

TIXOTROPIA E PASTAS DE CIMENTO: UMA INTRODUÇÃO

Paulo Henrique de Lima Silva – Faculdade Internacional da Paraíba – FPB
(phlimasilva@gmail.com)

RESUMO

O cimento é um material muito utilizado pelo homem com diversas finalidades. Com a evolução da indústria do petróleo em águas profundas, esse material tornou-se imprescindível para o sucesso da produção. A sua utilização em larga escala trouxe muitos novos desafios. Apesar de ser um material bastante conhecido pelo homem, existem processos microscópicos que interferem no seu comportamento mecânico como um todo que precisam ser melhor compreendidos, ainda mais num cenário de altas pressões e temperaturas como em um poço de petróleo no leito marinho. A compreensão de seu comportamento envolve uma visão interdisciplinar que permeia os conhecimentos de física, química, termodinâmica, mecânica dos fluidos, reologia, entre outros. A reologia, ciência relativamente nova, veio ajudar a desvendar parte do comportamento mecânico desse material em determinadas aplicações. Com o auxílio de modelos reológicos foi possível ter uma noção de como a pasta de cimento vai se comportar em cada etapa do processo de cimentação desse poço de petróleo. Uma propriedade inerente ao campo da reologia é a tixotropia, que faz parte da pasta de cimento durante o processo de injeção desta no poço de petróleo. Assim, este artigo se propõe a mostrar de maneira sucinta, clara e objetiva, por meio de uma revisão bibliográfica, como a reologia e a tixotropia estão relacionadas com o processo de cimentação de poços de petróleo.

Palavras-chave: Cimento. Reologia. Tixotropia.

ABSTRACT

Cement is a material widely used by man for various purposes. With the evolution of the oil industry in deep waters, this material has become essential for the success of the production. Its large-scale use has brought many new challenges. Although man-made, there are microscopic processes that interfere with their mechanical behavior as a whole that need to be better understood, especially in a scenario of high pressures and temperatures such as in an oil well on the seabed. Understanding their behavior involves an interdisciplinary view that permeates the knowledge of physics, chemistry, thermodynamics, fluid mechanics, rheology, among others. Rheology, a relatively new science, came to help unravel some of the mechanical behavior of this material in certain applications. With the aid of rheological models it was possible to have a notion of how the cement paste will behave at each stage of the cementing process of this oil well. One inherent property in the field of rheology is thixotropy, which is part of the cement paste during the process of injection of this into the oil well. Thus, this article proposes to show in a biased, clear and objective way, through a bibliographical review, as rheology and thixotropy are related to the process of cementing oil wells.

Keywords: Cement. Rheology. Thixotropy.

1 INTRODUÇÃO

O cimento é o material de construção muito importante que, após a mistura com água, cria uma liga com uma capacidade para endurecer tanto ao ar quanto sob a água. Edifícios, construções técnicas e industriais, instalações de infraestrutura, barragens, estradas ou pontes que nos cercam não teriam sido criados sem cimento (HEWLETT, 2004; IGLINSKI e BUCZKOWSKI, 2017). Na indústria do petróleo a importância do processo de cimentação de poços é crucial, pois o cimento é utilizado para dar integridade ao poço de petróleo, isolar as zonas de produção e fixar a tubulação que irá revestir o poço de petróleo (THOMAS, 2004).

O cimento é produzido essencialmente a partir de uma mistura de calcário e argila. O cimento Portland, fundamental para as construções anteriormente citadas, resulta da trituração de um componente denominado clínquer, obtido pelo cozimento até a fusão da mistura de calcário e argila dosada e homogeneizada convenientemente, à qual é adicionada uma pequena quantidade de sulfato de cálcio (gesso) (THOMAS, 2004 *apud* RODRIGUES, 2014). O cimento Portland apresenta uma propriedade aglomerante que é ativada somente quando este é misturado à água, assim, uma reação química denominada de hidratação ocorre durante sua mistura. Quando um cimento anidro é misturado com água, acontece uma transformação que resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento (TAYLOR, 1990). Segundo Metha e Monteiro (2008), a pega pode ser definida como o início da solidificação de uma mistura fresca de concreto. São manifestações físicas das reações progressivas de hidratação do cimento.

O cimento é o principal constituinte das pastas para cimentação de poços de petróleo. O Instituto de Petróleo Americano, em inglês, *American Petroleum Institute* (API), classificou os cimentos Portland em classes, que são designadas pelas letras de A a J. As classes mais utilizadas atualmente são a G e H, pois são compatíveis com os diversos aditivos usados praticamente em todas as condições previstas para os cimentos das demais classes (OLIVEIRA *et al.* 2016).

A pasta de cimento para poços de petróleo é desenvolvida para suportar condições severas de temperatura e pressão além da possível presença de fluidos corrosivos. Ao longo de todo o poço a temperatura sofre grande variação, existindo zonas onde a temperatura está abaixo de 10°C ou acima de 300°C em outras zonas. A pressão também sofre grande variação, podendo chegar até 30.000 psi em poços mais profundos (RODRIGUES, 2014).

Segundo Bosma *et al.* (1999), além de resistir a altas pressões e temperaturas variadas, a pasta de cimento deve ser projetada para que no estado fresco apresente densidade, viscosidade, perda de fluido e outras propriedades de acordo com as necessidades do poço. Após endurecer, a pasta deve resistir aos ataques químicos do ambiente, apresentar propriedades mecânicas que suportem as tensões geradas ao longo de todas as operações.

Segundo Mitchell e Miska (2006), ao determinar as características e desempenho de uma pasta, são recomendados além dos testes envolvendo temperatura e pressão, alguns testes adicionais que envolvem: resistência a compressão e tração, reologia e durabilidade.

Este estudo de revisão vai focar nos aspectos reológicos, tão importantes e muitas vezes deixados em segundo plano por não serem totalmente compreendidos pelos condutores de testes reológicos nas empresas ligadas ao processo de cimentação, ou pela grande dificuldade de obter dados confiáveis para uma aplicação em um modelo reológico que contemple todas as necessidades citadas anteriormente. Portanto, a reologia será apresentada de uma forma objetiva e simples para o entendimento do comportamento mecânico de pastas de cimento utilizadas nos processos de cimentação de poços de petróleo.

2 METODOLOGIA

Este estudo constitui uma revisão bibliográfica de caráter analítico e sistemático a respeito da aplicação dos conceitos de reologia em pastas de cimentos utilizadas em poços de petróleo. A parte do levantamento bibliográfico foi executado a partir da literatura existente em livros e artigos científicos. Segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica deve ser desenvolvida com base em material já elaborado, composto sobretudo de livros e artigos científicos. A preparação e manutenção de uma revisão sistemática da literatura envolve algumas etapas, são elas: (1) elaboração de uma questão de pesquisa orientadora da estratégia de busca; (2) variedade de fontes para a localização dos estudos; (3) definição de critérios de inclusão e exclusão; e (4) avaliação da qualidade metodológica das produções recuperadas (NORONHA; FERREIRA, 2000).

A coleta de dados foi realizada no período de 2 de fevereiro de 2019 a 7 de junho de 2019. Utilizou-se para a pesquisa as bases de dados da *ScienceDirect*® (Elsevier), Sistema Maxwell (PUC – Rio), *Scientific Eletronic Library Online* (SCIELO) e páginas com acesso aberto (*open access*). Inicialmente, a busca de artigos científicos que se adequassem aos critérios de inclusão se deu nas bases da *ScienceDirect*® e SCIELO. Posteriormente foi utilizada a plataforma da PUC – Rio, Sistema Maxwell, pelo fato do Departamento de Engenharia Mecânica possuir um grande conhecimento na área de reologia.

Após os artigos serem selecionados, foram executados os seguintes passos: leitura exploratória; leitura seletiva e escolha do material que se adequam aos objetivos e tema deste estudo; leitura analítica e análise dos textos, finalizando com a realização de leitura interpretativa e redação.

Assim, o estudo foi montado com a estrutura a seguir: Introdução, Fundamentação Teórica, Tixotropia em Pastas de Cimento, Considerações Finais e Referências.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

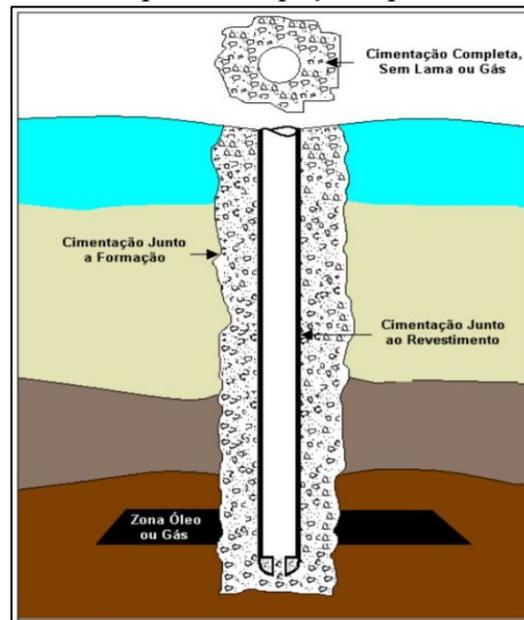
3.1 CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Para a produção de petróleo é fundamental a construção de poços. Durante a perfuração de um poço existem operações que desempenham um importante papel, começando pela perfuração em si, passando por alargamento, repassamento, conexões e manobras e terminando com o revestimento do poço e a cimentação do anular. A cimentação primária faz parte da etapa de perfuração de um poço de petróleo e consiste no preenchimento do espaço anular formado entre o revestimento e a parede do poço. Segundo Rodrigues (2014, p. 7):

A partir da configuração do anular é determinado o regime de bombeamento e a característica reológica das pastas. A densidade do fluido de perfuração indica a densidade mínima e compatível da pasta de cimento utilizada e as condições do poço vão determinar os tipos de aditivos que deverão ser utilizados. Os dados de temperatura e pressão do poço completam as informações necessárias para a realização do projeto de pasta mais adequado para cada situação.

A cimentação é realizada com o objetivo de isolar completa e permanentemente as zonas produtoras localizadas atrás do revestimento (NELSON, 1990). Sem isolamento completo dessas zonas produtoras, o poço pode nunca atingir seu potencial de produção total, atrasando receitas e provocando prejuízos irreparáveis. A Figura 1 mostra uma pasta de cimento ocupando todo o espaço anular entre o revestimento do poço e a formação geológica ao redor do poço de petróleo.

Figura 15 - Exemplo de um poço de petróleo cimentado



Fonte: Pereira, *et al.*, (2014).

Na indústria do petróleo existem dois tipos principais de cimentação: a cimentação primária e a cimentação secundária. A cimentação primária ocorre logo após a descida da cada coluna de revestimento, e sua qualidade é avaliada, geralmente, por meio de perfis acústicos que correm por dentro do revestimento (THOMAS, 2004).

A cimentação secundária ocorre quando existem falhas na cimentação primária. As causas mais comuns de falhas na cimentação são: densidade incorreta da pasta, fluxo de gás ascendente, entrada de gás na coluna de pasta, contração volumétrica e aderência insuficiente podem ser responsáveis por erros de cimentação (NELSON, 1990). Os defeitos do processo de cimentação aparecem através dos canais em torno do revestimento no espaço anular. Falhas de cimentação podem ocasionar em problemas de segurança, econômicos e até mesmo ambientais. (MARTINEZ; MACDONALD, 1980).

O sucesso da cimentação de poços depende de diversos parâmetros, entre os quais, avaliação da taxa bombeamento da pasta de cimento; determinação da relação pressão-profundidade durante e após a injeção da pasta de cimento; estimativa da taxa de bombeamento da pasta de cimento para uma remoção ótima do fluido de perfuração que se encontra no poço; remoção ótima do fluido de perfuração; previsão de migração de gás. (GUILLOT, 1990).

Os parâmetros mencionados anteriormente são dependentes da reologia. Portanto, o conhecimento das propriedades reológicas da pasta de cimento, nas condições de sua aplicação, fornece para o operador os dados necessários para o sucesso da operação. Ainda, conforme Guillot (1990), embora as pesquisas na área de reologia do cimento terem

avançado, um bom entendimento do comportamento mecânico da pasta de cimento ainda precisa ser obtido. Rodrigues (2018, p. 13), cita em seu estudo que:

Portanto, é importante dominar os processos que controlam a reologia do cimento, pois desta maneira os desafios enfrentados pela indústria do petróleo podem ser mitigados ou solucionados. O controle dos processos passa pela utilização de um modelo constitutivo adequado para pasta de cimento, pois tais modelos são empregados nas resoluções das equações de CFD (Computational Fluid Dynamics) e utilizados pelos softwares comerciais para estimativas de parâmetros da operação de cimentação. Sendo assim, a descrição reológica, por meio de um modelo constitutivo que envolva os processos complexos relacionados à reologia da pasta, contribuiria para o aprimoramento da operação de cimentação.

3.2 FLUIDO NÃO – NEWTONIANO

Segundo Fox *et al.* (2014, pág.5), “um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, não importando o quão pequeno seja o seu valor.”. Ainda, conforme Machado (2002), fluidos Newtonianos são fluidos que possuem uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, ou seja, em sistemas dentro do regime laminar apresentam valor de viscosidade apenas dependente da temperatura e pressão.

Essa relação linear pode ser matematicamente representada pela Lei da Viscosidade de Newton, descrita pela equação 1 (FOX *et al.*, 2014):

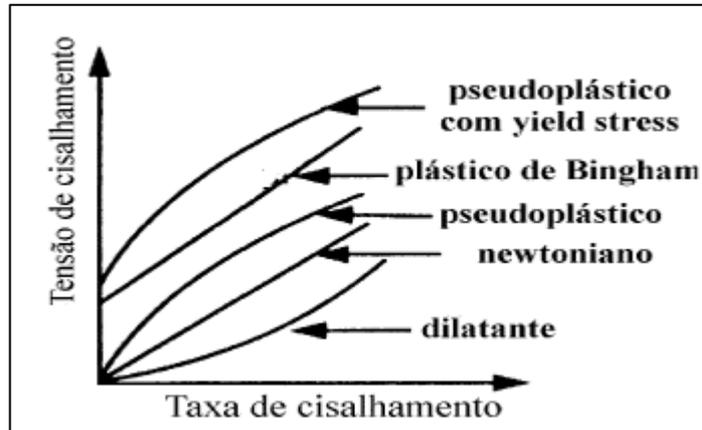
$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad \text{eq. (1)}$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento, η é a função viscosidade e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento.

Fluidos cujo comportamento mecânico não pode ser descrito pela Lei de Viscosidade de Newton, isto é, não apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, são denominados fluidos não-Newtonianos.

Há vários tipos de fluidos não-Newtonianos, estes podem ser classificados de acordo com as relações entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento atuante no fluido. Os fluidos não-Newtonianos mais simples têm como única diferença em relação ao fluido Newtoniano o fato da viscosidade depender da taxa de cisalhamento (Fig. 2).

Figura 16 - Classificação do comportamento reológico de diferentes tipos de fluidos



Fonte: Kawatra; Bakshi (1996).

Para alguns fluidos não-Newtonianos, os valores de viscosidade diminuem com o aumento da taxa de cisalhamento, para outros o contrário acontece, ou seja, a viscosidade aumenta com aumento da taxa de cisalhamento. No primeiro caso diz-se que o material possui comportamento pseudoplástico, enquanto no segundo, diz-se que o fluido possui comportamento dilatante (BARNES *et al.*, 2000). A expressão mais utilizada para modelar os fluidos pseudoplásticos e dilatantes é a do modelo de fluido de potência, desenvolvida empiricamente por Ostwald e Waele (BARNES *et al.*, 2000) abaixo descrita pela equação 2:

$$\eta(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{eq. (2)}$$

No modelo apresentado acima η é a função viscosidade, k é o índice de consistência, n é o índice de potência e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento.

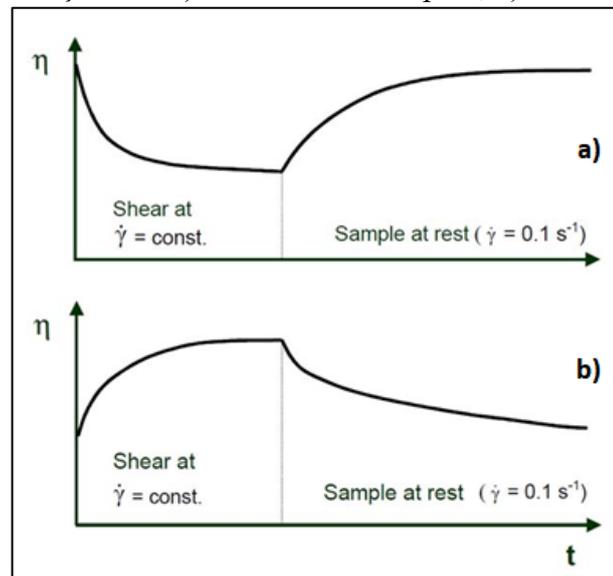
Outros tipos de fluidos não-Newtonianos puramente viscoso é o fluido viscoplástico. Tais fluidos necessitam de um valor inicial, uma tensão finita, conhecida como tensão limite de escoamento ou "yield stress", para que ocorra deformação, como por exemplo, os materiais denominados fluido de Bingham (BIRD, ARMSTRONG, HASSAGER, 1987). O modelo de Herschel-Bulkley descreve bem o comportamento dos fluidos viscoplásticos, é expresso por (BARNES *et al.*, 2000), na equação 3:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} \quad \text{se } \tau > \tau_0 \quad \text{eq. (3)}$$

No modelo apresentado acima η é a função viscosidade, τ é a tensão de cisalhamento, τ_0 é a tensão limite de escoamento, k é o índice de consistência, n é o índice power law e $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento. Abaixo da tensão limite a viscosidade do fluido é dita infinita.

Ainda existe fluidos onde a viscosidade muda com o tempo para uma mesma taxa de cisalhamento, tais fluidos são classificados em dois grupos, os tixotrópicos e os reopéticos. Para os fluidos tixotrópicos a viscosidade diminui com o tempo, quando submetidos a uma taxa de cisalhamento constante (MEWIS, 1979). Já os fluidos conhecidos como reopéticos, a viscosidade aumenta com o tempo, quando uma mesma taxa de cisalhamento é aplicada (BARNES, *et al.*, 2000).

Figura 17 - Diferença entre a) um fluido tixotrópico, b) um fluido reopético.



Fonte: Ascenso, 2016.

3.3 REOLOGIA E REOMETRIA

A reologia nasceu como uma ciência no começo do século XX e se dedica ao estudo das deformações e do escoamento dos materiais. A origem do nome vem da fusão dos radicais gregos *rheos* (fluir) e *logos* (estudo) (MACOSCO, 1994). A reologia estuda o modo como os materiais respondem à aplicação de uma tensão, com o intuito de prever a força necessária para causar uma deformação ou escoamento.

Na reologia tanto são estudados os materiais sólidos quanto os fluidos. Cada um desperta uma característica de interesse de estudo. Nos materiais sólidos a característica de maior interesse é a elasticidade, enquanto nos materiais fluidos a propriedade de maior interesse é a viscosidade. A viscosidade é a propriedade física de um fluido de opor-se ao fluxo induzido por uma tensão de cisalhamento aplicada sobre ele. A viscosidade de um material depende de diversos fatores, os quais se destacam: a natureza físico-química do material, a temperatura, a pressão, a taxa de cisalhamento e o tempo (CASTRO *et al.*, 2001).

O comportamento reológico dos materiais reais é muito variado e complexo. Um mesmo material pode ter diferentes comportamentos reológicos de acordo com as condições a que ele esteja submetido. Inúmeros modelos de comportamentos mecânicos foram propostos até hoje, cada um dentro de um limite e validade restritos (SILVA, 2014).

Segundo Macosco (1994), Reometria constitui um conjunto de técnicas experimentais empregadas na determinação das propriedades reológicas. Os experimentos reológicos são realizados por meio de instrumentos, os mais comuns são os viscosímetros e reômetros. Os viscosímetros são aparelhos que medem a viscosidade e fluxo dos fluidos. O reômetro é um instrumento laboratorial usado para medir as propriedades reológicas, a fim de determinar o comportamento mecânico de fluidos complexos, como por exemplo, nas propriedades: viscosidade, tensões cisalhantes e normais, deformações, módulos elástico e viscoso, etc.

Para determinação destes parâmetros, são realizados testes reológicos. Alguns destes testes reológicos são as curvas de fluxo e o teste de taxa de cisalhamento constante, ambos testes rotacionais. Outros testes reológicos existem com objetivos específicos para se determinar uma propriedade reológica de interesse, como os módulos elástico e viscoso, verificar a existência de tixotropia, entre outros.

A curva de fluxo fornece a relação entre a viscosidade do material em função da taxa de cisalhamento, em regime estacionário. Também é comum exibir a tensão cisalhante em função da taxa de cisalhamento. Se um fluido não-Newtoniano pode ser submetido a diversas condições de escoamento, como o caso das pastas de cimento injetadas em poços de petróleo, é importante identificar suas propriedades reológicas para condição.

O teste de taxa de cisalhamento constante, como o próprio nome indica, é um teste onde se fixa uma taxa de cisalhamento e o reômetro mede a resposta da amostra a essa condição imposta. Normalmente, acompanha-se a evolução da viscosidade ou tensão de cisalhamento ao longo do tempo. Esse teste tem como propósito descobrir em quanto o a amostra entra em regime permanente, ou seja, o tempo em que a viscosidade ou tensão de cisalhamento não varia. Além disso, quanto maior o valor taxa de cisalhamento colocada no teste mais rapidamente o regime permanente é alcançado.

4 TIXOTROPIA EM PASTAS DE CIMENTO

A tixotropia é um dos fenômenos presentes na área da reologia de fluidos complexos, como o petróleo, pastas de cimentos, géis, tintas, produtos farmacêuticos, cosméticos, etc. Oferta um amplo campo para seu estudo repleto de desafios.

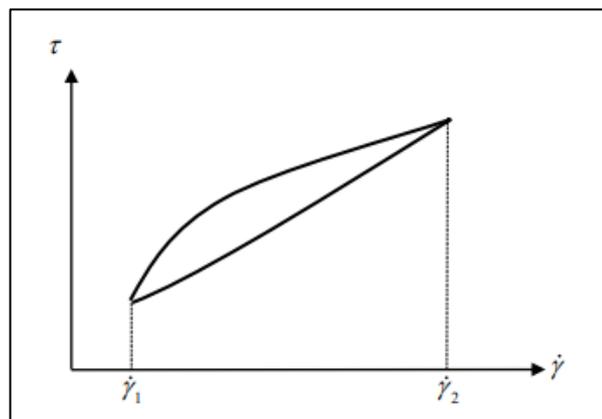
O termo tixotropia foi usado pela primeira vez por Peterfi (1927) *apud* Barnes (1997), o qual fez o primeiro trabalho a descrever este fenômeno por meio da verificação de que o protoplasma¹ se liquefaz por ação mecânica. O nome tixotropia é derivado das palavras gregas: *thixis* (agitação) e *trepo* (virar ou mudança).

Barnes *et al.* (1989), definem tixotropia como: “uma gradual diminuição da viscosidade quando o material é submetido a uma tensão de cisalhamento seguida de uma gradual recuperação da estrutura quando a tensão é removida”. Outros autores apresentam uma definição muito semelhante, mas com o mesmo sentido, ou seja, a tixotropia é caracterizada como “um decréscimo contínuo da viscosidade com o tempo quando uma amostra que tenha estado previamente em repouso é submetida ao escoamento e a subsequente recuperação da viscosidade no tempo quando o escoamento é descontinuado.” (MEWIS; WANGER, 2009).

O comportamento reológico complexo de materiais tixotrópicos pode ser entendido com base em sua microestrutura que também depende do histórico de cisalhamento. As partículas desses materiais frequentemente se atraem, mas de uma maneira relativamente fraca. Elas causarão a formação de agregados, ou flocos, que normalmente evoluem para uma rede de partículas que preenche o espaço. Como as ligações entre as partículas são fracas, uma força externa pode ocasionar a quebra desses agregados durante o fluxo imposto no material. O resultado é que, durante o fluxo, a rede se decompõe em agregados menores, que diminuem ainda mais quando com o aumento da taxa de cisalhamento (MEWIS e WANGER, 2009).

¹ Segundo o dicionário Michaelis UOL, protoplasma pode ser definido como: “Parte viva de uma célula, mistura coloidal complexa de proteínas, carboidratos, gorduras e compostos inorgânicos na água, geralmente organizada em organelas separadas; é o meio onde ocorre toda atividade metabólica.”.

Figura 18 - Curva de histerese para fluidos tixotrópicos



Fonte: Machado, 2002.

Cheng e Evans (1965), mostraram em seu trabalho uma das maneiras mais comuns de se evidenciar um comportamento tixotrópico, onde é utilizada a variação da viscosidade, sob uma taxa de cisalhamento constante. Espera-se que o fluido diminua seu valor de viscosidade ao longo do tempo desse teste. No entanto, outras maneiras de mensurar o fenômeno foram propostas. A técnica de histerese apresentada Green e Weltmann (1946) é uma delas. Durante o experimento o fluido é submetido a uma taxa de cisalhamento máxima e, em seguida, a uma redução da taxa de cisalhamento até zero. Essa variação (aumento/redução) pode ser realizada por meio de uma rampa linear contínua ou de uma série de pequenos degraus. O resultado esperado para um fluido newtoniano é que o caminho de ida e o de volta sejam idênticos, ou seja, duas curvas sobrepostas. Porém, para um fluido tixotrópico isso não ocorre. A Figura 4 mostra um comportamento típico de um fluido tixotrópico, onde é possível ver uma histerese. A área entre as curvas de ida e volta determina a magnitude da tixotropia.

A análise reológica de pastas de cimento busca, geralmente, estabelecer uma relação entre as propriedades da pasta de cimento com a característica do escoamento resultante. A compreensão do comportamento da tensão limite e viscosidade, associadas a temperatura e pressão são tópicos de interesse da área, incluindo a atuação dos mesmos durante o regime de cura da pasta de cimento (RODRIGUES, 2018).

O comportamento reológico associado à pasta de cimento é de extrema importância, pois as propriedades reológicas irão fornecer parâmetros a respeito do regime de fluxo e a perda de carga, porém a caracterização reológica é bastante difícil do ponto de vista experimental. As pastas de cimento são classificadas como suspensões e possuem muitas partículas, afetando as medidas reológicas (VLACHOU e PIAU, 2000). A reometria rotacional é a mais comumente utilizada na determinação das propriedades reológicas das pastas de cimento, como a viscosidade e a tensão limite de escoamento.

Para Castro e Pandolfelli (2009), as pastas de cimento apresentam-se como uma suspensão, ou seja, possuem uma grande concentração de sólidos tendo forte influência sobre a viscosidade, dentre os quais se destacam: a concentração volumétrica de sólidos, as características do meio líquido (viscosidade, densidade, etc.), a temperatura, as características físicas das partículas (distribuição granulométrica, densidade, formato, área superficial específica, rugosidade, etc.) e o tipo de interação entre partículas.

Segundo Rodrigues (2018), os testes reológicos envolvendo suspensões exigem uma boa dispersão da amostra durante sua preparação com o objetivo de torná-la mais homogênea possível, alguns aditivos podem empregados com este objetivo (plastificantes ou

superplastificantes), contudo outras técnicas podem ser aplicadas separadamente ou em conjunto com aditivos.

De acordo com Jarny *et al.* (2008), a tixotropia é um fenômeno presente em pastas de cimento, mas numa pequena escala de tempo, em escalas de tempo maiores a irreversibilidade assume um papel de maior relevância. Otsubo *et al.* (1980), mostraram em seu trabalho que as propriedades das pastas de cimentos frescas evoluem com o tempo.

Banfill e Saunders (1981) e Lapasin *et al.* (1983), mostraram que a viscosidade diminui com o tempo e depois aumenta, passando por um valor mínimo. No primeiro momento o regime de floculação é tixotrópico. Depois de alcançado um equilíbrio, a hidratação começa a prevalecer e a viscosidade começa a aumentar. Essa segunda parte do processo é irreversível.

Roussel *et al.* (2012), citam em seu estudo que a irreversibilidade está relacionada a dois processos diferentes: a criação de uma rede devido a interação coloidal e “pontes” de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) interligando as partículas de cimento. Ainda, segundo os autores, após o contato do cimento com a água, ou seja, o processo de hidratação, as primeiras pontes começam a se formar discretamente, podendo ser quebradas por uma força externa (cisalhamento, por exemplo) e apresentar um comportamento reversível. Posteriormente as interações coloidais formam uma rede rígida somando-se a nucleação para aumentar a rigidez da pasta. Todo este processo faz com que a seja necessária uma quantidade maior de energia para quebrar a estrutura, caso contrário o processo mantém sua irreversibilidade se contrapondo a tixotropia, com aumento contínuo da viscosidade.

Em suma, as pastas de cimento apresentam um comportamento complexo e diverso, pois durante sua evolução no tempo, diversos fenômenos induzem processos diferentes. Alguns relacionados à química do processo, outros relacionados à um comportamento microestrutural de aglomeração e quebra de estruturas particuladas. Ambos os efeitos interferem no comportamento mecânico macroscópico do material, sendo necessário uma ampla análise para um entendimento mais completo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da reologia é fundamental para o sucesso da produção de um campo de petróleo. A produção de petróleo brasileira é basicamente proveniente de campos marítimos, onde o processo de perfuração de poços atinge um grau de importância muito alto, não apenas pelos custos envolvidos, mas, basicamente, definindo o potencial de produção. A cimentação de um poço faz parte desse contexto, logo o comportamento mecânico da pasta de cimento utilizada é um dado crítico no projeto do poço de petróleo. Essas pastas de cimento apresentam um comportamento extremamente complexo, com muitas mudanças no decorrer do seu bombeamento da superfície da sonda ao poço. Todo o sucesso futuro vai depender dessa etapa de cimentação.

Assim, análises dos mais diversos tipos são necessárias para que se tenha segurança acerca do projeto de cimentação. A reologia vem complementar esse conhecimento, trazendo à tona conceitos até então desconhecidos. A tixotropia é um desses conceitos e está muito presente nas pastas de cimento de poços de petróleo, podendo afetar diretamente no processo de cimentação primária e secundária. Saber definir até onde esse fenômeno pode estar presente é tarefa árdua, exige muitos testes laboratoriais, muito estudo e muita análise de dados, mas que vão proporcionar um aumento no sucesso do processo de cimentação.

Hoje em dia com os desafios ainda maiores da produção de petróleo em áreas do pré-sal, onde poços são extremamente longos e com muitas fases, os ensaios reológicos das pastas de cimento empregadas devem ser feitos com toda sua plenitude.

Portanto, esse artigo cumpre seu papel de dar uma visão inicial da relação entre estresse e os conceitos empregados na reologia e sua importância para a indústria do petróleo, bem como para o desenvolvimento teórico de estudantes das mais diversas áreas (engenharia, química, física, etc.).

REFERÊNCIAS

- BANFILL, P.F.G.; SAUNDERS, D.C. On the viscometric examination of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 11, 363-370. 1981.
- BARNES, H.A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K. **An introduction to rheology**. Elsevier, 1989.
- BARNES, H.A. Thixotropy-a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 70, n. 1, 1-33. 1997.
- BARNES, H. A. **A Handbook of Elementary Rheology**. Aberystwyth, University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2000.
- BIRD, R.B.; ARMSTRONG, R.C.; HASSAGER, O. **Dynamics of Polymeric Liquids, Fluid Mechanics**. 2. ed., New York: Wiley-Interscience, 1987.
- BOSMA, M., RAVI, K., VAN DRIEL, W., SCHREPPERS, G. J. **Design Approach to Sealant Selection for the Life of the Well**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 56536, Houston, Texas. 1999.
- CASTRO, A. G.; COVAS, J. A.; DIOGO, A. C. **Reologia e Suas Aplicações Industriais**. 1.ed. Ciência e Técnica (Instituto Piaget). Lisboa, Portugal. 462 p. 2001.
- CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, 18–32. 2009.
- CHENG, D.C.H.; EVANS, F. Phenomenological characterization of the rheological behaviour of inelastic reversible thixotropic and antithixotropic fluids. **British Journal of Applied Physics**, v. 16, n. 11, 1599 – 1617, 1965.
- FOX, ROBERT W. *et. al.* **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. Ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GREEN, H.; WELTMANN, R.N. Equations of thixotropic breakdown for rotational viscometer. **Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition**, v. 18, n. 3, 167- 172. 1946.
- GUILLOT, D. Rheology of well cement slurries. *In*: NELSON, E. B. (Ed.). **Well Cementing**. [S.I.]: Elsevier. (Developments in Petroleum Science, v. 28). 1990.
- HEWLETT, P.C. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 4. ed. Elsevier Science & Technology Books. 2004.

- IGLIŃSKI, B., BUCZKOWSKI, R. Development of cement industry in Poland – History, current state, ecological aspects. **A review. Journal of Cleaner Production**, v. 1, n. 41, 702–720. 2017.
- JARNY, S. *et al.* Modelling thixotropic behavior of fresh cement pastes from mri measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 5, p. 616 – 623. 2008.
- KAWATRA, S. K., BAKSHI, A. K. On-line measurement of viscosity and determination of flow types for mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**. v. 47. 275-283. 1996.
- LAPASIN, R.; PAPO, A.; RAJGELJ, S. Flow behavior of cement pastes: A comparison of different rheological instruments and techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 13, p. 349 – 356. 1983.
- MACHADO, J. C.V. **Reologia e escoamento de fluidos, ênfase na indústria do petróleo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2002.
- MACOSCO, C.W. **Rheology: principles, measurements and applications**. WILEY-VCH Publishers. New York. 568p. 1994.
- MARTINEZ, J.; MACDONALD, W. J. **Study do cementing practice applied to the shallow casing in offshore wells**. Mauer Engineering Inc., Huston, Texas, report. 1980.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008.
- MEWIS, J. Thixotropy - a general review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 6, n. 1, 1–20. 1979.
- MEWIS, J.; WAGNER, N.J. Thixotropy. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 147, 214-227. 2009.
- MITCHELL, R. F., MISKA S. Z. Fundamentals of Drilling Engineering. **SPE Textbook Series**, U.S.A. Society of Petroleum, v. 12, p. 63-56, 2010.
- NELSON, E. B. **Well Cementing. Schlumberger Educational Services**. Saint-Etienne, 1990.
- NORONHA, D.P.; FERREIRA, S.M.S.P. Revisões de Literatura. *In*: Campello BV, Kremer JM, org. **Fontes de informação para pesquisadores e profissionais**. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2000.
- OLIVEIRA, B. Í. F.; DANTAS, A. R. S.; COSTA, T. H. S.; LEMOS, C. M. Análise da resistência à compressão do cimento Portland classe g aditivado com bentonita. *In*: 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 06 a 10 de Novembro de 2016, **Anais [...]**. Natal, RN, Brasil.
- OTSUBO, Y.; MIYAI, S.; UMEYA, K. Time-dependent flow of cement pastes. pendent flow of cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 10, n. 5, 631–638, 1980.
- PETERFI, T. **Arch. Entwicklungmech**. Organ, v. 112, p. 680-677, 1927.

PORTAL DO PETROLEIRO. **Cimentação de poços de petróleo.** Disponível em: <https://portaldopetroleiro.com/post/179389030291/tipos-de-cimenta%C3%A7%C3%A3o>. Acessado em: 22 maio de 2019.

PEREIRA, C.E.G *et al.* AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA E DA VARIAÇÃO DA DENSIDADE EM PASTA DE CIMENTO DE ALTA COMPACIDADE. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 296-300, 2014.

RODRIGUES, C. F. P. **Caracterização Experimental de Pastas de Cimento Reforçadas com Fibras de PVA e Polipropileno.** Projeto de Graduação. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2014.

RODRIGUES, E. C. Um modelo constitutivo fenomenológico irreversível para descrição reológica de pastas de cimento. 2018. Tese (doutorado em de Engenharia Mecânica) PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2018.

ROUSSEL, N. *et al.* The origins of thixotropy of fresh cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, 148–157. 2012.

SILVA, P. H. L. **Caracterização de emulsões de água em óleo visando ao estudo da formação de hidratos.** Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica – CTC. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: PUC-Rio. 2014.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** Londres: Academic Press Limited, 1990.

THOMAS, J.E. **Fundamentos de engenharia do petróleo.** Editora Interciência. 2.ed. Petrobrás, Rio de Janeiro, 2004.

VLACHOU, V.; PIAU, J. M. A new tool for the rheometric study of oil well cement slurries and other settling suspensions. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, 1551-1557. 2000.