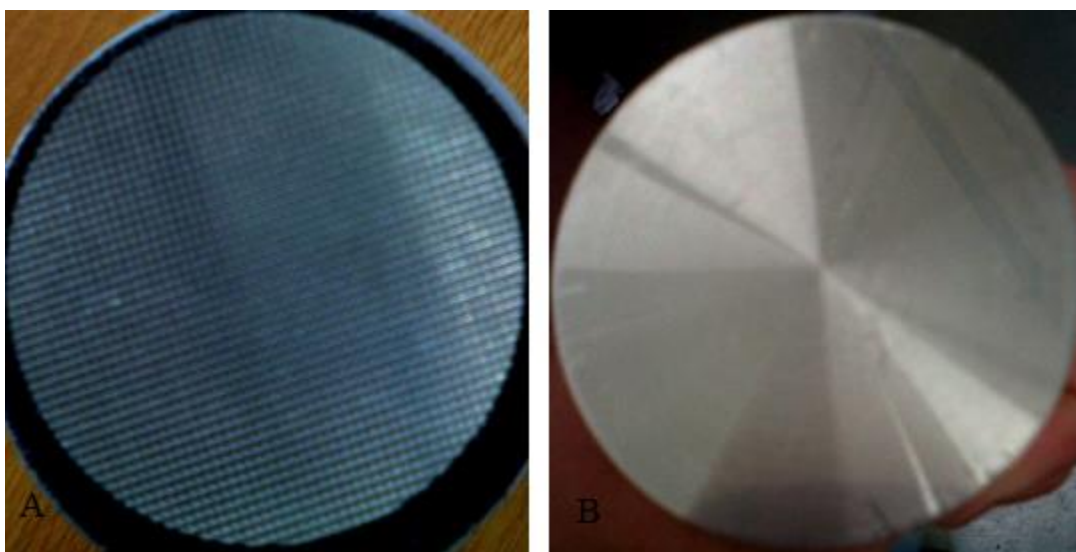


Figura 2.14— Esquema da geometria prato-prato (Haminiuk, 2005).

A amostra que se pretende analisar é colocada no prato fixo e a geometria movimenta-se perpendicularmente a este, prensando-a. Uma vez atingida a distância ideal entre o prato fixo e a geometria e da fixação da amostra, a geometria gira com uma determinada velocidade angular  $\omega$ , levando a que a amostra sofra um escoamento *Couette* (quando o fluido está num espaço confinado a sofrer um movimento relativo de superfícies e uma das razões pela qual acontece é devido ao arraste viscoso causado pela superfície em movimento (Edison, 2009)). É de extrema importância a quantidade de amostra que se coloca no reómetro, porque deve estar somente entre os limites da geometria, não a mais, nem a menos. Se por ventura for colocada em demasia, antes de a altura atingir o mínimo imposto, o próprio reómetro mostra uma mensagem de aviso. Nesta altura deve limpar-se o excesso com auxílio de uma espátula e depois continuar. Neste procedimento deve ainda ter-se o cuidado de ao limpar, não permanecem vestígios da amostra por cima da geometria, pois podem influenciar os resultados. O software que permite a utilização do reómetro, permite também efectuar diversas alterações na temperatura e na distância entre a geometria e o prato fixo, entre outros. Finalmente, os resultados obtidos aparecem na forma de gráfico, onde é possível seleccionar as grandezas que se querem visualizar (viscosidade, tensão, taxa de corte, etc). Poderão existir alguns resultados rejeitados e que estão relacionados com a incerteza do reómetro ou com o aparecimento de escoamentos secundários

(instabilidade inercial) (Santos, 2009). O protocolo de utilização do reómetro encontra-se no Capítulo 7 (Anexo B).

Uma vez que foram realizadas três amostras com concentrações de partículas de Sílica diferentes (5%, 10% e 15%), e dado que nas amostras mais concentradas a geometria prato-prato liso deslizava sobre a amostra, o que impedia a medição correcta dos parâmetros reológicos, optou-se por uma geometria prato-prato serrada (Figura 2.15a), que tem uma maior capacidade de prender a amostra, facilitando a sua rotação a taxas de corte elevadas e assegurando a condição de não deslizamento. Assim, durante todo o teste, a amostra manteve-se em contacto com as duas partes do reómetro (geometria e base, onde esta é colocada), o que levou a resultados mais fiáveis que uma geometria prato-prato lisa. Na Figura 2.15 pode ver-se a principal diferença entre estas geometrias.

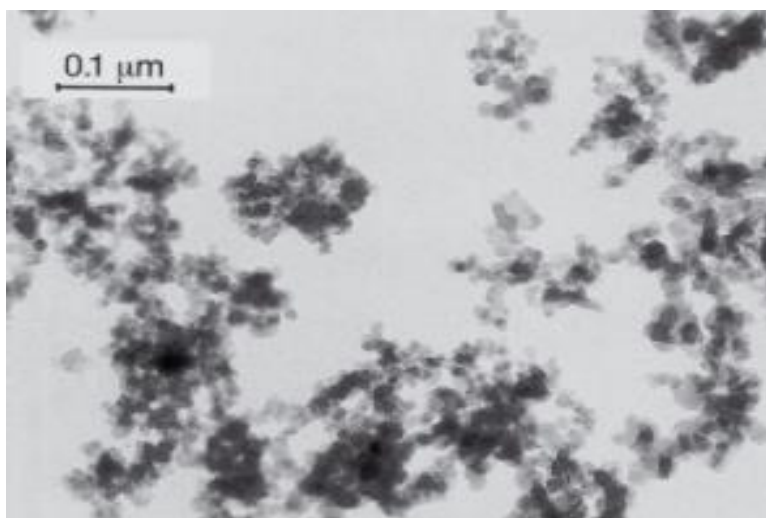


**Figura 2.15-** Geometrias: a) prato-prato serrada; b) prato-prato liso.

## 2.4 Materiais

### 2.4.1 Sílica Fumada (SiO<sub>2</sub>)

A sílica é um componente de areia e quartzo, sendo a sílica fumada composta de esferas de sílica de tamanho sub-micrónico, fundidas em cadeias muito curtas, mas altamente ramificadas. As esferas são uniformes em tamanho, variando apenas o tamanho das cadeias. Na Tabela 2.1 estão as propriedades principais de cada marca utilizada. Este tipo de sílica é obtida ao queimar-se tetra-cloreto de silício numa chama de hidrogénio-oxigénio a 1800°C, produzindo esferas de dióxido de silício livres de poros, daí receber o nome de sílica fumada. As esferas colidem umas com as outras, fundindo-se e formando uma cadeia tridimensional de agregados, que podem ter entre 10-30 esferas (Sigma-Aldrich, 1951). Na Figura 2.16 pode ver-se a agregação das partículas.



**Figura 2.16-** Agregação das partículas de Sílica (Evonik Industries, 2010).

A sua superfície química é hidrófila devido á presença de grupos hidroxilo/silanol (-OH) na superfície. Estes grupos deixam que as partículas se liguem entre si, quando misturadas em líquidos não polares, por meio de ligações de hidrogénio, sendo responsáveis pela capacidade de formar uma estrutura de rede (Galindo-Rosales, et al.,

2009). A sílica fumada pode ser aplicada em tintas e revestimentos, adesivos e selantes, tintas de impressão, ser um composto de cabos e géis cabo, protecção de plantas e ainda cosméticos (Evonik Industries AG , 2011).

Neste trabalho foram utilizadas partículas de sílica *AEROSIL 200*, que é uma sílica fumada hidrofílica, e neste caso em concreto, com uma área superficial de 200 [m<sup>2</sup>/g], da produtora *EVONIK* e posteriormente, na produtora *Sigma Aldrich* (Figura 2.17). Na Tabela 2.1 estão as propriedades principais de cada marca utilizada.

**Tabela 2.1-** Propriedades das sílicas fumadas hidrofílica utilizadas.

	Evonik	Sigma Aldrich
Área de superfície [m <sup>2</sup> /g]	200 ± 25	200 ± 25
Tamanho da partícula (µm)	0.15-0.3	0.2-0.3

Mais informações sobre utilização encontram-se no Capítulo 7, Anexo G.



**Figura 2.17-** Embalagem representativa de cada marca de sílica utilizada: a) Sílica fumada Aerosil 200-Evonik; b) Sílica fumada- Sigma Aldrich.

## 2.4.2 Polipropileno Glicol (PPG)

O polipropileno glicol ( $C_3H_8O_2$ ) é um polímero e portanto, pode definir-se como moléculas grandes formadas pela repetição de unidades químicas mais simples, que são os chamados monómeros de repetição (Marques, 2011). Sem que lhe sejam adicionadas quaisquer partículas, este polímero comporta-se como Newtoniano.

As moléculas de PPG são moléculas polares, e ao serem misturadas com o *AEROSIL 200*, gera-se uma suspensão não floculada. A capacidade de formação de enlace entre as partículas de sílica vê-se inibida pela presença das moléculas de PPG, ligando-se estas às superfícies das partículas mediante ligações de hidrogénio, impedindo a formação duma estrutura tridimensional por parte das partículas de sílica.

Neste trabalho utilizou-se PPG 400 da marca *Sigma Aldrich*, cujas propriedades mais importantes se encontram na Tabela 2.2 e as recomendações de utilização no Capítulo Anexos, Anexo F.

**Tabela 2.2-** Propriedades físicas do PoliPropileno Glicol 400 a 20°C (Sigma Aldrich, 2011) .

Propriedades físicas	PPG400
Mw [g/mol]	400
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.01 a 20°C
$\mu$ [Pa.s]	100 a 20°C

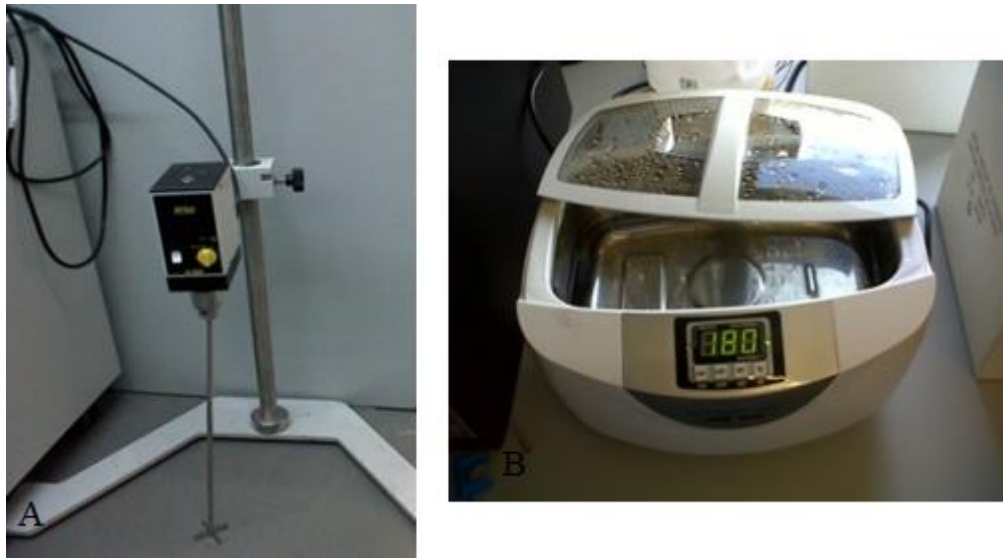
## 2.4.3 Preparação da amostra

A amostra é obtida pela mistura de partículas de  $SiO_2$  e PPG, tendo por base a Equação 2.2, que serve para efectuar o cálculo da quantidade de partículas em massa, para determinada concentração,

$$x\% [w/w] = \frac{[SiO_2]}{[SiO_2] + [PPG]} \times 100 \quad (2.2)$$

tendo em conta que todas as amostras foram idealizadas para 50 [g] em massa do solvente PPG, e para concentrações de 5%, 10% e 15% de partículas de sílica.

Após a mistura manual, levou-se a misturar mecanicamente, numa misturadora *CAT R50* (Figura 2.18a), a 200 [rpm] durante três horas, e posteriormente levou-se a um banho de ultra-sons *Digital Ultrasonic Cleaner* (Figura 2.18b), durante uma hora, para separar possíveis aglomerados de partículas e finalmente a uma bomba de vácuo durante uma hora para retirar todas as bolhas de ar formadas.



**Figura 2.18-** a) varinha de mistura; b) ultra-sons utilizado na preparação das amostras.

Além destas amostras, foi também preparada uma concentrada a 17% (Figura 2.19), que foi impossível de medir no reómetro, mesmo com a geometria serrada devido à elevadíssima viscosidade.



**Figura 2.19-** Amostra de 17% [w/w] de SiO<sub>2</sub> em PPG no momento da misturação.

Todas as amostras referidas foram também preparadas com adição de 1% de álcool, com o intuito de diminuir a viscosidade das amostras e facilitar assim a sua impregnação nas esponjas para a realização dos testes de impacto (ponto 2.6.1). Foram realizados igualmente os testes reológicos, de forma a perceber como o álcool modifica a sua reologia, chegando-se à conclusão que, se deixado a evaporar durante 7 dias, a curva de viscosidade obtida é muito semelhante à das amostras sem qualquer adição de álcool, como se poderá ver nos resultados deste Capítulo. A Tabela 2.3 identifica a nomenclatura dada a cada amostra preparada.

**Tabela 2.3-** Nomenclatura das amostras.

<b>Amostra</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>
<b>Sem álcool</b>	A	B	C
<b>Com álcool</b>	A1	B1	C1

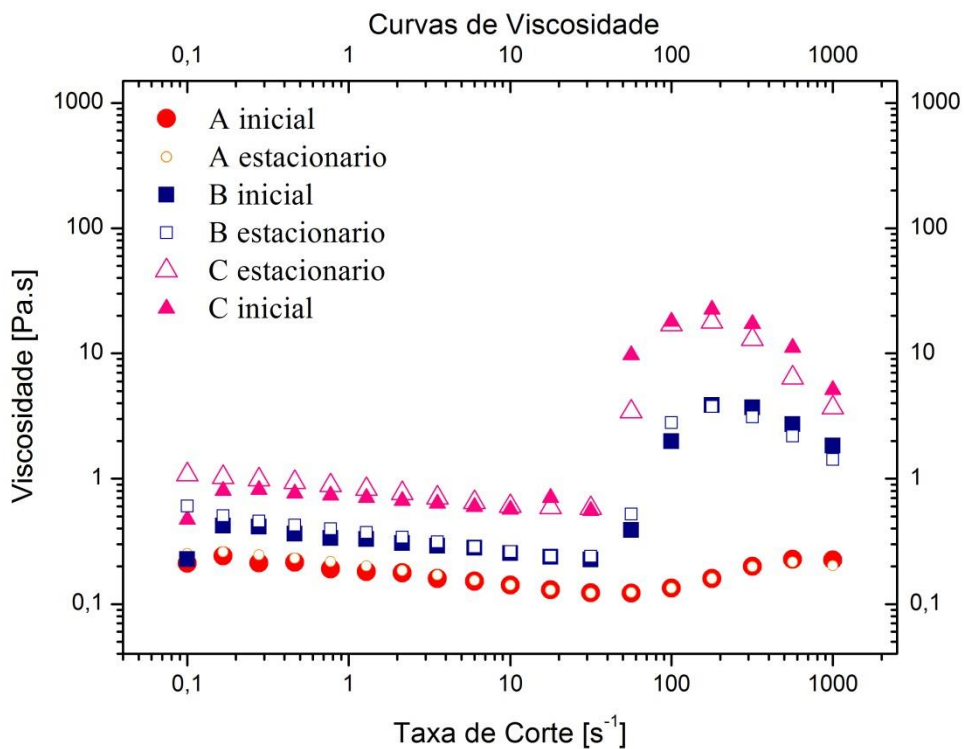
## 2.5 Resultados Reológicos

As curvas de viscosidade do fluido foram medidas no reómetro rotacional de tensão controlada, ilustrado na Figura 2.11, a 25°C controlados pelo termóstato do

reómetro. A amostra passou por três fases distintas: pré-corte, descanso e finalmente, a medição da curva de viscosidade. A primeira fase, pré-corte, tem como objectivo eliminar quaisquer tipos de historial na amostra (Rosales, et al., 2009), a uma taxa de corte constante de  $1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ , durante  $300 \text{ [s]}$  que mostraram ser suficientes para atingir o estado estacionário. A segunda parte do teste foi o repouso do fluido, levando a que ocorresse um equilíbrio estrutural (Rosales, et al., 2009). Concluiu-se que  $60 \text{ [s]}$  era o tempo suficiente para que as amostras atingissem esse equilíbrio. Finalmente, realizou-se a etapa de mais interesse, variando a taxa de corte em 18 saltos ascendentes de  $0.1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$  até  $1000 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ , com duração suficiente até que, em cada caso, fosse atingido um valor de viscosidade constante. Foram utilizados 18 valores de taxa de corte diferentes repartidos logaritmicamente entre  $0.1$  e  $1000 \text{ [s}^{-1}\text{]}$ . Esta terceira e última parte variou entre 2h a 3h, dependendo da amostra analisada.

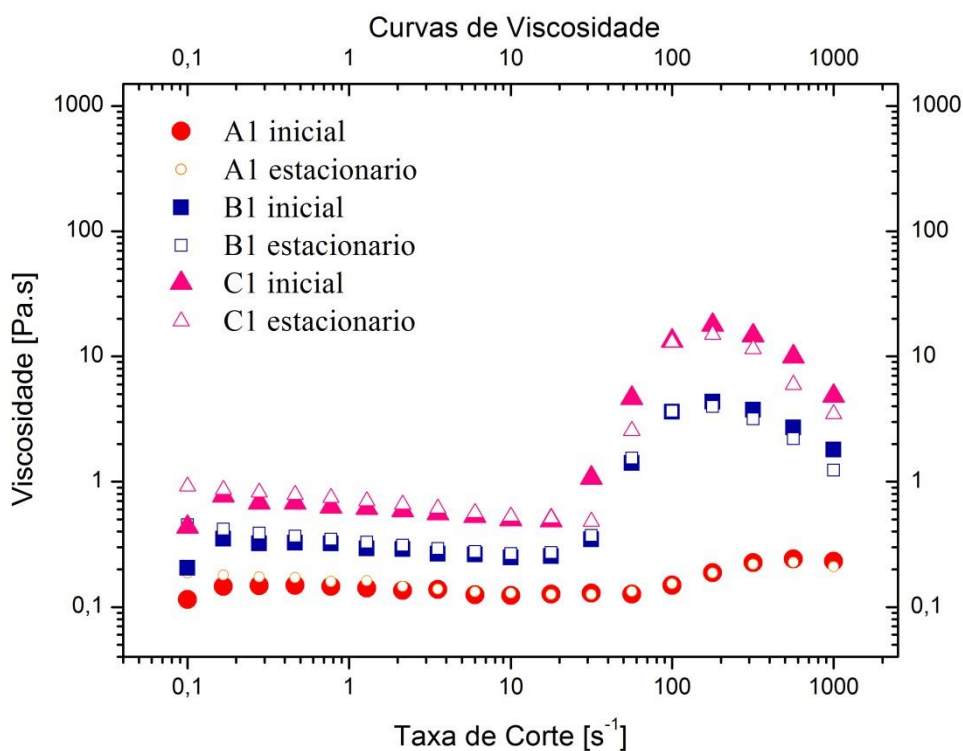
Foram realizados 3 testes distintos com cada amostra, de modo a garantir a reprodutibilidade da medida da viscosidade e do comportamento reoespessante. Além disso, foram estudadas duas curvas de viscosidade: uma com os valores iniciais da resposta transitória para cada valor de taxa de corte aplicada, outra com os valores correspondentes ao estado estacionário. Quer isto dizer que foram comparadas as curvas de viscosidade desde o primeiro momento em que a taxa de corte começa a fazer efeito na amostra, e no momento em que já não altera mais o valor da viscosidade alcançada. Esta comparação é importante para conhecer as propriedades reológicas no primeiro momento em que o fluido é accionado, ou seja, nos testes das esponjas, quando o peso embate na esponja no primeiro momento.

Os testes reológicos são ainda de extrema importância pois permitem obter os parâmetros do modelo reológico a utilizar no Capítulo 4. A Figura 2.20 ilustra as diversas curvas de viscosidade no estado estacionário e no estado inicial para as amostras sem álcool, e a Figura 2.21 para as amostras com álcool.



**Figura 2.20-** Curva de viscosidade do estado inicial e estado estacionário para todas as amostras sem álcool.

Como mostra a Figura 2.20, a resposta do estado inicial e do estado estacionário é muito semelhante, daí optar por um ou pelo outro para a realização do Capítulo 4, era indiferente.



**Figura 2.21-** Curva de viscosidade do estado inicial e estado estacionário para todas as amostras com álcool.

Também pela Figuras 2.20 e 2.21 se verifica o quão semelhante são os resultados para as amostras com adição de álcool, após uma semana a evaporar.

As Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6 seguintes apresentam os valores mais importantes, quer de taxa de corte (crítica e máxima) quer de viscosidade das amostras sem álcool. Apesar das diferenças pouco relevantes entre os resultados, optou-se por utilizar a resposta do estado estacionário, porque como o próprio nome indica, ocorre quando já não há mais alterações significativas do valor de viscosidade, por mais tempo que a força esteja a ser aplicada.

**Tabela 2.4-** Resultados de viscosidade obtidos para a amostra A.

Taxa de Corte [ $s^{-1}$ ]	Viscosidade I [Pa.s]	Viscosidade EE [Pa.s]
$\dot{\gamma}_c$ - 31.6	0.123	0.12258
$\dot{\gamma}_m$ - 563	0.22767	0.21467

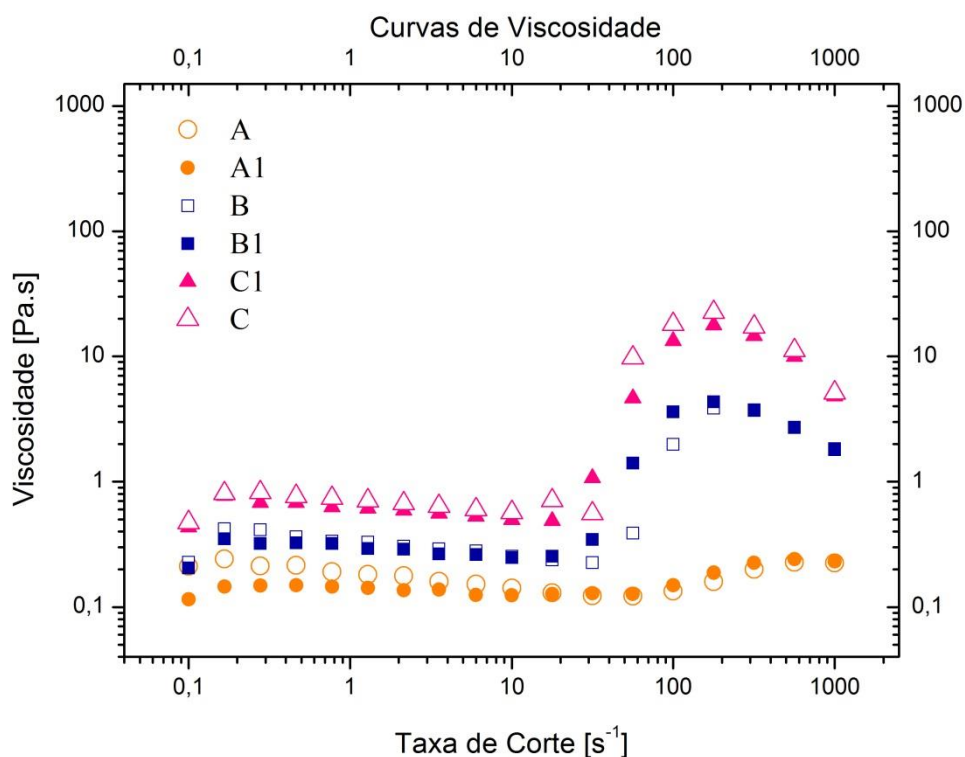
**Tabela 2.5-** Resultados de viscosidade obtidos param a amostra B.

Taxa de Corte [ $s^{-1}$ ]	Viscosidade I [Pa.s]	Viscosidade EE [Pa.s]
$\dot{\gamma}_c$ - 17.8	0.22567	0.23945
$\dot{\gamma}_m$ - 173	3.433	3.77121

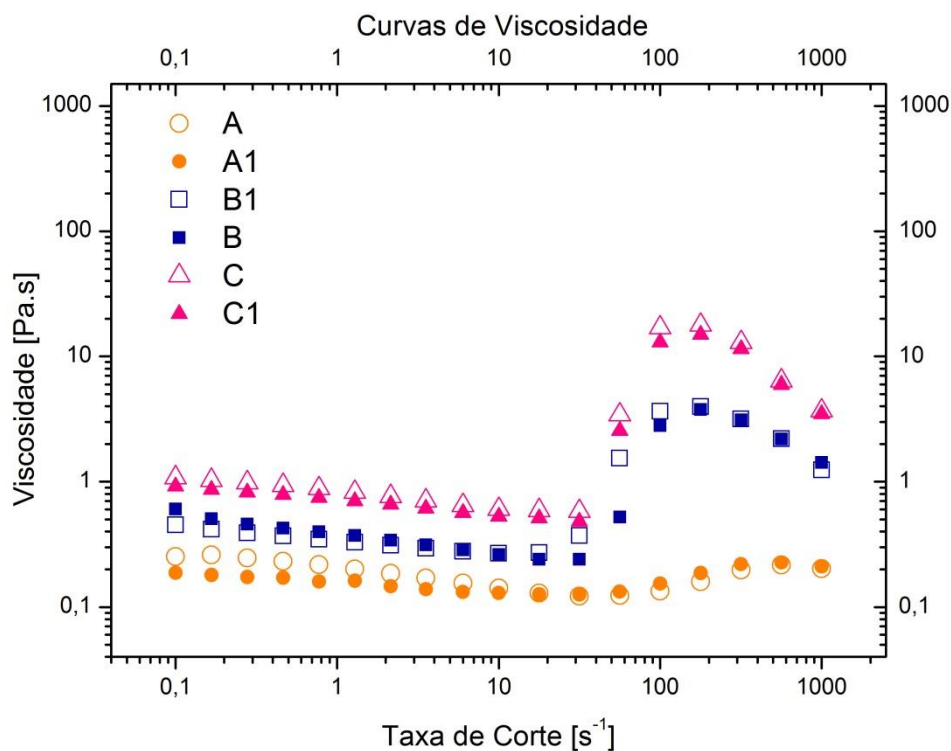
**Tabela 2.6-** Resultados de viscosidade obtidos param a amostra C..

Taxa de Corte [ $s^{-1}$ ]	Viscosidade I [Pa.s]	Viscosidade EE [Pa.s]
$\dot{\gamma}_c$ - 17.8	0.58094	0.556
$\dot{\gamma}_m$ - 173	22.46667	17.80303

As figuras seguintes mostram as curvas de viscosidade no estado inicial (Figura 2.22) e no estado estacionário (Figura 2.23) de todas as amostras com e sem álcool.



**Figura 2.22-** Curva de viscosidade para a resposta do estado inicial para todas as amostras.



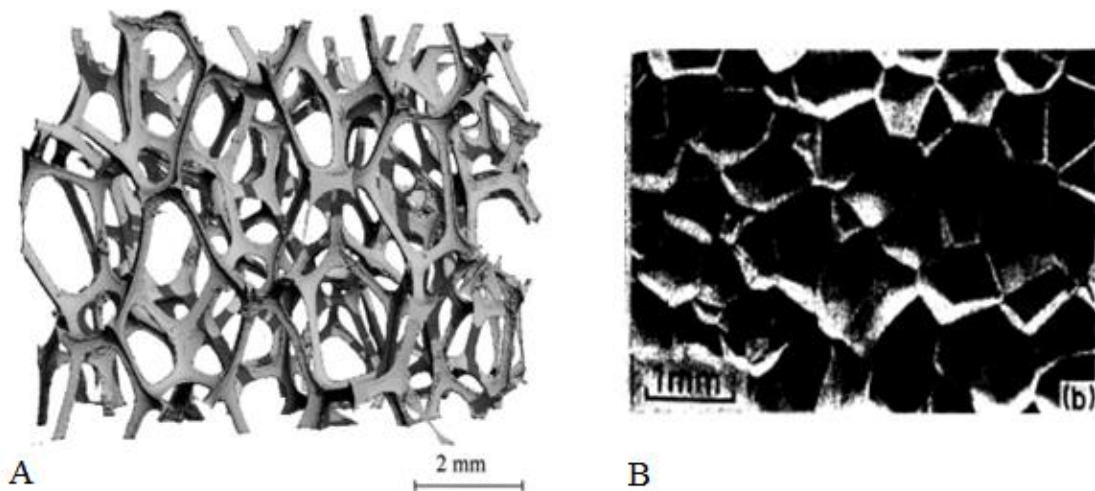
**Figura 2.23-** Curva de viscosidade para a resposta do estado estacionário para todas as amostras.

Após uma semana de evaporação do álcool pode ver-se o quão próximo são os resultados entre as amostras. A curva de viscosidade é de tal maneira semelhante, que justificou o uso de álcool sem que este altera-se as propriedades reológicas do fluido.

Vemos também que a taxa de corte mínima e máxima ocorrem mais tarde quanto menor a concentração de partículas, ao contrário das demais amostras, em que ocorre mais cedo. Facilmente se pode verificar a diferença drástica entre as curvas de viscosidade, conforme a percentagem de partículas: a curva das amostras *A* é bastante suave, podendo haver dificuldade em perceber onde está o comportamento reoespesante, mas no caso das amostras *B* e *C* é bastante evidente o início e o fim desse comportamento.

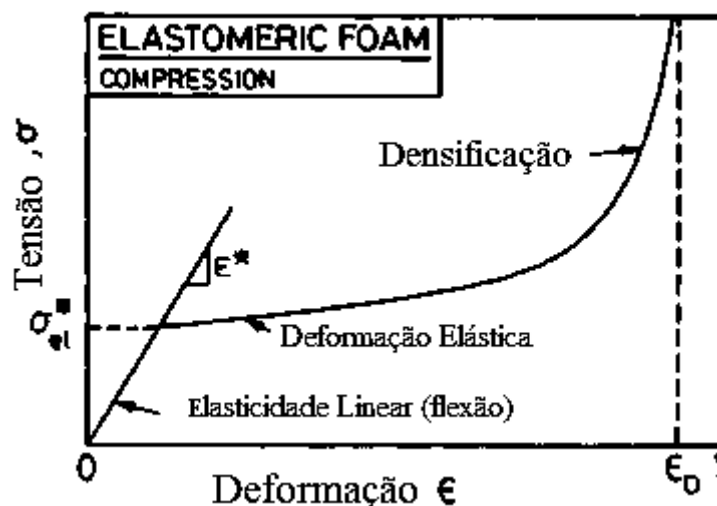
## 2.6 Espumas

Existem diversos tipos de esponjas ou espumas, e com diversas utilidades. Na sua grande maioria são fabricadas de poliuretano (PU), podendo ser mais rígidas, ou mais flexíveis. O PU é um polímero com vasta utilização, tais como fibras, carpetes, selantes, podendo as espumas dividirem-se em células abertas ou células fechadas (Figura 2.24). Uma espuma de células abertas tem uma microestrutura bastante complexa, consistindo numa rede de ligamentos interligados entre eles, formando as arestas das células (Jang, et al., 2007). Nas espumas de células fechadas a presença de ligamentos em cada célula é muito menor. Neste trabalho utilizaram-se espumas com células abertas, para permitir o escoamento do fluido reoessante no seu interior.



**Figura 2.24-** a) Imagem de tomografia computadorizada de uma espuma de poliuretano células abertas (Jang, et al., 2007); b) imagem tridimensional de uma espuma de células fechadas de poliuretano (Bettin, 2005).

A resposta do material de uma típica espuma elastomérica é caracterizada por um regime linear inicial, seguida de uma longa subida e que termina numa região de densificação, como mostra a Figura 2.25.



**Figura 2.25-** Esquemática da curva tensão ( $\sigma$ )- deformação ( $\epsilon$ ) de uma espuma, mostrando os três regimes: elasticidade linear, colapso e densificação (adaptada de (Bettin, 2005)).

O regime de maior importância é o regime do colapso, quando acontece a cedência da estrutura celular da espuma. A importância do valor da tensão neste ponto deve-se ao facto de ser esta a região da espuma onde a absorção da energia acontece. Como a espuma colapsa, as células da parede ficam próximas umas das outras até que quebram juntas, e neste ponto, denominado de densificação da espuma, a tensão aumenta descomunalmente muito rapidamente (Bettin, 2005). Desta forma, as propriedades das esponjas dependem de dois factores: um é a geometria da estrutura e outro são as propriedades do material de que é composto, sendo que as propriedades do material se referem à densidade  $\rho$ , ao módulo de Young's  $E$  e ao campo de deformação plástica,  $\sigma$  (Bettin, 2005).

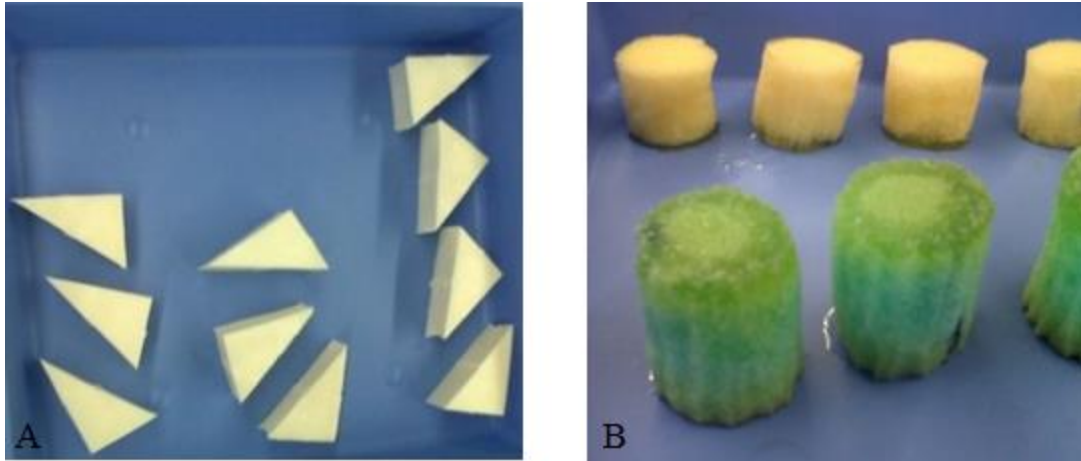
Inicialmente, neste trabalho, foram utilizadas esponjas de diferentes porosidades como mostra a Figura 2.26. Estas esponjas diferenciavam-se uma da outra na altura, e com PUs diferentes, o que significa que a consistência era diferente. A cruz sobre a espuma significa que esta não cumprira com o objectivo pretendido neste trabalho.



**Figura 2.26-** Diferentes espumas utilizadas, com diferentes porosidades.

No entanto, observou-se que as esponjas com maior porosidade não aguentavam o fluido durante muito tempo, o que levava a perdas elevadas deste, sem qualquer aplicação de força sobre a mesma, não servindo para o efeito desejado. O objectivo era conseguir uma esponja comercial, com uma porosidade tal que permitisse absorber e manter o fluido nos seus poros. Assim, neste trabalho foram utilizadas esponjas de PU da marca espanhola *Disna* e com 95% porosidade, fabricadas para fins de maquilhagem. Estas apresentam uma porosidade que capaz de reter o líquido no seu interior durante muito tempo, apenas libertando o mesmo após o impacto.

Na Figura 2.28 é demonstrada a diferença entre as esponjas inicialmente testadas com as esponjas utilizadas no trabalho. Facilmente se verifica a perda de fluido quando as espumas coloridas estão em repouso, contrariamente às espumas brancas, onde não se verifica qualquer perda de fluido devido à sua porosidade. Finalmente, estas esponjas foram preenchidas com 25% do seu volume vazio (ver Anexo J) com as amostras *A1*, *B1* e *C1* e deixaram-se em repouso durante uma semana para garantir a evaporação do álcool, tal como se tinha feito nos ensaios reológicos.



**Figura 2.27-** Espumas impregnadas com o fluido, não sujeitas a qualquer força.  
a) menor porosidade; b) maior porosidade.

### 2.6.1 Testes de impacto

A segunda e última parte da primeira fase deste trabalho era realizar os testes de impacto. Estes testes são fundamentais para provar a veracidade da teoria sobre os fluidos reoespessantes. Desta forma, após impregnar o fluido nas diversas espumas, realizaram-se os testes, aplicando quatro energias de impacto diferentes, sendo elas: 2, 5, 10 e finalmente, 20 [J]. Nesta fase foram utilizadas as amostras *A1*, *B1* e *C1* e ainda foram testadas a amostra de 17% SiO<sub>2</sub> e espumas vazias, bem como espumas impregnadas apenas com PPG e testes com a borracha preta que servia de protecção ao sensor incrustado no peso de aço que era lançado sobre a esponja.

A espuma foi colocada em cima de uma borracha dura, que por sua vez estava colocada em cima de uma barra de aço (Figura 2.29). A finalidade deste procedimento era evitar que o sensor incrustado no peso, ao ser largado, atravessasse a esponja e batesse directamente na barra de aço, podendo danificá-lo. Alterando as espumas, e o valor da altura da massa aplicada, foram largados os pesos em queda livre (Energia Potencial) e gravado o procedimento com uso de uma câmara de alta-velocidade (*Casio, EX-FH25*), a 1000 imagens por segundo. Devido a esse elevado número de imagens, foi necessário utilizar uma luz auxiliar de forma a serem notáveis as filmagens, já que, quanto maior esse número mais escura se torna a imagem pela câmara.



**Esponja**

**Borracha Preta**

**Barra de aço**

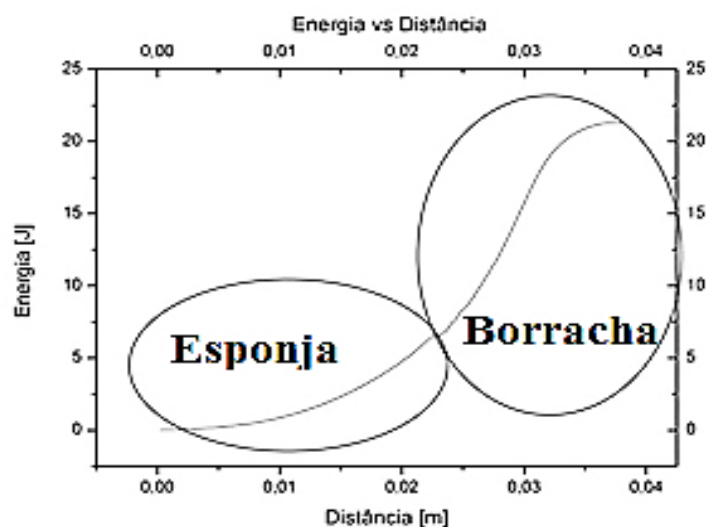
**Figura 2.28-** Equipamento utilizado nos testes de impacto- *Instrumented impact testing machine: ROSAND IFW5HV – Instrumented Falling Weight Impact Tester, type 5 HV*: a) montagem do equipamento; b) apresentação do software utilizado; c) Exemplificação da montagem dos materiais.

A Tabela 2.7 apresenta alguns parâmetros que são fixos para todos os testes.

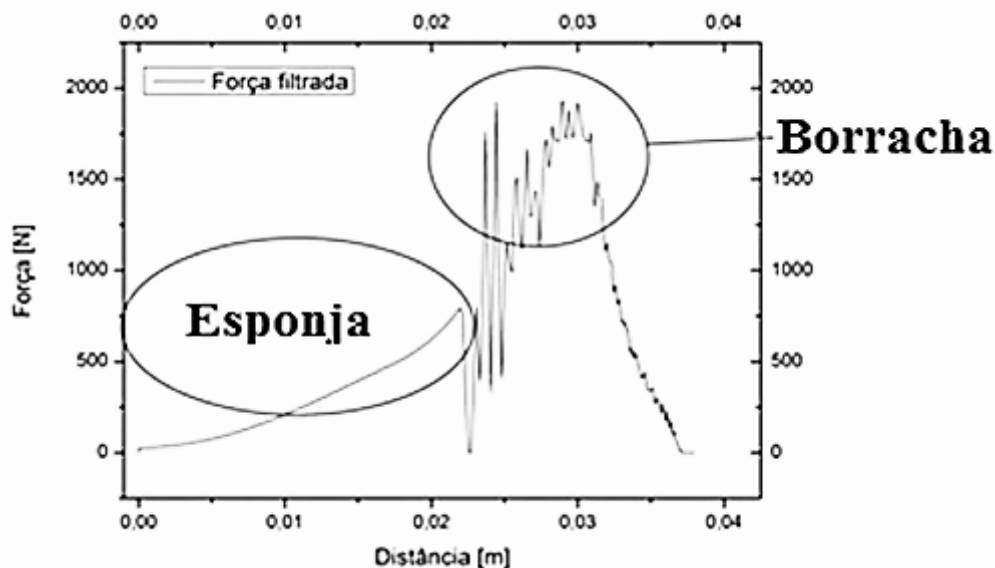
**Tabela 2.7-** Parâmetros iniciais e fixos para todos os testes.

Parâmetros	Valores
Massa [kg]	3.775
Temperatura [°C]	20
Pontos	1000

Os testes foram realizados com a esponja vazia, com a esponja impregnada só com PPG, com a borracha preta (visível na Figura 2.29), e com as espumas impregnadas com as amostras *AI*, *BI*, *CI* e 17%. As Figuras 2.30 e 2.31 mostram os resultados para todos os testes. Nestes resultados obtidos é importante identificar o início do teste, o pico que corresponde à energia máxima absorvida e finalmente o final do teste, quando a distância máxima é atingida, correspondente à espessura da esponja (25 [cm]). Foi com esse objectivo que se realizaram os testes só com a borracha preta, para tornar mais fácil a identificação de cada região nos resultados. Tudo o que ultrapassa a espessura da esponja, é considerado como a resposta da borracha e não é tido em conta na análise dos testes.



**Figura 2.29-** Exemplo de resultados obtidos para a amostra A, 20 [J]: Força *versus* Distância.

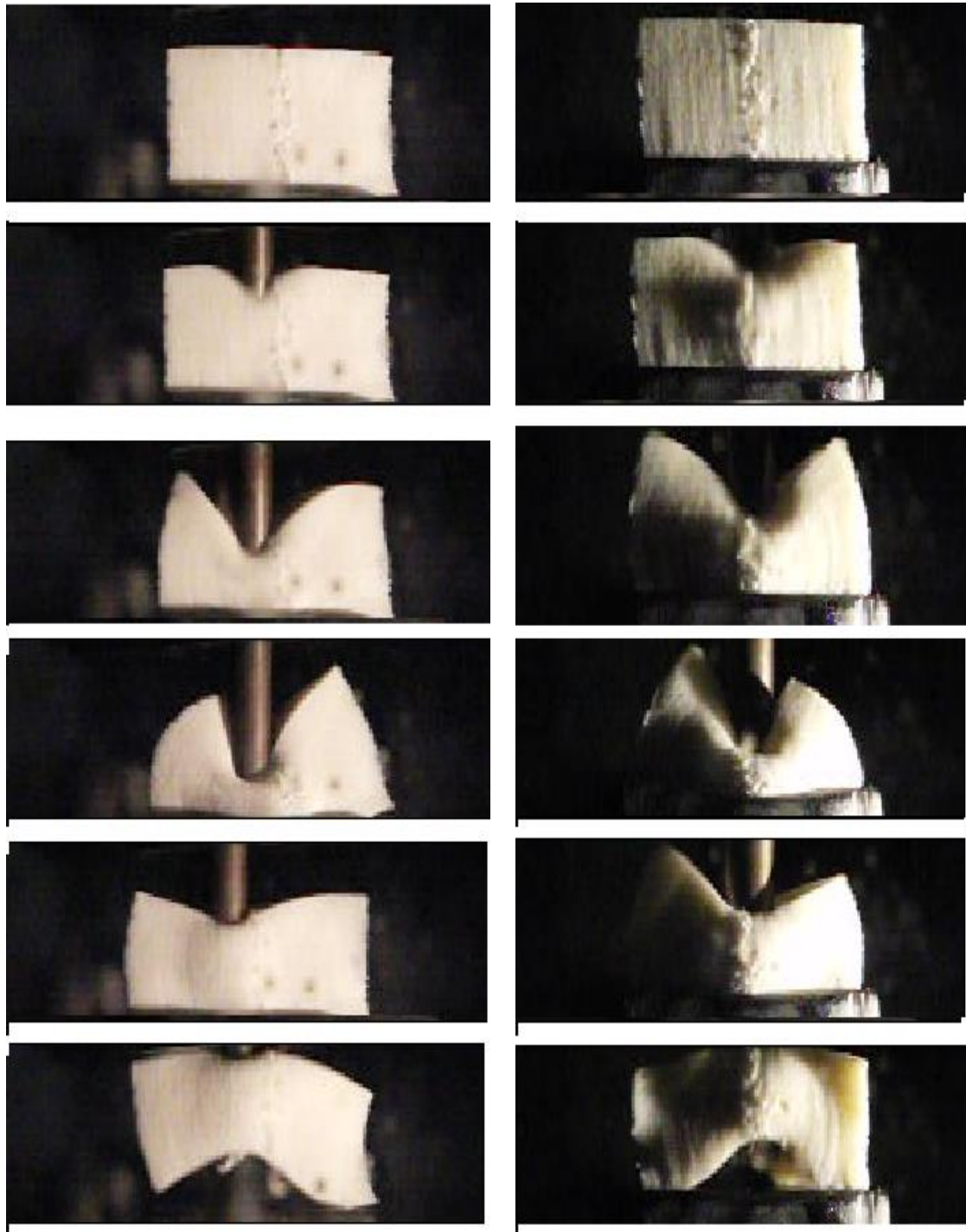


**Figura 2.30-** Exemplo de resultados obtidos para amostra A, [20J]: Energia Absorvida *versus* Distância.

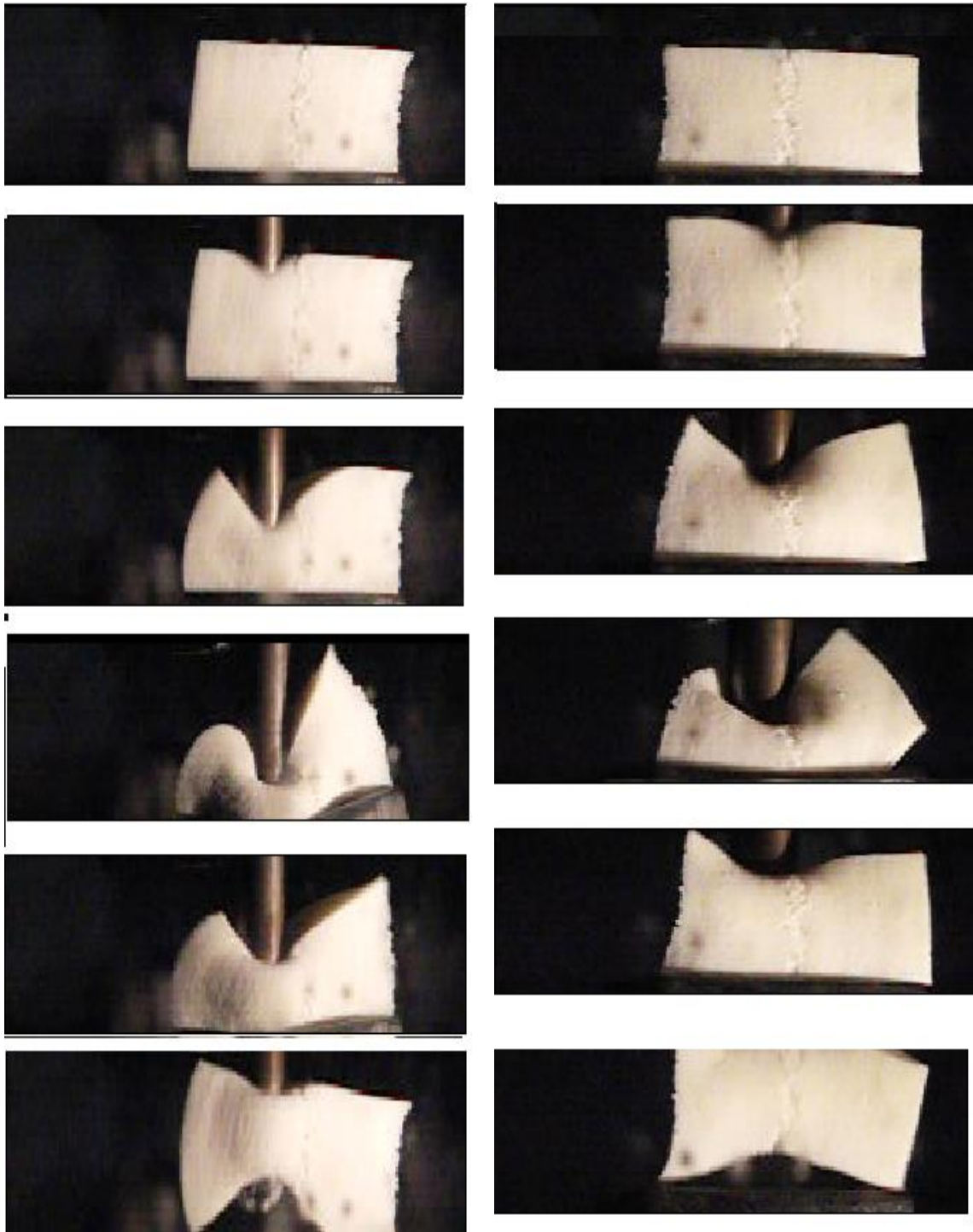
### 2.6.1.1 Resultados dos testes de impacto

Para que o fluido reoessante que está a preencher a esponja faça o seu melhor na absorção de energia durante o impacto, é preciso que a taxa de corte que este sofre esteja perto do taxa de corte máxima, onde a viscosidade é também máxima. Isto vai depender da geometria dos microcanais dentro da esponja e da intensidade do impacto.

Nas Figuras 2.32 e 2.33 é mostrado o que acontece desde o primeiro instante até ao momento final nos testes de impacto de 20 [J], podendo verificar-se que no caso da amostra com 17% de SiO<sub>2</sub> o comportamento reoessante do fluido evita a perfuração da esponja.

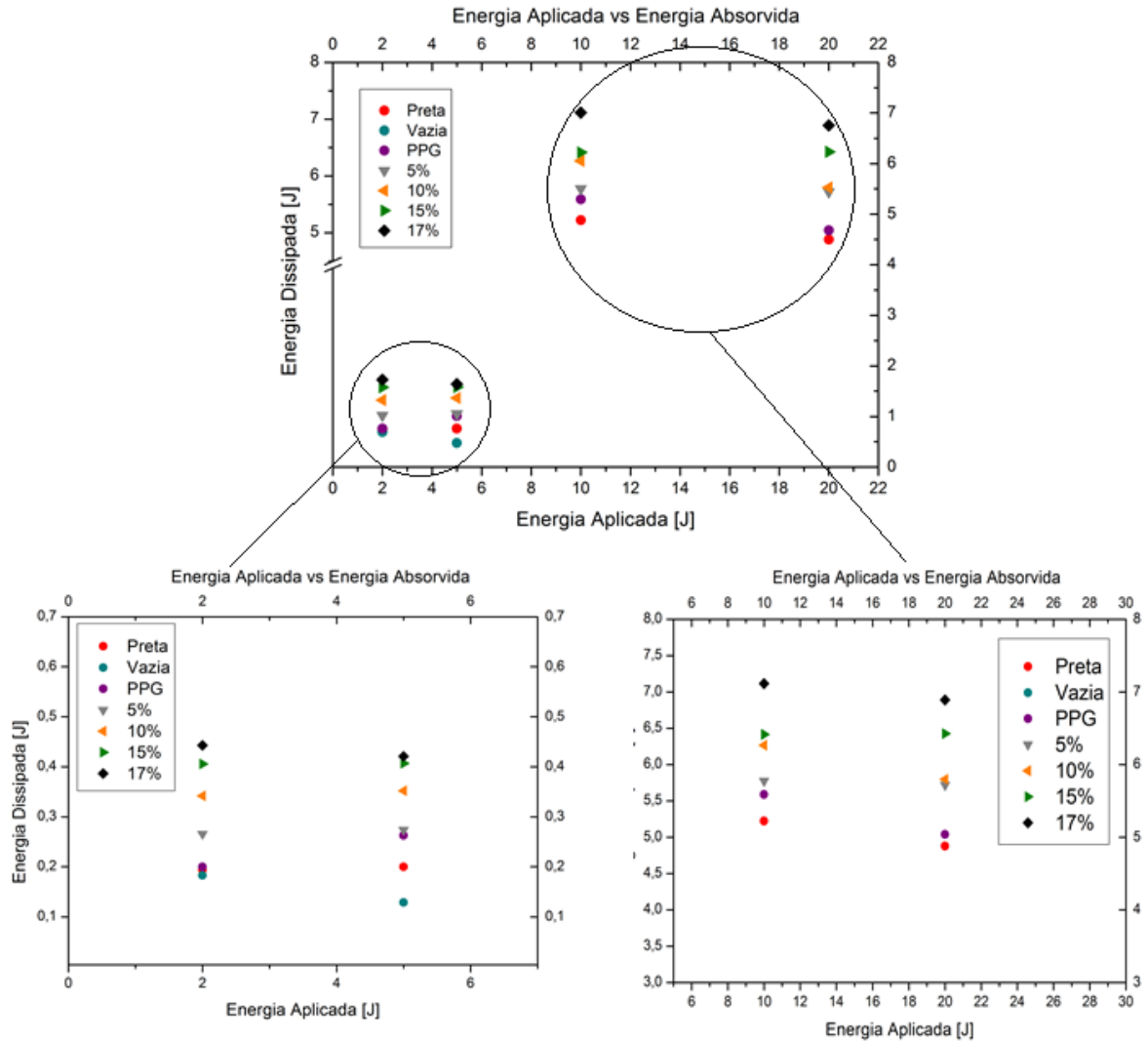


**Figura 2.31-** Esponja impregnada impactada com uma energia 20 [J]: (esquerda) *AI*-> houve perfuração; (direita) *BI*-> houve perfuração.



**Figura 2.32-** Esponja impregnada impactada com uma energia 20 [J] (esquerda)  
*CI*-> houve perfuração; (direita) 17% [w/w] SiO<sub>2</sub>-> não houve perfuração.

Pela Figura 2.34 e na Tabela 2.8 encontram-se os resultados da energia dissipada frente à energia aplicada.



**Figura 2.33-** Resultados obtidos nos testes de impacto com fluido reoessante.

**Tabela 2.8-** Resultados dos testes de impacto: Valor de energia absorvida pelo fluido reoessante.

Energia Aplicada [J]	Espumas						
	Vazia	Preta	PPG	AI	BI	CI	17% [w/w]
2	0.18305	0.194606	0.20003	0.26593	0.34178	0.40576	0.44297
5	0.12873	0.20003	0.26286	0.27376	0.35199	0.40672	0.42107
10	-	5.22394	5.98903	5.7752	6.2207	6.4159	7.11507
20	-	4.87899	5.04137	5.71928	5.79648	6.42591	6.89047

Observa-se que a energia dissipada pela borracha preta é menor em comparação com todos os restantes testes com a esponja. Em nenhum momento foi perfurada, daí servir para proteger o peso de embater directamente na base do equipamento. Ao contrário das esponjas com fluido, e só com PPG, os resultados mostram-se coerentes com o que era esperado. Quanto mais concentrada a amostra, maior a absorção de energia. Pelas imagens, com a maior energia aplicada (20 [J]), percebe-se que todas as esponjas foram perfuradas à excepção da que continha a amostra 17%. Tanto que estando as esponjas preenchidas 25% do seu volume, em 20 [J], por exemplo, esta amostra dissipou 6.89 [J], o que é aproximadamente 25% da energia total.

Relativamente aos resultados referentes às energias mais baixas (2 e 5 [J]), podem ser justificadas pelo facto de, aquando o impacto, não ter sido activado o comportamento reoessante, ou seja, poderia encontrar-se ainda na região 1 da curva de viscosidade destes fluidos, comportamento reofluidificante.

## 2.7 Conclusões dos resultados

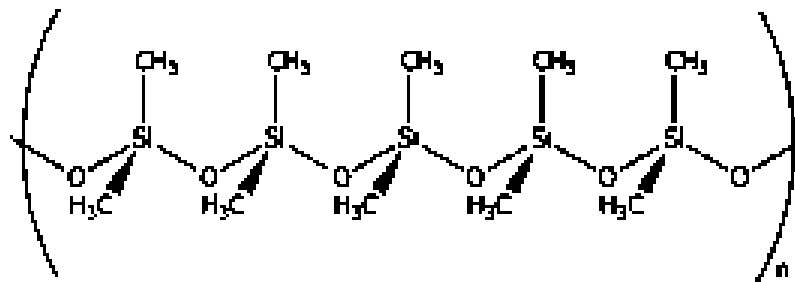
As curvas de viscosidade mostram claramente o comportamento reoessante das amostras, que se torna ainda mais notável nas mais concentradas. Nestas é bastante evidente o começo, ou seja, a taxa de corte crítica desse comportamento, bem como a taxa de corte máxima que equivale à viscosidade máxima. Na amostra de 5% não é tão evidente, porque o resultado reológico é uma curva bastante suave. Tão suave, que menos de 5% de partículas de SiO<sub>2</sub> em PPG não é suficiente para que o fluido se

comporte como reoessante. Os mesmos gráficos revelam ainda que o esperado realmente acontece, ou seja, a esponja vazia é a que absorve menos energia, seguida da borracha preta e finalmente a esponja preenchida com PPG. As espumas preenchidas com o fluido reoessante são as que dissipam mais energia, maior quanto maior a concentração de sílica no fluido. Apesar do volume preenchido ser relativamente baixo, os resultados são bastante promissores quanto ao seu objectivo, o que leva a crer que preenchendo um volume maior, serão ainda melhores. No caso de maior energia aplicada, foi dissipada cerca de 30% da energia, o que é realmente promissor.

# 3 Estudo do escoamento de um fluido reoespessante em microcanais fabricados por Xurografia suave

## 3.1 Polidimetilsiloxano (PDMS)

Nos últimos anos é visível o desenvolvimento e utilização de polímeros à base de silício, principalmente devido às diferentes propriedades que apresentam. O polidimetilsiloxano (PDMS) é o polímero que mais se destaca nesta categoria, e deriva da família dos siloxanos polimerizados, que são silicones, e a sua cadeia polimérica está demonstrada na Figura 3.1.

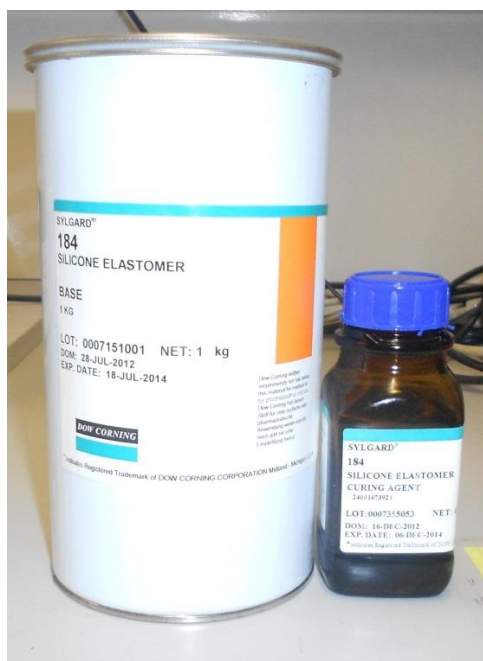


**Figura 3.1-** Esquematização da estrutura polimérica do PDMS (Bowen, et al., 2012).

As principais vantagens do PDMS são o facto de ser resistente à decomposição pelo calor, água ou agentes oxidantes, são bons isoladores eléctricos e quimicamente inertes. Aguentam temperaturas entre os -65°C e 400°C, apresentam alta flexibilidade a baixas temperaturas e hidrofobicidade (Werlang, 1996). Dificilmente perdem as suas características de impermeabilidade, elasticidade e brilho. Não traz quaisquer malefícios para o meio ambiente, não contamina o solo, nem a água ou ar.

O PDMS tem uma vasta utilização na área da biomédica, por exemplo em próteses mamárias, ou em articulações, e pode ainda ser utilizado na fabricação de cateteres (Lidervan, 2005) e microdispositivos (Lima, et al., 2008), por isso, hoje é cada vez mais utilizado (não só por causa desta área) e existem inúmeras escolhas no

mercado que fabricam PDMS por todas as qualidades e vantagens já mencionadas. Neste trabalho utilizou-se PDMS *Sylgard 184* da *Dow Corning*, (Figura 3.2). Na tabela 3.1 encontram-se as propriedades químicas principais do PDMS.



**Figura 3.2-** Exemplar da embalagem do PDMS utilizado neste trabalho.

**Tabela 3.1-** Propriedades químicas do Polidimetilsiloxano.

<b>Propriedades principais</b>	<b>Valor</b>
<b>Viscosidade [mPa.s]</b>	3900
<b>Módulo de Elasticidade [mPa]</b>	1.8
<b>Cor</b>	Transparente

O PDMS é misturado com o agente de cura em diferentes proporções, dependendo do objectivo que se pretende. Por exemplo, o PDMS requerido para os moldes, não deve ser demasiado rígido, assim utiliza-se uma razão de 10:1, que significa que para 1 [g] de agente de cura, deve adicionar-se 10 [g] de PDMS. Para o PDMS utilizado nas lâminas necessárias para aderir o canal sobre as mesmas, o rácio

utilizado foi de 20:1. Depois de colocadas as respectivas quantidades de cada componente num copo, mexe-se muito bem com uma espátula, 2 a 3 minutos, o que automaticamente irá formar inúmeras bolhas de ar, que têm de desaparecer. Para isso, leva-se a mistura a um exsicador, que está conectado a uma bomba de vácuo, como mostra a Figura 3.3:



**Figura 3.3-** Exsicador conectado à bomba de vácuo.

## 3.2 Xurografia Suave

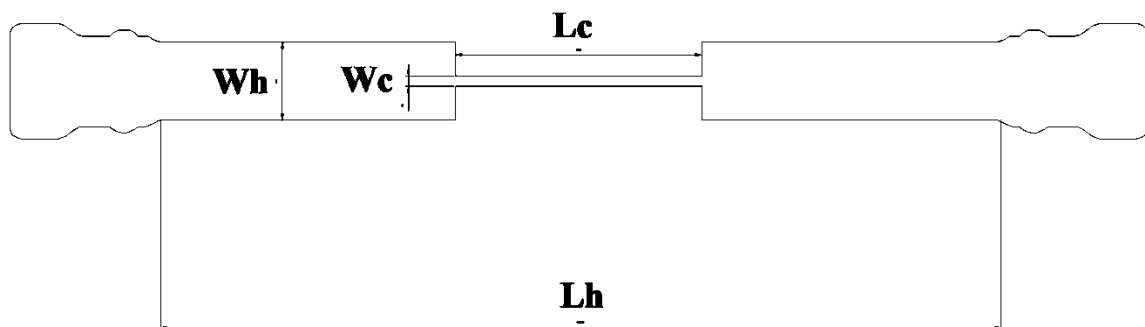
A Xurografia suave é uma técnica de fabricação de microcanais. Para se entender perfeitamente este conceito, a necessidade da microfabricação surgiu para que fosse possível visualizar o escoamento de um fluido em dimensões muito pequenas, podendo simular, por exemplo, um microvaso do corpo humano e o escoamento do sangue. No caso em particular deste estudo, pretende-se simular um poro de uma esponja e o escoamento do fluido (PPG+Silica) através dele. A principal característica desta técnica é o baixo custo, que aliado a equipamentos de indústria gráfica, apresenta-se como uma boa alternativa à litografia suave, que é bastante mais dispendiosa. Desta forma, reduz-se os custos na produção de microcanais (Pinto, et al., 2013). Para além desta vantagem, não necessita de salas limpas para que o resultado seja aceitável, sendo relativamente fácil a sua utilização. Esta técnica necessita de alguns materiais, especificamente, PDMS, uma plotter de corte, um software de desenho ligado a esta e onde são

desenhados os microcanais (AutoCAD e CorelDRAW), e vinil, que é um papel autocolante onde a plotter de corte imprime o canal

### 3.2.1 Fabricação de microcanais

Como referido anteriormente, o molde é obtido através da técnica de Xurografia. A geometria foi desenhada no software AutoCAD e posteriormente foi transferida para o software da plotter de corte, CorelDRAW. Na plotter e com auxílio de uma lâmina, o vinil é cortado com a geometria projectada.

Neste trabalho foram utilizados três canais diferentes. Apesar de a geometria ser idêntica, variavam na largura da entrada/saída. Esta diferença nas medidas tem como objectivo representar porosidades diferentes, ou seja, a variação das dimensões tem a finalidade de tentar perceber de que maneira o tamanho do poro influencia o escoamento do fluido. Na Figura 3.4 está representado um exemplo das geometrias desenhadas, e na Tabela 3.2, as diferentes dimensões por cada microcanal projectado e na Figura 3.5 uma ilustração da plotter de corte.



**Figura 3.4-** Desenho esquemático da geometria do microcanal.

O canal com  $W_h$  mais pequeno denominou-se 2:1:2, o canal médio 4:1:4 e finalmente, o canal maior, 8:1:8, em que o “1” se refere sempre à contração do canal.

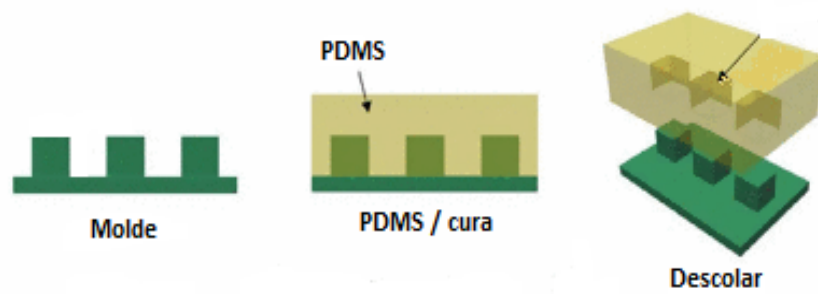
**Tabela 3.2-** Valores das dimensões de cada microcanal utilizado.

Parâmetro	Microcanal		
	2:1:2	4:1:4	8:1:8
$L_h$ [ $\mu\text{m}$ ]	33617	33290	34296
$W_h$ [ $\mu\text{m}$ ]	800	1600	3200
$W_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	400	400	400
$L_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	1000	1000	1000



**Figura 3.5-** Equipamento para impressão do molde das geometrias (Pinto, et al., 2013)- *Plotter Jaguar II*.

Após a impressão dos canais, estes foram colados numa placa de Petri. O PDMS (rácio 10:1) é vazado sobre o molde, sendo colocado numa estufa (Figura 3.7a) durante 20 minutos a 80°C . Após a cura do PDMS, este é cortado e retirado da placa, dando origem ao canal. O esquema da Figura 3.6 demonstra este procedimento.



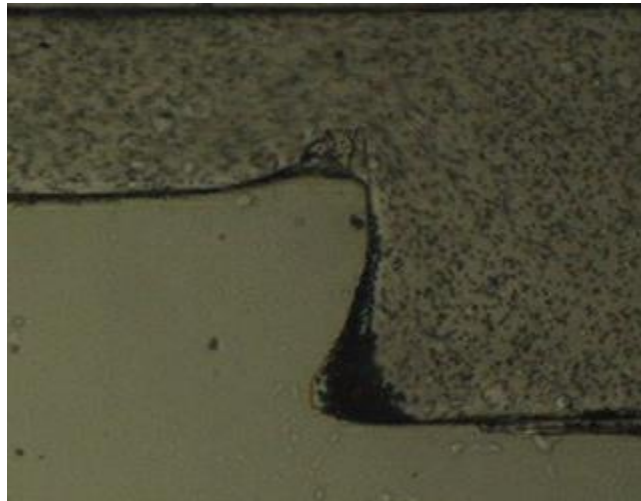
**Figura 3.6-** Procedimento do procedimento para fabricar os microcanais por Xurografia (Park, et al., 2010).

Finalmente, o PDMS com o microcanal é aderido a uma lâmina, lamela ou acetato previamente coberto com uma película de PDMS com razão 20:1. Esta película de PDMS foi efectuada com auxílio da spin-coater (*VTC-100 Vacuum Spin Coater*), que a espalhou de uma forma bastante uniforme ao longo da lâmina (Figura 3.7b). Posto isto, é levado de novo à estufa para curar durante 24 horas e o resultado final pode ser observado na Figura 3.7c.



**Figura 3.7-** a) Forno utilizado para curar o PDMS; b) Spin-coater utilizada para espalhar o PDMS na lâmina; c) Ilustração do resultado da fabricação de microcanais.

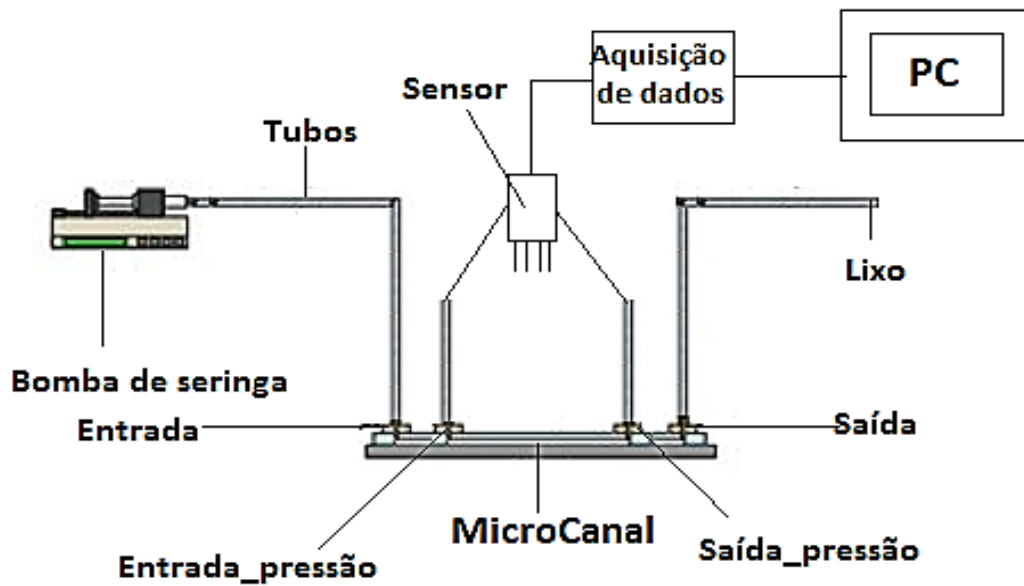
O procedimento integral para a fabricação de microcanais encontra-se no Capítulo 7, Anexo C. No entanto, este tipo de fabricação tem várias limitações, por exemplo, na Figura 3.8 é possível observar que as geometrias das arestas dos microcanais não correspondem às arestas inicialmente projectadas, talvez devido às pequenas dimensões do microcanal e à velocidade de corte da plotter.



**Figura 3.8-** Demonstração microscópica do resultado dos moldes em PDMS.

### 3.3 Quedas de pressão

Medir a queda de pressão dentro do microcanal tem como objectivo verificar quando é activado o comportamento reoespessante, que é visível quando a queda de pressão aumenta drasticamente. As quedas de pressão neste trabalho significam, de uma forma objectiva, calcular a energia perdida quando o fluido passa por um poro numa espuma, e portanto, entender a contribuição da expansão/contração que é visível nas geometrias. Para estas medições, utilizou-se uma bomba de seringa *Nemesys (Cetoni GmbH)*, uma seringa *Hamilton* de 10 [ml], um sensor diferencial de pressão de 30 [psi] para as amostras com comportamento reoespessante, um cartão de aquisição de dados *Instumental*, e um software em Labview para obtenção dos resultados. Um esquema do procedimento experimental encontra-se representado na Figura 3.9:



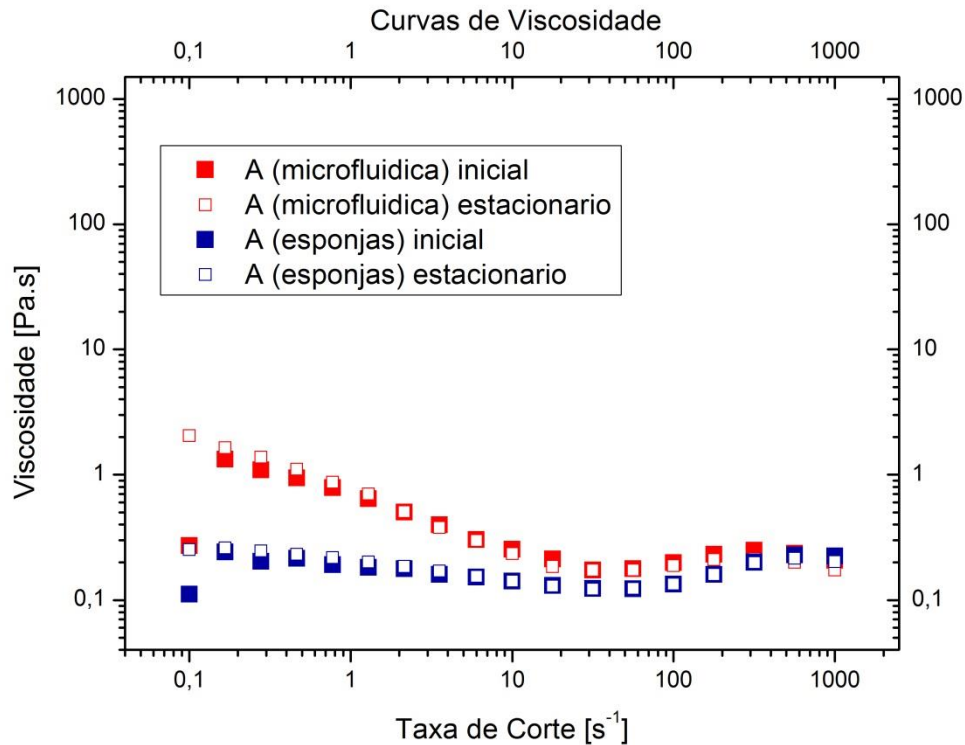
**Figura 3.9-** Representação esquemática para medir a queda de pressão em microcanais.

Os caudais utilizados nestas experiências, bem como as velocidades utilizadas nas simulações numéricas, foram obtidas pela Equação 3.1 (cuja dedução pode ser vista nos Anexos, Anexo M), utilizando valores de taxa de corte dentro do comportamento reoespassante (obtidos pelos testes reológicos). Finalmente, a velocidade é o caudal  $Q$  a dividir pela área transversal ( $A = h \times W_h$ ) do canal, em que  $h$  corresponde à espessura do vinil (95 [ $\mu\text{m}$ ]).

$$Q = \frac{\dot{\gamma} \times (W_h \times h)^2}{4 \times \sqrt{h^2 + W_h^2}} \quad (3.1)$$

### 3.3.1 Amostra A

Com intuito de determinar as quedas de pressão foi preparada uma nova amostra com 5% de partículas e realizado um novo teste reológico onde os resultados obtidos



podem ser observados na Figura 3.10.

**Figura 3.10-** Comparação das duas amostras de 5% partículas de  $SiO_2$ .

Como se pode observar na Figura 3.10, para baixas taxas de corte, a curva de viscosidade desta nova amostra é bastante distinta da curva obtida para as amostras da esponja anteriormente testadas. Esta diferença pode estar relacionada com diversos factores. Uma vez que todo o processo de preparação da amostra foi igual, as diferenças podem estar, por exemplo, no tempo de abertura da embalagem de sílica (decorreram pelo menos 5 meses) ou mesmo do PPG, o facto de serem partículas de sílica de fornecedores diferentes (*Evanok* e *Sigma-Aldrich*) e o tamanho de cada partículas também distintos, a temperatura de armazenamento, a absorção de alguma humidade, o

processo de fabricação das duas sílicas, a precisão do reómetro que se reflete maioritariamente a taxas de corte mais baixas, a degradação das moléculas, etc. Ainda assim, as semelhanças dentro do comportamento reoespessante são bastante razoáveis, logo a amostra é aceitável para realizar esta parte do trabalho.

A curva de calibração do sensor de pressão, bem como informações acerca do mesmo podem ser consultadas em anexos, Anexo K e Anexo I, respectivamente.

### **3.4 Conclusões**

Apesar de esta amostra ser a menos viscosa fabricada ao longo do trabalho, a obtenção de resultados foi uma tarefa bastante complexa devido essencialmente às dimensões muito pequenas dos microcanais e à viscosidade do fluido. Assim, não foi possível medir todos os resultados pretendidos para poder comparar-se com as simulações numéricas. Estes resultados são comparados nas conclusões da secção seguinte.

## 4 Simulações numéricas de fluidos Não-Newtonianos em microcanais.

### 4.1 Introdução

A movimentação de fluidos está relacionada com a maioria dos fenómenos físicos que ocorrem na natureza e as suas características têm sido, cada vez mais, objeto de estudo recorrendo a análises teóricas nem sempre suficientes, e recorrendo a métodos experimentais. Desta forma, este tipo de análise, devido ao também grande desenvolvimento a nível informático, pode ser feito recorrendo a simulações numéricas.

Uma simulação numérica consiste em simular um processo ou operação do mundo real. A este tipo de simulação, dá-se o nome de Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC), que é, portanto, prever o comportamento de fenómenos físicos através do cálculo numérico (Gaspar, et al., 2003). Assim, o primeiro passo para realizar uma simulação numérica é construir um modelo computacional que seja coerente com a situação real que se quer realizar. As simulações numéricas utilizam técnicas matemáticas para chegarem o mais próximo da realidade possível. Como dizia *Pegden (1990)*, *uma simulação é um processo de projectar um modelo computacional de um sistema real e conduzir ensaios experimentais com este modelo com o propósito de entender o seu comportamento e/ou avaliar estratégias para a sua operação* (Filho, 2008). Por outras palavras, através de uma simulação numérica, podemos obter dados de como se comporta o sistema em análise, podemos idealizar teorias através dos resultados obtidos, e principalmente, podemos usar esse modelo para prever o comportamento que terá alterando alguns parâmetros, sem a necessidade de realizar ensaios experimentais, sendo estes dispendiosos e morosos, e pelas simulações numéricas podemos obter inúmeras informações (Bateman, 2013).

Na terceira fase deste trabalho, foram realizadas simulações numéricas utilizando um software comercial de volumes finitos, o *Fluent*, pelo protocolo do Anexo E (onde estão todos os parâmetros utilizados) e o *Ansys Workbench* (ferramenta de desenho), onde os canais, bem como as malhas, foram desenhados. O *Fluent* incorpora diversas funcionalidades, e apesar de ser usual utilizar o *Gambit* para o desenho das geometrias,

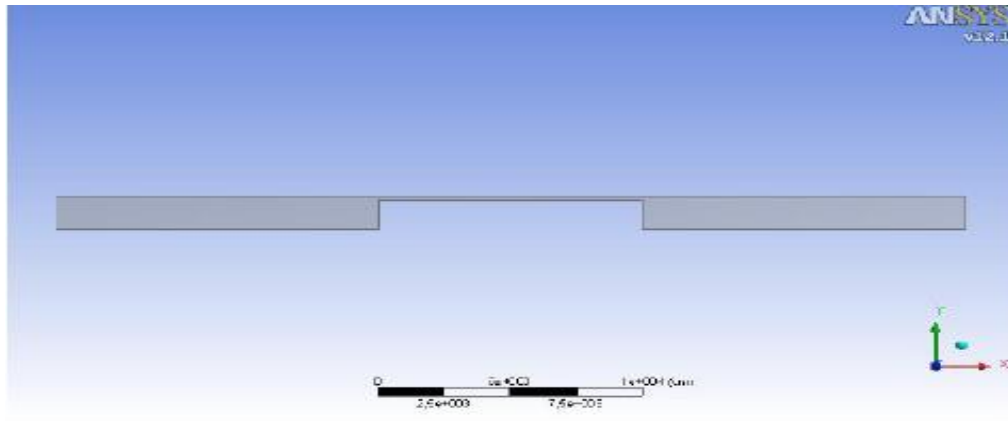
como este permite importar a geometria e a malha (conjunto de volumes finitos, explicado em 4.2), é uma vantagem para a utilização de outro qualquer software, neste caso o *Ansys*. O *Fluent* permite definir as condições-fronteira, as propriedades do fluido, materiais, e permite a visualização dos resultados e executa as operações de resolução utilizando diferentes algoritmos, onde neste caso em particular, foi utilizado o algoritmo *SIMPLE* (Gaspar, et al., 2003), que será referido mais á frente neste trabalho.

Com estas simulações, e indo ao encontro da fase 2 deste trabalho referida no Capítulo anterior, o objectivo era fazer o mesmo estudo para as restantes amostras, as mais viscosas (*B* e *C*), bem como para a *A*, e igualmente para os três microcanais. Relativamente à amostra menos viscosa, os resultados numéricos foram posteriormente comparados com os experimentais.

Assim, este processo divide-se em quatro etapas principais:

1. Construção da geometria em estudo, efectuada no pré-processador *Ansys Workbench*;
2. Geração da malha também pelo *Ansys Workbench*;
3. Definição do problema: propriedades e condições fronteira associadas ao sistema em estudo (velocidade do escoamento) no *Fluent*;
4. Resolução numérica do problema pela utilização do *Fluent*.

As geometrias não foram desenhadas na totalidade porque esta ferramenta permite a criação de simetrias relativamente a uma determinada orientação e o software onde são desenvolvidas as simulações, permite que se activem essas simetrias, permitindo visualizar o canal inteiro. Isto é interessante e útil porque diminui o tempo da simulação, já que, quantos mais elementos tiver a malha aplicada e maior for o canal, mais moroso se torna. O *Fluent* apresenta vários passos que se devem ter em conta antes de iniciar uma simulação, como escolher o material que se vai utilizar (água, fluidos Newtonianos, não-Newtonianos, etc), o tipo de escoamento, número de iterações, método de resolução, etc. A Figura 4.1 representa a geometria desenhada, incluindo o “extrude”, que representa o volume de um dos canais, que no entanto serve de exemplar aos restantes. Neste caso o valor de volume é de metade da profundidade real do canal, ou seja, em vez de 95 [ $\mu\text{m}$ ] é 47.5 [ $\mu\text{m}$ ], que representa a espessura do vinil utilizado na impressão dos canais.



**Figura 4.1-** Exemplo de como foram desenhados os canais no Ansys Workbench.

A validade das simulações numéricas para prever fenômenos físicos está intrinsecamente ligada aos métodos numéricos utilizados. Os modelos matemáticos representativos das leis da Física são descritos por equações diferenciais de derivadas parciais, e o Fluent permite a discretização dessas equações, usando o método das derivadas parciais - volumes de controle através de iterações, sendo um dos campos mais importantes da Dinâmica de Fluidos Computacional (Gaspar, et al., 2003).

O primeiro passo na utilização do Fluent é escolher o solucionador adequado à situação, sendo que existem apenas dois: baseado na pressão ou baseado na densidade. Ambos podem ser usados numa grande variedade de fluxos, no entanto um pode ter melhor desempenho que o outro, o que significa que converge melhor e mais rapidamente. Diferem principalmente na maneira em como são resolvidas as equações de energia, o momento e a continuidade (Ansys, 2009).

Neste trabalho foi utilizado o baseado na pressão, escolhido maioritariamente para escoamentos incompressíveis, e mais ou menos compressíveis. Dentro deste deve escolher-se o algoritmo de resolução: “coupled” ou acoplado, que resolve as equações da conservação da massa e do momento e quando necessário de energia ou outros escalares (turbulência,  $px$ ) de forma acoplada, o que melhora a velocidade de

convergência da solução, embora seja o algoritmo que utiliza mais memória; e “segregated” ou segregado, que as resolve separada e sequencialmente. O método baseado na pressão resolve-as, utilizando uma técnica baseada no controlo de volumes, que consiste: a) na divisão do domínio em discretos volumes de controlo através da aplicação de uma grelha computacional; b) na integração das equações em cada volume de controlo de forma a construir equações algébricas para as variáveis dependentes (velocidades, pressão, temperatura, etc); c) na linearização das equações que sofrem discretização e da solução algébrica obtida de forma a atribuir valores às variáveis dependentes. Esta técnica é descrita na Equação 4.1, para um volume de controlo arbitrário  $V$ .

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{\mathcal{G}} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (4.1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade,  $\vec{\mathcal{G}}$  vector velocidade,  $\vec{A}$  vector da área de superfície,  $\Gamma_\phi$  é o coeficiente de difusão para  $\phi$ ,  $\nabla \phi$  gradiente de  $\phi$  e  $S_\phi$  a fonte de  $\phi$  por unidade de volume. Esta equação é aplicada a cada controlo de volume ao longo de todo o domínio, e a Figura 4.2 é um exemplo. A Equação 4.2 é o resultado da discretização da Equação 4.1 em determinada célula:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (4.2)$$

Onde  $N_{\text{faces}}$  é o número de faces que encerram a célula,  $\phi_f$  é o valor de  $\phi$  através da face  $f$ ,  $\rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f$  é o fluxo de massa ao longo da face,  $\vec{A}_f$  é a área da face  $f$ ,  $\nabla \phi_f$  é o gradiente de  $\phi$  na face  $f$ , e  $V$  é o volume da célula.

Uma vez escolhido o solucionador, deve escolher-se o método de acoplamento entre a equação da conservação da massa e da quantidade de movimento para linearizar a solução após discretização, onde normalmente para cálculos no estado estacionário se

usa o SIMPLE ou o SIMPLEC e no estado transiente, é comum utilizar-se o PISO (Gaspar, et al., 2010). Utilizou-se o SIMPLE, pois é recomendado para situações com baixa ou nenhuma turbulência no escoamento, além disso está automaticamente associado ao algoritmo segregado mencionado anteriormente. Os passos principais deste método são descritos seguidamente:

1. Inicialização/ actualização das propriedades do fluido;
2. Resolução das equações de quantidade de movimento utilizando os valores actuais da pressão e fluxos mássicos nas faces (malha) de modo a actualizar o campo de velocidades;
3. Se as velocidades não satisfizerem localmente a equação da continuidade, é derivada uma equação de correcção de pressão da equação de continuidade, de forma a satisfazerem a continuidade;
4. A convergência da solução é avaliada e este ciclo de passos apenas termina quando o critério de convergência for atingido.

Este algoritmo utiliza uma relação entre a correcção da velocidade e da pressão de maneira a ser cumprida a conservação das massa e para obter o campo de pressão. Desta forma, a equação principal do SIMPLE, após ser obtida uma solução de correcção é: pressão numa célula (Equação 4.3).

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (4.3)$$

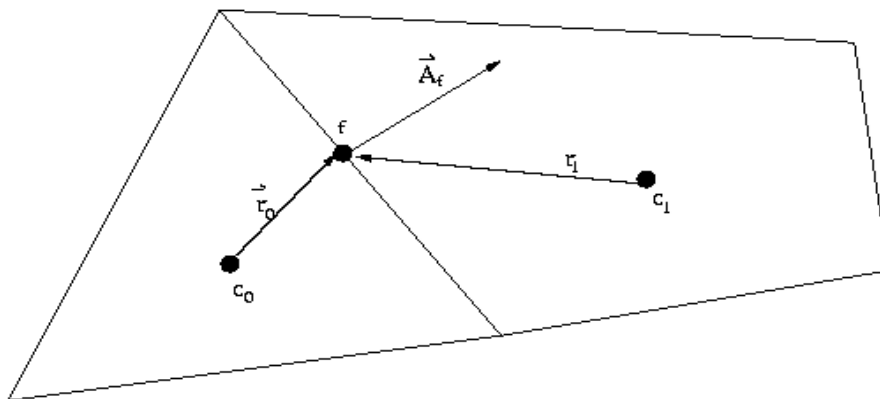
Onde  $p^*$  é o campo de pressão,  $p'$  é o valor da pressão numa célula corrigido e  $\alpha_p$  é o factor de relaxação para a pressão (Ansys, 2009).

Por definição, o Fluent atribui ao factor de relaxação o valor de 0.7, e o significado deste valor é que utiliza 70% do resultado da iteração anterior na nova iteração. Ou seja, o factor de relaxação estabiliza o comportamento de convergência de iterações não-lineares, controlando as variáveis de cada nova iteração, utilizando a seguinte relação consultada no guia de utilização deste:

$$\text{Nova} = \text{velha} + (\text{relaxação}) \times (\text{nova-velha})$$

Assim, baixando esse factor, a percentagem de informação utilizada da iteração não-linear anterior é mais baixa, facilitando a convergência da solução, sendo necessário um maior número de iterações totais, o que automaticamente aumenta o tempo da simulação. É aconselhado utilizar-se o factor padrão, e se nas primeiras 10 iterações a solução não mostrar qualquer sinal de convergência (se o valor dos resíduos não baixarem), deve baixar-se o valor deste para que convirja mais facilmente, já que a viscosidade e a densidade do fluido vão ficando mais relaxadas em cada iteração, até que atingem um valor estacionário (Ansys, 2009).

Por norma, o Fluent armazena valores do escalar  $\phi$  no centro das células da malha, correspondentes a  $c_0$  e  $c_1$  na Figura 4.2.  $\phi_f$  é necessário para a convenção da Equação 4.2 e deve ser interpolada desde os valores centrais da face, o que ocorre utilizando um esquema “upwind” (método de discretização espacial).



**Figura 4.2-** Controlo de volume usado para ilustrar a discretização de um escalar da equação de transporte (Ansys, 2009).

Assim, finalmente deve escolher-se o método de discretização espacial. O Fluent permite a escolha entre quatro esquemas para este feito: Primeira Ordem, Segunda Ordem, QUICK e Lei da Potência.

O esquema de primeira ordem serve para quando é desejada a precisão de 1ª ordem, e nestas condições, as quantidades nas faces dos volumes de controlo (volume

por onde o fluido escoar) são determinados, assumindo que os valores nos centros dos volumes de controle de qualquer variável dependente representam o valor médio no centro do volume de controle.

O QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for the Convection Kinematics) é normalmente utilizado em malhas com elementos quadrangulares ou hexaedros, e utiliza uma interpolação polinomial em três nós consecutivos da malha computacional (dois nós adjacentes à face e o nó a montante) (Gaspar, et al., 2010).

O esquema de segunda ordem é utilizado para todo o tipo de elementos da malha, quando se pretende obter os valores de precisão de segunda ordem. O esquema da Lei de Potência geralmente resulta na mesma precisão que o de primeira ordem (Ansys, 2009).

Normalmente é aconselhado começar com o de primeira ordem durante, pelo menos 30 iterações, e só depois alterar para o de segunda ordem. Nestas simulações não havia qualquer diferença ao fazê-lo, por isso foi possível utilizar apenas o segundo.

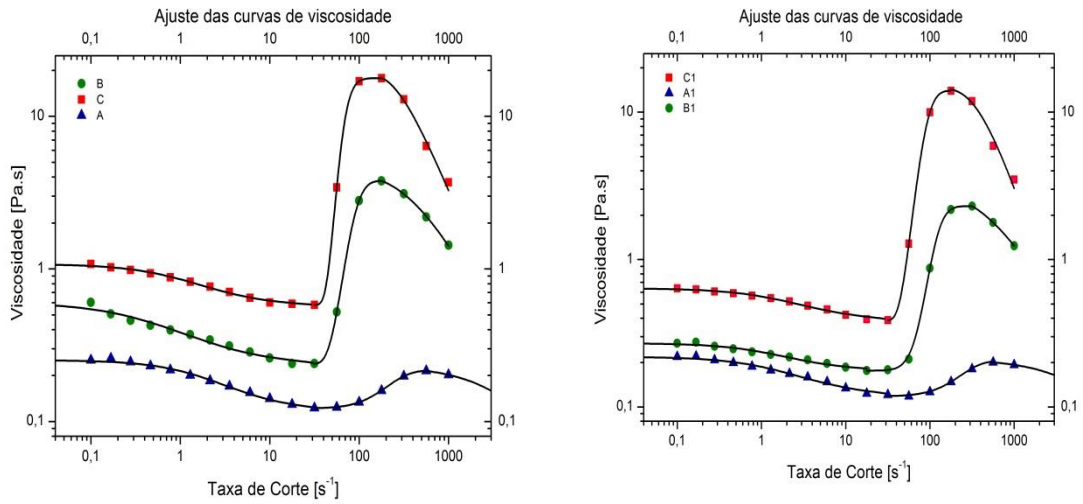
## **4.2 Modelo Reológico**

O modelo reológico utilizado não faz parte das equações ou modelos disponíveis dentro do Fluent, como é o caso dos modelos de Carreau, ou de Cross, por exemplo. No entanto, o modelo utilizado derivou do modelo de Cross e o Fluent permite a definição de novas equações que não estejam já inseridas no mesmo. Este modelo foi publicado recentemente como um modelo generalizado para fluidos não-Newtonianos com comportamento reoespessante (Galindo-Rosales, et al., 2011).

Desta forma, foi utilizada uma UDF (User Defined Function), que pode ser consultada no Anexo L, com o modelo para fluidos reoespessantes e que é composto pelo seguinte conjunto de equações da Equação 4.4:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \left\{ \begin{array}{l} \eta_I(\dot{\gamma}) = \eta_c + \frac{\eta_0 + \eta_c}{1 + \left[ \lambda_I \times \left( \frac{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma}_c - \dot{\gamma}} \right) \right]^{n_I}} \rightarrow \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c \\ \eta_{II}(\dot{\gamma}) = \eta_{\max} + \frac{\eta_0 + \eta_{\max}}{1 + \left[ \lambda_{II} \times \left( \frac{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_c}{\dot{\gamma}_{\max} - \dot{\gamma}} \right) \times \dot{\gamma} \right]^{n_{II}}} \rightarrow \dot{\gamma}_c < \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{\max} \\ \eta_{III}(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_{\max}}{1 + \left[ \lambda_{III} \times (\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_{\max}) \right]^{n_{III}}} \rightarrow \dot{\gamma}_{\max} < \dot{\gamma} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Como já explicado anteriormente, a curva de viscosidade de um fluido reoessante divide-se em 3 partes (zona de comportamento reofluidificante; zona de comportamento reoessante; zona de comportamento reofluidificante), e cada um destes ramos se aplica à respectiva zona. O resultado dos ajustes pode ser visualizado nas Figura 4.3 e na Tabela 4.1 são apresentados os valores para cada parâmetro:



**Figura 4.3-** Resultados dos ajustes das curvas de viscosidade.

**Tabela 4.1-** Parâmetros obtidos após o ajuste para as amostras sem álcool.

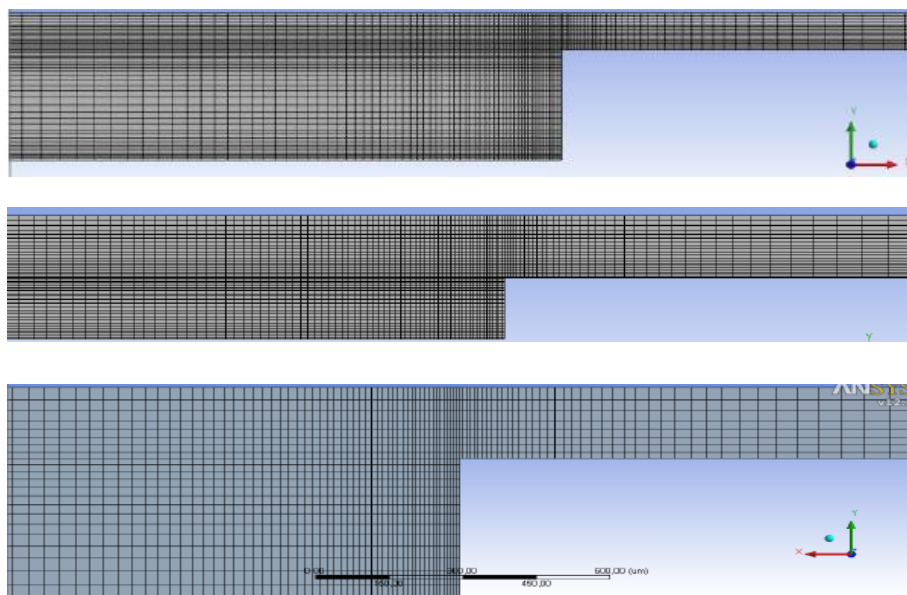
<b>Parâmetros</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
$\Pi_0$	0.25212	0.60348	1.07697
$\Pi_{\text{critico}}$	0.12258	0.23945	0.58094
$\dot{\gamma}_{\text{critico}}$	31.6	31.6	31.6
$\lambda_I$	6.49522	79.29121	20.63172
$n_I$	0.56603	0.44552	0.54069
$\Pi_{\text{max}}$	0.2146	3.77123	17.80303
$\dot{\gamma}_{\text{max}}$	563	178	178
$\lambda_{II}$	2.08961	1.73106	2.94041
$n_{II}$	1.68721	2.32257	3.10918
$\lambda_{III}$	0.0001435	0.00058262	0.00168
$n_{III}$	1	1.035685	1.124898

### 4.3 Estudo da malha

Para uma simulação numérica é muito importante a malha que é utilizada, neste caso devido ao método dos volumes finitos, que vai depender do número de elementos desta. No caso da simulação de fluidos, a densidade das células deve ser suficiente para capturar os detalhes do escoamento, mas não demasiado, porque quanto mais densa, mais tempo leva a resolução de problemas, e torna mais morosa a simulação. Isto quer dizer que, para implementar o método das equações finitas é necessário definir o problema e depois proceder à sua discretização (dividi-lo em pequenos volumes, volumes finitos, que originam os elementos da malha) (Fernandes, 2003). A qualidade da malha desempenha um papel extremamente importante na precisão e estabilidade do cálculo numérico, estando associada à distribuição dos nós, suavidade e assimetria, logo, um dos critérios avaliados é a relação de aspecto da malha.

Por exemplo, deve ser uma malha melhor refinada nas zonas de maior interesse, neste caso na contração dos canais. A malha correcta ajuda na discretização do erro, porque elementos demasiado grandes, levam a erros consideráveis na solução. Deve

também ser ordenada, o que é mais fácil em canais rectangulares ao contrário dos circulares, e a forma como é construída deve seguir a caminho que o fluido percorre, na prática. A malha é dos elementos mais importantes, porque é a mesma que nos dá informação se os resultados estão ou não bem. Ou seja, após uma primeira análise, altera-se o valor da malha (normalmente torna-se esta mais refinada ainda, com mais elementos) e repete-se o teste. A malha é considerada boa quando o resultado obtido for independente do número de elementos que esta apresenta. Na Figura 4.4 podem ver-se as malhas utilizadas.



**Figura 4.4-** Ilustração da malha: a) canal 2:1:2; b) canal 4:1:4; c) canal 8:1:8.

Já a Tabela 4.2 representa o número de elementos e nós da malha rectangular utilizada para cada canal.

**Tabela 4.2-** Elementos e nós das malhas utilizadas.

	<b>2:1:2</b>	<b>4:1:4</b>	<b>8:1:8</b>
<b>Elementos</b>	74840	62160	70520
<b>Nós</b>	92658	77076	87636

## 4.4 Resultados

Em primeiro lugar, foram feitos testes prévios com a geometria desenhada na sua totalidade e depois recorrendo a simetrias, e os resultados não variaram. Assim, optou-se pela utilização das simetrias, uma vez que a convergência da solução era menos morosa.

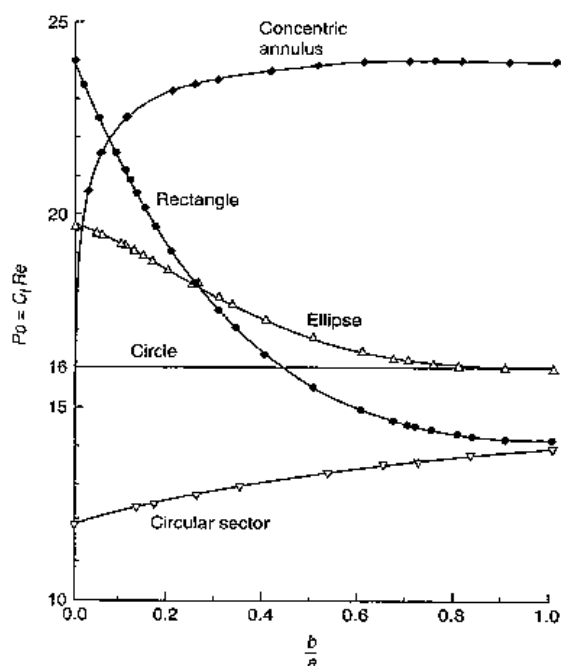
Em segundo lugar, considera-se que o escoamento é em regime laminar porque as velocidades utilizadas são baixas, movendo-se o fluido em camadas, havendo somente troca de movimento molecular. Como foram utilizadas velocidades baixas, o número de Reynolds é por conseguinte baixo, calculado segundo a Equação 4.5.

$$\text{Re} = \frac{2 \times \rho \times Q}{\mu \times (h + W_h)} \quad (4.5)$$

Onde  $h$  é a espessura do papel vinil (95 [ $\mu\text{m}$ ]),  $Q$  o caudal,  $\rho$  a densidade 998.2 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] e  $\mu=1\text{e}^{-3}$  [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]. Assim, usando as Equações 4.7, 4.8 e 4.9 e números de Reynolds no intervalo de 1E-2 a 10, sendo 1E-2, 1e<sup>-1</sup>, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 e 10, as primeiras simulações realizadas foram com água, com os caudais calculados pela Equação 4.6.

$$Q = \frac{\mu}{2 \times \rho} \times (h + W_h) \times \text{Re} \quad (4.6)$$

O objectivo destas simulações é averiguar a credibilidade da malha relativamente à teoria. A partir da Figura 4.5, foi calculado o número de Poiseuille (lei que relaciona o caudal  $Q$  de um tubo transportando um fluido viscoso com o raio, comprimento, pressão e coeficiente de viscosidade), numa secção rectangular, utilizando os valores de  $b/a$  (em que  $b=h=95$  [ $\mu\text{m}$ ] e  $a=W_h$ ) e uma interpolação. Esse valor foi posteriormente comparado com o valor de  $P_0$  obtido numericamente pelas equações 4.7, 4.8 e 4.9.



**Figura 4.5-** Comparação do número de Poiseuille em várias secções de vários tipos de canais (White, 2006).

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \times \rho \times U_m^2} \times \frac{D_h}{L} \quad (4.7)$$

Onde  $f$  é o factor de fricção,  $\Delta P$  a variação da pressão,  $D_h$  o diâmetro hidráulico,  $U_m$  a velocidade média,  $\rho$  a densidade  $998.2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  e  $L$  o comprimento da secção.

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (4.8)$$

$$P_0 = C_f \times Re \quad (4.9)$$

Onde  $P_0$  é o número de Poiseuille e  $Re$  é o número de Reynolds.

O número de Poiseuille permanece constante em canais não-circulares, como é o caso. O objectivo é que o  $P_0$  numérico e teórico sejam relativamente próximos, o que se revelou verdade. Alterando a malha dos canais, o resultado manteve-se, concluindo assim que se conseguiu um resultado independente da malha e coerente com a teórica. Conclui-se que o resultado teórico e o numérico eram coincidentes, logo a malha foi validada, como se pode ver nas Tabelas 4.4, 4.10 e 4.17.

A partir daqui iniciaram-se os testes com o fluido não-Newtoniano. Nestes, em grande parte das simulações com os parâmetros de ajuste das amostras *B* e *C* e para os diversos canais, os resultados numéricos não foram satisfatórios, uma vez que a solução nunca convergiu. E não convergindo, os resultados não são fiáveis e apresentam bastante ruído. Assim, tentou-se alterar diversos parâmetros no Fluent, um deles, o factor de relaxação, que como já dito, tem bastante influência neste campo. Assim, foram feitos testes com factores como 1E-1, 1E-2, 1E-3, 1E-4 com mais iterações, mas sem grande sucesso. Outras alternativas testadas foram a alteração do método de discretização, e uma malha mais refinada, mas também não foi encontrada uma resolução do problema. Neste subcapítulo mostram-se os resultados obtidos mediante as diferentes tentativas de resolução. A Tabela 4.3 resume os casos que foram e não foram possíveis realizar.

**Tabela 4.3-** Esquematização do que foi feito e do que não foi no Fluent.

<b>Amostra</b>	<b><i>A</i></b>	<b><i>B</i></b>	<b><i>C</i></b>
<b>Com contração</b>	Sim	Não	Não
<b>Sem contração</b>	Sim	Sim	Sim

#### **4.4.1 Canal 2:1:2**

Todas as simulações da amostra *A* no canal com contração foram realizadas com factor de relaxação 1E-2 e com 21000 iterações e no canal sem contração, foram realizadas com factor 1E-2 e 6000, pois nesta situação a solução converge mais rapidamente, atingindo facilmente a estabilidade. Já as simulações das amostras *B* e *C*

nos canais sem contração foram realizadas da mesma maneira, mas no canal com contração foram realizadas de outra forma, como será explicado mais à frente.

De seguida são apresentados os resultados obtidos com as simulações, e todos foram retirados exactamente de uma linha que passa no centro do canal, ao longo de todo o comprimento. Esta situação aplica-se a todas as amostras e a todos os canais e a forma como obter os resultados pelo Fluent encontra-se no Anexo E.

### Resultados com água e com contração

A Tabela 4.4 apresenta os resultados das quedas de pressão obtidos com a água teóricos e numéricos, bem como a comparação entre o número de Poiseuille obtido.

**Tabela 4.4-** Resultados para as quedas de pressão com a água e com contração.

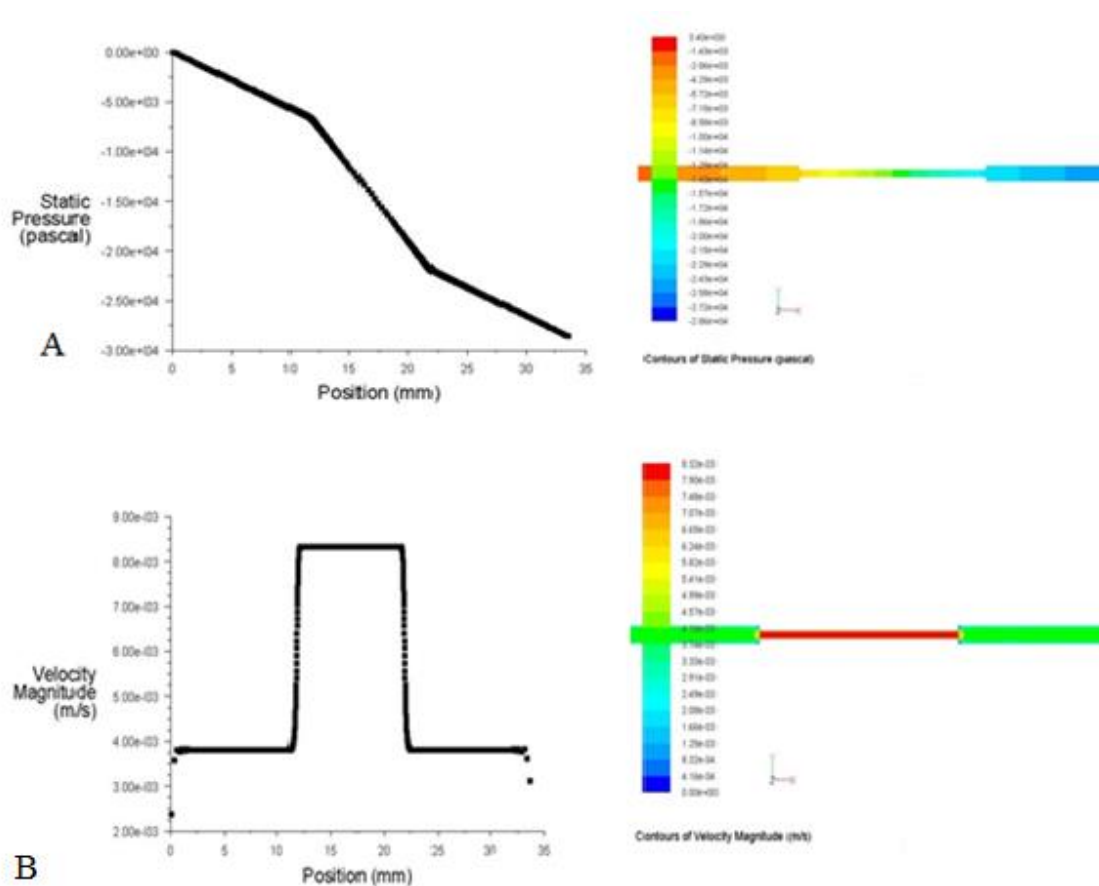
<b>Caudal [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Número de Reynolds</b>	<b>Queda Pressão [Pa] (teórico)</b>	<b>Queda de Pressão [Pa] (numéricos)</b>
4.50E-12	0.01	3.89E+00	3.79E+00
4.50E-11	0.1	3.89E+01	3.79E+01
2.25E-10	0.5	1.94E+02	1.89E+02
4.50E-10	1	3.89E+02	3.79E+02
6.74E-10	1.5	5.83E+02	5.68E+02
8.99E-10	2	7.78E+02	7.58E+02
1.80E-09	4	1.56E+03	1.52E+03
2.70E-09	6	2.33E+03	2.23E+03
3.60E-09	8	3.11E+03	3.03E+03
4.50E-09	10	3.89E+03	3.79E+03
	<b>P<sub>0</sub> (numérico)</b>	<b>P<sub>0</sub> (teórico)</b>	
Entrada/Saída	20.308	20.845	
Estenose	18.033	18.5086	

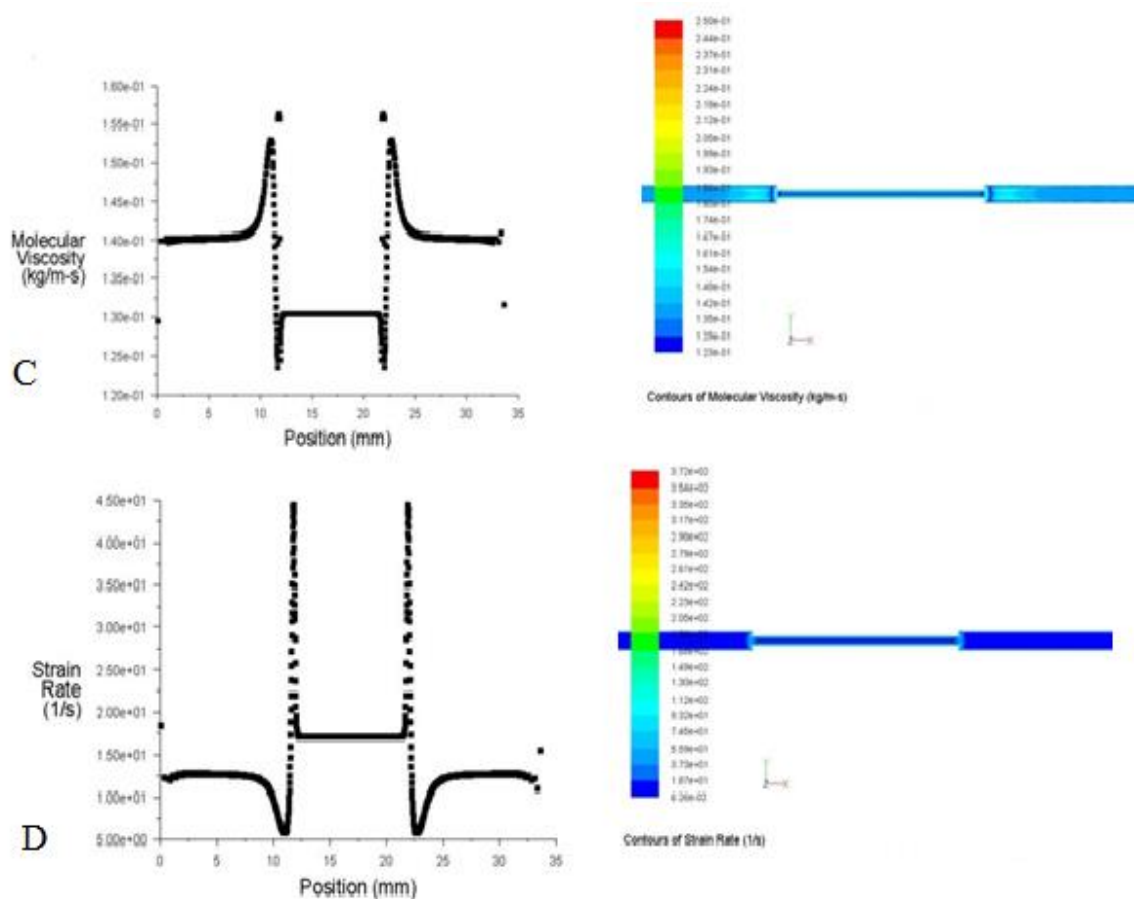
Pela Tabela 4.4 verifica-se que teoricamente e numericamente, o número de Poiseuille numa secção recta é bastante semelhante, o que valida a malha utilizada e

que, de alguma forma, justifica a utilização de simulações numéricas, pois aproximam-se bastante da realidade. Relativamente à queda de pressão teórica, esta foi obtida pela divisão da geometria total em três pequenas geometrias (entrada, contração, saída), logo, a queda de pressão total no canal é a soma das quedas de pressão em cada pequena geometria, pela equação 4.6.

### Amostra A em canal com contração

A Figura 4.6 é um exemplo dos resultados obtidos pelo Fluent. É possível retirar resultados apenas graficamente, onde é mais facilmente visível a existência de ruído, e resultados com gradientes de cor, onde geralmente vermelho corresponde aos valores mais altos e o azul-escuro aos valores mais baixos.





**Figura 4.6-** Resultado relativo à velocidade  $2.36 \times 10^{-3}$  [m/s]: a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte.

Pela Figura 4.6 verifica-se que os gráficos são bastante suaves, não apresentando ruído, o que significa que a solução convergiu correctamente e que o número de iterações foi suficiente para esse caso. A velocidade é maior ao encontrar a contração, o que tem lógica visto que a velocidade é o  $\frac{Q}{A}$  e a área na contração é menor.

Relativamente ao gráfico da viscosidade e da taxa de corte, é bastante coerente com a curva de viscosidade obtida no Capítulo 2 para esta amostra (A). Ou seja, a viscosidade aumenta antes e logo após à contração, simultaneamente à taxa de corte que atinge os valores mais elevados nesses pontos.

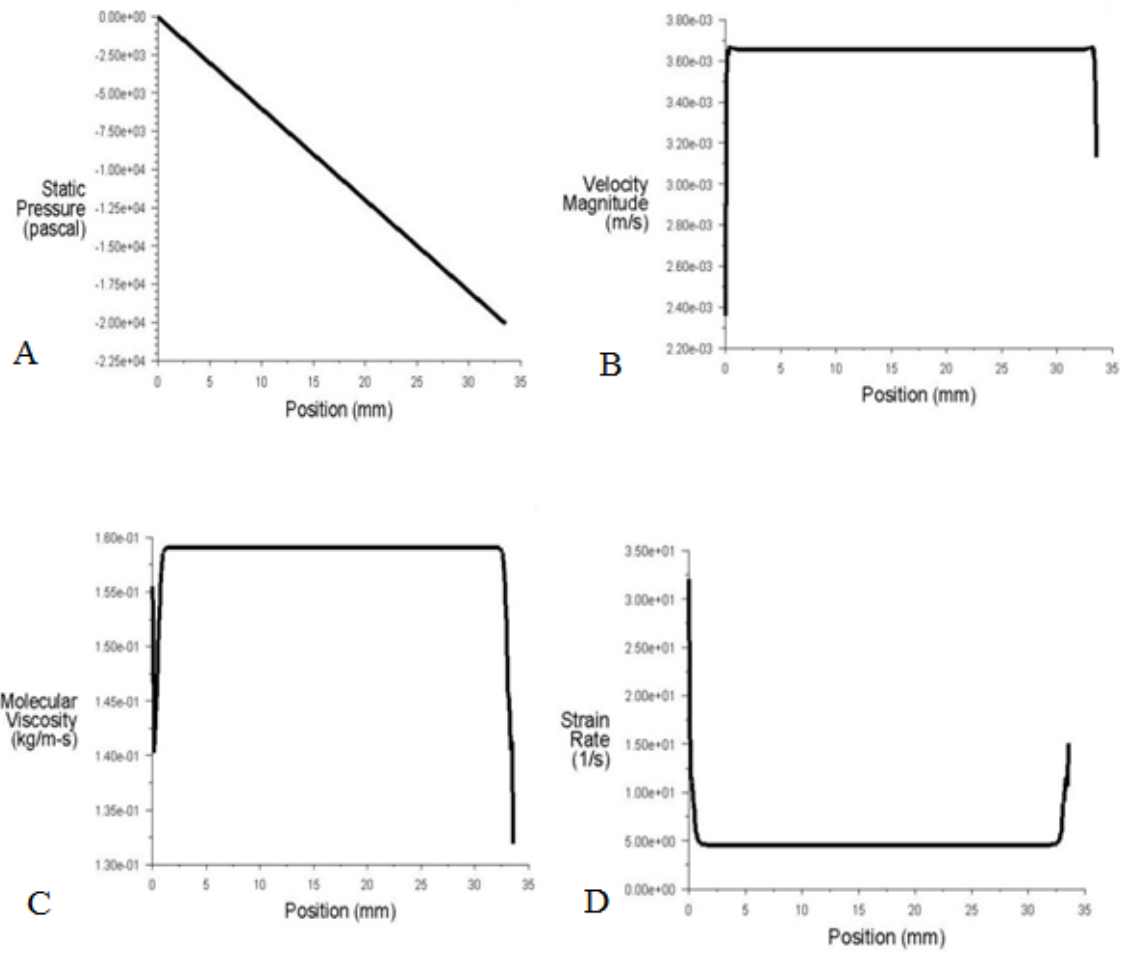
A Tabela 4.5 resume todos os valores da queda de pressão obtidos para todos os caudais.

**Tabela 4.5-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra A, canal com contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.08E-04	3.23E-03	6.94E+03
1.30E-03	5.91E-03	1.38E+04
1.54E-03	6.99E-03	1.67E+04
2.36E-03	1.08E-02	2.85E+04
4.01E-03	1.83E-02	5.45E+04
5.90E-03	2.69E-02	9.36E+04
7.55E-03	3.44E-02	1.07E+05
1.34E-03	6.13E-02	1.75E+05

#### **Amostra A em canal sem contração**

A Figura 4.7 representa os gráficos do canal sem contração, com escoamento de fluido reoessante.



**Figura 4.7-** Resultado relativo à velocidade  $2.36E-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte.

A Tabela 4.6 resume todos os valores da queda de pressão obtidos para todos os caudais.

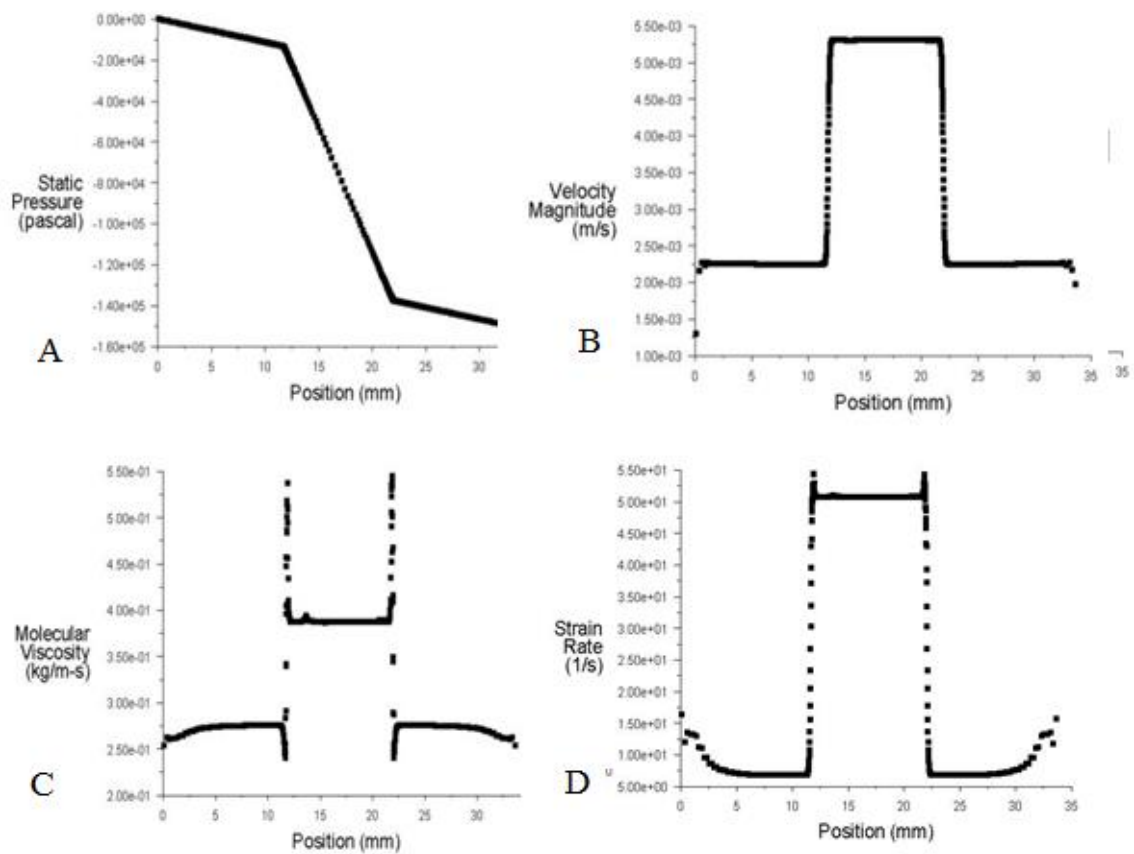
**Tabela 4.6-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra *A* e sem contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.08E-04	3.23E-03	5.514E+03
1.30E-03	5.91E-03	1.022E+04
1.54E-03	6.99E-03	1.212E+04
2.36E-03	1.08E-02	2.005E+04
4.01E-03	1.83E-02	3.813E+04
5.90E-03	2.69E-02	6.172E+04
7.55E-03	3.44E-02	8.318E+04
1.34E-03	6.13E-02	1.420E+05

Uma vez que não há contração, logo não há alterações da área, não deverá surgir qualquer queda/subida abrupta ao longo do canal, ou seja, entre a entrada e a saída deverá ser sempre constante, como vemos na Figura 4.6.

#### **Amostra *B* em canal com contração**

Com esta amostra e com contração, este foi o único resultado relativamente correcto possível de obter. Mais nenhum convergiu, nem alterando o número de iterações, nem o factor de relaxação. O resultado está ilustrado na Figura 4.8.



**Figura 4.8-** Resultado relativo à velocidade  $2.36E-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte.

A Tabela 4.7 resume os valores da queda de pressão obtidos.

**Tabela 4.7- Resultados** para as quedas de pressão com a amostra *B* e com contração.

Plots		
Velocidade [m/s]	Caudal [ml/min]	Queda Pressão [Pa]
$1.30e-3$	$5.91E-03$	$1.38E+4$

### **Amostra B em canal sem contração**

A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais.

**Tabela 4.8-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra B e sem contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.08E-04	3.23E-03	8.65E+3
1.30E-03	5.91E-03	3.59E+4
1.54E-03	6.99E-03	7.31E+4
2.36E-03	1.08E-02	2.72E+5
4.01E-03	1.83E-02	6.22E+5
5.90E-03	2.69E-02	8.39E+5
7.55E-03	3.44E-02	9.67E+5
1.34E-03	6.13E-02	1.19E+6

### **Amostra C em canal com contração**

Não foi obtido qualquer resultado satisfatório neste canal e com esta amostra.

### **Amostra C em canal sem contração**

A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra C.

**Tabela 4.9-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra *C* e sem contração.

Velocidade [m/s]	Caudal [ml/min]	Plots
		Queda Pressão [Pa]
7.08E-04	3.23E-03	2.141E+04
1.30E-03	5.91E-03	2.254E+05
1.54E-03	6.99E-03	4.099E+05
2.36E-03	1.08E-02	1.622E+06
4.01E-03	1.83E-02	2.885E+06
5.90E-03	2.69E-02	3.249E+06
7.55E-03	3.44E-02	3.191E+06
1.34E-03	6.13E-02	2.709E+06

#### 4.4.2 Canal 4:1:4

Todas as simulações da amostra *A* para o canal com contração foram realizadas com factor de relaxação  $1E-3$  e com 3100 iterações e para o canal sem estenose, foram realizadas com factor  $1E-2$  e 6000 para as amostras *A*, *B* e *C*. Relativamente aos canais com contração para as restantes amostras, será explicado mais à frente.

#### Resultados com água e com contração

Estas simulações foram realizadas com as definições padrão do Fluent: factor de relaxação 0.7 e com 1000 iterações. Sendo um fluido Newtoniano, a solução convergiu facilmente e rápido.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais com água.

**Tabela 4.10-** Resultados para as quedas de pressão com a água e com contração.

<b>Caudal [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Número de Reynolds</b>	<b>Queda Pressão [Pa] (teórico)</b>	<b>Queda de Pressão [Pa] (numérico)</b>
8.52E-12	0.01	5.22E+00	5.23E+00
8.52E-11	0.1	5.22E+01	5.23E+01
4.26E-10	0.5	2.51E+02	2.61E+02
8.52E-10	1	5.22E+02	5.23E+02
1.28E-09	1.5	7.87E+02	7.84E+02
1.70E-09	2	1.09E+03	1.05E+03
3.41E-09	4	2.09E+03	2.09E+03
5.11E-09	6	3.13E+03	3.14E+03
6.81E-09	8	4.15E+03	4.18E+03
8.52E-09	10	5.22E+03	5.23E+03
	<b>P<sub>0</sub> (numérico)</b>	<b>P<sub>0</sub> (teórico)</b>	
<b>Entrada/Saída</b>	21.693	22.3478	
<b>Estenose</b>	17.908	18.5086	

### **Amostra A em canal com contração**

A Tabela 4.11 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra A.

**Tabela 4.11-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra A, com contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.11E-04	6.49E-03	1.12E+04
1.30E-03	1.19E-02	2.36E+04
1.54E-03	1.41E-02	2.90E+04
2.37E-03	2.16E-02	4.56E+04
4.03E-03	3.68E-02	8.83E+04
5.93E-03	5.41E-02	1.13E+05
7.59E-03	6.92E-02	1.44E+05
1.35E-02	1.23E-01	2.29E+05

#### **Amostra A em canal sem contração**

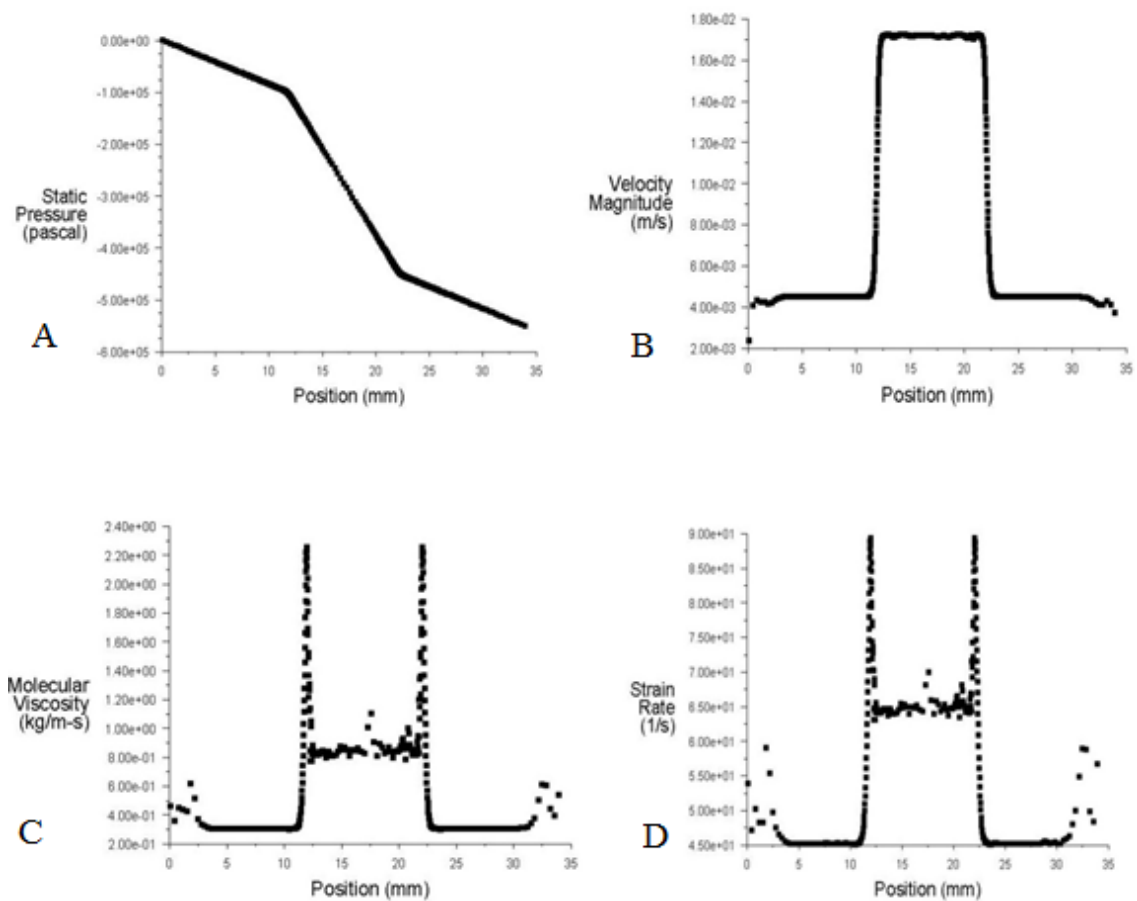
A Tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra A sem contração.

**Tabela 4.12-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra A, sem contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.11E-04	6.49E-03	5.236E+03
1.30E-03	1.19E-02	9.758E+03
1.54E-03	1.41E-02	1.166E+04
2.37E-03	2.16E-02	1.927E+04
4.03E-03	3.68E-02	3.682E+04
5.93E-03	5.41E-02	5.989E+04
7.59E-03	6.92E-02	8.080E+04
1.35E-02	1.23E-01	1.391E+05

### Amostra B em canal com contração

Nesta situação apenas se obteve uma simulação, que no entanto apresenta algum ruído, como se pode verificar pelas imagens da Figura 4.9, realizada com um factor de relaxação  $1e^{-3}$  com 84000 iterações.



**Figura 4.9-** Resultado relativo à velocidade  $2.36E-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte.

A Tabela 4.13 representa a queda de pressão obtida com esta simulação.

**Tabela 4.13-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra *B* e com contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
2.37E-3	2.38E-2	5.50E+5

Relativamente a esta amostra não foram obtidos mais resultados satisfatórios para nenhuma velocidade, pois todas apresentavam bastante ruído, já que a solução nunca convergiu.

#### **Amostra *B* em canal sem contração**

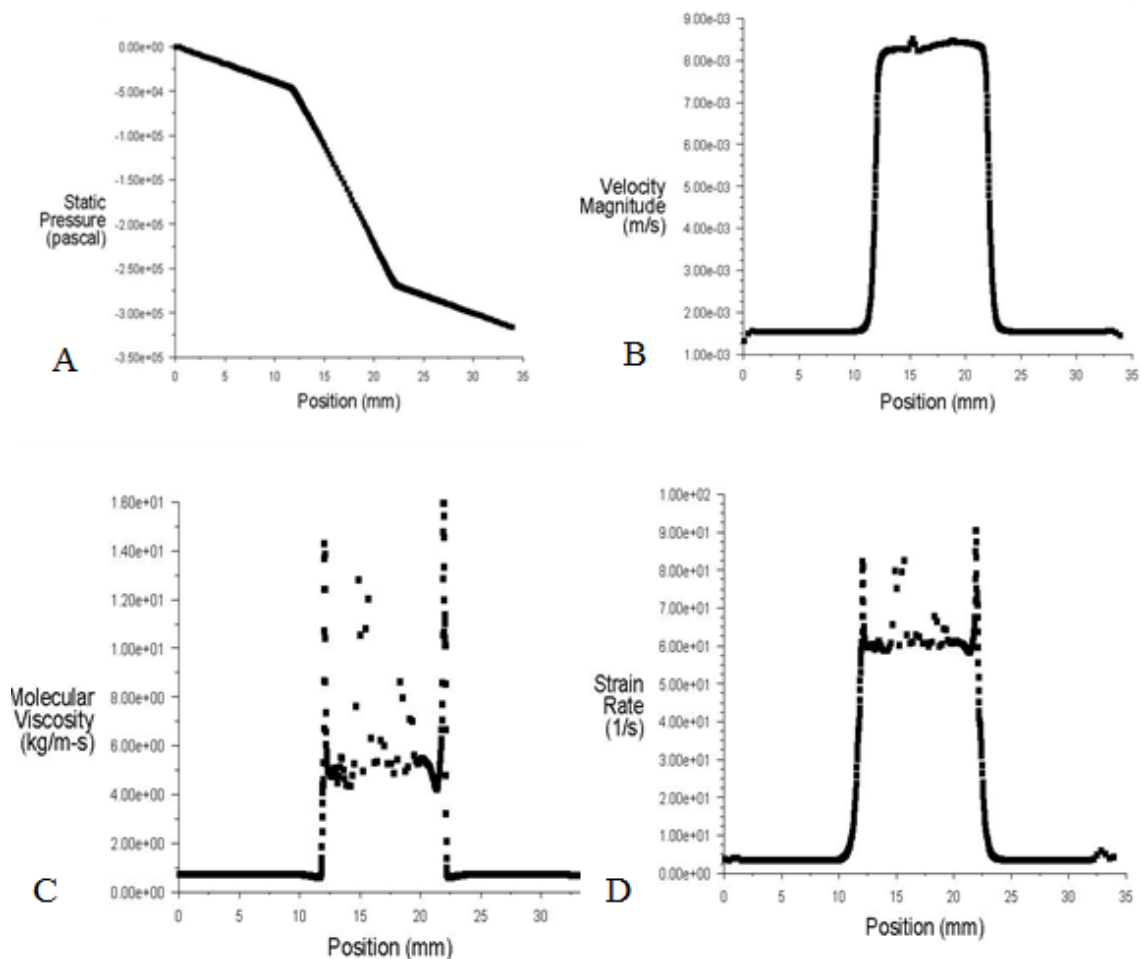
A Tabela 4.14 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra *B*.

**Tabela 4.14-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra *B* e sem contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.11E-04	6.49E-03	8.795E+03
1.30E-03	1.19E-02	3.555E+04
1.54E-03	1.41E-02	7.030E+04
2.37E-03	2.16E-02	2.800E+05
4.03E-03	3.68E-02	6.203E+05
5.93E-03	5.41E-02	8.337E+05
7.59E-03	6.92E-02	9.570E+05
1.35E-02	1.23E-01	1.179E+06

### Amostra C em canal com contração

Para esta situação não foi obtido qualquer resultado satisfatório. Como tentativa para melhor a situação, realizaram-se testes mantendo-se o mesmo valor do factor de relaxação, de forma a visualizar a convergência da solução com um número de iterações maior. As Figuras 4.10 e 4.11 mostram esses resultados, e a Figura 4.12 mostra o resultado obtido com uma malha mais refinada dentro da contração, local onde maioritariamente aparece o ruído.



**Figura 4.10-** Resultado relativo à velocidade 2.36E-3: a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte. (i)

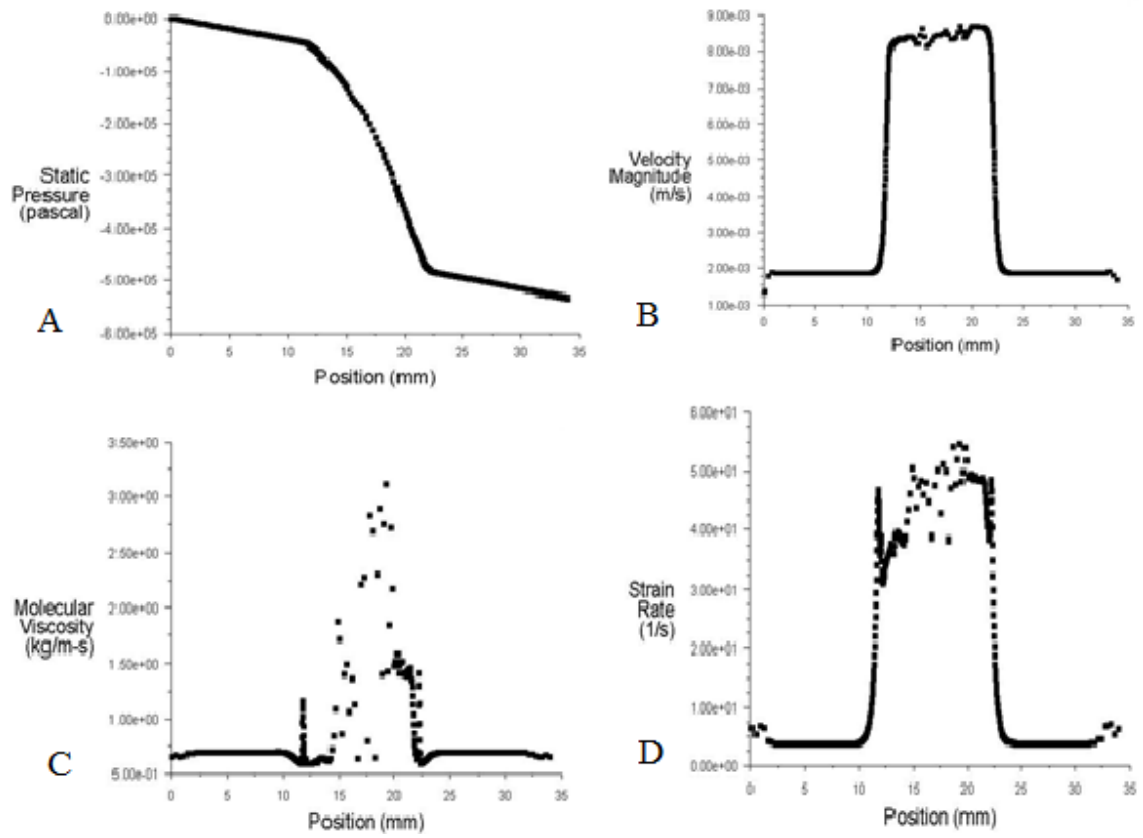
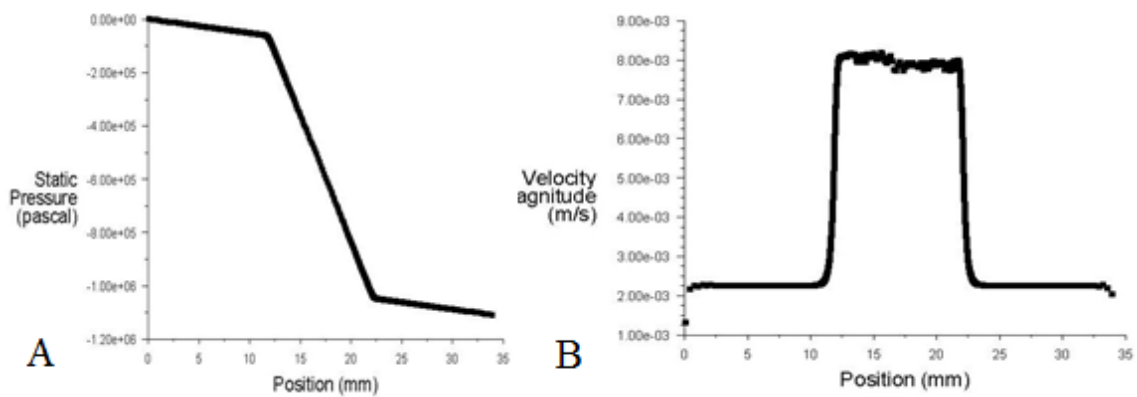
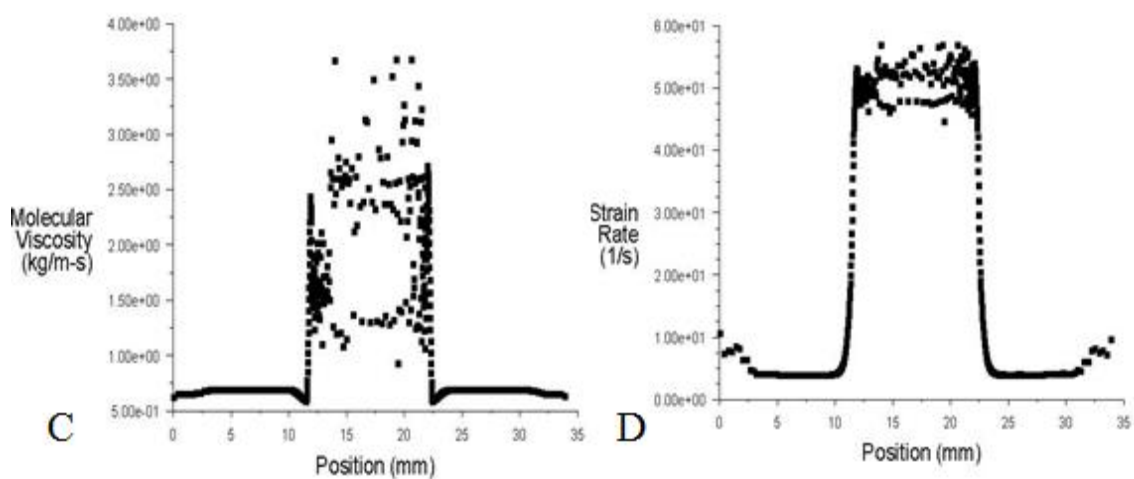


Figura 4.11- Resultado relativo à velocidade  $1.31E-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte. (ii)





**Figura 4.12-** Resultados após refinamento da malha dentro da contração (iii).

A Tabela 4.15 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra *B*.

**Tabela 4.15-** Parâmetros utilizados no Fluent.

4:1:4	Velocidade [m/s]	Factor de relaxação	Iterações
i			61000
ii	1.30E-3	1E-3	154600
iii		1E-3	78000

Nenhum destes resultados foi satisfatório, como é verificável pelas figuras.

### Amostra C em canal sem contração

A Tabela 4.16 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra C.

**Tabela 4.16-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra C e sem contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.11E-04	6.49E-03	2.120E+04
1.30E-03	1.19E-02	2.095E+05
1.54E-03	1.41E-02	4.076E+05
2.37E-03	2.16E-02	1.619E+06
4.03E-03	3.68E-02	2.902E+06
5.93E-03	5.41E-02	3.262E+06
7.59E-03	6.92E-02	3.190E+06
1.35E-02	2.47E-01	2.668E+06

### 4.4.3 Canal 8:1:8

#### Resultados com a água e com contração

A Tabela 4.17 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais com água.

**Tabela 4.17-** Resultados para as quedas de pressão com a água, canal com contração.

<b>Caudal [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Número de Reynolds</b>	<b>Queda Pressão [Pa] (teórico)</b>	<b>Queda de Pressão [Pa] (numérico)</b>
1.66E-11	0.01	8.36E+00	8.33E+00
1.66E-10	0.1	8.36E+01	8.33E+01
8.28E-10	0.5	4.18E+02	4.16E+02
1.66E-09	1	8.36E+02	8.31E+02
2.48E-09	1.5	1.25E+03	1.25E+03
3.31E-09	2	1.67E+03	1.67E+03
6.62E-09	4	3.34E+03	2.79E+04
9.93E-09	6	5.01E+03	5.00E+03
1.32E-08	8	6.69E+03	6.67E+03
1.66E-08	10	8.36E+03	8.33E+03
	<b>P<sub>0</sub> (numérico)</b>	<b>P<sub>0</sub> (teórico)</b>	
<b>Entrada/Saída</b>	22.473	23.0391	
<b>Estenose</b>	17.908	17.7	

### **Amostra A em canal com contração**

A Tabela 4.18 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra A.

**Tabela 4.18-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra A e com contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.12E-04	1.30E-02	2.31E+04
1.31E-03	2.38E-02	4.35E+04
1.54E-03	2.81E-02	5.64E+04
2.37E-03	4.33E-02	7.52E+04
4.04E-03	7.36E-02	1.22E+05
5.93E-03	1.08E-01	1.70E+05
7.60E-03	1.39E-01	2.09E+05
1.35E-02	2.47E-01	1.179E+06

#### **Amostra A em canal sem contração**

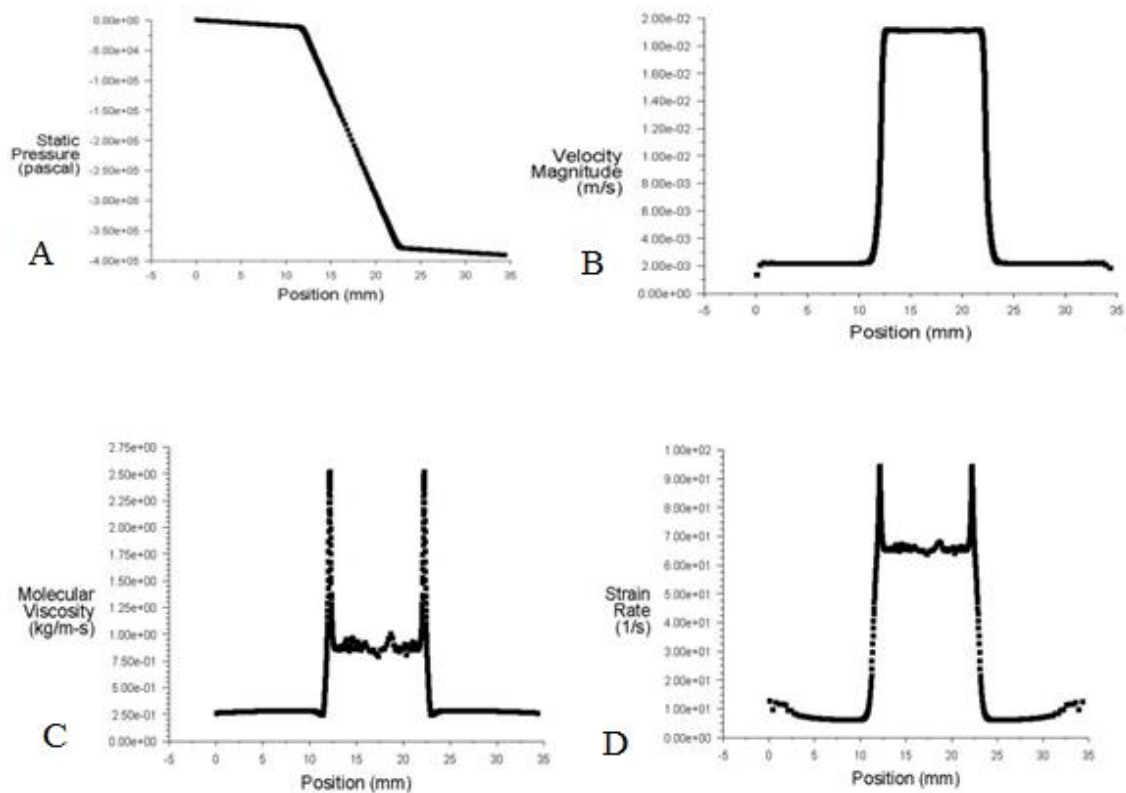
A Tabela 4.19 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra A sem contração.

**Tabela 4.19-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra A e sem contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.12E-04	1.30E-02	5.290E+03
1.31E-03	2.38E-02	1.012E+04
1.54E-03	2.81E-02	1.198E+04
2.37E-03	4.33E-02	1.977E+04
4.04E-03	7.36E-02	3.783E+04
5.93E-03	1.08E-01	6.032E+04
7.60E-03	1.39E-01	8.274E+04
1.35E-02	2.47E-01	1.404E+05

### Amostra B em canal com contração

Para esta amostra e neste canal foram encontradas as soluções das velocidades  $1.31E-3$  [m/s] e  $1.54E-3$  [m/s]. Tanto abaixo como acima destas, o mesmo problema persistiu: a não convergência da solução. A Figura 4.13 exemplifica o resultado obtido, sendo que para a velocidade menor é muito semelhante. É visível o ruído dentro da contração. A Tabela 4.20 apresenta o resultado das quedas de pressão.



**Figura 4.13-** Resultado relativo à velocidade  $1.54e-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte.

**Tabela 4.20-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra *B* e com contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
1.31E-03	2.38E-02	1.03E+6
1.54E-03	2.81E-02	1.18E+6

### **Amostra *B* em canal sem contração**

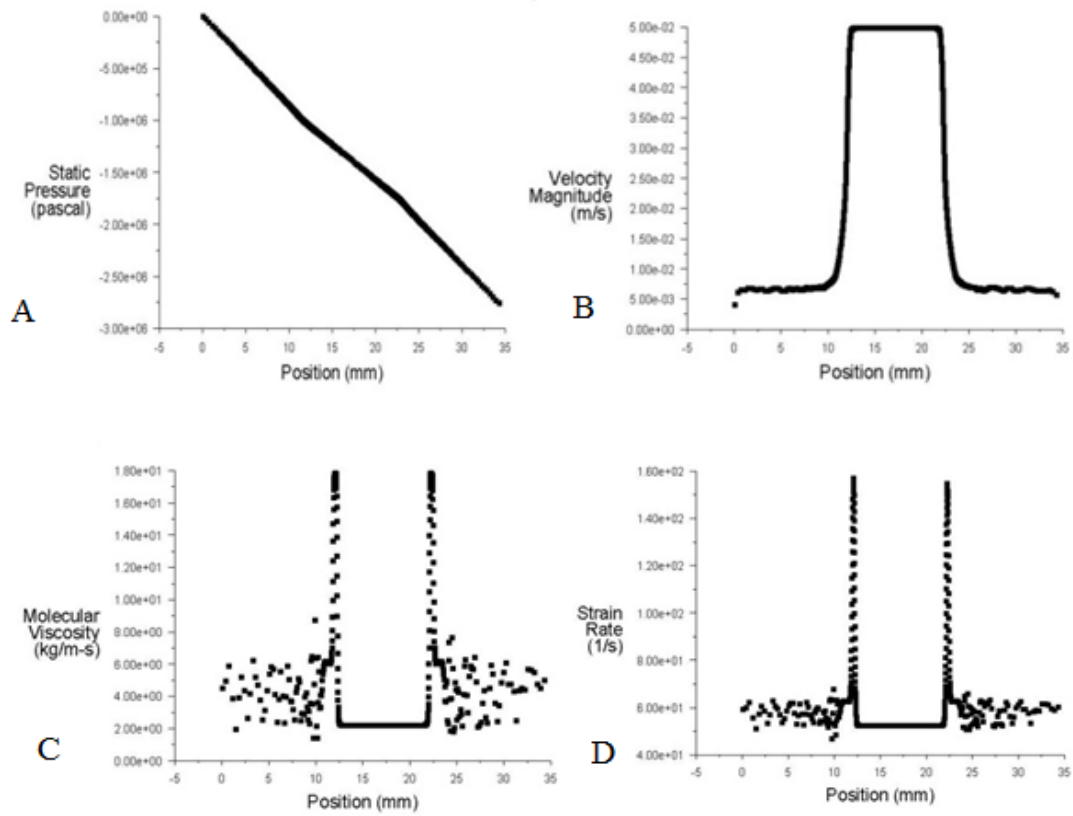
A Tabela 4.21 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra *B* sem contração.

**Tabela 4.21-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra *B* e sem contração.

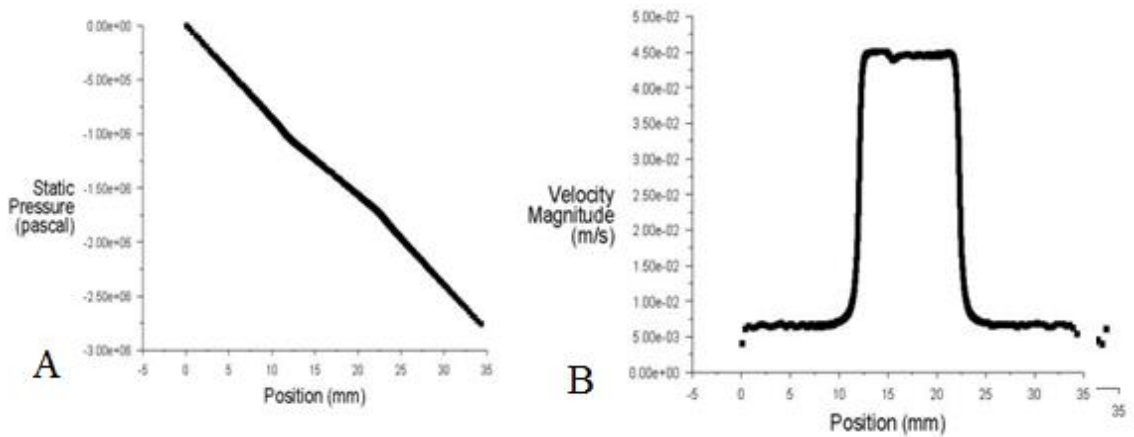
<b>Plots</b>		
<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Caudal [ml/min]</b>	<b>Queda Pressão [Pa]</b>
7.12E-04	1.30E-02	9.030E+03
1.31E-03	2.38E-02	3.672E+04
1.54E-03	2.81E-02	7.039E+04
2.37E-03	4.33E-02	2.739E+05
4.04E-03	7.36E-02	6.405E+05
5.93E-03	1.08E-01	8.586E+05
7.60E-03	1.39E-01	9.857E+05
1.35E-02	2.47E-01	1.214E+06

### **Amostra *C* em canal com contração**

Nesta amostra, foram testados outros métodos de discretização do momento, nomeadamente o PowerLaw e o Quick e ainda dois factores de relaxação diferentes,  $1e^{-2}$  e  $1E-3$ , de forma a tentar uma melhor convergência da solução. As Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 mostram os resultados obtidos.



**Figura 4.14-** Resultado relativo à velocidade  $1.31e^{-3}$ : a) pressão; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte. (i)



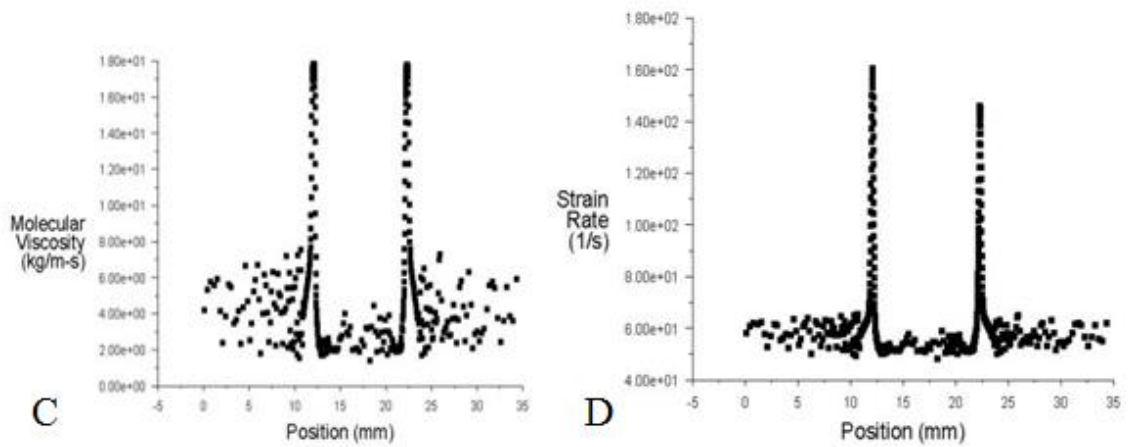
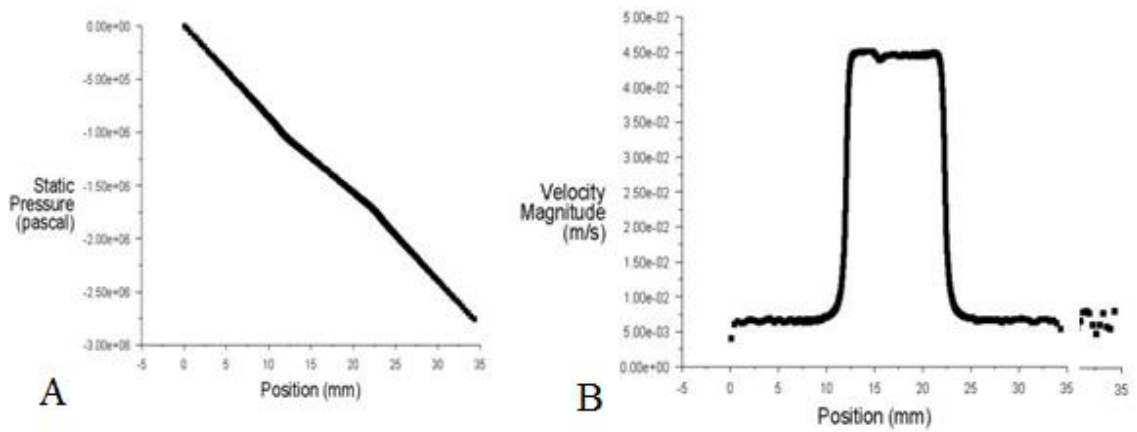


Figura 4.15- Resultado relativo à velocidade  $1.31E-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte.]. (ii)



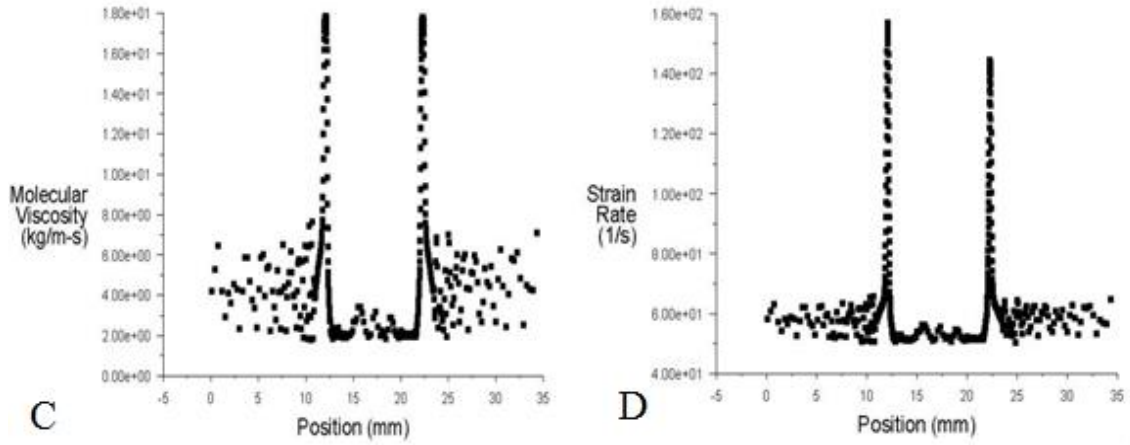


Figura 4.17- Resultado relativo à velocidade  $1.31E-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte. (iii)

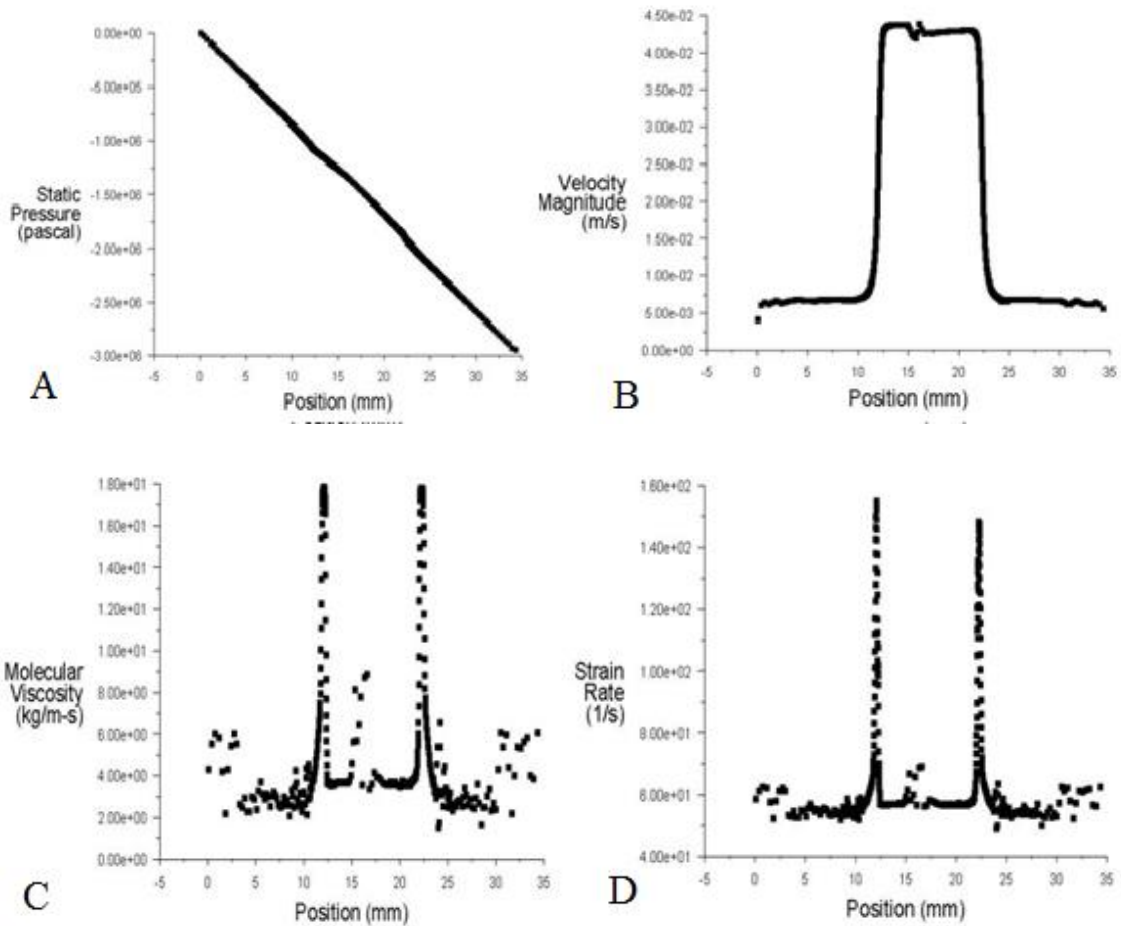


Figura 4.16- Resultado relativo à velocidade  $1.31E-3$ : a) pressão relativa; b) velocidade; c) viscosidade; d) taxa de corte.]. (iv)

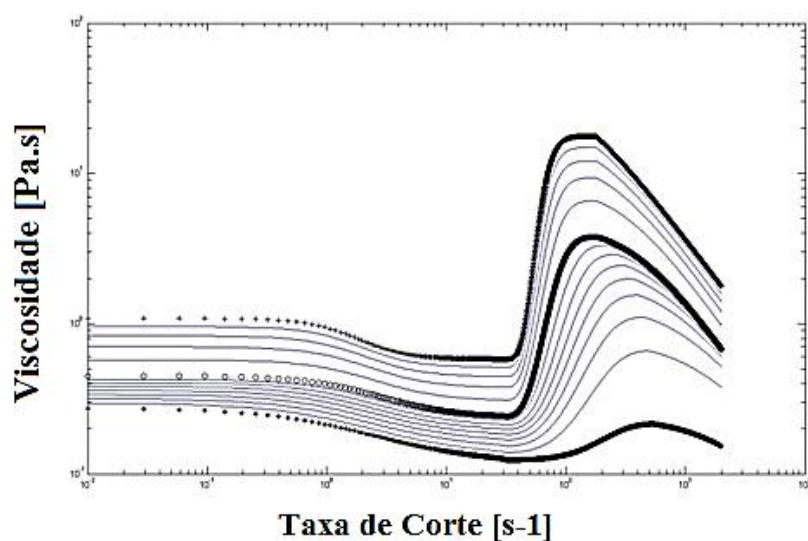
A Tabela 4.22 identifica os diferentes métodos de discretização do momento utilizados, bem como o factor de relaxação e o número de iterações em cada caso das Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17.

**Tabela 4.22-** Diferentes parâmetros utilizados no Fluent

<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Figura</b>	<b>Factor de Relaxação</b>	<b>Iterações</b>	<b>Método</b>
<b>4.04e-3</b>	i	0.01	31000	Second Order
	ii	0.001	36000	
	iii	0.0001	51000	Power Law
	iv	0.001	3500	Quick

Pelas figuras facilmente se conclui que a solução não melhorou. Outro aspecto importante é que, relativamente ao gráfico da pressão, verifica-se que é quase uma recta o que não se deveria verificar uma vez que estamos na presença de um microcanal com uma contração. Uma justificação possível mas pouco fiável, é que, a essas velocidades o fluido se comporte como reofluidificante, em vez de reoespesante.

Como não se obtiveram resultados, experimentou-se outra maneira de resolver. O Fluent permite que a simulação seja iniciada a partir de zero, ou a partir de uma solução anterior. A ideia foi inicializá-la a partir de uma solução que convergiu, da amostra A, e utilizando UDFs intermédias até chegar à amostra C. Como as curvas de viscosidade das amostras mais viscosas dão um grande salto quando se comportam como reoespesante em relação à da amostra A, poderia ser uma das causas pelas quais o Fluent não convergia a solução. Assim, foram criadas UDFs com novos parâmetros reológicos entre estas curvas, como mostra a Figura 4.18, onde as curvas a negrito correspondem às obtidas no Capítulo 2, e iniciaram-se as simulações sempre a partir da anterior e nunca do zero. No entanto, esta experiência também não foi a solução para os problemas de convergência da solução.



**Figura 4.18-** Curvas de viscosidade intermédias.

**Amostra C em canal sem contração**

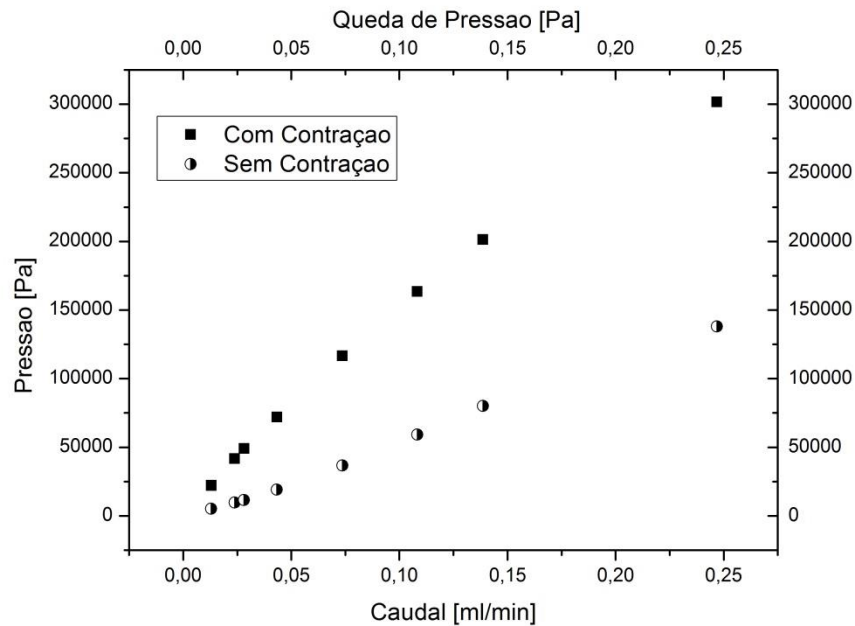
A Tabela 4.23 apresenta os resultados obtidos para a queda de pressão, para os distintos caudais da amostra C.

**Tabela 4.23-** Resultados para as quedas de pressão com a amostra C e sem contração.

<b>Plots</b>		
<b>Velocidade</b>	<b>Caudal</b>	<b>Queda Pressão</b>
[m/s]	[ml/min]	[Pa]
7.12E-04	1.30E-02	2.172E+04
1.31E-03	2.38E-02	2.151E+05
1.54E-03	2.81E-02	4.079E+05
2.37E-03	4.33E-02	1.649E+06
4.04E-03	7.36E-02	2.990E+06
5.93E-03	1.08E-01	3.364E+06
7.60E-03	1.39E-01	2.047E+06
1.35E-02	2.47E-01	2.748E+06

#### 4.1 Conclusões / comparação dos resultados experimentais e numéricos.

No gráfico da Figura 4.19 está representado o resultado das quedas de pressão relativamente a ao canal 8:1:8 e todos os caudais com a amostra A.



**Figura 4.19-** Quedas de pressão obtidas pelas simulações numéricas: Canal 8:1:8.

Através do gráfico verifica-se a diferença entre as quedas de pressão quando o canal apresenta contração e quando não apresenta. A contração faz aumentar consideravelmente a queda de pressão, devido ao dar-se uma diminuição da secção, logo, o fluido escoar mais dificilmente. Isto é visível para todas as geometrias.

Os resultados mostraram ainda que os valores das quedas de pressão obtidos numericamente são maiores que os experimentais, o que de alguma forma faz sentido devido a todos os erros associados à experimentação na microfluidica, deste o próprio fluido, que como já foi dito, não foi reproduzido como era esperado, até ao próprio sensor de medição e técnica, a bomba de seringa, e passando também pela geometria,

que tinha os cantos suavizados, o que faz com que a queda de pressão seja menor. Os canais não foram impressos tal e qual como foram desenhados no *Ansys*, e para além dessa situação, a plotter de corte apresenta dificuldades em recortar ângulos rectos, deformando a geometria, enquanto no *Ansys* os ângulos rectos não apresentam qualquer problema.

A Tabela 4.24 seguinte é a comparação entre os resultados práticos e numéricos obtidos:

**Tabela 4.24-** Resultados experimentais e numéricos das quedas de pressão para a amostra A.

		Delta P [Pa]		
Canal	Caudal [ml/min]	Experimental	Numérico	% Erro Relativo
			<b>Com contração</b>	
	0.0269	69700	93600	34
<b>2:1:2</b>	0.03441	71568.51137	107202.68388	50
	0.02162	31065.54	19277.86	38
<b>4:1:4</b>	0.03676	58369.25	88307.40397	52
	0.05405	151370.51724	112791.2781	25
<b>8:1:8</b>	0.07361	137826.69562	163421.92247	19
			<b>Sem contração</b>	
<b>2:1:2</b>	0.0613	102456.1021	141978.01841	39
<b>8:1:8</b>	0.108	47734.10981	59323.561	24

Verifica-se que esta percentagem de erro nunca ultrapassa 50%, no entanto, a diferença é bastante elevada, devido à grande diferença entre os valores numéricos obtidos e os experimentais.

## 5 Considerações finais, conclusões e trabalhos futuros

O objectivo principal deste trabalho consistiu em esclarecer e compreender o mecanismo de absorção de energia de materiais porosos quando preenchidos com fluidos reoespessantes.

A resposta reológica de três amostras diferentes com comportamento reoespessante (variando a concentração de partículas de sílica em polipropileno glicol) foi estudada por meio de um reómetro rotacional. A estas amostras foi ainda adicionado 1% de álcool de forma a diminuir a sua viscosidade e facilitar a sua impregnação nas esponjas, e deixado durante uma semana a evaporar para realizar novos testes reológicos. Assim, os resultados reológicos permitiram comprovar não só que as propriedades do fluido em questão são semelhantes antes e depois da adição de álcool mas também que a curva de viscosidade do estado estacionário é semelhante à do estado inicial. Adicionalmente, estes resultados permitiram ajustar os parâmetros reológicos a utilizar no modelo matemático utilizado para realizar as simulações numéricas.

Os testes de impacto foram realizados com esponjas de células abertas, que tornam a espumas mais flexíveis e com capacidade para manter o fluido dentro da mesma, apenas escoando entre os demais poros, a menos que seja sujeita a uma força. Estas esponjas impregnadas de fluido, permitiram comprovar que quanto maior a concentração de partículas, maior é o comportamento reoespessante e maior a protecção que a esponja oferece. Comprovou-se também com estes testes a necessidade de atingir um determinado valor de taxa de corte que se encontre entre o valor crítico e o valor máximo, para que o comportamento reoespessante seja ativado e a protecção seja efectiva. Neste trabalho, com 25% do volume vazio da esponja preenchido com fluido, conseguiu-se absorver cerca de 30% da energia aplicada.

A parte experimental relacionada com a microfluidica, apesar de apenas ser utilizada uma das amostras (a menos viscosa com 5% de partículas de  $\text{SiO}_2$ ), não foi bem-sucedida, não sendo por isso possível retirar conclusões definitivas. Os canais

fabricados em PDMS não aguentaram as elevadas pressões devidas ao escoamento dos fluidos reoessantes.

As simulações numéricas permitiram simular o escoamento da amostra menos concentrada (A), mas não foi possível simular o escoamento para as restantes amostras (B e C), devido a problemas de convergência.

Como trabalhos futuros seria interessante resolver os problemas encontrados ao longo deste trabalho, nomeadamente:

1. **Microfluidica**- desenvolvimento de microcanais de aço capazes de suportar altas pressões. Seria também necessário um estudo do escoamento de STF em diferentes configurações geométricas já desenvolvidas no CEFT;
2. **Simulação Numérica**: tentar resolver o problema relativo à implementação do modelo de comportamento reoessante no Fluent de forma à solução convergir;
3. **Relacionamento entre Reologia, Microfluidica e CFD**: uma vez resolvidos os problemas relativamente à microfluidica e às simulações numéricas, tentar relacionar estas três áreas de forma a encontrar a energia absorvida em materiais compósitos de STF sem a necessidade da realização dos testes de impacto.

Também seria interessante fazer um mesmo estudo mas com diferentes fluidos reoessantes e descobrir as principais diferenças entre eles, em termos de absorção energética, comportamento reológico, etc.

Para além dos problemas relativos a este trabalho, seria aliciante, da mesma forma que existem os coletes à prova de bala bem como os ténis ou ainda os fatos militares de combate, desenvolver uma peça de vestuário ou calçado, como por exemplo umas calças e uns sapatos, com esta finalidade, para uso diário.

Nos anexos N e O, respectivamente, encontram-se o poster relativo a este trabalho exposto numa conferência de Reologia na Bélgica (Anual European Rheology Conference (AERC)), e o resumo submetido para o primeiro Encontro de Jovens Investigadores (ERI) a realizar no Instituto Politécnico de Bragança, em Novembro de 2013.

## 6 Bibliografia

- Ansys, Inc. 2009.** Ansys Fuent 12.0. *User's Guide*. 2009.
- Barnes, H A. 1989.** Shear-Thickening ("Dilatancy) in suspension of nanoaggregating solid particles dispersed in newtonian liquids. 1989.
- Bateman, R. 2013.** *Wikipedia*. [Online] 15 de Março de 2013. [Citação: 23 de Julho de 2013.] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Simula%C3%A7%C3%A3o>.
- Betioli, A M, et al. 2009.** Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. 2009.
- Bettin, G. 2005.** Energy absorption of reticulated foams filled with shear-thickening silica suspensions. 2005.
- Boersma, W H, Lavens, L e Stein, H. 1990.** Shear thickening (dilatancy) in concentrated dispersions. 1990, Vol. 36.
- Bossis, G e Brady, J F. 1989.** The rheology of brownian suspensions. 1989.
- Bowen, J, Cheneler, D e Robinson, A. P. 2012.** *Microelectronic Engineering*. 2012, Vol. 97.
- Bruus, H. 2004.** Theoretical microfluidics. 2004.
- Cavadas, A M. 2008.** Hidrodinâmica de jactos de impacto confinados. *escoamento de fluidos newtonianos e não Newtonianos*. 2008.
- Chaplin, M. 2013.** *Water structure and science*. [Online] Julho de 2013. [Citação: 2 de Setembro de 2013.] <http://www.lsbu.ac.uk/water/chaplin.html#top>.
- Dawson, M. 2008.** Modeling the Dynamic Response of Low-Density, Reticulated, Elastomeric Foam Impregnated with Newtonian and Now-Newtonian Fluids. 2008.
- 2013.** Dilatant. *www.wikipedia.org*. [Online] 16 de Junho de 2013. [Citação: 25 de Julho de 2013.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Dilatant>.
- Doraiswamy, D. 2002.** *The Origins of Rheology: A Short Historical Excursion*. 2002. Vol. 71.
- Edison, C. 2009.** Escoamento de Poiseuille, de Stokes, de Couette e de Darcy. *Carlos Edison : Trata-se de uma miscelânea sobre Engenharia Química e áreas afins*. [Online]

22 de 04 de 2009. [Citação: 03 de 10 de 2013.]  
<http://carlosedison.blogspot.pt/2009/04/escoamentos-de-poiseuille-de-stokes-de.html>.

**EMC.** Apostila de processos 4. *FUNDAMENTOS DE REOLOGIA DE MATERIAIS POLIMÉRICOS*.

**Evonik Industries.** 2010. Aerosil fumed silica in unsaturated polyester resins and vinyl ester resins. 2010.

**Evonik Industries AG .** 2011. Aerosil 200. *Evonik Industries*. [Online] 2011. [Citação: 1 de Agosto de 2013.] <https://www.aerosil.com/lpa-productfinder/page/productsbytext/detail.html?pid=1855&lang=en>.

**Farr, R S, Melrose, J R e Ball, R C.** 1997. Kinetic theory of jamming in hard-sphere startup flows. 1997.

**Fernandes, C S.** 2003. Simulação do escoamento não-isotérmico de fluidos não-Newtonianos em canais convergentes/divergentes. 2003.

**Fernandes, C S V.** 2003. Simulação do escoamento não-isotérmico de fluidos não-Newtonianos em canais convergentes/divergentes. 2003.

**Filho, P J.** 2008. Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com Aplicações em Arena. 2. s.l. : Visual Books Ltda, 2008, p. 372.

**Galindo-Rosales, F J, et al.** 2011. How Dr. Malcom M. Cross may have tackled the development of " An apparent viscosity function for shear thickening fluids". 2011.

**Galindo-Rosales, Francisco e Rubio-Hernandes, F.** 2009. Static and dy. *static and dynamic yield stress of aerosil 200 suspensions in polypropylene glycol*. 2009.

**Galindo-Rosales,, F J, et al.** 2011. How Dr. Malcom M.Cross may have tackled the development of "An apparent viscosity function for shear thickening fluids". 2011.

**Gaspar, D, Barroca, R e Pitama, R.** 2003. Comparação das simulações numéricas obtidas por códigos comerciais de dinâmica de fluidos computacional. 2003.

**Gaspar, P D e Pitarma, R A.** 2010. Esquema de discretização em escoamentos com regime de convecção mista: Estudo de caso. 2010.

**Gaspar, P D e Pitarma, R. A.** 2010. Esquemas de discretização em escoamentos com regime de convecção mista: Estudo de caso. 2010.

**Gaspar, P D, Barroca, R F e Pitarma, R A.** 2003. Comparação das simulações numéricas obtidas por códigos comerciais de dinâmica de fluidos computacional. 2003.

- Gresham, R M. 2008.** Viscosity: A fluid's resistance to flow. 2008.
- Haminiuk, C W. 2005.** Comportamento reológico e fracionamento péctico das polpas integrais de aracá (*Psidium cattleianum* sabine) e amora-preta (*Rubus* spp). 2005.
- Hanlon, M. 2006.** New Shear Thickening Fluid (STF) enables flexible, comfortable armor. 2006.
- Hayves, W C, McMahon, T A. e Robinovitch, S N. 1997.** *Bone Fracture Prevention Garment And Method.* 5.599.290 United States, 04 de Fevereiro de 1997.
- Hilyard, N C e Cunningham, A. 1994.** Low density cellular plastics. 1994.
- Hoffman, R L. 1972.** Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. Observations of flow instability. 1972.
- Jang, W Y, Kraynik, A M e Kyriakides, S. 2007.** On the microstructure of open-cell nfoam and its effect on elastic properties. 2007.
- Kalman, D P, et al. 2007.** POLYMER DISPERSION BASED SHEAR THICKENING FLUID- FABRICS FOR PROTECTIVE APPLICATIONS. 2007.
- Laun, H M e Bung, R. 1992.** Rheological and small-angle neutron-scattering investigation of shear-induced particle structures of concentrated polymer dispersions submitted to plane poiseulle and couette-flow. 1992.
- Lee, Y S, et al. 2002.** Advanced body armor utilizing shear thickening fluids. 2002.
- Lidervan, M. 2005.** Avaliação da fase extratora polidimetilsiloxano/ polipirrol nas análises de antidepressivos em ampostras de plasma, através das técnicas de extracção sortiva em barra de agitação e cromatografia líquida. 2005.
- Lima, R, et al. 2008.** In vitro blood flow in a rectangular PDMS microchannel: experimental observations using a confocal micro-PIV system. 2008, pp. 153-167.
- Malkin, Alexander Ya. 1994.** *Rheology Fundamentals.* Moscow : s.n., 1994.
- Malkin, Alexander Yakovlevich. 1994.** Fundamental Topics in Rheology. *Rheology Fundamentals.* 1994.
- Malvern Instruments. 1965.** Reometria - rotacional. *www.malvern.com.br.* [Online] 1965. [Citação: 25 de Julho de 2013.] <http://www.malvern.com.br/labpor/technology/rheometry-rotational.htm>.
- Marques, L. 2011.** O que são polímeros e porque são interessantes? [Online] 2011. [Citação: 3 de Agosto de 2013.] <http://www.videos.ueevora.pt/oquesaopolimeros.pdf>..

- Mattiusi, E, et al. 2007.** ESCOAMENTO LAMINAR DE FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS EM TUBOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL ELÍPTICA. 2007.
- Mezger, Thomas G. 2005.** *The Rheology - Handbook*. Ulrich Z. s.l. : Ulrich Zorll, 2005.
- Mihailenko, T. 2006.** Estudo reológico de espessantes acrílicos. 2006.
- Moreira, Miguel. 2007.** A equação de Bernoulli da Hidráulica. 2007.
- Park, J Y, et al. 2010.** Increased poly(dimethylsiloxane) stiffness improves viability and morphology of mouse fibroblast cells. 2010.
- Pedro, R. 2000.** Reologia e modificadores reológicos. 2000.
- Peifer, M T. 2006.** Estudo da influência de formulações de espessante acrílico em sistemas pigmentados de alto PVC2006. 2006.
- Pinto, E, et al. 2013.** Fabricação de microcanais utilizando o método de Xurografia: Visualização da camada livre de células. 2013.
- Pordeus, R V. 2008.** Fenômeno de transportes- Mecânica dos fluidos. *Considerações e propriedades dos fluidos*. 2008.
- Ramirez, J G. 2004.** Characterization of Shear-Thickening Fluid-filled foam systems for use in energy absorption devices. 2004.
- Rosales, F, Hernández, F e Navarro, J. 2009.** Shear-thickening behavior of Aerosil R816 nanoparticles suspensions in polar organic liquids. 2009.
- Santos, N A. 2009.** Estudo da Reologia de Fluidos Análogos ao Sangue. 2009.
- Scharram, Gebhard. 1998.** *A practical Approach to Rheology and Rheometry*. s.l. : HAAKE, 1998.
- Sigma Aldrich. 2011.** Ficha de dados de segurança. *Propileno Glicol*. 2011.
- Sigma-Aldrich. 1951.** *Product Information- Silica, fumed*. 1951.
- Soares, R. 2000.** Principios da Reologia. 2000.
- Stickel, J J e Powell, R L. 2005.** Fluid mechanics and rheology of dense suspensions. 2005.
- . 2005. Fluid Mechanics and Rheology of Dense Suspensions. 2005.
- Wagner, N J e Brady, J F. 2009.** Shear thickening in colloidal dispersions. 2009.
- Werlang, M M. 1996.** Silarilenos-Siloxanos: Síntese, correlação estrutura-propriedades e blendas com polímeros orgânicos. 1996.

**White, M F. 2006.** Viscous Fluid Flow. 2006.

**Wilson, R. 2010.** Footwear Designer. *Coroflot*. [Online] 2010. [Citação: 25 de 09 de 2013.] <http://www.coroflot.com/reggie2k4>.

**Wilson, T V. 2012.** how stuff works. *How liquid body armor works*. [Online] 2012. [Citação: 5 de 09 de 2013.] <http://science.howstuffworks.com/liquid-body-armor.htm>.

## 7 Anexos

### 7.1 Anexo A- Protocolo para preparação das amostras

Material a utilizar:

- 2 Frascos com tampa;
  - Espátula;
  - Lenços de papel;
  - Balança;
  - Parafina;
  - Misturador;
  - Bomba de ar;
1. Lavar o material a utilizar e secá-lo devidamente;
  2. Certificar-se que a balança está limpa e não apresenta pó ou sujidade, o que pode comprometer as medições;
  3. Após a realização dos cálculos devidos da Equação 1, proceder à sua pesagem, utilizando os componentes SiO<sub>2</sub> e PPG 400 (Polypropileno glycol);
  4. Com auxílio da espátula, misturar os dois componentes após colocados no frasco (podem ser colocados por fases, não necessitando de ser colocadas as quantidades completas de uma vez);
  5. Fechar o frasco da mistura com parafina;
  6. Lavar o material todo e coloca-lo no local devido;
  7. Dentro do frasco colocar a varinha do misturador, envolvendo o gargalo com parafina de forma a evitar a queda de pó ou lixo, e ligar a misturadora com uma velocidade não muito elevada, nem muito baixa durante 3h até que a mistura seja relativamente líquida e homogénea;
  8. Após a misturação, verter a mistura para um frasco de menor dimensão e mais estreito, o que facilita o trabalho no reómetro, (um de plástico, por exemplo);
  9. Colocar o novo frasco na bomba de vácuo de forma retirar as bolhas de ar, durante 1 hora.
  10. Levar posteriormente o frasco a um banho de agitação para distribuir as partículas da amostra, evitando o risco de elas se concentrarem todas na mesma zona da amostra, o que compromete os resultados reométricos.

11. Pode deixar-se o frasco aberto até ao dia seguinte, desde que num lugar relativamente limpo, para o caso de ainda restarem bolhas de ar.
12. Finalmente, está pronta a ser utilizada.

## **7.2 Anexo B- Procedimento para utilização do reómetro**

1. Ligar o fornecedor de ar comprimido e ajustar a pressão até 5 bar;
2. Ligar o reómetro e esperar pela mensagem “status- ok”, que aparece no monitor do reómetro;
3. Ligar o programa que controla o reómetro, o RHEOPLUS;
4. Mudar a cabeça do reómetro para a posição de referência – pode ser feito utilizando o painel do reómetro, pressionando o botão “online” e depois primir a tecla “ref”;
5. Remover o sistema protector do reómetro;
6. No software do reómetro, abrir o comando “control panel” e:
  - Iniciar o equipamento para que se estabeleça contacto entre o software e o reómetro, premindo a opção “initialize”;
  - escrever a temperatura pretendida para realizar o ensaio e premir “set”;
  - montar a geometria a utilizar:
    - levantar a estrutura de acoplamento;
    - inserir o encaixe da geometria, alinhando as marcas num e noutra;
    - baixar a estrutura de acoplamento;
  - escolher a opção “Standard liquid” no painel de controlo;
  - clicar em “set gap zero” (obrigatório se a geometria a utilizar é o cono-prato ou o prato-prato);
  - mover a cabeça do reómetro, clicando Lift position (por exemplo 70 mm) e remover a geometria;
  - baixar a cabeça do reómetro para uma posição equivalente a 1 mm;
  - calibrar a inercia do aparelho, clicando “service” → “inertia drive” → “start” → “save”;
  - Mover a cabeça do reómetro, premindo “lift position” e montar a geometria de novo;
  - Mover a cabeça do reómetro para a posição de medida, carregando “Meas. Position”;
  - Esperar que seja atingido o equilíbrio térmico;
  - Mover a cabeça do reómetro para uma posição equivalente a 1 mm (deve ser a mesma que na calibração do equipamento);

- Calibrar o sistema de medida, a geometria fazendo “service” → “inertia” → meas. system → start → save
7. Calibrar o motor sempre que o software o pedir , fazendo “service” → “motor adjustment” → “start”. Este processo demora cerca de 15 minutos, e deve ser realizada sempre que a clibração anterior expirar (cada 90 dias. Mais ou menos), ou quando ocorrerem alterações sigificantes no sistema e no final, pressionar de novo “set zero gap”;
  8. Abrir um novo livro de trabalho fazendo “file → new”;
  9. Selecionar o tipo de teste que se quer realizar, na lista “standard templates”;
  10. Abrir a janela “measurement window” e definir os parametros requeridos para a análise;
  11. Voltando à janela “control panel”:
    - mover a cabeça do reómetro para cima pressionando lift position, para carregar a amostra;
    - baixar a geometria clicando “measuring position”;
    - o sistema vai parar na “trimming position” antes de chegar exactamente à posição “measuring position”, permitindo entre estas que o utilizador retire a amostra em excesso;
    - seleccionar “continue” e o sistema mover-se-á até a posição final esperada;
    - esperar pelo equilibrio térmico;
    - clicar em “reset normal force”;
    - na janela “measuring system” verificar as incompatibilidades usando a opção “check profile”. Esta janela dirá se os parametros têm erros, e se não, fechar a janela e continuar;
    - iniciar o teste primindo “start”;
    - depois de terminar o teste, mover o sistema de medição antes de içar completamente a cabeça do reómetro;
    - remover e limpar a geometria e arrumá-la no devido local;
    - remover a amostra restante na parte de baixo do sistema (o prato) e limpá-lo cuidadosamente, sem arranhar;
    - mover a cabeça do reómetro para a posição de referencia (máximo que a cabeça deste consegue subir) e colocar de novo a protecção desta;
    - Baixar a cabeça do reómetro através do painel do reómetro até que esta camada fique completamente imóvel

- Copiar todos os dados, Tabelas, imagens, fechar o software e desligar o reômetro e o banho térmico;
- Reduzir a pressão e desligar o fornecedor de ar comprimido.

### **7.3 Anexo C- Protocolo de preparação do PDMS e dos microcanais.**

1. Medir o PDMS e o agente de cura, sabendo que para os canais, a razão destes é de 10:1;
2. Agitar bem os dois componentes, para que fiquem bem misturados. Isto formará imensas bolhas de ar que têm de ser retiradas;
3. Levar a amostra ao excicador para retirar essas bolhas de ar- colocra o copo dentro deste e ligar o vácuo e ao fim de alguns segundos abrir a tampinha de forma a lentamente libertar o ar dentro do excicador;
4. Verter o PDMS nas placas de petri onde já se encontram os microcanais, de maneira a que a camada não seja muito alta nem muito pequena;
5. Com uma pequena agulha, rebentar algumas bolhas que se possam ter formado ao verter;
6. Levar as placas de petri ao excicador (não é obrigatório) de forma a retirar mais algum ar que ainda se encontre na mistura;
7. Levar as placas ao forno a 80°C, durante 20min;
8. Entretanto, preparar as lamelas onde serão colocados os microcanais:
  - Fazer uma nova preparação de PDMS mas agora com uma razão de 20:1;
  - Ferrar a Spin coater com alumínio, bem como a borracha com película transparente, por uma questão de higiene e cuidado;
  - Colocar o circulo de acetato com o furinho no centro no devido local (este furinho serve para, quando ligada a bomba de vácuo, a spin coater criar vácuo, visto que foi projectada somente para as lâminas/lamelas que a própria marca vende;
  - Colocar a lâmina e com uma espátula, adicionar uma pequena quantidade de PDMS;
  - Ligar a bomba de ar, e de seguida a spin coater premindo “Pump”→”Run”. A partir deste momento, a spin coater vai trabalhar a duas velocidades distintas de forma a espalhar o PDMS por todo o comprimento da lâmina.
  - Quando acender a luz verde, desligar a bomba de vácuo e retirar a lâmina.
  - Levar ao forno durante 20min, a 80°C.

9. Retirar os canais do forno e cortá-los de forma a caberem na lâmina;
10. Realizar os furinhos da entrada/saída e quedas de pressão em todos os microcanais, com as pontas de seringa adequadas;
11. Finalmente colar os canais nas lâminas e deixá-las no forno mais 24h até estarem prontos a serem utilizados.

#### **7.4 AnexoE: Protocolo para utilizar o Fluent**

1. General: Pressure-Based; Velocity Formulation Absolute; Time: Steady;
2. Models: Viscous-Laminar;
3. Materials: Fluid; Properties -density [kg/m<sup>3</sup>]-1010, Viscosity [kg/m-s]- user defined-UDF 5%, UDF 10% and UDF 15%;
4. Cell Zone Conditions: Solid, type- Fluid;
5. Boundary Conditions: Inlet-Velocity Inlet; Outlet: Outflow; Symmetries and walls;
6. Reference Values: Compute from Inlet;
7. Solution- Solution Methods: Scheme-Simple; Spatial Discretization: Gradient-Green-Gauss Cell Based; Pressure-Standard; Momentum-Second Order Upwind;
8. Solution Controls: Pressure-0.3; Density-1; Body Forces-1; Momentum-between 1e-2 and 1e-5;
9. Monitors: Iterations to plot-10000; Iterations to Store-10000;
10. Solution Initialization: Compute from Inlet; Initialize;
11. Calculation Activities: Auto-save Every 100 iterations; Edit-Maximum number of Data Files:1;
12. Run Calculation: Number of Iterations-30000; Calculate.

#### **7.5 AnexoE: protocolo para obter os resultados do Fluent**

1. Graphics and Animations- Contours-filled; Surfaces-Symmetries; Display;
2. Plots: XY Plot- Plot direction X, Surfaces- New Surface-Line/Rake- Line in the center of the channel (px x0=0, y0=0.4 ,z0=0, x1=33.618, y1=0.8, z=0). Write to file-Write;
3. Reports: Surface Integrals- Report Type: Area-Weighted Average- Surfaces-Inlet and Outlet. Compute.

## 7.6 AnexoF- Propriedades Químicas do Polipropilenoglicol

**SIGMA-ALDRICH**

*sigma-aldrich.com* FICHA DE  
DADOS DE SEGURANÇA de acordo  
com a Regulamento (CE) No. 1907/2006

**NOME DO PRODUTO: PROPILENOGLICOL**

**COMPOSIÇÃO/ INFORMAÇÃO SOBRE OS COMPONENTES**

### 3.1 Substâncias

Formula:C3H8O2

## 4. PRIMEIROS SOCORROS

### 4.1 Descrição das medidas de primeiros socorros

#### Recomendação geral

Consultar um médico. Mostrar esta ficha de segurança ao médico de serviço.

#### Se for inalado

Se for respirado, levar a pessoa para o ar fresco. Se não respirar, dar respiração artificial.

Consultar um medico.

#### No caso dum contacto com a pele

Lavar com sabão e muita água. Consultar um médico.

#### No caso dum contacto com os olhos

Lavar cuidadosamente com muita água, durante pelo menos quinze minutos, e consultar o médico.

#### Se for engolido

Nunca dar nada pela boca a uma pessoa inconsciente. Enxaguar a boca com água. Consultar um médico.

### 4.2 Sintomas e efeitos mais importantes, tanto agudos como retardados

Até onde sabemos, as propriedades químicas, físicas e toxicológicas não foram minuciosamente investigadas.

## 7. MANUSEAMENTO E ARMAZENAGEM

### 7.1 Precauções para um manuseamento seguro

Evitar o contacto com a pele e os olhos. Evitar a inalação do vapor ou da névoa.

### 7.2 Condições de armazenagem segura, incluindo eventuais incompatibilidades

Armazenar em local fresco. Guardar o recipiente hermeticamente fechado em lugar seco

e bem ventilado.

## **8. CONTROLO DA EXPOSIÇÃO/PROTEÇÃO INDIVIDUAL**

### **8.1 Parâmetros de controlo**

#### **Componentes a controlar com relação ao local de trabalho**

Não contem substâncias com valores limites de exposição profissional.

### **8.2 Controlo da exposição**

#### **Controlos técnicos adequados**

Manusear de acordo com as boas práticas industriais de higiene e segurança. Lavar as mãos antes de interrupções, e no final do dia de trabalho.

#### **Protecção individual**

##### **Protecção ocular/ facial**

Óculos de protecção com um lado protector de acordo com EN 166 Use equipamento de protecção ocular testado e aprovado de acordo com as normas governamentais adequadas, tais como NIOSH (US) ou EN 166 (EU).

##### **Protecção da pele**

Manusear com luvas. As luvas devem ser inspectadas antes da utilização. Use uma técnica adequada para a remoção das luvas (sem tocar a superfície exterior da luva) para evitar o contacto da pele com o produto. Descarte as luvas contaminadas após o uso, em conformidade com as leis e boas práticas de laboratório . Lavar e secar as mãos.

As luvas de protecção seleccionadas devem satisfazer as especificações da Directiva da UE 89/689/CEE e a norma EN 374 derivada dela.

##### **Protecção do corpo**

Roupas impermeáveis. O género de equipamento de protecção deve ser escolhido de acordo com a concentração e a quantidade da substância perigosa no lugar de trabalho.

## **7.7 ANEXO G - Propriedades Químicas do SiO<sub>2</sub>**

FOLHA DE DADOS DE SEGURANÇA - AEROSIL® 200

### **1. IDENTIFICAÇÃO DA SUBSTÂNCIA/PREPARAÇÃO E DA SOCIEDADE / EMPRESA**

#### **Informação do Produto**

Marca AEROSIL® 200

### **2. IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS**

#### **Classificação de acordo com o regulamento (CE) no. 1272/2008 [CLP].**

Observações: Nenhum material ou mistura perigosa de acordo com o Regulamento (CE) no. 1272/2008.

#### **Classificação de acordo com a Directiva 67/548/CE ou a Directiva 1999/45/CE**

Substância ou preparação não perigosa de acordo com as directivas da CE- 67/548/CEE ou 1999/45/CE.

#### **Etiquetagem GHS**

Observações : De acordo com o regulamento EU-CLP (1272/2008) identificação não obrigatória.

#### **Outros Perigos**

De acordo com os critérios do regulamento REACH, nenhum material PBT ou vPvB.

### **4.SOCORROS**

#### **Inalação**

Em caso de liberação de pó do produto:

Possíveis queixas: tosse, espirrar

Levar os afectados para o ar livre.

#### **Contacto com a pele**

Lavar abundantemente em água e sabão.

#### **Contacto com os olhos**

Possíveis problemas devido ao efeito de "corpo estranho".

Em caso de fissura aberta da pálpebra, lavar bem profundamente com muita água. No caso de queixas permanentes: Apresentar o oftalmologista.

#### **Ingestão**

Lavar a boca com água e beber a seguir bastante água.

Após ingestão de grandes quantidades de substância / No caso de queixas apelar para a ajuda médica.

### **Sintomas e efeitos mais importantes, tanto agudos como retardados**

#### **Sintomas**

Nenhum dado conhecido

#### **Perigos**

Nenhum dado conhecido

### **Indicações sobre cuidados médicos urgentes e tratamentos especiais necessários**

Sem perigos que necessitem de medidas de primeiros socorros especiais

## **6. MEDIDAS A TOMAR EM CASO DE FUGAS ACIDENTAIS**

### **Precauções individuais, equipamento de protecção e procedimentos de emergência**

Usar equipamento de protecção individual.

### **Métodos e materiais de confinamento e limpeza**

Amontar e varrer, ou aspirar o derramamento e apanhar num contentor adequado para a destruição.

## **7. MANUSEAMENTO**

### **Precaução para um manuseamento seguro**

Eventualmente aspiração do objeto.

### **Orientação para prevenção de Fogo e Explosão**

Evitar acumulação de cargas electrostáticas.

### **Armazenagem**

### **Condições de armazenagem segura, incluindo eventuais incompatibilidades**

Guardar em lugar seco.

## **8. CONTROLO DA**

### **EXPOSIÇÃO/PROTECÇÃO PESSOAL**

#### **Parâmetros de controlo**

#### **Protecção individual**

#### **Protecção respiratória**

Não é necessário equipamento especial de protecção.

No surgimento de pó: Máscara de pó com filtro de partícula P2

#### **Protecção das mãos**

Usar luvas de protecção feitas dos seguintes materiais: fazenda, borracha, couro.

As informações da solidez do material e do tempo de ruptura não são utilizável para materiais sólidos /poeiras não dissolvidos.

### **Protecção dos olhos**

Óculos de segurança com anteparos laterais

No surgimento de pó: óculos protectores bem presos aos olhos

### **Protecção do corpo e da pele**

Não é necessário equipamento especial de protecção. protecção preventiva para a pele.

### **Medidas de higiene**

Não comer, beber ou fumar durante a utilização. Lavar as mãos e/ou o rosto antes das pausas e antes do fim do trabalho.

Para que se possa garantir a protecção ideal da pele: utilize-se um sabonete com bastante teor de gordura

e um creme para pele para a protecção da pele.

Lavar o vestuário contaminado antes de voltar a usá-lo.

### **Medidas de protecção**

Manusear de acordo com as boas práticas industriais de higiene e segurança.

Se houver uma possibilidade de contacto com a pele / olhos, dever-se-á utilizar as luvas / óculos / fatos de protecção indicados. Se se ultrapassarem os valores-limite relativos aos locais de trabalho e/ou no caso de libertação de maiores quantidades (fugas, derrames, pó), dever-se-á utilizar os equipamentos de protecção respiratória.

## 7.8 AnexoH- Propriedades químicas do PDMS

Property	Unit	Result
One or Two Part	-	Two
Color	-	Colorless
Viscosity (Base)	cP	5100
	Pa-sec	5.1
Viscosity (Mixed)	cP	3500
	Pa-sec	3.5
Thermal Conductivity	btu/hr ft °F	0.15
	W/m °K	0.27
Specific Gravity (Cured)	-	1.03
Working Time at 25 °C (Pot Life - hours)	hr	1.5
Cure Time at 25 °C	hrs	48
Heat Cure Time at 100 °C	minutes	35
Heat Cure Time at 125 °C	minutes	20
Heat Cure Time at 150 °C	minutes	10
Durometer Shore	-	43
Dielectric Strength	volts/mil	500
	kV/mm	19
Volume Resistivity	ohm*cm	2.9E+14
Dissipation Factor at 100 Hz	-	0.00257
Dissipation Factor at 100kHz	-	0.00133
Dielectric Constant at 100 Hz	-	2.72
Dielectric Constant at 100 kHz	-	2.68
Linear CTE (by DMA)	ppm/°C	340
Tensile Strength	PSI	980
	MPa	6.7
	Kg/cm <sup>2</sup>	69
Refractive Index	@ 589 nm	1.4118
Refractive Index	@ 632.8 nm	1.4225
Refractive Index	@ 1321 nm	1.4028
Refractive Index	@ 1554 nm	1.3997

Sylgard® 184 Silicone Elastomer is suitable for:

- LED Lighting encapsulation
- Power supplies
- Connectors
- Sensors
- Industrial controls
- Transformers
- Amplifiers
- High voltage resistor packs
- Relays
- Adhesive/encapsulant for solar cells
- Adhesive handling beam lead integrated circuits during processing.

## 7.9 Anexo I- Informação sobre o sensor

### Installation Instructions for the 26PC Series Pressure Sensors

ISSUE 4  
PK 80083

#### ▲ WARNING

##### PERSONAL INJURY

DO NOT USE these products as safety or emergency stop devices, or in any other application where failure of the product could result in personal injury.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

##### GENERAL INFORMATION

26PC Series pressure sensors are four active element piezoresistive bridges. When pressure is applied, the resistance changes and the 26PC provides an output signal proportional to the input pressure.

Gage pressure is measured with respect to ambient pressure. When applied pressure increases, the differential voltage  $V_2 - V_4$  increases. As pressure decreases, differential voltage  $V_2 - V_4$  decreases.

Differential sensors provide a differential voltage proportional to the pressure differential between port P2 and P1. As  $DP = P_2 - P_1$  increases, differential voltage  $V_2 - V_4$  increases. As  $DP = P_2 - P_1$  decreases, differential voltage  $V_2 - V_4$  decreases.

##### SOLDERING

Limit soldering to 315 °C [600 °F] maximum, with duration of 10 seconds maximum.

##### CLEANING

Proper cleaning fluids should be selected, based on the type of contaminants to be removed. Honeywell recommends alcohols or fluorinated solvents. Do not immerse the sensor.

#### 26PC SERIES PERFORMANCE CHARACTERISTICS at 10.0 ± 0.01 Vdc Excitation, 25 °C

	Min.	Typ.	Max.	Units
Excitation	—	10	16	Vdc
Response Time	—	—	1.0	ms
Input Resistance*	5.5 k	7.5 k	11.5 k	Ohm
Output Resistance*	1.5 k	2.5 k	3.0 k	Ohm
Weight	2			gram

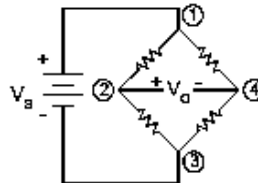
\* Measured using a 1 mA current

#### ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

Operating Temperature	-40 °C to 85 °C [-40 °F to 185 °F]
Storage Temperature	-55 °C to 100 °C [-67 °F to 212 °F]
Compensated Temperature	0 °C to 50 °C [32 °F to 122 °F]
Shock	Qualification tested to 150 g
Vibration	MIL-STD-202, Method 213 (0 kHz to 2 kHz, 20 G sine)

Note: For media compatibility specifications, refer to catalog or web site: [www.honeywell.com/sensing](http://www.honeywell.com/sensing)

#### 26PC CIRCUIT TERMINATION



Pin 1 =  $V_s$  (+)

Pin 2 = Output + ( $V_2$ )

Pin 1 is notched

Pin 2 is next to Pin 1, etc.

Pin 4 = Output - ( $V_4$ )

Pin 3 = Ground (-)

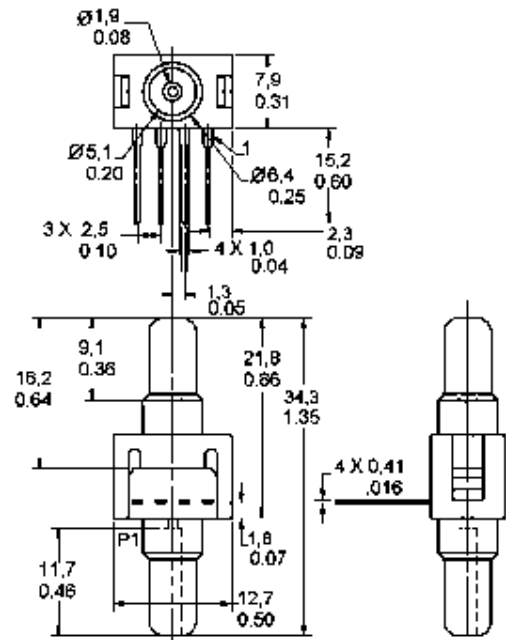
# 26PC Series Pressure Sensors

ISSUE 4 PK 80083

## MOUNTING DIMENSIONS (for reference only) mm/in

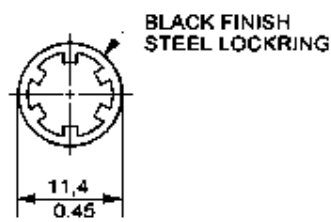
### DIFFERENTIAL SENSOR

1 X 4 Termination (Style 6) Port Style A, Straight (Only)



## ACCESSORY

PC-10182 — Steel Lockring



## 7.10 Anexo J- Impregnação da esponja

Calcular o volume da esponja pelas Equações J.1 e J.2 :

$$\phi = \left( 1 - \frac{\rho_{\text{espuma}}}{\rho_{\text{PU}}} \right) * 100 \quad (\text{J.1})$$

$$j = \frac{V_{\text{vazio}}}{V_{\text{Total}}} \quad (\text{J.2})$$

Sabendo que o valor de  $\rho$  do poliuretano é normalmente 1.5 [kg/m<sup>3</sup>] e que o  $\rho$  da espuma é dado pela Equação J.3:

$$\rho_{\text{espuma}} = \frac{m}{v} \quad (\text{J.3})$$

Uma vez que a espuma utilizada tem a forma de um triângulo, no cálculo do volume total aplica-se a Equação J.4 de volume de um triângulo [cm<sup>3</sup>] e da área da base de um triângulo (Equação J.5).

$$V_{\text{triangulo}} = Ab * e \quad (\text{J.4})$$

$$Ab = \frac{(b * h)}{2} \quad (\text{J.5})$$

Com a Equação J.2, sabendo o  $V_{\text{Total}}$  e o  $\phi$ , calcula-se o  $V_{\text{vazio}}$  e a quantidade de amostra para impregnar na esponja é 25% desse valor. Na Figura J.1 pode ver-se a que corresponde cada incógnita  $h$ ,  $b$  e  $e$ .

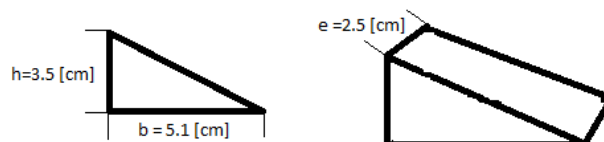


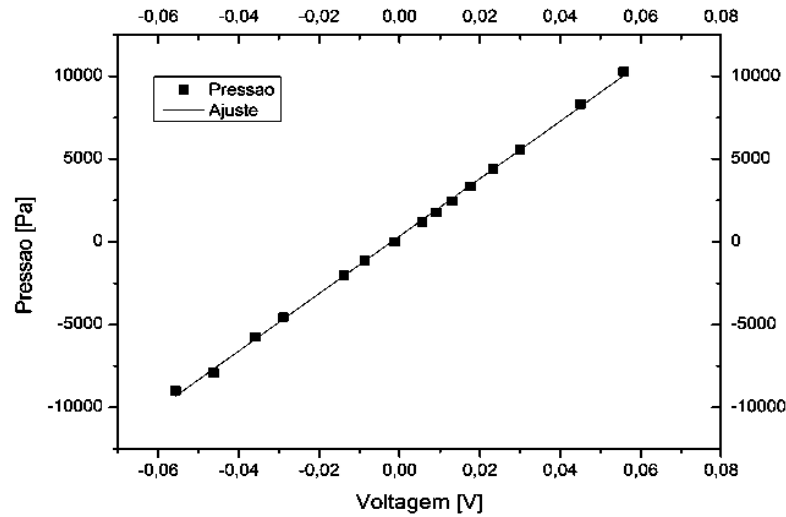
Figura J.1- Dimensões da espuma utilizada.

## 7.11 Anexo K- Calibração do sensor de pressão

A Equação (K.1) de ajuste para o sensor utilizado na amostra (30 [psi]) está descrita seguidamente:

$$P[Pa] = -3368.1651 - 3.45126e^6 * V \quad (K.1)$$

Onde V é o valor constante da voltagem obtida nas medições pelo software, quando atinge um patamar linear. Os restantes valores resultaram de testes previamente obtidos pela calibração do sensor fazendo variar alguns parâmetros a um mesmo caudal, e finalmente, fazendo o ajuste desses resultados, como mostra a Figura.



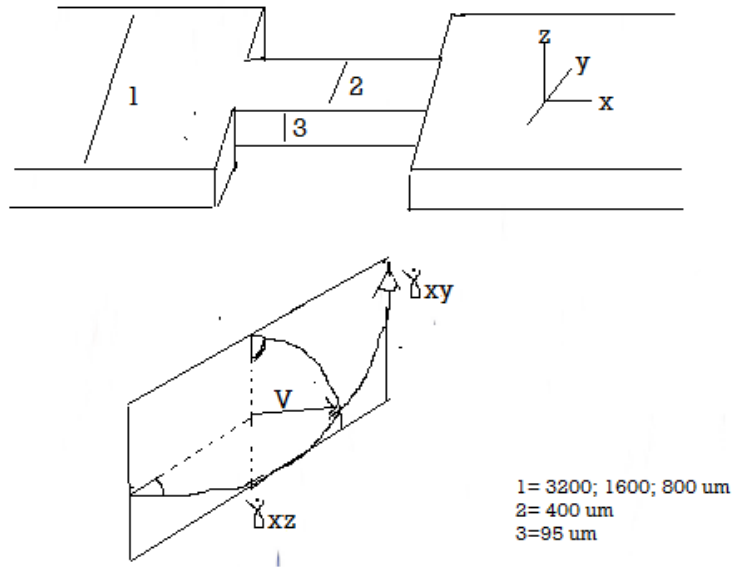
**Figura K.1-** Curva de calibração do sensor 30 [psi].

Fazendo uma média dos valores onde a voltagem é constante e substituindo esse valor na Equação anteriormente descrita, o resultado é a queda de pressão, que é o pretendido. Este mesmo procedimento foi realizado para todos os resultados obtidos neste e nos outros canais.

## 7.12 Anexo L- Exemplo de uma UDF utilizada no Fluent

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity, cell, thread)
{
    real mu_lam;
    real sr = C_STRAIN_RATE_MAG(cell,thread);
    if (fabs(sr)<0.0001)
        mu_lam = 0.25212;
    else if (fabs(sr)<31.6)
        mu_lam = 0.12258+(0.25212-0.12258)/(1.0+pow((6.49522*fabs(sr)*fabs(sr))/(31.6-
fabs(sr))),0.56603));
    else if (fabs(sr)==31.6)
        mu_lam = 0.12258;
    else if (fabs(sr)>563.0)
        mu_lam = 0.21467/(1.0+pow((0.000143493*(fabs(sr)-563.0)),1.0));
    else if (fabs(sr)==563.0)
        mu_lam = 0.21467;
    else
        mu_lam = 0.24767+(0.12258-0.21467)/(1.0+pow((2.08961*(fabs(sr)-31.6))/(563.0-
fabs(sr))),1.68721));
    return mu_lam;
}
```

### 7.13 Anexo M- Dedução da Equação 3.1, Capítulo 3



**Figura M.1**-Escoamento do fluido ao longo do canal.

$$V = 2 \times \bar{V} \quad (\text{M.1})$$

$$V = \frac{Q}{h \times w} \quad (\text{M.2})$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_{xz}^2 + \dot{\gamma}_{xy}^2} \quad (\text{M.3})$$


$$\dot{\gamma}_{xz} = \frac{V}{W_h/2} = \frac{2 \times \bar{V}}{W_h/2} = \frac{4 \times \bar{V}}{W_h/2} = \frac{4 \times Q}{h/W_h^2} \quad (\text{M.4})$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{V}{W_h/2} = \frac{2 \times \bar{V}}{W_h/2} = \frac{4 \times \bar{V}}{W_h/2} = \frac{4 \times Q}{h^2/W_h} \quad (\text{M.5})$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \times Q}{W_h \times h} \times \sqrt{\frac{1}{W_h^2} + \frac{1}{h^2}} \quad (\text{M.6})$$


Finalmente, a Equação M.6 resolve-se em ordem a Q, resultando na equação 3.1.

## 7.14 Anexo N- Poster exposto na Annual European Rheology Conference (AERC), 2-5 April (2013), Leuven, Belgium




Universidad Carlos III de Madrid

### Converting makeup foams into energy absorbing padding: A microfluidic analysis




T. Dinis<sup>1</sup>, J. Rodríguez<sup>2</sup>, A. Sevilla<sup>2</sup>, R. Lima<sup>1,3</sup>, L. Campo-Deaño<sup>3</sup> and F.J. Galindo-Rosales<sup>3</sup>



Universidade do Porto  
FEUP Faculdade de Engenharia

<sup>1</sup>Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal  
<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España  
<sup>3</sup>CEFT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal



**ABSTRACT**

Unintentional falls are the leading cause of non-fatal injury in almost all age groups resulting in bone fracture, bruising, and/or swelling of the impacted region. These accidents are even more dramatic in older adults due to the difficult recovery and increased risk for secondary health issues. Previous research has shown that protective padding is effective at reducing the peak force on the hip at impact. Currently there are two kind of pads available in the market: a) those with a hard shell, which are more effective in decreasing impact forces, although reduce patient compliance, and b) those that are soft, which are more comfortable but less efficient. An ideal solution is the one combining the comfort of a soft pad with the protective properties of the hard one. The purpose of this work is developing a protective foam padding based on commercially available makeup latex foams impregnated with a Shear Thickening Fluid (STF).

We have developed Impact tests with a Falling Weight Impact Tester in order to measure the energy dissipated by the STF. Since foam is a porous media, it can be modeled as a bundle of tubes consisting in a series of sudden contractions and expansions. By using a xurography process, we have developed microfluidic channels consisting of a single sudden expansion/contraction and we have performed flow visualizations. The results confirm that the particles slow down when the velocity is increased in the contraction, due to the rise in the viscosity when the shear thickening behaviour is triggered. Additionally, pressure drop measurements at different flow rates are still being carried out in order to correlate the energy dissipated in the foam with the pressure drop occurring in a sudden expansion/contraction microchannel. Moreover, numerical simulations are also ongoing and will allow us to get a better insight about the correlation between the pressure drops and energy dissipated.

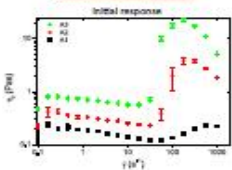
**SHEAR THICKENING FLUIDS**

	5Wwt SiO <sub>2</sub> in PPG400g/mol	A1a	5Wwt SiO <sub>2</sub> in PPG400g/mol + 1Wwt Ethanol
A1	10Wwt SiO <sub>2</sub> in PPG400g/mol	A2a	10Wwt SiO <sub>2</sub> in PPG400g/mol + 2Wwt Ethanol
A2	15Wwt SiO <sub>2</sub> in PPG400g/mol	A3a	15Wwt SiO <sub>2</sub> in PPG400g/mol + 2Wwt Ethanol
A3			

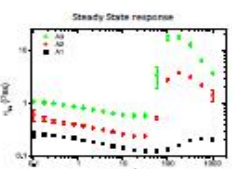
Table 1: Nomenclature and composition of the shear thickening fluids.

**Rheological characterization**

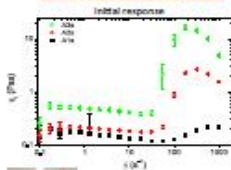
**Before the addition of alcohol**



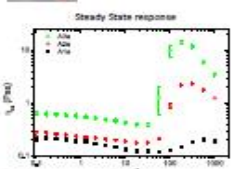
**Steady State response**




**After the expansion of 10Wwt alcohol**




**Steady State response**



**Energy absorbed by the makeup foam filled with shear thickening fluid**




Rosand Falling Weight Impact Tester  
Diameter of the puncher 20mm  
Energy ranged from 2J to 20J  
The impact was recorded with a high speed camera at 3000fps. Results showed that the impregnated foam was not able to absorb the 2J nor 10J impact, suffering from perforation. However, when the impact was of 20J, the shear thickening behavior of the fluid was triggered and the foam was not perforated.




Makeup latex foams from Diosa S.L. with a porosity of 45% were impregnated with shear thickening fluids at a fixed concentration of 25% v/v.

2J Impact




Perforation

10J Impact




Perforation

20J Impact



No perforation

**Microfluidics**



**References**

"Hip pad for protecting greater trochanter from impact", M.C. Garcia, United State Patent US200517997A (2004).  
 "Transient study on the shear thickening behaviour of surface modified fumed silica suspensions in polypropylene glycol", F.J. Galindo-Rosales and F.J. Rubio-Hernández, AP Conf. Proc., 2027, 586 (2008).  
 "Shear-thickening behaviour of Aerosil RB35 nanoparticles suspensions in polar organic liquids", F.J. Galindo-Rosales, et al. Rheol. Acta, 48, 699 (2009).  
 "The dynamic compressive response of an Open-Cell foam impregnated with a non-Newtonian fluid", M.A. Dewson, et al. J. of Applied Mechanics 76, 061011 (2009).  
 "Static and dynamic yield stress of Aerosil 200 suspensions in polypropylene glycol", F.J. Galindo-Rosales and F.J. Rubio-Hernández, Applied Rheology 20, 22787 (2010).  
 "Apparent viscosity function for shear thickening fluids", F.J. Galindo-Rosales, et al. J. Non-Newtonian Fluid Mech. 166, 321-325 (2012).

**Acknowledgement**

Authors acknowledge funding from FCT, COMPETE and FEDER through projects PTDC/SAU-REI/106726/2006, PTDC/SAU-REI/105650/2006, PTDC/SAU-ENB/110929/2010, PTDC/EMS-MFT/05106/2008 and scholarship 3204/BDP/05663/2003 and 3204/BDP/05664/2010.

Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte  
and Nonlinear Fluid Mechanics and Rheology  
Research Group (CFEFT)

3<sup>rd</sup> Annual European Rheology Conference  
Leuven (Belgium) - 2<sup>nd</sup> April 2013

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
www.feup.pt




Figura N.1- Poster relativo a este trabalho exposto numa conferência na Bélgica.

## 7.15 Anexo O- Resumo submetido para o primeiro Encontro de Jovens Investigadores do IPB – Novembro 2013

### CONVERSÃO DE ESPUMAS DE MAQUILHAGEM EM ESPUMAS DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DE IMPACTO

DINIS, Tânia<sup>1</sup>, SEVILLA, Alejandro<sup>2</sup>, LIMA, Rui<sup>1,3</sup>, CAMPO-DEAÑO, Laura<sup>3</sup>, GALINDO-ROSALES, Francisco J.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>tania.cs.dinis@gmail.com, ESTIG, Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Portugal.

<sup>2</sup> Área de Mecánica de Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, España.

<sup>3</sup>Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.

#### RESUMO

Os fluidos reoessantes (STF) são um tipo de fluido que aumenta a sua viscosidade quando é submetido a uma determinada força[1], sendo uma das potenciais aplicações os compósitos absorvedores de energia de impacto. O objectivo deste trabalho é desenvolver espumas protectoras baseadas em esponjas de maquilhagem preenchidas com STF a 25% do volume vazio da esponja. O fluido utilizado é uma suspensão de partículas de sílica fumada (SiO<sub>2</sub>) em polipropileno glicol (PPG) (M<sub>w</sub>=400 [g/mol]) a três concentrações diferentes: 5%, 10% e 15% [w/w] [2].

Numa primeira fase, realizaram-se estudos de reometria de corte e obtiveram-se as curvas de viscosidades destes fluidos sendo que o comportamento reoessante é maior quanto maior a concentração de SiO<sub>2</sub> [3]. Seguidamente, foram realizados testes de impacto nas esponjas, que permitiram confirmar que a energia dissipada é maior quando preenchidas com o fluido de 15% [w/w] de partículas de sílica. Numa segunda fase, desenvolveram-se por intermédio da técnica de Xurografia, microcanais consistindo numa expansão/contração/expansão com diferentes dimensões, de forma a simular os diversos tipos de poros. Por intermédio de um sensor foram medidas as quedas de pressão devidas ao escoamento do fluido reoessante no interior da esponja, com o intuito de as relacionar com a energia dissipada. Finalmente, foram realizadas simulações numéricas e os resultados das quedas de pressão ao longo dos microcanais foram comparados com os valores experimentais.

**Palavras-Chave:** CFD; Espuma protectora; Fluido reoessante; Microfluídica; Reologia.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à FCT, COMPETE, QREN e União Europeia (FEDER) no âmbito dos projectos PTDC/SAU-BEB/105650/2008, PTDC/SAU-BEB/108728/2008, PTDC/EME-MFE/099109/2008, e PTDC/SAU-ENB/116929/2010 e das bolsas SFRH/BPD/69663/2010 e SFRH/BPD/69664/2010.

#### Referências Bibliográficas:

- [1] Wagner, N. and Brady, J.F., Shear thickening in colloidal dispersions. *Physics Today*, 62, 27–32, 2009.
- [2] Galindo-Rosales, F.J. and Rubio-Hernández, F.J. Static and dynamic yield stresses of Aerosil 200 suspensions in polypropylene glycol, *Applied Rheology*, 20, 22787, 2010.
- [3] Galindo-Rosales, F.J. et al., How Dr. Malcom M. Cross would have tackled the development of An apparent viscosity function for shear thickening fluids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 166, 1421-1424, 2011.

Esta página foi deixada em branco propositadamente.