



## ANÁLISE REOLOGICA NA ELABORAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO PARA CIMENTAÇÃO EM POÇOS DE PETRÓLEO

Jose de Arimateia Almeida e Silva<sup>1</sup>; Sanclero de Melo Nunes<sup>1</sup>; Frankslale Meira<sup>2</sup> ;

<sup>1</sup> Instituto Federal da Paraíba (IFPB) - Campus Campina Grande [campus\\_cg@ifpb.edu.br](mailto:campus_cg@ifpb.edu.br); <sup>2</sup> Instituto Federal da Paraíba (IFPB) - Campus Campina Grande - Coordenação de Construção de Edifícios e-mail: [frankslale.meira@ifpb.edu.br](mailto:frankslale.meira@ifpb.edu.br)

### RESUMO

Com grande valorização das empresas extrativistas de petróleo no cenário mundial, e sua busca por melhores resultados em suas explorações. Gerou, cada vez mais, a necessidade de pesquisas relacionadas com a reologia, a fim de maximizar a extração e prevenir mais danos ambientais. Com isto em mente, tornam-se necessárias pesquisas reológicas relacionadas com um grau de grandeza aparente, uma vez que a partir deles, somos capazes de caracterizar o cimento, principalmente, aspectos, para além do desenvolvimento de novas técnicas e os materiais com mais alto desempenho a partir das verdadeiras necessidades do mercado. Demonstrando a importância de estudos reológicos. Portanto, este trabalho tem como objetivo avaliar o estudo da reologia e dinâmica rotacional em cimentar poços de petróleo. Por conseguinte, é importante melhorar a homogeneização da pasta de cimento e suspensões cerâmicas, porque perdem estas características quando submetido ao transporte, mistura e bombeamento. Foi realizado a adição de minerais e aditivos na pasta para o poço de petróleo para cimentação, em conformidade com os regulamentos em vigor, com a implementação de modelos de poder de Bingham e dinâmico ou oscilatório. Onde foi avaliada por meio de testes a determinação do potencial de velocidade e ensaios mecânicos de compressão zeta e tração. Mostrando que a influência principal é a temperatura em que esta exposta a pasta ao lado de seu método de aplicação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pasta de Cimento, Estudos Reológicos, Reologia, Poços Petrolíferos.

### 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo identificar os modelos e estudos voltados aos parâmetros reológicos encontrados na pasta cimentícia para poços petrolíferos e constatar os mais adequados para que, detenham resultados mais precisos.

Com a grande demanda das empresas extrativista de petróleo, acerca de melhorias nas suas operações. Tem gerado, cada vez mais, a necessidade de

pesquisas relacionada à reologia, com intuito de maximizar a extração e evitar maiores danos ambientais. A reologia é de fundamental importância, pois permite saber as propriedades do fluido e como este vai se comportar durante o bombeio da pasta [10] (Souza et al, 2011). Resultando a importância do estudo de alternativas que visem, além de contribuir para a diminuição do desperdício e a melhoria das técnicas, o aproveitamento dos recursos ambientais disponíveis,



possibilitando o desenvolvimento de um ambiente saudável, economicamente viável e ecologicamente correto.

Logo o estudo reológico qualificará a pasta. Já que, de acordo com [10] Souza et al (2011) é possível identificar a caracterização de um determinado fluido. Um fluido é como uma substância que se deforma continuamente quando é submetido um esforço constante, sem se importar quão pequeno seja este esforço. De todas as propriedades dos fluidos, a viscosidade requer uma maior atenção no estudo do fluxo de um fluido [4] (Lopes, 2010).

Outra propriedade dos fluidos pode ser descritas por campos envolvendo velocidade, matematicamente define-se velocidade num fluido como a taxa de deslocamento médio das moléculas contidas num volume elementar ao quadrado [9] (Pordeus, 2011).

$$\vec{V} = \frac{d\vec{x}}{dt} \Leftrightarrow V_i = \frac{dx_i}{dt} = (V_1, V_2, V_3)$$

Eq. [1]

(Pordeus, 2011)

Onde:

V=Velocidade

Dx=Deslocamento

DT=Tempo

Tensão de cisalhamento é a força por unidade de área cisalhante, necessária para manter o escoamento do fluido. A resistência ao escoamento é quem solicita esta tensão, que pode ser expressa por:

$$\tau = \frac{F}{S}$$

Eq. [2]

$\tau$  Onde F é a força aplicada na direção do escoamento e S é a da superfície exposta ao cisalhamento [5] (Machado, 2002).

A força dividida pela área na qual ela age é chamada tensão. O vetor força dividida pela área é o vetor de tensão, a componente normal da força dividida pela área é a tensão normal e a força tangencial dividida pela área é a tensão de cisalhamento [9] (Pordeus, 2011).

$$\tau = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{F_t}{A}$$

Eq. [3]

(Pordeus, 2011)

Onde:

= Tensão de cisalhamento

$F_t$  = Componente tangencial

A =Área

A taxa de cisalhamento definido como o deslocamento relativo das partículas ou planos de fluido, está relacionada com a distância entre eles. A taxa cisalhamento é também denominada de grau de deformação ou gradiente de velocidade e pode também ser definida através de uma expressão matemática que relacione a diferença das velocidades entre duas partículas ou planos vizinhos como a distância entre eles [5] (Machado, 2002), como a seguir:

$$\gamma = \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

Eq. [4]



Onde  $\Delta v$  é a diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes e  $\Delta y$  é a distância entre elas [5] (Machado, 2002).

[2] Oliveira (2014) estabelece que a viscosidade trata-se da propriedade pela qual um fluido oferece resistência ao corte, como também, sendo a medida da resistência do fluido à fluência quando sobre ele atua uma força exterior como, por exemplo, um diferencial de pressão ou gravidade. Destaca que as maiorias dos líquidos viscosos fluem facilmente quando as suas temperaturas aumentam e que o comportamento de um fluido depende da variação de temperatura, pressão ou de tensão quando varia a temperatura, pressão ou tensão dependendo do tipo de fluido. Segue abaixo a equação da lei de viscosidade de Newton:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy} \text{ ou } \tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Eq. [5]

[2] (Oliveira, 2014)

Onde:

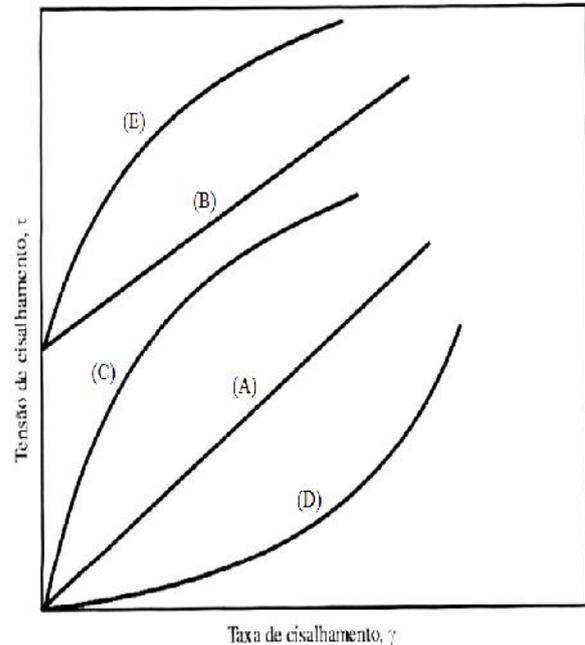
F, - Tensão de corte do fluido A.

$\mu$  - Viscosidade absoluta, ou coeficiente de viscosidade (o seu recíproco,  $1/\mu$  é a fluidez).

$\frac{dv}{dy}$  - Taxa de deformação, taxa de corte.

Tendo em vista, os diversos comportamentos apresentados pelos fluidos, segundo [5] Machado (2002) os fluidos podem ser classificados pelo seu comportamento de fluxo ou reológico, que deve observar a relação em tensão de cisalhamento e o

gradiente de velocidade assim como experimentalmente.



**Figura 1** – Curvas de fluxo de alguns tipos de fluidos: (A) newtoniano; (B) binghamiano ou plástico ideal; (C) pseudoplástico; (D) dilatante; e (E) pseudoplástico com limite de escoamento. [5] (Machado, 2002).

Fluidos nos quais a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação são não newtonianos [3] (Fox et al., 2006).

Estes fluidos são classificados conforme o aspecto da curva de fluxo e correlação com alguma equação ou modelo matemático [5] (Machado, 2002). E de acordo com [7] Miranda (2008), os modelos são: Newtoniano, Bingham, Potência, Herschel-Bulkley.

De acordo com o [11] Acervo da Universidade de Santa Catarina, nas aplicações destes fluidos podem-se ser adequadas ao modelo exponencial que é escoamento unidimensional é escrito abaixo:



$$\tau_{xy} = k \left( \frac{du}{dy} \right)^n$$

Eq. [6]

Onde:

k = Índice de consistência;

n = Índice de comportamento do escoamento;

**Pseudoplásticos:** No dicionário online Priberam da língua Portuguesa, Pseudo significa (grego *pseûdos*, - e os, mentira, falsidade), logo, falso plástico.

Tecnicamente, portanto, os fluidos de 'afinam' quando a vazão (ou taxa de cisalhamento) aumenta, são denominados de pseudoplásticos [5] (Machado, 2002).

Fazendo referência a [3] Fox et al. (2006), a viscosidade aparente decresce conforme a taxa de deformação cresce, portanto  $n < 1$ . Porém, se a viscosidade aparente cresce junto com a taxa de deformação ( $n > 1$ ) é um dilatante. Eles diminuem a viscosidade quando sujeito a tensões de cisalhamento, porém sobre pressão tornam-se sólidos.



**Figura 2** – Representação do fluido dilatante.

Segundo o Acervo da [11] UFSC, eles podem ser representados pelo modelo de Ostwald-de-Waele ou Modelo Power Law. Abaixo a equação:

$$\tau_{xy} = -k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \frac{du_x}{dy} \quad \text{Eq. [7]}$$

Onde:

K = Índice de consistência do fluido;

n = declividade da curva;



No qual, pode ser encontrada a mesma equação, mas da forma em que:

$$-k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} = \eta.$$

Segundo [3] Fox et al. (2006), os que dependem de uma tensão inicial de cisalhamento são os Plásticos de Bingham que possuem uma relação linear da tensão de cisalhamento com a taxa de deformação, bem parecido com o newtoniano, diferindo apenas, que é necessária uma tensão inicial de cisalhamento.

Já o Hershel-Bulkley segundo [3] Fox et al. (2006), é similar ao Bingham, todavia, não possui uma relação linear, e por isso, depende do expoente adimensional de cada fluido (n). Abaixo veremos o modelo usado, de acordo com [3] Fox et al. (2006).

$$\tau_{yx} = \pm \tau_0 - \mu_0 \frac{du_x}{dy}, \text{ para}$$

$$|\tau_{yx}| > |\tau_0|$$

Eq. [8]

$$\frac{du_x}{dy} = 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0|$$

Onde:

$\tau_0$   $\approx$  tensão de cisalhamento inicial;

$\mu_0$   $\approx$  constante análoga à viscosidade de fluido newtoniano;

+/- = Quando a tensão for negativa o sinal da tensão inicial de cisalhamento também será, o mesmo ocorre quando positivo.

## 1.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PARA POÇOS PETROLÍFEROS

A cimentação de poços de petróleo consiste de uma etapa crítica durante a fase de perfuração de um poço, pois problemas durante a operação de bombeio da pasta e um preenchimento incompleto do espaço anular, entre o revestimento e a parede do poço, podem causar a perda do poço [7] (Miranda, 2008).

Uma pasta de cimento eficiente deve apresentar viscosidade (água/cimento) baixa, dessa forma facilita sua penetração nos anulares ou nos canais, oferecendo boas condições de bombeamento. Para isso, estão sendo utilizadas novas tecnologias na formulação de pastas de cimento com o objetivo de aperfeiçoar as propriedades mecânicas e a resistência química. Essa tecnologia é utilizada para aumentar a compacidade de partículas sólidas da pasta. Fazendo isso os vazios da pasta serão preenchidos com sólidos de granulométrica adequada.

Conforme [4] Lopes (2010) os instrumentos comuns capazes de medir as propriedades reológicas podem ser divididos em dois grupos, os tipos rotacionais ou tubo. Sendo os rotacionais: Placa Paralela ou placa/placa, Cone e Placa, Cilindro Concêntrico, Agitador. E os tubos: Capilar de vidro, Capilar de Alta Pressão e Tubo.

Os reômetros com geometrias do tipo cilindros coaxiais são reômetros rotacionais que promovem a deformação por cisalhamento do material por meio da rotação de um elemento sensor no interior ou exterior da amostra. No caso de materiais muito viscosos, devem ser empregados outros tipos de geometrias, como a de cone e placa ou placas



paralelas, por exemplo, [8] (Nascimento, 2007).

De acordo com [10] Souza (2011) o modelo mais usado para determinar o comportamento reológico de pasta de cimento é o Bingham, cujo deve ter a taxa de deformação e de tensão de cisalhamento, sendo possível por meio de um viscosímetro. Atualmente os viscosímetros rotacionais são os mais utilizados para determinação de propriedades reológicas de pastas de cimento, sendo os coaxiais cilíndricos e os de cone-placa os mais comuns. Como as pastas de cimento são sistemas dispersos, os viscosímetros coaxiais são preferidos em relação aos do tipo cone-placa, porque dessa forma evita-se fricção entre as partículas e as condições de fluxo são mais próximas aos fluxos viscométricos [7] (Miranda, 1983).

Todavia, segundo [8] Nascimento (2007) os viscosímetros possuem uma grande desvantagem sob os reômetros, já que os mesmos possuem alta sensibilidade; bom domínio da temperatura e da taxa de cisalhamento; permite diversos métodos de análises da tensão cisalhamento e taxa de cisalhamento; o uso de testes dinâmicos oscilatórios. Sob o ponto de vista de [6] MARTINS (2011) os ensaios oscilatórios são preponderantes para conhecer as propriedades visco elásticas da pasta de cimento.

A metodologia retém o conhecimento extenso como um meio de vários investigadores centraram-se no estudo da reologia da calda de cimento para poços de petróleo, as propriedades dos fluidos, reômetros, modelos reológicos, caracterização das pastas de cimento para poços de petróleo e ensaios reológicos. Na coleta dessa informação, uma filtragem inicial foi realizada, cujos critérios foram encontrados trabalhos científicos teses, artigos, dissertações, técnicas e apostilas de Tcc. Posteriormente, a procurar um filamento e uma associação entre as referências a fim de centralizar o estudo reológico da pasta de cimento em poços de petróleo.

Por conseguinte, é importante melhorar a homogeneização da pasta de cimento e suspensões cerâmicas, porque eles perdem estas características quando submetido ao transporte, mistura e bombeamento. Realizou-se a adição de minerais e aditivos na pasta para o poço de petróleo de cimentação, de acordo com as regras em vigor, com a aplicação dos modelos de potência e Bingham e a dinâmica ou oscilatório. Ele foi avaliado por meio de testes desenvolvidores e reológicos, ensaio de rotação a determinação do potencial zeta e ensaios mecânicos de compressão e tração.

## 2. METODOLOGIA



Fig. 3 Reômetro placa/placa testes iniciais.

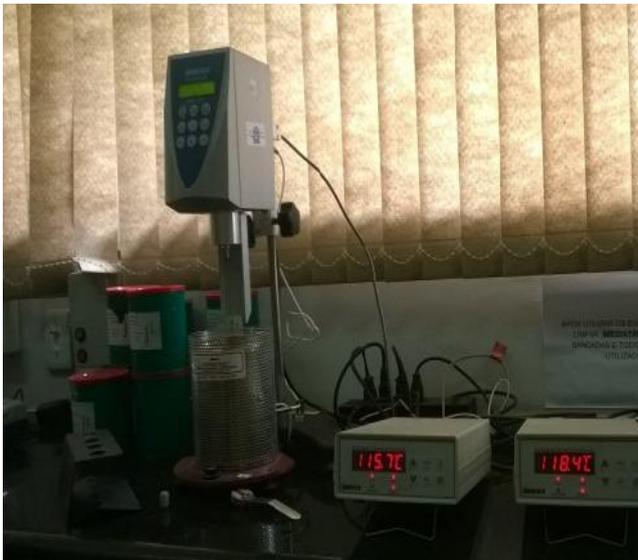


Fig. 6 Viscosímetro ensaios fluido expansível.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados permitem concluir que, o comportamento reológico notando a importância do estudo de rotação e pastas dinâmicas de cimento para os poços de petróleo. Já que, o fluido é determinado para fins amplamente arriscados, pois como afirmou [1] Costa et al. (2000) deficiências na cimentação primária em um poço pode gerar diversos pontos negativos em custos. Tendo o conhecimento reológico do fluido, pode-se

identificar o número de Reynolds, resistência à sedimentação. Mas, para os casos dos fluidos não-newtonianos é necessário as modelagens matemáticas para as conclusões dos parâmetros reológicos.

A ver, que os viscosímetros, em alguns casos, são instrumentos que limitam melhores estudos, pois não são precisos comparados aos reômetros e não permite varias modelagens durante a análise. Todavia, pode-se notar que não se deve usar qualquer reômetro para fins de um determinado estudo, é necessário o conhecimento do reômetro ideal, da geometria para o fluido, acessórios complementares necessários ao equipamento e dos ensaios mais adequados. Porém, esses equipamentos possuem um custo caro, o que leva às pesquisas a alguns graus de dificuldades.

### 4. CONCLUSÕES

Para desenvolver modelos para estudos capazes de caracterizar as propriedades reológicas encontrados na pasta de cimento para poços de petróleo e encontrar o mais adequado e apresentar as principais conclusões, análises de equipamentos de laboratório, será necessário que o reômetro. Como não há atualmente uma ampla vasto de vários reômetros e acessórios complementares. É necessário um conhecimento prévio de líquido para utilizar o equipamento mais adequado, porque deste modo se obter resultados ainda mais exatos. Além disso, porque as variações de pressão fornecidas pelas diferentes forças aplicadas, e alterações na temperatura do fluido para causar diferentes características reológicas.



Como deve ser simulados ensaios para encaminhar os resultados para procurar obter, por exemplo, se a viscosidade desejada for encontrada ou a tensão mínima para iniciar o fluxo de um fluxo de ensaio deve ser aplicada.

É importante para melhorar a homogeneização da pasta de cimento e suspensões cerâmicas, porque eles perdem estas características quando sujeita a transporte, mistura e bombeamento. A adição de minerais e aditivos na pasta para o poço de petróleo de cimentação, de acordo com as regras em vigor, com a implementação de modelos de poder e de Bingham e dinâmica ou oscilatório. Avaliada por meio de testes de desenvolvedores e testes reológicos de rotação para determinar o potencial zeta superior a 30 mV sendo o mesmo estável e teste de compressão mecânica e tração. No entanto, mostra que a influência principal é a temperatura em que esta exposta à pasta ao lado de seu método de aplicação.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro disponibilizado pelo CNPq, a parceria da UFCG, UFPB e o IFPB – Campus Campina Grande por possibilitar o desenvolvimento da pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] COSTA, André; et al. **Completação de Poços**. UFRJ, 2000. (Apostila).

[2] OLIVEIRA, Marcelo. **Fluidos – Propriedades**. Estv, 2014. (Apostila). Disponível em:  
<[http://www.estgv.ipv.pt/paginaspersonais/jqomarclo/OT/DEMad\\_OT\\_Fluidos.pdf](http://www.estgv.ipv.pt/paginaspersonais/jqomarclo/OT/DEMad_OT_Fluidos.pdf)>. Acesso em: 08 de Abril 2014.

[3] FOX, Robert W, 1934 - **Introdução da Mecânica dos fluidos**. Robert W. Fox, Alan T. McDonald, Philip J. Pritchard;

tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury, Geraldo Augusto Campolina França, - Rio de Janeiro: LTC, 2006. 6ª edição.

[4] LOPES, Milena S. **Caracterizações especiais de combustíveis fóssil e renovável**. 2010. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -- Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

[5] MACHADO, José Carlos V. **Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras 2002.

[6] MARTINS, Roberta Moraes. **Reologia de pasta de cimento com aditivos superplastificante e modificador de viscosidade**. 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Materiais para Engenharia) – Instituto de ciências exatas, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG..

[7] MIRANDA, Cristiane Richard. **Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo - processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química**. 2008. 290f. Dissertação (Doutorado em Ciência de Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

[8] NASCIMENTO, Christine R. **Ensaio em reômetro rotacional tipo cilindros coaxiais**. UFRJ, 2007. (Apostila).

[9] PORDEUS, Roberto. V. **Fenômenos de transporte mecânica dos fluidos**. Ufersa, 2011. Disponível em:<  
[http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/111/arquivos/CAP\\_1\\_DEFINICOES.pdf](http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/111/arquivos/CAP_1_DEFINICOES.pdf)>. Acesso em: 08 de Abril 2014. (Apostila).

[10] SOUZA, Bruno Bolsanelo; BORGES, Sergio P. de M. Souza. **Influência dos**



**cloretos de sódio e de potássio nas propriedades plástica e no comportamento mecânico de pastas para cimentação de poços de petróleo.** 2011. 155 f. Monografia (apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

[11] UFSC, Acervo digital da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), **Apostila de Reologia de Fluidos.** Disponível em:  
<<http://enq.ufsc.br/disci/eqa5415/REOLOGIA%20DE%20FLUIDOS%20-%20apostila.pdf>>. Acesso em 08 de Abril 2014.