

APLICAÇÃO DO ELEMENTO FRACIONÁRIO DE NEWTON AO FLUIDO COMPLEXO DE EQUISTAR PETROTHENE NA 952-00: NOVAS PERSPECTIVAS DE ESTUDO

Bruno Manuel Ribeiro Alves, E-mail: b.bruno.a@gmail.com¹
Benchehida Anissa, E-mail: nissa.benchehida@gmail.com²

^{1,2} École des ingénieurs, Institut Supérieur industriel de Promotion sociale
31, Boulevard Solvay Charleroi, 6000 Belgique

Resumo: O modelo de Scott-Blair, também conhecido como modelo fracionário de Newton é usado neste estudo, em conjunto com a ferramenta comercial office, variante Excel 365, para a modelização do módulo de relaxação, $G(t)$, para a modelização do módulo de fluência, $J(t)$ e para a modelização do módulo dinâmico em SAOS (“Small Amplitude Oscillatory Shear”) da resina de PEBD (Polietileno de Baixa densidade – aqui representada pela marca comercial Equistar Petrothene NA 952-00 da Lyondell Basel). Torna-se evidente que os ajustes realizados neste trabalho são próximos aos nossos dados experimentais, com os seus valores de correlação próximos de 0,99. O ângulo de fase em SAOS é a fraqueza do modelo. É ainda verificado neste trabalho que existe similaridade com o sistema CIE L^*a^*b .

Palavras-chave: Scott-Blair, Excel, Lyondell Basel, CIE L^*a^*b

APPLICATION OF THE NEWTON FRACTIONAL ELEMENT TO THE COMPLEX FLUID OF EQUISTAR PETROTHENE NA 952-00: NEW PERSPECTIVES OF RESEARCH

Abstract: The Scott-Blair model, also known as Newton's fractional model, is used in this study, together with the commercial office tool, Excel 365 variant, for modeling the relaxation modulus, $G(t)$, for modeling the relaxation modulus. fluence, $J(t)$ and for modeling the dynamic modulus in SAOS (“Small Amplitude Oscillatory Shear”) of LDPE resin (Low Density Polyethylene – represented here by the trademark Equistar Petrothene NA 952-00 from Lyondell Basel). It becomes evident that the adjustments made in this work are close to our experimental data, with their correlation values close to 0.99. The phase angle in SAOS is the weakness of the model. It is also verified in this work that there is similarity with the CIE L^*a^*b system.

Keywords: Scott-Blair, Excel, Lyondell Basel, CIE L^*a^*b ,

1. INTRODUÇÃO

Este artigo tem como finalidade a realização de um ajuste com um modelo fracionário de dois parâmetros, o modelo de Newton fracionário, para primeiro ser averiguado se os dados de fluidos complexos conseguem ser corretamente ajustados através da metodologia CRG-não linear presente no software comercial Excel 365, graças ao comando solver.

É pretendido com este trabalho justificar os valores dos parâmetros obtidos de forma teórica, avançando-se uma explicação para os parâmetros e as características do material.

É ainda verificado que a iminência de uma nova teoria, de representação (x, y) com x a corresponder à ordem fracionária e y a corresponder à magnitude da ordem fracionária. O que evita compreensões de equações complexas. Esta teoria tem para o modelo de Scott-Blair duas dimensões, no entanto para modelos de 4 parâmetros, como o modelo fracionário generalizado de Maxwell, apresenta quatro dimensões. Esta teoria tem a sua

fundamentação no sistema CIE L*a*b o que permitirá uma melhor compreensão do modelo de Scott-Blair e a sua aplicação à resina de Polietileno Equistar Petrothene NA 952-00. Neste momento apresentam-se a fundamentação teórica do trabalho, a metodologia, os resultados, a discussão e as considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um polímero fundido possui cadeias moleculares cujo comportamento final depende do processo de polimerização (BIRD et al., 1987). É assim que graças a estas características, os polímeros podem ser distinguidos dos outros materiais devido à diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de deformação, à existência de uma primeira diferença de tensões normais e de uma segunda diferença de tensões normais, da retração elástica, do efeito de Weissenberg e ainda o inchamento (BIRD et al. 1987).

Sabe-se que a simulação do comportamento dos materiais pode ser realizada utilizando modelos matemáticos, simples ou complexos. Em casos mais simples e por isso menos limitantes da simulação de comportamento temos os modelos inelásticos e/ não-Newtonianos generalizados (BIRD et al. 1997). Ressalta-se que estes modelos conseguem ajustes ótimos em determinadas situações e consequentemente bons resultados, como no estudo do comportamento reológico de polpa de frutas e do estudo do comportamento reológico de iogurtes (KOBUS et al. 2019; VELEZ-RUIZ; BARBOSA CANOVAS, 2009).

O 1º e o 2º patamar newtonianos que se identificam nestes modelos podem então ser caracterizados utilizando modelos da categoria de fluidos generalizados newtonianos (BOWERS; MILLER, 2021; IRGENS, 2014). Então começamos a compreender que os materiais têm um comportamento extremamente complexo pois à medida que o comportamento se complexifica o comportamento torna-se viscoelástico (existe sobreposição do comportamento viscoso e elástico). Os primeiros modelos surgiram em 1867 e foram os modelos lineares de Maxwell e de kelvin-Voigt (BIRD et al., 1997; MAXWELL, 1867). Estes modelos apresentam importantes inconvenientes como a restrição a pequenas deformações (BIRD et al., 1997; MAXWELL, 1867).

Para modelos mais complexos, que poderão ser de naturezas e origens mais diversas possíveis, podem ter origem na teoria das molas e dos pistões, como em teorias fundamentais (ver modelo de Oldroyd-B) e teorias cinética para redes de soluções concentradas e polímeros fundidos (PTT model – Phan Thien Tanner) (BIRD et al., 1987, PINHO, 2003).

Um recente modelo corresponde à teoria de Pom-Pom, com as suas variantes SXPP (Single eXtended Pom-Pom model), DCPM (Double Convected Pom-Pom model) e DXPP (Double eXtended Pom-Pom model). Estes modelos têm uma elevada complexidade pois o meio contínuo varia de ponto para ponto, dependendo do estado de entrelaçamento molecular (MCLEISH; LARSON, 1998). Ainda relativamente aos modelos complexos temos os modelos integrais que têm como objetivo resolver as fraquezas dos outros modelos, integrando as deformações passadas até aos tempos presentes (BIRD et al., 1987).

Os modelos finais reagrupam todos os modelos e intitulam-se de modelos multimodo. Estes modelos tentam relativamente ao comportamento dar um passo extra para a compreensão de maiores taxas de deformação. Estes modelos apresentam o avanço tecnológico que reside no facto de os polímeros terem um infinito número de tempos de relaxação (BIRD et al. 1987).

Uma nova categoria de modelos surgiu obtida através da derivada fracionária de Caputo

e do integral fracionário de Riemann-Liouville (FREED; DIETHEHN, 2002). Muitos investigadores atuam neste campo. Nomeadamente Ribeiro Alves um investigador independente que se concentra no setor dos materiais poliméricos com o objetivo de compreender o funcionamento dos modelos viscoelásticos fracionários através da modelização numérica (investigador teórico). O primeiro artigo publicado por Ribeiro Alves tratava sobre a modelização de um MCPE (Polietileno catalisado via metalocenos) graças a um modelo com três parâmetros, denominado de modelo standard de ordem viscoelástica fracionária unidimensional obtendo-se excelentes resultados (RIBEIRO ALVES, 2019). A partir daí tenta estudar o software que melhor se adequa publicando um artigo com o software R estatística e outro com o software Excel da Microsoft 365 (RIBEIRO ALVES, 2022; RIBEIRO ALVES, 2020).

O trabalho de Doerpinghaus forneceu dados surpreendentes sobre quatro gerações distintas de Polietilenos a diferentes temperaturas e taxas de deformação, tais como, sobre o LDPE (Polietileno de baixa densidade), o HDPE (Polietileno de alta densidade), o LLDPE (Polietileno Linear de baixa densidade) e finalmente o MCPE (polietileno catalizador via metalocenos) para diferentes fabricantes (DOERPINGHAUS, 2002).

A primeira geração corresponde ao LDPE catalisado via peróxidos e que é gerado sob altas condições de pressão e de temperatura gerando uma estrutura altamente ramificada (DOERPINGHAUS, 2002). Em 1950 com a descoberta de uma nova categoria de catalisadores derivados de óxidos e de metais de transição (catalisadores de Ziegler-Natta) obteve-se a segunda geração de Polietileno (DOERPINGHAUS, 2002). A terceira geração de Polietilenos constitui-se mais uma evolução do processo químico que de química de catalisadores, formando-se as resinas de LLDPE graças ao processo produtivo da “Union Carbide Unipolar Gas-Phase Process” (DOERPINGHAUS, 2002). Finalmente a quarta geração é a geração de polietileno catalisada via catalisadores metalocenos (DOERPINGHAUS, 2002). Estes catalisadores têm gerado uma quantidade considerável de pesquisa industrial e de investigação académica, como o caso de Ribeiro Alves (2019).

Atualmente o Polietileno é um dos compostos utilizados na produção de embalagens, garrafas e filmes. No entanto, o utilizador final, por vezes, não possui a ideia da engenharia por trás desta embalagem, por sua vez descartável. Um exemplo de resina catalisada via peróxidos de primeira geração é a resina da Lyondell Basel, a Equistar Petrothene NA 952-00, que se utiliza maioritariamente em moldação sopro (extrusão e injeção) e filmes para embalagens exibindo um comportamento excelente em termos de maciez, dureza e estabilidade dimensional. Em relação ao processamento tem ainda uma excelente relação entre processamento e dureza.

Para modelizar o comportamento deste material polimérico podem ser utilizados modelos viscoelásticos fracionários que são diferentes de todos os modelos abordados até agora, e, onde uma analogia com elementos discretos pode ser realizada através de um elemento intitulado como spring-pot (JAISHANKAR; MCKINLEY, 2013; MAINARDI, 2010). Outros modelos poderão ser obtidos através do elemento spring-pot, mola e pistão, pelo que neste trabalho serão chamados de submodelos. Um submodelo é, portanto, o modelo fracionário de Maxwell, que se caracteriza pelos elementos spring-pot e pistão (JAISHANKAR; MCKINLEY, 2013; MAINARDI, 2010).

Assim, os primeiros modelos a serem desenvolvidos foram o modelo de Hooke que se aplica a sólidos e que é formulado para o caso do sólido ideal e o modelo de Newton que é formulado para o caso do fluido puramente viscoso (MAINARDI, 2010). De

acordo com Mainardi (2010) o modelo de Hooke é representado pelo elemento mecânico mola e constitui-se por um parâmetro b_1 constante deduzindo-se $G(t)$ e $J(t)$ constantes. O modelo linear de Newton tem um elemento viscoso e/ ou dissipativo com somente um parâmetro b_1 (BIRD et al. 1987). É importante, este modelo para a modelização do comportamento de fluidos perfeitos, no entanto a função de relaxação é nula e a função de fluência é linear (BIRD, 1987). O modelo de Spring-pot é o modelo que interpola as respostas com os comportamentos extremos de Hooke ($\alpha=0$) e de Newton ($\alpha=1$) (JAISHANKAR; MCKINLEY, 2013). Este modelo tem um parâmetro b_1 que é superior a 0 e que corresponde a uma quase-propriedade para valores intermédios de α . Nos extremos trata-se de uma propriedade. Tem um módulo de relaxação, módulo de fluência e equações relacionadas com o módulo dinâmico representadas nas equações 1-5.

$$G(t) = \frac{b_1}{\Gamma(1-\alpha)} * t^{-\alpha} \quad (1)$$

$$J(t) = \frac{t^\alpha}{b_1 * \Gamma(1+\alpha)} \quad (2)$$

$$G'(w) = b_1 * w^\alpha * \cos\left(\frac{\pi}{2} * \alpha\right) \quad (3)$$

$$G''(w) = b_1 * w^\alpha * \sin\left(\frac{\pi}{2} * \alpha\right) \quad (4)$$

$$\tan \alpha = \frac{G''(w)}{G'(w)} \quad (5)$$

3. METODOLOGIA

Com a abertura de um documento Excel começa a escrever-se nas células do ficheiro os dados de Doerpinghaus correspondentes a Equistar Petrothene NA 952-00 em extensão uniaxial a 150°C e um valor de taxa de deformação de 0,01 (DOERPINGHAUS, 2002), tal como Ribeiro Alves fez em seus trabalhos precedentes e um dos quais está publicado em revista da especialidade de engenharia (RIBEIRO ALVES, 2023)

Os dados relativos ao módulo de relaxação introduzem-se inicialmente através do valor de deformação das células de A1:A129 seguindo-se pelos dados de tensão nas células B1:B129. As células de tempo, ou células C, obtêm-se através do quociente de cada célula A (deformação) com 0,01 (taxa de deformação) obtendo-se assim as células C1:C129. Em seguida as células estão relacionadas com o módulo de relaxação e obtêm-se através do quociente de cada célula B pela célula A, que nos permite obter as células D1:D129 (grupo de células do módulo de relaxação). O grupo de células do módulo de fluência relacionam-se através do quociente da célula A com a célula C (obtendo-se as células E1:E129).

A célula F corresponde ao valor de módulo de relaxação e localiza-se de F1:F129. É muito importante compreender como se realiza este cálculo através de células do Excel 365 pois têm de ser criados dois valores para dois parâmetros do modelo de Scott-Blair. Nesta página Excel escolheu-se a célula H3 para a ordem fracionária α , e a célula I3 para a quase-propriedade do modelo de Scott-Blair, b_1 .

Por exemplo, para a célula F2, ou seja, do segundo ponto experimental a ajustar para o módulo de relaxação, temos o exemplo da Figura 1, onde o \$ é utilizado para o bloqueio da célula em questão, tal como pode ser observado na figura 1.

Em seguida, quando terminado o módulo de relaxação ajustado de cada ponto relativo aos dados experimentais, três conjuntos distintos de células devem ser preparadas para obtenção da célula objetivo de o comando solver de Excel 365, traduzida por L1. Esta célula objetivo obtém-se da diferença entre as células ajustadas do módulo de relaxação (F1:F129) e das células experimentais do módulo de relaxação (D1:D129). As células obtidas colocar-se-ão nas células J1:J129. Estas células são depois expostas ao quadrado e escrevem-se em K1:K129, cuja soma permite a obtenção de L1 (a célula objetivo – ver figura 1).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0	0	0	0	0	0				0	0	15625092,3		
2	0,0136	340,8	1,36	25058,82	0,01	26280,64		alfa	b1	-1221,82	1492845,2			
3	0,0401	605,3	4,01	15094,76	0,01	13550,57		0,612596	4330,214	1544,193	2384532,3			
4	0,0617	732,1	6,17	11865,48	0,01	10406,77				1458,71	2127836,1			0,99243
5	0,087	793,6	8,7	9121,839	0,01	8431,322				690,5176	476814,49			
6	0,1117	892,1	11,17	7986,571	0,01	7234,495				752,0765	565619			
7	0,1358	937,6	13,58	6904,271	0,01	6418,47				485,801	236002,59			
8	0,1593	994,6	15,93	6243,566	0,01	5820,614				422,9515	178887,97			
9	0,1823	1023	18,23	5611,629	0,01	5359,059				252,5705	63791,869			
10	0,2085	1088	20,85	5218,225	0,01	4935,854				282,3717	79733,752			
11	0,2304	1071	23,04	4648,438	0,01	4642,908				5,529643	30,576954			
12	0,2553	1119	25,53	4383,079	0,01	4360,012				23,06681	532,07759			
13	0,2797	1139	27,97	4072,22	0,01	4122,905				-50,6851	2568,9752			
14	0,3035	1183	30,35	3897,858	0,01	3921,723				-23,8644	569,51132			
15	0,3267	1202	32,67	3679,216	0,01	3748,691				-69,4748	4826,7539			
16	0,3494	1222	34,94	3497,424	0,01	3597,559				-100,135	10027,011			
17	0,3716	1236	37,16	3326,157	0,01	3464,33				-138,173	19091,785			
18	0,3963	1243	39,63	3136,513	0,01	3330,414				-193,901	37597,685			
19	0,4205	1277	42,05	3036,861	0,01	3211,654				-174,794	30552,804			
20	0,4441	1304	44,41	2936,276	0,01	3105,998				-169,723	28805,857			
21	0,4672	1310	46,72	2803,938	0,01	3010,999				-207,061	42874,119			
22	0,4897	1327	48,97	2709,822	0,01	2925,479				-215,656	46507,694			

Figura 1: exemplo do ponto ajustado 2 e da célula objetivo, ambos em relação aos pontos experimentais.

De modo análogo procede-se para o módulo de fluência de maneira a obter os valores ajustados pelo modelo para cada ponto experimental. Já em relação ao módulo dinâmico, três células são geradas para cada função e no final a nossa célula objetivo corresponde à soma das três células objetivo para cada função material.

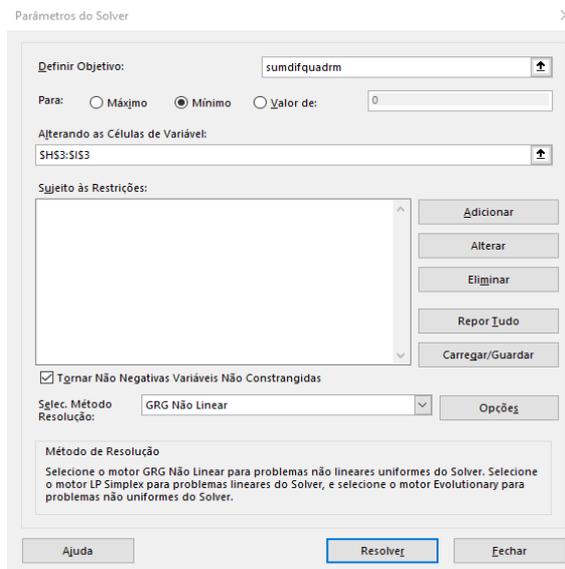


Figura 2: Janela de o comando solver

O complemento solver (Figura 2) tem de ser instalado nas opções do Excel 365, para

em seguida realizar-se o gráfico de dispersão para manipulação da curva a ajustar aos dados experimentais de Doerpinghaus. Os dados manipulam-se através da introdução de valores razoáveis observando-se diretamente a variação no gráfico. Uma vez obtidos os valores estimados, o comando solver resolve corretamente a equação para todos os pontos experimentais que devolve o ajuste e o valor dos parâmetros ajustados em H3 e I3 (através do método CRG-não linear).

4. RESULTADOS

É observado que para os dados experimentais de Doerpinghaus os valores de parâmetros α igual a 0,612596 e um valor de quase-propriedade b_1 igual a 4330,236 em relação ao módulo de relaxação ajustado. O valor do coeficiente de correlação entre as células D1:D129 e F1:F129 é incrivelmente elevado (ver figura 1) e com um valor de 0,99243 com o modelo de Scott-Blair. A figura 3 contém o ajuste do módulo de relaxação dos dados experimentais de Doerpinghaus do Equistar Petrothene NA 952-00 com a equação de relaxação do modelo de Scott-Blair ajustado. Os dados estão bem correlacionados como é facilmente observado pela figura 3.

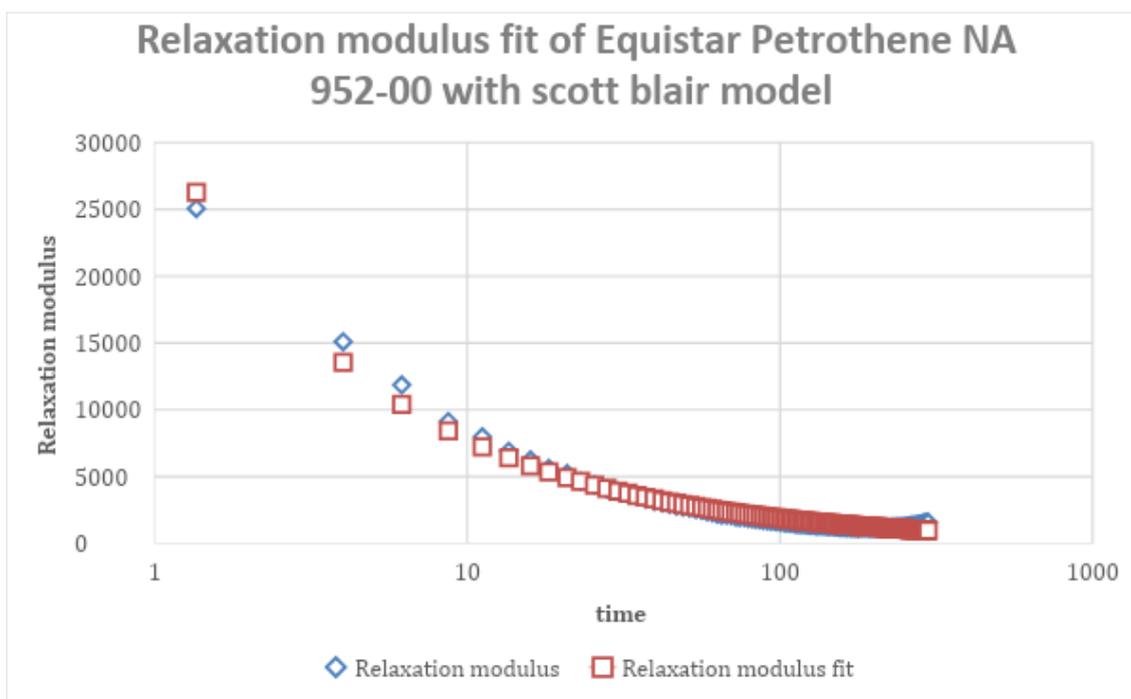


Figura 3: Ajuste com o módulo de relaxação para os dados experimentais de Doerpinghaus com o modelo de Scott-Blair

Para os dados ajustados de Doerpinghaus com o módulo de fluência, os valores são para o parâmetro de ordem fracionária, α , igual a zero e o valor da propriedade b_1 igual a 0,01. Portanto o ajuste corresponde ao modelo do sólido ideal, correspondente ao elemento mecânico de Newton, o amortecedor.

A figura 4 corresponde ao ajuste para o módulo de fluência dos dados de Doerpinghaus, e, pelo observado o ajuste é perfeito e como observado na imagem, correlaciona-se perfeitamente.

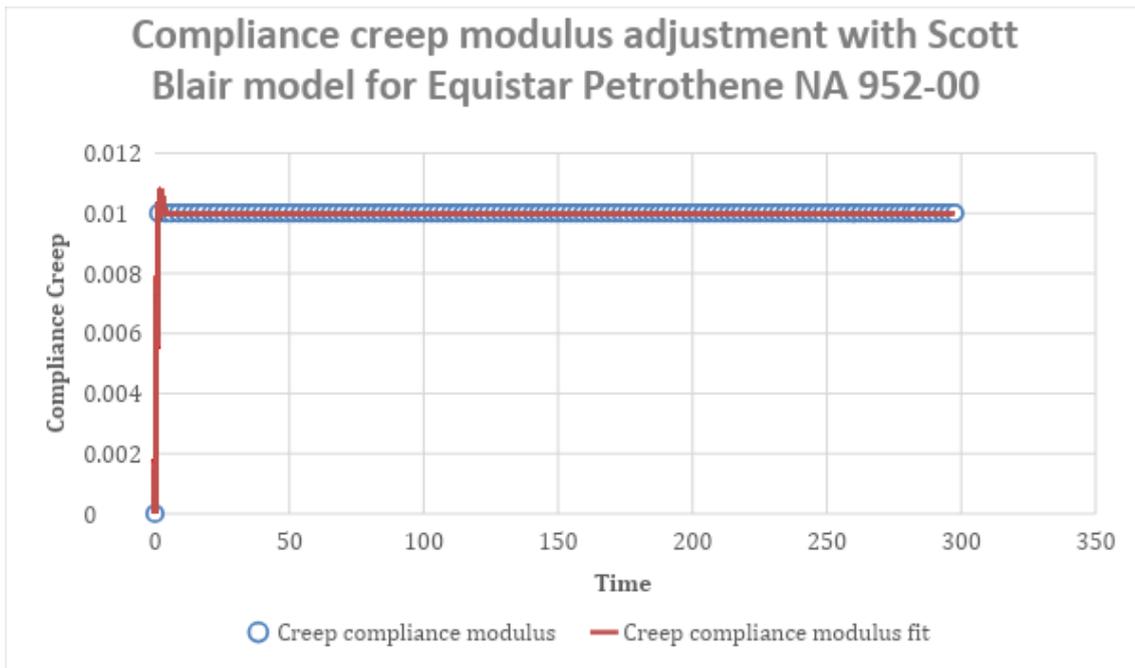


Figura 4: ajuste do módulo de fluência para os dados experimentais de Doerpinghaus com o modelo de Scott-Blair

O módulo dinâmico e as suas correspondentes funções materiais $G'(\omega)$, $G''(\omega)$ e ângulo de fase $G''(\omega)/G'(\omega)$. Embora seja observado um certo paralelismo entre $G'(\omega)$ e $G''(\omega)$ o comportamento descrito relativamente aos dados experimentais é bom. Por sua vez, o ângulo de fase apenas permite variações lineares da função a ajustar e assim o ajuste não é muito satisfatório. Relativamente aos valores obtidos para os parâmetros α é igual a 0,41331 e para b_1 10333,04. A figura 5 apresenta os resultados para as funções materiais do módulo dinâmico da resina Equistar Petrothene NA 952-00 para os dados experimentais de Doerpinghaus ajustados.

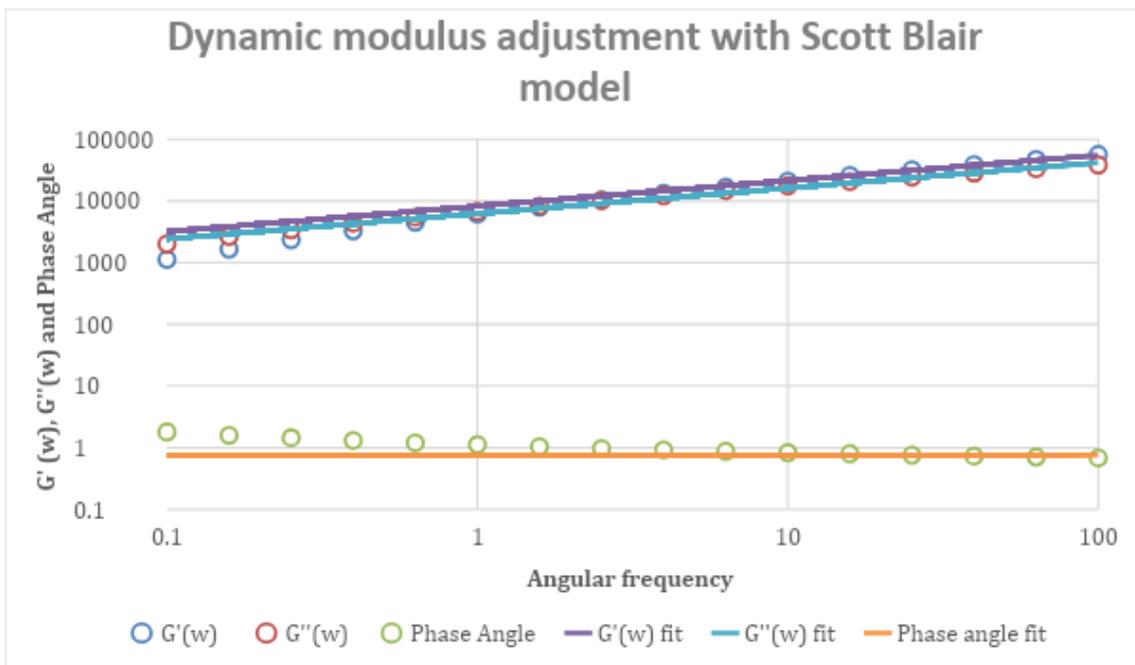


Figura 5 – Ajuste das funções materiais do módulo dinâmico para dados experimentais de Doerpinghaus

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados experimentais contidos na tese de Doutorado de Doeringhaus correspondem unicamente a diferentes Polietilenos, diferentemente catalizados. De facto é importante compreender o comportamento de polimerização com diferentes catalisadores, mas também se o modelo ajusta corretamente para as equações em estudo (Ver equações 1-5). Caso o ajuste seja relevante demonstra a grande capacidade de o modelo se adaptar aos dados experimentais isto porque o modelo trata unicamente de variação entre dois casos extremos (caso extremo de sólido e de fluido) e de uma quase-propriedade (que corresponde a variação entre os casos não compreendidos extremos). Assim, a compreensão do modelo começaremos pois pelo módulo de relaxação e interpretamos os seus valores dos parâmetros (ver tabela 1).

Tabela 1: Explicação aprofundada da teoria de Scott-Blair aplicada à resina Equistar Petrothene NA 952-00

	Extremo	Quase-valor unitário										Extremo
α	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Propriedade b_1	Sólido	Sólido > fluido				Sólido=fluido	Fluido > sólido				Fluido	
% fluido	0	10%-40%				50%	60%-99,99%				100	
% solido	100	90-60				50%	40-0,0001%				0%	

Esta tabela corresponde ao estudo da propriedade α (determinante na escolha de do elemento mecânico a aplicar) e de b_1 (Quase propriedade/ propriedade), consoante nos colocamos nos extremos ou nos seus quase-valores unitários. O mais importante é que nos permite perceber as porções de fluido e de sólido que contém.

Resolvendo a tabela 1 para o valor dos parâmetros obtidos e valores do módulo de relaxação obtém-se a tabela 2.

Tabela 2: Explicação aprofundada da teoria de Scott-Blair aplicada à resina Equistar Petrothene NA 952-00 ao módulo de relaxação

	Extremo	Quase-valor unitário										Extremo
α	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Propriedade b_1	Sólido	Sólido > fluido				Sólido=fluido	Fluido > sólido				Fluido	
% fluido	0	10%-40%				50%	60%-99,99%				100	
% solido	100	90-60				50%	40-0,0001%				0%	

E resolvendo a tabela 1 para o valor do módulo de fluência, obtém-se a tabela 3.

Tabela 3: Explicação aprofundada da teoria de Scott-Blair aplicada à resina Equistar Petrothene NA 952-00 ao módulo de fluência

	Extremo	Quase-valor unitário										Extremo
α	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Propriedade b_1	Sólido	Sólido > fluido				Sólido=fluido	Fluido > sólido				Fluido	
% fluido	0	10%-40%				50%	60%-99,99%				100	
% sólido	100	90-60				50%	40-0,0001%				0%	

E relativamente ao módulo de fluência a sua representação pode ser observada na tabela abaixo, a tabela 4.

Tabela 4: Explicação aprofundada da teoria de Scott-Blair aplicada à resina Equistar Petrothene NA 952-00 ao módulo dinâmico

	Extremo	Quase-valor unitário										Extremo
α	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Propriedade b_1	Sólido	Sólido > fluido				Sólido=fluido	Fluido > sólido				Fluido	
% fluido	0	10%-40%				50%	60%-99,99%				100	
% sólido	100	90-60				50%	40-0,0001%				0%	

De facto não deverá ser demasiado arriscado dizer que o gráfico do sistema $CIE^*L^*a^*b$ conduzirá a uma interpretação gráfica destes resultados. O sistema $CIE^*L^*a^*b$ trata de um diagrama de cromaticidade de cores com três dimensões básicas, ou propriedades colorimétricas, tais como a côr. (exemplo o azul ou o vermelho), saturação e luminosidade. Neste sistema a aplicar não teremos três, mas 2 dimensões básicas, a ordem fracionária e a quase-propriedade b_1 . A representação gráfica irá corresponder a um sistema (x, y) com Y a corresponder à magnitude (valor da quase-propriedade com extremo igual a zero – máximo permitido pelas restrições termodinâmicas do modelo de Scott-Blair) e X a corresponder no seu domínio R_0^+ à variação da ordem fracionária (que por sua vez corresponde à variação sólido/fluido).

Este sistema universalmente aceito desde 1976 para a quantificação e comunicação da côr terá a seguinte vantagem pois permite a catalogação através de um eixo de sistema bidimensional (x, y) pois permite a compreensão visual da ordem fracionária e a sua variação com as propriedades do produto. No entanto à hora atual tem aplicações restritas em casos de elevados valores de correlação.

6. CONSIDERAÇÕES

As descobertas a que este trabalho se propõe foram concretizadas permitindo assim uma nova janela de representação gráfica de resultados, para os dados de Polietileno ajustados com o modelo de Scott-Blair.

Esta teoria será ainda capaz de ser aplicada a submodelos para este e outros materiais poliméricos, mas por enquanto estudos terão de ser realizados de forma cuidada pois aumentando o número de parâmetros aumentarão também o número de dimensões.

No entanto embora exista uma lógica na teoria fracionária, desta forma não é necessário de apresentar os resultados na forma de equações complexas e quase incompreensíveis, mas fornece-se uma viva voz a uma teoria que sendo já validada por diferentes investigadores, como por exemplo os colegas Meng et Zhang (2023), infelizmente precisa de mais estudos para a sua averiguação e para aprofundar estes modelos complexos.

REFERÊNCIAS

Bird, R.B., Dynamics of Polymer liquids, Volume 2: Kinetic theory 2nd edition, Wiley 1987

Bowers, C.A., Miller, C.T., Generalized Newtonian fluid flow in porous media, Physical Review fluids, v.6

Doerpinghaus, P.J., Flow Behaviour of sparsely branched metallocene- catalysed polyethylene's, 2002

Freed, A., Diethelm, K., Fractional order viscoelasticity (FOV): constitutive development using fractional calculus: First Annual report, 2002

Irgens, F., Generalised Newtonian fluids. Rheology and Non-Newtonian Fluids, p.113-124, 2014

Maxwell, On the dynamic theory of gases, Philosophical transactions of the Royal society of London, v.157, p.49-88, 1867

Jaishankar, A., McKinley, G.H. Power-Law rheology in the bulk and at the interface: quasi-properties and fractional constitutive equations. Proceedings of the royal society A: Mathematical, Physical and engineering Sciences, v. 469, n2149, 2013

Kobus, Z., Modelling of rheological properties of cloudy apple juice using master curve, Cyta – Journal of Food, v. 17, n.1, p.648-655, 2019

Mainardi, F., Fractional calculus and waves in linear viscoelasticity: An introduction to mathematical models, p. 1-314, 2010

McLeish, T.C.B., Larson, R.G., Molecular constitutive equations for a class of branched polymers: The pom-pom polymer. Journal of rheology, v. 42, n.1, p. 81-110, 1998

Meng, R., Cao, L., Zhang, Q. study of the performance of variable-order fractional viscoelastic models to the order function parameters. Applied mathematical modelling, v.121, p. 430-444, 2023.

Pinho, F., Cálculo de escoamento de fluidos não-Newtonianos em regime laminar, “desenvolvimentos e aplicações recentes da metodologia dos volumes finitos

Ribeiro Alves, B. estudo e aferição da qualidade de ajuste de modelos viscoelásticos em ensaios dinâmicos para o polibutadieno com o software office, RCT- revista de ciência e tecnologia, v.8, 2022

Ribeiro Alves, B. Modelização viscoelástica fracionária do comportamento em relaxação da resina polimérica de ABS com software R, RCT – Revista de ciência e tecnologia, v.6, 2020

Ribeiro Alves, B., Properties of Heterogeneous materials using fractional models: Rubber agglomerate Panel. Power Engineering and Engineering Thermophysics, Vol.2, n°2, p.30-40, 29 Mai 2023

Ribeiro Alves, B., Modeling Insite ® technology ethylene alpha-olefin resins with standard FOV fluid in 1D, Journal of king Saud university: Engineering Sciences, v. 31, n.2, p. 157-163, 2019

Velez-Ruiz, J. F., Barbosa, C., Gustavo, V., Rheological properties of selected dairy products, v. 37, n.4, p. 311-359, 2009