

## Análise da Tensão Crítica em Função da Adição de Materiais Inertes em Matrizes Fluidas Formadas de Água+Colóides

Hamilton dos Santos Kiryu

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – FEIS – UNESP - Ilha Solteira, SP  
hamilton@dec.feis.unesp.br

Geraldo de Freitas Maciel

Departamento de Engenharia Civil – FEIS – UNESP - Ilha Solteira, SP  
maciel@dec.feis.unesp.br

Recebido: 22/03/06 - revisado: 06/07/06 - aceito: 25/10/07

### RESUMO

O objetivo desse trabalho é definir um modelo reológico, dentre vários possíveis, que melhor se ajuste às curvas de escoamento (tensão de cisalhamento  $\times$  taxa de deformação) de misturas compostas de água + argila caulínica + areia fina (misturas que representam escoamentos naturais e alguns fluidos industriais) e analisar a variação do parâmetro tensão crítica em função das características do fluido intersticial (água+argila caulínica), do material granular (diâmetro da areia fina) e da mistura (concentração em volume dos sólidos). Os ensaios reométricos foram realizados com o Reômetro R/S Brookfield, equipado com banho térmico que garante a temperatura constante da amostra durante o ensaio. A geometria de cilindros coaxiais foi escolhida para os testes de cisalhamento simples.

A partir dos resultados reométricos, propôs-se o modelo de Herschel-Bulkley para as análises reológicas realizadas, a partir da comparação com outros modelos disponíveis (Santos, 2003). Com relação aos estudos da variação da tensão crítica das amostras, pôde-se concluir que o aumento da tensão crítica do fluido é função da superfície específica e do diâmetro dos grãos, da concentração em volume dos inertes e do volume total dos sólidos da mistura, o que estaria em consonância com os estudos de Krieger e Dougerthy (1959). Um efeito peculiar encontrado é o grau de influência dos sólidos inertes, sob duas formas: pequeno aumento da tensão crítica com o diâmetro do grão e um crescimento exponencial com a superfície específica dos grãos.

**Palavras-chave:** Fluidos não-newtonianos, tensão crítica, material inerte, modelo reológico de Herschel-Bulkley, lamas.

### INTRODUÇÃO

Em geral, fluidos oriundos de processos naturais e industriais, de elevada concentração de sólidos, apresentam um comportamento reológico diferente do newtoniano. Durante esses processos pode ocorrer a mistura de fluidos de características distintas ou a incorporação de materiais que se dispersam de formas diferentes no interior do material fluido considerado “puro”. Alguns exemplos de processos naturais são as lamas geradas durante enxurradas (Figura 1a), deslizamento de encostas e misturas de água+detritos de cheias urbanas. Além disso, podem ser dados como exemplos de processos industriais o concreto fresco (Figura 1b), lamas oriundas da exploração de petróleo ou resultante do escoamento de esgotos, assim como processos de fabricação de produtos químicos (tintas, vernizes) e produtos

alimentares, como suco de laranja, maionese, dentre outros.



Figura 1 – a: Lama natural escoando em voçoroca (Santos, 2003)

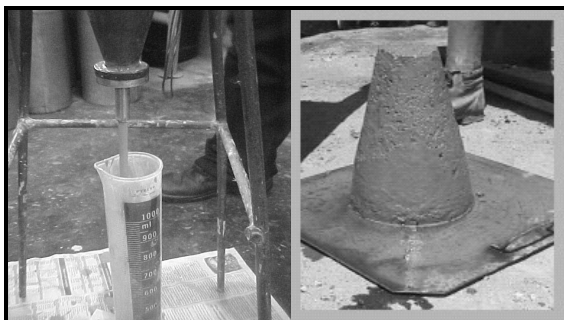


Figura 1 – b: Pasta de água/cimento e concreto fresco – Laboratório de Hidrologia e Hidrometria – FEIS/UNESP

Face ao comportamento não-newtoniano de tais misturas, o parâmetro chave da caracterização newtoniana, a viscosidade real, deixa de ser válido. Devido à infinidade de compostos que podem ser formados pela mistura de matérias, é fundamental o estudo do comportamento dessas misturas em função da natureza dos elementos base e das proporções nas quais são misturadas, com especial atenção à caracterização química da água como solvente e à mineralogia dos sólidos envolvidos. No tocante à reologia, a tensão crítica requer uma investigação minuciosa, devido a sua sensibilidade aos elementos base da mistura, conforme resultados apresentados em Santos (2003).

## ESTADO DA ARTE

A reologia, como ciência, descreve a deformação de um corpo (sólido, líquido, gás) sob a influência de tensões. As técnicas de medição das taxas de deformação sob a ação de tensões de cisalhamento, por exemplo, estão inseridas em competências da reometria. Maiores detalhes acerca da reologia/reometria, seus fundamentos teóricos e práticos, podem ser encontrados na literatura, tendo esse assunto já sido noticiado em artigo desta revista (Maciel e Santos 2003 e Santos e Maciel, 2003). A seguir será apresentada uma breve exposição sobre reometria.

### Reometria

Como já citado, a presença de materiais sólidos nos fluidos newtonianos pode modificar seu comportamento. Dentre as possíveis alterações, está o aparecimento de uma tensão crítica anterior ao escoamento. Essa tensão, chamada de crítica ou

inicial, é a tensão abaixo da qual o fluido pode resistir a tensões superficiais sem escoar (se deformando como um sólido elástico) e acima da qual o material escoou como um fluido.

Devido à complexidade do comportamento destes materiais, vários modelos reológicos foram propostos para descrever as relações entre as tensões de cisalhamento e as taxas de deformação aplicadas, associando essas relações com o limite de escoamento ou tensão crítica das misturas. A seguir são apresentados alguns desses modelos.

### Modelos reológicos

Os modelos apresentados são válidos para escoamentos laminares, estacionários e expressam a relação  $\tau(\dot{\gamma})$  (tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação).

O modelo mais simples que se tem é o do fluido newtoniano em que a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação (Equação 1).

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \text{ sendo:} \quad (1)$$

$\tau$ : tensão;

$\mu$ : viscosidade do fluido ( $\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ );

$\dot{\gamma}$ : taxa de deformação.

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

Um modelo um pouco mais complexo é o modelo de potência (Oswald, 1925):

$$\tau = a \dot{\gamma}^m \Rightarrow \mu = a \dot{\gamma}^{m-1}; \text{ sendo:} \quad (2)$$

a e m: parâmetros do fluido.

Para alguns fluidos, para taxas de deformação próximas a zero ou valores infinitos, o valor  $\mu$  tende a um valor constante ( $\mu_0$  e  $\mu_\infty$  respectivamente). Neste caso o modelo mais recomendado é:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = f(\dot{\gamma}) \quad (3)$$

onde  $\mu_0 > \mu_\infty$  e f é uma função decrescente de  $\dot{\gamma}$ . A função f deve apresentar os seguintes comportamentos: quando  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ , a função  $f(\dot{\gamma}) \rightarrow 1$  e quando  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ , a função  $f(\dot{\gamma}) \rightarrow 0$ . Os modelos reológicos

de Powell-Eyring, Carreau e Ellis são exemplos desse tipo de comportamento.

No caso de fluidos não-Newtonianos (com presença de tensão crítica), os modelos são da forma:  $\tau = \tau_c + f(\dot{\gamma})$ . Alguns exemplos importantes são:

$$\tau = \tau_c + \mu_B \dot{\gamma} \quad \text{(Bingham - 1920)} \quad (4)$$

$\tau_c$ : tensão crítica de escoamento;  
 $\mu_B$ : viscosidade plástica de Bingham.

$$\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n \quad \text{(Herschel-Bulkley - 1926)} \quad (5)$$

k: o parâmetro de consistência do modelo de Herschel-Bulkley – também considerado como viscosidade do modelo de Herschel-Bulkley;  
 n: índice de escoamento do fluido.

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{K\dot{\gamma}} \quad \text{(Casson - 1959)} \quad (6)$$

K: parâmetro de ajuste do modelo de Casson.

Para cada modelo proposto, deve-se atentar para o fato que cada um dos parâmetros reológicos, resguardadas as condições de contorno do ensaio, varia em função do material ensaiado, o que exige que tais parâmetros sejam determinados experimentalmente.

A Figura 2 ilustra alguns dos diferentes tipos de modelos reológicos encontrados na literatura.

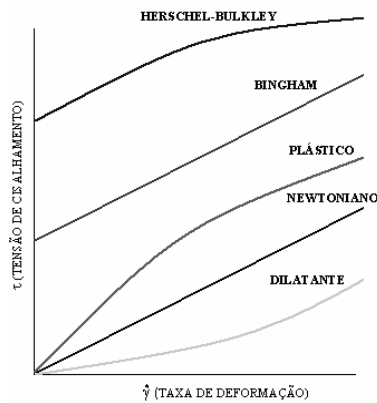


Figura 2 - Reograma de diferentes tipos de fluidos

**Efeito da distribuição granulométrica sobre as propriedades macroscópicas de uma suspensão concentrada**

A maior parte das suspensões naturais é caracterizada por possuírem variadas dimensões de

grãos, cuja natureza e intensidade das interações fluido/partícula e partícula/partícula são dependentes da dimensão destes inertes, de modo que não é possível determinar o comportamento das misturas, em escala microscópica, simplesmente a partir do conhecimento das interações entre esses elementos.

Na busca da caracterização de suspensões naturais desse tipo, Wildemuth e Williams (1985) sugeriram que a tensão crítica de uma suspensão, com diferentes diâmetros de grãos (granulometria estendida) fosse dependente da concentração máxima dos grãos.

Esses pesquisadores mostraram que, para qualquer suspensão, devia existir uma faixa de concentração sólida [ $\phi_0, \phi_{\infty}$ ] para a qual a suspensão tornar-se-ia plástica. Nesta faixa, a tensão crítica  $\tau_c$  seria expressa em função da concentração sólida, a saber:

$$\tau_c(\phi) = z \sqrt{B \left( \frac{\phi/\phi_0 - 1}{1 - \phi/\phi_{\infty}} \right)} \quad \text{sendo:} \quad (7)$$

$\phi_{\infty}$ : concentração máxima para forte cisalhamento;  
 $\phi_0$ : concentração crítica de sedimentação (formação de uma rede de contato de partículas);  
 B, z: parâmetros a serem calibrados experimentalmente.

Os parâmetros apresentados na Equação 7 são, entretanto, de difícil determinação. Um passo inicial para o entendimento da variação da tensão crítica em função da variação do diâmetro dos grãos seria a análise da adição de colóides. Isso porque um fluido formado de água+colóides forma, geralmente, um material homogêneo, sem apresentar problemas comuns em misturas de líquidos adicionados de grãos, tais como a sedimentação.

Segundo Ancey (2002), para as argilas, foi mostrado experimentalmente que a tensão crítica  $\tau_c$  varia muito rapidamente com a concentração sólida  $\phi$ , ( $\tau_c \propto \phi^\lambda$ ) sendo  $\lambda$  um coeficiente da ordem de 5.

Alguns modelos teóricos foram desenvolvidos para justificar esta variação em lei potência. Existem alguns fatores “complicadores” para a determinação teórica de  $\tau_c$ , dentre eles, citam-se: a agregação de partículas, presença de várias forças (força iônica, força Van der Waals, etc.), efeito Browniano, etc.

Vários modelos aproximados foram construídos para quando um tipo de interação em particu-

lar predomina. Assim, Kapur e Scales (1997); e Zhou et.al. (1999) desenvolveram um modelo de campo médio quando as interações de Van der Waals predominam. Esses autores chegaram a seguinte relação:

$$\tau_c(\varphi) = K \left( \frac{\varphi}{1-\varphi} \right)^\lambda \frac{1}{d^2}, \text{ para } K=3,1Ab/(24\pi\zeta) \quad (8)$$

$b, \lambda$ : parâmetros a serem determinados experimentalmente;

A: constante de Hamaker;

d: diâmetro das partículas;

$\zeta$ : distância média entre duas partículas.

Neste tipo de modelo, a dispersão formada de partículas coloidais e água é necessariamente floculada, onde a rede de interação entre elas (força de atração) é regida pelas forças de Van der Waals e os flocos formados interagem entre si de maneira fraca. Segundo Wildemuth e Williams (1985), é a existência deste tipo de interação entre os agregados que confere um caráter plástico à dispersão. Como efeito, para cisalhar a suspensão, é necessário quebrar as relações entre as partículas, diminuindo o tamanho dos flocos. Essa diminuição do tamanho dos flocos gera a diminuição da resistência do material ao escoamento e, por conseguinte, a diminuição da viscosidade global da mistura.

Para misturas com concentrações baixas, registra-se que o coeficiente  $\lambda$  poderia estar ligado à dimensão fractal dos flocos, ou seja, um parâmetro ligado à forma da partícula.

Para fortes concentrações, a dependência de  $\tau_c$  no que diz respeito à  $\varphi$  é bem mais significativa porque há, cada vez mais, contatos entre flocos e a ruptura das suas ligações torna-se cada vez mais difícil. Porém, uma problemática adicional é levantada quando se questiona sobre a variação do comportamento da mistura devido ao acréscimo de partículas grossas (não coloidais) nos sólidos totais. A priori, pode-se esperar uma diminuição da tensão crítica, porque o volume relativo ocupado pela fração fina é reduzido. Então a Equação 8 deve ser modificada em função dos sólidos inertes, a saber:

$$\tau_c(\varphi_f, \varphi_g) = K \left( \frac{\varphi_f}{1-\varphi_f} \right)^\lambda \frac{1-\varphi_g}{d^2} + \mathfrak{F}(\varphi_g) \text{ Sendo:} \quad (9)$$

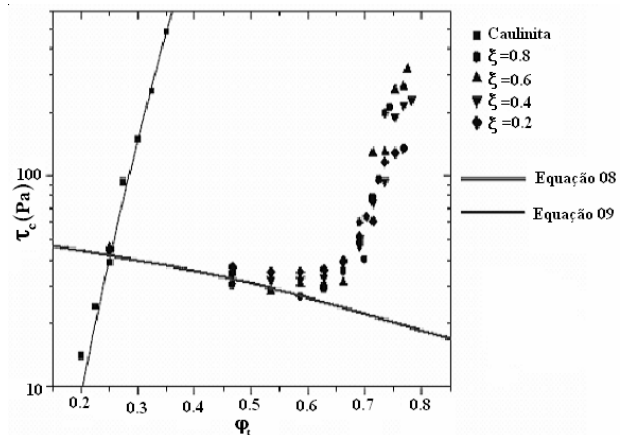
$\varphi_g$ : fração grossa de sólidos;

$\varphi_f$ : fração fina de sólidos.

Para a análise dessa nova problemática será utilizada a fração total  $\varphi_t$  dada por  $\varphi_t = \varphi_f + \varphi_g$ . Os resultados obtidos desta análise foram plotados na Figura 3. Com estes dados, Ancey (2002) estimou a variação da tensão crítica de uma suspensão de esfera de vidro e de caulinita em função da concentração total em um diagrama monologarítimo.

A tensão crítica foi medida com a ajuda do método de Pashias (“slump test”). No caso de uma suspensão de caulinita ( $\varphi_g = 0$ ), o modelo da Equação 9 permite descrever corretamente a dependência de  $\tau_c$  conforme a Equação 8.

Para os resultados apresentados na Figura 3, a suspensão de esfera de vidro apresentava por uma população bimodal e  $\xi$  era a fração ocupada pelas pequenas esferas. Observa-se que inicialmente a tensão crítica diminui quando se aumenta a fração de esferas no volume total de sólidos. No entanto, este decréscimo não se mantém quando se continua a acrescentar esferas. Para concentrações totais superiores a 55%, a tensão crítica aumenta com a concentração e a taxa de crescimento é semelhante àquela apresentada pela dispersão de caulinita para valores dos parâmetros  $K = 1,43 \cdot 10^{-7}$  e  $\lambda = 5,15$ .



**Figura 3 - Variação da tensão crítica com a concentração sólida. A suspensão de esfera era composta de esfera de 1 e 3 mm de diâmetro. A fração relativa de pequenas esfera é  $\xi$ . A concentração inicial de caulinita para as misturas caulinita+esferas era de 25%**

Ancey (2002) observou que a distribuição granulométrica tem efeitos complexos na tensão crítica. Segundo ele, tem-se:

- Para concentrações moderadas, observa-se que a tensão crítica independente da dimensão das partículas;

- Para altas concentrações o inverso foi observado: quanto mais a mistura era rica em esferas, mais a tensão crítica aumentava.

Uma possível explicação para estas observações é considerar um crescimento sensível das interações entre partículas grossas, a saber: - como as partículas grossas não são coloidais, apenas efeitos indiretos poderiam ser responsáveis por um aumento da tensão crítica (como por exemplo, deposição das partículas argilosas na superfície das esferas de vidro). No entanto, os cálculos das ordens de grandeza destes efeitos indiretos não permitem determinar a taxa de crescimento da tensão crítica e, sobretudo, de explicar porque este crescimento é idêntico ao crescimento provocado pela caulinita. Naturalmente é falso pensar que uma partícula grossa cercada de partículas coloidais comporta-se, por sua vez, como uma partícula coloidal.

Com o aumento da fração inerte nos sólidos totais da mistura, a tensão crítica da amostra deve diminuir. Esse fato é sustentado pela hipótese de que a tensão crítica é um efeito dos sólidos coloidais.

O efeito do aumento da tensão crítica observado por Ancey (2002) foi também observado, por estes autores, durante alguns testes reométricos de misturas possuindo uma quantidade elevada de sólidos inertes.

Em discussões com outros grupos de estudos em reologia (Escola Politécnica/USP – Departamento de Engenharia de Alimentos e Departamento de Química) foram levantadas as seguintes conclusões: o aumento da tensão crítica, para misturas ricas em materiais granulares, é propiciado pela formação de uma rede de contatos formada pelos grãos no interior do fluido intersticial. Considerando o efeito de contato direto entre as partículas inertes, pode-se concluir que muitos dos contatos entre os grãos não estavam sendo lubrificados a tal ponto que a fase da mistura teria se modificado; ao invés de água contendo material inerte ter-se-ia uma mistura composta de grãos adicionados de água.

Assim, as considerações de Ancey (2002) seriam corretas, porém para misturas diferentes, a saber: para uma mistura onde ocorra a formação de uma rede de contatos diretos entre os grãos, a “suposta” tensão crítica seria, na realidade, o esforço inicial do escoamento para “quebrar” a estrutura formada pelo contato direto entre os grãos. Para esse caso específico, a diminuição do material granular na fração de sólidos totais causaria a diminuição da tensão crítica. Já para uma mistura, onde não houvesse a formação de uma rede de contato direto

entre os grãos, a tensão crítica seria causada exclusivamente pelo caráter coloidal dos sólidos ativos (colóides). Nesse último caso, a diminuição dos sólidos granulares no volume total da mistura causaria um aumento da tensão crítica da mesma, devido ao aumento da quantidade de colóides no volume total de sólidos.

Outros pesquisadores (Ancey, 2002 e Krieger, 1959) estudaram o acréscimo da tensão crítica de uma mistura composta de água+colóides em função da adição de partículas inertes, porém, neste caso, o volume de colóides é constante, apenas adicionando mais sólidos à mistura. Assim, a variação da tensão crítica em função do aumento das partículas inertes em uma suspensão constante de água+argila deve seguir a Equação 10.

$$\tau_{cf} = \tau_c \left( 1 - \frac{\phi}{\phi_\infty} \right)^w, \text{ sendo} \quad (10)$$

$\tau_{cf}$ : tensão crítica final da mistura;

$\tau_c$ : tensão crítica do fluido intersticial (água+argila);

$\phi$ : concentração em volume dos sólidos totais;

$\phi_\infty$ : concentração de empacotamento de sólidos em volume (o empacotamento é atingido quando começam a aparecer fissuras na superfície da amostra, ou seja, os campos de tensão não são mais homogêneos no interior da mesma, surgindo caminhos preferenciais); e

w: índice de ajuste da curva de variação da tensão crítica.

No caso presente, as partículas finas (argila) e a água formam uma dispersão coloidal que constitui o líquido intersticial. Se a tensão crítica deste líquido intersticial é suficientemente grande, pode gerar uma resistência à sedimentação das partículas. Considerando duas partículas grossas cercadas de líquido, admite-se que:

- o líquido intersticial comporta-se como sólido elástico quando o estado de tensão não excede a tensão crítica de plasticidade;
- a tensão crítica de plasticidade pode ser descrita por um parâmetro de Von Mises;
- a tensão crítica de plasticidade e a tensão crítica são equivalentes.

Dessa forma, a resistência à compressão que o líquido sofre é  $2\tau_c$ .

Trata-se aqui de uma extensão da discussão do filme de líquido intersticial entre as duas partículas sujeitas a uma força devida ao peso submerso das

partículas ( $\rho' = \rho_s - \rho_f$ ). Pode-se, dessa forma, definir uma razão (N) entre a força de gravidade ( $4\rho'gd/3$ ) e a resistência do líquido ( $2\tau_c$ ), a saber:

$$N = \frac{2\rho'gd}{3\tau_c}, \text{ sendo:} \quad (11)$$

d: diâmetro dos grãos inertes.

Quando  $N < 1$ , o líquido intersticial opõe-se à sedimentação das partículas, conseqüentemente, as partículas não podem entrar em contato direto.

Contrariamente, quando  $N > 1$ , os contatos diretos podem formar-se por sedimentação.

## MATERIAIS E MÉTODOS

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



Figura 4 - Reômetro R/S e Banho térmico

A partir de uma investigação reológica para misturas compostas de água+argila (Santos, 2003; Kiryu, 2005), o modelo reológico proposto é o de Herschel-Bulkley. No caso em estudo, não há necessidade de procurar a curva que mais se adapta aos dados experimentais, pois o software Rheo2000, usado em conjunto com o reômetro, fornece a calibração dos parâmetros de Herschel-Bulkley, assim como as curvas de fluxo para cada material ensaiado. O Reômetro utilizado é o R/S Rheometer (“shear stress x shear rate”) fabricado pela “Brookfield

Engineering Laboratories”, equipado com banho térmico (Figura 4). A geometria escolhida é do tipo que utiliza cilindros coaxiais conforme mostra a Figura 5.

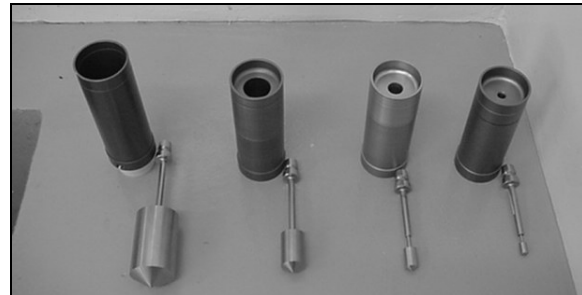


Figura 5 - “Spindles” utilizados

## Procedimento Experimental

Uma amostra de água+argila caulínica é preparada com certa concentração em volume de argila no volume total da mistura. Nessa mistura de água+argila com concentração em volume constante é adicionada uma determinada fração de sólidos inertes (areia fina) e, assim, é determinada uma nova concentração em volume dos sólidos inertes no volume total da mistura (considerando agora o volume líquido como sendo o volume de certa quantidade de água+argila e o volume de sólidos como sendo o volume de grãos inertes).

Após o seu preparo, a amostra deve ficar em repouso por 7 dias antes do ensaio reométrico (esse tempo foi estimado de modo que todos os grãos de argila estivessem totalmente saturados). Em seguida são realizados testes de cisalhamento simples no reômetro R/S da Brookfield. Devido à alta sensibilidade do reômetro, deve-se fazer a calibração semanalmente, de modo a se ter sempre dados confiáveis.

Com os dados dos ensaios reométricos e a ajuda do software Rheo2000 é possível determinar os parâmetros reométricos da curva de escoamento que melhor se adapta ao comportamento da mistura.

## Materiais utilizados

### Caracterização físico – química da argila utilizada

As características físico-químicas da argila utilizada fornecidas pela empresa mineradora foram controladas, a posteriori, pela equipe de solos do

Laboratório de Mecânica dos Solos da Feis/Unesp, e podem ser listadas como se segue:

**Procedência:** Minasolo Comércio e Representações LTDA;

**Extração:** Minas Gerais – Brasil;

**Minério:** Argila caulínica (não expansiva);

**Umidade:** 0,90 a 1,00;

**Outras Características:**

- Massa específica real (seca): 1,5 a 1,65 g/cm<sup>3</sup>
- Massa específica aparente moída: 0,5 a 0,65 g/cm<sup>3</sup> (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;

### Areia

A areia utilizada para confecção das amostras é a mesma destinada a construção de filtros de poços de bombeamento. Esse material é previamente queimado para garantir que partículas orgânicas sejam eliminadas e, posteriormente, peneirada para garantir que cada amostra possua apenas o diâmetro médio desejado. Para os ensaios foram utilizadas partículas com diâmetro médio constante, para isso utilizou-se apenas areia retida nas peneiras 200, 140, 100 e 60 (numeração segundo a NBR-5734/80) com diâmetros equivalentes de 0,075; 0,105; 0,15 e 0,25mm, respectivamente. A massa específica seca da areia utilizada é de 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os ensaios foram realizados no reômetro (R/S) utilizando a técnica de variação da tensão e medição das respectivas taxas de deformação. Pode-se optar, também, pela variação da taxa de deformação e medição da tensão, no entanto, concluiu-se ser de bom alvitre manter um mesmo protocolo e regularidade nos ensaios.

### Análise da variação do comportamento reológico em função da adição de inertes (grãos de areia)

Neste item serão descritos os ensaios realizados com misturas de água+argila+areia fina. Fo-

ram realizados ensaios reométricos para determinar a influência da granulometria dos inertes (areia fina) no comportamento da mistura.

Utilizaram-se quatro tipos de areias como inertes, que compunham as misturas, a saber: areia retida na peneira 100 e que passa na peneira 60 (diâmetro médio dos grãos de 0,150 mm); areia retida na peneira 140 e que passa na peneira 100 (diâmetro médio dos grãos de 0,105 mm) e areia retida na peneira 200 e que passa na peneira 140 (diâmetro médio dos grãos de 0,075 mm). Também foram realizados ensaios com uma composição de areia com os 3 diâmetros descritos anteriormente na mesma proporção.

Foram realizados ensaios com 2 tipos de amostras: amostras com a matriz intersticial constante, com concentração em volume de 15% de água+argila e com as seguintes adições de areia: 5%, 10%, 15% e 20% (essas proporções de areia foram repetidas para todos os 4 tipos de granulometria descritos anteriormente). A segunda amostra era composta de uma concentração em volume constante de 20%, apenas variando a fração de inertes nos sólidos totais.

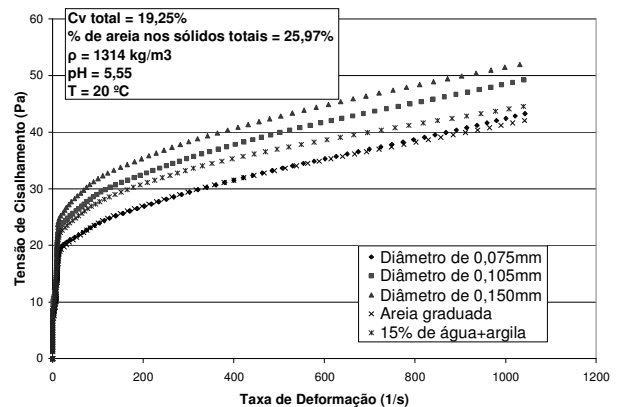


Figura 6 - Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com Cv=15% e adição de 5% de areia de várias granulometrias

### Ensaio com misturas de água+argila+areia fina com mistura intersticial constante de Cv=15%

Os resultados obtidos nos ensaios reométricos das amostras com mistura intersticial de água+argila de 15% e adições de 5%, 10%, 15% e 20% de areia no volume total de mistura podem ser vistos nas Figuras 6, 7, 8 e 9.

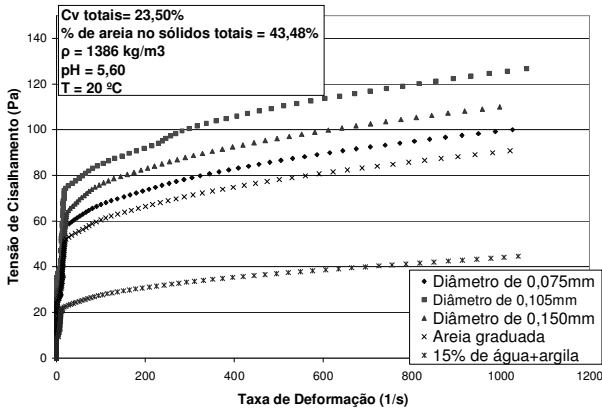


Figura 7 - Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com Cv=15% e adição de 10% de areia de várias granulometrias

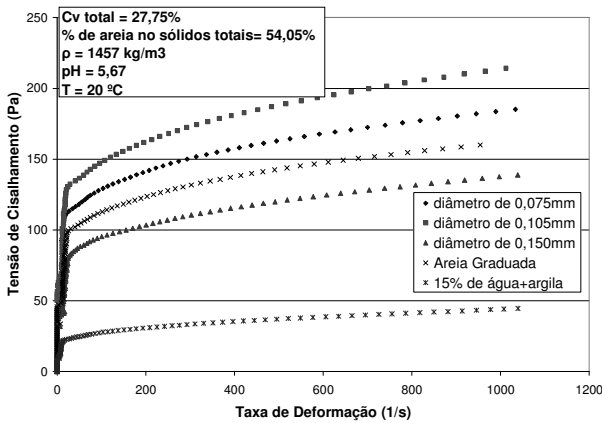


Figura 8 - Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com Cv=15% e adição de 15% de areia de várias granulometrias

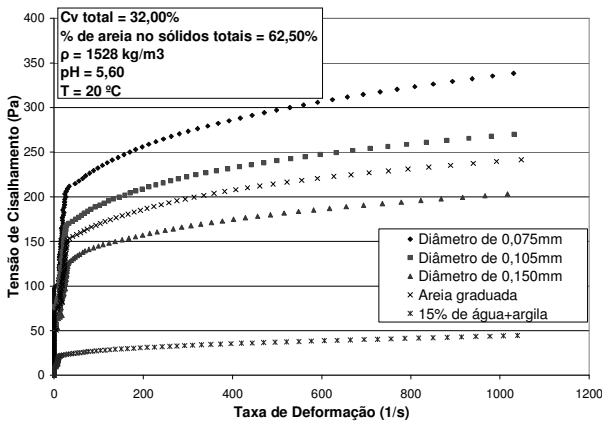


Figura 9 - Comparação dos reogramas de misturas com fluido intersticial de água+argila com Cv=15% e adição de 20% de areia de várias granulometrias

Ajustando cada uma das curvas apresentadas anteriormente ao modelo de Herschel-Bulkley ( $\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n$ ) foram obtidos os parâmetros reológicos apresentados na Tabela 1.

Observando as Figuras 6 a 9, pode-se notar que a influência da granulometria no comportamento das misturas depende da fração de areia adicionada. Na Figura 6 (amostra com 5% de areia no volume total da mistura) a maior tensão final alcançada corresponde a areia retida na peneira 100, seguida da peneira 140, com a peneira 200 sobreposta a areia graduada.

Já na Figura 9 (amostra com 20% de areia no volume total da mistura) a maior tensão alcançada corresponde a areia retida na peneira 200, seguida da peneira 140, peneira 100, sendo que a amostra composta de areia graduada está entre as amostras de diâmetros correspondentes as peneiras 140 e 200.

Tabela 1 - Ajuste dos parâmetros reológicos ao modelo de Herschel-Bulkley

Tipo de areia	Adição de areia	$\tau_c$ (Pa)	K (Pas <sup>n</sup> )	n
Peneira 100	5%	19,74	1,60	0,43
	10%	42,38	7,97	0,31
	15%	61,06	6,40	0,36
	20%	80,00	17,65	0,28
Peneira 140	5%	17,15	1,61	0,43
	10%	60,97	3,31	0,43
	15%	99,77	8,67	0,37
	20%	111,30	20,12	0,30
Peneira 200	5%	16,72	0,49	0,57
	10%	47,50	2,74	0,43
	15%	77,31	12,12	0,31
	20%	131,18	25,23	0,30
Areia Graduada	5%	16,48	0,62	0,53
	10%	42,49	2,48	0,43
	15%	76,25	6,69	0,37
	20%	105,88	14,63	0,32
Sem areia	-	17,00	1,43	0,42

Como pode ser notado ocorre uma inversão da influência da granulometria para os 2 casos citados anteriormente (na adição de 5% de areia o maior diâmetro causa o maior acréscimo de tensão na mistura, entretanto na adição de 20% de areia o maior acréscimo é provocado pela areia de menor diâmetro). Analisando ainda as Figuras 7 e 8, pode-



se notar uma inversão da influência da granulometria. Na Figura 7 (amostra com 10% de areia) a maior tensão é provocada pela areia retida na peneira 140, seguida da peneira 100 e peneira 200, a areia graduada possui a menor tensão nesse caso. No caso subsequente (Figura 8 – mistura com 15% de areia) a maior tensão é provocada ainda pela areia retida na peneira 140, porém a próxima maior tensão é gerada pela amostra preparada com a areia retida na peneira 200.

Em todos os casos as amostras preparadas com a areia graduada mantiveram-se, aproximadamente, na mesma posição em relação às outras curvas. Esse fato indica que essa amostra apresenta propriedades médias (o que é coerente, pois possuía as mesmas frações de cada uma das granulometrias).

Este efeito de inversão de influência da granulometria pode ser justificado pelo seguinte fato: apesar dos volumes de areias serem os mesmos, as superfícies específicas de uma dada granulometria variaram.

É sabido da mecânica dos solos que entre duas amostras com os mesmos volumes de sólidos, aquela que apresentar menor diâmetro médio de seus grãos, possuirá maior superfície específica (a superfície específica de uma amostra granular corresponde a soma das áreas de cada um dos grãos, esse valor pode ser determinado a partir de testes de percolação).

A partir desta consideração, ter-se-ia a seguinte explicação: na amostra com adição de 5% de areia, a quantidade de sólidos inertes inserido na mistura é muito baixa, dessa forma, a influência da área específica dos grãos não é significativa no comportamento global da mistura. Desse modo, o que seria significativo é o diâmetro dos grãos.

Os grãos de diâmetros maiores poderiam criar mais dificuldades para o escoamento do fluido intersticial que os grãos de diâmetros menores, fazendo com que fosse necessária uma maior tensão, no caso dos grãos maiores, para imprimir uma mesma taxa de deformação que as amostras compostas de grãos menores.

Já para o caso de adição de 20% de areia no volume total da mistura, o volume de sólidos inertes seria muito alto, assim, o efeito da área superficial dos grãos inertes seria muito mais significativo que o efeito da resistência do diâmetro do grão no escoamento.

Devido à grande área superficial das partículas de diâmetros menores, parte da água que compõe a mistura água+argila (fluido intersticial) deve ser disponibilizada para “molhar” as partículas inertes. Dessa forma, a mistura intersticial se tornaria

mais concentrada aumentando a dificuldade de escoamento para misturas compostas de grãos de diâmetros menores.

Esse tipo de comportamento já foi percebido por esta equipe de pesquisa durante ensaios com pastas de água+cimento, o cimento utilizado foi um novo tipo que está sendo comercializado no Brasil (o micro-cimento MC20 e MC30 da Holcim).

Além disso, durante os ensaios foi possível ser constatado visualmente que as amostras de 15% de fluido intersticial, com 20% de areia retida na peneira 200, eram mais viscosas que as amostras compostas com 20% de areia retida na peneira 100. Foram também realizados ensaios de repetição (foram feitas e ensaiadas novas amostras com as mesmas composições para descartar os resultados enganosos ou precipitados).

As amostras correspondentes às misturas com fluido intersticial de água+argila com concentração em volume ( $C_v$ ) de 15% e adições de 10% e 15% de areia no volume intersticial seriam casos intermediários, nos quais os dois efeitos (área superficial e diâmetro dos grãos) influenciariam na curva de escoamento.

Na Figura 10 são apresentadas as variações de tensões críticas em função da granulometria para cada uma das adições de areia. Note que em todos os casos (menos na adição de 5% de areia) ocorreu um aumento da tensão crítica se comparada com amostra de água+argila sem adição de areia. Para o caso de adição de 5% de areia, a tensão crítica é maior, para a areia retida na peneira 200 e areia graduada, porém a tensão final alcançada é praticamente a mesma para os três casos (areia retida na peneira 200, areia graduada e amostra sem areia).

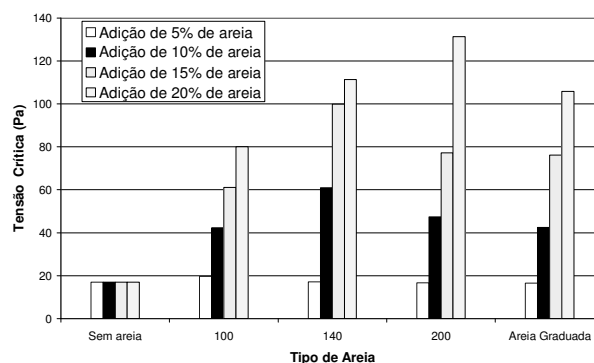
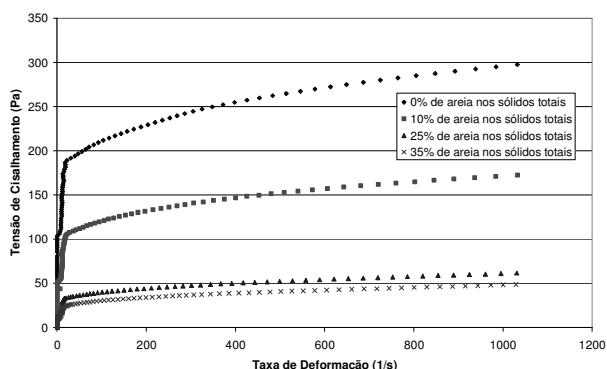


Figura 10 - Variação da tensão crítica em função da granulometria, adição de 5%, 10%, 15% e 20% de areia

**Ensaio com misturas de água+argila+areia fina com concentração de sólidos totais constante de 20%**

Para analisar a influência da variação da fração de sólidos inertes no volume total de sólidos foram realizados ensaios com amostras compostas de 20% de sólidos totais, variando-se a porcentagem de areia, nos sólidos totais, de 0 a 35%.

Em uma primeira análise, os dados obtidos dos ensaios com concentração de sólidos totais constantes (20%) na mistura podem ser vistos na Figura 11. Nesta primeira etapa de análise dos dados foram comparados os ensaios com adição de areia para uma mesma granulometria.



**Figura 11 - Ensaio com concentração de sólidos totais de 20% - adição de areia retida na peneira 100**

Para garantir que não houvesse a sedimentação do material inerte durante os testes reométricos, foram calculados os valores de N (segundo a Equação 11), o que assegurou que a mistura ensaiada era homogênea. As misturas foram preparadas com areia retida na peneira 100, areia retida na peneira 200 e areia graduada.

**Tabela 2 - Ajuste dos parâmetros reológicos ao modelo de Herschel-Bulkley para misturas formadas de água+argila+areia fina retida na peneira 100**

Parâmetros de Herschel-Bulkley		
$\tau_c$ (Pa)	k (Pas <sup>n</sup> )	n
148,50	11,42	0,37
76,39	9,53	0,33
23,47	3,11	0,36
18,52	1,88	0,40

Os dados referentes ao ajuste das curvas, com concentração de sólidos totais de 20% no volume total da mistura, ao modelo reológico de Herschel-Bulkley, podem ser vistos na Tabela 2.

Como já era esperado, o aumento da fração inerte (areia) nos sólidos totais causa uma diminuição da tensão crítica. Pode-se concluir que apenas ocorre o aumento das propriedades das curvas de escoamento (tensões críticas, tensões máximas, etc.), pela adição de sólidos inertes, quando não ocorrer a diminuição da concentração dos sólidos ativos na mistura intersticial.

Esta conclusão vem ao encontro de uma conclusão anterior, onde o comportamento global de uma mistura composta de água+colóides+sólidos inertes depende do comportamento da matriz fluida (água+colóides) que lubrifica os grãos inertes.

**Análise da influência dos parâmetros geométricos dos grãos no comportamento reológico das suspensões**

Analisando o efeito do aumento da tensão crítica de uma suspensão formada de água+argila, em função da adição de sólidos inertes conclui-se que esse aumento é provocado pela fração de sólidos inertes adicionados à mistura não-newtoniana e ao diâmetro dos grãos. A partir da observação dos resultados reométricos descritos anteriormente pôde-se concluir que o diâmetro dos grãos afetava a tensão crítica das amostras de duas formas distintas:

- A primeira forma foi uma influência direta: o aumento do diâmetro dos grãos em uma mistura provoca uma maior dificuldade no escoamento, dessa forma, misturas compostas de partículas inertes de diâmetros maiores devem possuir maiores tensões críticas. Entretanto o crescimento da tensão crítica em função do aumento do diâmetro dos grãos é uma função monotônica, ou seja, após certo diâmetro, o aumento do tamanho do grão influencia muito pouco na tensão crítica;
- O segundo tipo de influência é indireto: para duas amostras de grãos com a mesma massa (considerando uma massa específica dos sólidos constante), a maior área superficial dos grãos estará associada à amostra com menor diâmetro dos grãos.

Como foi comentado nos itens anteriores, adição de frações de sólidos inertes com grande área superficial diminui a água livre da mistura intersticial.

al que forma o fluido intersticial (responsável por lubrificar os contatos entre os grãos). Com isso a tensão crítica da amostra tende a aumentar. Entretanto, o efeito da área superficial dos sólidos sobre a tensão crítica não é monotônico e, segundo análises dos dados reométricos, deve ser proporcional a um coeficiente  $\alpha$  ( $1 < \alpha < 2$ ).

Seguindo essas considerações, pôde-se criar um número adimensional que acrescentasse, à tensão crítica do fluido intersticial, um valor que fosse função da concentração em volume dos sólidos no volume total da mistura, do diâmetro grãos e do volume dos sólidos totais da mistura. O número adimensional proposto pelos autores deste artigo seria dado pela Equação 12.

$$X = 1 + \frac{\phi^{0,5} C_{V_{inerte}} A_s^{1,25}}{KV_{st}}, \text{ sendo} \quad (12)$$

- $\phi$ : diâmetro médio dos sólidos inertes (cm);
- $C_{V_{inerte}}$ : concentração em volume dos sólidos inertes no volume total da mistura;
- $A_s$ : área superficial dos sólidos inertes (cm<sup>2</sup>);
- $K$ : constante numérica igual a 37;
- $V_{st}$ : volume total dos sólidos da mistura (cm<sup>3</sup>).

O número adimensional  $X$  foi plotado contra uma tensão crítica adimensional dada  $\tau_c/\tau_{ci}$ , sendo  $\tau_c$  a tensão crítica da mistura composta de água+argila+areia fina e  $\tau_{ci}$ , a tensão crítica da matriz fluida composta de água+argila.

Com o gráfico da tensão crítica adimensional contra o número adimensional  $X$ , dado pela Equação 12 (Figura 12), pôde-se determinar uma curva de ajuste da forma  $\frac{\tau_c}{\tau_{ci}} = X^{1,3314}$

Assim, substituindo o valor de  $X$ , tem-se:

$$\tau_c = \tau_{ci} \left( 1 + \frac{\phi^{0,5} C_{V_{inerte}} A_s^{1,25}}{KV_{st}} \right)^{1,3314} \quad (13)$$

A variação entre as tensões críticas experimentais e estimadas pode ser vista na Figura 13.

Além disso, para comparação de resultados, foram plotados dados experimentais de tensões de misturas compostas por água+argila e água+argila+areia fina obtidos por Kiryu (2003, 2005) junto com os dados experimentais de Ancy (2002), já apresentados na Figura 3. Essa comparação de dados pode ser observada na Figura 14.

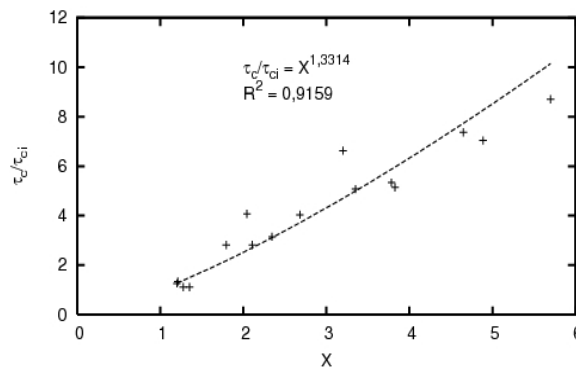


Figura 12 - Curva de ajuste para os dados de Tensão Crítica Adimensional x Número adimensional  $X$

Pode-se notar que os valores de tensão crítica encontrados por Kiryu (2005) seguem a mesma tendência dos valores de tensão crítica encontrados por Ancy (2002) para misturas compostas de água+argila. Entretanto vale ressaltar que as misturas compostas de água+argila+inertes de Ancy (2002) possuem uma lacuna (Ancy possui dados de tensão crítica para uma mistura de  $C_v=25\%$  e após esse ponto para uma mistura de  $C_v=45\%$ , deixando uma lacuna de pontos para valores com  $25\% < C_v < 45\%$ ). A tensão crítica correspondente a  $C_v=25\%$  estimada por Ancy (2002) está dentro da nuvem de pontos encontrada por Kiryu (2005). Além disso, os outros valores encontrados por Kiryu (2005) estão dentro da faixa de  $C_v$  não coberta por Ancy (2002), assim não se pode afirmar que o ajuste dos pontos realizado por Ancy (2002) não ajusta os pontos encontrados por Kiryu (2005), apenas que ajusta uma faixa diferente de  $C_v$ .

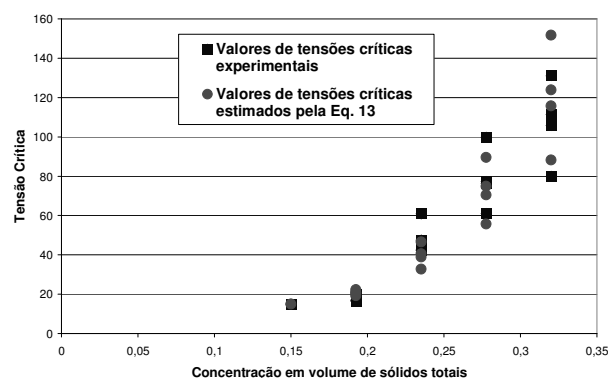


Figura 13 - Comparação entre dados de tensões críticas experimentais e estimados pela Equação 13

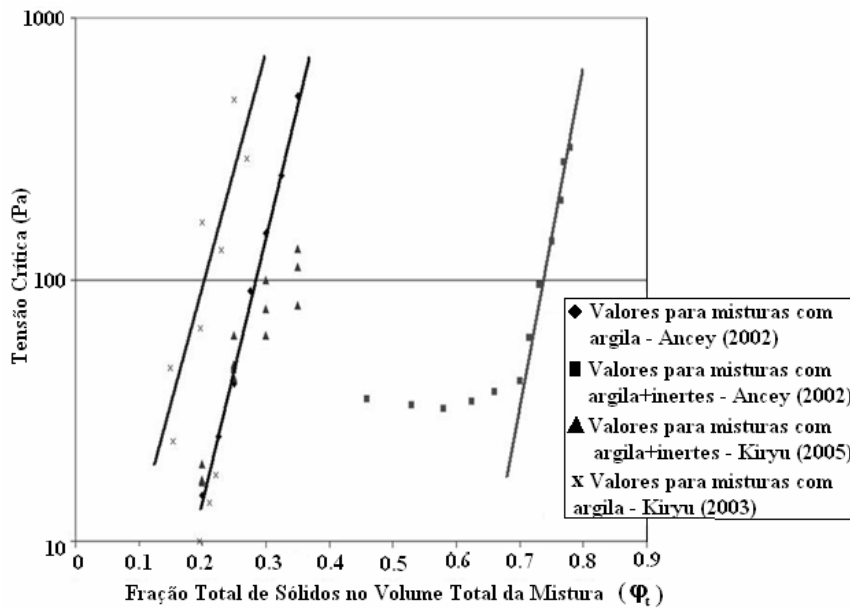


Figura 14 - Comparação entre dados de tensão crítica de Ancey (2002) e Kiryu (2003, 2005)

## CONCLUSÕES

Com base nas análises dos resultados apresentados neste trabalho, pôde-se concluir que a tensão crítica de fluidos viscoplásticos constituídos de água+argila é modificada em função da adição de partículas inertes na mistura original. Os resultados experimentais foram concludentes. Não obstante, a análise é complexa e exige protocolos e cuidados experimentais rigorosos.

A variação do comportamento da tensão crítica depende de parâmetros físicos dos grãos, tais como diâmetro, área superficial e massa específica. Pôde-se, também observar que a influência do diâmetro dos grãos sobre a tensão crítica é mais discreta, ao passo que a influência da área superficial mostrou-se mais marcante, com evolução exponencial.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo financiamento da bolsa de mestrado (proc. 03/10686-5).

## REFERÊNCIAS

ANCEY, C. "Rhéophysique des suspensions concentrées Application à la géophysique alpine" Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.

BINGHAM, E. C., "Fluidity and Plasticity", McGraw-Hill, New York, 1920.

CASSON, N., "A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type", In: Rheology of disperse systems. C.C. Mill (Ed.), Pergamon Press, London, 1959.

HERSCHEL, W. H. e BULKLEY, R., "Über die viskosität und Elastizität von Solen. Am. Soc. Test. Mat., 26, 621-633.

KAPUR, P.C., Scales, P.J., Boger, B.V. and Healy, T.W., "A theoretical framework for the yield stress of suspensions loaded with size distributed particles", American Institute of Chemical Engineering Journal, v.43, 1997.

KIRYU, H.S. Investigação de um modelo reológico para misturas água+debritos a partir das propriedades mecânicas dos compostos água+argila+sólidos inertes. 2005. Relatório Final FAPESP – proc. 03/10686-5.

KRIEGER, I.M. and DOUGHERTY, T.J. 1959. A mechanism for non-Newtonian flow in suspension of rigid spheres. Trans. Soc. Rheol. III, 137-152.

MACIEL, G. F. e SANTOS, F. L. Evolução de frentes de lama em canais - Parte II: determinação da lei de atrito em canal. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 08, n. 04, p. 107-113, 2003.

OSWALD, W. "Über die Geschwindigkeitsfunktion der viskosität disperser systeme - 1925.

SANTOS, F. L., "Estudo teórico-experimental em via de determinação de lei de atrito em escoamentos de flui-

- dos hiperconcentrados”. Dissertação de Mestrado - PPGEC - FEIS/UNESP, p. 150, 2003.
- SANTOS, F. L, MACIEL, G. F., “Evolução de frentes de lama em canais - Parte I: Uma proposta reológica de Herschel-Bulkley a partir de uma base experimentalista física”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 08, n. 04, p. 95-105, 2003.
- WILDEMUTH, C.R. AND WILLIAMS, M.C., “A new interpretation of viscosity and yieldstress in dense slurries: coal and other irregular particles”, *Rheologica Acta*, v.24, 1985.
- ZHOU, Z., SOLOMON, M.J., SCALES, P.J. AND BOGER, D.V., “The yield stress of concentrated flocculated suspensions of size distributed particles”, *Journal of Rheology*, V.43, 1999.

***Analysis of Yield Stress of Mixtures With Non-Newtonian Interstitial Fluid and Coarse Material***

**ABSTRACT**

*The purpose of this work is to define a better rheological model that explains the flux curves behavior (shear stress x shear rate) of mixtures composed by water+kaolinitic clay+fine sand and also to analyze the yield stress variation as a function of the coarse material characteristics (diameter, specific mass and superficial area). This kind of mixture is, in general, representative of some natural and industrial flows. The rheometric tests were performed using a Brookfield Rheometer R/S, equipped with thermal bath that keeps the sample temperature constant during the tests. The coaxial cylinder geometry was chosen for the simple shear tests. From the rheometric results, the Herschel-Bulkley model adjusted well to the rheological analyses and the yield stress variation would be a function of the grain superficial area, the grain diameter and of the coarse solids concentration in the total volume of the mixture. These results are in accordance with the Krieger and Dougherty (1959) study. A particular effect observed during the tests was the influence of coarse solids i.e. yield stress increase is influenced by grain diameter with a monotonous behavior and by the superficial area with an exponential behavior.*

*Key-words: Non-Newtonian fluids, yield stress, coarse material, Herschel-Bulkley rheological model, muds.*