

M  
mecânica

E  
experimental

Revista da APAET - Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões



Estruturas de Betão  
Tribologia  
Comportamento Dinâmico  
Instrumentação

nº 3  
1998

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO  
DE ÓLEOS DESCOFRANTES DE BASE VEGETAL**

Santos, J. R.; Branco, F. A.; Brito, J.

**EXPERIMENTAL VERIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL  
FOR ORIENTED DAMAGE OF CONCRETE**

Bogucka, J.; Debinski, J.; Litewka, A.; Mesquita, A. B.

**O "MÉTODO DE CORTE DE ARMADURAS" NA AVALIAÇÃO  
ESTRUTURAL DE PILARES DE BETÃO ARMADO**

Branco, F. A.; Santos, J. R. L.

**ANALYSIS AND OBSERVATION OF CREEP AND SHRINKAGE  
EFFECTS IN THE MACAU-TAIPA BRIDGE  
"PONTE DA AMIZADE"**

Catarino, J. M.; Chan, M. F.

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA À FADIGA DE ÓLEOS  
ADITIVADOS, ENSAIADOS NA MÁQUINA DE QUATRO ESFERAS**

Moreira, L. F.; Ferreira, L. A.

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ALGUMAS SOLUÇÕES  
AQUOSAS DILUÍDAS DE POLÍMEROS**

Coelho, P. M.; Pinho, F. T.

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS ÓLEOS E MASSAS LUBRIFICANTES NO  
COMPORTAMENTO À FADIGA DE UM CONTACTO ELASTOHIDRODINÂMICO**

Almeida, C.; Ferreira, L. A.

**ENSAIOS EXPERIMENTAIS – VIADUTO DO CORGE**

Silva, L. A. P. S.; Jordão, S. F. S.; Kowalczyk, R.

**DYNAMICAL MODELS CONFIGURATION OF JIGGING SCREEN ANALYSIS**

Bausic, F.; Diaconu, C.

**TÉCNICAS EXPERIMENTAIS IMPLEMENTADAS NUMA  
NOVA MÁQUINA DE ENSAIOS DE FADIGA  
ROTATIVA BIAXIAL**

Marques de Pinho, A. C.

**MEDIÇÃO DA FORÇA DE EXTRACÇÃO EM MOLDES  
DE INJECCÃO DE TERMOPLÁSTICOS**

Pontes, A. J.; Pinho, A. M.; Pouzada, A. S.

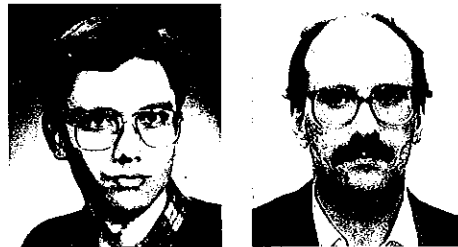
**MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE CORTE EM PROCESSOS DE MAQUINAGEM**

Paulo Davim, J.; Gabriel Mendes, J.; Monteiro Baptista, A.

# COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ALGUMAS SOLUÇÕES AQUOSAS DILUÍDAS DE POLÍMEROS

P. M. Coelho e F. T. Pinho

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial  
Faculdade de Engenharia, Rua dos Bragas, 4099 Porto CODEX, Portugal



## SUMÁRIO

*Caracterizou-se o comportamento reológico de várias soluções aquosas baseadas em dois polímeros: a Tylose, de baixo peso molecular e o CMC de peso molecular moderado. Todas as soluções são espessantes regressivas, com as mais pesadas a exibir um comportamento mais pseudoplástico. No que diz respeito à resposta aos ensaios de fluência e oscilatório, todas as soluções poliméricas evidenciaram pouca elasticidade, com as soluções de Tylose menos elásticas que as soluções de CMC, para a mesma concentração de aditivo. No entanto, resultados da medição da perda de carga numa conduta em regime turbulento mostram que soluções baseadas em qualquer um destes polímeros deve apresentar uma apreciável elasticidade de carácter elongacional.*

## INTRODUÇÃO

Os fluidos não-Newtonianos caracterizam-se por uma relação entre os tensores da tensão ( $\sigma$ ) e da taxa de deformação ( $\mathbf{D}$ ) que se afasta da lei linear de Newton da viscosidade ( $\eta$ )

$$\sigma = 2\eta\mathbf{D} \quad (1)$$

A taxa de deformação é por sua vez definida a partir do tensor gradiente de velocidade, como

$$\mathbf{D} \equiv \frac{\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T}{2} \quad (2)$$

Embora a grande maioria dos fluidos não-Newtonianos obedeam a uma relação não-linear entre a tensão e a taxa de deformação, em que se combinam características viscosas e elásticas, não se excluem comportamentos lineares de que o exemplo clássico é o fluido generalizado de Maxwell que obedece à seguinte lei constitutiva

$$\sigma + \lambda\dot{\sigma} = 2\eta\mathbf{D} \quad (3)$$

Este fluido exhibe um comportamento viscoso linear, logo Newtoniano, em situações de regime permanente, mas apresenta um comportamento elástico, caracterizado por um tempo de relaxação ( $\lambda$ ), em situações de regime transiente.

Quanto aos fluidos reais, é frequente que o seu comportamento não-linear possua características elásticas tão intensas e diversificadas, que mesmo em regime permanente de escoamento o comportamento hidrodinâmico seja afectado: é o caso do escoamento laminar em condutas de secção não-circular (Townsend et al, 1976), que depende do aparecimento de tensões normais, mas sobretudo o dos escoamentos em regime turbulento, nas mais variadas circunstâncias. Aqui, observam-se alterações dramáticas, de que o exemplo mais comum é o da redução dos coeficientes de fricção em condutas para valores que podem ser 80% inferiores aos dos fluidos Newtonianos a idêntico número de Reynolds (Virk, 1975).

As menores perdas de carga sofridas por este tipo de fluidos em escoamentos em condutas, potencia a sua utilização em situações onde se pretendem reduzir custos de bombagem ou aumentar certas características hidrodinâmicas dependentes do fluido, como por exemplo a coerência de jactos.

Como exemplo de aplicação prática destes fluidos em escoamentos de regime turbulento, onde se apela especificamente às características hidrodinâmicas que conduzem à redução do arrasto, salientamos a sua utilização como aditivo no transporte de produtos petrolíferos (Burger et al, 1992 e Jones e Walters, 1989), combate a incêndios (Union Carbide, 1966), ou ainda no aumento da capacidade do escoamento de esgotos (Sellin, 1977) ou no aumento da coerência de jactos de corte (Summers and Zakin, 1975).

Este conjunto ilustrativo de aplicações práticas deste tipo de fluidos constitui um motivo sobejamente motivador para programas de investigação das características hidrodinâmicas de escoamentos turbulentos de fluidos viscoelásticos. Tais investigações devem passar pela prévia caracterização das propriedades reológicas dos fluidos. Estes devem possuir diferentes graus de elasticidade, viscosidades não muito elevadas para permitir a observação de escoamentos em regime turbulento e ser transparentes para permitir o recurso a meios ópticos de diagnóstico. É a caracterização reológica de dois conjuntos destes fluidos, de base polimérica, que constitui o objectivo deste trabalho.

A próxima secção apresenta os vários fluidos seleccionados e descreve sumariamente os testes reológicos efectuados, bem como o respectivo equipamento. Seguir-se-á a análise dos resultados e a sua discussão. O artigo termina com o resumo das principais conclusões.

## FLUIDOS

Neste trabalho procurou-se caracterizar a reologia de dez soluções aquosas baseadas em dois polímeros: um de baixo peso molecular (6000 kg/kmole: Tylose MH1000K da Hoechst), em concentrações mássicas que variaram entre os 0.1% e os 0.6% e outro de peso molecular moderado (300 000 kg/kmole: CMC 7H4C da Hercules) a concentrações entre os 0.1 e 0.4% em massa.

Uma vez que o tamanho das moléculas é um parâmetro relevante para a elasticidade dos fluidos (Bird et al, 1987), seleccionou-se um polímero leve, como a Tylose MH 10000K, na tentativa de encontrar um fluido sem elasticidade. Trata-se de uma celulose metilo-hidróxila que é produzida pela modificação química de uma celulose alcalina com cloreto de metilo. A molécula de celulose tem uma espinha dorsal baseada na glucose, onde o hidrogénio é substituído por um grupo metilo. Para determinar e definir a estrutura química final faz-se uma esterificação com pequenas quantidades de óxido de etileno. A selecção deste polímero, a partir de um grupo maior de aditivos, está extensamente documentado em Pereira e Pinho (1994a).

A Tylose, bem como outros aditivos de base celulósica, é utilizada como espessante e ligante em tintas, em produtos cerâmicos e na indústria textil, sendo que as suas soluções aquosas são inodoras, incolores e não iónicas, com uma viscosidade bastante independente do pH.

Uma celulose mais pesada, a celulose carboximetilica, sal de sódio da Hércules, o CMC 7H4C, foi escolhida como um aditivo que potencia soluções de elasticidade moderada. Trata-se de um aditivo comumente utilizado na investigação (Dodge e Metzner, 1959, Ernst, 1966, Pinho e Whitelaw, 1990) e nas indústrias do petróleo, do papel, dos cosméticos e farmacêutica (Lapasin e Priel, 1995). O CMC é produzido pela modificação química de uma celulose alcalina com acetato monoclórico de sódio. O hidrogénio do grupo hidróxilo da glucose é substituído pelo grupo carboxi-

metilo do grupo sódio. As soluções aquosas de CMC também são inodoras, incolores e não tóxicas, mas a sua viscosidade já depende do pH da solução.

Os aditivos foram dissolvidos em água da rede de abastecimento do Porto, à qual foi acrescentada um ácido biológico, Kathon LXE da Rohm & Haas, a uma concentração de 0.02% em peso, para minimizar a ocorrência de degradação biológica.

Para todas as soluções prepararam-se amostras de 4 kg que eram agitadas cerca de 90 minutos após a adição dos polímeros. As soluções repousavam então cerca de 24 horas para completa hidratação das moléculas e eram agitadas novamente durante 30 minutos antes da sua caracterização reológica, por forma a garantir a sua completa homogeneização.

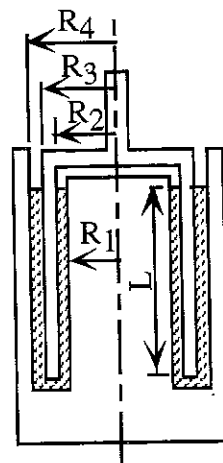
### TÉCNICA EXPERIMENTAL

Todas as medições reológicas foram efectuadas num reómetro de base universal Physica MC100 onde podem ser montados diferentes geometrias de cilindros concêntricos, cone-prato e prato-prato. No caso vertente, e dada a baixa viscosidade ( $\eta$ ) dos fluidos envolvidos, todos os ensaios foram efectuados com a geometria de duplos cilindros concêntricos Z1-DIN definida na norma DIN 54453 e esquematizada na Fig. 1, a qual inclui ainda as suas características mais importantes. Na legenda da figura,  $n$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $M$  e  $\tau$  representam a velocidade de rotação em [rpm], a taxa de deformação de corte, o binário resistente e a tensão de corte, respectivamente.

O reómetro dispõe de um banho termoestático que circula na camisa onde se insere a geometria, permitindo deste modo controlar a temperatura da amostra. Todos os ensaios foram conduzidos a 25°C.

Na sua essência o reómetro funciona segundo o princípio do controle de tensão de corte, mas o seu hardware permite também que o funcionamento possa ser efectuado por controle de taxa de deformação de corte. Nos ensaios a taxa de deformação elevada recorreu-se ao

controle do reómetro por taxa de deformação, mas optou-se pelo controle em tensão aquando das medições a baixas taxas de deformação uma vez que a dispersão de valores era menor.



$$\dot{\gamma} = K_{\dot{\gamma}} * n; K_{\dot{\gamma}} = 5.039s^{-1} / \text{min}^{-1}$$

$$\tau = \tau_{o/oo} M; \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

$$\tau_{o/oo} = 0.067 = \text{tensão de corte } M = 1\%_{oo};$$

$$R_1 = 22.25\text{mm}; R_2 = 22.75\text{mm};$$

$$R_3 = 23.5\text{mm}; R_4 = 24.0\text{mm}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = 1.021$$

$$L = 111\text{mm} ; \text{Volume} = 17\text{cm}^3$$

Figura 1- Principais características da geometria de cilindros concêntricos duplos, Z1-DIN.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização reológica dos fluidos incluiu ensaios da medição do binário resistente em escoamento de corte em regime permanente, de que se retira a viscosidade viscométrica, e dois ensaios para determinar grandezas relacionadas com o comportamento elástico dos fluidos, a saber: o ensaio oscilatório de corte de baixa amplitude e o ensaio de fluência.

#### Viscosidade viscométrica

A razão entre a tensão de corte ( $\tau = \sigma_{xy}$ ) e a taxa de deformação de corte ( $\dot{\gamma} = 2D_{xy}$ ) num escoamento de Couette plano define a viscosidade viscométrica ( $\eta$ ).

As Figs. 2 e 3 apresentam as viscosidades das várias soluções aquosas de Tylose e CMC, respectivamente, bem como as curvas correspondentes ao ajustamento do modelo de Carreau-Yasuda. Os

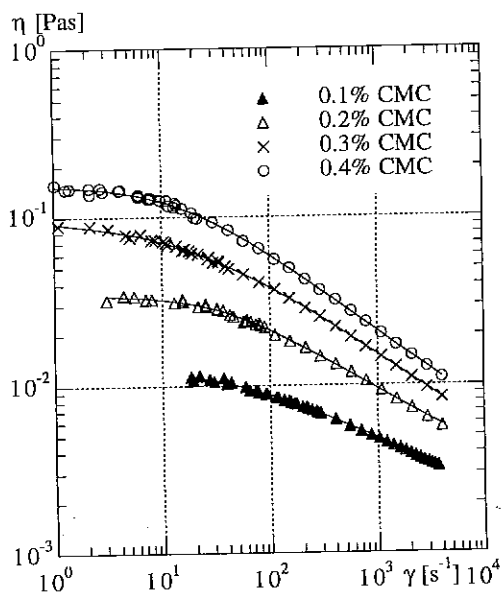


Figura 2- Viscosidade das soluções aquosas de CMC.

resultados mostram que todos os fluidos apresentam um comportamento espessante-regressivo (pseudoplástico), e para cada fluido existe uma gama de baixas taxas de deformação onde a viscosidade é constante, ou tende para um valor constante, o chamado primeiro patamar Newtoniano. A elevadas taxas de deformação a viscosidade varia linearmente com a taxa de deformação, numa representação em coordenadas logarítmicas, definindo-se assim a zona de lei de potência.

Quer para a Tylose, quer para o CMC a viscosidade e o nível de pseudoplasticidade aumentam com o aumento da concentração de aditivo. Por outro lado, sendo o CMC constituído por moléculas maiores do que a Tylose, e por consequência mais interactuantes e sujeitas a maiores deformações, as suas soluções apresentam níveis de pseudoplasticidade mais intensos do que as de Tylose, a igual concentração mássica. Assim, para idênticas concentrações de polímero, o declive da região de potência é maior para as soluções de CMC do que para as soluções de Tylose, bem como os valores

da viscosidade a baixas taxas de deformação ( $\eta_o$ ), como se pode visualizar bem na comparação da Fig. 4. No entanto, enquanto que os valores de  $\eta_o$  obtidos na

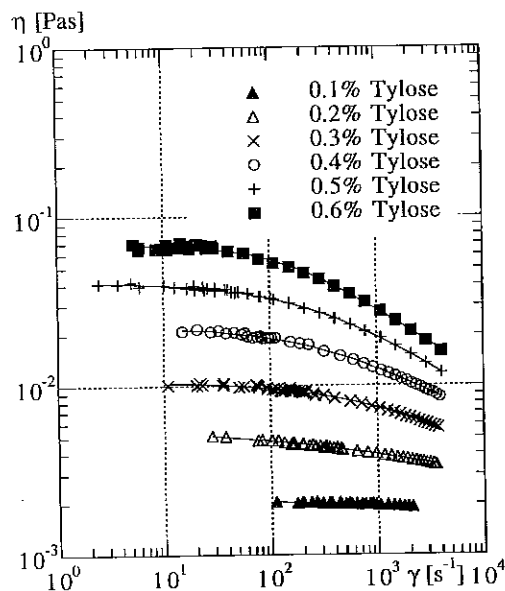


Figura 3- Viscosidade das soluções aquosas de Tylose.

regressão são próximos dos sugeridos pelas medições, nenhum ensaio foi efectuado a taxas de deformação tão elevadas que permita a observação experimental do valor de  $\eta_\infty$  que assim é totalmente de origem numérica.

Os parâmetros do modelo de Carreau - Yasuda (Eq. 5), ajustado para minimizar o erro quadrático médio de todas as soluções, segundo o algoritmo de Press et al (1992), apresentam-se na Tabela 1.

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_o - \eta_\infty) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (5)$$

Na Eq. (5)  $\lambda$  é uma constante de tempo que iguala o inverso da taxa de deformação onde se dá a transição entre as regiões de viscosidade constante e viscosidade variável,  $n$  é um expoente cujo afastamento de 1 é proporcional ao nível de pseudoplasticidade e  $a$  é um parâmetro que frequentemente toma o valor numérico de 2, situação a que corresponde o modelo de Carreau.

#### Teste de fluência

A resposta típica de um fluido viscoelástico a um ensaio de fluência, no

regime de comportamento linear, pode ser observado na Fig. 5. Uma tensão de corte constante é subitamente imposta e a resposta em deformação monitorizada no tempo. A deformação de corte ( $\gamma_{xy}$ ), medida em relação ao início do ensaio, aumenta com o tempo e aproxima-se de uma assíntota de declive constante  $\dot{\gamma}_0$  e ordenada na origem  $\gamma_0$ . O regime de comportamento linear só é observável quando se aplicam baixas tensões, caso contrário a resposta em deformação pode sofrer de "overshoot" antes de tender para o comportamento assintótico final.

No regime linear podemos ainda recorrer a este tipo de ensaio para determinar um tempo de relaxação característico do fluido ( $\lambda_e$ ), a não confundir com o parâmetro tempo  $\lambda$  que aparece no modelo de viscosidade de Carreau- Yasuda. Este tempo de relaxação pode calcular-se como o limite do quociente entre a ordenada na origem e o declive da curva da deformação em função do tempo, quando a tensão de corte tende para zero (Eq. 6).

$$\lambda_e = \lim_{\tau \rightarrow 0} \left( \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} \right) \quad (6)$$

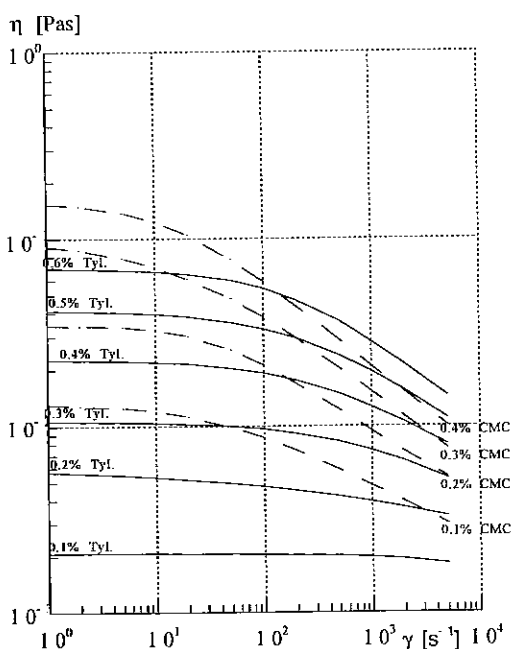


Figura 4- Comparação entre as viscosidades viscométricas das soluções de Tylose e CMC. Os valores representados são os dos modelos ajustados (c.f. Tabela 1).

Para as soluções mais concentradas de Tylose e CMC (0.6% e 0.4% em peso, respectivamente), foram efectuados vários testes de comportamento à fluência e os resultados deste teste indicam que, a existir um comportamento elástico este é ténue.

A Fig. 6 mostra a resposta em deformação da solução aquosa de 0.6% de Tylose para uma tensão aplicada de 0.6 Pa. Na recta de carga não é perceptível qualquer afastamento da curva relativamente à que teria um fluido inelástico (uma recta), e na descarga, a partir dos 60 segundos, observa-se sómente um muito ligeiro retorno de deformação ( $\gamma_e$ ), que no entanto é inferior a 0.2% da deformação máxima ocorrida na carga ( $\gamma_v$ ).

A magnitude destes efeitos está aliás bem patente na Fig. 7, onde se apresentam para as mesmas soluções os valores da deformação elástica em percentagem da deformação viscosa máxima. Para as tensões aplicadas observa-se que esse quociente foi sempre inferior a 0.6%.

Este resultado não é contudo totalmente adequado a uma análise objectiva, pois o valor do quociente não é universal, já que depende da duração do ensaio. Deve ser utilizado meramente em análises comparativas, porque sendo a memória dos fluidos evanescente, o quociente  $\gamma_v/\gamma_e$  tende sempre para valores nulos, mesmo

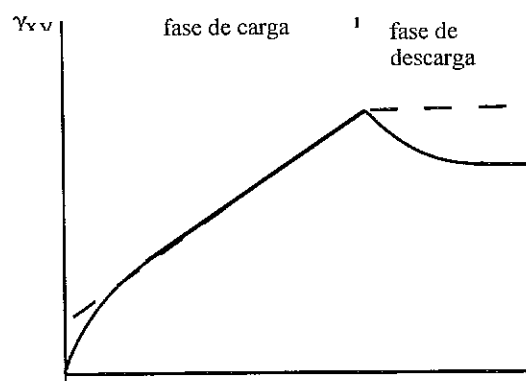


Figura 5- Resposta típica de um fluido viscoelástico num ensaio de fluência.

Tabela 1- Parâmetros do modelo de Carreau-Yasuda para as soluções de Tylose e CMC

Solução	$\eta_0$ [Pas]	$\eta_\infty$ [Pas]	$\lambda$ [s]	$a$	$n$	$\dot{\gamma}$ [s <sup>-1</sup> ]
0.1% Tyl.	0.00208	0.001	0.0000125	0.6719	-0.2848	100 a 3000
0.2% Tyl.	0.00608	0.001	0.00012	0.3008	0.6111	20 a 4000
0.3% Tyl.	0.0107	0.001	0.00090	0.6592	0.5856	10 a 4000
0.4% Tyl.	0.02276	0.001	0.00300	0.7432	0.6051	10 a 4000
0.5% Tyl.	0.04190	0.001	0.00255	0.6777	0.49448	2 a 4000
0.6% Tyl.	0.06924	0.00148	0.00751	1.1172	0.5572	5 a 4000
0.1% CMC	0.01319	0.0005	0.01922	0.8086	0.6464	10 a 4000
0.2% CMC	0.03454	0.000928	0.02771	1.216	0.5875	30 a 4000
0.3% CMC	0.1005	0.000813	0.04575	0.6504	0.5094	1 a 4000
0.4% CMC	0.1575	0.000898	0.06784	1.016	0.5137	1 a 4000

Tabela 2- Tempo de relaxação característico de algumas soluções

	0.4% CMC	0.3% CMC	0.2% CMC	0.1% CMC	0.6% Tyl.	0.4% Tyl.
$\lambda_e$ [s]	0.463	0.332	0.097	0.046	0.389	0.06

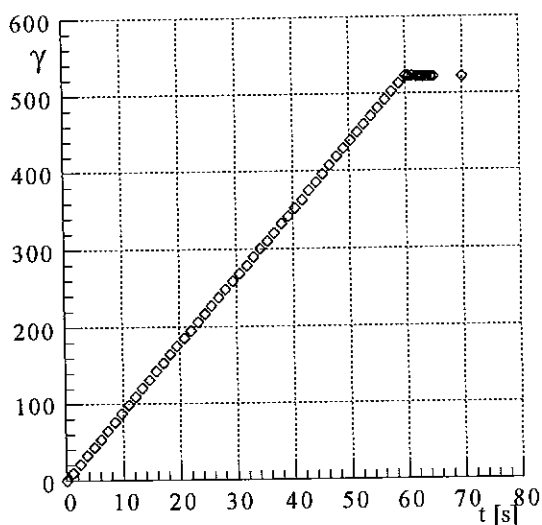


Figura 6- Resposta em deformação de uma solução aquosa de 0.6% de Tylose ao teste de fluência para uma tensão aplicada de 0.6 Pa.

com fluidos muito elásticos, desde que o ensaio seja suficientemente longo. É pois preferível analisar a resposta em deformação ou melhor, o tempo característico de relaxação, parâmetro que já é independente da duração do ensaio.

Por recurso à Eq. (6), determinou-se um conjunto de valores indicativos do tempo de relaxação de várias das soluções poliméricas. Os valores obtidos por ajustamento dos mínimos quadrados aos dados experimentais constam da Tabela 2. Estes valores também demonstram a fraca elasticidade das soluções neste ensaio, confirmando ainda que as maior dimensão

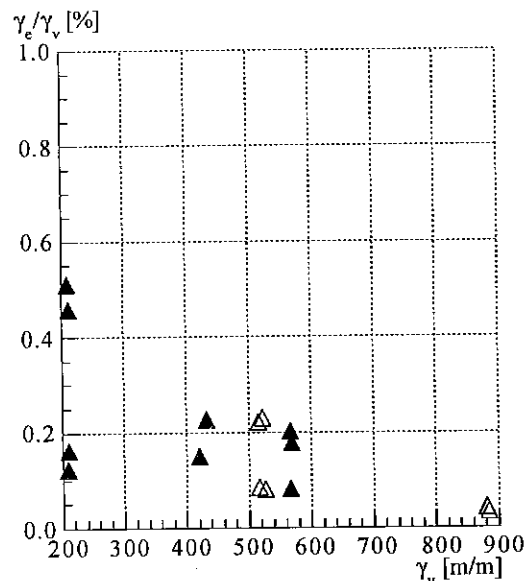


Figura 7- Razão entre as deformações elástica e viscosa máxima das soluções aquosas de 0.4% CMC (▲) e de 0.6% de Tylose (Δ) em ensaios de fluência.

das moléculas e as concentrações mais elevadas conduzem a uma maior elasticidade.

Conclui-se assim da baixa elasticidade das soluções aquosas de Tylose MH10000 K, para concentrações mássicas iguais e inferiores a 0.6% e de CMC 7H4C para concentrações iguais ou inferiores a 0.4%, no que ao teste de fluência diz respeito.

#### Ensaio oscilatório

No ensaio oscilatório de corte impõe-se uma deformação periódica sinusoidal de baixa amplitude ( $\gamma_a$ )



$$\gamma(t) = \gamma_a \sin \omega t \quad (7)$$

e observa-se a resposta em tensão

$$\tau(t) = \tau_a \sin(\omega t + \delta) \quad (8)$$

Tendo em conta as componentes da tensão desfasada a  $90^\circ$  e em fase, relativamente à deformação imposta, definem-se duas quantidades proporcionais à viscosidade e elasticidade dos fluidos, respectivamente. Assim, o módulo de elasticidade ( $G'$ )

$$G' \equiv \frac{\tau_a}{\gamma_a} \cos \delta \quad (9)$$

representa uma medida da energia de deformação armazenada reversivelmente, enquanto que o módulo de viscosidade ( $G''$ )

$$G'' \equiv \frac{\tau_a}{\gamma_a} \sin \delta \quad (10)$$

quantifica uma medida da energia cedida irreversivelmente pela amostra de fluido ao exterior, constituindo assim uma característica do comportamento viscoso do fluido.

O factor de perda  $\tan \delta$  é o quociente entre os dois módulos anteriores.

O ensaio oscilatório só apresenta características independentes da sua cinemática se realizado em condições de baixa deformação, onde só o comportamento linear dos fluidos é estimulado. Na zona de comportamento linear os resultados do ensaio são independentes da amplitude das solicitações aplicadas.

No caso das soluções mais concentradas a amplitude das deformações correspondente ao limite linear é bastante baixa, e dada a extrema diluição das soluções tornou-se difícil efectuar ensaios cujos resultados tenham boa precisão pois as tensões a medir, sobretudo as de carácter elástico, eram muito baixas.

Por forma a obter tensões mensuráveis com um mínimo de precisão, foi necessário proceder aos ensaios com uma amplitude de deformação igual a 0.2, que é ligeiramente superior à que corresponde ao limite elástico. Para essa deformação, a Fig. 8 mostra a evolução dos coeficientes de rigidez elástica ( $G'$ ) e viscosa ( $G''$ ) em função da frequência de oscilação. A

solução mais concentrada de Tylose apresenta um módulo de elasticidade cerca de 3 a 5 vezes inferior ao módulo de rigidez viscosa, resultado indicativo de uma baixa elasticidade. Já a solução de CMC é mais elástica, com o quociente  $G''/G'$  apresentando valores da ordem de 1.5 a 2, mas para uma menor amplitude de deformação, dentro da região de comportamento linear, essa razão aumenta para valores da ordem de 10. Os valores de tensão medidos para amplitudes inferiores a 0.2 são no entanto bastante baixos e por isso não é de estranhar que os dados experimentais apresentem um comportamento bastante errático. Para esta mesma amplitude a razão  $G'/G''$  para a Tylose é da ordem de  $10^{-3}$ , evidenciando-se assim a sua baixa elasticidade.

Para amplitudes a que correspondem comportamentos não-lineares, a resposta da fluido depende também de toda a história da deformação e por isso os resultados da Fig. 8 devem ser interpretados com algum cuidado.

A resposta errática de um reómetro para fluidos de baixa elasticidade não é novidade, pois já Escudier e Gouldson (1994) reportaram algumas dificuldades com soluções de goma de Xantham embora tenham utilizado um reómetro de precisão francamente superior ao Physica, o qual opera com rolamentos de esferas em vez das chumaceiras a gás do primeiro.

### Outros ensaios da elasticidade

A conclusão mais importante deste conjunto de ensaios é a de que as soluções de Tylose apresentam um comportamento fundamentalmente viscoso, enquanto que as soluções de CMC apresentam alguma elasticidade, embora não muito intensa, pelo menos no que diz respeito à resposta a solicitações de corte. Isto não significa que o comportamento destas mesmas soluções a solicitações do tipo elongacional possa também ser eminentemente viscoso.

Não existem actualmente no mercado dispositivos reológicos capazes de medir com precisão a viscosidade elongacional de fluidos muito diluídos. Os equipamentos mais promissores (Fuller et

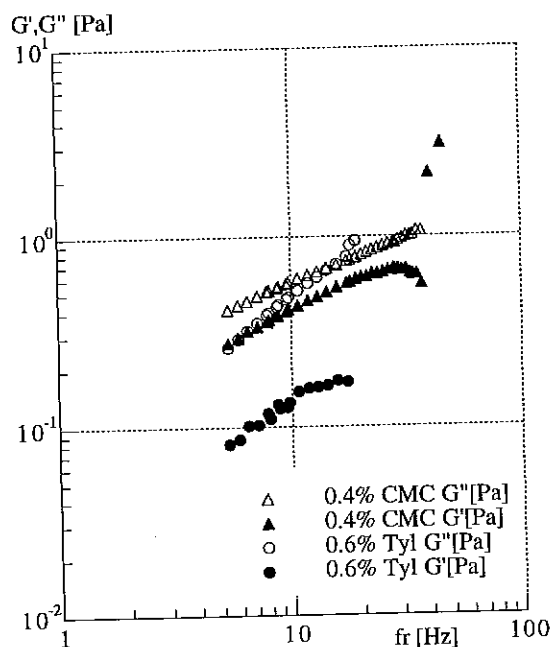


Figura 8- Módulos de rigidez viscosa ( $G''$ ) e de elasticidade ( $G'$ ) das soluções de 0.4% CMC e 0.6% de Tylose, para uma amplitude de deformação constante e igual a 0.2.

al, 1987), que chegaram a ser brevemente comercializados, apresentaram no entanto resultados contraditórios que conduziram ao questionar da sua validade (Dontula et al, 1997).

Há no entanto uma forma indirecta de aferir da eventual importância da viscosidade elongacional: a existência ou não de redução do arrasto em escoamento turbulento em condutas (Pereira e Pinho, 1994b). As actuais teorias sobre a redução do arrasto com soluções poliméricas a escoar em regime turbulento, apontam para uma relação estreita entre este fenómeno e a capacidade do fluido absorver energia elástica em deformações do tipo elongacional (Gyr and Bewersdorff, 1995), i.e, a viscosidade elongacional desses fluidos assumiria valores elevados e essa propriedade estaria por detrás dos mecanismos supressores da turbulência em soluções aquosas de polímero (Den Toonder et al, 1997). O que não está ainda bem determinado é a forma como ocorre essa interferência, o que requiere um conhecimento francamente mais avançado dos modelos reológicos deste tipo de fluidos.

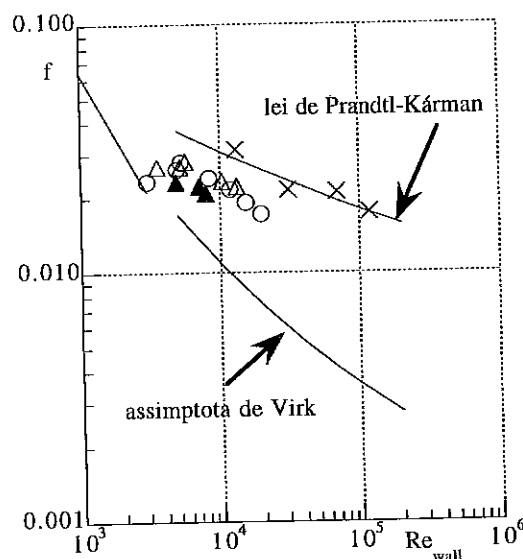


Figura 9- Coeficiente de fricção de Darcy em função do número de Reynolds de parede. X Água, O Tylose 0.4%,  $\Delta$  Tylose 0.5% e  $\blacktriangle$  Tylose 0.6% (de Pereira e Pinho, 1994b).

A Fig. 9 apresenta alguns resultados do coeficiente de fricção de Darcy para o escoamento turbulento numa conduta com as três soluções de Tylose mais concentradas aqui estudadas. É bem patente uma redução do coeficiente de atrito, relativamente ao dos fluidos Newtonianos, que pode atingir valores da ordem dos 30%, i.e, cerca de metade dos valores máximos previstos pela assíntota de Virk. Estes valores estão bem longe dos que seriam de esperar para soluções que exibiram tão fraca elasticidade nos ensaios reológicos efectuados, sobretudo porque as soluções de 0.2% CMC, que também exibem uma fraca elasticidade, até apresentam reduções do arrasto superiores, próximas do máximo previsto pela lei de Virk (Ernst, 1966, Pinho e Whitelaw, 1990).

Tudo leva pois a crer que estaremos perante fluidos com valores elevados da viscosidade elongacional, francamente superior ao valor corrente para fluidos viscosos, sendo o CMC aquele aditivo que proporciona maior elasticidade extensional. Isto, apesar da elasticidade destes mesmos fluidos ser muito baixa, como se viu nas medições reológicas efectuadas, as quais só dependem da resposta a escoamentos de corte puro.

## CONCLUSÃO

As soluções aquosas diluídas de Tylose apresentam um comportamento pseudo-plástico, onde se identifica claramente o primeiro patamar Newtoniano a baixas taxas de deformação. Já para as soluções de CMC, também elas pseudoplásticas, o primeiro patamar Newtoniano não é atingido para idênticas taxas de deformação.

Para a concentração mais elevada de Tylose (0.6% em peso) os ensaios de fluência e oscilatório de corte mostram que a elasticidade é muito baixa. Por outro lado, as soluções de CMC, embora também pouco elásticas, apresentam valores dos parâmetros elásticos pelo menos 4 a 5 vezes superiores aos correspondentes parâmetros para as soluções de Tylose.

A fraca elasticidade detectada nestes escoamentos de corte não significa, contudo, que os fluidos não possuam um intenso comportamento elástico em escoamentos de carácter elongacional. Assim, a crer em resultados de medições indirectas do efeito desta propriedade, elevadas reduções do arrasto destas soluções em escoamento turbulento em condutas, elas seriam de facto claramente elásticas em escoamentos dominados por efeitos de taxa de deformação normal.

A caracterização reológica tradicional das soluções diluídas de polímero, que depende sómente de ensaios de corte, é pois manifestamente insuficiente quando se pretende estudar as propriedades de fluidos não-Newtonianos que vão ser posteriormente investigados no seu comportamento em regime turbulento.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da JNICT- Junta Nacional de Investigação Científica, através do projecto PBIC/C/CEG/1370/92 da Unidade de Térmica Industrial do INEGI- Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Os ensaios foram conduzidos no LTAMF- Laboratório de Técnicas Avançadas em Mecânica dos Fluidos da Faculdade de

Engenharia. O nome dos autores está apresentado por ordem alfabética.

## REFERÊNCIAS

- Bird, R. B., Armstrong, R. C. e Hassager, O., Dynamics of polymeric liquids. Vol. 1: Fluid Mechanics, 2ª edição, John Wiley & Sons., Nova Iorque, 1987.
- Burger, E. D., Munk, W. R. e Wahl, H. A., Flow increase in the Trans Alaska pipeline through use of a polymeric drag-reducing additive. *J. of Petrol. Technol.*, **377**, February, 1992
- Den Toonder, J. M. J., e, M. A., Kuiken, G. D. C. and Nieuwstadt, F. T. M., Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments, *J. Fluid Mech.*, **337**, 193, 1997
- Dodge, D. W. e Metzner, A. B., Turbulent flow of non-Newtonian systems. *A. I. Ch. E. J.*, **5**, 189, 1959.
- Dontula, P., Pasquali, M., Scriven, L. E. e Macosko, C. W., Can extensional viscosity be measured with opposed nozzle devices? *Rheol. Acta*, **36**, 429-448, 1996
- Ernst, W. D., Investigation of the turbulent shear flow of dilute aqueous CMC solutions. *A. I. Ch. E. J.*, **12**, 581- 586, 1966.
- Escudier, M. P. e Gouldson, I. W., Concentric annular-flow of shear-thinning liquids with centrebody rotation. Relatório interno TF/38/94 do Departamento de Engenharia Mecânica da Univesidade de Liverpool, P. O. Box 147, Liverpool L69 3BX, U.K.
- Fuller, G.G., Cathey, C. A., Hubbard, B. e Zebrowski, B. E., Extensional Viscosity Measurements for Low-Viscosity Fluids. *Journal of Rheol.*, **31**, 235-249, 1987.
- Gyr, A. and Bewersdorff, H.- W., Drag reduction of turbulent flows by additives. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- Jones, D. M. e Walters, K., The behaviour of polymer solutions in extension-dominated flows, with applications to

- Enhanced Oil Recovery. *Rheol. Acta*, 28, 482-498, 1989.
- Lapasin, R. e Pricl, S., Rheology of Industrial Polysaccharides: theory and applications, Blackie Academic and Professional, 1995
- Pereira, A. S. e Pinho, F. T., Propriedades de algumas soluções aquosas de baixo peso molecular (Ensaio preliminares). Relatório técnico do projecto PBIC/1370/92 do INEGI- Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, 1994 a).
- Pereira, A. S. e Pinho, F. T., Turbulent pipe flow characteristics of low molecular weight polymer solutions. *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 55, 321-344, 1994 b).
- Pinho, F. T. e Whitelaw, J. H., Flow of non-Newtonian fluids in a pipe. *J. non-Newt. Fluid Mech.*, 34, 129, 1990.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. e Flannery, B. P., Numerical Recipes in Fortran, Cambridge University Press, 1992.
- Sellin, R. H. J., Increasing sewer capacity by polymer dosing, *Proc. Int. Civ. Engrs.*, 63, 49, 1977
- Summers, D. e Zakin, J. L., Impact erosion by jets of dilute polymer solutions. *Nature Phys. Sci.*, 27, 243, 1975
- Townsend, P., Walters, K. e Waterhouse, W. M., Secondary flows in pipes of square cross- section and the measurement of second normal stress difference. *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 1, 107- 123, 1976.
- Union Carbide loop entry in "New Chemicals and Minerals, *Chem. Eng.*, 36, 1966
- Virk, P. S., Drag reduction fundamentals. *A. I. Ch. E. J.*, 21, 625-656, 1975.