Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia - CT
Departamento de Engenharia do Petróleo

Aproveitamento de resíduo agroindustrial para formulação de pastas de cimento para poços de petróleo

Charlon Salvador Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Eduardo Martinelli

Natal-RN Junho de 2013

Charlon Salvador Gonçalves

Aproveitamento de resíduo agroindustrial para formulação de pastas de cimento para poços de petróleo

Monografia de Graduação apresentada ao Departamento de Engenharia do Petróleo do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Petróleo.

Orientador

Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Departamento de Engenharia do Petróleo - DEPET

Natal-RN
Maio de 2013

Monografia apresentada por Charlon Salvador Gonçalves e aceita pelo Departamento de Engenharia do Petróleo do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sendo aprovado por todos os membros da banca examinadora abaixo especificada:

_____

Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte
Orientador
Departamento de Engenharia do Petróleo
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

_____

Dr. Antonio Eduardo Martinelli
Co-orientador
Departamento de Engenharia de Materiais
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

_____

Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues
Departamento de Engenharia do Petróleo
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

_____

Dra. Vanessa Cristina Santanna
Departamento de Engenharia do Petróleo
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Natal-RN,_____de Junho de 2013

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo durante todos esses anos.

Agradecimentos

Quero agradecer a todas as pessoas que estiveram ao meu lado, me apoiando e incentivando a fazer o curso de engenharia. Todas elas contribuíram para minha formação. Agradeço ao Prof. Lindemberg de Jesus Nogueira pela orientação acadêmica. Ao prof. Antonio Eduardo Martinelli, meu sincero obrigado por me deixar fazer parte do LabCim. Obrigado também ao prof. Julio Cezar de Oliveira Freitas por esclarecer a importância e a interpretação dos resultados de laboratório para o campo.

Quero também agradecer ao André Almeida e Larissa Sobral por terem me alertado sobre a oportunidade de reingressar no curso de engenharia. Agradeço a minha amiga Flávia Medeiros Aquino, que sempre me falou do LabCim e sempre me incentivou nos estudos. Agradeço a Polyana, Tatiana Borges, Priscila Gouveia, Bruno Augusto, James Pyetro, Tiago Pinheiro, Ana Carla e Leticia Campos pelos momentos de descontração e pelas horas que estudamos juntos. Agradeço aos meus amigos de laboratório: Moisés Cavalcante, Fillipe Martins, Natália Amorim, Luanna Paiva, Wilma, Paulo Henrique, Marcus Barros, Fabrício, Adriano e Jéssica por me ensinarem a manusear os equipamentos, na interpretação dos resultados e também pelas horas de descontração. Obrigado especial à Lornna Galvão, que me deixou participar de sua pesquisa, me apresentou o laboratório e ensinou muito sobre as medidas. Obrigado aos meus amigos Mozean Pereira e Silvana pelos momentos de descontração.

Agradeço especialmente aos meus pais, Cláudio Salvador e Maria Ferreira, por terem me dado a melhor educação que puderam e por todo suporte que me dão até hoje. Ao meu irmão Charlie e Charton, minhas sobrinhas Celline e Cecília e minha namorada Paulinie por me apoiar a todo o momento, meus sinceros agradecimentos. Obrigado!

Aproveitamento de resíduo agroindustrial para formulação de pastas de cimento para poços de petróleo

Autor: Charlon Salvador Gonçalves
Orientador: Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

Resumo

Estudos mostram que alguns resíduos agroindustriais (biomassa) podem ser utilizados para produzir novos materiais cimentantes, mais econômicos e igualmente eficientes. Esses materiais possuem uma quantidade significante de sílica e óxidos, e tem a característica de reagir e se combinar com hidróxido de cálcio e formar compostos estáveis como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, característica esta denominada pozolanicidade. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) possui as características de uma pozolana e o estudo consiste em verificar a aplicabilidade da cinza na formulação de pastas para cimentação de poços de petróleo. Foram realizados ensaios de laboratório padronizados pelo *American Petroleum Institute* com pastas de cimento no estado fresco e endurecido, os quais submeteram as pastas às condições de um poço real com pressão e temperatura elevadas. Levaram-se também em consideração o tempo de operação e o regime de fluxo durante o deslocamento da pasta. O trabalho compreende o preparo de uma pasta de cimento utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo pozolânico e a realização de testes, para avaliar a sua aplicabilidade em operações de cimentação *on-shore*. Os resultados mostraram que a pasta aditivada com CBC nos estados fresco e endurecido foram semelhantes ao da pasta padrão, tais como propriedades reológicas, tempo de espessamento e estabilidade, significando que a CBC se comportou como um bom substituto parcial do cimento.

Palavras-chave: Cinza do bagaço de cana-de-açúcar, Pozolanicidade, cimentação de poços.

Use of agroindustrial residue to formulate cement slurries for petroleum wells

Autor: Charlon Salvador Gonçalves
Orientador: Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

Abstract

Studies have shown that some residues from industry can be utilized to produce new materials with cementing properties, more economic and eficient. These materials have significant quantities of silicous and oxides and characteristics of combining and reacting with calcium hydroxide and form stable compounds with silicates and aluminates, characteristic known as pozzolanicity. The sugar cane bagasse ash has characteristics of a pozzolan and this study is to verify its aplicability on well cementing. Some American Petroleum Institute`s standardized tests were performed with the slurry at the fresh state and hardened, which recriates the real well conditions as high pressure and high temperature, considering the operation time, the flow regime during the slurry displacement. In this work were prepared slurry with a pozzolanic aditive to investigate its aplicability on the on-shore well cementing. The results shown that the additivated slurry with sugar cane bagasse ash in fresh and hardened states were similar, such as rheology properties, thickening time and stability, meaning that the bagasse ash has a good behavior as a partial cement replacement.

Keywords: Sugar cane bagasse ash, pozzolanicity, well cementing.

Sumário

Sumário 8
Lista de figuras 10
Lista de tabelas 11
Lista de abreviaturas e siglas 12
Introdução 14
1.1 Objetivos 14
1.1.1 Objetivos Gerais 14
1.1.2 Objetivos Específicos 14
2 Revisão bibliográfica 16
2.1 A cimentação de poços 16
2.2 O cimento Portland 17
2.2.1 A classificação do cimento Portland 18
2.2.2 Composição química do cimento Portland 19
2.3 A hidratação do cimento Portland 20
2.3.1 Pega 20
2.3.2 Endurecimento 20
2.3.3 Cura 21
2.3.4 Fator Água - Cimento 21
2.3.5 Aditivos 21
2.4 As pozolanas 22
2.4.1 A cinza do bagaço da cana-de-açúcar - CBC 22
3 Materiais e métodos 24
3.1 Densidade da pasta 25
3.2 Teste de água livre 26
3.3 Teste de filtrado 26
3.4 Teste de Reologia 27
3.5 Tempo de espessamento 28

3.6 UCA - Ultrasonic Cement Analyzer 29
3.7 Estabilidade da pasta 29
3.8 Resistência à compressão 30
4 Resultados e discussões 31
4.1 Água livre, densidade e filtrado 31
4.2 Propriedades reológicas 31
4.3 Tempo de espessamento 34
4.4 UCA – Ultrasonic cement analyzer 35
4.5 Resistência à compressão 35
4.6 Estabilidade 36
Conclusões 39
Considerações finais 41
Referências 42

Lista de figuras

Figura 1: Variação do limite de escoamento em função da concentração de CBC..... 32
Figura 2: Reologia da pasta padrão e aditivada com 20% de CBC a 95 ºF..... 33
Figura 3: Curva de consistometria das pastas padrão e aditivada com 20% de CBC..... 35
Figura 4: Resistência à compressão após 28 dias de cura 36
Figura 5: Estabilidade da pasta padrão e aditivada com 20% de CBC..... 38

Lista de tabelas

Tabela 1: Composição do cimento Portland 20
Tabela 2: Formulação das pastas..... 24
Tabela 3: Resultados de Água livre, filtrado e densidade 31
Tabela 4: Propriedades reológicas @ 95 ºF 34
Tabela 5: Tempo de espessamento das pastas 34
Tabela 6: Resultados de resistência à compressão por UCA 35
Tabela 7: Resultados do teste de estabilidade 37

Lista de abreviaturas e siglas

API - American Petroleum Institute

FAC - Fator Água - Cimento

CBC - cinza do bagaço de cana-de-açúcar

BHST - Bottom Hole Static Temperature

BHCT - Bottom Hole Circulation Temperature

GG - Gradiente Geotérmico

%BWOC - By Weight of Cement

VP - Viscosidade Plástica

LE - Tensão Limite de Escoamento

DRX- Difratometria de Raios - X

Uc – Unidade de consistência

G_i – Força gel inicial

G_f – Força gel final

Introdução

As pastas de cimento para que sejam utilizadas em poços de petróleo devem ser submetidas aos testes de laboratório que investigam o seu comportamento sob as condições severas que um poço submete. Existem materiais que podem ser usados como aditivos minerais ao cimento Portland utilizado na cimentação de poços petrolíferos. A fim de avaliar as propriedades de pastas contendo um resíduo da agroindústria, foram formuladas pastas de cimento e estas foram submetidas aos testes normatizados pelo American Petroleum Institute que simulam as condições de poços de petróleo. Os ensaios foram realizados com pastas de cimento aditivadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, um resíduo agroindustrial que apresenta características pozolânicas, ou seja, propriedades cimentantes.

Este trabalho está subdividido da seguinte maneira: No capítulo 1 são apresentados objetivos gerais e específicos do trabalho. O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, mostrando conceitos e a teoria envolvida no estudo. O capítulo 3 trata dos materiais e métodos utilizados na pesquisa. No quarto capítulo são abordados os resultados e discussões dos ensaios realizados. O quinto capítulo é a conclusão do trabalho seguido pelas considerações finais e das referências bibliográficas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Preparar pastas de cimento com aditivo pozolânico e avaliar suas propriedades através de testes de acordo com normas API e NBR.

1.1.2 Objetivos específicos

Os testes realizados com a pasta de cimento foram os seguintes:

- Determinação da densidade da pasta pela norma API RP 10B;
- Ensaios reológicos pela norma NBR 9831;
- Teste de água livre e controle de filtrado pela norma API RP 10B;
- Estabilidade pela norma API RP 10B;
- Tempo de espessamento pela norma NBR 9831;
- Resistência à compressão pela norma NBR 9831.

2 Revisão bibliográfica

2.1 A cimentação de poços

A cimentação primária é uma etapa imprescindível na perfuração de um poço. Com ela é possível preencher o espaço anular compreendido entre as paredes externas do revestimento de aço e as paredes da formação perfurada, de modo a garantir a fixação do revestimento e coluna de produção como também impermeabilizar o próprio revestimento do contato com água da formação (THOMAS, 2004). A pasta de cimento é bombeada para dentro do poço por unidades de bombeio que se conectam através das linhas de cimentação e cabeça de cimentação fixada no topo do revestimento. Antes da pasta de cimento ser bombeada, é colocado centralizadores na parte externa do revestimento para que fique bem posicionado na abertura do poço. Outra peça chamada colar flutuante também é fixado ao revestimento. Esta é uma válvula que só permite a passagem em um único sentido impedindo a pasta de cimento voltar em fluxo contrário ao do bombeio. A sapata flutuante fixada na extremidade inferior do revestimento, serve de guia e também pode substituir o colar flutuante e realizar a mesma função dele. Uma peça de borracha chamada tampão de fundo (*bottom plug*) é descida, que impede o contato fluido-cimento e também limpa o reboco deixado pelo fluidode perfuração. O que desloca o tampão de fundo são a pasta de cimento e posteriormente, o fluidode perfuração. Depois de bombeado todo o volume de pasta, o tampão de topo é descido (*top plug*). A pasta sobe pelo espaço anular preenchendo-o (BOURGOYNE, 1986; RIGZONE, 2013). Muito antes, na etapa chamada de pré-operacional, o especialista em cimentação tem em mãos o projeto do poço, o qual contém informações como as fases da perfuração, os tipos de pasta que serão utilizadas em cada trecho e também os dados da perfilagem. O volume de pasta de cimento a ser utilizado é calculado baseado no perfil do poço chamado perfil *caliper*. Este mostra o real calibre do poço perfurado pela broca, o que na prática é sempre mais alargado devido às vibrações da coluna. Considera-se um volume de pasta de cimento em excesso por segurança.

Existem dois tipos de cimentação: a primária e a secundária. A cimentação primária é a realizada em cada fase da perfuração do poço para fixação dos

revestimentos. Uma cimentação primária bem feita evita a princípio, que seja realizada outra cimentação para corrigir falhas. A cimentação secundária é realizada para corrigir as falhas da cimentação primária ou para realizar algumas modificações no poço nas operações de *workover*. Tais falhas podem ser trechos mal cimentados ou vazamentos no revestimento e são reparados abrindo-se furos no revestimento onde a pasta de cimento é forçada a passar até preencher o espaço vazio. Esta é a operação chamada de *squeeze*. As modificações que podem ocorrer na operação de *workover* são isolamentos de zonas produtoras para evitar a produção de água, migração de gás ou mesmo para abandono do poço.

2.2 O cimento Portland

O cimento Portland é uma mistura de calcário, argila e minério de ferro. Esses materiais são calcinados em um forno rotativo a temperaturas elevadas. As proporções de cada um na mistura são adicionadas de maneira controlada e darão origem a classes diferentes do cimento Portland (NEVILLE, 1997). As maneiras existentes de fabricar o cimento são por via seca e via úmida. Quando é feito por via seca, os materiais em forma de pó são adicionados nas proporções requeridas e misturados. Esta mistura é assim levada ao forno rotativo. Já no processo por via úmida, uma lama é formada devido à adição de água aos materiais. Essa lama é então inserida no forno rotativo (ASSOCIATION, 2013). Durante a calcinação (queima controlada a temperaturas de 1450°C à 1650°C), várias reações químicas ocorrem e os materiais se agregam pelo processo de sinterização e tomam forma de esferas sólidas recebendo o nome de clínquer. Quando resfriadas, essas esferas são moídas juntamente com gesso ($CaSO_4.2H_2O$ = Sulfato de Cálcio Hidratado). Depois de todos estes processos, o cimento Portland está pronto para ser embalado e comercializado. A criação do cimento Portland foi de um pedreiro inglês chamado Joseph Aspdin no século 19. Ele queimou calcário e argila no forno de cozinha da própria casa. Ele recebeu a British Patent n°5022 em 21 de outubro de 1824. O nome Portland foi dado devido à aparência de cor do concreto produzido com o calcário natural da cidade de Portland, a 140 km de Londres, na Inglaterra (ASSOCIATION, 2013). Na realidade, a criação de Joseph contribuiu para os avanços na elaboração e aperfeiçoamento dos métodos de criação do cimento para a indústria.

2.2.1 A classificação do cimento Portland

O *American Petroleum Institute* (API) padronizou os tipos de cimento Portland utilizados na cimentação de poços. O cimento é relacionado em oito classes, de A a H e também classificado três tipos diferentes (BOURGOYNE, 1986; BELEM, 2008). Os tipos de cimento são:

- Cimento Portland Ordinário;
- Cimento com Moderada Resistência ao Sulfato;
- Cimento com Elevada Resistência ao Sulfato.

As classes são as seguintes:

- **Classe A** - Cimento para uso da superfície até 6000ft (1830m) de profundidade quando propriedades especiais não forem necessárias. Esse tipo de cimento só é do tipo ordinário.
- **Classe B** - Cimento para uso da superfície até 6000ft (1830m) de profundidade quando as condições requerem de moderada a alta resistência ao sulfato. Portanto, existe em ambos os tipos.
- **Classe C** - Cimento para uso da superfície até 6000ft (1830m) de profundidade quando as condições exigem alta resistência inicial. Existem os três tipos: ordinário, moderada resistência ao sulfato e elevada resistência a sulfato.
- **Classe D** - Cimento para uso a partir da profundidade de 6000-ft até 10000ft (1830m a 3050m) de profundidade sob condições moderadamente altas de temperatura e pressão. Disponível nos tipos moderado e alta resistência ao sulfato.
- **Classe E** - Cimento para uso a partir da profundidade de 10000-ft até 14000ft (3050m a 4270m) de profundidade, sob condições de temperatura e pressão elevadas. Disponível nos tipos moderado e alta resistência ao sulfato.
- **Classe F** - Cimento para uso a partir de 10000ft até 16000ft (3050m a 4880m) de profundidade sob condições de temperatura e pressão extremamente altas. Disponível nos tipos moderado e alta resistência ao

sulfato.

- **Classe G** - Cimento para ser usado da maneira como foi fabricado, da superfície até 8000ft (2400m) de profundidade. Pode ser usado com aceleradores e retardadores para cobrir uma larga faixa de profundidades de poços e temperaturas. Disponível nos tipos moderado e com alta resistência ao sulfato.
- **Classe H** - Cimento para ser usado da maneira como foi fabricado, da superfície até 8000ft (2400m) de profundidade. Pode ser usado com aceleradores e retardadores para cobrir uma larga faixa de profundidades de poços e temperaturas. Disponível somente no tipo de moderada resistência ao sulfato.

Existe também o cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos CPP - classe G e CPP - classe especial. Ele é definido como aglutinante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio hidráulicos e que apresenta características especiais para uso em poços de petróleo assim como produzido. Durante a fabricação, a única adição permitida é a de sulfato de cálcio durante a moagem (ABNT, 2006).

2.2.2 Composição química do cimento Portland

O cimento Portland possui em sua composição quatro compostos essenciais. Cada um tem uma participação na reação de hidratação do cimento e também no desenvolvimento de algumas propriedades do cimento endurecido. Para facilitar a escrita, criou-se uma nomenclatura específica (Tabela 1) onde são feitas abreviações nos nomes e fórmulas. Essa é uma convenção de escrita na química do cimento (TAYLOR, 1997).

Tabela 1: Composição do cimento Portland

Composto	Fórmula	Abreviação	Nome do mineral
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S	Alita
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S	Belita
Aluminato Tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	Aluminato Tricálcico
Ferroaluminato Tetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	Ferrita

2.3 A hidratação do cimento Portland

Quando a água é adicionada ao cimento, inicia-se uma reação de hidratação entre as fases (silicatos e aluminatos). Os produtos resultantes dessa reação são o silicato de cálcio hidratado chamado de *Gel de C-S-H* e o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ também chamado de *Portlandita*. O *Gel de C-S-H* é o principal agente ligante capaz de manter todas as partículas agregadas, que com o passar do tempo adquirem resistência como uma rocha. É o responsável pelo cimento endurecido (NEWMAN & CHOO, 2003; NEVILLE, 1997).

2.3.1 Pega

A pega da pasta de cimento é o enrijecimento do material passando do estado fluidopara o estado endurecido. Nesse processo, o material enrijece, mas, não desenvolve um significante aumento na resistência à compressão. O processo de pega do cimento se inicia quando este é misturado com água e leva algumas horas para atingir um tempo final, medido num consistômetro (TAYLOR, 1997). A temperatura elevada acelera o tempo de pega. Isso pode ser controlado adicionando produtos químicos com ação retardadora. No caso de temperaturas baixas, aceleradores de pega, a depender do efeito desejado (FINK, 2003; NEVILLE, 1997).

2.3.2 Endurecimento

O endurecimento que a pasta de cimento ganha é um processo lento e significa

o desenvolvimento da resistência à compressão (TAYLOR, 1997). Este processo lento se inicia logo após a pasta de cimento dar pega. O grande responsável por isso é o Gel de C-S-H (NEVILLE, 1997; MEHTA & MONTEIRO, 2001).

2.3.3 Cura

A cura é um processo de hidratação de uma pasta de cimento sob condições controladas, tais como umidade e temperatura (TAYLOR, 1997). A cura pode ser feita em ambientes com umidade elevada ou mesmo por imersão em água. O objetivo da cura é manter o máximo de saturação da pasta para que os interstícios sejam preenchidos totalmente pelos silicatos hidratados.

2.3.4 Fator Água – Cimento

O fator água - cimento é a relação em peso entre a água e o cimento. É um valor expresso em percentual.

2.3.5 Aditivos

Os aditivos são produtos químicos que modificam o comportamento natural do cimento. Alguns podem acelerar o tempo de pega da pasta (aceleradores de pega), outros, reduzi-lo. Os retardadores são muito utilizados, visto que a temperatura elevada dos poços faz com que o cimento tenha uma pega precoce. Existem aditivos denominados dispersantes, capazes de deixar a pasta de cimento mais fluida, ou seja, diminuir a viscosidade. Pode-se adicionar à pasta de cimento um aditivo controlador de filtrado. Este impede que a água da pasta de cimento seja perdida para a formação durante a hidratação da pasta no anular do poço (NELSON & GUILLOT, 2006).

Os aditivos mais comuns utilizados são:

- Acelerador de pega: Sais inorgânicos
  Ex.: $CaCl_2$ (cloreto de cálcio), NaCl (Cloreto de sódio);

- Retardador de pega: Lignosulfonatos;
- Redutor de filtrado: Polímeros, derivados do látex;
- Dispersante: Lignosulfonatos;
- Extendedor: Diminui a densidade da pasta;
- Adensante: Aumenta a densidade da pasta.

2.4 As pozolanas

As pozolanas são materiais naturais ou artificiais, silicosos ou silico-aluminosos que contém sílica na forma reativa. Tais materiais sem tratamento não possuem nenhuma atividade como material cimentante, porém, quando são finamente moídos e na presença de água reagem com hidróxido de cálcio para formar compostos hidratados com propriedades cimentícias (ASTM, 1994). O fato de a pozolana ser finamente moída é para que reaja com o hidróxido de cálcio produto indesejável da hidratação do cimento Portland, como descrito anteriormente. De acordo com NELSON & GUILLOT (2006), um saco de cimento padrão de 94lbm é hidratado, cerca de 20lbm de hidróxido de cálcio são liberados. Por ser bastante solúvel, pode acabar dissolvido na água que hidrata o cimento. Essa dissolução afeta no desenvolvimento do cimento endurecido deixando-o mais fraco.

Um aditivo pozolânico pode ser adicionado à formulação de uma pasta com intuito de consumir o excedente de $Ca(OH)_2$. O produto resultante também é um silicato de cálcio hidratado (Gel de C-S-H). O benefício gerado é o aumento da resistência mecânica do cimento, pois, a pozolana ocupa os interstícios entre as partículas do cimento preenchendo os espaços. Este é o chamado efeito *filler*.

2.4.1 A cinza do bagaço da cana-de-açúcar - CBC

O bagaço da cana-de-açúcar é um resíduo das usinas produtoras de álcool combustível. Depois da moagem para extrair o caldo da cana, o bagaço é reaproveitado como combustível para gerar energia da própria usina. O que sobra da queima é um material residual poluente, mas que pode ser reaproveitado se

receber o devido tratamento (CORDEIRO *et al*, 2009; ZARDO *et al*., 2004). Por possuir quantidades significativas de sílica (mais de 70% de SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3) e alumina (Al_2O_3), constatou-se que aproveitar esse resíduo pode ser uma alternativa viável (ANJOS, 2009), baseado-se no fato de que o Brasil é um dos maiores produtores de álcool combustível e decisões políticas recentes irão incentivar ainda mais a sua produção. O potencial que esse material tem de ser reutilizado é considerável (ENERGIA, 2013).

A CBC, como é chamada a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, para que atue como uma pozolana deve receber um tratamento físico, ou seja, deve ser moída de forma que a sua granulometria seja tão fina quanto a do cimento.

Materiais e métodos

Para os testes realizados no Laboratório de Cimentos da UFRN, foi utilizado o cimento especial para poços de petrolíferos, batelada[1] 113, fabricado pela Cimesa em Laranjeiras/SE. O cimento foi fornecido pela Petrobras em Mossoró/RN. A definição e as especificações desse tipo de cimento estão descritas em norma (ABNT, 2006).

As pastas de cimento do estudo foram elaboradas para serem utilizadas na cimentação primária, ou seja, para revestimento de um típico poço terrestre com BHST = 125° F, BHCT = 95° F e gradiente geotérmico GG = 1,7° F/ft, o que corresponde em média a uma cimentação na profundidade de 800 m. Para os testes foram formuladas pastas de cimento com base em cálculos realizados por planilha eletrônica (Tabela 2). Preparou-se um volume de pasta de 600 mL. Este volume bem como o seu preparo representa em escala reduzida o processo realizado no campo. No caso da adição de 20% de cinza, durante a formulação foi especificada a quantidade em porcentagem em peso de cimento (%BWOC).

Tabela 2: Formulação das pastas

Poço: Revestimento			**G.G. (°F/100 pé):**		1,7
Prof. vertical (m):		800	**BHST (°F):**		**95**
Prof. medida (m):		800	**BHSqT (°F):**		**125**
	$V_{esp.}$	**CAMPO**		**LABORATÓRIO**	
Componente	**(gal/lb)**	**Concentração**	**(gpc ou %)**	**Massa (g)**	**Volume (ml)**
Cimento	0,0375	57,1	% em peso	**640,88**	**200,3**
CBC	0,0423	20,0		**128,18**	**45,3**
Água	0,1202	6,0835	gpc	**346,14**	**346,1**
Antiespumante A	0,1223	0,012	gpc	**0,67**	**0,7**
Dispersante D	0,1089	0,040	gpc	**2,50**	**2,3**
Red. Filtr. F	0,1997	0,500	%	**3,20**	**5,3**
P (lb/gal)	**15,6**	**Vol. pasta (ml)**	**600,0**	**1121,6**	**600,0**
ρ (lb/gal):		**15,6**	Água de mistura (gpc):		**6,2293**
Fator água-cimento (%):		**54,01**	Rendimento (pé3 pasta/pé3 cimento):		**1,4097**

[1] Batelada corresponde a 1000 toneladas de cimento fabricadas pelo mesmo produtor, em uma mesma unidade e armazenado no mesmo silo. Corresponde a um conjunto de lotes.

A partir daí realizou-se os seguintes passos:

1. Pesagem do cimento e de aditivos sólidos a serem misturados a seco (no caso, a CBC) utilizando balança analítica da marca Tecnal;

2. Pesagem da água e aditivos líquidos formando a água de mistura. Os aditivos líquidos são: o antiespumante e dispersante. Estes foram adicionados respectivamente nesta ordem. O redutor de filtrado por ser um sólido, foi adicionado por último, já com a água de mistura sob agitação no copo do mixer.

3. Mistura dos componentes da pasta utilizando um misturador da marca Chandler Engineering, modelo 30-60. Como descrito em norma (ABNT, 2006), o processo de preparo de pasta deve durar 50 segundos. A adição de todos os materiais sólidos à água de mistura foi feita durante 15 segundos utilizando-se um funil, período em que a rotação do misturador se manteve constante em 4000 RPM ±200 RPM. Logo após, a rotação foi ajustada para 12000 RPM ±500 RPM durante os 35 segundos restantes para uma agitação mais vigorosa.

Foi feita a homogeneização da pasta preparada utilizando-se um consistômetro atmosférico da marca Chandler Engineering modelo 1200, durante 20 minutos, a uma temperatura de 27°C. A homogeneização da pasta visou prepará-la para os ensaios de água livre, tempo de espessamento, estabilidade, filtrado e reologia de acordo com a norma específica (ABNT, 2006). Após estas etapas, partiu-se para realização dos testes subsequentes.

3.1 Densidade da pasta

A densidade da pasta pode ser medida em dois tipos de balanças: a comum, mais conhecida como balança de lama, e a balança pressurizada. O ensaio consistiu em preencher o volume da balança com a pasta de cimento. Em seguida, apoiou-se a balança num suporte procurando equilibrá-la deslocando um

contrapeso até que visualmente o nível estivesse centralizado. A balança de lama da marca Ofite Inc., determinou o peso aparente da pasta de cimento, pois, esta podia conter ar aprisionado. A balança pressurizada da marca Halliburton Services, determinou o peso real da pasta de cimento, onde a quantidade de ar aprisionada foi desprezível.

3.2 Teste de água livre

Este teste determina o percentual de volume da fase sobrenadante formada. Para isso, preparou-se uma pasta no misturador. Em seguida ela foi homogeneizada no consistômetro atmosférico. Após os 20 minutos de homogeneização, a pasta foi colocada em uma proveta volumétrica de 250 mL. A proveta, sobre uma bancada com o mínimo de vibrações, foi devidamente coberta com papel-filme para evitar evaporação de água. O tempo foi cronometrado para 2 horas (ABNT, 2006). Ao final desse tempo, observou-se o volume de água sobrenadante, o qual foi retirado utilizando-se uma pipeta para que fosse pesado na balança e convertido em volume. Com isso, calculou-se a % de água livre segundo a fórmula:

$$\%\ \text{água livre} = \frac{\text{Volume água livre}}{250\ \text{mL de pasta}} \text{x}\ 100 \qquad \text{Eq. 1}$$

3.3 Teste de filtrado

Realizou-se a determinação da perda da fase líquida, em condição estática de pressão e temperatura, a partir de 175 mL de pasta de cimento contido num filtro-prensa da marca Fann, série 387 HPHT. A pasta foi submetida a um diferencial de pressão de 1000psi, forçando-a através de um elemento filtrante, uma peneira com abertura de 44µm (#325 mesh), durante um período de 30 minutos (FREITAS, 2008). O volume de água que a pasta perdeu (filtrado) foi coletado em uma proveta (ABNT, 2006). Uma faixa ideal de volume de filtrado compreende de 30 mL a 50 mL

de filtrado. O volume total é calculado multiplicando por dois o volume coletado.

3.4 Teste de Reologia

O teste de reologia é feito segundo os procedimentos normatizados (ABNT, 2006). Este teste determina as propriedades e os parâmetros reológicos das pastas de cimento a partir do modelo reológico adotado. Como modelos reológicos têm o modelo de Bingham, onde se pode determinar a tensão limite de escoamento (LE) e a viscosidade plástica (VP). De acordo com a Eq. 2, temos:

$$\tau = LE + VP\,\gamma$$

Eq.: 2

Onde:

τ É a tensão de cisalhamento gerada pela resistência ao escoamento do fluido;

LE É a tensão mínima a ser atingida para que o fluido inicie o escoamento. Este é o coeficiente linear na Eq. 2;

VP É a constante de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento;

γ Representa a diferença de velocidade entre as camadas do fluido. Seu valor é igual a zero enquanto a $\tau \leq$ LE.

No caso do modelo de potência, determina-se o índice de comportamento de fluxo (n), que representa o afastamento da linearidade de um fluido newtoniano [2]. Quando n> 1, o fluido é denominado dilatante e quando n<1 o fluido é denominado pseudoplástico. O índice de consistência (K) representa a resistência do fluido ao escoamento devido ao atrito entre as camadas do fluido. A Eq. 3 descreve o modelo de potência.

[2] Fluido newtoniano possui relação tensão de cisalhamento/taxa de cisalhamento constante. O índice de comportamento n é igual a 1.

$$\tau = k\gamma^n$$

Eq.: 3

Estes modelos reológicos são para fluidos não-newtonianos.

A força gel inicial (G_i) e a força gel final (G_f) são parâmetros que determinam o regime de escoamento que influenciarão nas pressões requeridas pelas bombas nas operações de cimentação.

O teste é realizado com um viscosímetro da Chandler Engineering, modelo 3500. Este é um viscosímetro rotativo de cilindros coaxiais do tipo Couette[3]. (MACHADO, 2002). Quando o cilindro externo gira, cisalha a porção de fluido em contato com a superfície. Isso ocasiona a deformação constante do fluido, que é o escoamento. Esse escoamento do fluido no anular entre os cilindros causa um movimento no cilindro interno (bob) no mesmo sentido. O cilindro interno não gira porque está suspenso por uma mola de torção. A mola possui tensão conhecida, o que permite aferir o quanto ela é flexionada a partir de uma escala em graus. São utilizados cerca de 350 mL de pasta de cimento para realização da medida. Após despejar a pasta de cimento no copo do viscosímetro, o equipamento é ligado a uma rotação de 3RPM. A deflexão é medida após dez segundos de observação. O processo se repete nas rotações de 6, 10, 20, 30, 60, 100, 200 e 300 RPM de maneira ascendente e descendente. Para observar a força gel inicial (G_i), a pasta fica em repouso durante 1 minuto e a leitura é feita em seguida a 3 RPM. A força gel final (G_f) é observada após a pasta ficar em repouso por dez minutos, com a leitura feita em seguida a 3 RPM.

3.5 Tempo de espessamento

O tempo de espessamento é também conhecido como tempo de pega. Este determina o período de tempo que uma pasta de cimento passa do estado fluido até um estado endurecido, onde atinge uma consistência na qual seja impossível

[3] Viscosímetro tipo Couette: O cilindro externo que gira; Viscosímetro do tipo Searle: cilindro interno que gira.

bombeá-la. O teste é realizado no consistômetro pressurizado, modelo Chandler Engineering 8240. A pasta de cimento é colocada em uma célula de aço cilíndrica juntamente com um conjunto de palhetas. Ao inserir a célula no consistômetro, as palhetas ficam imóveis enquanto a célula gira. A pasta fica sob estas condições até atingir 100 unidades de consistência Bearden[4] (Uc) em condição dinâmica, sob pressão e temperatura pré-estabelecidas. Os resultados deste teste indicam o período de tempo que a pasta permanecerá bombeável durante uma operação de cimentação. Até 50 Uc a pasta de cimento pode ser bombeável, mas podem ocorrer prejuízos nas bombas, no poço e/ou na formação, caso ela tenha baixo gradiente de fratura. O tempo ideal para que ocorra a pega é de 4 horas a 5 horas para as condições do poço consideradas nos ensaios.

3.6 UCA - Ultrasonic Cement Analyzer

A análise por ultrassom determina o desenvolvimento da resistência mecânica. A medida de resistência foi correlacionada através de um algoritmo interno com o período de tempo que a onda ultrassônica levou para atravessar a amostra sob cura (tempo de trânsito). O método permitiu um acompanhamento contínuo do desenvolvimento da resistência à compressão (ABNT, 2006).

3.7 Estabilidade da pasta

O método avaliou a segregação de sólidos na pasta de cimento endurecida. Para realizá-lo, utilizaram-se tubos decantadores, cilindros de cobre bipartidos de 203 mm de comprimento e diâmetro interno de 25 mm com tampas rosqueáveis. A tampa do topo é vazada para que houvesse uma sangria de pasta ao rosqueá-la, aliviando a pressão (ABNT, 2006). Ao preenchê-lo com a pasta, tomou-se o cuidado de eliminar as bolhas de ar com auxílio de um bastão de vidro.

Os tubos decantadores foram colocados em banho térmico por 24 horas para a

[4] Unidades Bearden (Uc): É um número adimensional que representa a resistência oferecida pela pasta e cimento ao movimento das palhetas do consistômetro pressurizado, medido pelo grau de deflexão da mola do potenciômetro, através de torques equivalentes.

cura. Ao final desse período, retirou-se a tampa superior dos tubos para observar se houve rebaixamento de topo, ou seja, um volume não preenchido no topo. Quando houve, pesou-se o tubo em balança analítica. Então, esse volume foi preenchido com água até completar. Mediante um cálculo transformou-se o volume medido em cm para comprimento em milímetros.

Os corpos moldados foram removidos das faces bipartidas, medidos com um paquímetro da marca Mitutoyo e em seguida foram cortados em quatro partes iguais que foram denominadas de: Topo, intermediário I, intermediário II e fundo. Estes foram pesados em balança analítica, o seu peso flutuado na água e seu peso no ar para se determinar a densidade.

No teste de estabilidade não pode haver uma diferença de massa específica entre o corpo de fundo e o de topo maior do que 0,5 lb/gal ($\Delta\rho = \rho_{fundo} - \rho_{topo} \leq 0,5$ lb/gal), bem como um rebaixamento maior que 5 mm. Caso isso ocorra, deve-se reformular a pasta.

3.8 Resistência à compressão

Esse teste determina a resistência à compressão da pasta de cimento endurecida. A informação que o teste fornece possibilita estimar o quanto a pasta endurecida irá resistir aos esforços de compressão quando curada no poço. Para o teste, foram utilizados moldes cúbicos de plástico com 50,8 mm ± 0, 13 mm de aresta preenchida com as pastas de cimento. Os moldes foram totalmente imersos em banho térmico para cura à pressão atmosférica durante 28 dias.

Após esse período de cura, os corpos foram desmoldados e suas dimensões foram medidas com um paquímetro e os valores foram anotados no software do equipamento, uma prensa eletromecânica modelo Shimadzu AG-I, que registrou a máxima resistência à compressão dos corpos em triplicata. A partir destes foi calculada a média aritmética e o desvio padrão.

4 Resultados e discussões

4.1 Água livre, densidade e filtrado

No teste de água livre não houve porcentual de fase aquosa sobrenadante. Isto significa que a pasta não sedimenta quando deixada em repouso. A densidade apresentou ótimo resultado conforme o desejado na formulação da pasta, 15,6 lb/gal, Para o teste de filtrado, a pasta padrão liberou uma quantidade de água na faixa ideal (Tabela 3). A pasta aditivada com 20% de CBC ultrapassou em 6,0 mL o limite máximo. Segundo NELSON & GUILLOT (2006), uma pasta que perde muito filtrado para a formação durante o bombeio faz com que a viscosidade aumente e podem ocorrer problemas na operação. A correção pode ser feita ajustando a concentração do controlador de filtrado.

Tabela 3: Resultados de Água livre, filtrado e densidade

Pasta	Água livre (mL)	Filtrado (mL)	Densidade (lb/gal)
Padrão	0	74	15,6
20%CBC	0	106	15,6

4.2 Propriedades reológicas

A Figura 1 mostra as tensões limite de escoamento das pastas. A tensão limite de escoamento foi maior na pasta padrão. O comportamento esperado seria o de a pasta aditivada apresentar uma maior tensão. De acordo com MACHADO (2002), a tensão limite de escoamento acontece devido às interações entre as partículas e esta propriedade serem diretamente relacionada com a superfície específica, somatório das áreas superficiais dos grãos, dada em m^2/kg. Embora uma tensão limite de escoamento mais baixa seja uma característica boa em termos operacionais, o que pode ter acontecido é que as partículas de cinza aderiram mais às moléculas do dispersante por serem mais finas do que a do cimento.

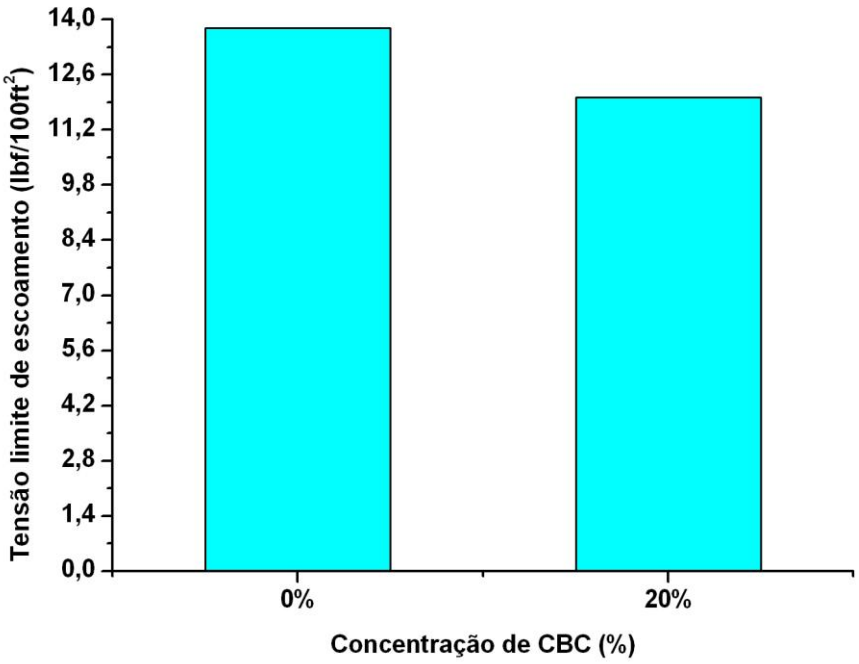

Figura 1: Variação do limite de escoamento em função da concentração de CBC

A Figura 2 mostra o comportamento do fluido segundo o modelo reológico de Bingham (Plástico ideal) na temperatura de circulação (BHCT). É possível observar no gráfico a tensão limite de escoamento da pasta aditivada ligeiramente menor que a pasta padrão.

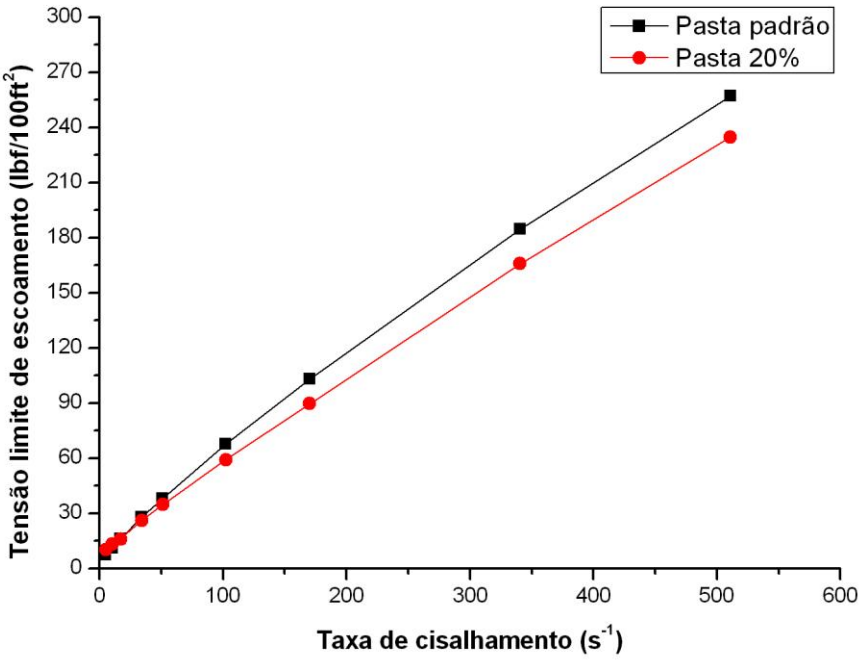

Figura 2: Reologia da pasta padrão e aditivada com 20% de CBC a 95 ºF

A Tabela 4 resume as propriedades reológicas calculadas. Para as pastas de cimento estudadas, como não há faixa de valores aceitáveis definidos em normas API, os valores de viscosidade plástica estão dentro da faixa aceitável pela indústria, que consideram uma faixa de 150 a 250 cP. Os valores de G_i e o G_f das pastas aumentaram com a adição de CBC. Na prática, o G_i e o G_f simulam as tensões requeridas nos equipamentos ao se reiniciar o bombeio das pastas após alguma parada na operação de cimentação. Os valores representam a tensão a ser aplicada para quebrar o gel, ou seja, a rede formada quando a pasta fica em repouso (NELSON & GUILLOT, 2006). No caso do gel inicial G_i onde a pasta fica em repouso por 1 minuto, tanto a padrão quanto a aditivada apresentaram valores muito próximos. Para o gel final G_f onde a pasta fica em repouso por dez minutos, a pasta aditivada exigiu mais tensão na quebra da rede, reforçado pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 4: Propriedades reológicas @ 95 ºF

T (ºF)	Pasta	VP (cP)	LE (lbf/100ft²)	G_i (lbf/100ft²)	G_f (lbf/100ft²)
95	Padrão	233,50	13,78	4,0	20,00
95	20%CBC	211,80	12,02	5,0	33,00

4.3 Tempo de espessamento

O tempo espessamento (tempo de pega) da pasta padrão apresentou valor coerente com o exigido pelas companhias petrolíferas que é na faixa de 4 a 5 horas para as condições de poço definidas. A Tabela 5 mostra que a pasta com 20% de CBC, embora com um tempo de pega próximo do valor ideal, foi considerada com pega acelerada. Este comportamento se deve à fluidez da pasta aditivada ser maior que a pasta padrão, fluidez demonstrada pela quantidade de fluido liberada no teste de filtrado. Como mostra a Figura 3, as pastas têm comportamento semelhante até decorridas 1 hora e meia de teste. Após esse período, a pasta aditivada com CBC tem um ganho de consistência mais acentuado. A correção desse tempo pode ser feita com um aditivo químico retardador de pega.

Tabela 5: Tempo de espessamento das pastas

Pasta	50Uc (h)	100Uc (h)
Padrão	02:44	04:00
20% CBC	02:27	03:49

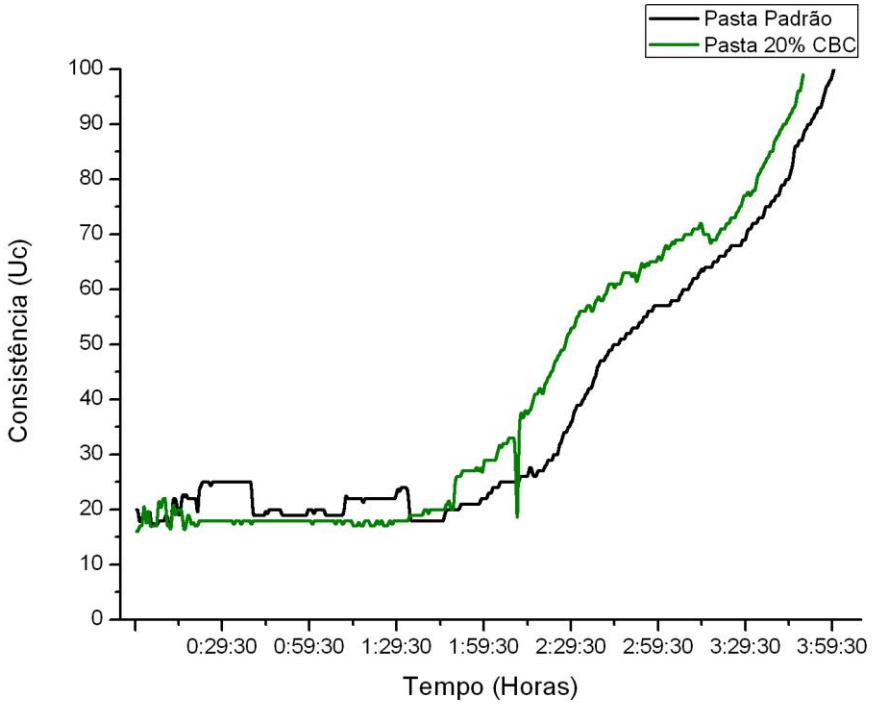

Figura 3: Curva de consistometria das pastas padrão e aditivada com 20% de CBC

4.4 UCA – Ultrasonic cement analyzer

O resultado da resistência adiquirida pela pasta aditivada com CBC (Tabela 6) ficou cerca de 10% abaixo do valor padrão. Pode-se considerar o resultado satisfatório.

Tabela 6: Resultados de resistência à compressão por UCA

Pasta	RC (psi@24horas)
Padrão	2647 psi
20% CBC	2378 psi

4.5 Resistência à compressão

A adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aditivo pozolânico foi capaz de aumentar a resistência à compressão após os 28 dias de cura. A Figura 4

mostra o comparativo entre a pasta padrão e a aditivada. O resultado desse teste mostra de uma maneira indireta que a CBC atuou no consumo de $Ca(OH)_2$ excedente da hidratação do cimento Portland. Isso gerou um aumento da quantidade de Gel de C-S-H como produto final, sendo este responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica. O aumento na resistência à compressão da pasta aditivada em relação à pasta padrão foi de quase 20% de acordo com a Figura 4.

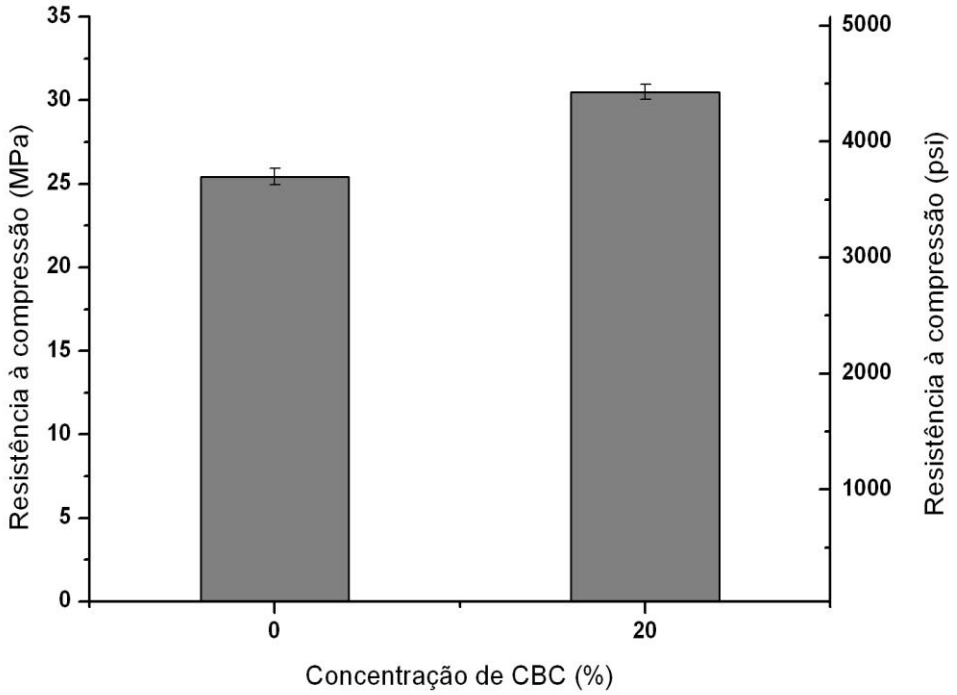

Figura 4: Resistência à compressão após 28 dias de cura

4.6 Estabilidade

O teste de estabilidade para as pastas padrão e com 20% de CBC mostrou que as pastas não sedimentaram, ou seja, não houve segregação de sólidos, indicando que não há formação acentuada de bolhas que permanecem aprisionadas após a cura da pasta. Também não houve rebaixamento de topo em nenhum dos corpos

preparados. Como não houve sedimentação, foi possível que a diferença de densidades entre os corpos de fundo e os de topo moldados no tubo decantador não variassem mais do que o exigido pelo API, onde o Δρ deve ser menor ou igual a 0,5lb/gal. Os resultados são mostrados na Tabela 7.

A Figura 5 mostra o comportamento da estabilidade das pastas. Como os valores de Δρ dos corpos II, tanto da pasta padrão quanto da pasta aditivada com 20% de CBC apresentaram valores negativos devido a erros operacionais durante o corte dos corpos, estes não são mostrados no gráfico.

Tabela 7: Resultados do teste de estabilidade

Pasta padrão			
Corpo	**ρtopo**	**ρfundo**	**Δρ (lb/gal)**
I	15,97	16,0	0,03
II	16,0	15,99	-0,01
III	15,88	16,07	0,18
Pasta 20%			
I	16,04	16,05	0,01
II	15,98	15,95	-0,02
III	16,03	16,06	0,03

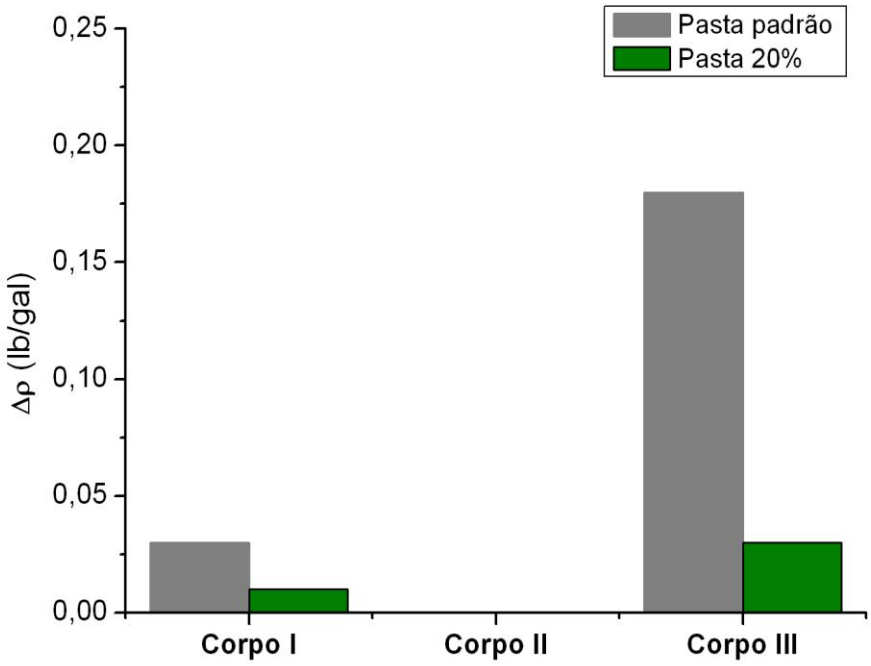

Figura 5: Estabilidade da pasta padrão e aditivada com 20% de CBC

Conclusões

A CBC é um material pozolânico que a princípio pode ser usado como aditivo ao cimento Portland ou substituí-lo em parte na formulação de pastas. Algumas medidas precisam ser feitas a respeito da caracterização do material, tais como medir a área superficial pelo método BET, teste de pozolanicidade e investigação por análise termogravimétrica e DRX.

Em relação aos resultados dos testes com as pastas de cimento pode-se dizer:

- O volume de filtrado liberado pela pasta aditivada ultrapassou o limite máximo da faixa aceitável quando submetido a um ΔP = 1000 psi, mas, um ajuste na concentração do controlador de filtrado pode corrigir este problema.
- Os resultados de reologia se mostraram satisfatórios para uma aplicação real de campo. A pasta aditivada com CBC apresentou resultados de LE e VP menores do que o padrão. Os valores de G_i e G_f da pasta aditivada também ficaram num patamar aceitável pela indústria petrolífera.
- Em relação ao tempo de espessamento, que expressa em quanto tempo a pasta fica enrijecida e não-bombeável, a pasta aditivada pegou onze minutos mais cedo que o limite mínimo considerado pela indústria (tempo mínimo = 4 horas). Isso aconteceu devido à fluidez da pasta aditivada que pode ser corrigida com um aditivo retardador de pega ou a correção do volume de filtrado pode consequentemente ajustar o tempo de espessamento.
- O resultado da análise de resistência mecânica por ultrassom ficou 10% abaixo em relação ao padrão. Essa é uma pequena diferença que pode ser considerada tolerável.
- A cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentou bom comportamento como material cimentante. O resultado de resistência à compressão da pasta aditivada com CBC foi de 20% maior em relação ao padrão.
- No teste de estabilidade, a pasta aditivada não sedimentou, mantendo-se bastante estável e com variação mínima entre os corpos de fundo e de topo. Isso propicia ao cimento curado no poço suportar as cargas de maneira

uniforme em toda a sua extensão.

Pode-se concluir que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar é um material capaz de substituir 20% em massa do cimento e causar poucas alterações nas propriedades de uma pasta, nos estados fresco e endurecido.

Considerações finais

Como perspectiva para trabalhos futuros deve ser realizada uma análise de viabilidade técnica e econômica do emprego da cinza como material cimentante, visto que a indústria brasileira tende a produzir mais e mais matéria-prima pozolânica com o aumento da produção de cana-de-açúcar.

Referências

ABNT. 9831, *Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - Requisitos e métodos de ensaio*. 2nd. ed. Rio de Janeiro: ABNT NBR, 2006.

ANJOS, M. A. S. dos. *Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

API. RP 10B - *Recommended Practice for Testing Well Cements*. 22nd. ed. Washington: API, 2005.

ASSOCIATION, P. C. *History and Manufactory of Portland Cement*. mar. 2013. Mar., 2013. Disponível em: <http://www.cement.org/basics/concretebasics_history.asp>. Acesso em: Março 5, 2013.

ASTM. C 618-94 - *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. [S.l.]: ASTM, 1994.

BELEM, F. A. T. *Operador de Sondas de Perfuração - Módulo VI, apostila II: Cimentação.* [S.l.], 2008.

BOURGOYNE, A. T*. Applied Drilling Engineering*. 1st. ed. Texas: SPE, 1986.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO, R. D.; FAIRBAIRN, E. de M. R. *Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios.* Revista Química Nova, v. 32, n. 1, p. 82_86, 2009.

ENERGIA, M. das Minas e. *Governo aumenta etanol na gasolina*. Maio 2013. May., 2013. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/system/modules/br.com.mme/elements/pdf/pdf-noticia.pdf?urlPdf=|spg|noticias|destaque2|destaque_0027!html>. Acesso em Maio 17, 2013.

FINK, J. K. *Oil Field Chemicals*. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2003.

FREITAS, J. C. de O. *Adição de poliuretana em pastas de cimento para poços de petróleo como agente de correção do filtrado*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

MACHADO, J. C. V. *Reologia e Escoamento de Fluidos*. 1st. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, properties and Materials.* [S.l.: s.n.], 2001.

NELSON, E.; GUILLOT, D. *Well Cementing*. 2nd. ed. Texas: Schlumberger, 2006.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2nd. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NEWMAN, J.; CHOO, B. S. *Advanced Concrete Technology -Constituent Materials.* 1st. ed. Oxford: Elsevier, 2003.

RIGZONE. *How does cementing work?* maio 2013. May., 2013. Disponível em: <http://www.rigzone.com/training/howitworks.asp>. Acesso em Maio 25, 2013.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. 2nd. ed. London: Thomas Telford, 1997.

THOMAS, J. E. *Fundamentos da Engenharia do Petróleo*. 2nd. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

ZARDO, A. M. *et al*. *Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como filler em compostos de fibrocimento*. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável and X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. [S.l.]: FZEA/USP, 2004.