

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DESENVOLVIMENTO DE ADITIVOS ESTENDEDORES A PARTIR DE SUBPRODUTOS DE BIOCOMBUSTÍVEIS PARA APLICAÇÃO EM PASTA DE CIMENTO

AUTORES:

Nicolle Thaynna Alves Marreiros, Willame Gomes da Silva Batista, Dayanne Gabriella da Silva, José Valderisso Alfredo de Carvalho, Renata Martins Braga, Júlio Cezar De Oliveira Freitas.

INSTITUIÇÃO:

Instituto de química, Núcleo tecnológico em cimentação de poços de petrolíferos (NTCPP), Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte

DESENVOLVIMENTO DE ADITIVOS ESTENDEDORES A PARTIR DE SUBPRODUTOS DE BIOCOMBUSTÍVEIS PARA APLICAÇÃO EM PASTA DE CIMENTO

Resumo

Na cimentação de poços de petróleo, é necessário utilizar pastas de cimento de baixa densidade em zonas de baixo gradiente de fratura, pois a pressão hidrostática nessas áreas supera a pressão da formação geológica. Essas pastas, com densidade entre 12,5 e 14,0 lb/gal, ajudam a evitar a perda de circulação e o fraturamento de rochas frágeis. No entanto a resistência mecânica reduzida dessas pastas pode diminuir a capacidade de suportar pressões e temperaturas extremas, comprometendo a integridade estrutural do poço e aumentando o risco de fissuras e fraturas. Para enfrentar esse desafio, são usados materiais estendedores que preenchem espaços vazios e aumentam o rendimento da pasta de cimento, garantindo uma mistura homogênea e consistente. A baixa densidade é uma característica importante desses aditivos, e o uso de resíduos com essa propriedade é interessante para a indústria, pois pode mitigar impactos ambientais e agregar valor aos resíduos. O negro de fumo, também conhecido como *Carbon black* (CB), é um material de carbono com partículas em forma de microesferas ocas, produzido através da pirólise de combustíveis à base de carbono. Com baixa densidade e alta área superficial, o negro de fumo pode melhorar a trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade do cimento, preenchendo os vazios entre as partículas e agregados. Neste estudo foram formuladas cinco pastas leves com densidade de 14,0 lb/gal, variando diferentes concentrações do CB com o intuito de analisar os resultados de água livre e reologia. Em relação aos parâmetros reológicos, especificamente o limite de escoamento, observou-se que a viscosidade das pastas não aumentou tanto quanto o esperado para aplicações em poços de petróleo. Contudo, em comparação com a pasta padrão, verificou-se uma melhoria nos parâmetros reológicos, sendo possível identificar diferenças significativas no desempenho reológico da pasta testada.

Palavras-chave: Cimentação, Gradiente de fratura, Negro de fumo, Reologia, Água livre Resíduos, Sustentabilidade, Economia circular

Abstract

In oil well cementing, it is necessary to use low-density cement slurries in low fracture gradient zones, as the hydrostatic pressure in these areas exceeds the formation pressure. These slurries, with densities ranging from 12.5 to 14.0 lb/gal, help to prevent circulation loss and fracturing of fragile rocks but exhibit lower mechanical strength, which may compromise the long-term sealing and safety of the well. The reduced mechanical strength of these slurries can decrease their ability to withstand extreme pressures and temperatures, compromising the structural integrity of the well and increasing the risk of weaknesses, cracks, and fractures. To address this challenge, extenders are used to fill void spaces and increase the yield of the cement slurry, ensuring a homogeneous and consistent mixture. Low density is an important characteristic of these additives, and the use of waste materials with this property is beneficial to the industry, as it can mitigate environmental impacts and add value to waste materials. *Carbon black*, Carbon black is a carbon material with particles in the form of hollow microspheres, produced by the pyrolysis of carbon-based fuels. With low density and high surface area, *Carbon black* can improve the workability, mechanical strength, and durability of cement by filling the voids between particles and aggregates. In this study, five lightweight slurries with a density of 14.0 lb/gal were formulated, varying the concentrations of *Carbon black*, in order to analyze the results of free water and rheology. The study of free water yielded satisfactory results regarding the quantity of water within

the system. It was observed that as more CB was added, the amount of water in the system significantly decreased. Regarding the rheological parameters, specifically the yield stress, it was observed that the viscosity of the slurries did not increase as much as expected for oil well applications. However, compared to the standard slurry, an improvement in the rheological parameters was observed, with significant differences in the rheological performance of the tested slurry being identified.

Keywords: Carbon black. Tire rubber, Slurry cement, Sustainable

Introdução

A cimentação de poços de petróleo é uma etapa crucial na construção e manutenção de poços, influenciando diretamente a segurança e a eficiência das operações de extração de óleo e gás. As pastas de cimento utilizadas nessas operações devem possuir propriedades reológicas adequadas para evitar problemas como perda de circulação e fraturamento de formações rochosas frágeis (Nelson; Guillot, 2006). A utilização do resíduo *Carbon black* como aditivo na pasta de cimento é de grande importância devido às suas propriedades únicas e aos benefícios ambientais e econômicos que oferece. Primeiramente, o *Carbon black*, com suas partículas em forma de microesferas ocas, possui uma baixa densidade e uma alta área superficial específica, características que melhoram significativamente a trabalhabilidade, resistência mecânica e a durabilidade do cimento. Ao preencher os vazios entre as partículas de cimento e os agregados, o resíduo utilizado contribui para uma mistura mais homogênea e consistente, aumentando a capacidade da pasta de suportar pressões e temperaturas extremas, o que é essencial para a integridade estrutural dos poços de petróleo. Além disso, o uso de CB como aditivo valoriza um resíduo industrial, contribuindo para a redução do impacto ambiental associado ao descarte desse material.

A incorporação de resíduos em processos produtivos é uma estratégia alinhada com os princípios da economia circular, promovendo a sustentabilidade e a inovação tecnológica na indústria de construção e de petróleo e gás. Dessa forma, a utilização de *Carbon black* não apenas melhora as propriedades técnicas da pasta de cimento, mas também representa um avanço significativo em termos de gestão ambiental e responsabilidade social. Estudos anteriores têm explorado diversas formulações de pastas de cimento, mas muitos desafios persistem, especialmente em zonas de baixo gradiente de fratura, onde a pressão hidrostática pode superar a pressão de formação. Embora as pastas de baixa densidade sejam eficazes para mitigar esses problemas, elas frequentemente apresentam resistência mecânica reduzida, comprometendo a vedação e a segurança a longo prazo. A melhoria das propriedades reológicas e mecânicas das pastas de cimento é, portanto, uma área de grande interesse. O uso de aditivos como o *Carbon black* pode oferecer uma solução promissora, devido às suas propriedades únicas de baixa densidade e alta área superficial.

O objetivo principal deste estudo é avaliar o impacto da adição de CB nas propriedades reológicas e água livre das pastas de cimento de baixa densidade utilizadas na cimentação de poços de petróleo, buscando determinar a influência do resíduo na viscosidade e no limite de escoamento e avaliar a eficácia do pó de CB na redução da quantidade de água livre presente nas formulações contendo o resíduo.

Metodologia

As formulações das cinco pastas de cimento estudada nesse trabalho, são compostas por cimento classe G de densidade 14,0 lb/gal e *carbon black* 2.5516 g/cm³. O *Carbon Black* utilizado no estudo, é proveniente da pirolise do pneu, altamente puro e apresenta propriedades químicas únicas que o tornam ideal para diversas aplicações industriais e de pesquisa. Além disso, seu uso contribui para a redução do impacto ambiental, ao reaproveitar um resíduo que poderia ser descartado de forma inadequada.

Tabela 1 – Formulações usadas nos ensaios.

Formulações	Água (g)	Cimento (g)	CB (g)
PCB0	419,81	586,74	-
PCB5	411,38	566,83	28,34
PCB10	403,50	548,22	54,82
PCB15	396,12	530,80	79,89
PCB20	389,20	514,80	102,89

FONTE: Elaborado pelo autor (2024)

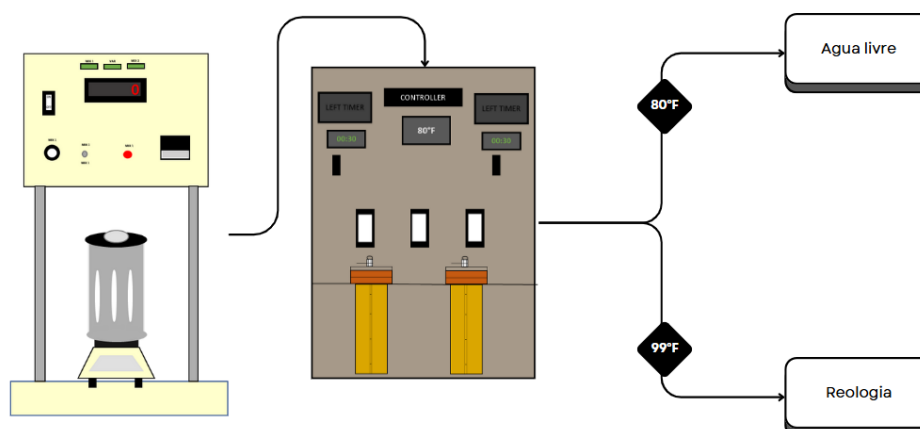
Preparação da pasta

A preparação e caracterização das pastas, incluindo a homogeneização e os ensaios de reologia, foram realizados conforme descrito na norma API RP 10B-2 (Api, 2013)(American Petroleum Institute, 2005).

Homogeneização

Primeiro, foi feita a homogeneização da formulação no misturador de palheta Chandler, modelo 80-60. Em seguida, levou-se a pasta ao consistômetro atmosférico Chandler, modelo 12000 (Figura 1), por 30 minutos.

Figura 1 – Desenho esquemático que representa a metodologia dos ensaios realizado.



Ensaio de Água livre

Após homogeneizar T°80F, conforme Figura 1, a pasta de cimento foi colocada dentro de uma proveta até preencher 250 mL. Em seguida a proveta foi coberta com papel filme, para evitar a evaporação de líquido e colocada em repouso em uma mesa de modo a evitar ao máximo vibrações. Após passar 2 h, o conteúdo de água sobrenadante foi retirado com auxílio de uma pipeta volumétrica e foi medido o volume de água presente no sistema. Pela norma, o conteúdo sobrenadante não deve exceder o valor de 5,9%, caso contrário a pasta é considerada inviável para a aplicação em poços de petróleo.

Ensaio reológico

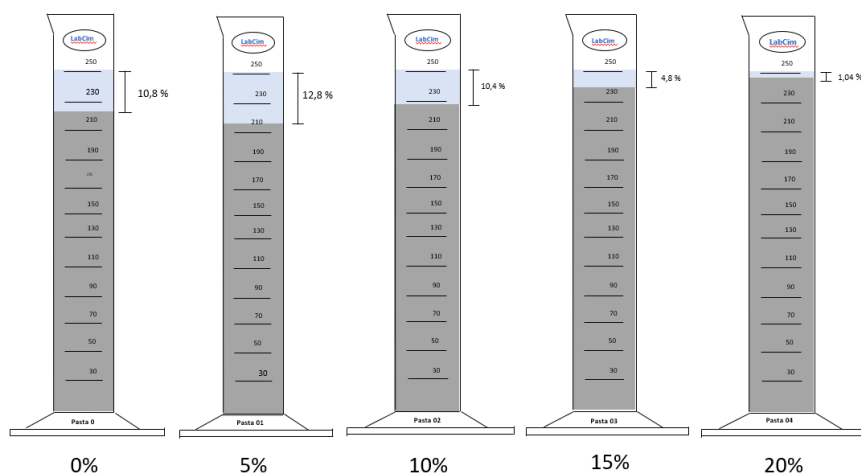
O ensaio foi realizado conforme a norma API RP 10B, utilizando viscosímetro rotativo de cilindros coaxiais chandler modelo 3500. Inicialmente foi realizada a homogeneização da pasta a 99°F conforme Figura 1. Após homogeneizada, a pasta foi transferida imediatamente para o copo do viscosímetro, de modo que a sua temperatura seja mantida. Em seguida, foram efetuadas leituras variando as rotações de 3-300 rpm, com intervalo de 10 s entre elas. Após registrar as leituras, foi determinado o Gel inicial e após 10 minutos em repouso o Gel final foi obtido.

Resultados e Discussão

Água livre

Os resultados obtidos para o ensaio de água livre são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Resultados do teste de água livre para as pastas PCB0, PCB5, PCB10, PCB15, PCB20.



A pasta padrão apresentou 27 mL de água livre que corresponde a 10,8%. As pastas contendo *Carbon black* demonstraram que a adição do resíduo promoveu a diminuição de água sobrenadante dentro da pasta de cimento leve. À medida que a concentração do CB foi aumentada, ocorreu a diminuição do sobrenadante. Conforme especificado pela norma API SPEC 10A, a quantidade máxima de água livre no sistema não deve exceder os 5,9% de água em relação ao peso de cimento. De acordo com os resultados obtidos, observa-se que as pastas PCB15 e PCB20 apresentam valores de 4,8% e 1,04%, respectivamente. Portanto, os resultados estão em conformidade com a norma.

Estudo reológico

Os resultados obtidos para o ensaio de reologia são apresentados na Tabela 2.

Carbon Black (%)	Modelo de Bingham			Modelo de Potencia			Gel inicial (lbf/100ft ²)	Gel final (lbf/100ft ²)
	LE (Pa)	VP (MPa.s)	R ²	n	K	R ²		
PCB0	3,33	8,81	0,9980	0,3565	0,0115	0,9459	2	8
PCB5	5,03	9,79	0,9917	0,3279	0,0177	0,9737	3	5
PCB10	5,50	13,72	0,9962	0,33736	0,0171	0,9811	4	7
PCB15	11,05	15,02	0,9619	0,2934	0,0406	0,9896	7	10
PCB20	12,98	22,67	0,9947	0,3130	0,0472	0,9843	9	11

Tabela 2 – Parâmetros reológicos

A tabela apresenta os parâmetros reológicos de diferentes amostras contendo porcentagens variadas de *Carbon Black*, tanto para o modelo de Bingham quanto para o modelo de Potência. Baseando-se nessa tabela, é possível observar que à medida que aumenta a concentração de CB nota-se um aumento das propriedades reológicas. A discussão desses parâmetros foi levantada nos gráficos 1, 2 e 3, a seguir.

Curvas de fluxo - Modelo de potencia

O índice de comportamento de fluxo (n) ou índice de comportamento, indica a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento do fluido. É um parâmetro que descreve se o fluido é pseudoplástico (n<1), Dilatante (n>1) ou newtoniano (n=1) (Machado, 2002). Todas as pastas formuladas tiveram o índice de comportamento, variando entre 0,357-0,313, logo se adequa como sendo um fluido Pseudoplástico (n<1) não newtoniano, isso significa que o aumento da taxa de deformação reduz a viscosidade, e consequente facilita o bombeio das pastas nas operações.

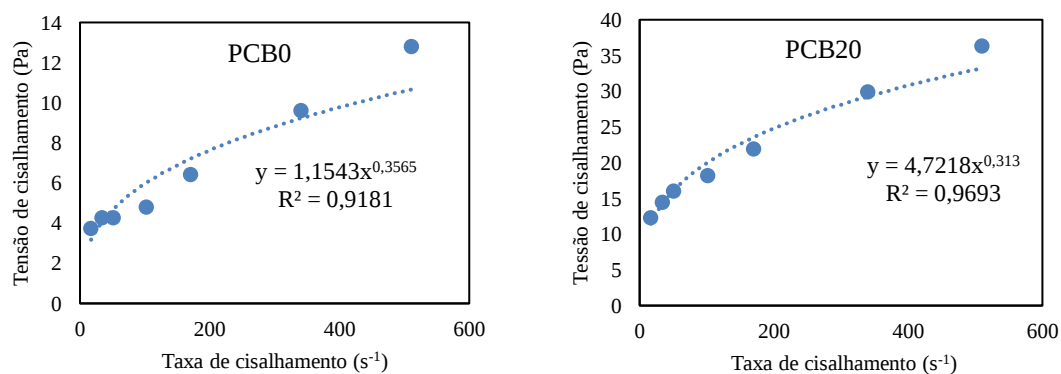


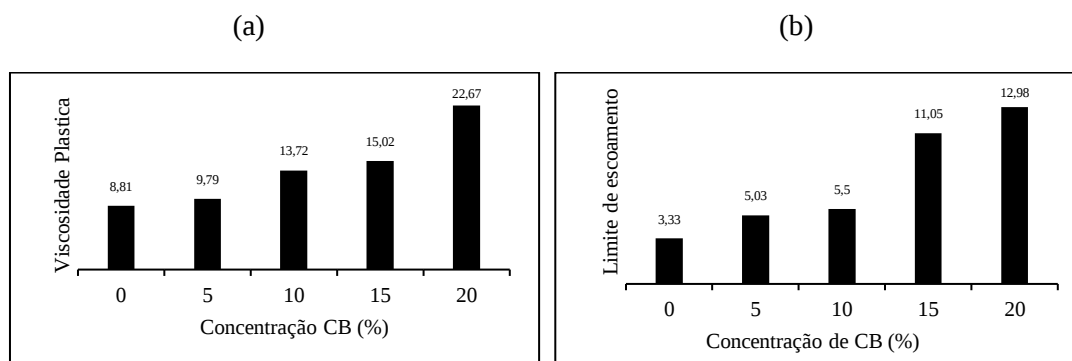
Figura 3 – Modelo de potência para pasta padrão (PCB0) e PCB20.

A Figura 3 apresenta os resultados das pastas PCB0 e PCB20, sem aditivo e contendo 20% de CB, respectivamente, que apresentaram os melhores resultados. O índice de comportamento da PCB0 é 0,3565. Com o aumento do teor de *Carbon black*, o índice de comportamento diminui ligeiramente, chegando a 0,3130 em PCB20. O parâmetro de consistência da pasta padrão é 0,0115. esse valor aumenta significativamente com o teor de *Carbon black*, atingindo 0,0472 em PCB20, ou seja, o K

aumenta isso nos indica um fluido de característica viscosa. Os valores de R^2 variam de 0,9459 a 0,9896, sugerindo um bom ajuste dos dados ao modelo de Potência.

Viscosidade plástica e limites de escoamento

Figura 4 – Resultados dos parâmetros reológicos. (a) Viscosidade plástica, (b) Limite de escoamento.

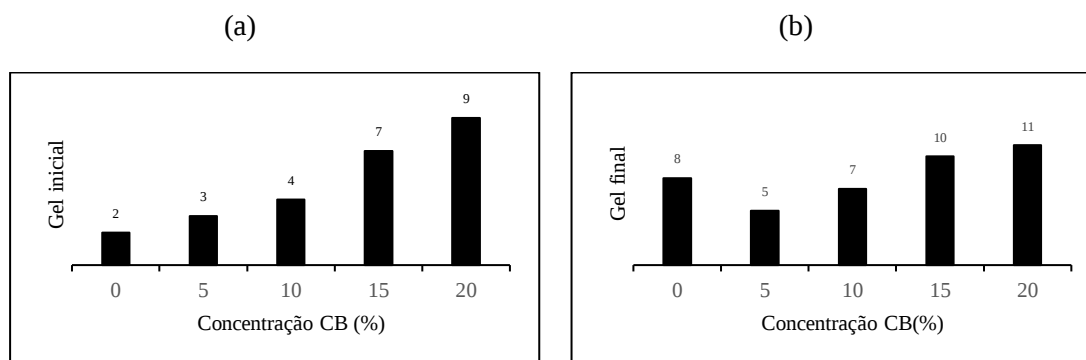


Os resultados apresentados na Fig.4 indicam que a adição de *Carbon black* melhora os parâmetros reológicos das pastas, tanto o limite de escoamento quanto a viscosidade plástica, como previsto pelo modelo de Bingham. Além disso, a consistência da pasta aumenta conforme previsto pelo modelo de Potência, embora o índice de comportamento mostre uma leve diminuição. Esses resultados confirmam que as pastas contendo *Carbon black* possuem propriedades reológicas aprimoradas em comparação com a pasta padrão, tornando-as mais adequadas para aplicações em poços de petróleo. Observa-se que as interações entre as partículas foram mais elevadas com maiores concentrações de CB. De acordo com Machado (2002), se a concentração de partículas dispersas aumenta, então a viscosidade plástica também aumenta, e isso foi observado com o incremento de CB. Indicando uma maior interação entre as partículas de CB com a água, tornando a pasta mais viscosa.

Força Gel

O gel inicial é um parâmetro reológico que indica a dificuldade que a pasta tem em iniciar o movimento após o repouso de 10 s. O gel final é um parâmetro reológico indicativo da dificuldade da pasta em iniciar o cisalhamento quando está no seu estado estático por 10 min. pode-se observar as figuras dos resultados das pastas formuladas padrão e aditivadas com CB20.

Figura 5 – Resultados dos parâmetros reológicos. (a) Gel inicial, (b) Gel final.



A partir do resultado obtido, pode-se observar que com o aumento da concentração do *Carbon black*, houve um aumento gradativo tanto do gel final como do gel inicial. Ou seja, com aumento das concentrações do CB, aumentou-se as interações eletrostáticas entre elas formando-se um gel quando em repouso.

Os dados sugerem que a adição de *Carbon black* influencia significativamente os valores de gel inicial e gel final das pastas. A formação inicial do gel é mais pronunciada com o aumento da concentração de *Carbon black*. A resistência final do gel também tende a aumentar, embora com uma exceção observada na concentração de 10% de CB. Esses resultados indicam que a modificação reológica das pastas com *Carbon black* pode ser ajustada conforme a necessidade, melhorando seu desempenho em aplicações específicas.

Conclusões

Nos parâmetros reológicos o limite de escoamento aumentou com a dição de CB, indicando que uma tensão maior é necessária para iniciar o fluxo da pasta de cimento isso é visto como uma melhoria na resistência inicial da pasta. Foi visto que viscosidade plástica também aumenta com a adição de CB, o que sugere que a pasta se torna mais viscosa à medida que mais CB é adicionado. Perante os objetivos do trabalho, os resultados ditos, foram atingidos com a melhora dos parâmetros reológicos da pasta de cimento. A adição de (CB) obteve impacto significativo na quantidade de água livre na pasta de cimento leve para poços de petróleo. Inicialmente piora a estabilidade da pasta. Mas com o aumento, começa a mostrar uma melhoria. Com a concentração máxima estudada, ocorreu uma redução na quantidade de água livre.

O uso do *Carbon black* como estendedor em pasta de cimento com baixa densidade é uma alternativa que pode trazer diversos benefícios para a indústria. Neste trabalho observou-se que ao adicionar o CB, é possível reduzir a quantidade de água livre no sistema, mais estável e sem riscos de grave decantação. Além do mais, o *Carbon black* permite a redução do consumo de cimento, que significa uma economia significativa nos custos de produção. A aplicação de CB em pasta não apenas melhora as características da pasta de cimento, como também contribui para a otimização dos processos e a redução do impacto ambiental.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio prestado pelo Núcleo tecnológico em cimentação de poços petrolíferos (NTCPP/UFRN), o Laboratório de Tecnologia Ambiental (Labtam/UFRN) e ao ANP-PRH-37 pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

API, A. Practica recomendada para “ Evaluación de Cementos de Pozos ” (Testing Well Cements). [s. l.], v. 2, 2013.

MACHADO, J. C. Vieira. **Reologia e escoamento dos fluidos: ênfase na indústria do petróleo**. [S. l.]: Interciência, 2002.

NELSON, E. B.; GUILLOT, D. **Well Cementing**. [S. l.: s. n.], 2006.

Baptista de Jesus, L., Pereira Taguchi Borges, S., Gomes de Souza Junior, F., Dias Toledo Filho, R., & Aboelkheir, M. (2023, March 1). *Caracterização reológicas e mecânicas de pastas de cimento modificadas com pó de borracha de pneu*