AVALIAÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND FORMULADAS COM CP II F E CINZA DE CARVÃO MINERAL VISANDO A CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO[1]

CIRINO, M.A.G., Universidade Regional do Cariri, e-mail: miguel.gonclaves@urca.br; CABRAL, A.E.B., Universidade Federal do Ceará, e-mail: Eduardo.cabral@ufc.br

ABSTRACT

Portland cement slurries formulated with cements commonly used in civil construction don't fully meet the normative requirements of the API (American Petroleum Institute), especially about the mechanical properties, due to the composition characteristics and properties required for oil wells cementing. Due to these characteristics, in Brazil, specific Portland cements are used for oil wells, such as CPP Class G and CPP Especial Class. The research sought to evaluate a reliable alternative of cement slurries formulated with CPII F cement, with great availability in the market, with partial substitution of the cement by coal burning ashes to 5% and 10%, chosed for modifying the microstructure and the resistance of the slurries. The ash comes from the Pecém-CE thermoelectric plants, which represents an environmental liability due to the provision in patios of accumulation of this industrial waste. Initially, the chemical and microstructural cement and the ashes were characterized as the pozzolanic activity. Subsequently, the technological tests required by NBR 9831/2006 and API ASPEC / 2010 were carried out for the cementation of oil wells. It is concluded that the formulated slurries presented the possibility of cementing applications of shallow wells.

***Keywords**: Oil well cementing. Coal ash. Portland cement slurries.*

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o principal material para se executar de cimentação de poços de petróleo, destacando-se o CPP Classe G e o CPP Classe Especial, com menor variabilidade das propriedades em uso. Para tal, é necessário alterar as características dos fornos de produção, interrompendo a produção dos cimentos para construção civil que representam a maior receita das empresas cimenteiras.

Como alternativa, segundo Belém (2011), pode-se utilizar os cimentos compostos que, de maneira geral, não atendem aos requisitos para cimentação de poços de petróleo.

Vale destacar que a cimentação do poço é de grande importância para a cadeia de exploração do petróleo, onde problemas oriundos no processo podem ocasionar a redução da vida útil do poço devido o aparecimento de fissuras e vazios (MIRANDA, 2008) necessitando de correções que geram custos adicionais (BELÉM, 2011).

As pastas de cimento formuladas devem manter sua consistência, não apresentar água livre e apresentar boa resistência à compressão (BALTHAR, 2010) fato agravado para pastas de densidade pasta inferior à 15,6 lb/gal usada em cimentações rasas de até 200m de profundade (NELSON, 1990).

[1] CIRINO, M.A.G., CABRAL, A.E.B. Avaliação de pastas de cimento Portland formuladas com CP II F e cinza de carvão mineral visando a cimentação de poços de petróleo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

Ao utilizar um sistema composto de cimento portland e adições minerais, como as cinzas de carvão mineral, propiciam a melhoria da resistência mecânica, por apresentar indícios de atividade pozolânica e reduzir a permeabilidade das pastas (SABEDOT *et al*., 2011).

Um fato relevante se deve ao grande volume de resíduo industrial gerado pelas térmelétricas, onde menos de 30% das cinzas geradas são utilizadas como adições minerais em cimentos e o restante fica depositado em pátios, pondo em risco o meio ambiente. Situação similar é observada nas termelétricas que tendem à siderúrgica do Pecém, localizadas em São Gonçalo do Amarante/CE, com geração média de 80 toneladas de cinzas por dia (leve e pesada).

Assim, a pesquisa visa avaliar pastas de baixa densidade 15,6 lb/gal (1,737 g/cm³), formuladas com cimento Portland CPII F e substituição parcial por cinzas de carvão mineral, visando a cimentação de poços petrolíferos conforme requisitos da NBR 9831 (ABNT, 2006) e API SPEC 10 A (API, 2009).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O processo de cimentação é realizado com a iserção de pasta de cimento Portland no espaço formado entre a formação rochosa e o revestimento metálico (COOK *et al*., 2006). Após o endurecimento, a pasta deve suportar a estrutura do poço, proteger o revestimento metálico contra a ação de fluidos corrosivos (BASSONI, 2013), (CHOOLAEI *et al*., 2012) e (LIU, 2016). Na ocorrência de problemas, uma nova inserção da pasta é necessária gerando a interrupção da operação do poço (NELSON, 1990), principalmente em pastas de baixa densidade.

Ao se utilizar os cimentos compostos para a cimentação de poços de petróleo, como o CPII F, comumente usado na construção civil, problemas decorrentes principalmente na resistência à compressão são observados. Assim, para a melhoria das propriedades mecânicas pode-se substituir parcialmente os cimentos pelas cinzas de carvão mineral, definidos como materiais silicoaluminosos que podem apresentar atividade pozolânica, atuar como núcleos de hidratação e refirnar a matriz cimentícea por efeito *filler*, melhorando sua microestrutura (HUI, 2014).

3 MATEIRIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de caracterização físico-química do cimento CPII F foram feitos para equivalente alcalino, resíduos insolúveis, óxidos, cal livre, perda ao fogo, silicatos, aluminatos, granulometria e massa específica. As cinzas foram avaliadas quanto à massa específica, granulometria, micrsocopia eletrônica de varredura e atividade pozolânica. Com base na massa específica formulou-se as pastas, conforme BWOC – *By Weight Of Cement*, procedimento da norma API RP 10B (API, 2003). A Tabela 1 apresenta as formulações avaliadas na pesquisa onde, CV1 corresponde à cinza de carvão mineral pesada, CV2 cinza de carvão mineral leve.

Tabela 1 - Formulações das pastas de cimento Portland

FORMULAÇÕES	PERCENTUAIS: CIMENTO CPII F / DE CINZAS (%)	MASSA DO CIMENTO NA FORMULAÇÃO	MASSA DE ÁGUA NA FORMULAÇÃO	MASSA DA CINZA	FATOR ÁGUA / CIMENTO (%)
CPIIF	100 / 0	652,77 g	389,72 g	-	59,70
CPIIF5CV1	95 / 5	628,32 g	384,79 g	31,32 g	61,43
CPIIF10CV1	90 / 10	602,21 g	380,23 g	60,21 g	63,16
CPIIF5CV2	95 / 5	628,32 g	384,79 g	31,32 g	61,43
CPIIF10CV2	90 / 10	602,21 g	380,23 g	60,21 g	63,16

Fonte: Autores

Após a formulação das pastas, seguiu-se a mistura e homogeneização e, em seguida, foram realizados os ensaios tecnológicos API (*American Petroleum Institute*) para o teor de água livre, consistometria e resistência à compressão. Procedimentos definidos pela norma brasileira ABNT NBR 9831 (ABNT, 2006), API SPEC 10 (API, 2009) e API RP 10B (API, 2003).

Para a resistência à compressão utilizou-se corpos de prova cúbicos de 50mm de aresta, num total de três por traço, nas idades de 8 horas (parâmetro normativo), 24 horas, 7 dias e 28 dias, curadas à 38°C.

Por fim, os resultados foram comparados entre as pastas formuladas, normas e literatura disponível.

4 RESULTADOS

4.1Caracterização físico-química dos materiais anidros

A caracterização química do cimento CPII F é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização química do cimento CPII F

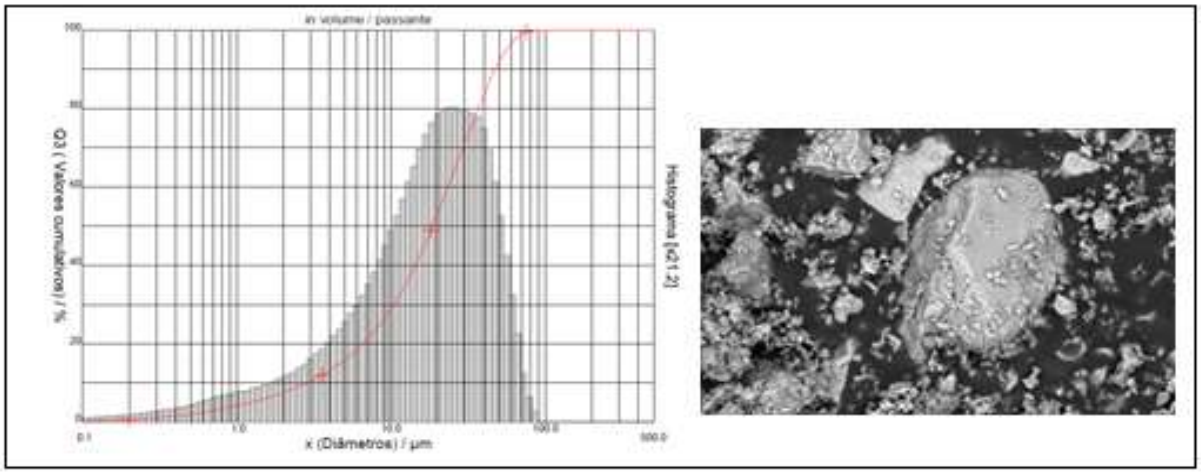
CIMENTO	MgO	SO_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Cal livre	Perda ao fogo	Resíduos insolúveis	Silicato tricálcico	Aluminato tricálcico	Ferroaluminato	Na_2O	K_2O	Equivalente alcalino
CPII F 32	2,75	2,63	19,62	4,95	3,20	60,46	1,30	6,61	2,88	46,47	7,70	9,74	0,37	1,02	1,04

Fonte: Autores

Conforme NBR 11578 (ABNT, 1991) o cimento Portland CPII F uilizado apresentou parâmetros esperados para este tipo de cimento.

O cimento Portland CPII F apresentou distribuição granulométrica na faixa entre 0,1 µm a 100 µm e forma dos grãos irregulares e levemente angulares, conforme Figura 1. Essas características impactam nas propriedades das pastas no estado fresco, como a consistência e reatividade e, no estado endurecido, a fluidez, a resistência mecânica e durabilidade.

Figura 1- Granulometria e microscopia do cimento CPII F



Fonte: Autores

Tabela 3 – Atividade pozolânica das cinzas de carvão mineral

PROPRIEDADES QUÍMICAS	**REQUISITO (%)**	**CV1 (%)**	**CV2 (%)**
Al2O3 + Si O2 + Fe2O3	≥ 70,0	52	84,03
SO3	≤ 5,0	10,77	1,64
Perda ao fogo	≤ 3,0	0,88	0,35
Umidade	≤ 6,0	6,57	1,83
Álcalis Na2O	≤ 1,5	0,75	1,35

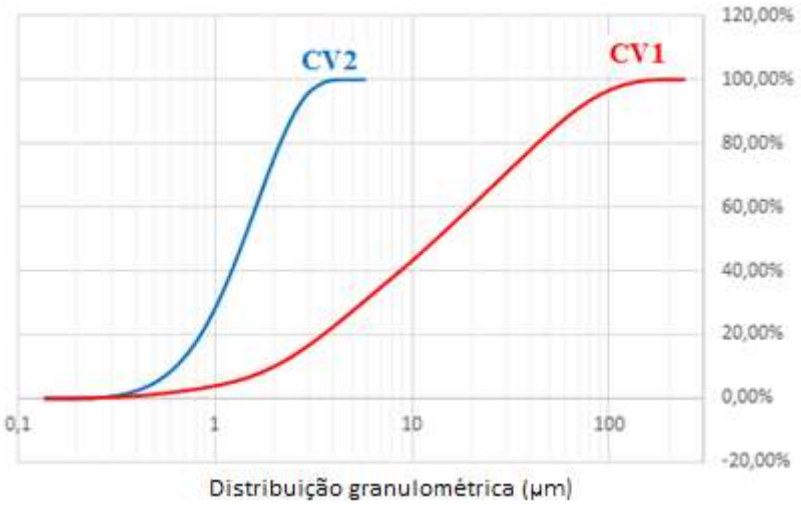
PROPRIEDADES FÍSICAS	**REFERÊNCIA**	**CIMENTO**	**CV1**	**CV2**
Material retido na peneira 45 µm	< 20,0 %	-	13,18 %	1,26 %
Desempenho com cimento Portland aos 28 dias de cura	≥ 90,0 % da resistência do cimento de referência	26,76 MPa	26,90 MPa	28,31 MPa
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	≥ 6,0 Mpa	-	6,6 MPa	7,6 MPa

Fonte: Autores

Conforme avaliação da Tabela 3, a cinza de carvão mineral CV2, atendeu todos os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) para as propriedades físicas e químicas, apresentando indícios de atividade pozolânica. No que se refere a cinza CV1, observou-se o não atendeu aos requisitos químicos, verificando-se apenas o aumento da resistência, efeito físico superior ao químico, possivelmente decorrente de efeito *filler* decorrente do diâmetro médio da cinza.

A Figura 2 apresenta a comparação entre a distribuição granulométrica entre as cinzas CV1 e CV2.

Figura 2 – Porcentagem acumulada da distribuição granulométrica das cinzas

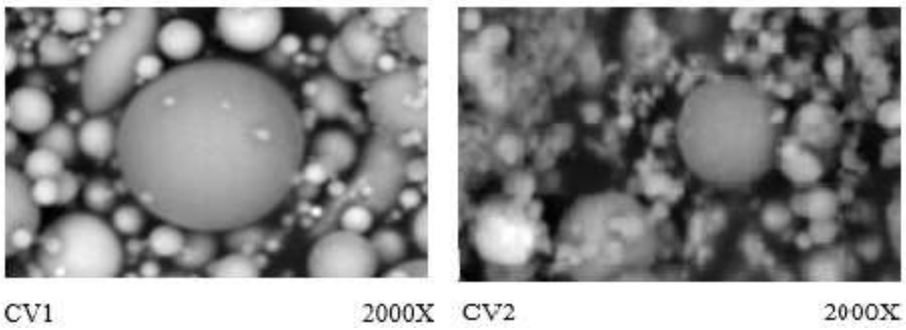


Fonte: Autores

Quanto aos diâmetros médios, as cinzas de carvão mineral CV1 (31,11 µm), diâmetros próximos ao observado para o cimento e a cinza CV2 (1,70 µm) valores inferior ao do cimento. Com isso, há uma tendência que a cinza CV2 favoreça o efeito nucleação e o efeito *filler*, além da potencial atividade pozolânica.

Os resultados de granulometria são complementados pelas micrografias das cinzas (Figura 3).

Figura 3 – Micrografias das cinzas de carvão mineral



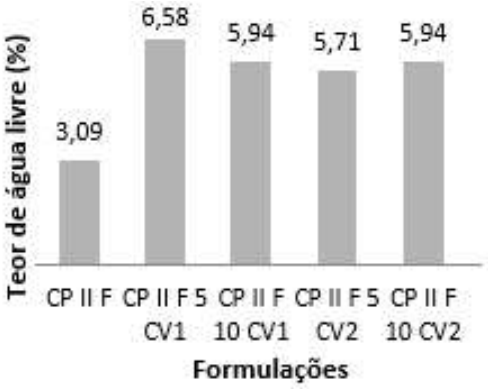
Fonte: Autores

A forma esférica das cinzas auxiliam no aumento da fluidez das pastas, podendo combater a restrição do movimento decorrente do atrito entre os grãos do cimento e das cinzas das pastas no estado fluido.

4.2 Ensaios tecnológicos API

A Figura 4 apresenta os valores de água livre que corresponde a água sobrenadante, que não participará das reações químicas de hidratação.

Figura 4 - Teor de água livre das pastas formuladas

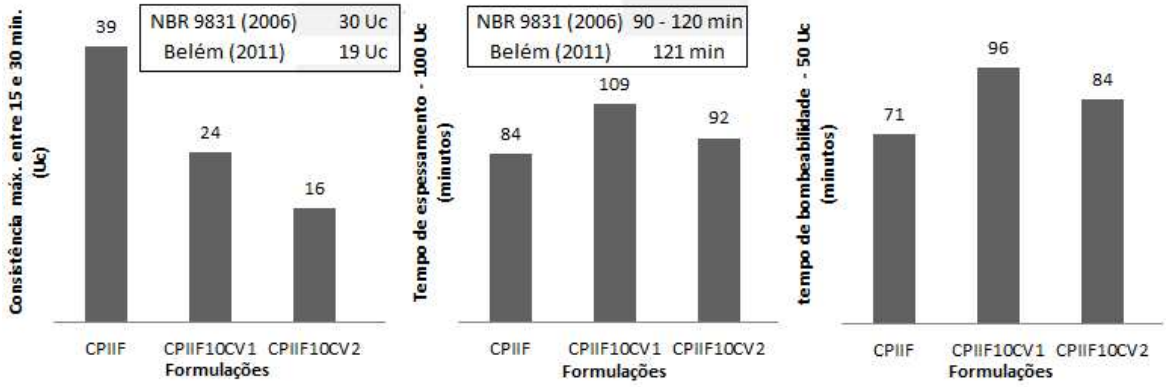


Fonte: Autores

Os resultados apontam que as pastas com substituição das adições minerais apresentaram maior teor de água livre, do que a pasta pura. Este fato pode ser explicado pelo tempo de realização do ensaio, duas horas, onde a redução do total de cimento pode incdicar uma menor taxa de reação dos grãos de cimento e a água, assim, liberando maior percentual de água. No entanto, todas as pastas formuladas apresentaram percentuais de água livre inferiores ou próximos aos observados na NBR 9831 (ABNT, 2006), com 5,90%, e Belém (2011).

A Figura 5 apresenta os resultados para consistometria para os parâmetros de consistência máxima entre 15 e 30 minutos, tempo de espessamento – 100 Uc e tempo de bombeabilidade - 50 Uc (parâmetro não normativo), importante parâmetro para a execução da cimentação. Onde Uc é a unidade de medida de consistometria.

Figura 5 - Consistometria das pastas formuladas



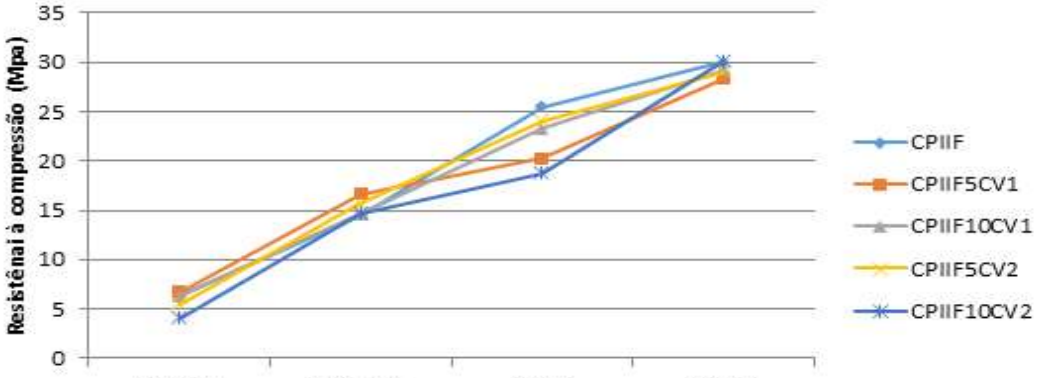
Fonte: Autores

Para a consistência entre 15 e 30 minutos, as pastas formuladas com as cinzas apresentaram menor valor de consistência, possivelmente devido à baixa taxa de hidratação e a forma esférica das cinzas. Ao avaliar para 100 Uc, a crescente taxa de hidratação associada ao percentual de cinzas na mistura aumenta a consistência das pastas.

Os resultados indicam bons parâmetros de aceitação das pastas formuladas, mesmo com valores discordantes com a NBR 9831 (ABNT, 2006) e Belém (2011). Isto se deve ao fato que a consistometria pode ser modificado com a aditivação química.

Na Figura 6 observa-se a evolução da resistência à compressão das pastas formuladas em relação às idades de 8 horas, 24 horas, 7 dias e 28 dias.

Figura 6 - Resistência à compressão das pastas formuladas



AMOSTRA	8 horas (Mpa)	24 horas (Mpa)	7 dias (Mpa)	28 dias (Mpa)
CPIIF	6,27	14,50	25,45	29,94
CPIIF5CV1	6,73	16,64	20,22	28,33
CPIIF10CV1	6,27	14,58	23,22	29,18
CPIIF5CV2	5,49	15,68	24,07	29,01
CPIIF10CV2	4,12	14,66	18,80	30,07

Fonte: Autores

Para a resistência à compressão, todas as pastas formuladas apresentaram valores superiores ao mínimo estabelecido pela NBR 9831 (ABNT, 2006) para 8 horas de cura (valor de referência: 2,1 MPa). Para as demais idades observa-se uma taxa de aumento da resistência para todas as pastas, conforme esperado, devido a hidratação dos cimentos.

Para a idade de 28 dias, vale salientar a proximidade dos valores encontrados. Estes resultados podem ter sido influenciados pelo elevado fator água/cimento (variável conforme percentual de substituição dos cimentos pelas cinzas), como também as formulações CPIIF5CV1, CPIIF10CV1, CPIIF5CV2 e CPIIF10CV2 apresentaram pouca uniformidade e perda não passível de mensuração das cinzas na mistura (Figura 7). Ambos os casos podem ter influenciado no desenvolvimento da resitência à compressão das pastas por reação pozolânica incompleta, com maior efeito para idades superiores aos 28 dias, e devido o efeito *filler* oriundo do *filler* calcário do cimento CPII F.

Figura 7 - Pastas recém-misturada





Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

As pastas formuladas com CPII F e substituição parcial do cimento por cinzas de carvão mineral apresentam evidência de aplicação em cimentação de poços de petróleo rasos (com densidade de 14,5 lb/gal). Resultado decorrente dos valores observados, próximos ou superiores aos requeridos para teor de água livre e resistência à compressão. Para a consistometria, mesmo com valores ligeiramente inferiores, não inviabiliza a aplicação, já que pode ser modificada por meio de aditivos químicos.

Vale destacar também o uso das cinzas de carvão mineral que ajudam a reduzir o montante depositado nos pátios da termoelétrica do Pecém e assim, diminuindo os possíveis impactos ambientais decorrentes do acúmulo destes resíduos industrial.

REFERÊNCIAS

API. **API SPEC 10A**: *Specification for cements and materials for well cementing* API SPEC 10A. Usa: Api, 2009.

API. **RP 10B:** *Recommended pratice for testing well cements.* Houston: Api, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 11578**: *Cimento Portland Composto.* Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9831:** *Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos - requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, 2006. 36 p.

BALTHAR, Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado**. *Caracterização físico-química e mecânica de pastas de cimento leves e fibrosas para poços de petróleo*.** Tese Dsc., COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Braisl, 2010.

BASSIONI, Ghada; ALI, Mohammed M. *Studying the physico-chemical properties of commercially available oil-well cement additives using calorimetry*. **Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry,** Amsterdã, v. 111, n. 1, p.295-303,2013.

BELÉM, Francisco Aldemir Teles. ***Desenvolvimento de pastas cimentantes utilizando cimento Portland composto para cimentação de poços de petrólíferos.*** Dissertação Msc., PPGCEP, Natal, RN, Brasil, 2011.

CHOOLAEI, M., RASHIDI, A.M., ARDJMAND, M., YADEGARI, A., SOLTANIAN, H. *The effect of nanosilica on the physical properties of oil well cement***. Materials Science and Engineering.** n.638, p. 288-294, 2012.

COOK, R.; LAKE, L. W.; MITCHELL, R.F. *Cementing. Petroleum handbook, drilling engineering. Volume* 2. Richardson, Texas. Estados Unidos da América, SPE, 2006.

HUI, Li *et al*. *Microestructure and performance of fly ash micro-beads in cementitious material system.* **Construction And Building Materials,** Amsterdã, v. 52, p.422-427, 2014.

LIU, Huajie *et al*. *The application of coated superabsorbent polymer in well cement forplugging the microcrack.***Construction And Building Materials,** Amsterdã, n. 104, p.72-84, 2016.

MIRANDA, C.R. *Pasta de cimento Portland para poços de petróleo – processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química***.** Tese Dsc., DCTIME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

NELSON, E. B. *Well cementing.* Houston: Dowell Schlumberger Educational Services, 1990.

SABEDOT, S.; SUDSTRON, M. G.; BOER, S. C.; SAMPAIO, C. H.: DIAS, R. G. O.; RAMOS,C.G. Caracterização e aproveitamento de cinzas de combustão de carvão mineral gerados em usinas termelétricas. **Anais do 3° Congresso Brasileiro de Carvão Mineral.** Gramado. 2011.