

Evolução de Frentes de Lama em Canais – Parte I: Uma Proposta Reológica de Herschel-Bulkley a Partir de uma Base Experimentalista Física

Francisco Lledo dos Santos, Geraldo de Freitas Maciel, Victor Marcuz de Moraes

Departamento de Engenharia Civil – FEIS – UNESP – Alameda Bahia, 550

15385-000 Ilha Solteira, SP – lledo@dec.feis.unesp.br, maciel@dec.feis.unesp.br

Recebido: 25/01/03 – revisado: 12/11/03 – aceito: 11/12/03

RESUMO

Essa comunicação científica versa sobre o tema de fluidos hiperc concentrados. Tem por objetivo desenvolver uma caracterização reológica de misturas sólido-líquido (água-argila caulinitica) com diferentes concentrações em volume (C_v) para as quais são determinadas, a partir de ensaios de reometria de precisão, as propriedades tais como a viscosidade aparente, tensão crítica de cisalhamento e curva de tensão de cisalhamento \times taxa de deformação. Verificou-se, em condições controladas, a influência da temperatura, pH e concentração em volume (C_v) sobre a curva reológica dessas misturas, além de eventuais fenômenos de tixotropia e modo de preparo. O modelo reológico ajustado foi o de Herschel-Bulkley, a saber: $\tau = \tau_c + k(\dot{\gamma})^n$, onde: τ é a tensão de cisalhamento; τ_c é a tensão crítica (ou rigidez inicial); k é um termo de consistência (viscosidade aparente); n é o índice de escoamento; e $\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}$ é a taxa de deformação. Por fim, obtém-se, a partir de uma análise quantitativa global, leis de evolução dos diversos parâmetros reológicos em função da concentração em volume. Os resultados obtidos nessa primeira grande campanha experimental corroboram as tendências apontadas na literatura.

Palavras-chave: fluido Não-Newtoniano; Herschel-Bulkley; frentes de lama, canais.

INTRODUÇÃO

Misturas resultantes de fluido de comportamento Newtoniano e partículas sólidas aparecem com frequência na natureza e na indústria. Tais misturas conferem, via de regra, propriedades Não-Newtonianas. De uma maneira geral, na abordagem dessas composições encontram-se, em primeiro plano, os escoamentos de lodo residuário (lodo de esgoto), carvão líquido, lamas oriundas da exploração do petróleo, concreto fresco, fluidos agro-alimentares. Num segundo plano, identificam-se fenômenos associados a assoreamento em reservatórios, deposição em canais de irrigação, transporte em condutos (hidrotransporte) e, por fim, os deslizamentos de encostas, liquefação das areias (figura 1), ações erosivas das voçorocas (figura 2) e das lavas torrenciais - esse verdadeiro "mar de lama" e destroços que sazonalmente vem banindo a vida de centenas de pessoas no cenário nacional e internacional.

A partir das motivações supracitadas, surgiu o interesse desta equipe de trabalho, em diagnosticar, de maneira mais afinada, consistente e com compromissos de engenharia, propriedades físicas da matriz argilosa Não-Newtoniana (misturas de água+argila - figura 3), que uma vez caracterizada, poderia ser inserida em estudos de escoamentos com comportamento laminar (evolução de "mud-flows", frentes de lamas) ou turbulento (cheias urbanas) no tocante a leis de atrito na nova reologia.



Figura 1 – Escoamento de fluido localizado que ocorreu de repente numa massa de areia limpa saturada (Tchesbotari-off, G.P. – “Fundações, Estrutura de Arrimo e Obras de Terra”).

CONSIDERAÇÕES GERAIS

É sabido que um fluido com uma pequena concentração de sedimentos permanece com propriedades newtonianas, podendo apresentar, entretanto, variação na sua viscosidade, que passa a depender dessa concentração.

Quando a concentração de sedimentos aumenta, em especial para sedimentos contendo partículas de argila, a mistura deixa de se comportar como Newtoniana, conferindo, então, propriedades Não-Newtonianas. Essa concentração passa a variar com a granulometria e a composição do mineral do sedimento, bem como com a qualidade da água. (Einstein (1956), Wang et al. (1994)).

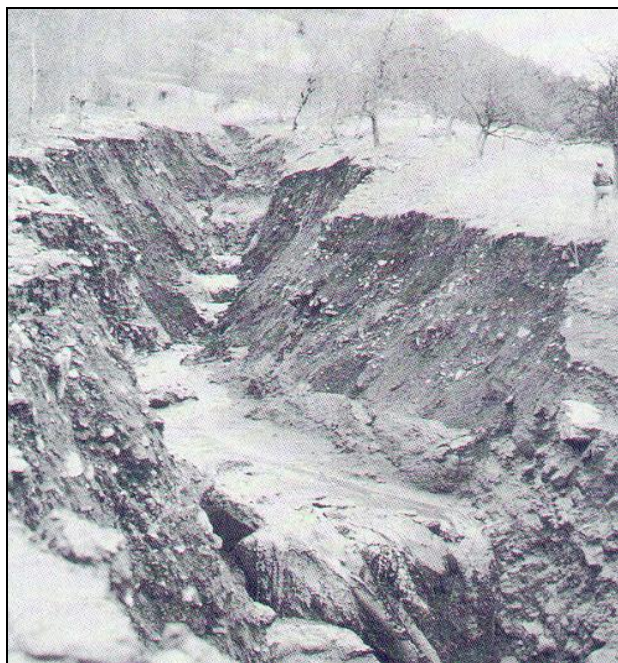


Figura 2 - Escoamento de lama causado pela chuva causando erosão. (Coussot, P – Mudflow Rheology and Dynamics).

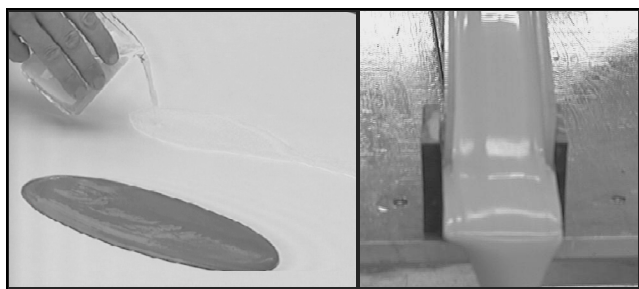


Figura 3 - Mistura água+argila caulinitica e água com corante (esq.) e frente de lama (água+argila) (dir.) escoando em canaleta em laboratório da FEIS/UNESP.

Várias tentativas foram feitas na busca de melhor explicar a dinâmica global e intrínseca dessas misturas nessa última década. Pode-se citar, a partir da literatura, desde as tentativas de modelagem a partir dos raros dados de campo, passando por séries de ensaios de laboratório, até chegar à modelagem numérica, onde diversas leis de comportamento reológico têm sido tratadas. Dentre essas tentativas, o modelo reológico plástico de Bingham é o que

mais figura na literatura. No entanto, com base em estudos mais recentes (últimos 05 anos), tendo a experimentação física como base de decisão, verifica-se que todas essas suspensões de matriz argilosa e hiperconcentrada obedecem, de uma maneira geral, ao modelo reológico não-linear viscoplástico do tipo Herschel-Bulkley (cf. Coussot (1992, 1997), Coussot et al. (1996), Piau (1996), Huang@Garcia (1998)) para as quais uma proposta “binghamiana” torna-se um caso particular, não obstante às vezes interessante e conveniente em certas aplicações da engenharia (Maciel et al., 1997).

No que diz respeito aos tipos de misturas ensaiadas (água-argila caulinitica), cujos resultados são apresentados nesta comunicação científica, estes têm confirmado algumas das propriedades de reometria e têm se mostrado em consonância com a proposta de modelagem reológica.

REOMETRIA

Generalidades

Reometria pode ser definida como o estudo das técnicas que possibilitam a medição das propriedades reológicas de um fluido.

É sabido que, sob mesmas condições iniciais e de contorno, as características de um escoamento dependem, unicamente, da composição do material (em escoamento). Este fato fez com que se desenvolvessem métodos empíricos (como, por exemplo, o “slump test”) nos quais os materiais são submetidos a forças e movimentos e reagem de maneira diferente de acordo com sua composição. Assim, as diferentes reações apresentadas pelos materiais eram usadas para comparação entre eles. Essas são técnicas usualmente padronizadas em concreto fresco ou na indústria alimentícia, por exemplo. No entanto, no caso de escoamento de fluidos, esses métodos não nos dão informações relevantes, pois as condições desses escoamentos são complexas e estão longe de serem controláveis, assim os dados colhidos no teste (velocidade, altura da lâmina etc.) retratam o comportamento do escoamento em um instante particular, sendo assim não confiáveis para a caracterização do fluido.

O objetivo da reometria é determinar as características do fluido a partir de medições feitas em escoamentos simples e controlados. Nestes testes o fluido é tensionado de maneira simples, de tal forma que poucas componentes do seu tensor de tensões sejam diferentes de zero. Assim, a partir das componentes da tensão cisalhante e da taxa de deformação, pode-se chegar a uma equação característica.

Na prática, a fim de se medir a viscosidade de um fluido, este deve ser confinado entre alguns dispositivos, com condições de borda fixas e determinadas (dentro de

um tubo, entre placas paralelas, entre cilindros concêntricos etc.). Esses aparelhos são definidos como reômetros.

A escolha da geometria mais apropriada para materiais complexos, como lama, é um ponto extremamente importante. Na prática, para qualquer fluido, é muito difícil encontrar a geometria que nos forneça uma taxa de deformação perfeitamente homogênea entre as placas (cones, cilindros, discos). Então, na maioria dos casos, têm-se uma taxa de deformação heterogênea e os dados reométricos convencionais nos mostram apenas as características médias do escoamento (torque, velocidade de rotação, pressão) nas bordas. Nesses casos são necessários alguns cálculos para a obtenção dos dados de tensão de cisalhamento x taxa de deformação a partir dos valores de torque x velocidade de rotação. Os métodos de cálculo são diferentes para cada geometria.

Modelos Reológicos

A seguir são apresentados alguns modelos matemáticos que representam diferentes tipos de comportamentos reológicos. Esses modelos são válidos para escoamentos simples (fluxos com superfície livre) e expressam a relação $\tau(\dot{\gamma})$ (tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação).

O modelo mais simples é o do fluido newtoniano em que a tensão de cisalhamento (τ) é diretamente proporcional à taxa de deformação ($\dot{\gamma}$). A constante de proporcionalidade (μ) é a viscosidade dinâmica do fluido. Matematicamente, temos:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

Este tipo de comportamento é observado com o ar, água, óleos, álcoois, etc.

Um modelo um pouco mais complexo é o modelo “power-law” (Ostwald, 1925):

$$\tau = a \dot{\gamma}^n$$

sendo a e n parâmetros do fluido.

Para alguns fluidos, para taxas de deformação próximas a zero ou valores infinitos, o valor μ tende a um valor constante (μ_0 e μ_∞ , respectivamente). Neste caso o modelo mais recomendado é:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = f(\dot{\gamma})$$

onde $\mu_0 > \mu_\infty$ e f é uma função decrescente de $\dot{\gamma}$ que tem que ser escolhida de tal forma que $f(\dot{\gamma}) \rightarrow 1$ quando $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ e $f(\dot{\gamma}) \rightarrow 0$ quando $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$. Powell-Eyring, Carreau e Ellis são exemplos desse modelo.

No caso de fluidos Não-Newtonianos (com presença de tensão crítica (τ_c), os modelos são da forma:

$$\tau = \tau_c + f(\dot{\gamma})$$

Alguns exemplos importantes são:

$$\tau = \tau_c + \mu_B \dot{\gamma} \quad (\text{Bingham e Green – 1919})$$

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n \quad (\text{Herschel e Bulkley – 1926})$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{K \dot{\gamma}} \quad (\text{Casson – 1959})$$

Em cada caso, os parâmetros τ_c , μ , μ_B e K são diferentes e devem ser determinados experimentalmente. Esses modelos são aplicáveis, por exemplo, a lamas, misturas hiperconcentradas, concreto fresco, tintas etc.

A figura 4 ilustra alguns dos diferentes tipos de modelos reológicos encontrados na literatura.

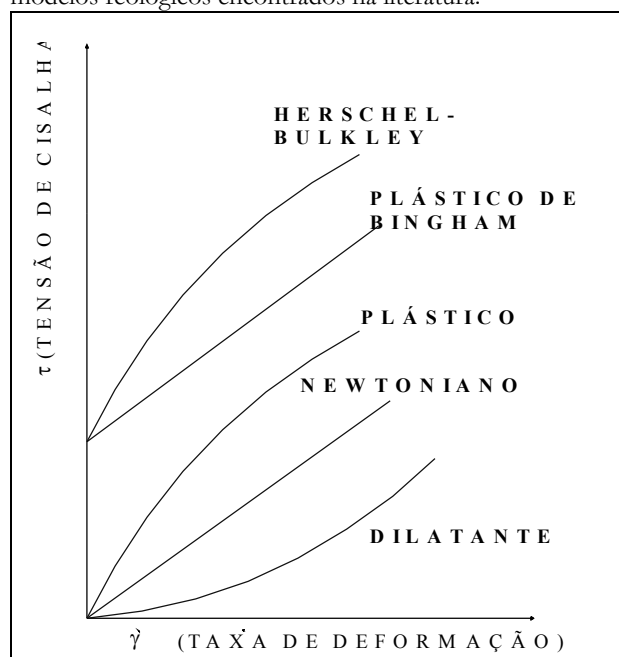


Figura 4 - Reograma de diferentes tipos de fluidos

Estratégias de Medição

A partir da proposição de um modelo que pudessem explicar o comportamento reológico das misturas ensaiadas, e em posse dos dados experimentais, torna-se necessário definir qual o método a ser utilizado para uma calibração precisa dos parâmetros do modelo em questão.

Para o modelo de Herschel-Bulkley proposto, uma opção seria plotar $(\tau - \tau_c) \times \dot{\gamma}$ em escala log-log para diferentes tentativas de valores de τ_c até traçar uma curva satisfatória a partir dos pontos obtidos experimentalmente.

A posição e curvatura desta curva característica nos forneceriam os valores de K e n (parâmetros de Herschel-Bulkley).



Figura 5 - Reômetro R/S



Figura 6 - "Spindles" utilizados

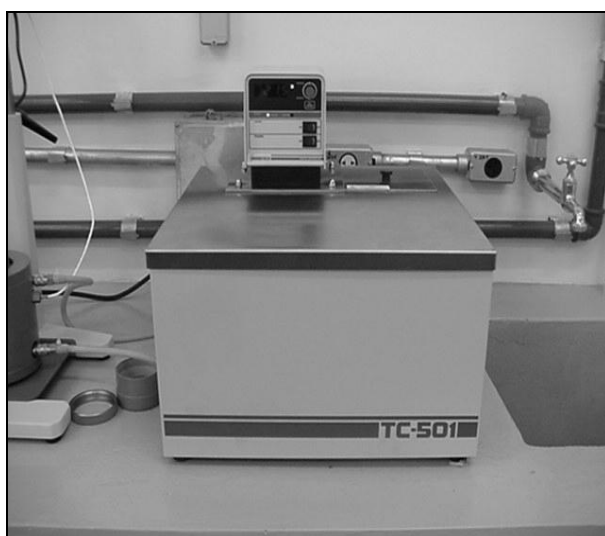


Figura 7 - Banho térmico

No caso em estudo, não há necessidade de procurar a curva que mais se adapta aos dados experimentais, pois o software Rheo2000 usado com o reômetro fornece a calibração afinada dos parâmetros de Herschel-Bulkley, assim como as curvas características de escoamento para cada material ensaiado. O Reômetro utilizado é o R/S Rheometer (figura 5), que controla tensão e deformação e é fabricado pela "Brookfield Engineering Laboratories". A geometria escolhida é do tipo que utiliza cilindros coaxiais (figura 6), equipado com controlador de temperatura (figura 7).

Procedimento Experimental

O procedimento utilizado nos ensaios de reometria é bem simples e repetitivo, podendo ser resumido da seguinte forma:

- inicialmente é ligada toda a aparelhagem (reômetro, banho térmico e microcomputador);
- em seguida, ajusta-se a temperatura do banho térmico. O princípio de funcionamento deste equipamento é a manutenção da temperatura de um fluido circulante por meio de aletas aquecedoras e refrigeradoras. Este fluido circula pela "jaqueta térmica" (acessório acoplado ao reômetro na figura 5), que envolve o "spindle", mantendo constante a temperatura da amostra. Dependendo da faixa de temperatura na qual se está trabalhando, é usado um tipo de fluido circulante. Para temperaturas variando entre 5 e 80°C (nas quais estamos trabalhando), o fluido é a água;
- encaixa-se o "spindle" escolhido, contendo a amostra previamente preparada, ao reômetro. A escolha do "spindle" é feita de acordo com a "consistência" da amostra, pois cada acessório abrange uma faixa de viscosidade na qual pode trabalhar. Quando o "spindle" escolhido não é capaz de realizar o teste, este deve ser substituído;
- no software, configura-se todo o procedimento de ensaio: é feita a opção por ensaio controlando tensão ou deformação, deve ser indicado o "spindle" utilizado, define-se o tempo de ensaio e a faixa de deformação ou tensão imposta (para a coleta dos dados de tensão ou deformação, respectivamente). Em seguida, o reômetro é acionado do próprio software e o teste tem início.

Devido à alta sensibilidade do reômetro, deve-se fazer a calibração semanalmente, de modo a se ter sempre dados confiáveis.

RESULTADOS

Calibração do equipamento

Todos os ensaios foram realizados no reômetro (R/S) utilizando a técnica de variação da taxa de deformação e medição das tensões. Poderíamos optar, também, pela variação da tensão e medição da taxa de deformação, no entanto, achamos de bom alvitre manter um mesmo protocolo e regularidade nos ensaios.

Nessa fase surgiu a necessidade de verificar a confiabilidade do aparelho. Para isso, ensaiamos uma mistura de água + açúcar, com concentração de 60% (em massa), à temperatura de 10°C. Segundo o *Manual de Engenharia Química - UFRJ, quinta edição* (Perry, (1980)), sob essas condições, essa mistura (Newtoniana) apresenta viscosidade de 113,9 cP (=0,1139 Pa.s). No ensaio, a viscosidade obtida foi de aproximadamente 0,11 Pa.s, com um coeficiente de correlação (B) de 0,99 para o modelo Newtoniano, o que assegura a precisão na calibração do reômetro.

Caracterização físico – química da argila utilizada

As características físico-químicas da argila utilizada fornecidas pela empresa mineradora foram controladas, a posteriori, pela equipe de trabalho no laboratório de Mecânica dos Solos, e podem ser listadas como se segue:

Procedência: Minasolo Comércio e representações LTDA;

Extração: Minas Gerais – Brasil;

Minério: Argila caulinitica (com propriedades não expansíveis);

Umidade: 0,90 a 1,00;

Outras Características:

- Massa específica real (seca): 1,5 a 1,65 g/cm³
- Massa específica aparente moída: 0,5 a 0,65 g/cm³ (malha 325);
- Porosidade aparente: 16,00 a 18,50 %;
- Absorção de água: 9 a 10 %;
- Partículas abaixo de 5 microns: 65 a 70 %;
- Cor já seca moída: cinza - clara a bege;
- pH: 5 a 6;

Análise da variação da temperatura

Os resultados que se seguem têm o intuito de elucidar algumas características da mistura ensaiada (água + argila caulinitica, em diferentes Cv) com relação à variação da temperatura. Para uma determinada amostra, com uma concentração em volume (Cv), pH e massa específica pré-estabelecidas, variou-se a temperatura com o auxílio do banho térmico numa faixa da ordem de 10°C a 80°C. A figura 8 representa a variação das curvas tensão de cis-

alhamento x taxa de deformação em função desse parâmetro.

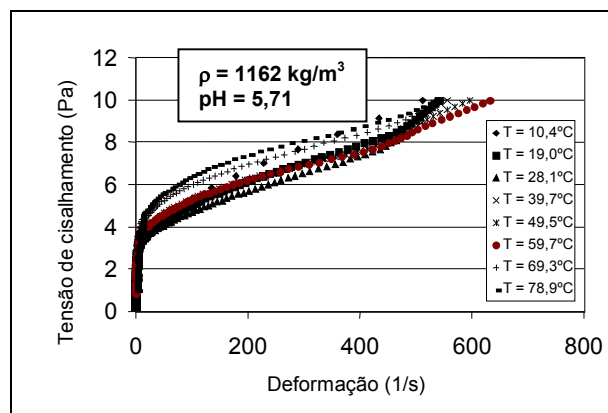


Figura 8 – Variação das curvas de escoamento em função da temperatura para Cv = 10%

Como pôde-se analisar, a variação da temperatura na amostra pareceu não influenciar de forma significativa na curva de escoamento da mistura, sobretudo se considerarmos uma faixa de temperatura que abranja a temperatura ambiente (0°C < T < 30°C). Sendo assim, podemos nos “tranquilizar” quando do controle da temperatura no momento da realização do ensaio de reometria.

Análise da variação do pH

As figuras 9 e 10 mostram as diferenças no comportamento reológico das misturas em função da variação do pH para duas concentrações em volume distintas (Cv=10% e Cv=15%).

As variações do pH resultaram da variação da água utilizada (da torneira do laboratório de Hidráulica da FEIS/UNESP) e água destilada, assim como da eventual adição de NaCl na solução.

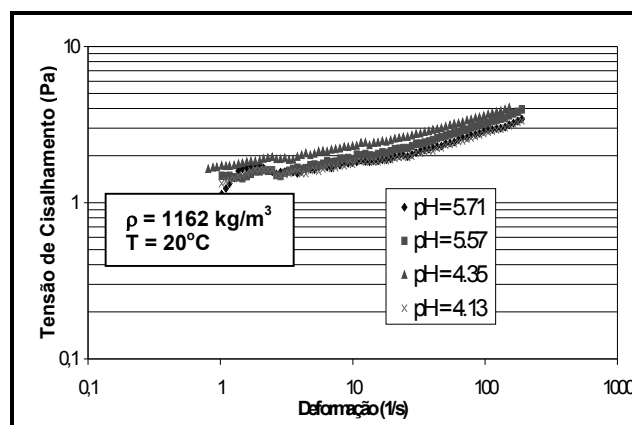


Figura 9 – Variação das curvas de escoamento em função da variação do pH para Cv=10%

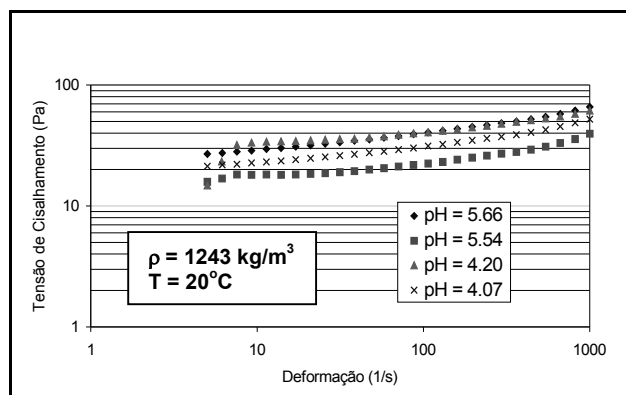


Figura 10 - Variação das curvas de escoamento em função da variação do pH para $C_v=15\%$

Pôde-se observar, a partir dos resultados obtidos, que a influência do pH na curva de tensão de cisalhamento x taxa de deformação é pequena, sendo, para esse estudo, praticamente desprezível. No entanto, a variação desse parâmetro mostrou-se ser mais significativa do que o efeito da temperatura sobre as tensões de cisalhamento.

Análise da variação da concentração em volume (C_v)

É sabido que a viscosidade de um fluido hiperconcentrado cresce com o aumento da concentração de sólidos presentes na mistura. Isso ocorre porque quanto maior for a quantidade de material sólido, maiores serão as forças de atrito interno no fluido escoante, e, conseqüentemente, maior terá de ser a tensão para causar uma determinada deformação.

Dessa forma, pode-se perceber também que a rigidez inicial do fluido aumenta com a concentração e, portanto, a tensão mínima necessária para provocar uma deformação (tensão crítica) também é maior.

Essas afirmações são evidenciadas na figura 11.

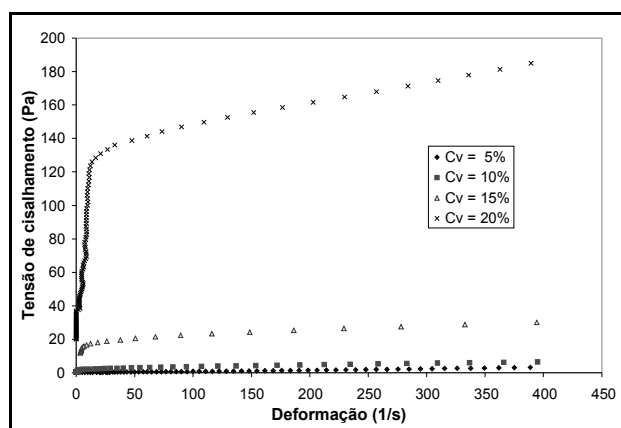


Figura 11 - Variação das curvas de escoamento em função da variação da concentração em volume C_v , para $T = 20^\circ\text{C}$.

Análise da Influência do Modo de Preparo da Mistura

Foram preparadas, de formas diferentes, duas amostras com mesma concentração em volume. A primeira mistura foi agitada manualmente por 5 minutos dentro de um recipiente fechado, enquanto que a segunda foi espatulada por 5 minutos. Ambas foram ensaiadas à mesma temperatura e verificou-se que o modo de preparo da amostra praticamente não influencia na curva tensão de cisalhamento x taxa de deformação.

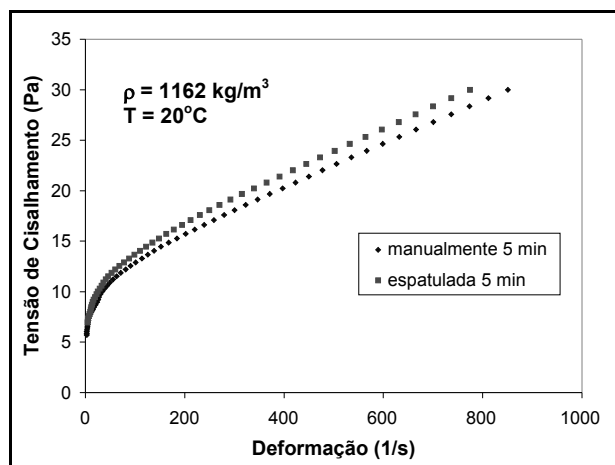


Figura 12 – Influência do modo de preparo das misturas para $C_v = 10\%$

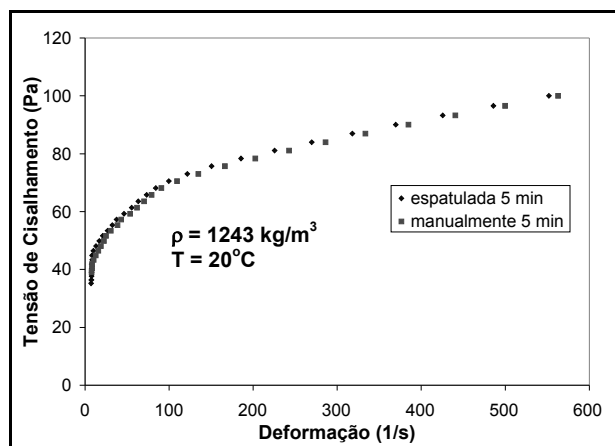


Figura 13 – Influência do modo de preparo das misturas para $C_v = 15\%$

Análise da Ocorrência de Tixotropia

A análise da variação das curvas de escoamento em função do tempo (tixotropia) é um aspecto importante quando da caracterização reológica rigorosa de uma mistura hiperconcentrada.

Nestes testes, o reômetro era programado de forma a impor deformações crescentes (carregamento) e

decrecentes (descarregamento). Assim, pela comparação entre as curvas obtidas no carregamento e no descarregamento, analisamos a indicação de ocorrência ou não do fenômeno de tixotropia.

Para uma concentração $C_v = 15\%$, aplicando uma deformação $\dot{\gamma} = D$ de 0 a 500 s^{-1} durante 180 segundos e descarregando de 500 a 0 s^{-1} em 180 segundos (conforme a figura 14), obteve-se o resultado indicado na figura 15.

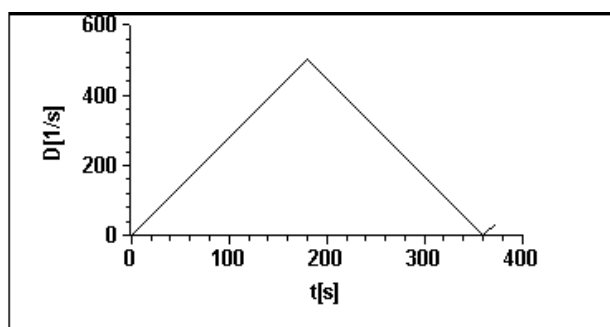


Figura 14 - Deformação imposta no ensaio da Figura 15

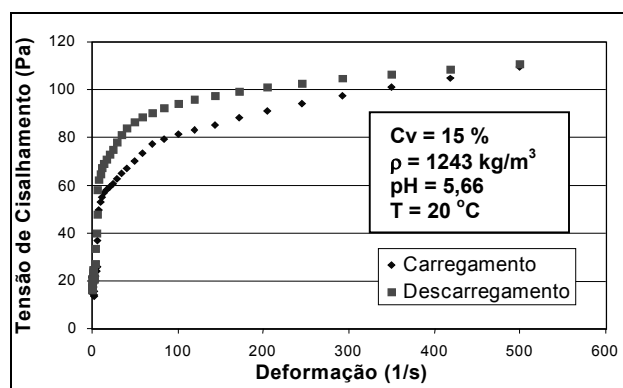


Figura 15 - Análise de tixotropia sem intervalo entre carregamento e descarregamento

Mantendo a mesma amostra, aplicou-se uma deformação $\dot{\gamma} = D$ de 0 a 500 s^{-1} durante 180 segundos, agora com um intervalo de repouso de 10 segundos entre carregamento e descarregamento – figura 16. O resultado obtido encontra-se apresentado na figura 17.

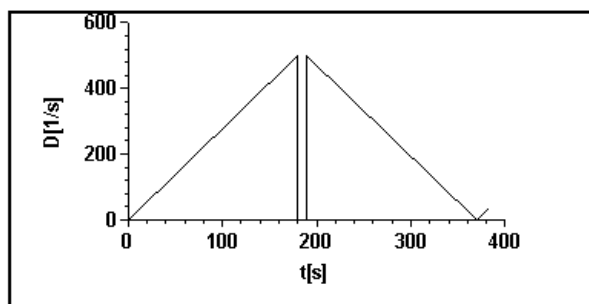


Figura 16 - Deformação imposta no ensaio da Figura 17

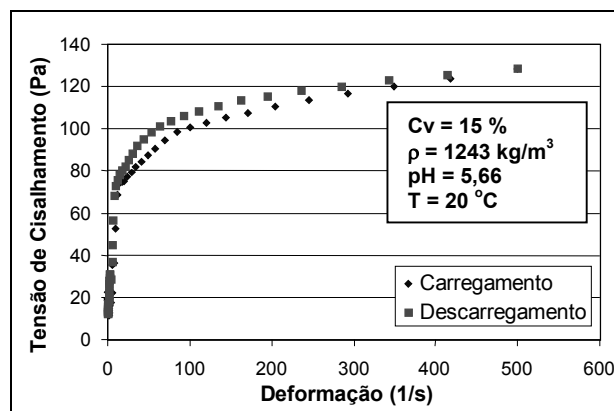


Figura 17 - Análise de tixotropia com intervalo de 10s entre carregamento e descarregamento

O ensaio seguinte seguiu a mesma sistemática dos dois ensaios anteriores. Considerou-se, entretanto, um intervalo de 60 s entre o carregamento e o descarregamento – ver figuras 18 e 19.

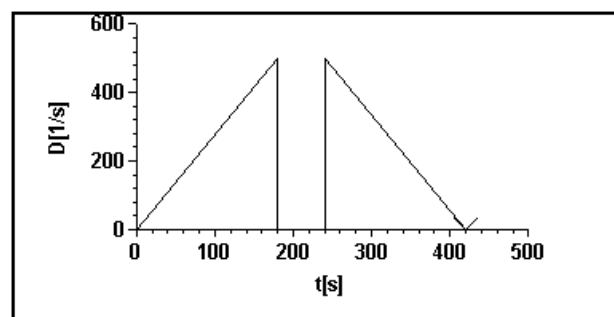


Figura 18 - Deformação imposta no ensaio da Figura 19

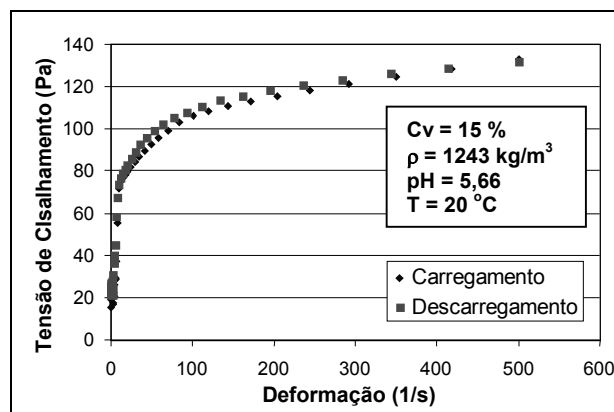


Figura 19 - Análise de tixotropia com intervalo de 60s entre carregamento e descarregamento

Como pôde-se verificar, para os casos apresentados nas figuras 15, 17 e 19, a mistura de argila caulínica e água em questão recupera suas propriedades iniciais à medida que incrementam-se os tempos de repouso, conferindo tixotropia do material, ou seja, não apresentando

variação significativa (no tempo) no comportamento reológico. Nota-se, claramente, que quando se aumenta o tempo entre o carregamento e o descarregamento, as curvas tendem a se sobrepor. Isso ocorre devido ao ensaio se aproximar do regime permanente.

Proposta de uma Lei de Comportamento para as misturas ensaiadas controladas (água-argila caulínica)

A seguir, julgou-se oportuno apresentar algumas tendências de comportamento para algumas concentrações ($C_v=10\%$, $C_v=15\%$ e $C_v=20\%$) e tentou-se comparar o modelo tipo Herschel-Bulkley (com correlação para os dados experimentais acima de 98%) com o modelo Binghamiano e Newtoniano (figuras 20, 21 e 22). O ajuste dos modelos reológicos ilustrados nas figuras 20, 21 e 22 e na Tabela 01 foram obtidos a partir do software Rheo2000, utilizado nesta pesquisa.

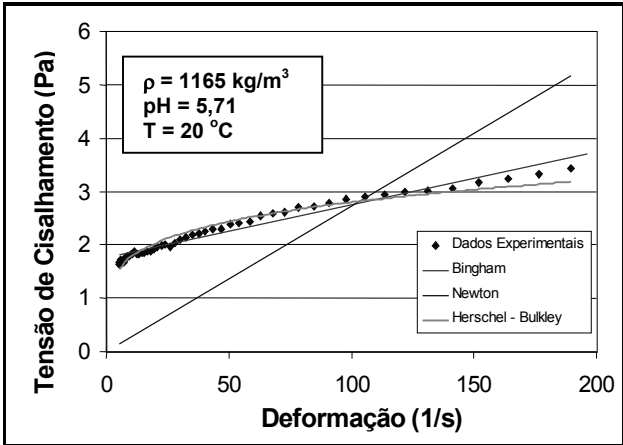


Figura 20 - Comportamento reológico de mistura água + argila caulínica com $C_v = 10\%$

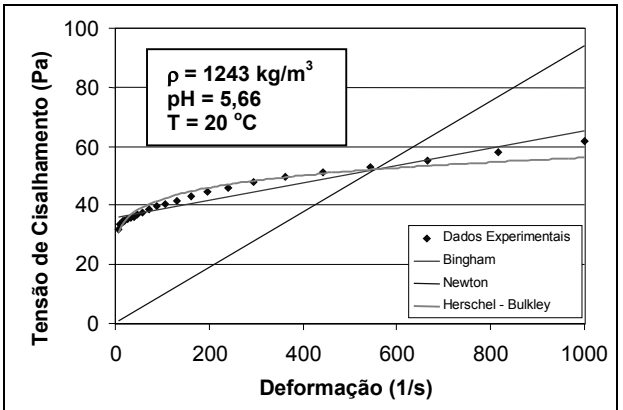


Figura 21 - Comportamento reológico de mistura água + argila caulínica com $C_v = 15\%$

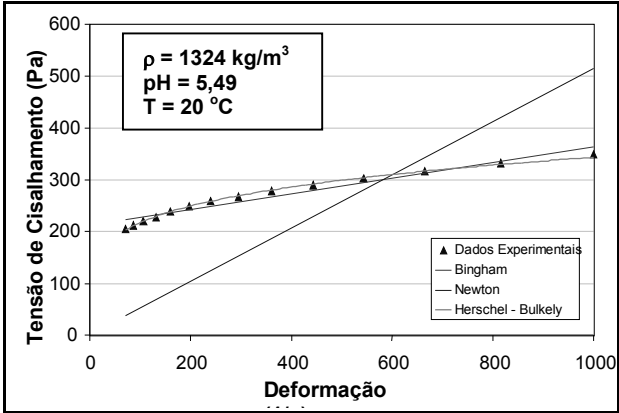


Figura 22 - Comportamento reológico de mistura água + argila caulínica com $C_v = 20\%$

Tabela 1 – Parâmetros encontrados na adaptação dos modelos reológicos para as misturas água-argila caulínica

Cv (%)	Ajuste com Herschel - Bulkley				
	τ_c	K	n	R ²	
10	1,26	0,22	0,47	0,99	
15	29,45	1,30	0,46	0,98	
20	192,27	46,29	0,27	0,98	
Cv (%)	Ajuste com Bingham			Ajuste com Newton ($\tau_c=0$ e n=1)	
	τ_c	μ_B	R ²	μ	R ²
10	1,7529	0,010	0,960	0,027	-
15	35,818	0,029	0,929	0,094	-
20	211,66	0,152	0,950	0,515	-

Análise quantitativa global de parâmetros reológicos em função da variação de C_v

Pesquisas bibliográficas indicam que os parâmetros do modelo reológico proposto de Herschel-Bulkley seguem, via de regra, para argilas caulínicas, o seguinte padrão: os valores de τ_c (tensão crítica) e K (viscosidade aparente) aumentam exponencialmente com a concentração em volume de sólidos da mistura. Em contrapartida, o valor de n (índice de escoamento) diminui com a concentração, obedecendo a uma função tipo potência.

A partir dessa base de informações, o objetivo deste item é checar correlações apontadas entre os dados reológicos das misturas ensaiadas e verificar sua consonância com os resultados da literatura. Para tanto, são representados nas figuras 23 a 28 os dados que temos obtido em nossas medições assim como aqueles já disponíveis na literatura. A partir dessa nova base de dados, leis de comportamento globais quantitativas são definidas para cada binômio reológico.

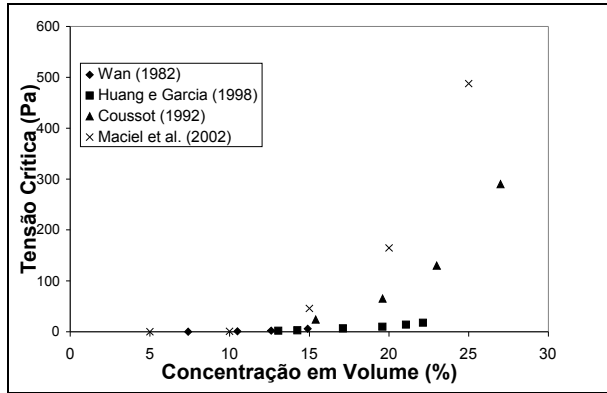


Figura 23 - Evolução da tensão crítica τ_c em função da concentração em volume C_v

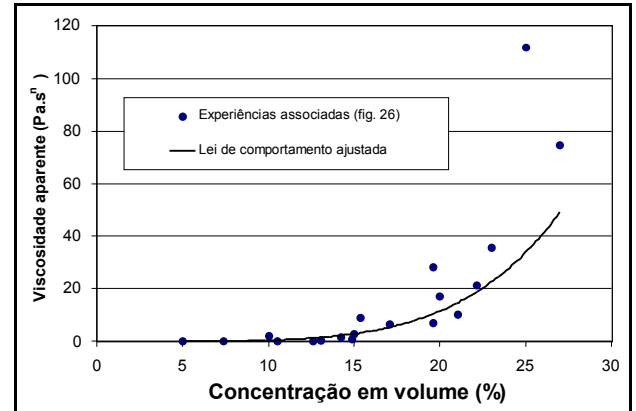


Figura 26 - Lei de comportamento da viscosidade aparente K em função da concentração em volume C_v .
($K = 0,0073e^{0,3665C_v}$; $R^2 = 0,8285$)

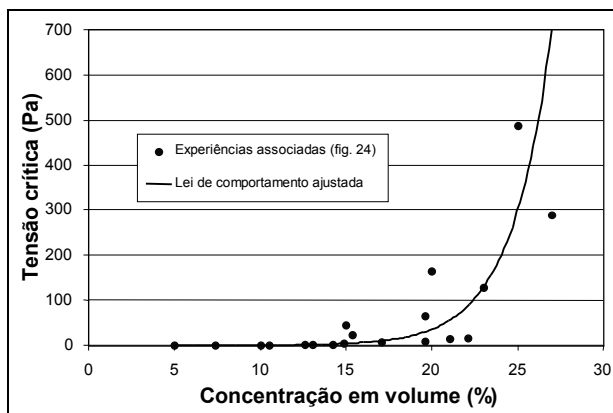


Figura 24 - Lei de comportamento da tensão crítica τ_c em função da concentração em volume C_v para todos os dados
($\tau_c = 0,0073e^{0,4248C_v}$; $R^2 = 0,8398$)

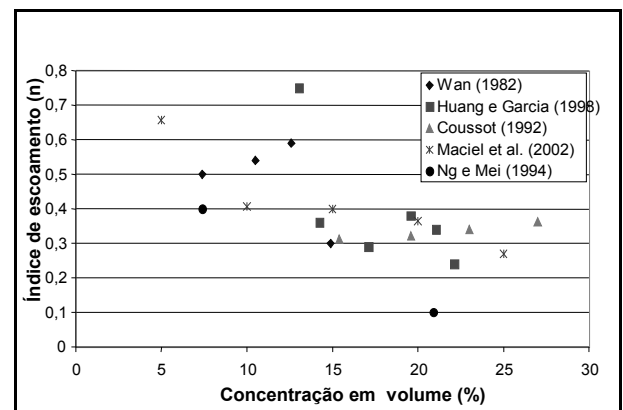


Figura 27 - Evolução do índice de escoamento n em função da concentração em volume

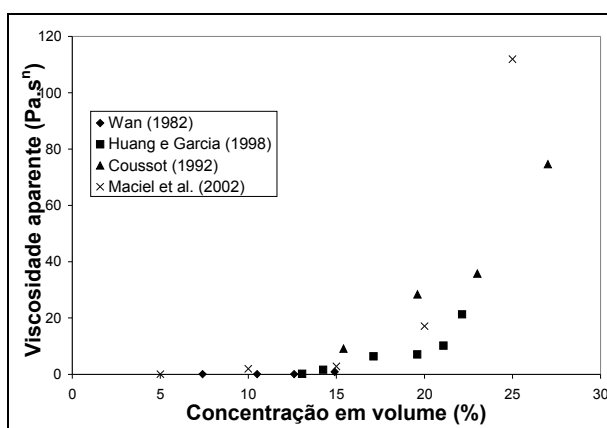


Figura 25 - Evolução da viscosidade aparente K (n variando entre 0,1 e 0,8) em função da concentração em volume C_v

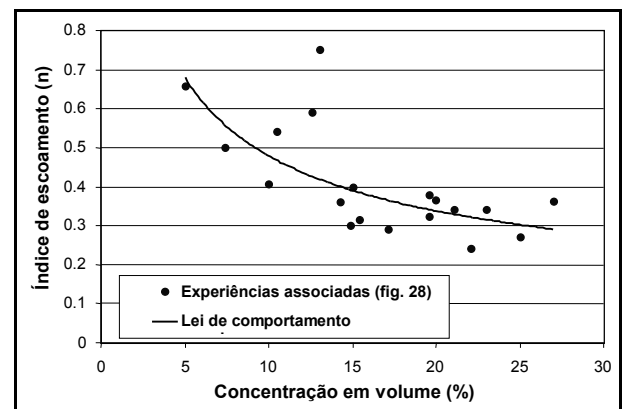


Figura 28 - Lei de comportamento do índice de escoamento n em função da concentração em volume C_v
($n = 1,529C_v^{-0,5039}$; $R^2 = 0,4967$)

Nota: Para a determinação da lei de comportamento do índice de escoamento n foram desconsiderados os resultados de Ng e Mei (1994), pois estes foram realizados com material não caulínico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Trata-se de um artigo que relata um projeto maior, ainda em andamento, mas cuja parte de caracterização do material (mistura água-argila caulínica) está praticamente encerrada, apresentando os seguintes resultados:

- as argilas caulínicas ensaiadas mostraram-se, como esperado, não expansivas, apresentando comportamento tixotrópico e alterando as propriedades reológicas básicas, tais como tensão crítica (τ_c), índice de escoamento (n) e viscosidade aparente (K) em função da concentração em volume (C_v);
- as misturas ensaiadas no reômetro (de alta precisão) puderam ser bem caracterizadas no tocante à curva de evolução reológica;
- os resultados experimentais ajustaram-se bem ao modelo reológico de Herschel-Bulkley, notadamente na determinação da tensão crítica e para taxas de deformação inferiores a 100 s^{-1} (faixa observada “no campo” para fenômenos tipo “mud-flow”);
- não obstante, verifica-se uma boa adaptabilidade do modelo binghamiano para deformações elevadas.

Assim exposto e com base nos resultados experimentais obtidos na FEIS/UNESP, uma nova base de dados foi montada, a partir da qual, obtiveram-se leis de evolução dos diversos fenômenos reológicos, que se encontram apresentadas no item “Proposta de uma Lei de Comportamento para as misturas ensaiadas controladas (água-argila caulínica)”.

As próximas etapas deste projeto consistem em:

- caracterização reológica de misturas água-argila-areia fina;
- caracterização e quantificação das propriedades do escoamento destas misturas (lâmina de água, velocidade, vazão) em canais inclinados de geometria variada;
- determinação de leis de atrito na nova reologia.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento do projeto (00/14853 – 5), ao CNPq e Fapesp pelas bolsas de mestrado e de IC.

REFERÊNCIAS

- BINGHAM, E. C. e GREEN, H., "*Paint, a plastic material and not a viscous liquid, the measurement of its mobility and yield value*", Proc. Am. Soc. Test. Mater., 19, 640-664, 1919.
- CASSON, N., "*A flow equation for pigment oil suspensions of the printing ink type, rheology of dispersed system*", Pergamon Press, pp. 84-104 New York, 1959.
- COUSSOT, P., "*Mudflow rheology and dynamics*", Monografia – Balkema – 255 p, 1997.
- COUSSOT, P., "*Rhéologie des boues et laves torrentielles - Etude de dispersions et suspensions concentrées*", Tese de doutorado - Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992.
- COUSSOT, P., PROUST, S., ANCEY, C., "*Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids*", J. Non-Newtonian Fluid Mech., Vol. 66 - p 55-70, 1996.
- EINSTEIN, A., "*Investigation of the Brownian movement*". New York, Dover publication. [English translation off Ann. Physik, 19, p.286 (1906), et 34, p.591, (1911)], 1956.
- HERSCHEL, W. H. e BULKLEY, R., "*Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions*", Am. Soc. Testing Mater., 26, 621-633, 1926.
- HUANG, X., GARCIA, M.H., "*A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope*", J. Fluid Mech., Vol. 374, p 305-333, 1998.
- MACIEL, G. F. et al., "*Relatório técnico projeto de pesquisa FAPESP proc. 00/14853-5*", outubro de 2002.
- MACIEL, G. F. et al., "*Roll wave formation in the non Newtonian flows*", XIV COBEM. Bauru, S.P., Brasil. 1997.
- NG, C. O. e MEI, C. C., "*Roll waves on a shallow layer of mud modeled as a power-law fluid*", J. Fluid Mech., 263, 151-183, 1994.
- OSTWALD, W., "*Über die Geschwindigkeitsfunktion der viskosität disperser systeme*", Kolloid Zeitschrift, 36, 99-117, 1925.
- PERRY, H., "*Manual de engenharia química*", 5 ed., Rio de Janeiro: Guanabara dois, 1980.
- PIAU, J. M., "*Flow of a yield stress fluid in a long domain, application to flow on an inclined plane*", J. Rheology, Vol. 40, p 711-723, 1996.
- WAN, Z., "*Bed material movement in hyperconcentrated flow*", Ser. Pap. 31 Inst. of Hydrodyn. and Hydraul., Tech. Univ. of Denmark, Lyngby, 1982.
- WANG, Z. et al., "*Rheological properties of sediments suspensions and their implication*", J. Hydr. Res., 32, 495-516, 1994.

Mud front evolution in open channels - Part One: Proposal of a Herschel-Bulkley rheologic model from experimental data

ABSTRACT

This paper deals with the subject of hyperconcentrated fluids. The goal is to develop a rheological characterization of solid-liquid mixtures (water- kaolinitic clay) with different volume concen-

trations (C_v) for which the rheologic properties such as the apparent viscosity, yield stress value and curve of shear stress versus shear rate are determined, using a high precision rheometer (shear stress and controlled shear rate). Under controlled conditions, the influence of the temperature, pH and volume concentration (C_v) on the rheologic curve of those mixtures was verified, besides possible thixotropic phenomena and mode of preparation. The rheologic model fitted was Herschel-Bulkley: $\tau = \tau_c + k(\dot{\gamma})^n$, in which: τ is the shear stress; τ_c is the yield stress value; k is a consistence term (apparent viscosity); n is the flow index; and $\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}$ is the shear rate. Finally, laws of evolution

of the various rheologic parameters as a function of volume concentration were obtained from a global quantitative analysis. The results obtained in that first series of experimental data agree with those presented in literature.

Key Words: Non-Newtonian fluid; Herschel-Bulkley; mud; open channels.